



UNIONE EUROPEA
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale



CTN01_00176_163601



TRIM

Tecnologia e Ricerca Industriale per la Mobilità Marina

Sistemi di air lubrication per la riduzione della resistenza viscosa delle carene navali

Sotto-Progetto	Efficienza	
Obiettivo Realizzativo	CFD su flussi bifase e forma semplice insufflata	
Descrizione attività	Ricerca bibliografica su sistemi air lubrication e macrobolle	
Tipo di documento	Rapporto Tecnico	
Codice del documento	SP.4-OR.1-D.2	
Data di emissione	15/11/2021	
Redazione	Massimo Miozzi	 ISTITUTO DI INGEGNERIA DEL MARE INSTITUTE OF MARINE ENGINEERING



FINCANTIERI



AZIMUT BENETTI
GROUP





Titolo documento **Sistemi di air lubrication per la riduzione della
resistenza viscosa delle carene navali**

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

Distribuzione Pubblico

Rev.	Data	Pagine	Redazione	Approvato da
0	15/11/2021	2+58	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 finanziato dal Ministero dell'Università e della Ricerca nell'ambito dell'iniziativa dei Cluster Tecnologici Nazionali.

Indice

Elenco delle figure	3
Elenco delle tabelle	4
Sommario	5
1 Introduzione	6
1.1 Il trasporto navale e la riduzione delle emissioni di gas serra	6
1.2 L'approccio tecnologico alla riduzione della resistenza di attrito	10
2 La resistenza al moto delle navi	13
2.1 Generalità	13
2.2 Le componenti della resistenza al moto	13
3 La lubrificazione delle carene con l'aria	16
3.1 Generalità	16
3.2 BDR – Bubble Drag Reduction	17
3.3 ALDR – Air Layer Drag Reduction	18
3.4 PCDR – Partial Cavity Drag Reduction	18
4 Studi e progetti con carene lubrificate con micro bolle	20
4.1 Progetti di ricerca	20
4.1.1 Prove sperimentali su lastre e modelli in scala	20
4.2 Prove sperimentali su navi al vero ed effetti scala	25
5 Tecnologie innovative per la riduzione della resistenza al moto indotte da micro bolle	29
5.1 Generalità	29
5.2 MALS - Mitsubishi Air Lubrication System	29
5.3 Foreship [®] Air Lubrication System (ALS)	32
5.4 WAIP – Winged Air Induction Pipe	35
5.5 Silverstream [®] Air Lubrication System	40
5.6 Samsung Heavy Industries <i>Saver Air</i>	43
5.7 Sviluppo dell'Air Layer al WTSRI, Shanghai	46
5.8 Stato attuale delle installazioni di sistemi Air Lubrication nel mondo	47
6 L'azione delle micro bolle sulla resistenza al moto	49
6.1 Generalità	49
6.2 Simulazioni sperimentali e numeriche	52
6.2.1 Sperimentazioni nel canale di flusso ad acqua	52
6.2.2 Sperimentazioni nel canale di flusso ad olio al silicone	53
6.3 Simulazione numerica del canale di flusso a micro bolle	54
6.3.1 Metodo ad accoppiamento di forza (<i>FCM</i>)	54
6.3.2 Metodo a tracciamento frontale (<i>FTM</i>)	55
Riferimenti bibliografici	56

Elenco delle figure

1	Emissioni di CO ₂ connesse al trasporto marittimo, comparate alle emissioni di CO ₂ globali [1].	6
2	Categorizzazione delle tecnologie innovative per l'efficiamento energetico delle navi [2].	7
3	La formula per il calcolo dell' <i>EEDI</i> con indicati i termini che influiscono sulla riduzione delle emissioni mediante l'adozione degli <i>ALS</i> (Air Lubricating Systems) [13].	8
4	Variazioni nella velocità <i>SOG</i> per le petroliere di dimensioni maggiori e per i porta-container confrontati con la media del trasporto navale internazionale, 2013–2015 [14].	9
5	Contributo alle emissioni di CO ₂ per classe di nave e per stato di bandiera, 2013–2015 [7].	10
6	Contributi alla resistenza totale per uno scafo generico [12].	10
7	Componenti di resistenza al moto per una carena tradizionale espresse in funzione del numero di Froude.	14
8	Vasca navale del <i>NMRI</i> di Tokyo.	21
9	Resistenza misurata del modello in funzione della velocità.	22
10	Potenza all'asse misurata a bordo della <i>Till Deymann</i> con e senza lubrificazione ad aria sia per condizioni di acqua di mare che acqua dolce.	22
11	Vista del modello della <i>Till Deymann</i> che mostra la tipica forma della prua e il recesso dell'elica prodiera. L'immagine a destra mostra l'apertura per l'iniezione dell'aria sulla parete di destra, prima dell'installazione del materiale poroso.	23
12	Apparato sperimentale presso l'Università indonesiana di Giacarta.	23
13	Piano delle linee d'acqua e posizione degli iniettori di micro bolle.	24
14	Coefficiente di resistenza totale con e senza micro bolle.	24
15	Relazione tra la riduzione della resistenza al moto e il numero di Froude.	25
16	<i>Pacific Seagull</i>	26
17	<i>Seiun-Mar</i> e posizione dei condotti di emissione d'aria.	28
18	Il ferry <i>Naminoue</i>	30
19	Rappresentazione del concetto <i>MALS</i> : le bolle d'aria coprono il fondo della nave, come un tappeto d'aria.	31
20	Nave per il trasporto di carbone <i>Soyo</i>	32
21	La nave <i>AIDAprima</i> equipaggiata con dispositivi <i>MALS</i>	32
22	Il sistema <i>Foreship</i> [24].	33
23	Il sistema di distribuzione <i>Foreship</i> [24].	33

24	Risultati CFD per il flusso di bolle del sistema Foreship [24].	34
25	Confronto tra risultati CFD e risultati delle verifiche <i>full-scale</i> per il sistema Foreship, incluse quelle effettuate da un ente di verifica terzo. [24].	34
26	Anthem of the Seas. [24].	35
27	Raffigurazione schematica del funzionamento del dispositivo WAIP.	37
28	Dispositivo WAIP (ghisa) ad ala sulla carena di una nave.	38
29	Installazione di 20 ulteriori dispositivi WAIP sul traghetto New Ferry Misaki.	38
30	Olivia Maersk, dotata di 124 dispositivi WAIP.	40
31	Diagramma del sistema Silverstream.	40
32	Emissione di bolle del sistema Silverstream.	41
33	La nave da crociera Norwegian Joy.	42
34	La nave da crociera Diamond Princess della Carnival Corporation.	42
35	Dettaglio del sistema di iniezione d'aria <i>SHI Saver Air</i>	43
36	Alimentazione del sistema di iniezione d'aria <i>SHI Saver Air</i>	44
37	Vista dal basso del sistema <i>SHI Saver Air</i> montato su una nave monoelica.	45
38	Il sistema di air lubrication installato sull'HCC della Samsung.	45
39	Occorrenza dei sistemi ALS per tipologia di nave [7].	47
40	Dimensioni caratteristiche (L, B e D) dei vascelli con installati sistemi ALS [7].	47
41	Vascelli con installati sistemi ALS consegnati di recente [7].	47
42	Vascelli sotto contratto per l'installazione di sistemi ALS [7].	48
43	Tunnel d'acqua circolante per gli esperimenti con le micro bolle.	51
44	Sensore che misura l'attrito superficiale.	51



Elenco delle tabelle

1	Variazione di potenza e di consumo medio di carburante relativi al traghetto New Ferry Misaki.	39
2	Dimensioni delle sezioni di test del canale.	53



Sommario

Questo rapporto descrive lo stato dell'arte sull'utilizzo di bolle per ottenere la riduzione della resistenza all'avanzamento della nave in qualunque condizione meteomarina. Questa riduzione riguarda, in particolare, la componente d'attrito della resistenza al moto della carena. Nel rapporto si seguiranno due linee parallele: i) un approccio descrittivo relativo all'applicazione su scala nave dei sistemi di riduzione della resistenza che utilizzano l'aria; ii) un approccio fisico basato sulla descrizione degli effetti ottenuti in scala di laboratorio prodotti dalla presenza di bolle di piccole dimensioni su uno strato limite turbolento, generalmente sviluppato a ridosso di una lastra piana.

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

1.1 Il trasporto navale e la riduzione delle emissioni di gas serra

La riduzione della resistenza è un fenomeno complesso di interesse generale in molteplici applicazioni ingegneristiche e industriali, che vanno dalle macchine idrauliche, alle operazioni nei pozzi petroliferi, dai sistemi di pompaggio nelle condutture di trasporto del petrolio al campo delle automobili, dei velivoli aerei, dei sottomarini, comprendendo anche l'oggetto di questo rapporto, ovvero le navi e il settore del trasporto marittimo.

Nel 2015, questo settore era responsabile del 2.5% delle emissioni globali di CO₂ derivate dall'uso di combustibile fossile nei processi industriali.

Il maggior contributo a questa cifra derivava dal trasporto internazionale che, se trattato come fosse una singola nazione, si piazzerebbe al sesto posto nella classifica dei maggiori responsabili per le emissioni di GHG, subito sopra la Germania [1]. È quindi ovvio l'interesse strategico nel controllo e nella razionalizzazione di un contributo di così ampia portata, affidato all'IMO dalle Nazioni Unite (UN).

L'*International Maritime Organization (IMO)* è l'agenzia specializzata delle Nazioni Unite che ha responsabilità per la sicurezza e la protezione della navigazione, nonché per la prevenzione dell'inquinamento marino e atmosferico prodotto dalle navi. Questa organizzazione nel 2011 ha adottato [3], nella sua azione di supporto alle UN per il raggiungimento dell'*Obiettivo 13* [4], una strategia di partenza per la riduzione delle emissioni di gas serra (*Green House Gases, GHG*) prodotte dal trasporto navale internazionale che dovrebbe portare alla loro completa eliminazione entro la fine di questo secolo. Più in dettaglio, nella specifica dei *livelli di ambizione* viene per la prima volta fissato l'obiettivo di una riduzione delle emissioni dei GHG prodotti dal trasporto navale di almeno il 50% entro il 2050 (confronto con il 2008) e, nello stesso tempo, viene promossa e perseguita, nel più lungo periodo, la loro completa eliminazione.

Questa strategia, allineata con gli obiettivi contenuti negli accordi di Parigi sul clima (*COP21*) del dicembre 2015, inquadra le visioni del futuro degli stati membri, fissando

	Third IMO GHG Study (million tonnes)						ICCT (million tonnes)		
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015
Global CO₂ Emissions²	31,959	32,133	31,822	33,661	34,726	34,968	35,672	36,084	36,062
International Shipping	881	916	858	773	853	805	801	813	812
Domestic Shipping	133	139	75	83	110	87	73	78	78
Fishing	86	80	44	58	58	51	36	39	42
Total Shipping	1,100	1,135	977	914	1,021	942	910	930	932
% of global	3.5%	3.5%	3.1%	2.7%	2.9%	2.6%	2.5%	2.6%	2.6%

Figura 1: Emissioni di CO₂ connesse al trasporto marittimo, comparate alle emissioni di CO₂ globali [1].

Innovative Energy Efficiency Technologies				
Reduction of Main Engine Power			Reduction of Auxiliary Power	
Category A	Category B-1	Category B-2	Category C-1	Category C-2
Cannot be separated from overall performance of the vessel	Can be treated separately from the overall performance of the vessel		Effective at all time	Depending on ambient environment
	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$	$f_{eff} = 1$	$f_{eff} < 1$
<ul style="list-style-type: none"> - low friction coating - bare optimization - rudder resistance - propeller design 	<ul style="list-style-type: none"> - hull air lubrication system (air cavity via air injection to reduce ship resistance) (can be switched off) 	<ul style="list-style-type: none"> - wind assistance (sails, Flettner-Rotors, kites) 	<ul style="list-style-type: none"> - waste heat recovery system (exhaust gas heat recovery and conversion to electric power) 	<ul style="list-style-type: none"> - photovoltaic cells

Figura 2: Categorizzazione delle tecnologie innovative per l'efficientamento energetico delle navi [2].

le ambizioni e le linee guida sulla riduzione delle emissioni dei *GHG* prodotti dal trasporto navale internazionale. L'inquadramento proposto identifica anche dei possibili interventi candidati ad essere intrapresi nel breve, medio e lungo periodo, una loro eventuale tempistica e il possibile impatto sugli stati membri che dovessero adottarli, ampliando e superando in questo modo le indicazioni contenute nella versione precedente dell'*Annesso VI MARPOL* del 2005. Le modifiche introdotte nel *Capitolo IV* stabiliscono infatti, oltre a restrizioni più stringenti sulle emissioni di diossidi di zolfo, di azoto e di particolato, una restrizione alle emissioni di *GHG* e in particolare di CO_2 nel comparto del trasporto navale internazionale [5].

Il punto focale dell'iniziativa dell'*IMO* riguarda l'introduzione dell'indice di efficienza delle navi (Energy Efficiency Design Index, *EEDI*) [6], il cui utilizzo viene prescritto per la qualificazione energetica di tutte le nuove navi di stazza superiore a 400 t (*GRT*, Gross Registered Tonnage, stazza lorda di registro).

L'indice *EEDI* viene definito come il rapporto tra la CO_2 [g] emessa e la stazza della nave [t] su una specifica distanza di navigazione [Mm] e rappresenta un bilancio tra l'utilità sociale del trasporto in essere e il danno prodotto con l'emissione della CO_2 . Il valore dell'indice *EEDI* è calcolato in accordo alla procedura contenuta in [2] e deve essere uguale o inferiore al valore richiesto per la tipologia e la stazza della nave in esame. La sua adozione ambisce indirettamente a limitare le emissioni di *GHG* e a incrementare l'efficienza delle navi.

L'insieme di queste politiche ha forzato e sta forzando gli armatori a ricercare soluzioni tecnologiche rivolte alla riduzione delle emissioni di CO_2 aumentando l'efficienza delle navi e riducendo, in apparente logica conseguenza, il consumo di combustibili fossili.

Come si vedrà in seguito, occorre rilevare che negli ultimi anni, in apparente contraddizione, il raggiungimento del primo obiettivo non ha significato soddisfare anche il

(A) The combination of P_p and V_{ref} as reflected in the power curve

(B) Emission reduction through the propulsion power reduction

(C) Emission reduction through the aux. power reduction by generating electricity for normal maximum sea load

$$EEDI = \frac{(\prod_{j=1}^n f_j) (\sum_{i=1}^{n_{ME}} P_{ME(i)} \cdot C_{FME(i)} \cdot SFC_{ME(i)}) + (P_{AE} \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE})}{f_j \cdot f_c \cdot ZP \cdot f_w \cdot V_{ref}} + \frac{((\prod_{j=1}^n f_j \cdot \sum_{i=1}^{n_{PTI}} P_{PTI(i)}) \cdot \sum_{i=1}^{n_{AEff}} f_{eff(i)} \cdot P_{AEff(i)}) \cdot C_{FAE} \cdot SFC_{AE}}{f_j \cdot f_c \cdot ZP \cdot f_w \cdot V_{ref}} - \frac{(\sum_{i=1}^{n_{AEff}} f_{eff(i)} \cdot P_{eff(i)} \cdot C_{FME} \cdot SFC_{ME})}{f_j \cdot f_c \cdot ZP \cdot f_w \cdot V_{ref}}$$

Figura 3: La formula per il calcolo dell'*EEDI* con indicati i termini che influiscono sulla riduzione delle emissioni mediante l'adozione degli *ALS* (Air Lubricating Systems) [13].

secondo, almeno in termini globali. Tra i vari metodi di riduzione della resistenza messi a disposizione dallo stato dell'arte della tecnologia, qui ci si soffermerà su quelli mirati alla riduzione della resistenza idrodinamica [2, 7, 8, 9] e, più in particolare, su quei metodi di riduzione della resistenza di attrito basati sull'inserzione di uno strato di bolle d'aria tra lo scafo e l'ambiente marino circostante. Questi metodi sono detti *Air Lubrication Systems, ALS* [10, 11, 12] e sono catalogati come appartenenti alla categoria *B1* nella classificazione *IMO* (Figura 2) [2].

Queste tecnologie hanno un impatto importante sull'indice *EEDI*, perchè sono in grado di ridurlo in modo significativo intervenendo sui fattori indicati in rosso in Figura 3 [13].

In tale direzione si stanno volgendo gli armatori, sempre più interessati negli ultimi anni a diminuire i costi operativi della nave, tra l'altro riducendo la resistenza all'avanzamento e la potenza richiesta a bordo, con conseguente beneficio sui consumi di combustibile.

È comunque da sottolineare che nonostante il quantitativo specifico (per unità di tratta) di emissioni di CO_2 per alcune specifiche classi di navi sia diminuito a causa della loro maggiore efficienza, nel periodo 2013 – 2015 le emissioni totali di CO_2 causate dal trasporto marittimo sono aumentate [14]. Infatti, il taglio ai consumi di combustibile e alle emissioni di *GHG* indotto dall'aumento dell'efficienza è stato abbondantemente superato dall'aumento del numero e della lunghezza delle tratte percorse, a causa dell'incremento della domanda mondiale di trasporto di beni e cose. Inoltre, nonostante la velocità media delle navi da trasporto sia rimasta pressochè inalterata dal 2013, le petroliere al di sopra delle 200 000 DWT (Deadweight, carico utile trasportabile) e i portacontainer sopra le 14 500 TEU (Twenty feet Equivalent Unit, volume

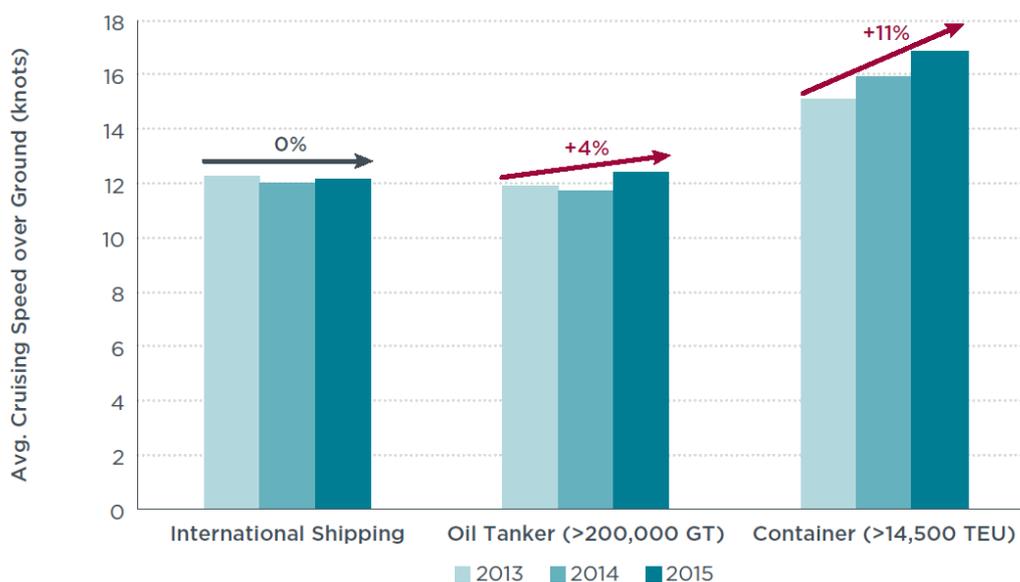


Figura 4: Variazioni nella velocità *SOG* per le petroliere di dimensioni maggiori e per i porta-container confrontati con la media del trasporto navale internazionale, 2013–2015 [14].

equivalente di un container) hanno invece accelerato, aumentando la loro *SOG* (Speed Over Ground) rispettivamente di circa il 4% e di più dell'11%, come illustrato in Figura 4 [14]. L'aumento di velocità consente loro di percorrere distanze maggiori in tempi minori ma, allo stesso tempo, provoca un aumento dei consumi di carburante e di emissioni di CO_2 . Quindi anche se queste classi di navi hanno visto ridurre le loro emissioni specifiche grazie alla adozione di tecnologie migliorative dell'efficienza, il loro contributo totale alle emissioni di *GHG* è aumentato.

La disconnessione tra i valori specifici delle emissioni di e le emissioni totali induce a ritenere che gli interventi di efficientamento energetico operati *business as usual* difficilmente riusciranno ad essere efficaci per una riduzione sostanziale delle emissioni di gas serra dal trasporto navale.

Nel chiudere questo breve inquadramento del contributo del trasporto navale nell'ambito delle emissioni di *GHG*, occorre ricordare come una azione mirata ed efficace non possa prescindere dal considerare che, dal punto di vista della tipologia di vascello, il 55% delle emissioni di *GHG* è attribuibile a tre classi di navi: porta-container, trasporto alla rinfusa e petroliere, mentre dal punto di vista dello stato di bandiera il 66% del totale delle emissioni può essere ricondotto a soli 6 paesi, a fronte dei 223 registrati: Panama, Cina, Liberia, Isole Marshal, Singapore e Malta, come illustrato in Figura 5 [14].

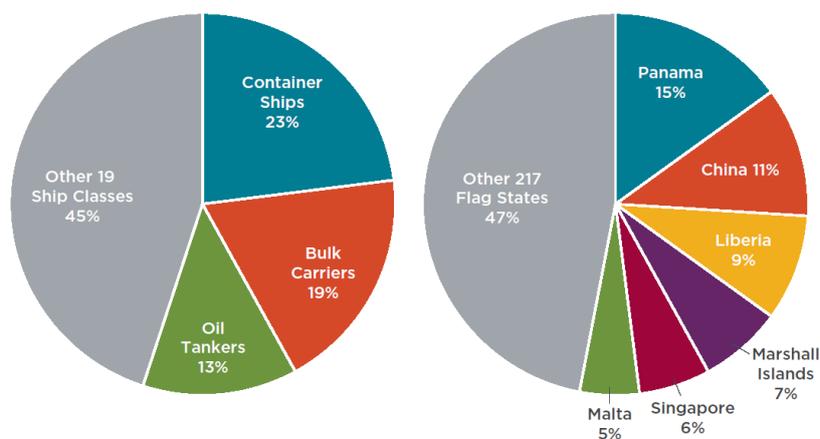


Figura 5: Contributo alle emissioni di CO₂ per classe di nave e per stato di bandiera, 2013–2015 [7].

1.2 L'approccio tecnologico alla riduzione della resistenza di attrito

È noto che i maggiori componenti della resistenza all'avanzamento di uno scafo generico consistono in una componente d'onda, una di pressione, e una componente d'attrito (Figura 6). Senza apportare ulteriori cambiamenti alle forme di carena e senza adottare la soluzione di una riduzione della velocità di servizio, solamente la resistenza d'attrito può essere ridotta. Essa rimane proporzionale alla superficie bagnata di carena e al quadrato della velocità della nave.

Le stime indicano che, se adeguatamente sviluppata, la lubrificazione con micro bolle d'aria porti a un risparmio netto di combustibile variabile tra il 5%, effettivamente indicato nei report dei test, condotti anche dagli enti controllori, effettuati sui dispositivi più recenti e il più ottimistico 20%, con una conseguente riduzione delle emissioni di NO_x, SO_x, particolato solido e CO₂.

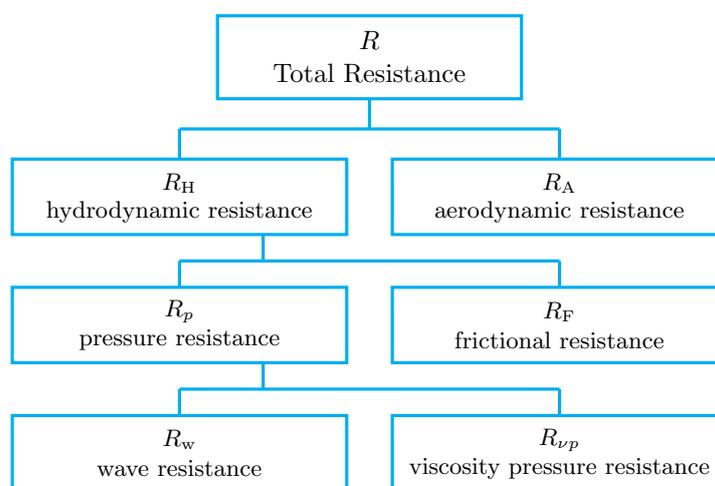


Figura 6: Contributi alla resistenza totale per uno scafo generico [12].

A margine della presente indagine, che si occupa della riduzione di resistenza ottenibile mediante l'utilizzo di bolle per la lubrificazione delle carene, si ricorda come in linea di principio lo stesso risultato sia ottenibile anche attraverso differenti tecnologie, quali l'utilizzo di opportune vernici con caratteristiche superidrofobiche, o con profili alari, oppure levigando la superficie di carena, o altrimenti mediante l'iniezione di polimeri, tutte misure che, oltre a richiedere un notevole sviluppo tecnologico, necessitano di notevoli spese operative per una loro applicazione sulle navi in esercizio.

In questo report vengono descritte in modo sistematico le tecnologie attualmente presenti sul mercato, identificate nelle cinque categorie descritte di seguito:

- **Mitsubishi Air Lubrication (*MALS*)**

Mitsubishi Air Lubrication System (*MALS*) ha rappresentato uno dei primi sistemi di air lubrication commerciali sviluppato dall'industria navale dalla Japanese Shipbuilder Mitsubishi Heavy Industries (*MHI*), sulla base di ricerche sviluppate a partire dagli anni '80 in Giappone. Il *MALS* è un sistema di air lubrication che utilizza le bolle per la riduzione della resistenza (*BDR*, Bubble Drag Reduction). *MHI* ha anche sviluppato le turbo soffianti utilizzate nelle installazioni del *MALS*, denominate Mitsubishi Turbo-blower per l'air lubrication.

- **R&D Engineering - Winged Air Induction Pipe System (*WAIP*)**

Il Winged Air Induction Pipe (*WAIP*) è costituito da una serie di piccole camere areate accoppiate con un profilo alare per la generazione di micro bolle, sviluppato in Giappone da Kumagai et al. [15]. La ricerca è stata condotta in ambienti accademici a partire dal 1998. Il sistema *WAIP* ha superato un discreto numero di test ed è commercializzato dalla *R&D Engineering Inc.*

- **Samsung Heavy Industries *SAVER* System (*SAVER Air*)**

Samsung Heavy Industries (*SHI*) ha sviluppato un sistema di air lubrication denominato *SAVER*. Questo sistema utilizza una serie di distributori d'aria installati sul fondo della carena per spruzzare bolle d'aria che formano un tappeto d'aria fondo della carena stessa, per ridurre la resistenza d'attrito.

- ***Silverstream* System**

L'origine del sistema *Silverstream* ha luogo nel gruppo *DK*, a quel tempo impegnato nel campo delle tecnologie per la riduzione della resistenza mediante grandi camere aerate. La compagnia si trasforma nella *Silverstream Technologies* nel 1994 per promuovere la commercializzazione dei suoi brevetti nell'ambito dell'air lubrication con piccole camere aerate. Questo sistema si serve di distributori brevettati per il rilascio d'aria al fine di creare uno strato di micro bolle capace di ridurre la resistenza d'attrito.

- **Foreship Air Lubrication System (*Foreship ALS*)**

Foreship è una compagnia finlandese di progettazione ed ingegnerizzazione operante nel campo navale fondata nel 2002, che ha sviluppato un sistema di air lubrication con dei distributori d'aria aggiunti sul fondo della nave. Questi distributori sono ottimizzati idrodinamicamente con l'accortezza di non incrementare la skin friction quando il sistema non è in funzione.



Vengono poi descritti i dati riportati nelle conferenze e nei progetti a livello europeo, tra cui le conferenze del consorzio *SMOOTH* (Sustainable Methods for Optimal design and Operation of ships with air lubricated Hulls), che funge da guida per gli istituti di ricerca europei e per i partner industriali di sette differenti paesi europei, e diversi progetti di ricerca, quali quelli del *MARIN* (MARitime Research Institute of the Netherlands), afferenti in particolare al consorzio olandese *PELS* (Project Energy-saving air-Lubricated Ships), così come sono stati presentati al 20th International Hiswa Symposium on Yacht Design and Yacht Construction (2008).

Il rapporto si chiude infine con una sezione dedicata all'azione delle microbolle al fini della riduzione della resistenza, che include anche simulazioni sperimentali e numeriche condotte dall'Università di Trieste a questo scopo prima del 2012.

2 La resistenza al moto delle navi

2.1 Generalità

Lo studio della resistenza al moto di un corpo solido, che sia una nave o un qualunque altro corpo solido, in un fluido viscoso è un complesso fenomeno idrodinamico che, nel caso di una nave in mare, è aggravato dalla presenza della superficie libera del fluido costituente un'ulteriore superficie di separazione. Stato del mare, condizioni ambientali, movimenti di rollio, beccheggio e sussulto, interazione elica-carena, azione degli organi di governo della nave e conseguente propulsione della stessa rappresentano complicazioni ulteriori per lo studio del fenomeno.

Per affrontare un problema così complesso è necessario procedere per passi successivi di complessità, adottando alcune semplificazioni, per poi introdurre una serie di coefficienti correttivi desunti dall'esperienza e che considerano diversi aspetti non ponderabili, quali la resistenza dell'aria e delle appendici di carena.

Le comuni assunzioni fondamentali fanno riferimento sia alla carena sia all'ambiente:

- Forme di carena simmetriche rispetto al piano diametrale longitudinale.
- Carena pulita.
- Moto rettilineo e uniforme.
- Mare calmo e di estensione illimitata.
- Assenza di resistenza dovuta all'aria.

D'altra parte, la conoscenza preliminare della resistenza all'avanzamento di una nave è fondamentale per il progettista che deve soddisfare molteplici esigenze quali velocità, potenza installata, consumi, autonomia.

Quando una nave naviga in acqua calma, è soggetta ad una forza che agisce in direzione opposta alla direzione del moto. Questa forza è la resistenza opposta dall'acqua al moto della nave, che viene definita resistenza totale R_T , ed è la forza di resistenza che è utilizzata per calcolare la potenza effettiva richiesta per la nave. La resistenza di una nave in acqua calma è funzione di molti fattori, tra cui la sua velocità, le forme di carena (lunghezza, larghezza, immersione, superficie bagnata di carena, ecc.) e la temperatura dell'acqua.

2.2 Le componenti della resistenza al moto

La resistenza totale al moto di una nave R_T è la forza di rimorchio necessaria per mantenerla in moto rettilineo ed uniforme (Figura 6). Sono molte le componenti che si combinano a formare la resistenza totale all'avanzamento che agisce su una carena: gli effetti viscosi dell'acqua sulla carena, l'energia richiesta per creare e mantenere le onde di prora e di poppa, e la resistenza che l'aria oppone al moto di avanzamento della

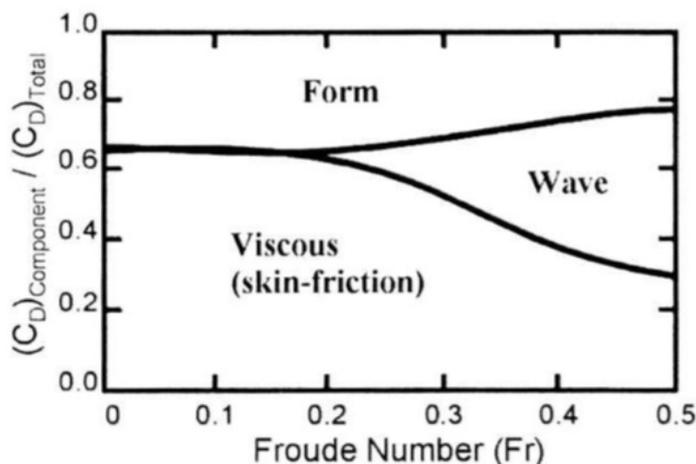


Figura 7: Componenti di resistenza al moto per una carena tradizionale espresse in funzione del numero di Froude.

nave (che qui verrà trascurata). In particolare, la resistenza totale all'avanzamento che agisce su una nave può essere suddivisa in una componente di attrito (friction), una resistenza di forma e una resistenza di generazione d'onda, dove la resistenza d'attrito costituisce il 60 – 70% della resistenza totale (Figura 7).

Seguendo le ipotesi di W. Froude e la legge di similitudine, la resistenza della nave o del suo modello può essere separata in due componenti indipendenti; una, la componente viscosa, è proporzionale alla resistenza (d'attrito) di una lastra piana della stessa lunghezza e superficie bagnata quando rimorchiata alla stessa velocità, e l'altra componente della resistenza segue la legge di similitudine di Froude. Il coefficiente di resistenza totale può essere definito come:

$$C_T = C_W + (1 + k)C_F \quad (1)$$

dove il C_T è il coefficiente di resistenza totale, C_W il coefficiente di resistenza d'onda, C_F il coefficiente di resistenza d'attrito, e $(1 + k)$ il fattore di forma.

Il fattore di forma $(1 + k)$ è determinato sperimentalmente a velocità molto basse o a bassi numeri di Froude ($Fr < 0.2$), dove il C_W deve diventare trascurabile. L'*ITTC 2002* e Bertram [16] raccomandano di applicare il metodo di *Prohaska*, descritto come:

$$C_T = (1 + k)C_F + aFr^n \quad (2)$$

A basse velocità, $Fr < 0.2$, il C_T è assunto essere funzione di Fr^4 , il tracciamento della linea dritta del C_T/C_F in funzione di Fr^4/C_F intersecherà l'asse delle ordinate ($Fr = 0$) al punto $(1 + k)$, permettendo così al fattore di forma di essere determinato. Il coefficiente d'attrito della lastra piana (C_F) è stimato con ragionevole precisione utilizzando la linea d'attrito ITTC '57.

Dai risultati sperimentali delle prove in vasca navale, per il modello, il coefficiente di resistenza totale è stato calcolato come:

$$C_T = \frac{R_T}{\frac{1}{2}\rho S V^2} \quad (3)$$

dove ρ è la densità dell'acqua ed S è la superficie bagnata della carena della nave. Il numero di Froude e il numero di Reynolds sono definiti come:

$$Fr = \frac{V}{\sqrt{gL}} \quad (4)$$

$$Re = \frac{VL}{\nu} \quad (5)$$

dove V è la velocità della nave, L la lunghezza della nave, g l'accelerazione di gravità, e ν la viscosità cinematica dell'acqua. Le caratteristiche delle micro bolle possono essere determinate dalle seguenti formule. Lo spessore dello strato d'aria è:

$$t_a = \frac{Q_a}{B_a V} \quad (6)$$

dove Q_a è la velocità dell'aria iniettata, B_a la larghezza del foro d'iniezione, e V è la velocità del modello di nave. La riduzione della resistenza al moto è data da:

$$DR(\%) = \left| \frac{C_T - C_{T0}}{C_{T0}} \right| \times 100 \quad (7)$$

dove C_{T0} è il coefficiente di resistenza totale senza iniezione di micro bolle e C_T è il coefficiente di resistenza totale con micro bolle.

3 La lubrificazione delle carene con l'aria

3.1 Generalità

Tutte le forze che compongono la resistenza totale misurabili durante l'avanzamento di un qualsiasi corpo in un fluido sono dovute agli sforzi tangenziali che si generano nello strato limite, che è la zona interessata dalla perturbazione dovuta al contatto tra il fluido e il corpo stesso. Nel nostro caso specifico i soggetti (corpo e fluido) in esame sono la carena di una qualsiasi imbarcazione e l'acqua di mare. L'idea che sta alla base di qualsiasi studio rivolto alla riduzione di tali forze di resistenza è quella di interrompere o ridurre, in qualche modo, la trasmissione di questi sforzi tangenziali.

Nel caso in esame, la tecnica di riduzione della resistenza all'avanzamento di un'imbarcazione qualunque prevede l'iniezione di micro bolle nello strato limite come soluzione per la riduzione della resistenza d'attrito, che rappresenta la maggior componente della resistenza.

Le bolle, data la loro natura gassosa, non consentono la trasmissione degli sforzi tangenziali. È stato valutato che, per una lastra piana provvista di un sistema d'iniezione d'aria attraverso fori di $0.5 \mu\text{m}$, la riduzione che si può ottenere arriva a circa l'80% della resistenza d'attrito totale.

Non esiste, però, una teoria consolidata che spieghi in modo esauriente questo fenomeno a livello microscopico. Di sicuro una possibile spiegazione, a livello macroscopico, è legata al rapporto esistente tra la densità dell'aria e quella dell'acqua, dove quella in acqua è, ovviamente, più grande, di più di 500 volte, rispetto alla densità in aria. Risultando la resistenza d'attrito legata alla densità del fluido a contatto con l'elemento in movimento, ovvero con la carena, si comprende il perché un piano di bolle molto dense sulla parte solida del corpo riduca la resistenza da questo sperimentata. Questa parete, infatti, non permette il trasferimento degli sforzi tangenziali.

Premesso questo, dato che il 60% della potenza propulsiva tipica di una nave commerciale serve per vincere la resistenza d'attrito, qualunque tecnica che possa significativamente ridurre la resistenza d'attrito della nave può avere un sostanzioso impatto sia economicamente che a livello ambientale.

I metodi proposti per la riduzione della resistenza d'attrito (*FDR* – frictional drag reduction) sono basati sulla riduzione della densità o della viscosità del fluido vicino la superficie di carena (lubrificazione ad aria), sull'alterazione del trasporto dello sforzo tangenziale nello strato limite turbolento, oppure sulla violazione della condizione di non-scorrimento nel caso dei rivestimenti super idrofobici. Sono stati proposti, poi, altri metodi per ridurre la componente d'attrito della resistenza. Questi includono l'iniezione di polimeri, metodi elettromagnetici, e soprattutto varie tecniche di lubrificazione con l'aria. Considereremo, in particolare, solamente la lubrificazione con l'aria.

Un semplice test per illustrare come funziona la lubrificazione con l'aria è far correre una lastra sottile, ma robusta, prima attraverso l'aria, e poi attraverso l'acqua. La resistenza è dovuta principalmente alla resistenza d'attrito, ed è possibile constatare

immediatamente che la resistenza in aria è di gran lunga minore della resistenza in acqua. Questo perché la viscosità dinamica, ovvero la naturale resistenza al fluire dei corpi, e la densità dell'aria sono di molto inferiori rispetto all'acqua. Infatti, alla stessa velocità, la resistenza d'attrito di una lastra piana è più di 500 volte maggiore in acqua che non in aria. Un'efficace applicazione della lubrificazione con l'aria, sia per navi esistenti che per navi nuove, porterebbe a un risparmio di combustibile, stimato in misura del 5–20%, e a più ridotte emissioni allo scarico. All'interno del campo della lubrificazione con l'aria, c'è una gran varietà di tecniche, suggerite a partire dal lavoro di Latorre (1997) [17]. Queste possono essere ricondotte a tre categorie principali:

- *BDR* – Bubble Drag Reduction, mediante l'iniezione di bolle;
- *ALDR* – Air Layer Drag Reduction, mediante la generazione di uno strato d'aria;
- *PCDR* – Partial Cavity Drag Reduction, tipica delle Air Cavity Ships.

In questo rapporto viene considerata solo la prima delle tecniche di lubrificazione ad aria, ovvero alla lubrificazione delle carene per mezzo di bolle, in quanto rappresenta uno dei metodi più utilizzati per la riduzione della resistenza all'avanzamento delle navi, e non inquinanti.

3.2 BDR – Bubble Drag Reduction

Nell'ambito della riduzione della resistenza all'avanzamento della nave mediante il metodo dell'insufflazione di bolle al di sotto della carena, piccole bolle vengono iniettate all'interno dello strato limite. Le bolle disperse riducono la densità apparente e modificano il trasporto del momento turbolento.

La tecnica fa spesso riferimento alla micro bubble drag reduction, ovvero alla riduzione della resistenza per effetto delle micro bolle, nel caso in cui le micro bolle siano molto piccole in confronto allo spessore dello strato limite. Questa tecnica è oggetto di molti studi, nonché di ampi dibattiti: opinioni discordanti riguardano l'eventualità per cui la riduzione della resistenza derivi principalmente dalla modifica della viscosità effettiva, oppure dalla diversa densità, dalla diversa turbolenza, oppure dalla alterazione del trasporto della quantità di moto. Tuttavia, molti degli studi sono stati condotti in scala in laboratorio e le domande riguardanti l'adeguatezza di prove in scala rimangono; così come non è del tutto chiaro quanta iniezione di gas sia necessaria, qual è la massima riduzione della resistenza d'attrito che ci si può aspettare, quanto sono importanti le dimensioni delle bolle, quali sono le prestazioni che si ottengono in acqua di mare e, infine, qual è il miglior metodo di iniezione delle bolle.

In ogni caso, i meccanismi secondo cui è garantita una riduzione della resistenza d'attrito possono essere semplicemente ricondotti a una riduzione della densità, a una modifica della turbolenza, oppure, probabilisticamente, a una fusione e conseguente separazione delle bolle.

Sono stati condotti diversi test a livello sperimentale, dapprima in Giappone, successivamente negli Stati Uniti: Moriguchi e Kato [18] usarono delle bolle di diametro

compreso tra 0.5 e 2.5 mm, e misurarono fino a un 40% di riduzione della resistenza, ma per contenuti d'aria al di sopra del 10%. Shen et al. [19], utilizzando bolle più piccole di diametro tra 0.03 e 0.5 mm, trovarono un 20% di riduzione della resistenza, nel caso di un contenuto d'aria del 20%. Non furono trovate, comunque, apprezzabili influenze relative alle dimensioni delle bolle. In seguito, Sanders et al. [20] eseguirono esperimenti con una lastra piana molto larga, con lunghezza superiore ai 10 m, con velocità fino ai 20 m/s. Il loro esperimento teneva conto di numeri di Reynolds che non sono finora ottenibili su modelli in scala, con bolle di diametro tra 0.1 e 1.0 mm. I test mostrarono che le bolle venivano spinte al di fuori dello strato limite, ad alcuni metri dagli iniettori d'aria in direzione opposta a quella d'avanzamento della lastra, anche nel caso in cui le bolle venissero iniettate sul lato più basso della lastra. In pratica, si era formato un livello di liquido libero vicino alla superficie bagnata della lastra, con una conseguente scomparsa dell'effetto della lubrificazione con l'aria. L'ipotesi più plausibile suppone che la portanza che agisce su una bolla nello strato limite sia di gran lunga più che sufficiente per sopraffare la galleggiabilità della bolla, spingendola lontano dalla parete anche quando questa sia in alto.

3.3 ALDR – Air Layer Drag Reduction

Nell'ambito della riduzione della resistenza mediante l'iniezione di uno strato d'aria, si sfrutta il fatto che il gas crei uno strato lubrificante apparentemente continuo tra la carena e il liquido. L'aria viene iniettata al di sotto della carena di una nave, forma un sottile strato sulla parte piana (orizzontale) della carena e riduce la resistenza d'attrito. Il concetto di strato d'aria può esser visto come una combinazione delle tecniche a micro bolle e quelle a cavità aerate (*ACS – Air Cavity Ships*): un flusso d'aria è iniettato nella regione del fondo di una nave, e si forma una sottile pellicola d'aria. Questo strato d'aria è soggetto ad una serie di fenomeni, come turbolenza e instabilità naturali che hanno luogo su ogni interfaccia fluido-liquido.

L'*ALDR* è una tecnica di lubrificazione con l'aria adottata già da diverse compagnie marittime, a seguito di stime di una riduzione della resistenza del 5% e di una riduzione del consumo di combustibile del 15%, come emerso da risultati di prove al vero in mare effettuate su una nave da carico da 110 m, per conto del cantiere olandese *Damen Shipyards Group*, che ha stimato, per l'installazione di un simile dispositivo, una lievitazione del costo di costruzione di circa il 2–3%.

3.4 PCDR – Partial Cavity Drag Reduction

Nella metodologia di riduzione della resistenza per effetto di una parziale cavità, il gas o l'aria creano uno strato lubrificante tra la carena e il liquido. La riduzione della resistenza è ottenuta riempiendo un recesso, molto più sottile dello strato limite nave-carena, con gas. Per applicare questa tecnica sulla carena di una nave, il fondo della carena deve avere diversi recessi, che devono essere riempiti con gas, solitamente aria. Queste cavità possono essere realizzate solamente su una superficie orizzontale piana. Su tutta la lunghezza della cavità d'aria, non è presente alcuna superficie bagnata; si



ha così una locale, ma effettiva, riduzione della resistenza d'attrito. Sono stati condotti diversi test di modelli in scala, presso vasche navali *SSPA* (Svezia) e presso il *MARIN*, che ha anche calcolato la resistenza d'onda nel caso di una chiatta che presentava molte cavità, con l'ausilio di *RAPID*, un codice a flusso potenziale non lineare. Un evidente svantaggio di questa tecnica è che l'aria può fuoriuscire dalle cavità quando la nave si trova a rollare e a beccheggiare in mare e, di conseguenza, la sua stabilità è compromessa dalla creazione di superfici libere aggiuntive. Questo significa che tale tecnica può essere idealmente adatta per navi fluviali, un settore per il quale saranno imposti, in un futuro molto prossimo, dei regolamenti che mirano a ridurre le emissioni di gas di scarico e di diossido di carbonio.

4 Studi e progetti con carene lubrificate con micro bolle

4.1 Progetti di ricerca

La riduzione della resistenza all'avanzamento della nave, mediante la tecnica della lubrificazione con l'aria, in particolare per effetto delle micro bolle, è oggetto di ricerca molto attiva ed attuale, e al centro di studi condotti da diversi istituti di ricerca, tra cui il *MARIN* (Maritime Research Institute Netherlands), e oggetto di conferenze internazionali, quali il progetto *SMOOTH* (Sustainable Methods for Optimal design and Operation of ships with air lubricated Hulls), finanziato con fondi dell'Unione Europea.

Il progetto *SMOOTH* si articola su una serie di conferenze internazionali, che si svolgono ogni anno, centrate sulla riduzione della resistenza al moto delle navi, sui vari sistemi in grado di realizzare questi progetti e sulla loro efficacia. Di gran rilievo è stata la "International Conference on Ship Drag Reduction" tenutasi a Istanbul, in Turchia, nel maggio 2010, fondata su alcuni risultati di misurazioni di navi soggette a una lubrificazione con aria per effetto di micro bolle. Gli esperimenti furono eseguiti dal *MARIN* per conto del progetto europeo *SMOOTH*. Questo progetto si focalizza sulla tecnica della lubrificazione con l'aria e i suoi effetti sulla resistenza al moto, la propulsione, la manovrabilità e la tenuta delle navi al mare. In particolare, sono state condotte due serie di esperimenti; la prima serie si concentrava su una nave, battezzata *Till Deymann*, che naviga in acque interne, testata sia in scala come modello, sia al vero, con e senza lubrificazione con aria per mezzo di micro bolle. Invece, la seconda serie di test consisteva in prove di tenuta al mare, con e senza lubrificazione con le micro bolle. Mentre i risultati delle prove su modello mostrarono un piccolissimo aumento in termini di resistenza al moto e in termini di propulsione, le prove al vero, con lubrificazione con le micro bolle, dimostrarono una riduzione della potenza propulsiva richiesta, nonché una piccola diminuzione della resistenza al moto.

4.1.1 Prove sperimentali su lastre e modelli in scala

Allo scopo di approfondire i meccanismi di riduzione di resistenza legati all'uso delle bolle, sono stati realizzati diversi test di laboratorio, utilizzando sia delle lastre piane di grandi dimensioni, sia modelli di navi abbastanza dettagliati e di notevoli dimensioni.

Per quanto riguarda la riduzione della resistenza con micro bolle, prove sperimentali con lastre piane mostrarono una straordinaria riduzione della resistenza fino all'80%. Questa riduzione della resistenza si pensa sia originata da una favorevole interazione con lo strato limite turbolento e non come conseguenza di una riduzione della viscosità; infatti, la viscosità aumenta a causa dell'iniezione delle micro bolle. Il meccanismo secondo cui si ha una riduzione della resistenza, tuttavia, non è ancora molto chiaro. Può trattarsi semplicemente di una riduzione della densità del fluido, modificando la turbolenza o, probabilmente, come conseguenza della fusione e separazione delle bolle.

Per comprendere maggiormente il meccanismo di riduzione della resistenza al moto generato per effetto delle micro bolle, sono state condotte, inizialmente, numerose prove

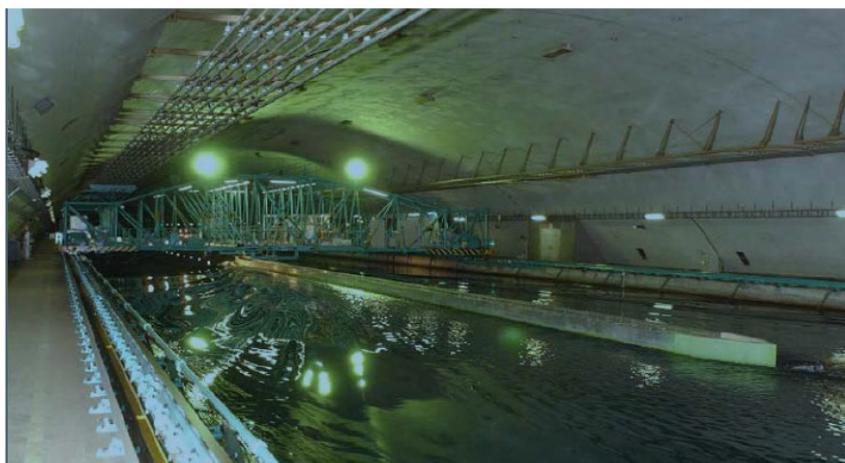


Figura 8: Vasca navale del *NMRI* di Tokyo.

di rimorchio di lastre piane in vasca, dato che la resistenza d'attrito della carena di una nave, come teorizzato da W. Froude, viene assimilata a quella di una lastra piana di lunghezza uguale alla lunghezza della carena e con area della superficie bagnata uguale alla corrispondente area della carena.

Inoltre, per progettare dispositivi emettitori di micro bolle per navi al vero è necessario, innanzitutto, conoscere quanta riduzione della resistenza è possibile ottenere per una data quantità d'aria iniettata al vero. Dato che l'effetto di riduzione dell'attrito superficiale persiste per una lunga distanza dal punto d'iniezione, al di sotto della carena, uno dei modi più semplici per ottenere quest'informazione è quello di condurre esperimenti su una scala che sia comparabile a quella al vero.

Watanabe e Shirose [21] rimorchiarono una lastra piana di 40 m di lunghezza, provvista di un sistema d'iniezione di micro bolle d'aria al di sotto della sua superficie bagnata, e misurarono riduzioni dell'attrito superficiale locale e riduzioni della resistenza totale. Nel presente progetto di ricerca, furono condotti simili esperimenti utilizzando una lastra piana ancor più estesa, di lunghezza pari a 50 m [22]. La lastra era rimorchiata in una vasca navale lunga 400 m, del *National Maritime Research Institute* di Tokyo (Figura 8). Le bolle venivano prodotte facendo fluire l'aria attraverso un piatto poroso. L'attrito superficiale è stato misurato con e senza iniezione di bolle, da un sensore di attrito superficiale posto in tre diverse posizioni nella direzione dello scorrimento della lastra. Gli esperimenti furono condotti per diverse velocità (5, 7, 10)m/s, e si registrò un effetto massimo di riduzione della resistenza pari al 40%. Tali esperimenti mostrarono che l'effetto di riduzione dell'attrito superficiale delle micro bolle persiste per l'intera lunghezza della lastra; questo ha suggerito che le micro bolle sono maggiormente appropriate per le navi più grandi.

Anche se i dati ottenuti nelle varie prove sperimentali utilizzando lastre piane di varia estensione sono utili, queste hanno dei limiti. Per prima cosa, la larghezza delle lastre piane, pari a 0.6 m o 1.0 m, è molto piccola rispetto alla loro lunghezza, diversamente

dalle navi al vero. In secondo luogo, la superficie bagnata di una nave esistente non è sempre piana, e l'effetto di curvatura della superficie su cui agiscono le bolle deve essere tenuto in considerazione. Inoltre, le bolle in acqua di mare sono più piccole rispetto alle bolle in acqua dolce, come quella delle vasche di sperimentazione. Queste circostanze rendono valide le prove effettuate al vero.

Gli esperimenti sono poi proseguiti con le prove in vasca su modelli di navi in scala, inizialmente provvisti di un sistema di lubrificazione per effetto di micro bolle, poi provati senza. Emblematico è il caso della nave *Till Deymann*: si tratta di una nave navigante in acque interne da 109.8 m di lunghezza, su cui è stato installato un sistema di lubrificazione ad aria, con micro bolle. Il modello, costruito in scala 1 : 10, è stato dotato, come la nave al vero, di una carena a doppia prua e quattro spintori azimutali, due a poppa e due a prua, uno per ogni prua. Il modello fu testato in un campo di velocità compreso tra i 5 e i 10 nodi; il risultato che si ottenne fu una diminuzione della potenza richiesta all'asse di circa il 4%. Successivamente, venne eseguito un altro test

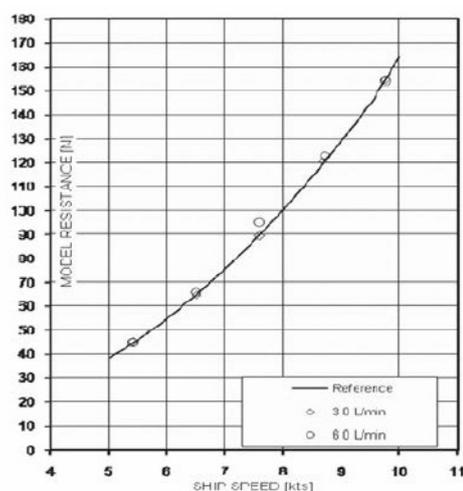


Figura 9: Resistenza misurata del modello in funzione della velocità.

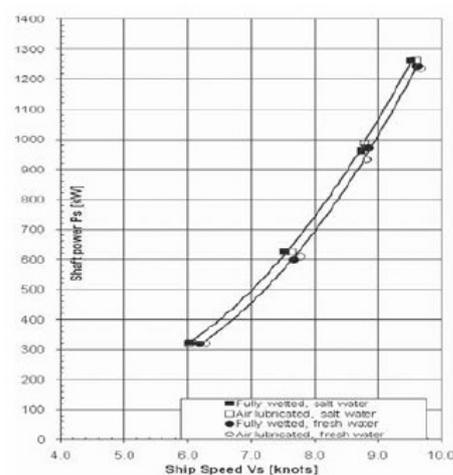


Figura 10: Potenza all'asse misurata a bordo della *Till Deymann* con e senza lubrificazione ad aria sia per condizioni di acqua di mare che acqua dolce.

in vasca, su un modello di catamarano *SES* (Surface Effect Ship), in scala 1 : 12, su cui era stato installato un sistema di riduzione della resistenza all'avanzamento a micro bolle. I test furono condotti nella vasca navale della *NASA*, a Langley, ed evidenziarono una riduzione della resistenza totale del 6–11% dovuta oltre che agli insufflatori di micro bolle, a degli strati di vernice particolare. All'Università indonesiana di Giacarta venne poi provato un modello in scala di una nave guardacoste (*FPB* – Fast Patrol Boat), su cui sono stati installati insufflatori di micro bolle (Figura 12). Il modello di nave era trainato da un motore elettrico, la cui velocità poteva essere misurata e regolata. La resistenza del modello di nave era misurata con precisione da un trasduttore di carico. In particolare si è riscontrata una diminuzione della resistenza che può raggiungere



Figura 11: Vista del modello della Till Deymann che mostra la tipica forma della prua e il recesso dell'elica prodiera. L'immagine a destra mostra l'apertura per l'iniezione dell'aria sulla parete di destra, prima dell'installazione del materiale poroso.

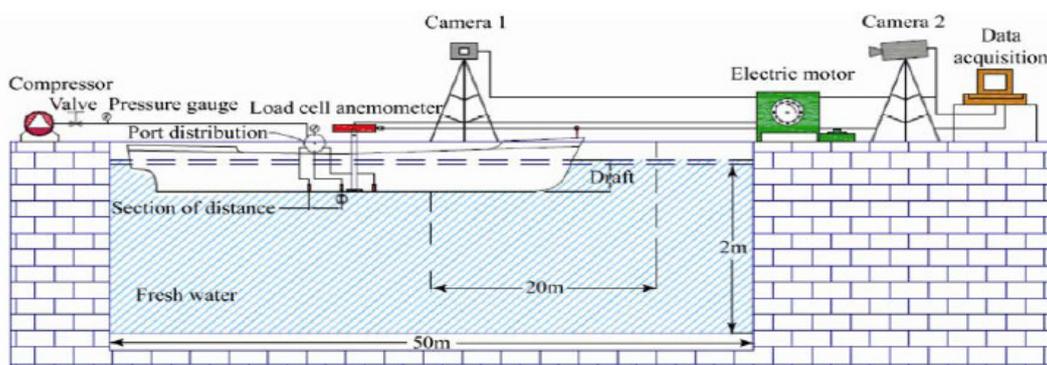


Figura 12: Apparato sperimentale presso l'Università indonesiana di Giacarta.

valori compresi tra il 7–10%, confrontando i risultati della resistenza della nave con e, poi, senza iniezione di micro bolle. Interessante è che da questo test è emerso, anche, che la miglior posizione degli emettitori delle micro bolle, che consente di ottenere la più efficace riduzione della resistenza, si trova a poppavia della mezzera nave (Figura 13): Il risultato di questa prova in vasca si può sintetizzare con l'ausilio del seguente grafico, che mostra la relazione tra il coefficiente di resistenza totale e il numero di Froude per la nave con e senza iniezione di micro bolle: viene fatto un confronto con micro bolle e senza micro bolle applicato al modello di nave per valutare le caratteristiche di resistenza. Il suddetto grafico illustra la relazione tra il coefficiente di resistenza totale al moto della nave e il numero di Froude per navi con micro bolle e senza micro bolle. Il modello provvisto dell'iniezione di micro bolle sarà modificato per tre variazioni del posizionamento del punto d'iniezione. Risulta che il modello di nave con iniezione di micro bolle ha un valore del C_T che è relativamente più alto a basse velocità. Quando il numero di Froude aumenta, $Fr > 0.46$, il coefficiente di resistenza totale, per il modello di nave con micro bolle, diminuisce visibilmente rispetto al modello di nave senza micro bolle. D'altro canto, è stato trovato che il valore del coefficiente di resistenza totale dipende dalla posizione dell'iniettore delle micro bolle. Risulta che il modello di nave con iniezione di micro bolle alla posizione 3 ha il più piccolo valore del C_T . Questo

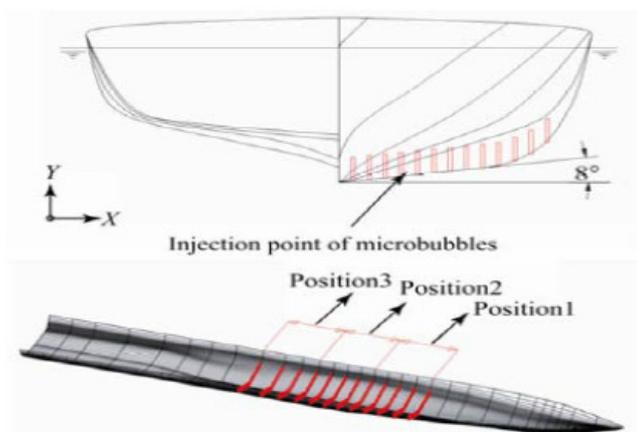


Figura 13: Piano delle linee d'acqua e posizione degli iniettori di micro bolle.

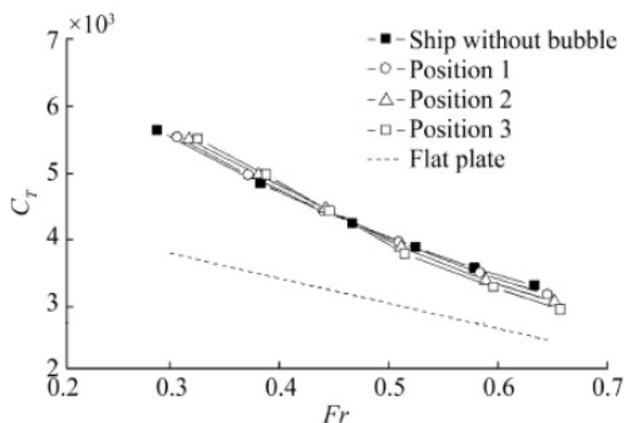


Figura 14: Coefficiente di resistenza totale con e senza micro bolle.

risultato concorda molto bene, per di più, col lavoro sperimentale di Kodama et al. [23] in un tunnel d'acqua circolante. In questo studio è stato trovato che la riduzione dell'attrito superficiale è di gran lunga maggiore quando la posizione degli emettitori di micro bolle è situata leggermente addietro rispetto la mezzeria. Si può concludere, dunque, che la posizione dell'iniettore ha effetto sul valore del coefficiente di resistenza.

È possibile, infine, osservare la riduzione di resistenza al variare del numero di Froude, osservando il grafico in Figura 15. Il coefficiente che esprime la riduzione della resistenza è maggiore per la posizione 3 rispetto a quello relativo alle posizioni 2 ed 1. La riduzione della resistenza parte da un numero di Froude di circa 0.34 ($V = 22$ kn). Man mano che il numero di Froude cresce, aumenta anche la riduzione della resistenza. Da questo studio emerge che è possibile ottenere un'effettiva riduzione della resistenza al moto fino al 9% ad un $Fr = 0.55$ ($V = 25$ kn).

Considerando i risultati delle suddette prove in vasca eseguite su modelli in scala, effettuate allo scopo di valutare la riduzione della resistenza al moto che si può ottenere

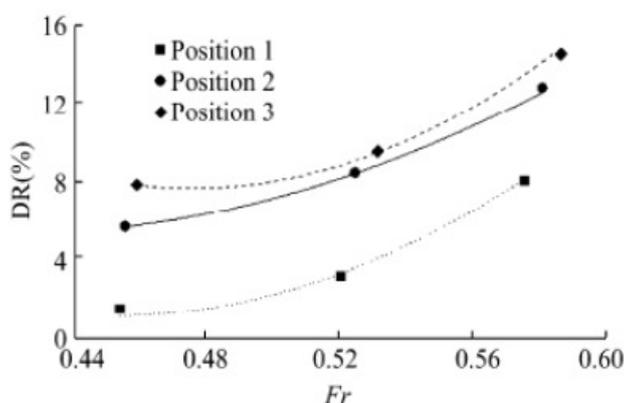


Figura 15: Relazione tra la riduzione della resistenza al moto e il numero di Froude.

nel caso di navi al vero ad alta velocità, dopo un adeguato passaggio in similitudine dal modello al vero considerando, anche, gli inevitabili effetti scala, è possibile trarre importanti conclusioni:

- L'applicazione delle micro bolle alle navi ha influenza positiva sulla resistenza all'avanzamento della nave. L'applicazione delle micro bolle può ridurre significativamente la resistenza al moto per le navi ad alta velocità. I risultati dei molti test mostrano che è possibile ottenere una riduzione della resistenza effettiva attorno al 9% per valori di $Fr = 0.55$ ($V = 25$ kn);
- La velocità del flusso d'iniezione dell'aria per dar luogo alla formazione di micro bolle e la locazione della posizione dell'iniezione sono significativi per raggiungere la massima riduzione della resistenza;
- L'iniezione delle micro bolle a poppavia rispetto alla mezzera nave è la miglior posizione per l'effettiva riduzione della resistenza.

4.2 Prove sperimentali su navi al vero ed effetti scala

Nella precedente sezione sono state illustrate varie prove sperimentali su modelli di carena in laboratorio, per estrarre informazioni in merito ai meccanismi di riduzione della resistenza al moto ottenuta tramite insufflaggio di micro bolle. Un inconveniente legato a tali test sono i cosiddetti effetti scala, che si instaurano nel passaggio in similitudine dal modello al vero. Generalmente, sarebbe sempre preferibile poter studiare un fenomeno fisico e i suoi meccanismi conducendo prove su prototipi a grandezza reale; tuttavia questo risulta di difficile attuazione, a causa delle limitate risorse a disposizione. I modelli fisici vengono quindi riprodotti in scala in laboratorio riducendo tutte le grandezze ad una opportuna scala di lavoro. Capita però che non risulti sempre possibile scalare in maniera corretta tutte le grandezze significative, passando dal prototipo al vero e il modello. Un caratteristico esempio è rappresentato dalle forze di origine viscosa, che solitamente sono più grandi nel modello piuttosto che nella realtà.



Length: $LOA = 126.66$ m, $LPP = 120.0$ m
Breadth: $B = 21.4$ m
Depth (mould): $D = 9.90$ m
Draft (full): 7.215 m
Engine power: 3.30 MW
Propeller: 4-bladed CPP, $D = 3.600$ m
Speed: $V = 12.4$ kn
Gross Tonnage: $GT = 7809$ ton

Figura 16: Pacific Seagull.

Gli effetti scala sono tanto più pronunciati quanto più piccola è la scala che si utilizza per riprodurre il fenomeno fisico; questo rappresenta un ulteriore limite alle prove sperimentali eseguite in laboratorio, e rappresenta la necessità di condurre, conseguentemente alle prove su modelli in vasca navale o in tunnel di cavitazione, test su navi al vero in mare.

Un primo esempio di rilievo di prova in mare di una nave sottoposta a lubrificazione con l'aria della carena, precisamente con micro bolle d'aria, può essere quello della nave da carico *M/V American Spirit*, navigante nella regione dei grandi laghi nordamericani. La nave ha elevate dimensioni, è caratterizzata da forme di carena piene (il C_B è molto alto), ed è stata sottoposta a prove in mare con tutte e tre le tecniche di lubrificazione ad aria, ovvero con micro bolle, con uno strato d'aria tra carena e fluido, e con una parziale cavità. Da queste prove si è avuta l'indicazione che si possono raggiungere riduzioni di resistenza vicine al 10–12%, a seconda della diversa tecnologia di lubrificazione e della velocità operativa della nave.

Emblematico è, poi, il caso della nave porta-cemento Pacific Seagull di bandiera giapponese, le cui caratteristiche principali sono riportate in Figura 16.

Questo tipo di nave è particolarmente adatto alle micro bolle. La nave è equipaggiata con compressori e relative condutture per convogliare l'aria per caricare e scaricare il cemento. Questi possono essere utilizzati anche per soffiare aria allo scopo di creare micro bolle, con una piccola quantità di lavoro aggiuntivo. Inoltre, una nave porta-cemento ha una forma di carena piena, con un lungo corpo cilindrico, e le bolle iniettate vicino alla prua coprono efficientemente una notevole porzione della superficie di carena.

In questo caso, l'aria è fornita da un compressore avente capacità di $43 \text{ m}^3/\text{min}$. Gli iniettori di bolle, lunghi 5 m e aventi piccoli fori per iniettare l'aria, sono posizionati su entrambi i lati della superficie di carena vicino alla prua. Questi sono progettati per essere usati esclusivamente in condizioni di pieno carico. Utilizzando tecniche di fluidodinamica computazionale allo scopo di prevedere le traiettorie delle bolle attorno alla superficie di carena, gli emettitori di micro bolle sono progettati in modo

tale da garantire che le bolle iniettate si propaghino sulla superficie bagnata di carena coprendola interamente, senza intaccare l'efficienza dell'elica. A seguito dell'installazione di dispositivi di misurazione, quali estensimetri attaccati sull'asse dell'elica per misurare la spinta e il momento torcente, di sensori d'attrito superficiale, se l'interazione elica-carena non cambia con le micro bolle, è possibile stimare la riduzione della resistenza al moto misurando la spinta e stimare il risparmio netto di potenza, come segue: Se la velocità della nave V è assunta costante prima e dopo l'iniezione delle bolle,

$$V_{\text{bolle}} = V \quad (8)$$

e se D è la resistenza al moto della nave e $(-\Delta D)$ la riduzione della resistenza al moto. Allora

$$(-\Delta D) \equiv D - D_{\text{bolle}} \quad (9)$$

W , che è la potenza necessaria per spingere una nave, si riduce, a seguito dell'iniezione di bolle, della quantità:

$$(-\Delta W) \equiv W - W_{\text{bolle}} = (-\Delta D)V \quad (10)$$

Allora la percentuale di risparmio di potenza nominale r_{nominale} è definita come

$$r_{\text{nominale}} = \frac{(-\Delta W)}{W} = \frac{(-\Delta D)}{D} \quad (11)$$

e la percentuale di risparmio di potenza netto r_{netto} è definita come

$$r_{\text{netto}} = \frac{(-\Delta W) - W_{\text{pompa}}}{W} = r_{\text{nominale}} - r_{\text{pompa}} \quad (12)$$

dove W_{pompa} è la potenza di pompaggio per l'iniezione di aria ed r_{pompa} la sua percentuale. Utilizzando le equazioni derivate sopra si possono stimare i valori delle percentuali di risparmio d'energia per la nave. Iniettando aria ad una portata di $43 \text{ m}^3/\text{min}$, si ottiene una riduzione della resistenza al moto della nave del 7.38% in condizioni di pieno carico. La potenza necessaria alla pompa per iniettare aria è pari a 1.94% della potenza necessaria a spingere la nave. Dunque, si ha una riduzione di potenza netta pari al 5.44%. Le percentuali aumentano se la nave si trova a navigare in condizioni di zavorra, come emerso da successivi analoghi test, per raggiungere un guadagno netto di potenza pari a circa il 10%. Dall'analisi delle prove in mare esposte a titolo di esempio in questa sezione, si può evincere una diffusa diminuzione della resistenza raggiunta a seguito dell'installazione di dispositivi di lubrificazione ad aria, precisamente micro bolle d'aria. Questa riduzione di resistenza è funzione di vari parametri, che, da quanto emerso dalle prove al vero, risultano essere principalmente la tipologia della nave e le relative forme di carena. Si è osservato, infatti, che è possibile ottenere riduzioni della resistenza al moto di entità maggiore per navi aventi forme piene e lunghi corpi cilindrici, caratterizzati da un fondo piatto orizzontale e murate verticali, come nel caso delle navi petroliere, navi cisterne in generale, navi da carico alla rinfusa; mentre per navi aventi sezioni pronunciate di tipo a "V", come le navi da guerra o navi sfiniate e molto veloci, l'entità della diminuzione della resistenza al moto per effetto delle micro bolle diminuisce drasticamente toccando valori molto bassi, dal 2 al 4%, per il fatto



Figura 17: Seiun-Maru e posizione dei condotti di emissione d'aria.

che le bolle, nel caso di navi aventi sezioni di tipo a 'V', scivolano verso l'alto lungo la parete e non ricoprono più la superficie bagnata di carena. Altri parametri che influenzano l'entità della riduzione della resistenza sono la velocità d'insufflazione dell'aria e la corrispondente portata, e la posizione degli ugelli stessi: si è osservato, in questi test su navi al vero ma anche, precedentemente, dai test su modelli in scala, come la miglior posizione di iniezione dell'aria sia a mezzera nave, in particolare leggermente a poppavia della mezzera nave, anche se, precedentemente, ci si è imbattuti in soluzioni particolari in cui gli emettitori di micro bolle erano posti in corrispondenza della prora della nave e, caso assai particolare, in corrispondenza del bulbo, come nel caso della nave scuola giapponese Seiun-Maru (Figura 17). Questa soluzione presenta valori percentuali di riduzione della resistenza notevolmente bassi, dell'ordine del 2-3%, ma solamente per basse velocità.

5 Tecnologie innovative per la riduzione della resistenza al moto indotte da micro bolle

5.1 Generalità

Recentemente, a partire dal 2009 sino ad oggi, sono state sviluppate ed adottate diverse soluzioni innovative nel campo della lubrificazione delle carene con micro bolle d'aria, che hanno portato a un incremento in termini di riduzione della resistenza al moto e di riduzione delle emissioni inquinanti. Diverse compagnie marittime hanno adottato, a seguito delle sempre più numerose richieste degli armatori indirizzate alla possibilità di ridurre i consumi e le emissioni, installazioni innovative volte a ridurre la resistenza al moto delle navi, tra cui il *MALS* (Mitsubishi Air Lubrication System), sviluppato dalla giapponese Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (*MHI*), il sistema di lubrificazione *WAIP* (Winged Air Induction Pipe), proposto dalla giapponese *R&D Engineering Inc.*, a cui negli anni si sono aggiunti il sistema della finlandese *Foreship*, quello della londinese *Silverstream* e il *Saver Air* della Sud Coreana Samsung.

Tali soluzioni differiscono per la posizione degli emettitori delle micro bolle e, soprattutto, per la loro diversa conformazione e per i diversi materiali utilizzati; notevoli sono anche le differenze legate alla forma e alla generazione delle micro bolle. Vengono di seguito descritti sommariamente i vari approcci tecnologici proposti sul mercato.

5.2 MALS - Mitsubishi Air Lubrication System

Il *MALS* rappresenta un esempio di studi e progetti di carene lubrificate con micro bolle, sviluppato dalla Mitsubishi Heavy Industries, Ltd. (*MHI*). Questo sistema di lubrificazione ad aria con micro bolle è stato il primo ad essere applicato a una nave nuova, e ha portato a una sostanziale riduzione della resistenza al moto della nave. Il sistema *MALS* è stato installato per la prima volta su un traghetto avente forme sfinite di carena. Esso ha confermato un miglioramento superiore al 5% del consumo di combustibile, come conseguenza della riduzione della resistenza d'attrito che si ha fornendo aria nella parte inferiore della carena della nave e, quindi, creando uno strato di micro bolle che permette alla nave di fluire con minor attrito tra la carena e l'acqua di mare. L'esperimento di verifica, supportato dal registro giapponese *ClassNK*, è stato condotto in mare utilizzando il traghetto Ferry Naminoue, una nave passeggeri entrata in servizio a partire dall'ottobre del 2012 e che percorre la tratta Kagoshima-Amami-Okinawa nel sud del Giappone (Figura 18).

I risultati dell'esperimento hanno verificato che il dispositivo *MALS* è anche applicabile alle navi high-speed, quale modo efficace di ridurre il consumo di carburante e di ridurre le emissioni nell'ambiente, estendendo così il campo delle tipologie di navi per le quali il dispositivo è appropriato. Successivamente, il sistema è stato installato su due navi per il trasporto di carichi pesanti, prima la Yamatai e poi la Yamato, due navi dotate di un sistema propulsivo bi-elica e caratterizzate da un fondo piatto molto esteso, un'ampia larghezza e bassa immersione. I risultati hanno confermato che la distribuzione delle bolle d'aria sulla superficie del fondo garantiva una riduzione della resistenza al moto



$L = 145 \text{ m}$ $B = 24 \text{ m}$ $T = 6.2 \text{ m}$ $GT = 8100 \text{ t}$ $DWT = 3808 \text{ t}$ $V_{\max} = 20.7 \text{ kn}$

Figura 18: Il ferry Naminoue.

in una misura superiore al 5%, in funzione del diverso diametro delle bolle d'aria: al diminuire del diametro delle bolle, quello che si ottiene è una maggior riduzione della resistenza. Inoltre, con tecniche computazionali è stato possibile prevedere, oltre alla suddetta distribuzione delle bolle attorno alla carena, anche che l'intrusione delle micro bolle generate al di sotto del fondo della nave nella zona del disco elica non provoca effetti negativi in termini di prestazioni dell'elica.

Un'ulteriore e significativa conferma delle potenzialità della tecnologia *MALS* in termini di riduzione della resistenza d'attrito e delle emissioni inquinanti deriva dal nuovo progetto recentemente completato dalla *MHI*, di una nave portacontainer da 14000 TEU con carena lubrificata con aria. La *Mals-14000cs* è una nave New-Panamax che sarà in grado di navigare attraverso il canale di Panama dopo la sua espansione pianificata per il 2014: le dimensioni di progetto sono 366.0 m di lunghezza fuori tutto, 48.8 m di larghezza e 15.2 m di immersione. La nave *Mals-14000cs* è stata progettata per realizzare una riduzione del 10% delle emissioni di CO_2 con il sistema delle bolle d'aria. Il progetto della nave, con una nuova forma dello scafo ottimizzata, prevede il ponte spostato relativamente in avanti, scarichi a poppa, e uno spazio supplementare per i container. Il progetto di questa nuova nave, che offre una maggior capacità di carico dei container, abbinato a un sistema a due motori e due alberi di propulsione, consente una riduzione delle emissioni di CO_2 del 24%. Sommato con una riduzione del 5% consentita dal motore diesel a controllo elettronico e il sistema di recupero del calore emesso, la *Mals-14000cs* raggiunge un taglio complessivo del 35% delle emissioni di CO_2 . Inoltre, questa nave è progettata per essere ancora più ecologica attraverso l'installazione di uno scrubber che consente di rimuovere l'ossido di zolfo (SO_x) di scarico e un sistema di trattamento delle acque di zavorra. Un altro esempio di adozione del sistema *MALS* è rappresentato dalla nuova portarinfuse *Soyo*, la prima nave al mondo per il trasporto d'oltremare, in particolare di carbone, ad avere un sistema di lubrificazione con l'aria permanentemente installato (Figura 20). Lo scopo di quest'ultima installazione consiste nel verificare ulteriormente l'efficacia del sistema su una rinfusiera, ovvero una carena con elevata immersione, e constatare così la possibilità di estendere l'installazione del sistema di lubrificazione alle navi mercantili, in



Figura 19: Rappresentazione del concetto MALS: le bolle d'aria coprono il fondo della nave, come un tappeto d'aria.

generale. Questo sistema di lubrificazione con micro bolle d'aria riduce le emissioni di CO₂ prendendo una certa quantità di emissioni dal turbocompressore del motore principale (aria di combustione) e conducendole verso il fondo della nave. Un sistema con questo bypass di aria è previsto possa ridurre efficacemente l'emissione di anidride carbonica anche su grandi navi mercantili generali aventi notevoli immersioni; nel caso particolare della portarinfuse *Soyo*, durante le prove in mare, oltre che verificare la sicurezza e le prestazioni del sistema, si è verificato una riduzione della resistenza per effetto della lubrificazione con micro bolle variabile tra il 4% e il 7% a seconda che la nave navighi a pieno carico oppure in zavorra, rispettivamente.

A conferma dei buoni risultati che si possono ottenere dall'installazione di un particolare dispositivo di lubrificazione con micro bolle d'aria quale il *MALS*, sono state recapitate alla *MHI* diverse commesse che prevedono l'installazione di tale tecnologia su navi che, attualmente, sono ancora alle fasi di conclusione del progetto. Le commesse non hanno riguardato unicamente navi mercantili ma anche navi da crociera di notevoli dimensioni, in particolare quelle commissionate dalla compagnia crocieristica tedesca *Aida Cruises*, la cui consegna è stata effettuata nel 2017. In figura 21 è riportata l'*AIDA* prima, una delle due navi da crociera equipaggiate con dispositivi *MALS*.

Le due navi da crociera hanno una stazza lorda di 125 000 tonnellate di stazza, e possono imbarcare 3250 passeggeri e rappresentano la nave da crociera più grande mai costruita dalla compagnia. L'applicazione di questa tecnologia a queste due navi da crociera è stata decisa alla luce del forte interesse da parte del committente di abbattere il consumo di carburante, e quindi i costi di esercizio legati alla conduzione della nave,



Figura 20: Nave per il trasporto di carbone Soyo.



Figura 21: La nave AIDAprima equipaggiata con dispositivi MALS.

e alleggerendo il carico inquinante sull'ambiente. Il sistema si prevede possa ridurre il consumo di carburante della nave di circa il 7% in base ai dati stimati e pubblicati dal cantiere costruttore.

5.3 Foreship® Air Lubrication System (ALS)

Foreship è uno studio di Architettura Navale con la sede principale in Finlandia, che lavora sullo sviluppo e il perfezionamento di un sistema di air lubrication in grado di inserire un tappeto di bolle nello strato limite turbolento. Gli obiettivi della loro attività consistono nella massimizzazione della riduzione di potenza richiesta alla nave, al netto dell'energia necessaria all'immissione delle bolle; nella realizzazione di un sistema in grado di poter essere montato anche su navi esistenti e che, ultimo obiettivo, non generasse un incremento della resistenza una volta spento [24].

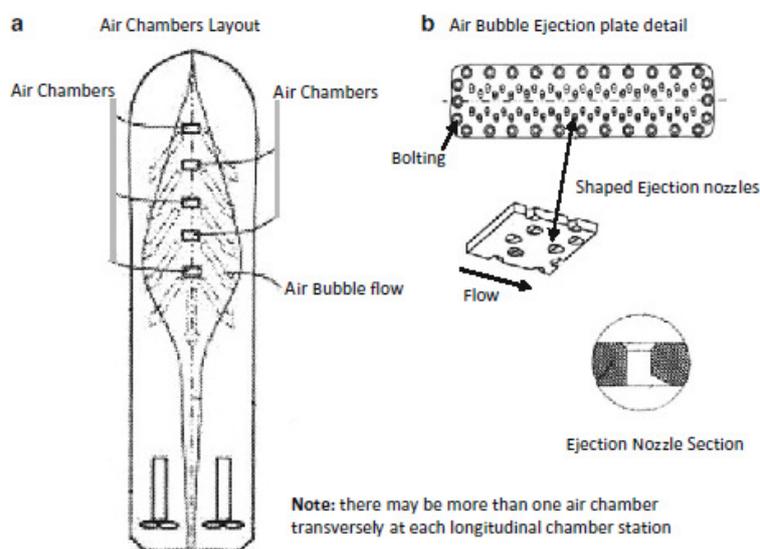


Figura 22: Il sistema Foreship [24].

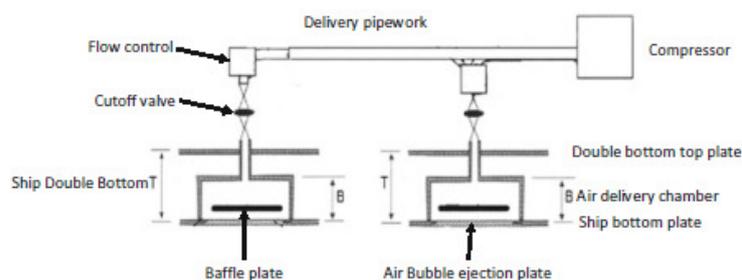


Figura 23: Il sistema di distribuzione Foreship [24].

I test si sono basati su CFD ed EFD full scale, per evitare le difficoltà nello scalare le correttamente bolle.

Il sistema Foreship prevede una serie di *plenum chambers*, camere aeree disposte lungo la linea di mezzeria della chiglia che forniscono aria attraverso degli array di ugelli appositamente sagomati e praticati su lastre piane, come mostrato in Figura 22 [25, 26]. La disposizione longitudinale dei dispositivi è stata determinata mediante calcoli CFD, tenendo anche conto sia della eventuale dispersione o coalescenza delle bolle stesse, sia della variazione del dislocamento e della velocità di servizio della nave, nonché dello stato di mare.

Nei brevetti depositati dall'azienda viene descritto il controllo computerizzato del volume del flusso d'aria e della sua pressione inviato ad ognuna delle *plenum chambers*. Le *plenum chambers* alloggiavano al loro interno un deflettore che permette di regolarizzare l'afflusso d'aria alle lastre che alloggiavano gli ugelli (Figura 23). Queste piastre hanno una dimensione tipica di $1000 \times 250 \text{ mm}^2$ e ospitano, in posizioni ottimizzate, da 50 a 200 ugelli la cui geometria è studiata e verificata con molto dettaglio al fine



Figura 24: Risultati CFD per il flusso di bolle del sistema Foreship [24].

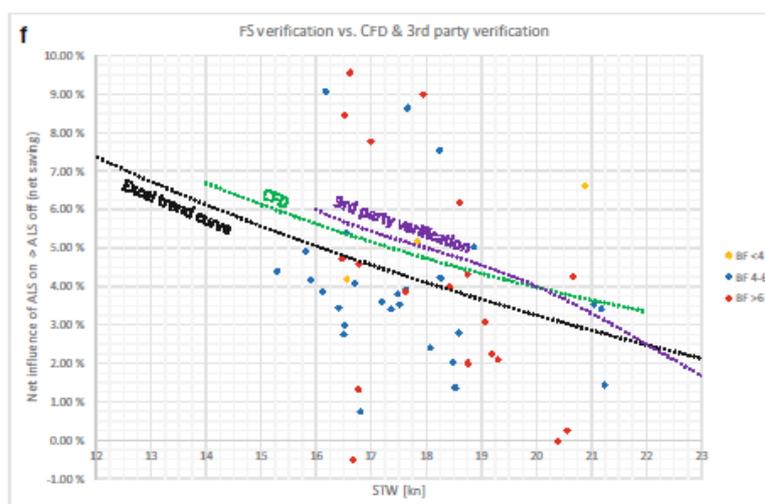


Figura 25: Confronto tra risultati CFD e risultati delle verifiche *full-scale* per il sistema Foreship, incluse quelle effettuate da un ente di verifica terzo. [24].

di garantire la massima depressione del flusso d'aria in relazione alla pressione locale dell'acqua, senza aumentare la resistenza.

Una indicazione del flusso di bolle ottenuto con il sistema Foreship è riportata in Figura 24. La velocità impostata per la nave è di 18 kn con portate d'aria di 5 kg/s e 10 kg/s (prima e seconda immagine in Figura 24), e di 22 kn con una portata d'aria di 10 kg/s. In queste condizioni, i risultati indicano che la parte centrale della nave è interessata da un flusso di bolle con una frazione aria/acqua di 0.075–0.08.

Le analisi mostrano come all'aumento del volume d'aria corrisponda un aumento della riduzione di resistenza. All'opposto, l'aumento della velocità da 18 kn a 22 kn riduce questo vantaggio.

La Figura 25 riporta una visione generale delle performances previste numericamente e verificate al vero su un modello *full-scale* anche da un ente terzo. La dispersione dei dati è molto elevata, ma per il gruppo Foreship i risultati in media intorno al 4–5% sembrano una stima plausibile e incoraggiante per una nave da crociera.



Figura 26: Anthem of the Seas. [24].

La Foreship ha iniziato gli studi analitici per l'installazione del sistema su una nave nuova a partire dal 2012-2013. La prima installazione del suo sistema è stata di tipo retrofit, non essendo stata prevista inizialmente. A seguito dei risultati incoraggianti ottenuti, a partire da novembre 2014 si è iniziato a installare questo sistema sia su navi nuove sia preesistenti. Al momento risultano installati più di 10 sistemi Foreship, con il gruppo Royal Caribbean Cruise Line (RCCL) come cliente principale.

Dopo una serie di test, il gruppo installò il sistema di lubrificazione sulle navi Quantum of the Seas e Anthem of the Seas (Figura 26). A partire da quel momento, e in considerazione dei brillanti risultati ottenuti, l'installazione di questo sistema ALS è diventata lo standard nell'approccio progettuale al risparmio energetico della RCCL. Secondo lo studio di progettazione, il flusso di bolle è in grado di seguire le linee di flusso lungo la carena e, avendo una ridotta void fraction, risente meno dell'azione del galleggiamento e delle forze idrodinamiche rispetto a flussi ottenuti con bolle di dimensioni maggiori.

Gli studi effettuati con la modellazione numerica indicano una limitata richiesta di aggiustamento dei parametri operativi all'aumentare della velocità della nave, una volta che il sistema è stato attivato a 12 kn–14 kn.

Un'ultima considerazione riguarda l'azione che il flusso di bolle ha sul rumore (underwater noise): l'esperienza ha mostrato una riduzione del livello di rumore fino a 10 dbA, con discreto beneficio per il confort interno.

5.4 WAIP – Winged Air Induction Pipe

Un altro esempio di studio e ricerca su carene lubrificate con micro bolle è rappresentato dal sistema *WAIP* (Winged Air Induction Pipe). Questa tecnologia, efficace nel ridurre la resistenza d'attrito, è stata concepita con l'intenzione di ridurre la quantità di energia richiesta per generare le micro bolle e anche per ridurre le dimensioni delle stesse micro bolle generate, col risultato di una ridotta galleggiabilità della bolla stessa. La

peculiarità del sistema è che le bolle generate hanno dimensioni ridottissime, sono micro bolle ultrasottili prossime ai $10\ \mu\text{m}$, pari a $1/100$ della grandezza delle bolle d'aria generate con un metodo convenzionale di compressione d'aria. Inoltre, le dimensioni di tali micro bolle ultrasottili non cambiano una volta che sono state espulse in acqua. Diversamente dalle bolle generate con sistemi standard di compressione dell'aria, le micro bolle generate dal sistema *WAIP* tendono a rimanere all'interno dello strato limite attorno alla carena, e a coprire effettivamente una grande area della superficie della carena da prua a poppa.

L'installazione del dispositivo *WAIP* sulla carena riduce la resistenza d'attrito della nave del 15–20%, contribuendo a ridurre la potenza del motore principale e il consumo di combustibile. A titolo di esempio, l'installazione di un sistema *WAIP* su una nave con un motore principale da 20 000 kW, che naviga a 22.5 kn, risparmia olio combustibile pesante per una quantità prossima a 8.5 milioni di dollari l'anno, a prezzi di mercati attuali, di 385 dollari per tonnellata. Una riduzione, quindi, del 15% del consumo di combustibile implica un sostanziale risparmio di 1.3 milioni di dollari l'anno.

Il congegno *WAIP* si basa sulla instabilità di Kelvin-Helmholtz, che si verifica quando appare una differenza di velocità al confine tra il fluido più leggero, aria in questo caso, che sta di sopra, e il fluido più pesante, cioè l'acqua di mare. Solitamente, il fluido leggero che sta sopra al fluido pesante è molto stabile quando non c'è differenza di velocità all'interfaccia dei due fluidi. Ma una volta che si verifica qualche differenza di velocità all'interfaccia, si causa instabilità e vengono generate micro bolle ultrasottili pari a $10\ \mu\text{m}$. Questa instabilità si manifesta al di sopra dell'ala del sistema *WAIP*. L'unità *WAIP* viene installata sulla superficie della carena e consiste di un'ala, simile a una pala, avente diversi parametri di progetto, come la forma (ogivale, a forma di profilo alare, ecc.), le dimensioni (lunghezza della corda e larghezza), l'altezza della protrusione e l'angolo d'attacco. L'ala è attaccata a un condotto d'iniezione d'aria ed è collegata ad una presa d'aria esterna. Quando è in funzione, il movimento di avanzamento della nave attraverso l'acqua genera una forza d'aspirazione al di sotto dell'unità del *WAIP*, cosicché le micro bolle sono continuamente emesse dal dispositivo.

Questa sequenza di generazione di bolle si verifica quando l'immersione della nave è compresa all'interno di un certo range di profondità, ovvero non si verifica per quelle navi superficiali che navigano a pelo d'acqua, come le navi *SES* (Surface Effect Ships), così come non si verifica quando l'immersione della nave è molto elevata, e la velocità della nave non è abbastanza alta; in questi due casi non si instaura l'instabilità di Kelvin-Helmholtz e non saranno generate micro bolle ultrasottili. In casi come questi, il livello di confine aria-acqua deve essere spinto verso il basso appena al di sopra della pala del dispositivo, per essere in grado di generare micro bolle. Per raggiungere questo fine, deve essere utilizzato un compressore d'aria di piccole dimensioni al fine di abbassare il confine aria-acqua al di sopra dell'ala del sistema *WAIP*.

L'energia consumata a tal scopo dal compressore d'aria è calcolata in meno dello 0.15% della potenza del motore principale, ed è da considerarsi trascurabile, come emerge da applicazioni pratiche e prove in laboratorio. Il sistema *WAIP* è un dispositivo per la generazione di micro bolle ultrasottili che, diversamente dai modi convenzionali di

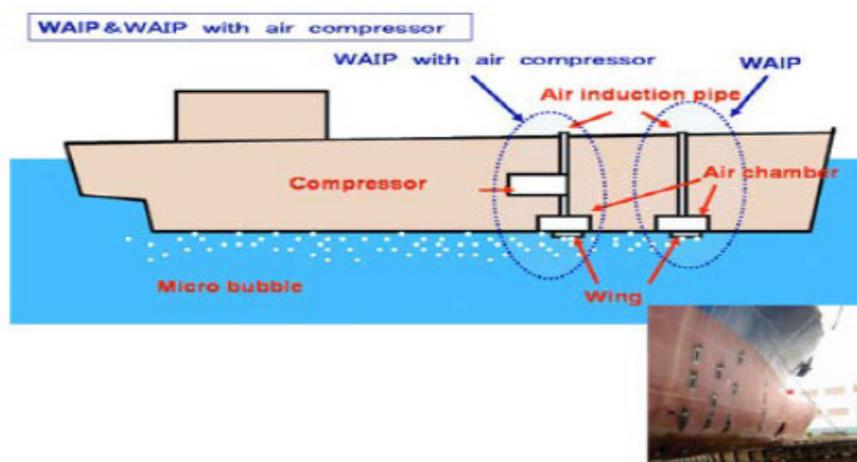


Figura 27: Rappresentazione schematica del funzionamento del dispositivo WAIP.

generazione delle micro bolle, riduce la resistenza d'attrito senza richiedere un impegno di energia per la generazione delle micro bolle, riducendo così le richieste di potenza sino al 15%. Tra i suoi vantaggi, il sistema *WAIP* non necessita di prove in mare dopo la sua installazione, non necessita di manutenzione, e non deve essere sottoposto a controlli in condizioni di mare agitato. In conclusione, gli armatori possono ridurre la resistenza d'attrito per ogni tipo di nave, installando un diverso numero di dispositivi *WAIP* sulla carena di qualsiasi nave, avente qualsiasi forma di carena e qualsiasi velocità.

Per verificare l'efficacia e i risultati che si possono ricavare dall'installazione di un simile dispositivo, sono state eseguite varie prove in mare su diverse tipologie di navi, prevalentemente traghetti e navi passeggeri di limitate dimensioni, su navi costiere e navi da carico generali, come le bulk carrier. I risultati ottenuti sono stati buoni, tra il 6 e il 12% in termini di riduzione della resistenza al moto; l'entità della riduzione dipenderà dal numero dei dispositivi *WAIP* installati su entrambi i lati della carena della nave (si può arrivare ad installare un elevato numero di queste appendici a seconda delle dimensioni della nave), e, come già osservato, dall'immersione e dalla velocità di esercizio della nave, considerati congiuntamente.

Una prima installazione del dispositivo per la riduzione della resistenza al moto è avvenuta sul traghetto *Santander Ferry 1*, caratterizzato da ridotte dimensioni ($LPP \times B \times D = 28.8\text{ m} \times 5.45\text{ m} \times 1.55\text{ m}$); su di esso sono stati installati 16 dispositivi ad ala *WAIP* in ghisa disposti a file parallele di 4 per ogni fila, sulla carena della nave, a una distanza tale da coprire omogeneamente il fondo della nave. Da prove in mare condotte nelle Filippine, in condizioni di mare calmo e assenza di vento, è stata registrata una riduzione massima della resistenza al moto del 14%. Questo è il risultato di due prove consecutive: prima il traghetto è stato provato con i 16 dispositivi *WAIP* correttamente funzionanti, successivamente è stato testato con i dispositivi disattivati; dal confronto tra le due prove emerge che nel secondo caso la nave ha consumato una maggior quantità di carburante, pari al 14% in più del carburante che



Figura 28: Dispositivo WAIP (ghisa) ad ala sulla carena di una nave.



Figura 29: Installazione di 20 ulteriori dispositivi WAIP sul traghetto New Ferry Misaki.

è stato consumato nel primo caso, con i 16 congegni WAIP in funzione. In seguito, ulteriori test furono eseguiti sul traghetto, da cui sono stati rimossi sei dispositivi WAIP poppieri e i restanti dieci sono stati sistemati in tre file da tre ciascuna più uno singolo a poppavia (i dispositivi sono facilmente rimovibili e installabili, secondo quanto garantito dai produttori). In questo caso, con la medesima procedura di test illustrata precedentemente, è risultato un risparmio di carburante pari al 12%.

Successivamente, altre sperimentazioni della tecnologia furono condotte su un traghetto nel Giappone meridionale, il traghetto *New Ferry Misaki*, da parte del Ship Research Center of Japan (Figura 29). Il traghetto è stato equipaggiato con 14 dispositivi WAIP in ghisa e a seguito di abituali rotte in mare risultò una riduzione della resistenza del 5.8% alla velocità di prova di 18 kn, molto vicino al valore stimato come possibile da raggiungere prima dell'esecuzione delle prove. Altri 20 dispositivi furono installati, più tardi, sul traghetto, sotto la supervisione del registro giapponese ClassNK, per raggiungere un totale di 34 dispositivi.

Tabella 1: Variazione di potenza e di consumo medio di carburante relativi al traghetto New Ferry Misaki.

WAIP installati	Potenza motore principale [kW]	Consumo di carburante [l/d]
Nessuno	110.5	4105.90
14 WAIP	103.4	3842,50
34 WAIP	100	3714.80

Durante i vari percorsi di rotta che la nave copriva abitualmente nella baia di Tachibana, tra il 2004 e il 2006 è stato registrato il consumo medio di carburante bruciato per completare il percorso, e, come emerge dalla tabella riportata di seguito che riassume i risultati forniti dalle prove in mare e valutati dal registro, si è avuto un sensibile risparmio di carburante, che aumenta al crescere dei dispositivi *WAIP* installati sul fondo del traghetto (Tabella 1).

L'installazione di questa tecnologia si è espansa a navi di più elevate dimensioni e dislocamento, con una maggior superficie immersa di carena su cui è possibile alloggiare un maggior numero di congegni *WAIP*. Una di queste è la nave costiera da carico *Filia Ariea* su cui sono stati installati 52 dispositivi, mentre sulla portacontainer *Olivia Maersk*, caratterizzata da dimensioni notevolmente maggiori, ne sono stati installati 124 di *WAIP* (Figura 30).

A bordo della *Filia Ariea* sono state installate soffianti d'aria anziché dei compressori; ma grazie alla ridotta immersione prodiera e alla ridotta capacità delle soffianti, si è avuta una riduzione della resistenza al moto, per effetto dei dispositivi *WAIP*, del 10%, ad una velocità di prova di circa 14 kn, come misurato dalla compagnia di misurazione *Belkoned Marine Service b.v.*

Una nota stonata, sorprendentemente, proviene invece dall'esempio della *Olivia Maersk* in cui il concetto *WAIP* non ha ancora mostrato alcun risultato conclusivo in termini di guadagni di prestazioni e di associati risparmi di carburante, nonostante gli sforzi di tutte le persone coinvolte nell'installazione e nelle misurazioni successive. In questo caso, il progetto ha dimostrato complessità tecniche della lubrificazione con l'aria su carene di navi sfnate e aventi forme particolari, di tipo a V pronunciate, certamente non appropriate per il meccanismo che, in altri casi come visto in precedenza, sono in grado di generare le micro bolle su una superficie di carena più piatta e orizzontale, e dalle forme meno particolari. Alcune osservazioni relative la velocità d'iniezione del flusso hanno contribuito ad un maggior apprendimento di come il sistema di lubrificazione con micro bolle d'aria può essere migliorato in futuro. La stessa Maersk sta considerando le possibilità per un prossimo sviluppo della lubrificazione con l'aria, utilizzando l'*Olivia Maersk* come nuovo punto di partenza per altre sperimentazioni con lubrificazione della carena. Il progetto, in più, ha aperto le porte alle possibilità di partnership con la *R&D Engineering Inc.*, che proseguirà ad indagare su tali mezzi di riduzione della resistenza d'attrito.



Figura 30: Olivia Maersk, dotata di 124 dispositivi WAIP.

5.5 Silverstream® Air Lubrication System

La Silverstream Technologies ha sede a Londra, in Gran Bretagna, e negli ultimi anni ha sviluppato e immesso nel mercato dei sistemi di air lubrication disponibili sia come retrofit su navi esistenti, sia come add-on su navi di nuova produzione [24]. Allo stato attuale la società dispone di un elevato numero di brevetti internazionali in materia di air lubrication ed è operativa sia in ambito progettuale che costruttivo.

L'interesse degli armatori intorno a questi dispositivi nasce dalla possibilità di migliorare l'economia di servizio e di minimizzare il carico di imposte fiscali da parte dei vari paesi. Per questi motivi è una alternativa valida ai sistemi offerti dalla *MHI* e dalla *Foreship*. La configurazione del sistema è riportata in Figura 31. Il sistema di generazione delle bolle *Silverstream* differisce da quelli presentati in precedenza (*MHI* e *Foreship*) per diversi aspetti. Le camere di distribuzione

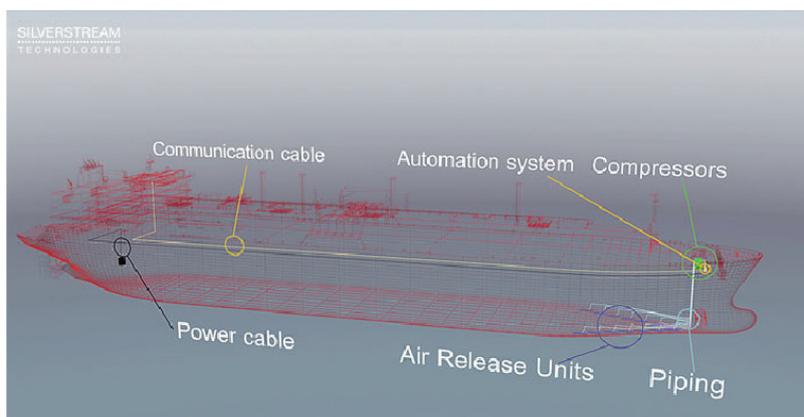


Figura 31: Diagramma del sistema Silverstream.

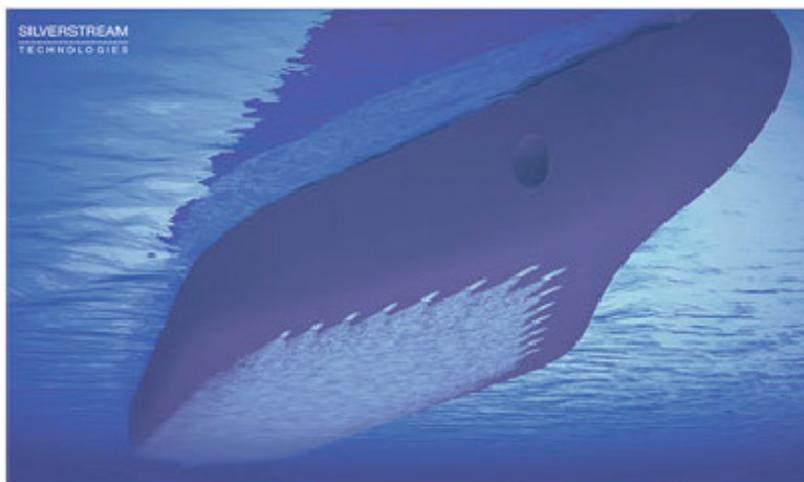


Figura 32: Emissione di bolle del sistema Silverstream.

dell'aria sono disposte in modo da seguire accuratamente la forma della chiglia della nave e l'aria è introdotta in queste camere a pressione e volume appena sufficienti per bilanciare la pressione sotto la chiglia indotta dall'immersione della stessa. La geometria del dispositivo è organizzata in modo tale da garantire che, durante l'avanzamento della nave, il flusso d'acqua intrappoli l'aria sovrastante e che l'instabilità di Kelvin-Helmholtz associata all'accoppiamento dei due flussi generi un flusso di bolle a piccolo diametro. La quantità di aria introdotta nella camera di rilascio è in equilibrio con la quantità di aria catturata nello strato limite a causa dello shear, a sua volta una funzione della velocità di avanzamento.

La Figura 32 mostra un rendering del flusso di bolle lungo la chiglia di una nave. L'elemento caratterizzante del sistema Silverstream riguarda la capacità del sistema di garantire, previa accurata regolazione del flusso e della pressione dell'aria, un flusso persistente di bolle di piccole dimensioni (circa 1 mm) generate nella regione di mixing all'interfaccia con lo strato limite turbolento. La piccola dimensione rappresenta una elevata tensione superficiale e una moderata spinta di galleggiamento, fattori che favoriscono la formazione di flussi consistenti.

La capacità del sistema di sfruttare l'instabilità di Kelvin-Helmholts per generare le bolle senza utilizzare sovrapressioni significative è uno dei fattori chiave che permette di garantire condizioni di esercizio stabili e continue.

L'esperienza di Silverstream in questi ultimi anni garantisce un risparmio di carburante nell'ordine del 4–10%, limitando inoltre la crescita di incrostazioni sulla chiglia e riducendo il rumore dell'elica.

Un aspetto interessante del sistema Silverstream riguarda la disponibilità di report che descrivono le attività di calibrazione a lungo termine per la calibrazione e l'ottimizzazione dei dispositivi installati, alcuni dei quali redatti anche da enti di controllo terzi. Ad esempio il retrofit montato sul motor tanker Amalienborg nel 2015, a cui viene attribuito un risparmio di carburante del 4% durante le attività di regolare esercizio,



Figura 33: La nave da crociera Norwegian Joy.



Figura 34: La nave da crociera Diamond Princess della Carnival Corporation.

è stato verificato dai Lloyds Register e dalla Hamburg Model Ship Basis (HSVA) [12]. In de Freitas et al. [27] vengono riportate le più recenti attività verificate dai Lloyds Register seguendo la procedura messa a punto per la stima della efficienza dei dispositivi di riduzione del consumo energetico emessa dall'IMO [2]. La Silverstream ha di recente installato il suo sistema sulla nave da crociera *Norwegian Joy* di dimensioni ($L \times B \times d$ pari a $333 \text{ m} \times 41 \text{ m} \times 8.7 \text{ m}$, di peso $167\,725 \text{ t}$) (Figura 33 e ha anche ricevuto, nel 2018, ordini per sei RoRo ibridi da parte della Grimaldi, con impegno per la consegna nel 2019 e nel 2020. Infine, la Figura 34 mostra una immagine della *Diamond Princess*, una nave da crociera della Carnival Corporation di dimensioni ($L \times B \times D \times d$ pari a $290 \text{ m} \times 37.5 \text{ m} \times 8.5 \text{ m}$, di peso $115\,875 \text{ t}$), costruita da MHI nel 2014 su cui è stato installato il sistema *Silverstream* come retrofit durante un attracco nei mesi di maggio/giugno 2017. Le indicazioni finali sui contratti stipulati dichiarano una riduzione di potenza richiesta e di carburante superiore al 5% a una velocità di crociera di 22 kn.

5.6 Samsung Heavy Industries *Saver Air*

Samsung Heavy Industries ha sede in Geoje, Sud Corea. Questo gruppo ha condotto attività di ricerca e sviluppo per la riduzione della resistenza di attrito mediante iniezione di uno strato d'aria a partire dal 2012 [28], focalizzandosi sulla progettazione di un cargo bulk carrier da 66 000 *DWT*, avente dimensioni di $L \times B \times d$ pari a $200 \text{ m} \times 36 \text{ m} \times 11.2 \text{ m}$ a scala nave.

Jang et al. [28] riportano di aver testato il loro progetto su scala modello dividendo le attività in due fasi successive. La prima fase ha riguardato l'applicazione del sistema per la generazione dell'air layer su una lastra piana mentre la seconda, basandosi sull'esperienza fatta, ha riguardato un modello di nave in scala 1 : 24 testato in bacino per le prove di resistenza e, successivamente, di auto propulsione. Il sistema di iniezione d'aria utilizzato per il modello era composto di due blocchi dotati ciascuno di tre unità di iniezione, ognuno dei quali realizzato con due file di ugelli (Figura 35), mentre il sistema di alimentazione dei dispositivi di iniezione è illustrato in Figura 36. I risultati dei test hanno dimostrato la possibilità di realizzare uno strato d'aria di spessore tra i 4 e i 10 mm lungo il fondo dello scafo, con una conseguente riduzione della resistenza di circa il 10% che, considerando una richiesta di energia dei compressori per l'iniezione d'aria compresa tra 2% e 4% corrisponde a un vantaggio in termini di riduzione di potenza necessaria tra il 5% e il 6% del totale richiesto in assenza di *ALS*. Nonostante la maggior richiesta di energia per l'iniezione dell'aria a una profondità maggiore, le prove al vero hanno avuto un esito positivo e lo strato di bolle realizzato, di spessore 7–10 mm, si è dimostrato in grado di perdurare sul fondo della carena e di indurre una potenziale riduzione della resistenza di circa 8–10%, con una riduzione di potenza richiesta netta di circa 7–9 % a una velocità di 13–16 kn.

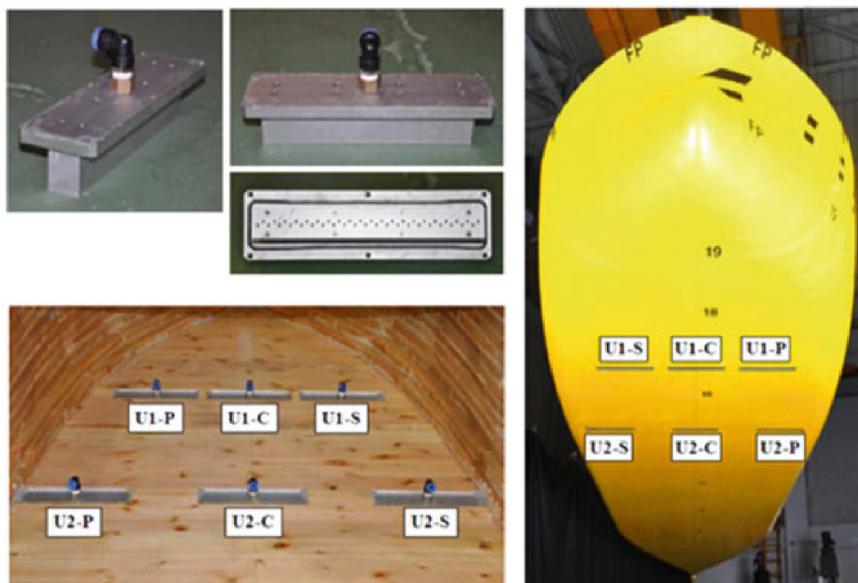


Figura 35: Dettaglio del sistema di iniezione d'aria *SHI Saver Air*.

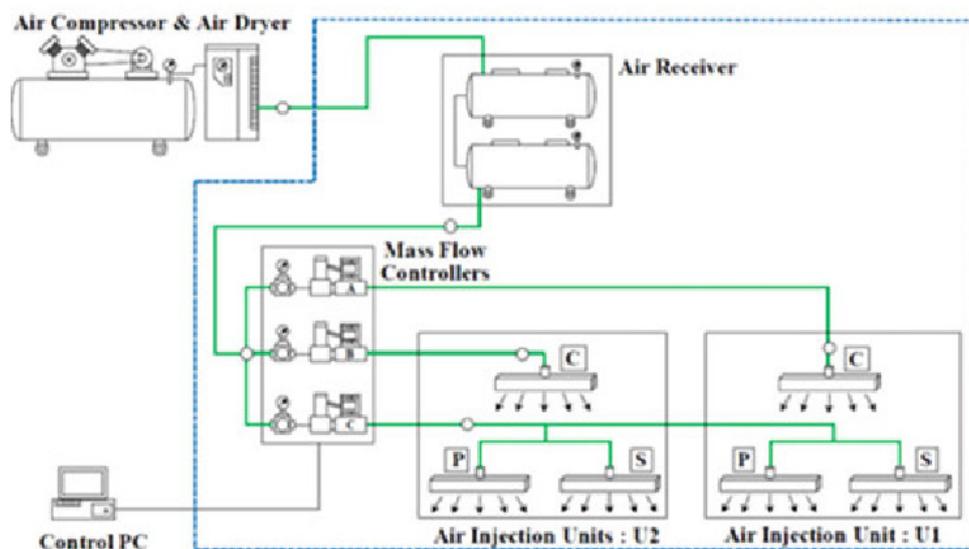


Figura 36: Alimentazione del sistema di iniezione d'aria *SHI Saver Air*.

Inoltre, i test di autopropulsione hanno rilevato una blanda o pressoché nulla influenza dello strato di bolle sull'efficienza propulsiva. La rilevanza dei risultati ottenuti, seppure in acqua calma, mostrava un margine sufficiente a ritenere possibile una applicazione del sistema anche in mare aperto e Samsung, proseguendo su questa linea, lo ha ulteriormente sviluppato e ricondotto a una serie di unità di rilascio d'aria che hanno poi preso il nome di *Samsung Saver Air*. Un esempio della sua applicazione a una nave monoelica è mostrato in Figura 37. Successivamente, *SHI Saver Air* è stato installato come retrofit su un *HCC* (Heavy Cargo Carrier) appartenente alla flotta Samsung Shipyard, utilizzato per il trasporto di grandi parti di scafi dai cantieri Rongcheng, Weihai, Shandong, in China per il loro assemblaggio nei cantieri di Goeje in Sud Corea, principalmente allo scopo di acquisire esperienza e dati. Il natante *HCC*, di dimensioni $L \times B \times T$ di $165 \text{ m} \times 42 \text{ m} \times 5.25 \text{ m}$ è dotato, dettaglio non secondario, di una chiglia piatta la cui superficie inferiore equivale al 48.3m% dell'intera superficie bagnata. I test su modello sono stati condotti utilizzando l'installazione mostrata in Figura 38. Al termine, Samsung è stata in grado di sviluppare equazioni per determinare il risparmio netto di potenza ottenuto sia a scala modello sia a scala nave [29]. A scala modello, la riduzione di potenza richiesta a 12 kn è stata determinata pari al 22.5% a pieno carico e al 24.5% alla immersione di zavorra (ballast draft). Questo significa che, sottraendo la potenza richiesta per l'immissione d'aria pari rispettivamente a 8.5% e 8.8%, il guadagno netto risulta pari al 13.8% e 15.7%, un risultato molto netto.

Su scala nave il discorso cambia significativamente. I test condotti nel 2005 hanno mostrato l'esistenza di un ottimo per il flusso d'aria utilizzato e, in condizioni Beaufort 4 con mare forza 1–1.5, è stato rilevato un risparmio di potenza pari al 12.9% a 12 kn (10.7% a 13 kn). Data la potenza richiesta per l'immissione d'aria pari al 3.3% (2.7%), il risparmio netto di potenza è stato del 9.6% (8%), molto inferiore a quello ottenuto su scala modello ma ugualmente significativo. Successivamente, Samsung ha applicato

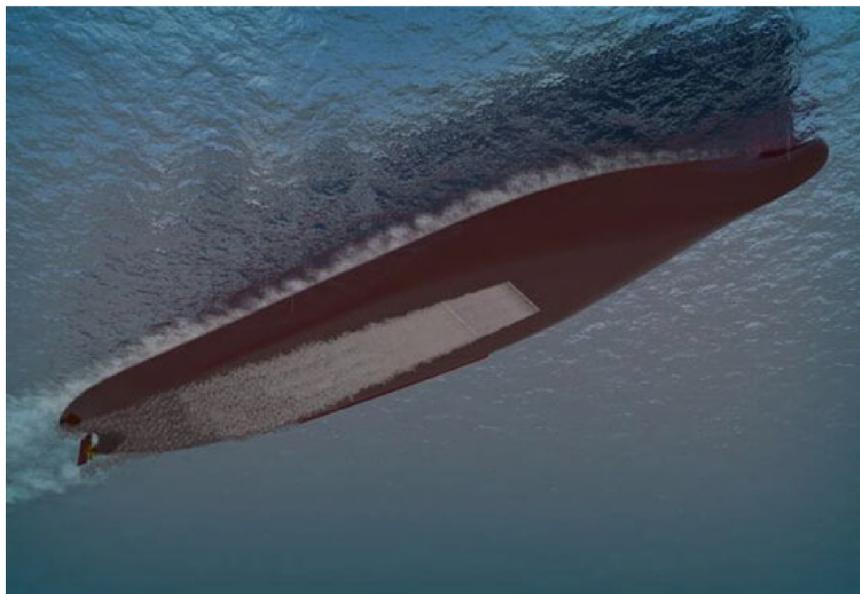


Figura 37: Vista dal basso del sistema *SHI Saver Air* montato su una nave monoelica.

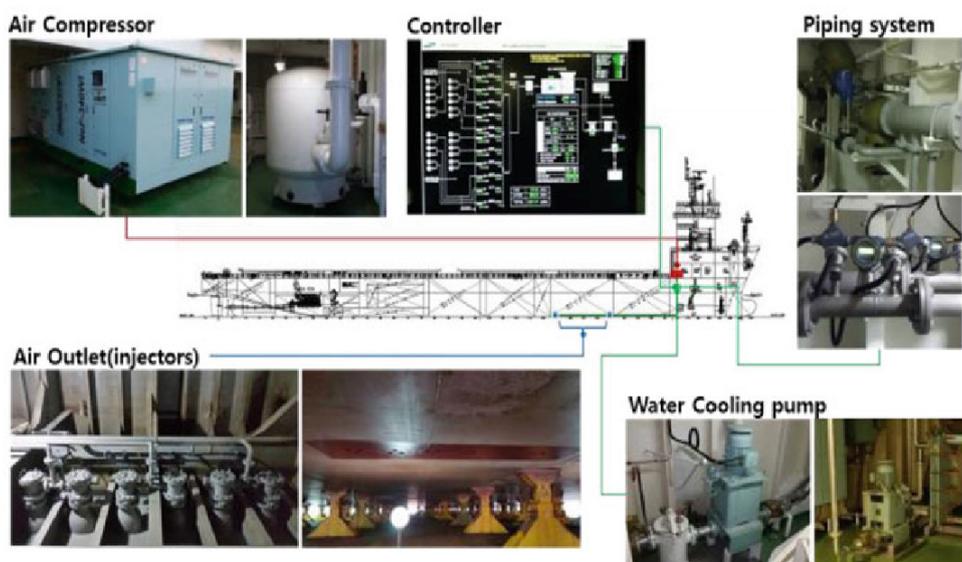


Figura 38: Il sistema di air lubrication installato sull'HCC della Samsung.

il suo sistema a una nave LNG per studiare le performances in condizioni operative, attivando una cooperazione con Shell International Trading, Gaslog, e l'American Bureau of Shipping progettando e installando un sistema Saver Air per una nave LNG da $150\,000\text{ m}^3$, operante tra l'Australia, la Corea del Sud e il Giappone (retrofit). Questa nave ($L \times B \times d$ pari a $290\text{ m} \times 45\text{ m} \times 11.5\text{ m}$) ha un rapporto tra superficie del fondo e superficie bagnata del 41%.

Utilizzando i risultati iniziali come input per una ottimizzazione del sistema, e analizzando i dati secondo le indicazioni della ISO 19030, Samsung prevede una riduzione di resistenza in condizioni operative pari al 6%. Nel 2017 Samsung ha ricevuto la prima commessa commerciale per il suo sistema di Air lubrication da parte della MSC Container Line. L'offerta riguardava uno di sei portacontainer da $23\,000\text{ TEU}$ e, in caso di esito positivo, sarebbe stata estesa alle restanti navi.

Un nuovo ordine è arrivato nel 2018 per due LNG dal $180\,000\text{ m}^3$ da parte della Celsius Tankers di Copenhagen, con una opzione per due ulteriori navi.

5.7 Sviluppo dell'Air Layer al WTSRI, Shanghai

Il Water Transportation Science Research Institute (WTSRI), Shanghai, China, ha condotto ricerche sui metodi di air lubrication a partire dagli anni '80. Durante questi anni, come documentato in [30, 31], sono state condotte la ricerca e l'applicazione sperimentale sull'utilizzo di film e layer d'aria iniettati sul fondo di navi aventi chiglia pressochè piatta e larga, basso dislocamento e basse velocità di crociera.

I test di rimorchio, effettuati nel 2011 con un mare forza 2–3 su una chiatta da 1000 t a valle della installazione del sistema, hanno misurato una riduzione della resistenza stimabile nel 20.1%, che potrebbe corrispondere a un risparmio energetico complessivo di circa il 15% una volta dedotto il costo delle soffianti d'aria.

Nuovi test sono stati effettuati su un porta-container costiero da 5500 t , 424 TEU di lunghezza complessiva pari a 122 m , equipaggiato con due motori principali azionanti due eliche, e con il sistema di air lubrication installato a bordo. I test sono stati condotti lungo la costa del Mare Cinese del Sud, con un vento scala Beaufort 5–6 e con un mare approssimativamente di stato 3–4. I risultati raggiunti (dichiarati) sono stati [31]:

- L'aria pompata dalle soffianti e iniettata sotto il fondo della nave forma un film di bolle in grado di ridurre la resistenza d'attrito di circa il 10–15% al confronto della nave originaria, con il sistema di insufflaggio in azione;
- La resistenza aggiuntiva, indotta dai dispositivi di iniezione dell'aria sulla chiglia della nave è pari a circa 1.5% della resistenza di attrito totale a sistema di insufflaggio spento.

Cai [31] dichiara che, sulla base dei test effettuati, il metodo basato sul film d'aria potrebbe ridurre la superficie dello scafo bagnata di circa il 40% per un portacontainer da 4200 TEU o 8000 TEU e, di conseguenza, ridurre la resistenza di attrito di circa il 20% e il consumo di combustibile del 15–20%.

5.8 Stato attuale delle installazioni di sistemi Air Lubrication nel mondo

Lo sviluppo dei nuovi sistemi di Air Lubrication descritti in questa sezione ha portato a una loro presenza su navi in esercizio operativo. Fino al 2018, possono essere identificati 23 vascelli con un ALS installato a bordo. Questi vascelli appartengono a una ampia varietà tipologica, come mostrato in Figura 39 [7], e dimensioni molto varie (Figura 40).

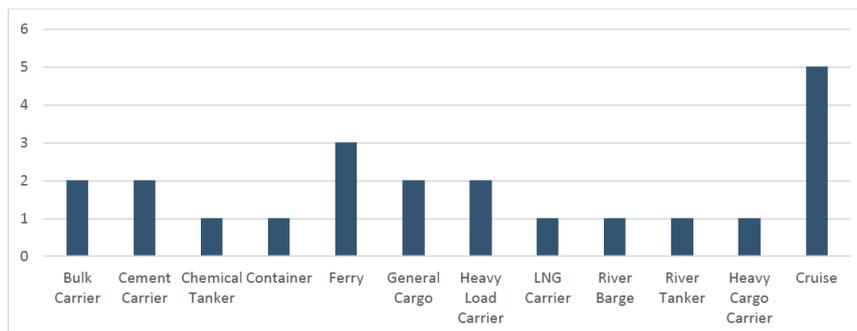


Figura 39: Occorrenza dei sistemi ALS per tipologia di nave [7].

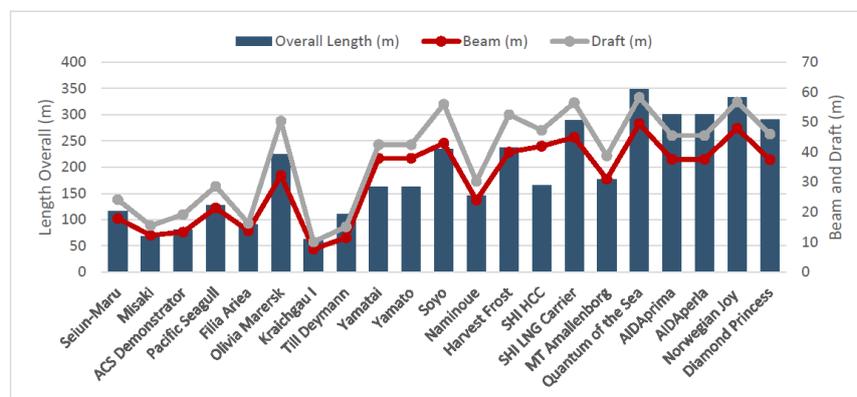


Figura 40: Dimensioni caratteristiche (L, B e D) dei vascelli con installati sistemi ALS [7].

Tra le navi dotate di sistema ALS esistenti e quelle consegnate di recente predomina la presenza di navi da crociera (Figure 39 e 41), i dati di queste ultime relativi ai sea trials non sono ancora stati pubblicati.

Year	Vessel	Type	Overall Length (m)	Beam (m)	Draft (m)	System
2015	Quantum of the Sea	Cruise	348.1	49.5	8.8	Foreship
2016	AIDAprima	Cruise	300	37.6	8	MHI
2017	AIDAperla	Cruise	300	37.6	8	MHI
2017	Norwegian Joy	Cruise	333.5	48	8.7	Silverstream
2018	Diamond Princess	Cruise	290.2	37.5	8.5	Silverstream

Figura 41: Vascelli con installati sistemi ALS consegnati di recente [7].

Date	Company	Vessel	Vessel Owner
Jan, 2018	SHI	(1) 23000 TEU super large container vessel	MSC
Aug, 2018	SHI	(2) LNG carriers	Celsius Tanker
Dec, 2018	Silverstream	(12) RORO carriers	Grimaldi Group

Figura 42: Vascelli sotto contratto per l'installazione di sistemi ALS [7].

Nel futuro a breve termine, invece, spicca la presenza di grandi navi LNG. Le indicazioni che si possono trarre da quanto esposto in questa sezione riguardano da un lato il notevole sviluppo delle tecniche ALS, dall'altro il loro inserimento tra le raccomandazioni dell'IMO. Infatti, i notevoli risultati dichiarati da costruttori e armatori dimostrano che è possibile ottenere significative riduzioni di resistenza e di potenza richiesta nelle condizioni operative della nave, ovvero per varietà di carico (e immersione), di velocità e di stato del mare. Che questi risultati siano ottenibili a costi relativamente moderati sembra ormai una opinione comune nei cantieri navali, e i margini di miglioramento per una ulteriore economizzazione della installazione dei sistemi ALS sembrano ampi.

D'altro canto, l'inclusione dei sistemi ALS nelle raccomandazioni IMO di buona pratica per la misura delle potenze coinvolte stabilisce un chiaro quadro normativo su cui basare la calibrazione del sistema.

Quest'ultimo punto, che per naturale estensione include anche l'adozione dell'indice EEDI per la valutazione dell'efficienza energetica delle navi, per alcuni autori può però avere l'effetto di dopare il mercato degli ALS. Giernalczyk e Kaminski [13] fanno infatti notare come, negli ultimi anni, l'interesse nella adozione di questi sistemi in fase di progettazione e costruzione di nuove navi sia scemato e, ove dovesse apparire, è usualmente imposto dalla necessità di ottenere il valore raccomandato dell'indice EEDI [13].

6 L'azione delle micro bolle sulla resistenza al moto

6.1 Generalità

L'idea di ridurre la resistenza all'avanzamento delle navi ponendo un sottile strato d'aria tra la carena e l'acqua, attraverso l'iniezione di micro bolle all'interno dello strato limite turbolento, è stata oggetto di intense ricerche a partire dalle prime osservazioni sperimentali che sono state fatte su questo fenomeno. Tuttavia, è mancante una teoria fondamentale di base del fenomeno. Nelle pagine che seguono sarà fornita una teoria che spiega la riduzione della resistenza per mezzo di micro bolle, focalizzando l'attenzione sull'azione delle micro bolle sulla resistenza al moto, ovvero spiegando in che modo agiscono le micro bolle sulla carena, e quali sono i fattori che permettono una diversa entità della riduzione della resistenza all'avanzamento della nave.

Le ricerche sperimentali eseguite nel campo hanno identificato, quali fattori caratteristici, la distribuzione locale e la forma della frazione di vuoto delle micro bolle nello strato limite e le dimensioni della bolla stessa. In particolare, per chiarire il meccanismo della riduzione della resistenza d'attrito per mezzo di micro bolle, sono stati eseguiti studi sperimentali con misurazioni laser riguardanti la generazione di micro bolle, i generatori stessi e le diverse tecniche per generare le micro bolle. Dato che la generazione di bolle prevede, inevitabilmente, un dispendio di energia, è necessario controllare le dimensioni delle bolle e la loro distribuzione nello strato limite per raggiungere un guadagno netto ottimizzato. Per questo motivo, da diverso tempo, sono state oggetto d'indagine diverse tecniche di generazione di micro bolle. Una delle tecniche maggiormente adottate è l'utilizzo dell'instabilità gas-liquido, per esempio con un ugello a getto turbinante con iniettore di micro bolle, oppure con un miscelatore statico e un ugello d'aria circondati da ugelli a getto liquido.

La formazione di bolle attraverso la decompressione di gas — dissoluzione di acqua — è una delle tecniche effettive per generare micro bolle, aventi diametro tra $20\ \mu\text{m}$ e $40\ \mu\text{m}$. L'acqua, sufficientemente ventilata sotto un'alta pressione, è introdotta nella sezione di prova, e questa miscela gas-acqua disciolta viene decompressa. Dato che la solubilità dell'aria in acqua è proporzionale alla pressione, l'aria in eccesso forma micro bolle. Le principali direzioni verso cui si indirizza la ricerca della tecnica di riduzione della resistenza per effetto di micro bolle includono lo sviluppo dei metodi d'iniezione delle micro bolle e la validazione dell'effetto di riduzione della resistenza in un tunnel d'acqua, come col metodo dell'elettrolisi, il metodo poroso, il già discusso metodo *WAIP*; lo studio sperimentale dei meccanismi e dei parametri chiave della tecnica di riduzione della resistenza attraverso micro bolle così come l'effetto delle dimensioni delle bolle, della concentrazione delle bolle, del tipo di gas; l'utilizzo di metodi numerici per la modellazione della tecnica di riduzione della resistenza, o attraverso metodi di simulazione diretta (DNS) computazionali; l'applicazione della tecnica che sfrutta le micro bolle per ridurre la resistenza al moto di una nave e, inizialmente, l'esecuzione di test in vasca navale.

Alcuni risultati importanti di queste ricerche sono la conferma dell'effetto di riduzione della resistenza al moto attraverso prove in vasca su lastre piane e modelli, e

soprattutto, parametro più importante per la riduzione della resistenza al moto, è la definizione della frazione di volume dell'aria iniettata nello strato limite dell'acqua. Tali conclusioni derivano, in particolare, da test condotti in tunnel d'acqua e in vasca navale, notevolmente diversi da quelli precedentemente descritti perché volti ad indagare l'azione delle micro bolle su lastre piane dal punto di vista strettamente fisico ed idrodinamico, molto lontano, dunque, da quanto si è trattato in precedenza. In questi test è stata misurata sperimentalmente la resistenza all'avanzamento, con e senza iniezione di micro bolle, di una lastra piana porosa, sospesa ai quattro angoli da quattro strisce d'acciaio, al cui centro è posto un dinamometro. Il sistema d'iniezione è posto di fronte al sistema di misurazione della lastra piana. Le resistenze della lastra piana sono state, inizialmente, misurate senza iniezione di micro bolle, per velocità comprese tra 2.45 m/s e 4.2 m/s. Successivamente, sono state misurate le resistenze della lastra piana con iniezione di micro bolle, per velocità di flusso compresa tra 12 l/min e 75 l/min, sia in tunnel d'acqua che in vasca navale.

I risultati dei test mostrano alcune differenze, a seconda che le prove sperimentali siano state eseguite o in tunnel d'acqua o in vasca. La prima è che il massimo effetto di riduzione della resistenza al moto per effetto di micro bolle nel tunnel d'acqua è circa dell'80%, mentre in vasca navale è solamente di circa il 30%. La seconda è che l'effetto di riduzione della resistenza aumenta monotonamente all'aumentare della velocità del flusso d'aria nel tunnel d'acqua. La terza è che l'effetto di riduzione della resistenza è solamente funzione della frazione del volume d'aria C_V ed è indipendente dalla velocità del flusso d'aria nel tunnel d'acqua; mentre in vasca navale l'effetto di riduzione della resistenza dipende dalla velocità con cui viene soffiata l'aria. Il meccanismo che crea la differenza nell'effetto di riduzione della resistenza della lastra piana, quando è provata in tunnel d'acqua e in vasca navale, assume un ruolo cruciale per l'applicazione della tecnica della riduzione della resistenza per effetto di micro bolle sulle navi al vero. Il più probabile meccanismo possono essere i diversi comportamenti delle micro bolle tra il tunnel d'acqua e la vasca. Nel primo caso, le micro bolle sono distribuite uniformemente attorno all'intera lastra, e ogni singola bolla si può individuare chiaramente; nel secondo caso, invece, relativo alla vasca navale, le bolle sono deformate irregolarmente, e molte bolle sono attaccate alla lastra.

I diversi comportamenti delle bolle in tunnel d'acqua e in vasca navale possono essere dovuti al diverso gradiente di velocità nello strato limite, e comportano un effetto di riduzione massimo della resistenza fino all'80% nel caso del tunnel d'acqua; mentre, nel caso della vasca navale, è solamente del 30% circa. Tale differenza di effetto della riduzione della resistenza nel tunnel d'acqua e in vasca navale può essere causata dal diverso comportamento prodotto dal differente gradiente di velocità. Simili studi sperimentali sulle micro bolle e la loro applicabilità sulle navi sono stati condotti in Giappone, in un tunnel d'acqua circolante progettato appositamente per gli esperimenti con le micro bolle. Si tratta di un tunnel con una lunga sezione di test (Figura 43), che permette misurazioni sulla persistenza dell'effetto di riduzione della resistenza d'attrito dovuta alle micro bolle nella direzione del flusso. È dotato anche di un serbatoio di deposito, che permette continui test sulle micro bolle. Mediante l'applicazione di un sensore di tipo dinamometrico, si è misurata una riduzione del 40% grazie alle micro

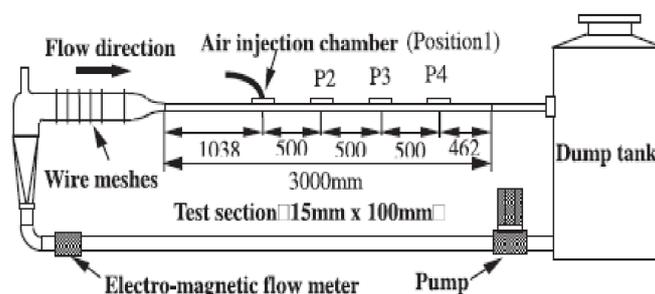


Figura 43: Tunnel d'acqua circolante per gli esperimenti con le micro bolle.

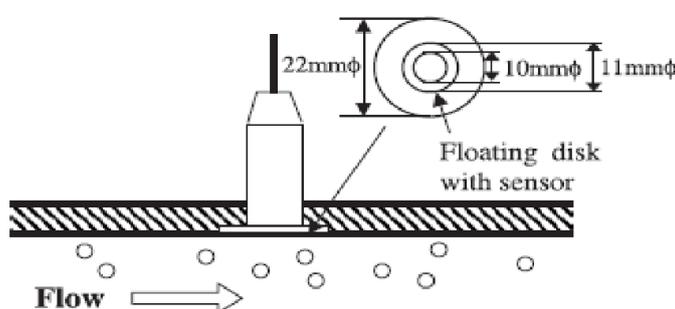


Figura 44: Sensore che misura l'attrito superficiale.

bolle. In particolare, l'attrito superficiale è stato misurato nella sezione di prova con e senza micro bolle, usando dei sensori (Sankei Engineering) di tipo dinamometrico, posti al centro della sezione di prova, e sottoposti a preventiva calibrazione, sia statica che dinamica. L'attrito fu misurato a tre differenti velocità, alle quali si osservò una riduzione approssimativamente del 30%, che aumentava al crescere della quantità d'aria iniettata.

Altri studi furono, poi, eseguiti con un'altra tecnica di misurazione del flusso, detta *Particle Tracking Velocimetry* (PTV), utilizzata per misurare i campi di velocità. Questa tecnica permette di determinare simultaneamente il campo di velocità del flusso, le dimensioni e la distribuzione delle micro bolle iniettate nello strato limite di un flusso turbolento. Le dimensioni delle micro bolle, infatti, sono un parametro che influenza i guadagni nella riduzione della resistenza d'attrito; queste dipendono dalla quantità di gas pompata attraverso le lastre porose, con fori aventi diametri, comunemente, di qualche micron, e dalla velocità del liquido, ovvero sia le dimensioni delle micro bolle generate diminuiscono all'aumentare della velocità del flusso liquido.

Alternativamente alla lastra porosa, si può sfruttare il fenomeno dell'elettrolisi per generare le micro bolle, come teorizzato da McCormick e Bhattacharyya [32], e di seguito sviluppato negli anni successivi dai giapponesi. In questo caso le micro bolle sono generate sulla superficie di un filo metallico, attraverso cui è applicata un'alta tensione o corrente. In generale, la grandezza massima delle micro bolle generate è

quella del diametro del filo metallico, che può essere ottimizzato mediante una piccola attrezzatura di prova in Platino al 99.9%, che permette di manipolare alte tensioni e alte correnti. Furono testati due diversi diametri del filo metallico, $250\ \mu\text{m}$ e $76\ \mu\text{m}$. Quando il generatore di tensione trasmette la sua tensione (circa $30\ 000\ \text{V}$), si producono le bolle d'idrogeno sull'anodo, mentre sul catodo si generano le bolle d'ossigeno. L'anodo produce una densità maggiore di bolle rispetto al catodo, e le bolle sono più piccole. È stato scelto il diametro del filo metallico di $76\ \mu\text{m}$ per produrre micro bolle; questo perché produce bolle più piccole. A seguito di questi studi è stato possibile constatare che la riduzione della resistenza per effetto di micro bolle dipende dalla frazione di vuoto; è noto, infatti, che un aumento della frazione di vuoto nello strato limite porta ad un aumento dell'entità della riduzione della resistenza, finché non è raggiunto un valore massimo.

6.2 Simulazioni sperimentali e numeriche

Oltre a queste simulazioni sperimentali, al fine di chiarire il meccanismo per il quale si verifica una riduzione della resistenza per mezzo di micro bolle, sono stati effettuati altri esperimenti e simulazioni numeriche.

Per quanto riguarda le simulazioni sperimentali, è stato utilizzato olio al silicone, dieci volte più viscoso dell'acqua, per abbassare il numero di Reynolds a quello della simulazione numerica, di cui si tratterà nelle righe immediatamente seguenti, e con tensione superficiale di un terzo di quella dell'acqua.

Nel caso della simulazione numerica sono stati utilizzati due metodi numerici; uno è il "Metodo ad accoppiamento di forza" (Force Coupling Method), in cui si assume che le bolle siano rigide, e l'influenza delle bolle sul flusso è simulata da forze superficiali. L'altro è il "Metodo a tracciamento frontale" (Front Tracking Method), in cui la fase liquida e la fase gassosa sono disciolte simultaneamente, e la bolla può essere deformata.

Questi esperimenti e simulazioni numeriche differiscono alquanto tra di loro per diversi aspetti. Il primo è l'effetto di dispersione delle bolle: nell'esperimento le bolle che sono iniettate dalla parete sono, inizialmente, concentrate vicino alla parete e sono gradualmente disperse lontano dalla parete, poi, a causa della turbolenza quando avanzano lungo la direzione del flusso; c'è, quindi, una regione di transizione. Un'altra condizione diversa è l'intervallo dei numeri di Reynolds: nella simulazione numerica il numero di Reynolds è di uno o due ordini di grandezza più piccolo di quello dell'esperimento. Lo studio sperimentale si articola in quattro esperimenti, condotti in due diversi canali dritti (cui faremo riferimento come "canale di tipo A" e "canale di tipo B"), di diverse dimensioni utilizzando, alternativamente, prima acqua e poi olio al silicone.

6.2.1 Sperimentazioni nel canale di flusso ad acqua

Queste sperimentazioni sono atte ad una misurazione sincronizzata della forza di scorrimento indotta sulla parete e al comportamento delle bolle grandi. Lo studio sperimentale è stato condotto, inizialmente, nel canale ad acqua "di tipo A1", in cui l'apparato sperimentale è costituito da un canale rettangolare orizzontale di resina acrilica traspa-

Tabella 2: Dimensioni delle sezioni di test del canale.

Canale	Fluido	L [mm]	H [mm]	W [mm]
A1	Acqua	6000	10	100
A2	Olio al silicone	6000	10	100
B1	Acqua	-	40	-
B2	Olio al silicone	6000	20	160

rente. Alcune finestre di misurazione sono state poste nella parete superiore del canale a intervalli di 250 mm nella direzione del flusso. Le bolle d'aria sono state iniettate nel canale orizzontale attraverso il dispositivo d'iniezione dell'aria; questo dispositivo ha una lastra porosa fatta di allumina (ossido di Alluminio Al_2O_3) con un diametro nominale dei pori di 60 μm . L'area d'iniezione è di 1448 mm^2 . Le bolle sono state generate con aria compressa soffiata dal di fuori del canale. L'acqua circola nel canale e le bolle sono eliminate nella regione sottostante, facendo turbinare il fluido in un deposito removibile di bolle.

La forza locale di scorrimento indotta sulla parete superiore del canale è misurata da un trasduttore di scorrimento, avente una parte sensibile di 10 mm di diametro e carico massimo di 1 N, corrispondente a uno sforzo di taglio di 12.5 Pa. Per ottenere la forza locale di scorrimento, i dati sono registrati in un PC attraverso un amplificatore e un registratore di dati. Quello che emerge da questa misurazione è che l'attrito superficiale inizialmente aumenta all'aumentare della frazione di vuoto e poi inizia a diminuire ad una maggiore frazione di vuoto. In questo processo il fattore di guadagno (rapporto variazione della resistenza/frazione di vuoto) è maggiore di uno in valore assoluto; questo implica un controllo sensibile dell'attrito di superficie per effetto delle micro bolle.

Risulta evidente da questa misurazione l'esistenza di una correlazione negativa tra l'attrito superficiale locale e la frazione locale di vuoto. In particolare, l'attrito diminuisce drasticamente nella parte posteriore della singola bolla. Inoltre, è possibile constatare che l'attrito superficiale medio assume un valore massimo nel caso di bolle iniettate di circa 10 mm; dimensioni maggiori e minori di questa accrescono la riduzione della resistenza. Infine, l'attrito superficiale medio locale all'interno della singola bolla diminuisce all'aumentare della lunghezza della bolla in direzione del flusso. Nel caso in cui le bolle siano di diametro maggiore di 50 mm (grandezza critica, $d/H = 5$), l'attrito superficiale diventa pari a zero.

6.2.2 Sperimentazioni nel canale di flusso ad olio al silicone

L'olio al silicone e l'aria sono utilizzati per realizzare un canale di flusso avente basso numero di Reynolds per corrispondere con la condizione di simulazione numerica diretta (*DNS*). L'utilizzo dell'olio al silicone assicura al meglio la stabilità dell'interfaccia gas-liquido. Prima della realizzazione della misurazione, vengono esaminate le caratteristiche medie della generazione di bolle nell'olio al silicone, che si stima esse-

re alquanto diverso dal caso dell'acqua. Nell'esperimento della generazione di bolle è utilizzato un diverso canale "di tipo A2" (le cui caratteristiche sono riportate nella soprastante tabella), riempito di olio al silicone anziché acqua; questo comporta una diversa generazione delle bolle, pur rimanendo costante la velocità media del liquido in entrambi i casi, pari a 1.5 m/s. Utilizzando comuni tubi capillari, che sono stati usati per gli esperimenti nel tunnel d'acqua, si forma una lunga e costante cavità dietro al singolo tubo, nel caso in cui si utilizzi olio al silicone, a causa dell'elevata viscosità. Per questo motivo è stata realizzata una lastra per la generazione di bolle, provvista di due linee risultanti da piccoli fori di piccolo diametro, pari a $50\ \mu\text{m}$, utilizzando la tecnica di trapanazione al laser. Utilizzando questa lastra, sono stabilmente generate bolle piccole ed uniformi di diametro inferiore ad 1 mm. Ci sono tre fattori per questo successo:

- le bolle implodono facilmente grazie allo sforzo di scorrimento del liquido, a causa di una bassa tensione superficiale;
- lo stesso sforzo di scorrimento è elevato nel caso di un'alta viscosità;
- non vi è coalescenza quando la superficie della bolla è stabile, cioè quando non comporta contaminazione nel caso di olio al silicone.

Quello che risulta a seguito degli studi condotti in canale di flusso ad olio di silicone è che l'iniezione delle bolle procura un aumento del coefficiente d'attrito di meno del 50% nel caso di flussi laminari nel canale. Nella regione di transizione da flussi laminari a turbolenti, il coefficiente d'attrito salta su del doppio, perché le bolle attivano la transizione di flusso turbolento. Il rapporto incrementale del coefficiente d'attrito eguaglia il rapporto dei coefficienti d'attrito turbolento/laminare. Dopo il passaggio al flusso turbolento, il rapporto incrementale è ridotto gradualmente dall'aumento della frazione di vuoto. Nel caso in cui il flusso sia originariamente turbolento, il mescolamento delle bolle produce una certa riduzione della resistenza.

6.3 Simulazione numerica del canale di flusso a micro bolle

Al fine di confrontarli direttamente con l'esperimento utilizzando olio di silicone, sono state eseguite simulazioni numeriche dirette per canali di flusso a micro bolle. Sono stati impiegati due tipi di metodi di simulazione diretta, come precedentemente accennato: il "Metodo ad accoppiamento di forza" (Force Coupling Method) ed il "Metodo a tracciamento frontale" (Front Tracking Method).

6.3.1 Metodo ad accoppiamento di forza (*FCM*)

Nel caso del "Metodo ad accoppiamento di forza" sono state eseguite simulazioni numeriche sia per flusso laminare che turbolento. Nella simulazione che utilizza questo metodo, la bolla è trattata come una sfera rigida e l'interazione bolla-liquido è semplicemente rappresentata dalla forza superficiale. Nel caso di flusso laminare, la turbolenza, che inizialmente è indotta dal moto delle bolle, scompare all'evolvere del flusso.

Le bolle, inizialmente distribuite solamente nel canale, migrano attraverso la parete superiore a causa della loro galleggiabilità. Nel livello completamente sviluppato, la distribuzione media della velocità diviene quasi identica a quella del flusso monofase. L'attrito superficiale aumenta con le bolle approssimativamente del 20% nella fase iniziale. Questa tendenza concorda col risultato sperimentale, utilizzando l'olio al silicone, ad eccezione del fatto che l'incremento è di circa il doppio nell'effettivo esperimento. Nel caso di flusso turbolento, l'attrito superficiale aumenta aggiungendo bolle. La componente fluttuante della velocità media nella direzione del flusso diventa più piccola e le componenti normali alla parete e alla direzione del flusso diventano maggiori, poiché risultano nell'omogeneizzazione delle tre componenti di fluttuazione delle velocità. Le velocità di fluttuazione delle bolle sono molto più piccole di quelle del liquido.

6.3.2 Metodo a tracciamento frontale (*FTM*)

Nel caso del metodo a *tracciamento frontale* sono eseguite simulazioni numeriche per flusso turbolento. In questo modo il problema dell'interfaccia mobile tra due fluidi è risolto con un sistema a griglia rettangolare. La condizione di contorno locale è trattata più rigorosamente rispetto a quella del metodo precedentemente descritto. In particolare possiamo catturare la deformazione della bolla. Utilizzando la tecnica del *FTM* possiamo eseguire la simulazione numerica diretta del flusso delle micro bolle; possiamo, poi, discutere l'effetto di deformazione della bolla sulla riduzione dell'attrito superficiale verificando le differenze e le analogie tra i risultati dei metodi *FCM* e *FTM*. Gli scopi di questo studio numerico sono quelli di scoprire l'influenza della deformazione della bolla sulla riduzione della resistenza per effetto delle micro bolle e di validare le simulazioni numeriche dirette attraverso un confronto diretto con l'esperimento a bassi numeri di Reynolds.

Ciò che emerge dall'esecuzione di simulazioni numeriche dirette utilizzando il metodo *FTM*, eseguite per il canale di flusso con bolle deformabili nel caso di flusso turbolento, è che il calcolo di casi di bolle, per un tempo sufficientemente lungo per ottenere valori statistici, è possibile solo fino a un valore del numero di Weber pari a $We = 100$, perché il calcolo cresce troppo a causa dell'eccessiva deformazione della bolla. Inoltre, l'attrito superficiale tende ad aumentare se si aggiungono al flusso bolle meno deformabili (caratterizzate da un numero di Weber pari a $We = 50$) e tende a diminuire se al flusso vengono aggiunte bolle più deformabili ($We = 100$), anche se questa tendenza non è molto chiara. Per questo motivo si deve affermare che, anche se le bolle aggiunte a questo basso numero di Reynolds aumentano l'attrito superficiale, le bolle deformabili danno un contributo minore all'aumento dell'attrito superficiale. Infine, il tensore degli sforzi di Reynolds aumenta aggiungendo bolle meno deformabili ($We = 50$), che concorda con la tendenza dell'attrito superficiale.

Riferimenti bibliografici

- [1] Olivier J. G. J., Janssens-Maenhout G., Muntean M. e Peters J. A. H. W. Trends in global CO₂ emissions: 2016 Report. European Commission, Joint Research Centre (JRC), Directorate C — Energy, Transport and Climate. https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-trends-in-global-co2-emissions-2016-report-2315_4.pdf, 2019. Ultimo accesso: 19-10-2021.
- [2] IMO, International Maritime Organization. MEPC.1/Circ.815. Guidance on treatment of innovative energy efficiency technologies for calculation and verification of the attained EEDI (Energy Efficiency Design Index). <https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/OurWork/Environment/Documents/Circ-815.pdf>, 2013.
- [3] IMO, International Maritime Organization. MEPC.200(62). Amendments to the annex of the protocol of 1978 relating to the international convention for the prevention of pollution from ships, 1973. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.200\(62\).pdf](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.200(62).pdf), 2011.
- [4] Agenzia Italiana per la Cooperazione allo Sviluppo. Agenda 2030 per uno sviluppo sostenibile. <https://www.aics.gov.it/home-ita/settori/obiettivi-di-sviluppo-sostenibile-sdgs/>, 2000. Ultimo accesso: 25-10-2021.
- [5] Smith T., O’Keeffe E., Hauerhof E., Raucci C., Bell M., Deyes K., Faber J. e Hoen T. Reducing the maritime sector’s contribution to climate change and air pollution. scenario analysis: take-up of emission reduction options and their impacts on emissions and costs. a report for the department for transport. https://assets.publishing.service.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/816018/scenario-analysis-take-up-of-emissions-reduction-options-impacts-on-emissions-costs.pdf, 2019. Ultimo accesso: 19-10-2021.
- [6] IMO, International Maritime Organization. MEPC.308(73). Guidelines on the Method of Calculation of the Attained Energy Efficiency Design Index (EEDI) for New Ships. [https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308\(73\).pdf\(accessedon25October2021\)](https://wwwcdn.imo.org/localresources/en/KnowledgeCentre/IndexofIMOResolutions/MEPCDocuments/MEPC.308(73).pdf(accessedon25October2021)), 2018.
- [7] ABS Group. Air lubrication technology. <https://ww2.eagle.org/content/dam/eagle/advisories-and-debriefs/Air%20Lubrication%20Technology.pdf>, 2019. Ultimo accesso: 25-10-2021.
- [8] Park S. H. e Lee I. Optimization of drag reduction effect of air lubrication for a tanker model. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 10(4):427–438, 2018.
- [9] Ahmadzadehtalatapeh M. e Mousavi M. A review on the drag reduction methods of the ship hulls for improving the hydrodynamic performance. *International Journal of Maritime Technology*, 4(0), 2015.

- [10] Perlin M., Dowling D. R. e Ceccio S. L. Freeman scholar review: Passive and active skin-friction drag reduction in turbulent boundary layers. *Journal of Fluids Engineering, Transactions of the ASME*, 138(9), 2016.
- [11] Foeth E. J. Decreasing frictional resistance by air lubrication. In *Proceedings of the 20th International HISWA Symposium on Yacht Design and Yacht Construction.*, Amsterdam, Netherlands, 17-18 November 2008.
- [12] Silberschmidt N., Tasker D., Pappas T. e Johanneson J. Silverstream system - air lubrication performance verification and design development. In *Technologies for the ship of the future*, HIPER 2016 Conference, Cortona, Italy, 12-19 October 2016.
- [13] Giernalczyk M. e Kaminski P. Assessment of the propulsion system operation of the ships equipped with the air lubrication system. *Sensors (Switzerland)*, 21(4): 1–15, 2021.
- [14] Olmer N., Comer B., Roy B., Mao X. e Rutherford D. Greenhouse gas emissions from global shipping, 2013-2015. <https://theicct.org/publications/GHG-emissions-global-shipping-2013-2015>, 2017. Ultimo accesso: 19-10-2021.
- [15] 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.
- [16] Bertram V. *Practical Ship Hydrodynamics*. Butterworth-Heinemann, Oxford, second edition, 2012.
- [17] Latorre R. Ship hull drag reduction using bottom air injection. *Ocean Engineering*, 24(2):161–175, 1997.
- [18] Moriguchi Y. e Kato H. Influence of microbubble diameter and distribution on frictional resistance reduction. *Journal of Marine Science and Technology*, 7(2): 79–85, 2002.
- [19] Shen X., Ceccio S. L. e Perlin M. Influence of bubble size on micro-bubble drag reduction. *Experiments in Fluids*, 41(3):415–424, 2006.
- [20] Sanders W. C., Winkel E. S., Dowling D. R., Perlin M. e Ceccio S. L. Bubble friction drag reduction in a high-reynolds-number flat-plate turbulent boundary layer. *Journal of Fluid Mechanics*, 552:353–380, 2006.
- [21] Watanabe O. e Shirose Y. Measurement of drag reduction by microbubbles. *Ishikawajima-Harima Giho/IHI Engineering Review*, 39(2):89–93, 1999.
- [22] Kodama Y., Takahashi T., Makino M. e Ueda T. Conditions for microbubbles as a practical drag reduction device for ships. In *Proceedings of ICMF'04, 5th International Conference on Multiphase Flow*, Yokohama, Japan, May 30 - June 4 2004.

- [23] 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.
- [24] Pavlov G. A., Yun L., Bliault A. e He S. *Reducing Friction Resistance*, pages 85–122. Springer, New York, NY, 2020.
- [25] Aarnio M. e Lundquist H.-P. Bubble system for ships, 2014. UK Patent Application GB 2505236 A.
- [26] Aarnio M. e Lundquist H.-P. Bubble system for ships, 2014. UK Patent GB 2505281 B.
- [27] de Freitas L., Silberschmidt N., Pappas T. e Johanneson J. Full scale performance measurement and analysis of the silverstream air lubrication system. In *Full scale ship performance*, RINA Conference, London, UK, 24-25 October 2018.
- [28] 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.
- [29] Lee J., Kim J., Kim B., Jang J., McStay P., Reptakis G. e P. Fitzpatrick. Full scale applications of air lubrication for reduction of ship frictional resistance. In *SNAME Maritime Convention*, HIPER 2016 Conference, Houston, USA, 24-28 October 2017.
- [30] Cai J. Q. Theory and technology for reducing resistance of ships by a thin air film. In *Proceedings of HPMV Conference*, Shen Zheng, China, Nov 12 - 15 1992.
- [31] Cai J. Q. Air film (layer) energy-saving technology and its application tests on ships. In *Proceedings of HPMV Conference*, Shanghai, China, 2013.
- [32] McCormick M. E. e Bhattacharyya R. Drag reduction of a submersible hull by electrolysis. *Naval Engineers Journal*, 85(2):11–16, 1973.