

ALLA RICERCA DELLE REGOLAZIONI OTTIMALI DI UNA BARCA A VELA MEDIANTE IL MESH MORPHING

M.E. BIANCOLINI, I.M. VIOLA, S. RAMIREZ

In questo articolo presentiamo alcuni dei risultati ottenuti nell'ambito di una collaborazione attiva da qualche anno fra l'Università di Roma Tor Vergata e lo Yacht and Superyacht Research Group del Regno Unito. Il tema della collaborazione riguarda l'uso del mesh morphing in campo nautico e ha coinvolto ricercatori, professori e studenti dei due centri di ricerca.



Il mesh morphing consente di modificare la mesh del modello fluidodinamico della barca in modo rapido ed efficace; le modifiche possono riguardare sia la forma dei componenti che la loro posizione relativa. Il metodo risulta pertanto utile sia in fase di progettazione, per ottimizzare la forma delle superfici, che in fase di set-up, consentendo di modificare le regolazioni delle vele e l'assetto della barca (Biancolini et al., 2014). L'efficacia dell'approccio viene mostrata in questa sede lavorando su una geometria

di riferimento; l'accuratezza del modello CFD (solutore ANSYS Fluent®) relativo a tale geometria è stata dimostrata in passato mediante un confronto con prove sperimentali svolte in galleria del vento, sia in termini di forze totali che di distribuzioni di pressione. Per studiare l'ottimizzazione dell'assetto da usare in un Velocity Prediction Program, il modello CFD è stato reso parametrico variando: il mainsail sheeting angle, il genoa sheeting angle, l'heeling angle e l'apparent wind angle (AWA).

INTRODUZIONE

Le vele sono progettate per ottenere le massime prestazioni della barca. In condizioni di vento moderato questo risultato si ottiene massimizzando la componente della forza aerodinamica diretta secondo la direzione di avanzamento. Con venti più forti l'ottimizzazione dipende anche dalle caratteristiche idrostatiche e idrodinamiche dell'imbarcazione.

La simulazione numerica è diventato uno strumento fondamentale per il progetto delle vele a

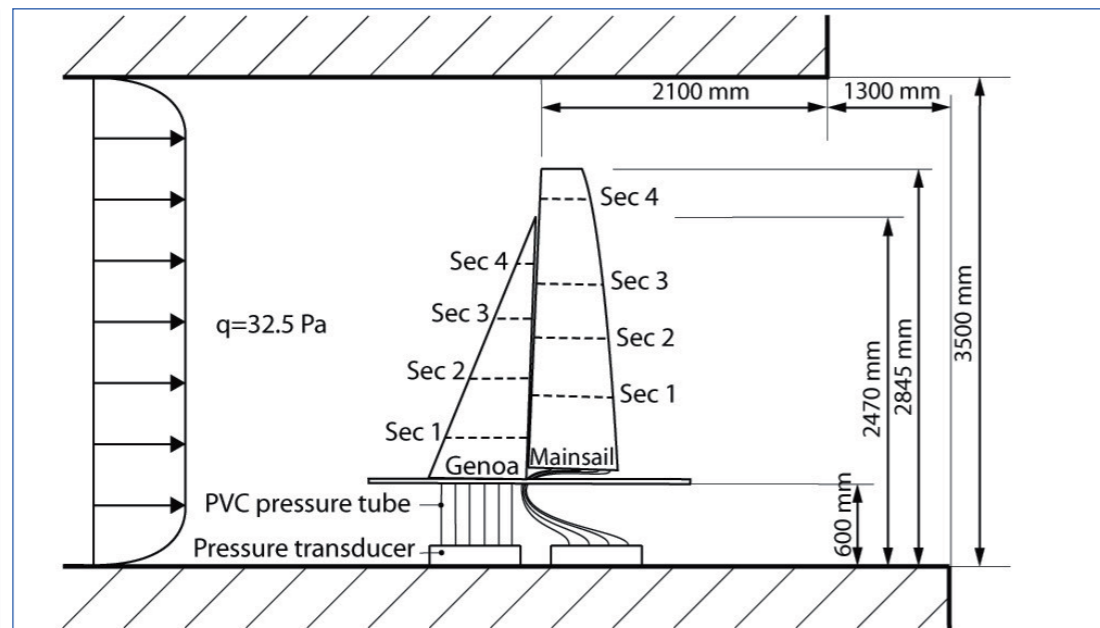
partire dagli anni '70, quando si affermarono i codici a potenziale. In tempi recenti si è assistito ad un'importante crescita delle risorse di calcolo disponibili per i calcoli CFD e molti autori hanno dimostrato che anche in questo settore è possibile ottenere analisi CFD molto affidabili in termini di forze totali ed in ottimo accordo con i dati sperimentali. Nel 2011 sono stati condotti degli esperimenti su vele rigide con acquisizione della pressione lungo i profili (Viola et al., 2011). Grazie a questi esperimenti è stato possibile dimostrare come il trim delle vele influenza la distribuzione di pressione e come sia possibile rifinire e validare il modello CFD su quantità locali piuttosto che globali.

Nell'industria delle vele si utilizzano ancora metodi basati sui flussi a potenziale in fase di progetto, per via del basso costo di calcolo e per la semplicità nella generazione di una nuova configurazione, requisiti che consentono di vagliare numerose configurazioni diverse. Ogni geometria scelta deve essere infatti valutata per diverse condizioni operative, e per ogni condizione operativa è necessario trovare lo sheeting angle ottimo, il quale risulta essere specifico rispetto alla geometria scelta. La regolazione delle vele dipende principalmente dalle posizioni delle scotte, dagli angoli di twist ed in misura minore dalla profondità di corda e dalla curvatura, oltre che da altri parametri meno influenti.

L'esigenza industriale sta spingendo verso una maggiore accuratezza e quindi, anche considerando le grandi potenze di calcolo disponibili, verso dei workflow completamente basati su analisi RANS invece che sui flussi a potenziale. Uno dei maggiori ostacoli in tal senso è l'elevato tempo necessario per la preparazione di un modello CFD affidabile relativo ad una singola geometria; tipicamente il workflow che porta dal modello CAD al modello CFD è composto da diverse fasi (mesh di superficie, mesh di volume, condizioni al contorno, set-up del solutore) ed è talmente complesso da rendere impraticabile un'analisi di tipo parametrico che consenta di esplorare diverse variazioni rispetto alla geometria base.

Il mesh morphing si sta affermando sempre di più come strumento per la definizione di un modello CFD parametrico. Le nuove forme vengono ottenute da quella base deformandone la mesh, ovvero cambiando solo la posizione dei nodi. Questa tecnica oltre ad essere solitamente più veloce rispetto al remeshing, consente di preservare la stessa topologia. Se le distorsioni

Fig. 1 - Caratteristiche del modello utilizzato in galleria.



non sono tali da inficiare la qualità del calcolo, avere una mesh consistente porta a numerosi vantaggi fra cui: la possibilità di inizializzare il calcolo con condizioni di flusso già risolte per la baseline (riducendo notevolmente il tempo di convergenza), eliminazione del rumore di remeshing (per quanto controllata, una piccola dipendenza del risultato dalla mesh è sempre presente), uso del metodo in analisi di tipo evolutivo (interazione fluido struttura). La prima soluzione industriale basata sul mesh morphing RBF è stata introdotta nel 2009 con il software RBF Morph™ che dispone di un solutore RBF ad alte prestazioni che scala come N1.6. Una descrizione completa dello strumento è riportata in (Biancolini, 2012).

METODO PROPOSTO

L'ottimizzazione delle regolazioni si basa su due elementi fondamentali: un modello CFD parametrico ed uno strumento in grado di guidare tale modello parametrico verso la configurazione ottimale. Nello studio qui presentato sono state usate le RBF sia per rendere parametrica la forma della mesh mediante algoritmi di mesh morphing, sia per la fase di ottimizzazione come strumento di interpolazione nello spazio dei parametri di forma.

Il punto di partenza è dato da un modello CFD la cui accuratezza sia stata verificata rispetto alle evidenze sperimentali. Mediante le tecniche di mesh morphing tale modello diventa quindi parametrico, ovvero capace di cambiare la sua forma in modo continuo in base ai parametri di

ingresso desiderati, ovvero gli sheeting angle di randa e genoa, l'AWA e l'heeling angle. Per quanto riguarda il metodo di ottimizzazione, considerando l'elevato costo di una singola valutazione CFD, si è deciso di utilizzare l'approccio del meta-modelling, ovvero di utilizzare una tabella di punti di progetto per la quale ogni configurazione è calcolata mediante un'analisi CFD completa. I risultati ottenuti, ovvero portanza e resistenza, vengono quindi manipolati al fine di ottenere le grandezze di interesse, ovvero le componenti di spinta frontale e laterale, allineate con l'imbarcazione. Le risposte vengono quindi estrapolate mediante un meta modello che consente di stimare la risposta con continuità anche nei punti che non sono stati calcolati nella tabella, ovvero di ottenere con continuità la superficie di risposta. Visto che il costo di valutazione dei parametri di output sulla superficie di risposta è bassissimo, si può ricercare l'ottimo in modo rapido ed efficiente, ci siamo quindi avvalsi di metodi screening, ovvero le risposte sono state valutate su una griglia equispaziata molto fitta.

Il modello CFD riproduce una geometria studiata sperimentalmente (Viola et al, 2011), tramite la quale, sono stati studiati nello specifico i modelli rigidi di randa e genoa di un AC33-Class provati sperimentalmente presso la galleria del vento dell'Università di Auckland. Si tratta di una galleria aperta con una sezione di prova ampia 7 m e alta 3.5 m; il pavimento e il soffitto si estendono rispettivamente per e a valle della sezione di uscita. Le vele sono state fissate mediante fili trasparenti al flusso a valle della se-

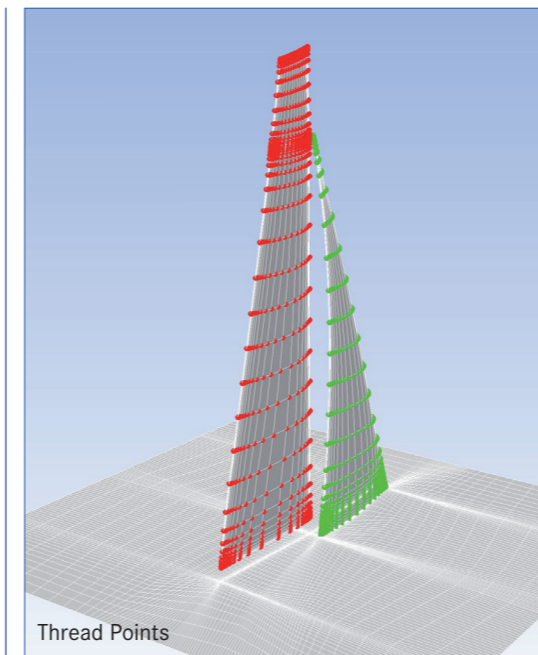


Fig. 2 - Due insiemi di punti RBF consentono di controllare separatamente il movimento delle due vele.

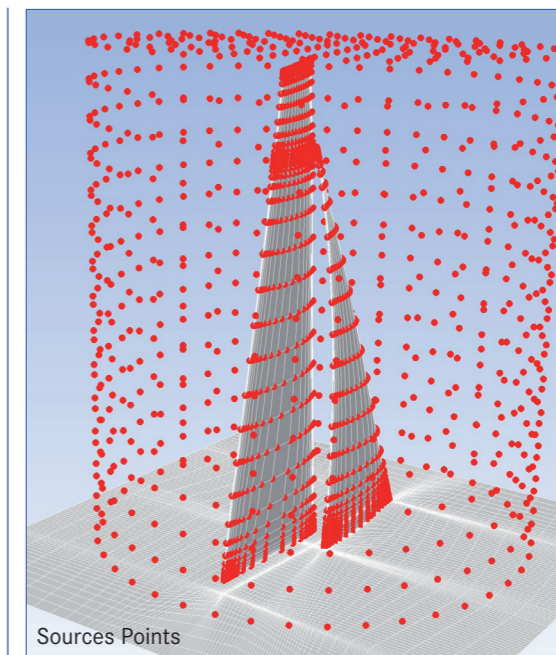


Fig. 3 - Punti di controllo del problema completo.

zione di uscita. La posizione relativa delle vele è tale da rappresentare una condizione con barca verticale e. Albero e scafo non sono presenti nel modello, lo scafo è stato sostituito da un piano in legno al piede del genoa rappresentativo sia dello scafo che del pelo libero dell'acqua. L'esperimento è illustrato in Figura 1. La pressione è stata misurata in quattro sezioni orizzontali del genoa e della randa. I test sono stati ripetuti per quattro valori dello sheeting angle del genoa (G1-4) e quattro valori dello sheeting angle della randa (M1-4), ruotando le vele attorno agli assi definiti dai punti estremi dei bordi di attacco a intervalli rispettivamente di 1.4° e 1°, rispettivamente (angolo genoa 0, 1.4°, 2.7°, 4.1° denominati con G1, G2, G3 and G4 e angolo randa 0, 1°, 2°, 3° denominati con M1, M2, M3 and M4). Per un totale di 16 combinazioni di trim. La regolazione che permette la massima spinta è la G3M2. Il set-up sperimentale è stato modellato con analisi CFD utilizzando una mesh strutturata di tipo esaedrico generata con ANSYS ICEM CFD (versione 12.0.1) risolta mediante ANSYS Fluent® (versione 14.0.0). Il problema RANS incomprimibile e newtoniano è stato affrontato con un solutore basato sulla pressione e un approccio ai volumi finiti. La turbolenza è stata rappresentata con un SST con correzione per bassi numeri di Reynolds. La griglia consente di mantenere nelle zone in depressione dove si ha separazione e nel lato di sopravvento,

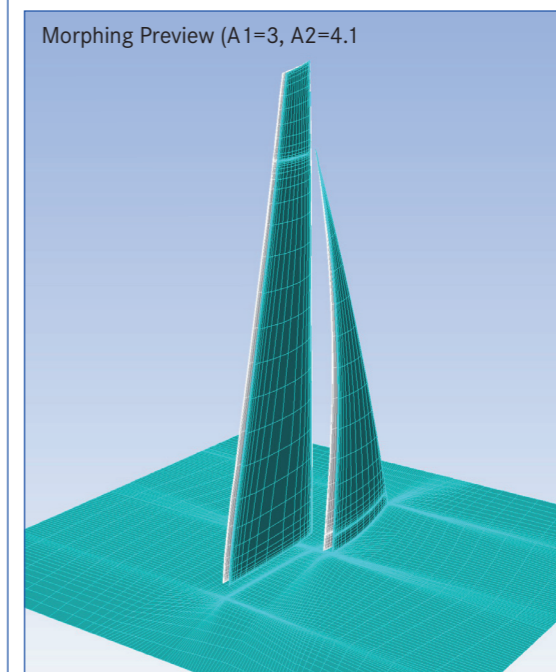


Fig. 4 - Anteprima del morphing con le amplificazioni sopra indicate.

dove lo strato limite rimane attaccato. La griglia è mostrata nella Figura 2. L'accoppiamento fra velocità e pressione avviene con lo schema SIMPLEC. Sono stati usati schemi al secondo ordine visto che la convergenza con schemi del terzo ordine è risultata problematica. I calcoli sono stati condotti usando una Workstation con due processori (16 core) e 128 GB di RAM utilizzando Windows 7 Professional a 64bit.

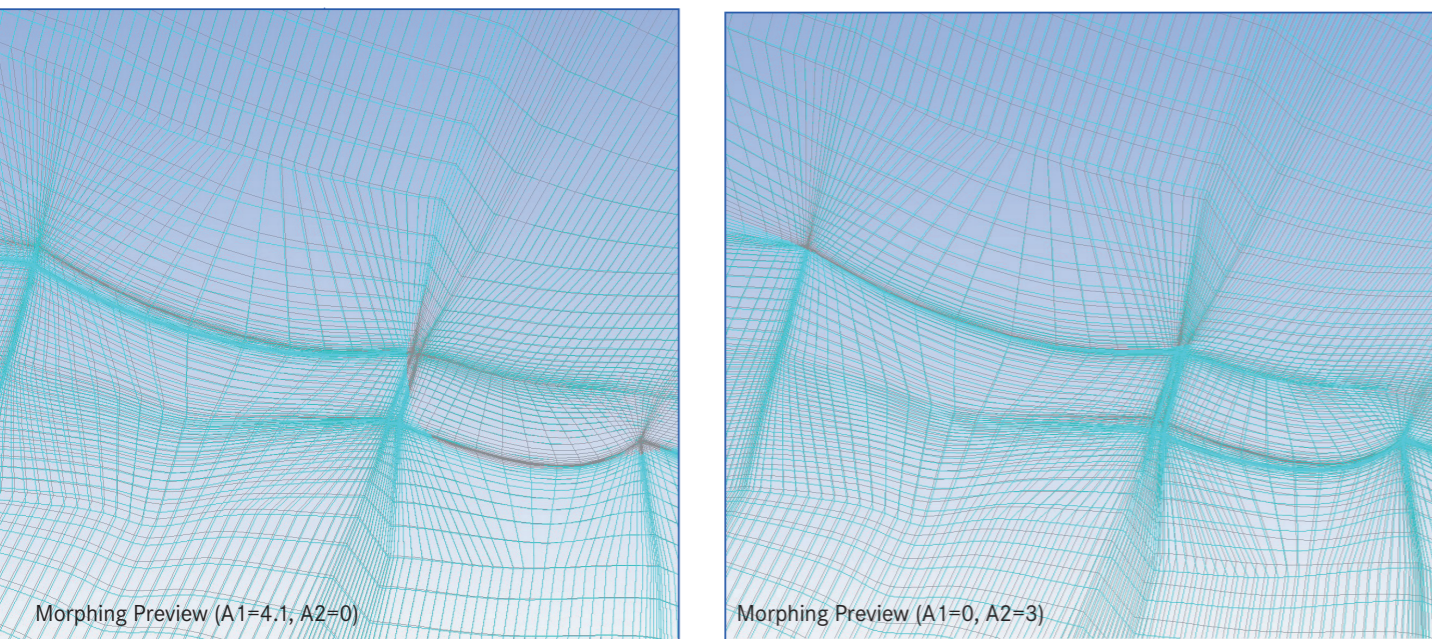


Fig. 5 - Vista ortogonale dall'alto ($y=1$ m) della mesh originale e deformata per le amplificazioni sopra indicate (genoa a sinistra e randa a destra).

IMPOSTAZIONE DI RBF MORPH PER MODIFICARE LA FORMA DELLE VELE

Il software RBF Morph™ è stato utilizzato per configurare tutti e 4 i parametri di forma delle vele precedentemente menzionati.

Il set-up per i parametri relativi allo sheeting angle della randa e del genoa sono molto simili tra loro, poiché si tratta sostanzialmente di uno stesso tipo di regolazione applicato su 2 vele diverse, le quali differiscono però per geometria e per modalità con cui tale regolazione viene generata.

In entrambi i casi vengono definiti due surface set, ovvero degli insiemi contenenti i nodi della porzione di superficie selezionata. I nodi estratti dalla superficie in rilievo vengono utilizzati come centri RBF per controllare accuratamente la forma delle vele assegnando così una rotazione rigida inerente l'asse di una vela mantenendo inalterati i punti appartenenti all'altra (Figura 2); la rotazione di riferimento equivale a 1° in modo da ottenere un valore di amplificazione numericamente equivalente alla rotazione espressa in gradi. L'azione di morphing viene limitata da un cilindro imponendo spostamento nullo a tutti i punti sul mantello del cilindro stesso. Il problema RBF completo è rappresentato in Figura 3.

Il problema complessivo è composto in questo caso da 4156 centri e impiega circa 4 s per la soluzione RBF. I modificatori di forma così ottenuti vengono quindi verificati con gli strumenti

di anteprima. Si è utilizzata una combinazione di entrambi i modificatori ai valori massimi (e.g. 4.1° per lo sheeting angle del genoa e 3.0° per lo sheeting angle della randa) in modo da osservare gli effetti sulla mesh superficiale; contestualmente viene rappresentata anche la mesh originale per esaltare l'effetto della variazione di forma (Figura 4). L'effetto dei modificatori di forma all'altezza massima (agenti separatamente, si veda Figura 5), è evidenziato nella sezione $y = 1$ m. Le mesh originale e quella deformata sono sovrapposte tramite una vista ortografica dall'alto. Un'azione completa di morphing, con l'utilizzo della combinazione simultanea di entrambi i modificatori, impiega approssimativamente 90 s in seriale e 30 s in parallelo su 4 core. La mesh in esame è relativamente piccola (1.5 milioni di nodi), ma in ogni caso il metodo lavora molto efficacemente in parallelo e può essere utilizzato con mesh di centinaia di milioni di celle in tempi ragionevoli.

L'impostazione del problema di morphing per l'heeling angle e l'AWA è descritto in dettaglio in (Biancolini et al., 2014); l'effetto di tali parametri è rappresentato in Figura 6.

GENERAZIONE DELLE SUPERFICI DI RISPOSTA

Il metodo per ottenere superfici di risposta noto come metamodel method rappresenta una tec-

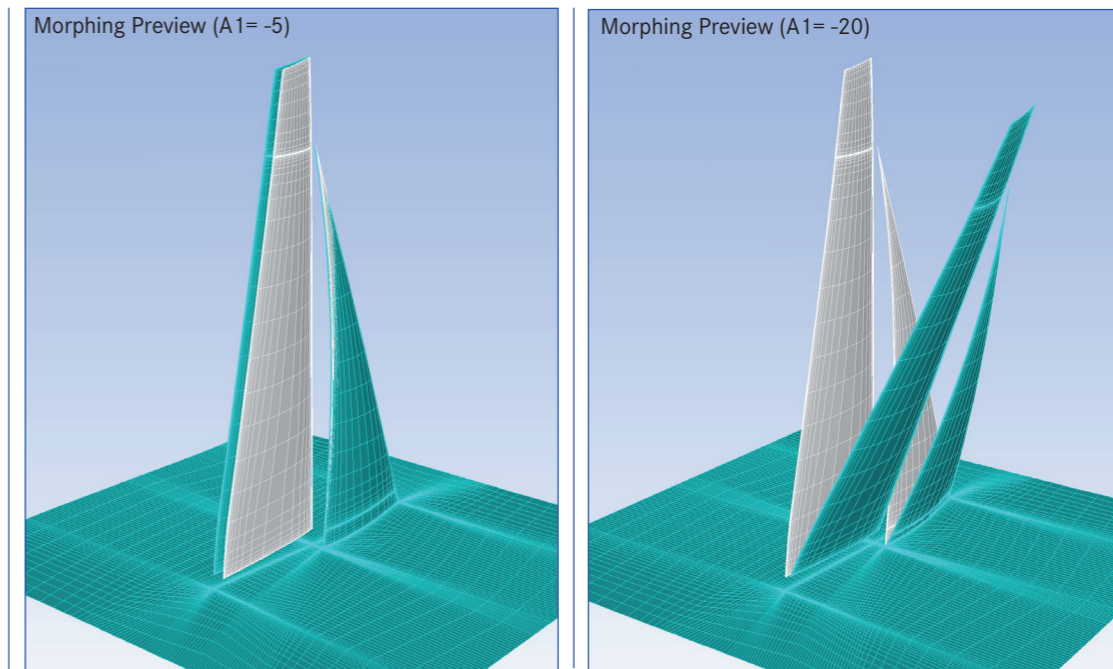


Fig. 6 - Anteprima di modifica dell'AWA (sinistra) e dell'heeling angle (destra).

nica affermata nel campo dell'ottimizzazione di funzioni ad elevato costo computazionale, ed è quello che si è scelto di utilizzare nel presente studio.

In primo luogo viene generata una tabella DOE (Design Of Experiments) popolata da valori definiti nello spazio di progetto, dove tutti i parametri possono essere combinati fra loro a vari livelli. In secondo luogo, viene eseguita l'interpolazione di tali punti nello spazio (oltre a quello corrispondente alla baseline) per ottenere così in definitiva la superficie di risposta cercata. Per operare l'interpolazione, come illustrato in precedenza, si è scelto di sfruttare ancora una volta le potenzialità delle RBF. Questo approccio è stato ivi adottato per due distinte analisi, i cui risultati sono stati successivamente analizzati in modo congiunto e confrontati.

La tabella è stata generata utilizzando il criterio di riempimento Optimal Space Filling, integrato all'interno del software DesignXplorer di Ansys, in modo da riempire lo spazio 4-dimensionale dei parametri di input con dei punti di progetto, e ottenendone così uno di pari dimensioni riempito con i corrispondenti punti di output calcolati via CFD. Sono stati scelti 100 punti in modo da garantire una densità sufficientemente alta nello spazio dei parametri di progetto, considerato anche che l'ampiezza degli intervalli dei valori d'ingresso è stata adeguatamente ridotta al fine di mantenere un'elevata qualità della mesh,

poiché quest'ultima è soggetta in questo caso ad azioni combinate di tutti i parametri agenti simultaneamente. In Figura 7 sono riportati i diagrammi contenenti i punti di progetto appartenenti al DOE e al metamodello, rappresentati rispettivamente sui piani Cd, Cl e Cx, Cy. Si può notare come, in entrambi i casi, lo spazio coperto dal metamodello è più ampio e più denso rispetto a quello coperto dal DOE.

RISULTATI

Per effettuare l'analisi di sensibilità, è stata compilata manualmente una tabella al variare di un intervallo di quattro valori per ognuno dei quattro parametri d'ingresso precedentemente illustrati, mantenendo contestualmente nulli gli altri tre parametri. In questo modo si sono ottenuti i risultati in termini di C_d e C_l , al variare dei quattro parametri di input presi singolarmente. In questa analisi, non essendoci combinazioni in cui più di un parametro alla volta è diverso da zero, la mesh risulta essere poco stressata, dovendo subire solo un'azione di morphing per volta. Dunque si sono potuti prendere in considerazione degli intervalli di amplificazione dei parametri piuttosto ampi, nello specifico: $0^\circ \div 4^\circ$ per lo sheeting angle della randa; $0^\circ \div 4^\circ$ per lo sheeting angle del genoa; $17^\circ \div 29^\circ$ per il AWA; $-1^\circ \div 20^\circ$ per l'heeling angle. I valori relativi ai trim sono indicati rispetto alla baseline.

Nelle figure 8 e 9 è illustrato l'andamento dei risultati di output in risposta alla variazione di un parametro di input alla volta, (per l'AWA sono indicati i valori differenziali rispetto alla baseline). Sono riportati sia i risultati ottenuti tramite il calcolo diretto dei 16 valori di input, sia quelli ottenuti tramite l'interpolazione/estrapolazione sul DOE da 100 punti (indicati con RS nella legenda). È da notare come le curve di risposta ottenute nei due metodi distinti evidenzino una sostanziale sovrapposizione all'interno del dominio comune. Ciò conferma che la spaziatura utilizzata per la generazione del meta modello è tale da garantire una buona fedeltà di risposta. È importante sottolineare che la valutazione della risposta sul meta modello richiede qualche frazione di secondo, tanto da poter essere utilizzata su un simulatore dell'imbarcazione di tipo real time. Il tempo di calcolo necessario per la generazione di ognuno dei punti del meta modello utilizzando la CFD può essere di alcune ore (e dipende dalla accuratezza del calcolo, che influenza la dimensione della griglia, e dalle risorse impiegate).

Il meta modello consente di determinare il punto di massima spinta propulsiva al variare simultaneo di tutti i parametri di ingresso. Ci si è avvalsi in questo caso del metodo di screening, che consente di analizzare in modo molto fine lo spazio dei parametri; la risposta ottenuta (Figura 7) consente di visualizzare come si distribuiscono i risultati di interesse. Da ciò risulta che il punto di ottimo è così caratterizzato:

$$\begin{cases} \text{main sheeting angle} = 3^\circ \\ \text{genoa sheeting angle} = 5^\circ \\ \text{AWA} = 24^\circ \\ \text{heeling angle} = 0^\circ \end{cases} \begin{cases} C_d = 0.22 \\ C_l = 1.397 \\ C_x = 0.366 \\ C_y = 1.366 \end{cases}$$

Si può notare come le regolazioni in condizioni ottimali corrispondano ad un'andatura generalmente più lasca rispetto alla condizione di baseline. In particolare il AWA è di 5° superiore a quello base, che rappresenta l'angolo caratteristico dell'andatura di bolina stretta per questo tipo di imbarcazioni, e i trim risultano essere più aperti. L'heeling angle ottimale, come ovvio, è nullo. In questo tipo di andatura, è utile evidenziare come, essendo l'incremento di AWA rispetto alla baseline all'incirca pari a quello dei trim (nel caso del genoa il δ è identico), l'orientazione assoluta delle vele al vento (= AWA - angolo di trim assoluto) rimane pressoché invariata. Il miglioramento in termini di spinta propulsiva,

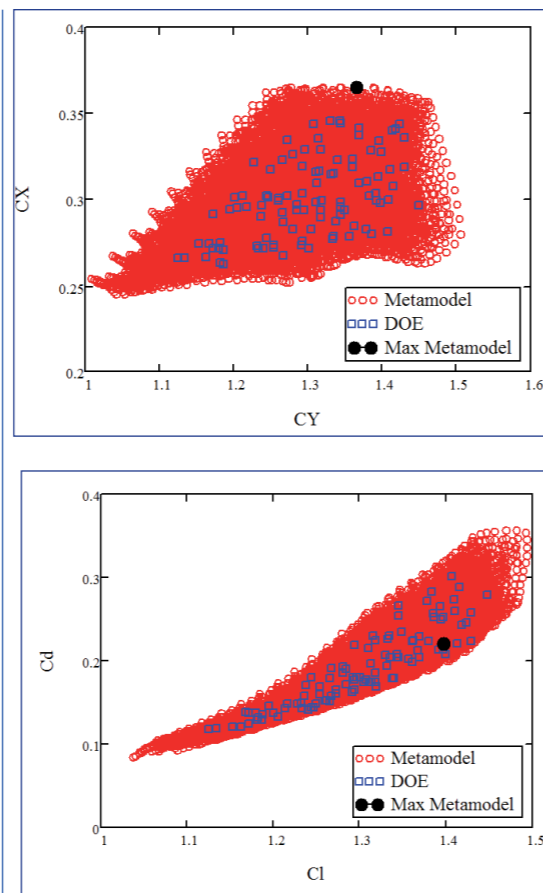


Fig. 7 - Rappresentazione dei punti appartenenti al DOE e al meta modello sia in termini di lift e drag (sinistra) che di forze efficaci al moto dell'imbarcazione (destra). Notare come il punto di massima spinta si trovi in una regione in cui, al variare del CY, il CX rimane pressoché costante in un ampio intervallo.

dunque, è dovuto principalmente al fatto che una rotta al vento apparente più poggiate è caratterizzata da una maggiore proiezione della risultante delle forze aerodinamiche lungo la direzione assiale della barca, e quindi da una minore in direzione trasversale. In figura 10 sono rappresentati i risultati grafici, in termini di distribuzioni di pressione, dell'analisi CFD della configurazione ottimale ottenuta nel modo descritto sopra. Tutti i parametri di regolazione sono stati impostati sui suddetti valori, fatta eccezione per l'angolo di sbandamento, il quale non è propriamente un parametro che può essere impostato a scelta dall'equipaggio nella pratica reale di conduzione della barca, ma piuttosto un parametro dipendente da altre variabili. Tale parametro è stato quindi impostato su 8°, un valore decisamente più inerente all'intervallo tipico di assetto in condizioni di vento medio.

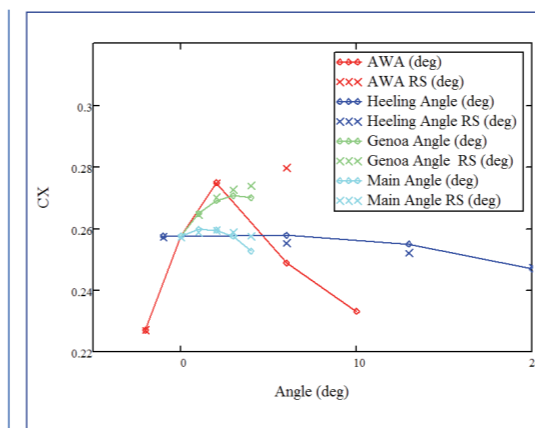


Fig. 8 - Sensibilità del coefficiente propulsivo rispetto a AWA, heeling angle e sheeting angle di genoa e randa. I valori "RS" sono interpolati con il meta modello.

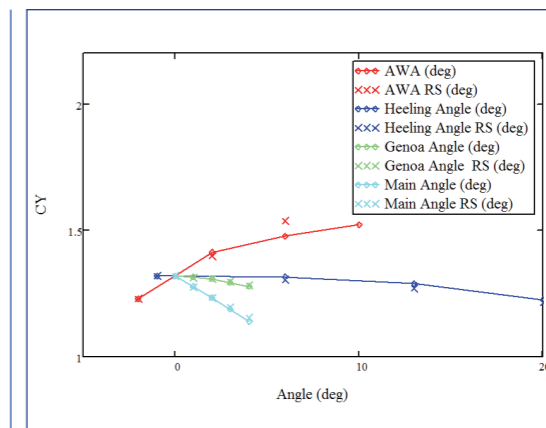


Fig. 9 - Sensibilità del coefficiente di spinta laterale rispetto a AWA, heeling angle e sheeting angle di genoa e randa. I valori "RS" sono interpolati con il meta modello.

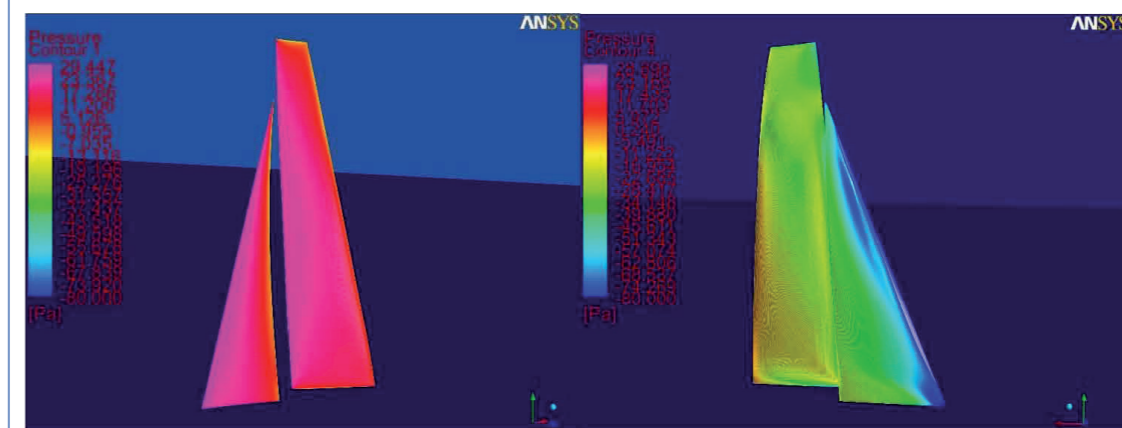


Fig. 10 - Andamento del coefficiente di pressione sul lato sopravvento (sx) e sottovento (dx)

CONCLUSIONI

È stato esposto un metodo per l'ottimizzazione delle regolazioni delle vele. Si è utilizzata la teoria delle RBF per un approccio di mesh morphing che consentisse l'utilizzo della l'uso del mesh parametrisation come uno strumento d'interpolazione per la stima delle superfici di risposta all'interno di un ciclo di ottimizzazione. La flessibilità del metodo è stata dimostrata analizzando varie modifiche di forma, cioè sheeting angle della randa, sheeting angle del genoa, AWA e heeling angle. Tutte le modifiche di forma sono state integrate all'interno di un ciclo di analisi delle sensibilità e di ottimizzazione. L'approccio può essere facilmente esteso incrementando la complessità delle modifiche di forma e/o la complessità del sistema stesso.

RIFERIMENTI

Biancolini, M.E., Viola, I.M., Riotte, M. (2014). Sails trim optimisation using CFD and RBF mesh morphing. *Comput Fluids* (2014), <http://dx.doi.org/10.1016/j.compfluid.2014.01.007>

Viola, I.M., Flay R.G.J. (2011). *Sail Aerodynamics: Understanding Pressure Distributions on Upwind Sails*, Experimental Thermal and Fluid Science, 35 (8), 1497-1504.

Biancolini, M. E. (2012). *Mesh Morphing and Smoothing by Means of Radial Basis Functions (RBF): A Practical Example Using Fluent and RBF Morph*. Handbook of Research on Computational Science and Engineering: Theory and Practice, IGI Global, ISBN 13: 9781613501160

Gli autori

M.E. Biancolini, S. Ramirez
Dipartimento di Ingegneria dell'Impresa, Università degli Studi di Roma "Tor Vergata" (Via Politecnico 1, 00133, Roma, RM, Italy).
Contatti: e-mail: biancolini@ing.uniroma2.it

I.M. Viola
Institute for Energy Systems, School of Engineering, University of Edinburgh (The King's Building, Mayfield Road, EH93JL Edinburgh, United Kingdom).