

L'obiettivo dello studio era definire una procedura di ottimizzazione numerica per regolare una vela rigida per catamarani da regata, in funzione delle condizioni di navigazione. L'analisi ha considerato una vela alare rigida simile a quella installata sui catamarani da regata AC45, barche da 45 piedi che danno vita all'America's Cup World Series, campionato costituito da una serie di regate match race.



ACWS 45 Napoli, 18/04/2013).  
Photo: © Luna Rossa/ Carlo Borlenghi

## OTTIMIZZAZIONE DELLA REGOLAZIONE DI UNA VELA RIGIDA PER CATAMARANI DA REGATA

Alberto Clarich (Esteco spa), Gianluca Gustin (Università di Trieste)

Esteco, in collaborazione con l'Università di Trieste - Dip. di Ingegneria e Architettura - ha svolto uno studio per definire una procedura di ottimizzazione numerica per regolare una vela rigida per catamarani da regata, in funzione delle condizioni di navigazione. L'analisi ha considerato una vela alare rigida simile a quella installata sui catamarani da regata AC45: lunghezza pari a 13.45 m, trave tra i due scafi di lunghezza pari a 6.90 m e superficie dell'ala pari a 85 m<sup>2</sup>. Le forze aerodinamiche agenti sulla vela dipendono dall'angolo AWA (Apparent Wind Angle), definito tra la direzione della rotta della barca (la cui velocità è BS o Boat Speed) e la direzione del vento apparente, la cui velocità (AWS o Apparent Wind Speed) è ottenuta come somma vettoriale del vento reale (TWS o True Wind Speed) e la stessa velocità della bar-

ca (BS). Il vento agente sulla vela, con velocità e direzione pari a AWS, determina una forza aerodinamica risultante FA con componente FM agente lungo l'asse della barca (che costituisce la forza motrice della stessa), e componente ortogonale detta forza sbandante (FS). La forza FA può anche essere scomposta nelle componenti ortogonali e parallele alla direzione del vento apparente, ottenendo rispettivamente la portanza aerodinamica e la resistenza aerodinamica.

L'effetto delle azioni aerodinamiche è equilibrato dall'effetto delle appendici idrodinamiche sotto lo scafo, che danno origine a una forza risultante FI, avente nella sezione frontale una componente PI scomponibile a sua volta in una componente verticale (P\_V) pari alla forza di galleggiamento e una orizzontale (P\_H) che di fatto determina la resistenza al moto di scarroc-

Fig. 1 - Forze agenti su un catamarano

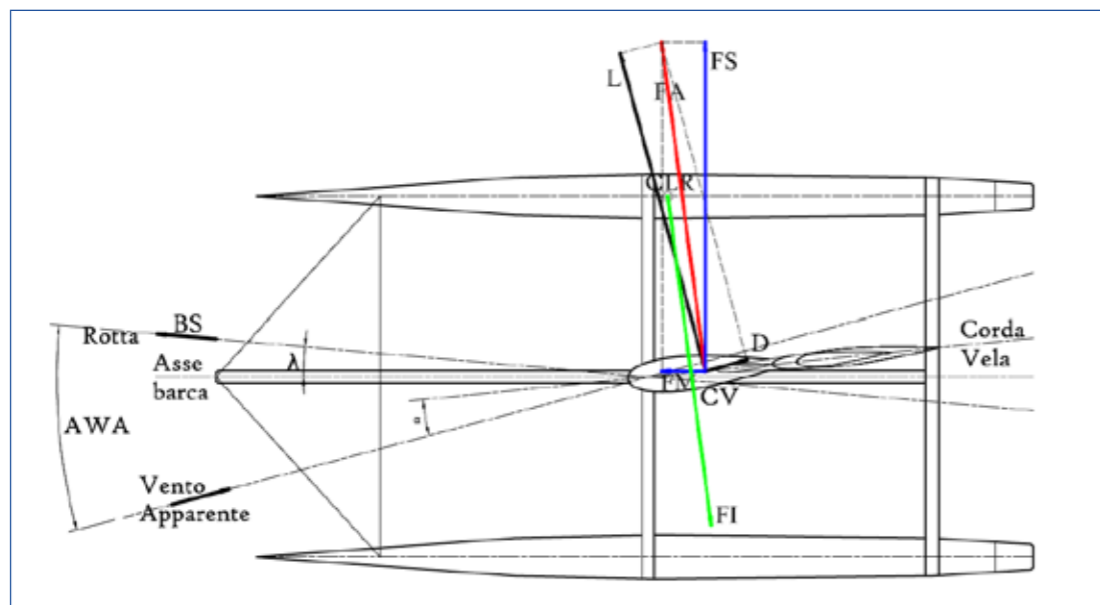
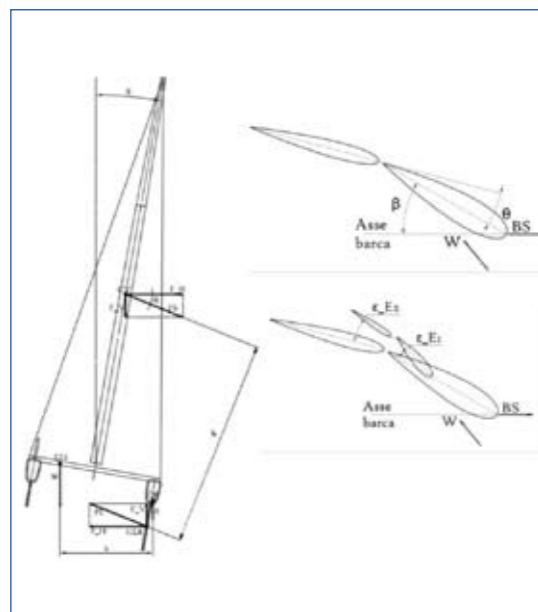


Fig. 2 - Vista frontale del catamarano; parametri per la regolazione della vela



La regolazione deve consentire di massimizzare la componente motrice risultante della forza aerodinamica (FM) e di ottenere un momento sbandante (MS) più vicino possibile al momento raddrizzante ottimale per un equipaggio tipico di questo tipo di imbarcazioni, che si è stimato pari a 60.000 Nm con una tolleranza di +/-5.000 Nm.

Attraverso un modello CAD è possibile variare i parametri di regolazione (angoli di incidenza e di svergolamento dei due elementi). Il modello per la simulazione numerica della vela è stato interamente realizzato in Ansys®, utilizzando Icem Cfd® per la definizione della griglia di calcolo e Cfx® per la simulazione. Il dominio di calcolo è stato suddiviso in una parte costituita da un parallelepipedo di dimensioni ridotte contenente la vela, nella quale è generata una griglia di calcolo ibrida, e un'altra nella quale è stata generata una mesh strutturata a blocchi. Come condizioni al contorno è stata definita a prua, sopravento e sottovento, una velocità in ingresso pari al vento apparente, mentre a poppa è stata definita una condizione di pressione relativa pari a 0 Pa. La velocità in ingresso non è costante lungo l'altezza della vela, ma segue un profilo di velocità dato dalla seguente formula:

$$TwS(h) = u_{TW} \left( \frac{h}{H_{ref}} \right)^{1.67}$$

dove TwS(h) è il profilo del vento reale in funzione dell'altezza della vela,  $u_{TW}$  è la velocità indisturbata del vento reale (considerata pari a 8.2 m/s),  $H_{ref}$  è l'altezza di riferimento della vela (10m), e  $\Delta W$  è il gradiente del vento. Con un angolo TWA del vento reale rispetto la barca pari

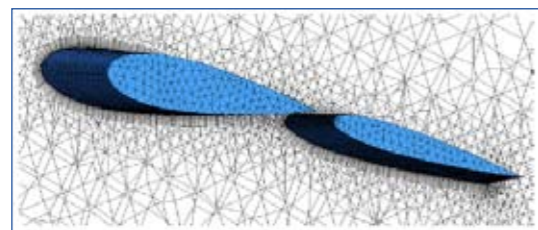


Fig. 3 - Dettaglio della mesh

cio rispetto l'asse della barca.

La barca si inclinerà quindi di un angolo tale che il momento esercitato dalla forza peso W bilanci il momento sbandante determinato dalla forza sbandante FS agente sulla vela e dalla forza sbandante PI agente sullo scafo.

Una regolazione ottimale richiede quindi un intervento sulla vela che è rigida e definita da due elementi svergolati tra la base e l'altezza.

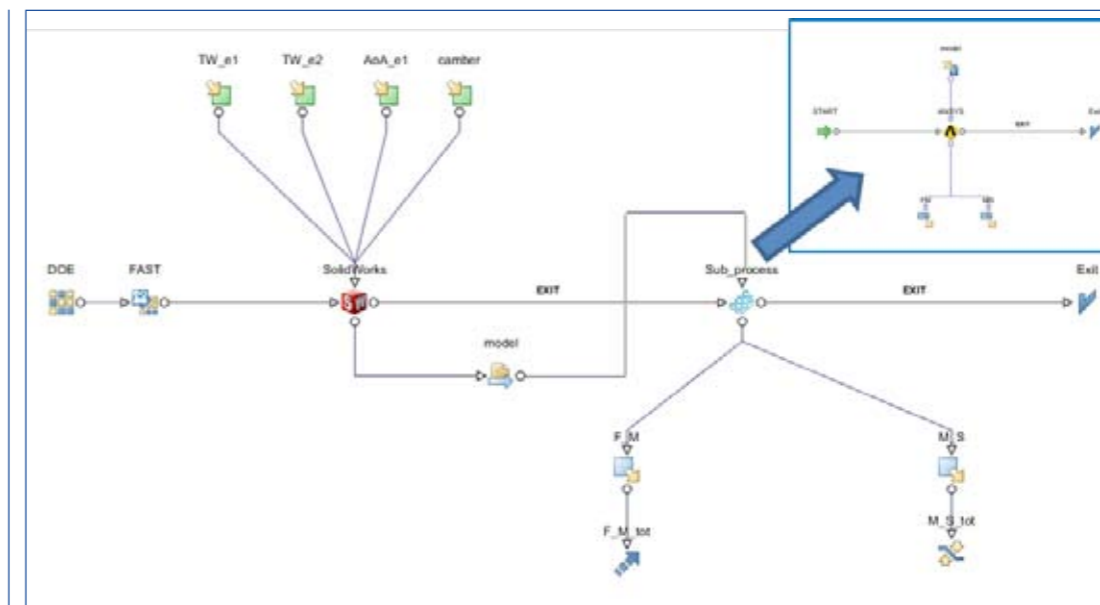


Fig. 4 - Workflow in modeFRONTIER

a 40° (andatura di bolina) e una velocità della barca considerata pari a 9.6 m/s, la velocità indisturbata del vento apparente risulta pari a 15 m/s: il numero di Reynolds basato sulla corda della vela e su quest'ultima velocità risulta quindi pari a  $5.28 \times 10^6$ . Tornando ai dettagli della mesh, attorno alla vela sono stati estrusi 15 layers con fattore di espansione pari a 1.3, a partire da un'altezza della prima cella adiacente alla vela di 1 mm. Lo spessore totale di layers estrusi risulta quindi essere di  $4.65 \cdot 10^{-2}$  m, che è sufficiente a coprire lo spessore dello stato limite. Utilizzando infatti la formula:

$$d = 0.035cRe^{-1/7} = 2.085 \cdot 10^{-2} m$$

essendo c la lunghezza della corda (pari a 5.44 m) e utilizzando il valore di Re precedentemente calcolato, si verifica che l'altezza dello strato di prisma è superiore alla dimensione stessa stimata dello strato limite.

In conclusione la griglia ibrida generata intorno alla vela è composta da circa  $10^7$  elementi con oltre  $4 \times 10^6$  nodi, mentre la griglia strutturata a blocchi nel resto del dominio è composta da circa  $5 \times 10^5$  elementi ed analogo numero di nodi. Come modello di turbolenza è stato adottato il modello SST disponibile in Ansys Cfx®.

I modelli numerici preparati secondo quanto descritto nei paragrafi precedenti sono stati quindi integrati nell'ambiente di ottimizzazione multi-obiettivo modeFrontier® prodotto da Esteco. In tale ambiente modulare è possibile definire un workflow attraverso la connessione di diversi nodi che rappresentano diverse fasi del processo da automatizzare, per la valutazione di

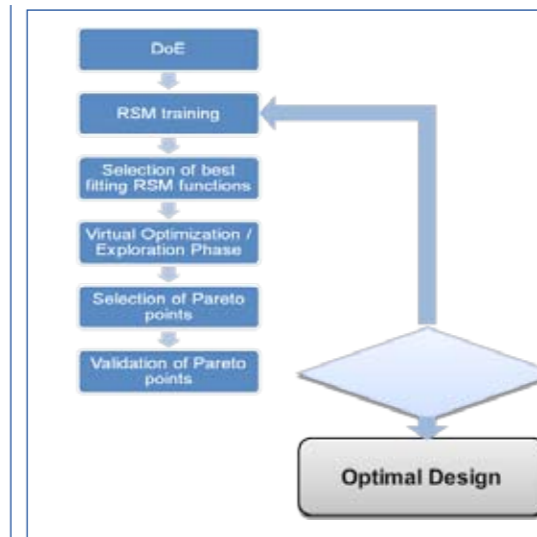


Fig. 5 - Schema logico dell'algoritmo FAST di modeFRONTIER

ogni singola configurazione proposta dall'algoritmo di ottimizzazione. È stata utilizzata la nuova soluzione Enterprise di Esteco, per eseguire un workflow o parte di esso in qualunque macchina disponibile nella rete attraverso l'utilizzo di tecnologia basata su standard di comunicazione internet: con questa tecnologia è quindi possibile gestire un processo di ottimizzazione utilizzando risorse disponibili in diversi dipartimenti di un'azienda o addirittura gestire progetti che coinvolgano aziende diverse. L'algoritmo di ottimizzazione scelto in modeFrontier® è il Fast, che consente un'ottima combinazione di robustezza in termini di bontà dei risultati ottenibili ed efficienza in termini di numero di simulazioni necessarie ad ottenerli.

L'algoritmo è infatti basato sull'integrazione di un robusto algoritmo di ottimizzazione mul-

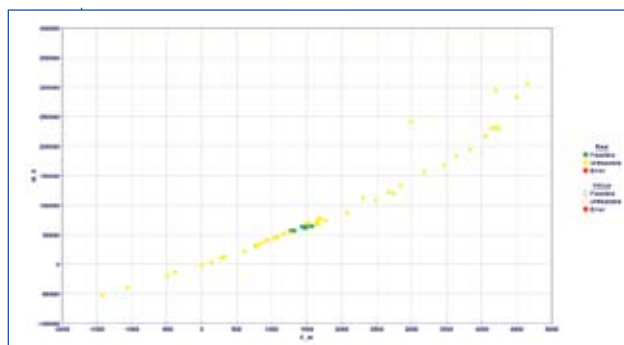


Fig. 6 - Risultati dell'ottimizzazione (forza motrice vs momento sbandante)

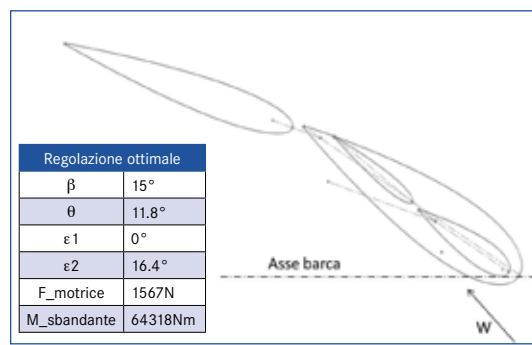


Fig. 7 - Parametri di regolazione ottimale

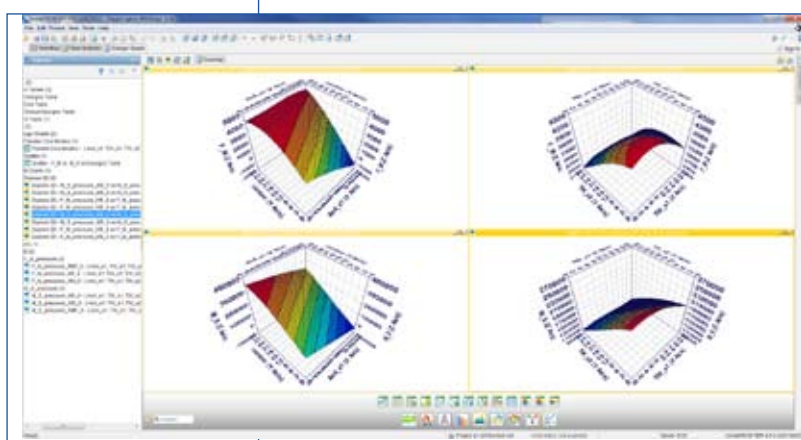


Fig. 8 - Superfici di risposta (FM in alto e MS in basso, in funzione dei 4 parametri di regolazione)

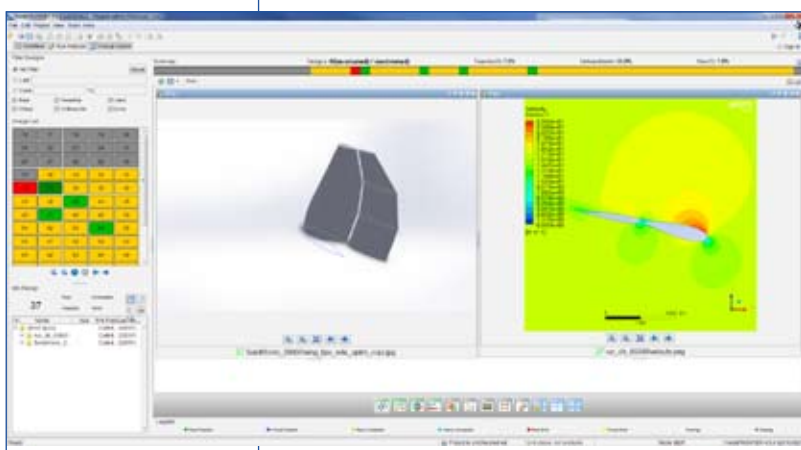


Fig. 9 - Run Analysis monitor in modeFRONTIER®; dettagli della soluzione ottimale

ti-obiettivo, MOGAI (Multi-Objective Genetic Algorithm) con le Superfici di Risposta (RSM) adattative. Partendo da un database di designs scelti da un opportuno algoritmo (DOE o Design of Experiments), diverse Superfici di Risposta o Meta-modelli, indicati per semplicità col termine RSM, possono essere addestrate, e utilizzate per l'estrapolazione automatica delle risposte

del sistema in funzione delle variabili di design.

Può essere così effettuata un'ottimizzazione virtuale in modo istantaneo, incluso un DOE di affinamento locale attorno alle soluzioni migliori. A questo punto, le soluzioni migliori così ottenute (Fronte di Pareto) possono essere validate mediante simulazioni reali (ovvero mediante l'uso dei processi CAE definiti nel workflow), aggiornando in questo modo il database utilizzato per il training delle RSM. Una procedura automatica di validazione determinerà l'algoritmo RSM più performante, che sarà quindi utilizzato per il passo successivo di ottimizzazione virtuale e validazione, ripetendo il ciclo fino a convergenza sulle soluzioni ottimali. In totale sono state eseguite 64 simulazioni, corrispondenti a 4 steps di dimensione pari a 16 designs ciascuno. Il range entro il quale i risultati rispettano il vincolo sul momento sbandante è particolarmente stretto. L'algoritmo Fast è riuscito, con un numero limitato di simulazioni, a trovare dei risultati validi nonostante la difficoltà di trovare soluzioni che rispettassero vincoli tanto stretti. Per migliorare ulteriormente le soluzioni, è stato quindi applicato un metodo del gradiente molto accurato utilizzando per il calcolo delle derivate parziali le Superfici di Risposta precedentemente allenate e adattate dall'algoritmo Fast. In questo modo, per eseguire 10 nuove iterazioni dell'algoritmo, si sono rese necessarie soltanto 10 nuove simulazioni, senza bisogno di ripeterne nessuna per il calcolo delle stesse derivate parziali. Tra questi nuovi risultati, è stata scelta come configurazione ottimale la soluzione col valore più alto di forza motrice. Al fine di validare i risultati ottenuti, è stata ripetuta la simulazione della geometria migliore utilizzando una mesh strutturata a esaedri con analogo numero di elementi; i risultati hanno confermato la validità delle simulazioni entro il 2-3% di errore.