

MODELLAZIONE AL COMPUTER DI BARCHE A VELA DA COMPETIZIONE

Lo straordinario sviluppo della capacità di calcolo unitamente a quello di codici numerici, ha proiettato molto rapidamente la ricerca nel campo delle applicazioni nautiche verso l'utilizzo di nuovi strumenti di indagine e acquisizione dati. La diffusione di nuovi programmi di calcolo adatti allo studio di imbarcazioni nasconde dietro a sé lo sviluppo di nuove tecnologie e conoscenze, frutto del lavoro di ricerca condotto negli ultimi anni in vari ambiti quali la matematica numerica, la visualizzazione scientifica e il calcolo parallelo. In questo articolo vengono introdotte e discusse le potenzialità di questi nuovi approcci.

1. INTRODUZIONE

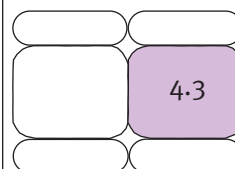
Il potenziamento dei moderni sistemi di calcolo ha permesso un inaspettato sviluppo della ricerca scientifica e quindi delle sue applicazioni anche nel settore della nautica. Programmi sempre più sofisticati e precisi possono girare su un semplice *laptop* e hanno costi contenuti e accessibili a tutti. Sia i piccoli cantieri di imbarcazioni da crociera sia i disegnatori di lussuosi mega-yacht, si stanno velocemente fornendo dei più recenti strumenti di progettazione e gestione dei processi. La diffusione di nuovi programmi di calcolo nasconde dietro a sé lo sviluppo di nuove tecnologie e conoscenze, frutto del lavoro di ricerca condotto negli ultimi anni in vari settori scientifici tra cui l'analisi numerica, il *software design* e la visualizzazione scientifica (Figura 1).

Come avviene in molti altri settori, per esempio quello dell'*automotive*, anche nella nautica, una delle maggiori opportunità per la ricerca scientifica risiede nelle competizioni sportive in grado di muovere ingenti capitali che giustificano importanti investimenti nella ricerca. Inoltre, regate come l'*America's Cup* (AC) sono

precedute da periodi di preparazione pluriennali in cui vere e proprie rivoluzioni tecnologiche segnano nuovi limiti e riferimenti tecnici. Nel 2007, per la prima volta nella storia della progettazione di imbarcazioni per l'AC, un team (che è risultato poi essere quello vincitore) ha dichiarato che la principale scelta nella strategia di progettazione è stata fortemente guidata da studi effettuati con tecniche numeriche di fluidodinamica computazionale (CFD). Questa affermazione segna una significativa evoluzione nell'uso di questo tipo di tecniche, storicamente relegate ad analisi di complemento o di verifica, che oggi mostrano finalmente un livello di affidabilità tale da permettere di essere considerate come primario strumento di indagine per lo studio e la progettazione di imbarcazioni a vela da competizione. La progettazione di un'imbarcazione a vela coinvolge sia problematiche strutturali che fluidodinamiche, ovvero sia lo studio della struttura sia lo studio del comportamento (dinamico) dei fluidi in cui la barca si muove. Questi due aspetti sono quanto mai intrecciati tra loro nel caso di una barca; tuttavia in questa pubblicazione



Ignazio Maria Viola
Raffaele Ponzini



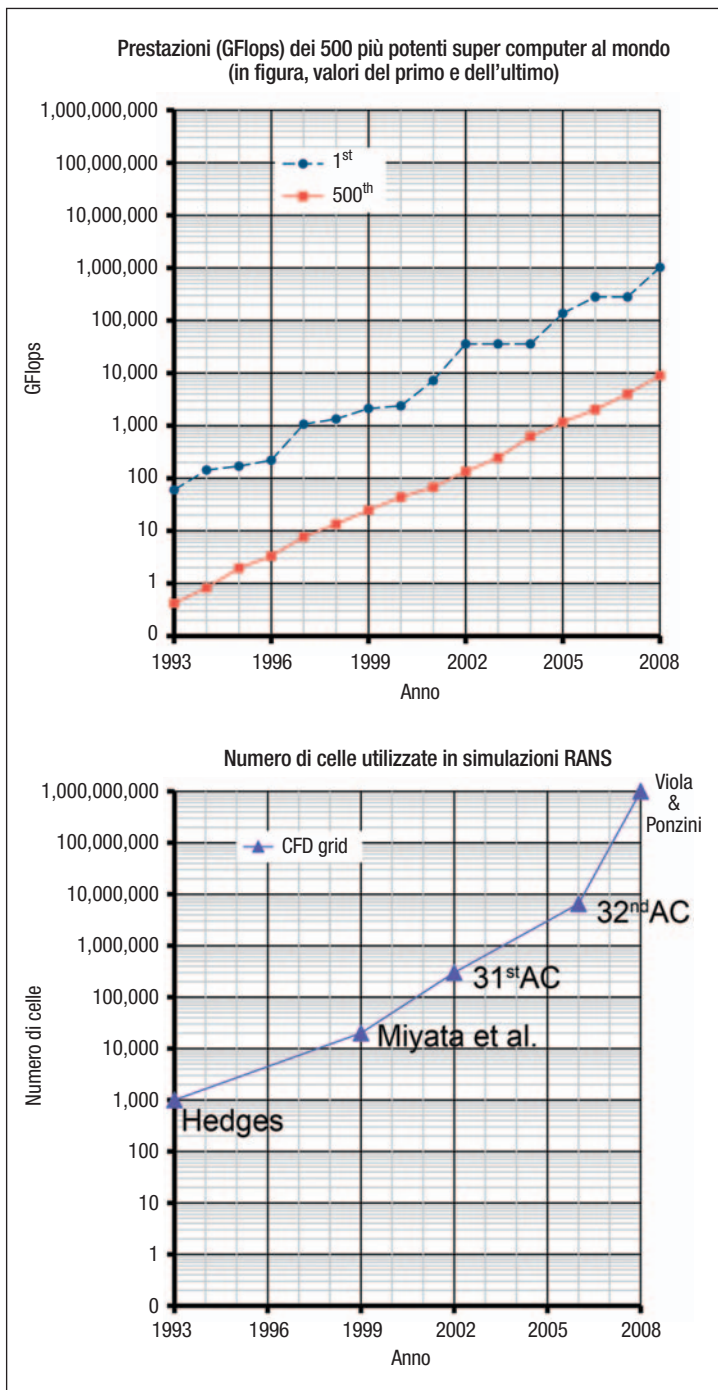


FIGURA 1
 Comparazione tra andamento dello sviluppo tecnologico in termini di risorse di calcolo disponibili in GFlops (classifica top500.org) e numero di celle utilizzate nella modellazione CFD di imbarcazioni da regata

prenderemo in considerazione solo lo studio dell'aerodinamica di un'imbarcazione a vela. Più in dettaglio, in questo articolo faremo riferimento a studi di aerodinamica tramite modelli CFD semplificati cioè atti a valutare caratteristiche del

piano velico in condizioni statiche, trascurando i movimenti dell'imbarcazione e le variazioni di intensità e direzione del vento nel tempo. Per lo studio dei piani velici, modelli CFD semplificati permettono di calcolare l'equivalente delle grandezze che possono essere misurate tramite la galleria del vento, con livelli di accuratezza e di flessibilità superiori, e con costi inferiori a quelli sperimentali. Affinché i risultati dei modelli CFD possano essere considerati affidabili, e quindi utilizzati per lo studio di qualsiasi configurazione dell'imbarcazione, è necessario effettuare delle validazioni tra valori misurati in galleria e valori calcolati dai modelli in condizioni equivalenti. Come verrà discusso nel seguito, per avere dei calcoli accurati è necessario pagare un prezzo in termini di risorse computazionali. Questo articolo analizza il divario esistente tra risorse necessarie e risorse disponibili nello studio della fluidodinamica dei piani velici tramite modelli CFD. L'articolo, dopo aver riassunto l'evoluzione storica delle applicazioni numeriche in ambito velico, analizzerà brevemente le differenti tipologie di modellazione CFD possibili in questo ambito per poi discutere più in dettaglio quanto ottenuto all'interno di un progetto di collaborazione scientifica in atto tra la sezione calcolo del CILEA e il Yacht Research Unit di Auckland (NZ). Nella conclusione verranno tracciate alcune indicazioni circa possibili sviluppi futuri di questo tipo di applicazioni.

2. CICLO CAE E PROGETTAZIONE NAUTICA

Gli anni settanta hanno rappresentato un momento di grande sviluppo della dinamica delle imbarcazioni a vela. Nel mondo accademico, Marchay [1] all'Università di Southampton realizzava le prime prove in galleria del vento su piani velici e, contemporaneamente, Milgram al MIT applicava i primi codici a pannelli che aveva utilizzato in precedenza su profili alari [2, 3], pubblicando pochi anni dopo uno scritto sui coefficienti aerodinamici delle imbarcazioni a vela [4]. Negli stessi anni, nel mondo dell'industria, Gentry, della Boeing Company, applicava codici a pannelli sviluppati nel settore aeronautico alle imbarcazioni classe Coppa America, tra cui il 12-metri Courageous che difese la coppa nel 1974 e nel 1977, Freedom nel 1980, e Liberty nel 1983 [5]. Anche per le appli-

cazioni idrodinamiche, gli anni settanta sono stati un momento di fondamentale sviluppo. A questo decennio si debbono le prime prove sistematiche nella vasca navale di Delft [6] e i primi modelli VPP realizzati al MIT, che univano modelli idro/aero-dinamici in grado di stimare la velocità e l'assetto dell'imbarcazione [7, 8]. Da allora fino alla fine del secolo, le tecniche numeriche sono cresciute in ombra rispetto a quelle sperimentali, ma l'iniziale svantaggio competitivo legato all'eccessivo onere computazionale per i calcolatori di cui si disponeva, è andato diminuendo con lo sviluppo tecnologico. La campagna di Coppa America del 2003 ha segnato il primo passo per un utilizzo massiccio delle tecniche numeriche insieme a quelle sperimentali, soprattutto in ambito idrodinamico. Infatti, il calcolo numerico permette nei mesi prossimi alla competizione, di mettere a punto le ultime modifiche in tempi più stretti rispetto a quelli di una prova sperimentale in vasca. Si pensi, ad esempio, alla scelta della pinna e del bulbo che può essere fatta poco prima della regata. Per questo motivo, l'unione dell'economicità dello strumento rispetto alla prova in vasca e della discreta accuratezza che si ottiene anche con tecniche che trascurano la viscosità, ha permesso all'idrodinamica numerica di essere la prima a rimontare il gap che la separava dalla prova sperimentale.

Nel campo dell'aerodinamica, Michael Richelsen scrisse negli anni ottanta i codici per la veliera North Sails "Flow" e "Membrain", rispettivamente un codice a pannelli inviscido per il calcolo della distribuzione di pressione e un codice a elementi finiti (FEM) per il calcolo strutturale. Le versioni aggiornate di questi codici, sempre riviste dallo stesso autore, sono tuttora lo strumento principale per il disegno delle vele di bolina di barca da regata. L'accuratezza e la semplicità di questi codici ne hanno fatto la fortuna. Tuttavia, la natura inviscida di "Flow" non consente di modellare la separazione, creando il presupposto per la diffusione dei codici CFD. Questi ultimi hanno tardato molto a essere largamente impiegati, sia per la complessità di utilizzo, sia per il costo computazionale che fino alla fine del secolo aveva un bilancio costo/beneficio troppo sfavorevole. Nella Coppa America del 2003, quasi tutti i consorzi si sono timidamente affacciati all'uti-

lizzo di questi codici, principalmente sfruttando la vera innovazione che portavano con sé: la possibilità di risolvere il campo di moto in un ampio volume di calcolo anziché solo sulla superficie della vela e della scia come nel caso dei codici inviscidi a pannelli. Per questo motivo, i codici CFD sono stati utilizzati come strumento di visualizzazione del flusso da associare alle prove in galleria del vento, oppure come strumento per lo studio del posizionamento reciproco tra due barche.

Nella Coppa America del 2007, l'alzarsi del livello competitivo, il maggiore sforzo di ricerca richiesto da una classe già largamente strizzata perché in uso dal 1992, i tempi serrati imposti dal sistema degli ACT della Louis Vuitton Cup, ha lanciato appieno l'utilizzo di codici numerici. I codici CFD non sono stati utilizzati solo come strumento di visualizzazione, ma come vero e proprio strumento di progettazione per le vele in andature portanti, per la progettazione delle appendici di carena e, in taluni consorzi, anche per la progettazione delle forme di carena superando i più che collaudati codici inviscidi.

Infine, nell'ultima Coppa America, che ha visto protagonisti dei giganteschi multi-scafo, uno dei quali con un'ala rigida assai più grande dell'ala di un Boeing 747, l'analisi sperimentale è stata rilegata alla validazione dei modelli CFD.

Oggi, i codici CFD sembrano destinati a essere sempre più utilizzati e lo sviluppo tecnologico è talmente veloce che risulta molto difficile prevederne il futuro. È facile immaginare che presto supereranno i codici inviscidi in molte applicazioni e che diverranno sempre più utilizzati nella progettazione di ogni forma, sia essa scafo o vela.

In queste considerazioni vi sono le motivazioni più profonde del presente articolo. È infatti opinione degli autori che la pressante pulsione all'utilizzo di tecniche CFD debba necessariamente partire da un'indagine attenta dei limiti di questo nuovo strumento di indagine. Anche per questa ragione si è deciso di discuterne qui non solo i confini "esterni", ovvero le frontiere dell'integrazione dei diversi aspetti della dinamica dell'imbarcazione, ma anche quelli "interni", ovvero i limiti e i pregi di una simulazione numerica che riproduca quanto misurabile in galleria del vento. In

questo articolo, pertanto, da una parte si vuole mettere in luce le potenzialità conoscitiva intrinseca nella modellazione CFD in termini di quantificazione degli aspetti fluidodinamici e della visualizzazione degli stessi che consentono al progettista delle vele di discernere quantitativamente configurazioni di progetto favorevoli e sfavorevoli, dall'altra parte si vuole discutere circa l'opportunità di utilizzare il calcolo numerico come alternativa all'attività sperimentale stessa.

Le simulazioni numeriche discusse nel seguito si riferiscono a geometrie di vele rilevate in galleria del vento con tecniche fotogrammetriche, durante la misura delle forze aerodinamiche. In questo modo è quindi possibile ottenere i dati, in termini di geometria e condizioni al contorno, necessari per sviluppare i modelli CFD e, successivamente, confrontare i risultati numerici con i dati sperimentali rilevati nelle stesse condizioni. Il ciclo di modellazione numerica di un problema di aerodinamica del piano velico di un'imbarcazione da regata è mostrato nella figura 2. I passaggi fondamentali rappresentati sono:

i. (box-blu) la fase di *pre-processing* in cui a partire dai dati ottenuti sul modello fisico (in galleria del vento) si ottiene un modello CFD costituito da una geometria (che verrà discretizzata) e dalle condizioni fluidodinamiche che si sono misurate agli estremi di quello che verrà considerato come dominio di calcolo;

ii. (box-verde) la fase di calcolo vero e proprio in cui le equazioni costitutive della fluidodinamica vengono risolte per il modello CFD precedentemente ottenuto sfruttando architetture di calcolo parallelo e interconnessioni ad alta banda passante;

iii. (box-arancio) la fase di *post-processing* in cui i valori del campo di moto e di pressioni così calcolati vengono processati per ottenere informazioni qualitative e quantitative tramite la visualizzazione scientifica utili alla progettazione.

Nel seguito dell'articolo si farà sempre riferimento a modelli CFD ottenuti in questo modo e su cui sono state realizzate un grande numero di simulazioni variando di volta in volta le condizioni di navigazione, il modello numerico adottato per risolvere le equazioni della fisica che governano questo problema, la risoluzione della discretizzazione spaziale adottata (espressa in termini di numero di celle) al fine di approfondire i limiti e le potenzialità di questo approccio applicativo.

La CFD applicata allo studio dei piani velici, si inserisce nell'ambito della fluidodinamica esterna a bassi numeri di Mach e medio/alti numeri di Reynolds, pertanto richiede la risoluzione delle equazioni di Navier Stokes (NS) con condizioni al contorno sulla velocità e sulla pressione. Le equazioni fondamentali di conservazione della massa, bilancio della quantità di moto e dell'energia interna sono risolte per il

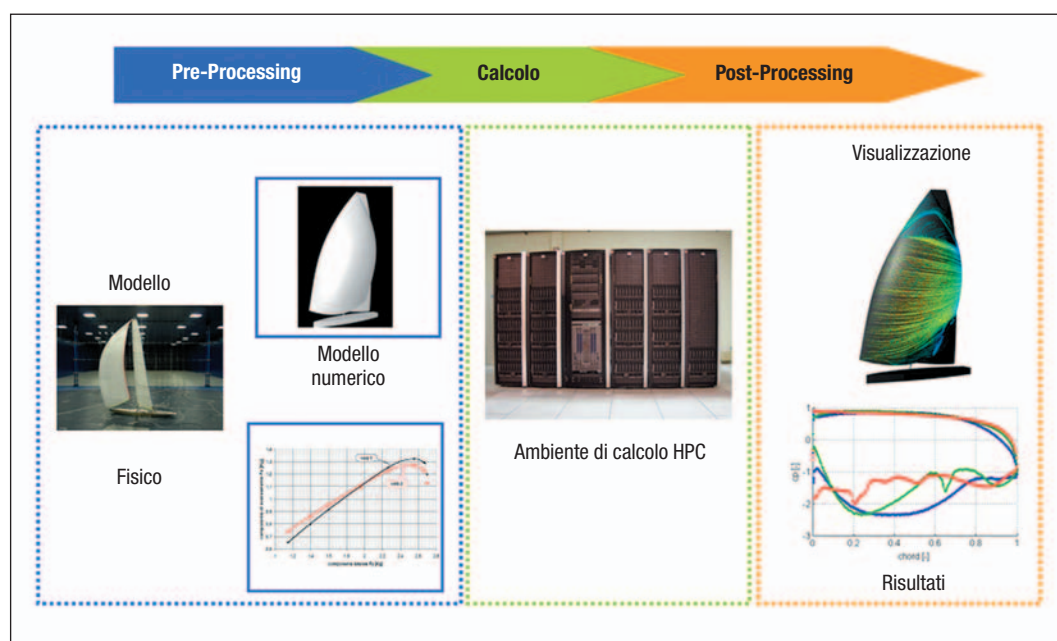


FIGURA 2
Ciclo di progettazione al computer in ambito navale

fluido aria all'interno di una determinata geometria opportunamente discretizzata. I bassi numeri di Mach consentono di ritenere ininfluenze le variazioni di densità, di conseguenza assumendo la viscosità costante, l'equazione dell'energia diventa disaccoppiata dalle altre equazioni e il campo di moto e di pressione è definito dalle sole prime due equazioni (conservazione della massa e della quantità di moto). Il sistema così ottenuto è risolvibile con le dovute condizioni iniziali e al contorno. Si osservi che le equazioni di Navier Stokes incomprimibili hanno la particolarità di perdere il significato fisico di pressione che compare solamente come gradiente di pressione. La prima delle due equazioni che deriva dalla conservazione della massa è detta *equazione di continuità*, la seconda che deriva dal bilancio di quantità di moto è detta *equazione del momentum* (riquadro a p. 62, *Equazioni di Navier Stokes* e, in particolare, le equazioni a.1 e a.3).

3. REYNOLDS

Le equazioni di NS incomprimibili possono essere riscritte esplicitando il numero adimensionale di Reynolds (Re). Da questa formulazione è possibile osservare che la soluzione del problema in esame è univocamente definita dalle condizioni al contorno e dal numero di Re , il quale esprime il rapporto tra le forze convettive e quelle viscosive diffusive. Nello studio dei piani velici in galleria del vento, i numeri di Re variano da 500.000 a 1.500.000 mentre al vero si hanno Re da 1.000.000 a 30.000.000. La differenza in termini di Re massimi raggiungibili in galleria del vento è un limite della metodologia sperimentale che non è possibile superare per motivazioni prettamente tecnologiche (resistenza dei materiali). La simulazione numerica non ha questo limite e, anzi, si presenta anche come un possibile strumento per scalare in vera grandezza i risultati ottenuti in galleria del vento.

3.1. DNS

Il sistema così descritto potrebbe essere discretizzato e risolto esattamente, in questo caso si parla di risoluzione diretta delle equazioni, in inglese *Direct Navier Stokes* (DNS). Tutta via considerazioni energetiche ci imporrebbe-

ro una discretizzazione eccessivamente onerosa per alti Re . Questo è uno dei punti fondamentali riguardo all'affidabilità delle simulazioni numeriche. Infatti, nella turbolenza 3D (al contrario della turbolenza 2D) il trasporto energetico avviene dalle strutture vorticosi più grandi, che sono della dimensione dell'oggetto immerso nel campo di moto, alle strutture vorticosi più piccole, che sono di dimensione tale che le strutture vorticosi sono dissipate per effetto viscoso. Pertanto, è necessario che la discretizzazione spaziale sia in grado di risolvere le scale più piccole ove l'energia è dissipata.

Analogamente, le scale temporali devono consentire di cogliere i tempi caratteristici delle strutture più grandi e delle strutture più piccole a cui avviene la dissipazione. Le strutture vorticosi possono essere considerate delle fluttuazioni di velocità e pressione associate a delle frequenze di fluttuazione, le quali sono sempre più alte al diminuire della dimensione spaziale della struttura vorticosi.

Utilizzando considerazioni dimensionali formulate la prima volta da Kolmogorov nel 1941 [9], si mostra che il numero di elementi N , e il numero di passi temporali T_s , necessari a cogliere le dimensioni a cui avviene la dissipazione viscosa sono esprimibili in funzione del numero di Reynolds. In particolare, N è dell'ordine di $Re^{3/4}$ e T_s risulta essere dell'ordine di $Re^{1/2}$. Considerando la necessità di discretizzare in tre dimensioni spaziali si ottiene per le quantità spaziali il valore di $Re^{9/4}$. In conclusione, il numero complessivo di gradi di libertà (gdl) descritti dal prodotto del numero di celle per ogni passo temporale che deve essere calcolato, risulta dell'ordine di $Re^{11/4}$.

Il flusso intorno a un cilindro è mostrato nella figura 3 (tratta da [10]). Si può notare come le strutture vorticosi tramite cui si immette energia nel sistema sono di dimensione dell'ordine di grandezza del diametro del cilindro (L). Queste vanno via via trasformandosi in strutture più piccole fino a scale di dimensioni pari a η , dove le strutture sono dissipate per effetto viscoso. La griglia di calcolo che consentirebbe la risoluzione diretta delle equazioni dovrebbe avere dimensione Δ dello stesso ordine di grandezza di η . In applicazioni nautiche, poiché η è molto piccolo rispetto ad L , questa condizione richiederebbe una griglia così fine

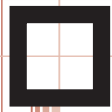
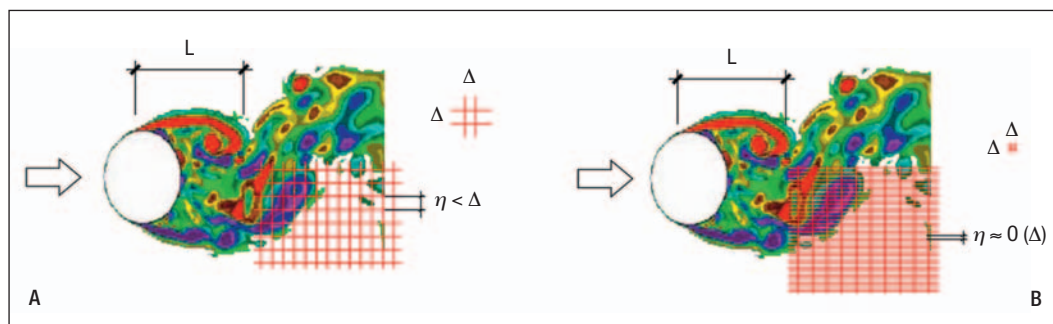


FIGURA 3
Strutture turbolente
nella scia di un
cilindro [10]



da avere un numero (ad oggi) irraggiungibile di elementi. Pertanto la dimensione di griglia Δ è tipicamente molto maggiore di η . Nelle applicazioni in esame, considerando l'ordine di grandezza dei numeri di Reynolds cui sono realizzate le prove in galleria del vento, $Re = O(10^5)$, il numero di *gdl* necessari alla risoluzione diretta delle equazioni risulta:

$$gdl = O(10^5)^{11/4} = O(10^{55/4}) = O(10^{14}) \quad (1)$$

All'attuale stato dell'arte non è possibile risolvere un così elevato numero di *gdl*. Ipotizzando di realizzare una simulazione stazionaria per diminuire il numero di *gdl* necessario, il numero di *gdl* si riduce significativamente. Infatti:

$$gdl = N = O(10^5)^{9/4} = O(10^{45/4}) = O(10^{11}) \quad (2)$$

ovvero 200 miliardi di celle. Al momento in cui questo articolo viene redatto, le simulazioni più all'avanguardia sono dell'ordine di poco superiori a un miliardo di celle ($gdl = 10^9$), utili quindi a simulare con questo approccio valori di Reynolds dell'ordine di 10^3 , infatti:

$$Re = O(10^9)^{4/11} = O(10^3) \quad (3)$$

Poiché ai *Re* di interesse non è possibile cogliere tutte le scale energetiche, diventa necessario modellare altrimenti gli effetti delle scale più piccole che non vengono colte da una discretizzazione più rada. Questo approccio risulta essere quello comunemente adottato in letteratura per ovviare a detti limiti computazionali. Tuttavia, come verrà spiegato nel seguito, questo è anche un approccio che introduce un livello di aleatorietà molto elevato e che impone una profonda fase di calibrazione del modello numerico prima di poter fare uso con confidenza (vedi [11]).

3.2. Modelli mediati

Per determinare l'effetto delle scale più piccole si applica un operatore di media sul sistema di equazioni di NS. La differenza tra le equazioni primitive e quelle mediate rappresenta l'effetto delle scale scartate dall'operazione di media. Si osserva che il sistema di equazioni di NS che era risolvibile quando non mediato, dopo l'operazione di media presenta un'aggiuntiva incognita tensoriale (ovvero una matrice), nota come tensore (simmetrico) degli sforzi di Reynolds, composto da sei incognite scalari. Queste incognite rappresentano l'effetto sul campo medio delle componenti fluttuanti escluse dall'operatore di media. Il loro significato fisico dipende pertanto dalla definizione dell'operatore utilizzato. Queste grandezze non sono risolte, ma sono modellate con opportune equazioni euristiche che ne forniranno una stima.

Per avere nuovamente un sistema chiuso (ovvero risolvibile quando sono conosciute le condizioni al contorno e iniziali) come quello originale, è necessario introdurre tante equazioni quante le nuove incognite. Queste equazioni sono dette "modelli di turbolenza".

I modelli di turbolenza che sono comunemente utilizzati in questo tipo di applicazioni assumono l'ipotesi di Boussinesq, per il quale il tensore degli sforzi di Reynolds può essere modellato con un termine viscoso artificiale, indotto per via numerica nel modello fisico che si vuole modellare. I diversi modelli di turbolenza si distinguono per come modellano la cosiddetta "viscosità turbolenta".

3.3. Accuratezza e limiti computazionali

Come discusso nell'introduzione, al fine di studiare l'affidabilità dei vari possibili approcci di modellazione tramite CFD in questo ambito di progettazione, sono state svolte svariate analisi, riferendosi a dati di galleria del

vento per un'imbarcazione di Coppa America studiata in condizione stazionaria, al variare dei seguenti parametri di interesse:

i. modello di turbolenza;
ii. configurazioni geometriche (nominalmente angoli al vento dell'imbarcazione e regolazione delle vele);

iii. risoluzione della discretizzazione spaziale. I risultati mettono in evidenza come, nonostante i modelli di turbolenza permettano di modellare con un limitato numero di *gdl* problemi che richiederebbero un numero di *gdl* molto oneroso, non sia sempre univoco il risultato che si ottiene. Per questo motivo, come detto, sono necessarie lunghe campagne computazionali di *tuning* del problema numerico al fine di valutare quale modello di turbolenza sia in grado di fornire risultati più simili alla galleria del vento in quelle specifiche condizioni. Viceversa, scegliendo strategie decisamente più onerose dal punto di vista computazionale, è possibile ottenere risultati più indipendenti dalle condizioni modellate. In accordo con le richieste teoriche sul livello di risoluzione spaziale della discretizzazione adottata, all'aumentare della dimensione della griglia di calcolo si ottengono risultati sempre più accurati.

Nell'agosto del 2008 si realizzava la simulazione più onerosa in ambito fluidodinamico con un codice di calcolo commerciale [12]. Un'imbarcazione di Coppa America con randa e *spinnaker* asimmetrico è stata modellata con una griglia composta da un miliardo di celle ($N = 10^9$) (Figura 4). Al crescere della risoluzione spaziale diminuiscono le dimensioni delle strutture vorticosi che sono escluse dall'operatore di media e che debbono essere modellate con il modello di turbolenza. Pertanto, in detta simulazione, per via dell'elevatissima risoluzione spaziale, nessun modello di turbolenza è stato adottato, considerando trascurabili le scale di dimensione inferiore a quella della griglia di calcolo. Per verificare l'effetto delle scale trascurate, diverse simulazioni sono state realizzate diminuendo la risoluzione spaziale fino alle dimensioni di griglia comunemente utilizzate. La differenza tra le forze aerodinamiche calcolate nelle diverse simulazioni, mostra l'effetto delle scale non risolte dalle griglie di calcolo. La differenza tra la forza aerodinamica calcolata con $N = 10^9$ è risultata quasi il 20% maggiore della forza calcolata con $N = 10^6$.

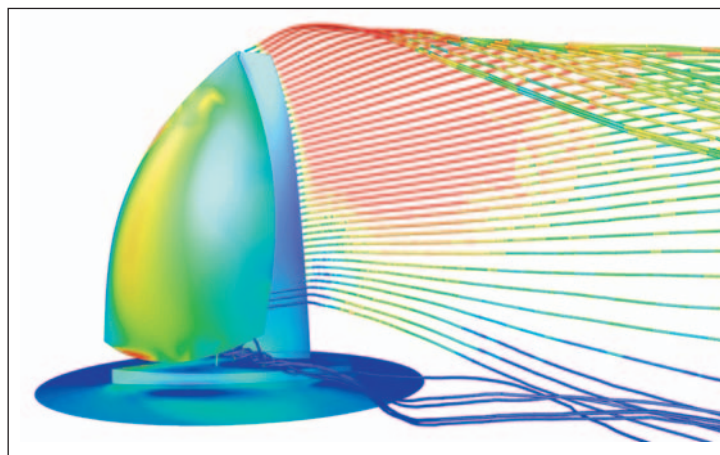


FIGURA 4
Visualizzazione delle linee di flusso colorate secondo le velocità, ottenute tramite un modello CFD da un miliardo di celle di un'imbarcazione a vela da regata

4. CONCLUSIONI

Pur ricordando che è sempre difficile prevedere lo sviluppo tecnologico e i suoi tempi, sembra lecito sperare che nei prossimi anni vi siano sufficienti motivazioni e volontà affinché si cerchi di integrare tutti i diversi aspetti dinamici dell'imbarcazione utilizzando tecniche proprie della fluidodinamica numerica e della realtà virtuale, realizzando un simulatore che consenta di progettare una vela ottimizzando l'unica variabile obiettivo del progetto: le probabilità di battere l'avversario su un determinato percorso.

È importante sottolineare che l'uso di tecniche numeriche non è al momento una completa alternativa alla prova sperimentale. Infatti, la prova sperimentale in galleria del vento oltre a fornire le forze prodotte da una particolare regolazione delle vele, permette di determinare la regolazione ottimale agendo sulle scotte, misurando in tempo reale le forze aerodinamiche che agiscono sull'imbarcazione. Al contrario, in ambito numerico, la ricerca della regolazione richiederebbe di accoppiare al calcolo aerodinamico in oggetto, un dedicato codice strutturale e un ottimizzatore, codici che si stanno diffondendo in questi ultimissimi anni e che sicuramente rappresentano il futuro dell'aerodinamica numerica delle vele in andature non di bolina. Tuttavia nel breve periodo non saranno in grado di sostituire l'attività sperimentale in galleria del vento.

Per il futuro si chiede a questi codici di muovere verso l'integrazione dei diversi aspetti della dinamica dell'imbarcazione. Già alcuni passi sono stati fatti in questa direzione: nel campo dell'idrodinamica, le simulazioni numeriche consentono di lasciare libero il movimento dell'imbarcazione e di risolverne il movimento insieme al campo di moto dei due fluidi aria e acqua, e di calcolare la forma della superficie libera (ovvero il moto ondosso generato dall'imbarcazione). Nel campo dell'aerodinamica, è possibile risolvere il campo di moto intorno a uno *spinnaker* tenendo conto dell'irregolarità nel tempo del vento incidente e di un moto imposto dell'imbarcazione. Queste potenzialità rendono il futuro della fluidodinamica numerica molto attraente ma mettono in luce una nuova criticità: la mancanza della verifica sperimentale. Sono state

realizzate negli ultimi quattro anni diverse simulazioni che accoppiano aero- e idro-dinamica in una sola simulazione, ma la mancanza di prove sperimentali non ha consentito di valutarne la bontà. Il paradosso di fronte al quale ci si trova in questo momento è che proprio quando la fluidodinamica numerica si trova a superare quella sperimentale, la prima si scopre dipendere fortemente dalla seconda per poter progredire.

Approfondimenti

Di seguito riportiamo per completezza una possibile trattazione introduttiva di una delle formulazioni tipicamente utilizzate per descrivere le equazioni di Navier-Stokes. Queste poche righe possono essere di ausilio per avere una visione più chiara di alcune parti del testo.

Equazioni di Navier-Stokes

Le equazioni di Navier-Stokes per fluidi incomprimibili, ovvero per i quali la densità è costante e omogenea, sono dedotte dal principio della conservazione della massa e del bilancio della quantità di moto. La conservazione della massa si può esprimere nel seguente modo:

$$\nabla \cdot u = 0 \quad (a.1)$$

dove: $\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right)$

è l'operatore Nabla, u è il vettore velocità ed il punto (\bullet) esprime il prodotto scalare. Questa equazione è nota come *equazione di continuità*.

Il principio del bilancio della quantità di moto, che in formulazione Lagrangiana ha la nota forma $F = ma$, si può esprimere nella seguente forma dedotta dalla sua formulazione Euleriana:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla) u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \nabla^2 u \quad (a.2)$$

dove compare la derivata temporale della velocità, il termine non lineare con l'operatore nabla, la variazione di pressione divisa per la densità (ρ), e il termine viscoso che contiene la viscosità cinematica (ν) e l'operatore Laplaciano

$$\nabla^2 = \text{div}(\text{grad}) \left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2} \right).$$

Questa equazione è nota come *equazione del momentum*.

Sostituendo i termini dimensionali dell'equazione del momentum con i seguenti termini non dimensionali:

$$\tilde{u} = \frac{u}{u};$$

$$\tilde{p} = \frac{p}{\rho u^2};$$

$$\tilde{x} = \frac{x}{L};$$

$$\tilde{t} = \frac{tu}{L};$$

l'equazione (a.2) diviene:

$$\frac{\partial \tilde{u}}{\partial \tilde{t}} + (\tilde{u} \cdot \nabla) \tilde{u} = -\nabla \tilde{p} + \frac{1}{\text{Re}} \nabla^2 \tilde{u} \quad (a.3)$$

La quale mette in luce la dipendenza dal numero di Reynolds (Re) come discusso nel testo.

Bibliografia

- [1] Marchay C.A.: *Aero-Hydrodynamics of Sailing*. London: Adlard's Coles Nautical, 1979.
- [2] Milgram J.H.: *The analytical design of yacht sails*, *Trans. Soc. Naval Architect. Marine Eng.* SNAME, 1968, p. 118-160.
- [3] Milgram J.H.: *The aerodynamic of sails*. Proc. 7th Symp. Naval Hydrodyn, 1968, p. 1397-1434.
- [4] Milgram J.H.: *Sail Force Coefficients for Systematic Rig Variations*. SNAME Technical and Research Report: R-10, 1970.
- [5] Gentry A.E.: *The Aerodynamics of Sail Interaction*. Aient Interface III, The 3rd AIAA Symposium on Sailing, Nov. 20, 1971, Redondo Beach, California, US.
- [6] Gerritsma J., Onnink R., Versilius A.: *Geometry resistance and Stability of the Delft Systematic Hull Series*. The 7th HISWA Symposium, amsterdam 1981.
- [7] Kerwin J.E.: *A Velocity Prediction Program for Ocean Racing Yachts*. Rep. 78-11 MIT, July 1978.
- [8] Kerwin J.E., Newman J.N.: *A Summary of the H. Irwing Pratt Ocean Race Handicapping Project*. SNAME 4th CSYS Annapolis 1979.
- [9] Kolmogorov A.N.: *Dissipation of energy in a locally isotropic turbulence*. *Doklady Akad. Nauk SSSR*, 32, 141, 1941. (English translation in: American Mathematical Society Translations 1958, Series 2, Vol. 8, p. 87, Providence R.I.).
- [10] Squires K.D.: *Detached Eddy Simulation of Turbulent Flows - Method and Applications*. Lecture notes, Von Karman Institute for Fluid Dynamics, Brussels, Belgium, March 13-16, 2003.
- [11] Viola I.M., Ponzini R., Rocchi D., Fossati F.: *Analysis of Aerodynamic Indices for Racing Sailing Yachts: a Computational Study and Benchmark on up to 128 CPU*. In the Proceedings of the 20th International Conference on Parallel Computational Fluid Dynamics (PARCFD 2008), 19th-22nd May 2008, Lyon, France.
- [12] Viola I.M., Ponzini R., Passoni G.: *Downwind Sail Aerodynamics: Large Scale Computing vs. Large Scale Wind Tunnel Test*. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*. Submitted 2009.

RAFFAELE PONZINI ha una Laurea in Bioingegneria conseguita al Politecnico di Milano (2002) con una tesi di modellistica numerica applicata al campo dell'emodinamica (Analisi dei profili spaziali di velocità in un bypass coronarico da Y tramite un modello multiscala). Dal 2003 lavora all'interno del gruppo di calcolo ad alte prestazioni del CILEA dove è responsabile della gestione dei codici di fluidodinamica computazionale (CFD). Il suo campo di applicazione lavorativo include anche l'insegnamento di diversi linguaggi di programmazione (Python, C, C++) e di tecniche di programmazione ad oggetti. Nel 2007 ha conseguito un dottorato di ricerca in Bioingegneria presso il Politecnico di Milano (con lode) con una tesi dal titolo "*Computational modelling of local haemodynamics phenomena: methods, tools and clinical applications*". I suoi interessi di ricerca includono la modellistica multiscala, il processamento di immagini e la visualizzazione scientifica. È attualmente autore di 10 articoli (*peer-reviewed*) internazionali nel campo della biomeccanica computazionale e di numerose pubblicazioni a congresso nel campo biomedicale e della modellazione CFD in ambito navale.
E-mail: ponzini@cilea.it

IGNAZIO MARIA VIOLA, PhD, Ingegnere Navale, ricopre la posizione di *Lecturer in Naval Architecture* presso la *School of Marine Science and Technology* dell'Università di Newcastle (UK). Nato a Milano nel 1976, si laurea a pieni voti in Ingegneria Navale presso l'Università degli Studi di Genova nel 2001. Dopo una prima esperienza industriale di tre anni nella progettazione e costruzione di imbarcazioni (direttore della produzione di serie del cantiere MAS e coordinatore ufficio Ricerca e Sviluppo PRIMA), nel 2004 comincia una lunga collaborazione con la Galleria del Vento del Politecnico di Milano dove si interessa di fluidodinamica numerica e sperimentale. Si occupa dell'aerodinamica numerica per il consorzio Luna Rossa sfidante della Coppa America del 2007 e, nel 2008, completa il PhD in fluidodinamica applicata alle imbarcazioni. Lo stesso anno, in collaborazione con R. Ponzini (CILEA), realizza la prima simulazione numerica su una geometria complessa con una griglia di un miliardo di celle. Dal 2008 è membro del *Yacht Research Unit* dell'Università di Auckland (New Zealand), *scientific supplier* del consorzio di Coppa America *Emirates Team New Zealand*.
E-mail: im.viola@auckland.ac.nz
Web: www.ignaziovola.com