

Simulazioni fluidodinamiche di una imbarcazione di coppa America ai limiti delle possibilità computazionali

Giuseppe Passoni* Raffaele Ponzini**, Ignazio Maria Viola***

*Laboratorio di Idraulica, DIIAR - Politecnico di Milano

**CILEA, Segrate

***Yacht Research Unit, The University of Auckland, New Zealand

Abstract

In questo articolo viene presentato l'applicazione della fluidodinamica computazionale al caso della progettazione ingegneristica delle imbarcazioni a vela. In particolare il contesto, il metodo e le prospettive di questo metodo di indagine vengono discussi in relazione al più oneroso calcolo CFD mai affrontato nell'ambito delle imbarcazioni da regata di Coppa America.

In this article we present the application of computational fluid dynamics analysis to the case of sail wind engineering. In particular the context, the method and the perspectives of such approach are discussed referring to the largest CFD case ever performed on a Americas Cup size yacht. This work is the main output of an ongoing scientific collaboration among CILEA and academics and industrial partners concerning the applicability of CFD analysis to wind engineering design.

Keywords: CFD, Wind-engineering, external aerodynamics.

Introduzione

La fluidodinamica computazionale (CFD) è da sempre uno dei campi di applicazione più rilevanti per quanto riguarda le applicazioni scientifiche. Il CILEA da sempre attento a stimolare utilizzi innovativi e prospettici delle risorse di calcolo, nel 2008, ha intrapreso una attività nell'ambito della CFD, per valutarne l'uso nella progettazione di imbarcazioni veliche ed in particolare per valutare il massimo livello di dettaglio ottenibili con le più moderne risorse hardware e software. Per questo motivo è stata intrapresa una collaborazione scientifica con l'Ing. Ignazio M. Viola.

Dal 2005 al 2008 Ignazio Maria Viola, nell'ambito del suo dottorato di ricerca [1] svolto presso il dipartimento di meccanica del Politecnico di Milano e finanziato da Luna Rossa, ha studiato la fluidodinamica sia numerica che sperimentale applicata alle imbarcazioni di Coppa America. Al termine dei suoi studi ha messo a punto una metodologia robusta per comparare le analisi sperimentali effet-

tuate in galleria del vento a quelle numeriche eseguite al calcolatore come descritto ampiamente in [1]. Grazie ad una borsa di studio erogata dalla Regione Lombardia nella primavera del 2008, lo stesso Viola ha potuto, in collaborazione con il Prof. Giuseppe Passoni del Politecnico di Milano [2], con Raffaele Ponzini del CILEA di Segrate [3] e con il vendor di software Ansys [4], estendere la scala delle sue analisi ad un caso la cui dimensione supera di diversi ordini di grandezza quella di tutte le altre analisi effettuate nell'ambito della fluidodinamica applicata alla nautica ad oggi mai rese pubbliche. In particolare la aerodinamica esterna di un modello numerico di una imbarcazione di Coppa America di oltre un miliardo di celle, ottenuto da dati di galleria del vento, è stato costruito e studiato con successo utilizzando sofisticate tecniche ed infrastrutture di calcolo parallelo.

Il seguito dell'articolo contiene:

- La descrizione del ciclo di progettazione virtuale al calcolatore (Cad Aided Engineering,

CAE) mostrando inoltre lo sviluppo storico delle dimensioni dei modelli numerici studiati.

- La descrizione del modello da un miliardo di celle studiato considerando il dettaglio del modello fisico e del modello numerico nonché la metodologia utilizzata per ottenere il modello da un miliardo di celle.
- Le prospettive di queste metodologie nel breve e nel lungo periodo per la progettazione e il design in ambito navale.

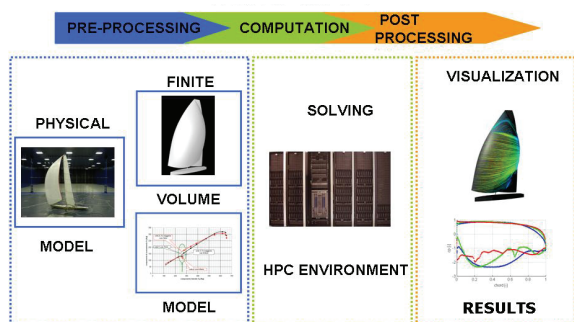


Fig. 1 - Ciclo della progettazione assistita al calcolatore.

Il ciclo CAE

Uno strumento di progettazione e design oltre che di ricerca avanzata, alternativo alla tradizionale galleria del vento, è costituito dalla progettazione a calcolatore o CAE. In figura 1 sono riportati i passaggi salienti di questa metodologia largamente utilizzata ormai in tutti i campi di ingegneria applicata.

Le fasi che vi si possono distinguere sono essenzialmente tre:

- Pre-processing (pannello blue): in questa fase a partire dal modello fisico (in questo caso il modello in scala dell'imbarcazione delle vele posto in galleria del vento) si ottengono i parametri necessari per implementare il modello numerico che sono essenzialmente la geometria delle vele e le condizioni fluidodinamiche, ovvero la velocità e la direzione del vento rispetto al modello di imbarcazione, dette 'condizioni al contorno'.
- Computation (pannello verde): in questa fase, grazie alle tecniche di calcolo numerico e ad infrastrutture software e hardware parallele, vengono risolte le equazioni della fisica che rispondono a quanto osservato nel modello fisico. Brevemente, poiché per le geometrie considerate non esistono soluzioni analitiche delle equazioni

fenomenologiche, teoremi del calcolo numerico permettono di risolvere in maniera approssimata le stesse equazioni su elementi discreti e di cardinalità finita (discretizzazioni o mesh). In questo senso si parla dunque di 'simulazioni numeriche' volendo intendere che tramite la soluzione delle equazioni della fisica eseguita sulle mesh delle geometrie considerate si possono ottenere valori approssimati, simulati appunto, dei fenomeni fluidodinamici reali.

- Post-processing (pannello giallo): in questa fase conclusiva vengono effettuate analisi qualitative tramite la così detta 'visualizzazione scientifica' delle grandezze coinvolte e quantitative tramite il processamento dei risultati per ottenere indici, correlazioni e leggi matematiche in grado di caratterizzare in maniera sintetica quanto simulato. Come è noto l'uomo apprende tramite la vista, pertanto, la varietà, la disponibilità e l'accuratezza con cui è possibile visualizzare grandezze fisiche all'interno dei modelli CFD una volta terminato il calcolo, rende estremamente potente dal punto di vista conoscitivo questo strumento.

Non è superfluo sottolineare alcuni aspetti fortemente innovativi di questo strumento proiettivo. Infatti la modellazione virtuale CAE, in generale, ha dei costi enormemente contenuti rispetto a qualsiasi altro ambiente di sperimentazione fisico permettendo peraltro una ripetibilità ed un livello di controllo sulle grandezze ottenibili dai risultati impossibile da replicare in galleria del vento o in vasca navale. Inoltre l'ambiente virtuale permette lo studio di scenari non approcciabili con i modelli fisici (alte velocità, livelli di turbolenza, complessità geometriche) attraverso la banale variazione di costanti e parametri del modello numerico.

Verso l'esperimento computazionale: la DNS

L'affidabilità in termini di accuratezza e robustezza dei risultati ottenuti con la CFD è strettamente legata all'accuratezza spaziale e temporale richiesta dagli algoritmi con cui vengono risolte le equazioni che sintetizzano il problema che si sta studiando. Il sistema così descritto potrebbe essere risolto esattamente dal punto di vista numerico, a patto di utilizzare un numero sufficientemente elevato di elementi di mesh; in questo caso si parla di risoluzione diretta delle equazioni o DNS. Tuttavia considerazioni energetiche ci

imporrebbero una discretizzazione eccessivamente onerosa per le condizioni fluidodinamiche di interesse. Infatti al crescere del contenuto energetico del problema, l'energia viene dissipata a scale spaziali e temporali sempre più piccole.

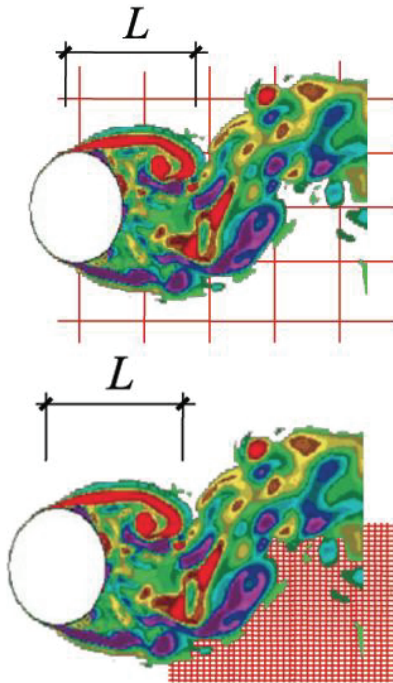


Fig. 2 – Scale spaziali e discretizzazione dei problemi. Si noti come per catturare le dimensioni caratteristiche di alcuni fenomeni fisici sia necessario utilizzare griglie di calcolo particolarmente raffinate.

Utilizzando considerazioni dimensionali formulate la prima volta da Kolmogorov nel 1941 [5], si mostra che il numero di elementi necessario a cogliere le dimensioni a cui avviene la dissipazione dell'energia è calcolabile a priori date certe grandezze caratteristiche della fluidodinamica del problema (il numero di Reynolds). La figura 2 esemplifica quanto descritto a parole e mostra il flusso intorno a un cilindro. Le strutture vorticosi, tramite cui si immette energia nel sistema, sono di dimensione dell'ordine di grandezza del diametro del cilindro. Queste vanno via via dissipandosi in strutture più piccole fino a scale di dimensioni dove sono dissipate per effetto viscoso. La griglia di calcolo che consentirebbe la risoluzione diretta delle equazioni dovrebbe avere dimensione pari almeno a quella delle scale più piccole. Qualora questo non sia possibile, per limiti tecnici, (tipicamente di limiti sulla memoria del sistema di calcolo) è pratica comune, per determinare l'effetto delle scale più piccole, effet-

tuare una operazione di media sul sistema di equazioni introducendo per consistenza delle ulteriori leggi euristiche in grado di rappresentare quei fenomeni dissipativi che si stanno trascurando implicitamente: i modelli di turbolenza. In questo studio si è invece cercato di raggiungere quella dimensione di griglia necessaria a rappresentare le scale più piccole caratteristiche del nostro problema. Ma qual è il prezzo da pagare? Come avviene in molti ambiti, l'uomo tende a saturare le risorse a sua disposizione e questa tensione spinge sempre oltre il limite della risorsa in uso. In ambito computazionale le risorse sono rappresentate ad esempio dai GFlops ovvero dal numero di miliardi di floating point operation eseguite da un calcolatore in un secondo. In figura 3, ottenuta da dati ufficiali forniti dalla TOP500 [6] (ovvero la classifica che viene stilata due volte all'anno in cui vengo indicati i 500 calcolatori più performanti al mondo) è possibile apprezzare come l'andamento della crescita delle dimensioni dei modelli computazionali in ambito nautico per la Coppa America segua fedelmente il trend segnato appunto dalla disponibilità di GFlops. In particolare si è passati da modelli di alcuni decine di migliaia di elementi nel 2000 fino al modello da oltre un miliardo di celle presentato qui e sviluppato nel 2008. Di questo passo è chiaro che il livello di dettaglio spaziale, necessario per risolvere in maniera diretta le equazioni della fisica che stanno alla base dei fenomeni che si vogliono studiare con i modelli numerici (DNS) verrà presto raggiunto e superato fornendo pertanto agli ingegneri navali uno strumento ancor più affidabile ed accurato quanto quelli già consolidati quali la galleria del vento e la vasca navale. La domanda nasce dunque spontanea: è possibile effettuare una DNS per una imbarcazione di Coppa America oggi? La risposta a questo quesito dipende proprio dalle condizioni fluidodinamiche del moto dell'imbarcazione oltre che dalla dimensione dell'imbarcazione stessa. In particolare utilizzando la teoria di Kolmogorov [5] è possibile dire che per la geometria di imbarcazione studiata in galleria del vento il numero di celle necessarie è pari a 32 miliardi circa. Questa dimensione purtroppo è ancora al di fuori della portata delle infrastrutture sia hardware che software a disposizione. Scendendo di un ordine di grandezza nella scala spaziale, ma restando ben al di sopra della scala attualmente considerata nella letteratura corrente, ci siamo prefissati come obiettivo quello di simulare la stessa

imbarcazione utilizzando un numero di celle crescenti da 16 milioni fino ad oltre un miliardo.

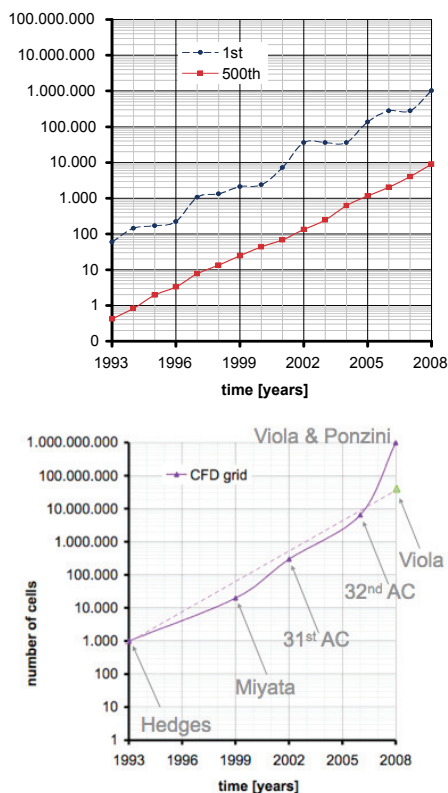


Fig. 3 - Andamento della crescita delle dimensioni dei modelli computazionali in ambito nautico per la Coppa America rispetto all'aumentare della disponibilità delle risorse di calcolo (dati Top500).

A billion cells CFD model: yes we can

L'aerodinamica di un ACC (America's Cup Class) con una randa ed un gennaker asimmetrico da vento leggero, mentre naviga in una andatura di lasco con un angolo al vento apparente di 45° , condizione precedentemente studiata in galleria del vento, è stata modellata secondo il ciclo CAE descritto in precedenza e rappresentato in figura 1.

La soluzione delle grandezze fluidodinamiche in condizioni stazionarie è stata ottenuta tramite un software commerciale (Fluent v6.23, Ansys Inc.). Il calcolo delle forze aerodinamiche e dei coefficienti associati ha permesso di comparare l'esperimento virtuale con quello fisico eseguito in galleria del vento ottenendo un ottimo livello di correlazione. Il calcolo ha richiesto l'uso di 179 nodi di calcolo per un totale di 512 processori in parallelo e 2.24 TB di RAM per una durata temporale complessiva di un

mezzo, totalizzando un utilizzo di risorsa di calcolo equivalente a 100.000 ore che corrispondono a circa 10 anni di tempo di calcolo virtuale se effettuato su una singola CPU seriale.

Il calcolatore utilizzato è un cluster Hewlett Packard che utilizza un sistema operativo Linux ed è equipaggiato con 208 dual-processors nodi blade con CPU Intel Xeon 3.166 GHz quad-core and 2 GB RAM per core (per un totale di 1664 cores). La disponibilità di memoria RAM totale è di 3,3 TB di e la sua performance di picco è stata valutata essere pari a 22 TFlop/s (migliaia di miliardi di operazioni al secondo). Questa è attualmente il sistema di calcolo di punta del Consorzio Interuniversitario CILEA [3] che si è collocato nel panorama mondiale come la 135ima macchina più potente al mondo [6] al momento della sua installazione.

Per costruire delle griglie di calcolo così grandi è stato necessario adottare una procedura parallela sfruttando la particolare architettura del sistema di calcolo e facendo generare separatamente da ciascun processore coinvolto nel calcolo solo una parte della griglia complessiva. In particolare una mesh di partenza da 16 milioni di elementi è stata ripartita tra i 512 processori coinvolti nel calcolo e poi grazie ad avanzati algoritmi di partizionamento è stato possibile suddividere iterativamente ogni elemento della mesh di partenza in 64 sottoelementi fino ad ottenere la griglia desiderata da oltre un miliardo di celle.

Per cercare di dare una idea della accuratezza spaziale raggiunta con questa procedura si può dire che se h è l'altezza dell'albero della imbarcazione, il valore dell'altezza della cella più piccola è pari a $h/20.000$. Questo che è evidentemente un costo in termini di utilizzo della memoria del calcolatore diventerà poi una ricchezza sia in termini di validità del calcolo che di precisione nella fase di post-processing: in figura 4 è mostrato un esempio della ricchezza informativa ottenibile con la visualizzazione scientifica sulla simulazione numerica fatta. In particolare nella figura sono mostrate due superfici isovelocità (rispettivamente in chiaro e in scuro) che mettono in evidenza le regioni dove il flusso è separato.

Prospettive: la galleria del vento virtuale

La classica domanda che ci si pone in questi casi è: where do we go from here? Oltre alla ovvia tensione degli autori verso una simulazione DNS da 32 miliardi di celle e ad un differente approccio di modello che tenga presente anche la natura non stazionaria dei fenomeni di turbolenza sopra citati, vi sono delle considerazioni di più ampia generalità che possono essere fatte. Nonostante la metodologia descritta si sia dimostrata vincente in questa ricerca, risulta evidente al lettore che per ora non rappresenta di per sé una completa alternativa alla prova sperimentale. Infatti, in galleria del vento oltre alla misurazione delle forze prodotte da una particolare regolazione delle vele, si cerca anche la regolazione ottimale agendo sulle scotte e verificando in tempo reale le forze corrispondenti. In ambito numerico, la ricerca della regolazione richiederebbe di accoppiare al calcolo CFD sia un codice strutturale che un ottimizzatore. Uno strumento informatico di questo tipo potrebbe essere considerato a buon diritto come una galleria del vento virtuale. In altri ambiti industriali (automotive in testa) questo tipo di codici multi-layer si stanno diffondendo negli ultimissimi anni e probabilmente rappresentano il futuro dell'aerodinamica numerica delle vele.

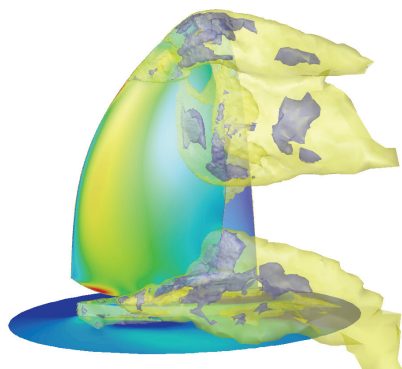


Fig. 4 – Visualizzazione scientifica del calcolo da un miliardo di celle (vedi corpo del testo) [9].

Conclusioni

In questo articolo è stata mostrata la fattibilità di uno studio CFD di oltre un miliardo di celle per una imbarcazione di Coppa America investigandone la distribuzione delle forze sulle vele in una particolare configurazione di andatura. Questa dimensione computazionale non è mai stata pubblicata fino ad oggi (si veda [7], [8]), e la precisazione sulla divulgazione di un simile risultato non è superflua visto che in generale il livello di riservatezza e di tutela dei dati nell'ambito di questa prestigiosa competizione è solitamente estremamente elevato. Pertanto gli autori non si stupirebbero se risultassero delle analisi simili fatte in precedenza ma i cui risultati non siano mai stati diffusi. È opportuno anche sottolineare come le persone impegnate in questa sperimentazione computazionale innovativa, svoltasi ben lontano temporalmente dallo svolgimento della competizione, abbiano lavorato con il solo interesse scientifico-tecnologico di verificare se e come fosse possibile passare dalla galleria del vento fisica a quella virtuale su un caso realisticamente connesso con l'ingegneria industriale applicata.

La fattibilità mostrata segna in ogni caso un riferimento che gli autori si augurano possa spronare ulteriormente i team di sviluppo delle imbarcazioni di coppa America nelle edizioni a venire.

Bibliografia

- [1] Viola I.M.: Fluidodinamica Numerica e Sperimentale Applicata alla Dinamica delle Imbarcazioni a Vela. Tesi di dottorato, Politecnico di Milano, 2008.
- [2] URL: <http://www.windtunnel.polimi.it>
- [3] URL: <http://www.cilea.it>
- [4] URL: <http://www.ansys.com>
- [5] A.N. Kolmogorov, Local Structure of Turbulence in Incompressible Viscous flow for Very Large Reynolds Number, Doklady Akademiyi Nauk SSSR, Vol. 30, p.299-303, 1941.
- [6] URL: <http://www.top500.org>
- [7] Ansys press release: Billion-news
- [8] Cilea press release: [Billion-news](http://www.billion-news.com)
- [9] URL: <http://www.ignazioviola.com>