



THE UNIVERSITY *of* EDINBURGH

Edinburgh Research Explorer

## Fluidodinamica numerica applicata all'aerodinamica di imbarcazione a vela

### Citation for published version:

Viola, IM, Ponzini, R & Passoni, G 2011, 'Fluidodinamica numerica applicata all'aerodinamica di imbarcazione a vela' *Analisi e Calcolo*, ???volume??? 42, ???pages??? 11-16.

### Link:

[Link to publication record in Edinburgh Research Explorer](#)

### Document Version:

Preprint (usually an early version)

### Published In:

*Analisi e Calcolo*

### General rights

Copyright for the publications made accessible via the Edinburgh Research Explorer is retained by the author(s) and / or other copyright owners and it is a condition of accessing these publications that users recognise and abide by the legal requirements associated with these rights.

### Take down policy

The University of Edinburgh has made every reasonable effort to ensure that Edinburgh Research Explorer content complies with UK legislation. If you believe that the public display of this file breaches copyright please contact [openaccess@ed.ac.uk](mailto:openaccess@ed.ac.uk) providing details, and we will remove access to the work immediately and investigate your claim.



**Abstract:** In questo articolo viene descritta l'analisi aerodinamica per una imbarcazione di Coppa America. I risultati si riferiscono a calcoli effettuati con modelli di fluidodinamica computazionale molto accurati, creati utilizzando dati sperimentali di galleria del vento. In particolare, per rispondere a domande ancora aperte in questo campo di applicazione, un'analisi di sensitività dei coefficienti aerodinamici è stata effettuata confrontando quattro discretizzazioni spaziali differenti (da 4 milioni fino ad un miliardo di celle), e tre schemi di discretizzazione spaziale con accuratezza di ordine crescente. Un andamento coerente della soluzione numerica è stato evidenziato dalle prove effettuate incrementando la risoluzione della griglia e l'accuratezza dell'algoritmo di discretizzazione numerica. In particolare, un sistematico aumento della forza totale agente sulla vela ed un allargamento della regione con flusso separato sono stati riscontrati per le configurazioni a più alta risoluzione. I risultati numerici sono stati infine processati per estrarre i parametri aerodinamici i cui valori sono stati confrontati con quelli corrispondenti misurati con prove in galleria del vento evidenziando le differenze esistenti.

## 1 Introduzione

Negli ultimi decenni strumenti avanzati di calcolo numerico sono stati ampiamente utilizzati per ottenere una comprensione più profonda della dinamica dei fluidi intorno alle vele in andature portanti, caratterizzate da un'ampia regione di flusso separato, e stabilire l'affidabilità di questi nuovi strumenti di indagine per fronteggiare problemi che sarebbero difficilmente trattabili con le tradizionali tecniche sperimentali. Nello studio dell'aerodinamica della vela di un'imbarcazione, un duplice approccio basato su tecniche sperimentali e modelli computazionali è particolarmente auspicabile, purtroppo questo ciclo virtuoso è raramente attuabile poiché le geometrie e dati sperimentali sono spesso sottoposti a vincoli di riservatezza; anche per questo motivo la letteratura scientifica è piuttosto limitata in questo ambito di applicazione e confronti o validazioni sono poco presenti. Di seguito analizzeremo lo stato dell'arte sul tema della simulazione numerica per lo studio dell'aerodinamica di imbarcazioni a vela al fine di mostrare in quale contesto scientifico si inserisce il presente lavoro.

Hedges et al. (1996) hanno per primi utilizzato tecniche di fluidodinamica numerica (CFD), ove le equazioni di Navier-Stokes incomprimibili sono risolte per flussi viscosi, per lo studio di vele portanti, quale è lo spinnaker. In particolare hanno utilizzato un modello RANS (Reynolds Averaged Navier-Stokes) con un modello di turbolenza sviluppato da Hedges nella sua tesi (Hedges, 1993) per l'analisi di un'imbarcazione a vela con spinnaker simmetrico e randa. Hedges ha confrontato i coefficienti aerodinamici calcolati tramite la CFD con quelli calcolati in galleria del vento. Più recentemente, Lasher e Richards (2007) hanno studiato uno spinnaker simmetrico sottoposto a tutti i possibili angoli al vento. La presenza della randa e dello scafo è stata trascurata, mentre il dominio di calcolo è stato discretizzato con un numero di celle tetraedriche dell'ordine di  $10^5$ . Tre modelli di turbolenza sono stati utilizzati e i rispettivi risultati numerici sono stati poi confrontati tra loro e con le prove in galleria del vento. Gli autori hanno rilevato difficoltà nella modellazione dello strato limite di galleria tramite modelli di turbolenza evidenziando come i tre modelli, a parità di condizioni al contorno, calcolassero diversi profili di velocità in corrispondenza di posizioni omologhe del modello. Un anno dopo, Richards e Lasher (2008) hanno modellato con tecniche RANS alcuni esperimenti in galleria del vento ove erano state misurate forze e pressioni su uno spinnaker e una randa in scala 1:25. Le misurazioni erano state effettuate per varie regolazioni

delle vele e con angoli al vento. Un numero di celle tetraedriche dell'ordine di  $10^5$  è stato utilizzato per i calcoli CFD.

Griglie di calcolo con risoluzione significativamente maggiore (fino a 37 milioni di elementi tetraedrici) sono stati utilizzati da Viola (2009) per lo studio di uno spinnaker asimmetrico e randa. La presenza dello scafo, dell'albero e del boma sono stati considerati nella simulazione numerica. La griglia di calcolo utilizzata ha consentito la soluzione delle equazioni di Navier-Stokes quasi in forma diretta per le condizioni di moto studiate, quindi permettendo di non considerare la presenza di un modello di turbolenza. I coefficienti aerodinamici globali hanno mostrato una buona corrispondenza con il dato di galleria con differenze limitate ad un massimo del 3%. Diversi modelli di turbolenza sono stati anche testati ma senza verificare un aumento sensibile della precisione; piuttosto una generale sovrastima delle forze è stato registrato inserendo questi termini dissipativi numerici.

Il presente articolo rappresenta un ulteriore avanzamento del lavoro presentato in Viola (2009). L'obiettivo di questo lavoro è di stabilire l'affidabilità delle stime della forza registrata sulla vela tramite modelli CFD, in particolare di stabilire se aumentando di molto la risoluzione della griglia di calcolo e dell'ordine di accuratezza dell'algoritmo numerico usato per risoluzione del modello è possibile ottenere un andamento stabile della soluzione. Il dominio numerico è stato discretizzato con accuratezza spaziale fino a oltre  $10^9$  elementi tetraedrici e risolto con algoritmi di discretizzazione spaziale del secondo ordine; i risultati così ottenuti sono stati con quelli ottenuti nel precedente lavoro di Viola (2009) e con i dati di galleria.

Il resto del lavoro è organizzato come segue.

- La sezione Materiali e Metodi spiega come sono stati costituiti i modelli CFD in termini di geometria e condizioni al contorno evidenziando la tecnica di discretizzazione del dominio adottata per ottenere la griglia da  $10^9$  celle. Considerazioni in merito alle scale di turbolenza e il loro rapporto con la risoluzione della griglia computazionale sono discusse. Infine, l'ambiente di High Performance Computing (HPC) utilizzato per tutti i calcoli è descritto.
- La sezione Risultati contiene sia considerazioni qualitative sulle principali variabili aerodinamiche che un'analisi quantitativa della sensitività dei coefficienti aerodinamici studiati al variare della risoluzione della griglia di calcolo e dell'accuratezza dell'algoritmo di discretizzazione numerica. In questa sezione un confronto con dati di galleria del vento è anche presentato.
- Nella sezione Discussione e Conclusioni viene effettuata un'analisi critica dei risultati numerici rispetto alla letteratura esistente.

## **2 Materiale e Metodi**

### *Modello geometrico*

La stessa geometria utilizzata da Viola (2009) è stata adottata nella costituzione del modello CFD studiato nel presente lavoro. La geometria dell'imbarcazione, comprensiva di randa e spinnaker asimmetrico, è stata rilevata durante analisi e misure sperimentali presso la galleria del vento del Politecnico di Milano. Figura 1 mostra una immagine fotografica dello stesso modello durante una prova sperimentale nella galleria del vento del Politecnico di Milano ma in una configurazione di prova differente da quella considerata nel presente lavoro. Le grandi dimensioni della galleria (4 m di altezza per 14 m di larghezza) hanno consentito di studiare un modello in scala 1:12.5, quindi con un'altezza complessiva da terra di 2,7 m, qui di seguito indicata sempre come l'altezza di

riferimento  $h$ . Un modello semplificato di forma dello scafo, albero e boma sono stati elaborati per la costituzione del modello CAD poi usato nei calcoli CFD. Maggiori dettagli sulla procedura sperimentale adottata in galleria del vento sono stati pubblicati da Fossati et al. (2006).

### *Condizioni al contorno*

Condizioni al contorno sulla velocità di entrata e di uscita sono state imposte a  $3,7 h$  sopravvento e a  $7,4 h$  sottovento rispetto al modello dello scafo. Impostare un'esatta corrispondenza tra i valori rilevati dal modello sperimentale all'ingresso della galleria e la sua controparte numerica non è stato possibile. Infatti, durante le prove di galleria del vento, il profilo spaziale di velocità (al variare dell'altezza) è stato misurato in assenza del modello dell'imbarcazione. Il valore misurato è quindi stato integrato dal pavimento della galleria fino alla testa dell'albero dell'imbarcazione per poi essere adottato come velocità di riferimento per i coefficienti aerodinamici. Nel modello CFD è stato utilizzato un profilo uniforme per la velocità del vento con un valore tale da essere equivalente al valore integrale ottenuto dalle misure in galleria. In tal modo è stata modellata correttamente la portata del flusso della galleria. Il profilo di velocità, al contrario, non è stato modellato. Infatti, il profilo di velocità in galleria del vento a monte del modello è significativamente influenzato dalla presenza del modello stesso. Purtroppo l'unica misura disponibile è il profilo di velocità nella sezione di prova in assenza del modello.

Una pressione uniforme è stata imposta all'uscita del modello. La sezione trasversale della galleria del vento ( $5,2 h$  larghezza e  $1,5 h$  di altezza) è stata modellata utilizzando un sotto-dominio di  $4,4 h$  di larghezza e  $1,3 h$  di altezza, evitando la necessità di modellare il profilo di velocità a parete. Condizioni di sforzi tangenziali nulli sono state utilizzate per modellare le pareti della galleria, soffitto e pavimento. Pertanto lo strato limite sul pavimento non è stato modellato. Infatti, poiché la corretta modellazione dello strato limite richiede un'elevata risoluzione della griglia su una regione spaziale molto ampia (il pavimento della galleria), una analisi di sensibilità alla risoluzione della griglia quale è il presente lavoro sarebbe stato significativamente influenzato dai diversi profili di velocità che si sarebbero ottenuti con diverse griglie. Pertanto, lo strato limite di galleria non è stato modellato.

### *Generazione della griglia di calcolo*

Il processo di generazione della griglia di calcolo è uno degli aspetti innovativi del presente lavoro. Per raggiungere elevata risoluzione della griglia è necessaria una grande quantità di memoria (RAM), in particolare per generare e memorizzare una griglia da un miliardo di celle tetraedriche sono necessari circa 2 TB di RAM utilizzando gli strumenti informatici a nostra disposizione (*Gambit v2.4.6, Ansys Inc. e TGrid v5.0.6, Ansys Inc.*). Per questo motivo ci siamo avvalsi di tecniche di generazione di griglia in ambiente di calcolo parallelo. Purtroppo ad oggi non sono noti agli autori software per la generazione di griglie in ambiente parallelo nonostante i modelli CFD, che fanno uso di griglie di calcolo, presentino importanti caratteristiche di scalabilità ed efficienza in ambienti distribuiti. Per questo limite il modello CFD di partenza è stato discretizzato con una griglia uniforme con elementi tetraedrici ottenuti a partire da elementi triangolari di superficie per un totale di circa 16 milioni di elementi (tale griglia verrà nel seguito denotata come 16M). A partire da questa griglia, direttamente nel risolutore numerico da noi adottato per i calcoli (*Fluent v6.3.35 beta, Ansys Inc.*) il dominio è stato e suddiviso in 512 processi paralleli tramite tecniche di domain decomposition già presenti nel codice commerciale sopra citato. Quindi ogni tetraedro di ogni sotto-dominio è stato suddiviso in 8 sotto-tetraedri, utilizzando un algoritmo di hanging node ottenendo una griglia da 128 milioni di celle (nel seguito denotata come 128M) già distribuita sui processi paralleli. Ripetendo questa procedura una seconda volta da questa griglia si è ottenuto una nuova discretizzazione di 1024 milioni di tetraedri (nel seguito

denotata come 1024M). Al termine di questa procedura quattro griglie topologicamente identiche sono state ottenuti 4M, 16M, 128M e 1024M.

Per quanto noto agli autori la griglia da 1024 milioni di tetraedri è la prima griglia computazionale di queste dimensioni su una geometria completamente tridimensionale di interesse ingegneristico. In questa griglia il primo centro cella si trova ad una altezza pari a  $h/20,000$ , mentre la distanza a parete è di  $h / 6,400$  e la risoluzione della griglia massima nel dominio di calcolo è pari a  $h/80$ .

### *Impostazioni del risolutore numerico*

Il sistema di equazioni valido per i fluidi incomprimibili (equazioni di Navier-Stokes) unitamente con le condizioni al contorno descritte sopra, è stato risolto in condizioni stazionarie nel dominio di calcolo ottenuto con le quattro griglie descritte e utilizzando un codice commerciale a volumi finiti (*Fluent v6.3.35 beta, Ansys Inc.*). Nel seguito indicheremo le soluzioni evidenziando con quale accuratezza numerica la soluzione è stata ottenuta rispetto alla velocità o alla pressione. Questi algoritmi di risoluzione sono già a disposizione dell'utente all'interno dell'applicativo commerciale utilizzato; per ogni approfondimento si rimanda il lettore interessato alla documentazione ufficiale del solutore. In particolare si avrà:

- p1v1 per indicare uno schema *upwind* del primo ordine sia per la velocità che per la pressione;
- p1vq per indicare uno schema *upwind* del primo ordine in pressione e *QUICK* del secondo in velocità;
- p2v2 per indicare uno schema *upwind* del secondo ordine sia in pressione che in velocità.

I coefficienti di sotto-rilassamento sono stati modulati per ottimizzare il tempo di convergenza e al fine di mantenere il valore dei residui corrispondenti alle equazioni di continuità e alle tre componenti della velocità al di sotto  $10^{-3}$ . Il criterio di convergenza è stato poi definito su un'analisi dei coefficienti di portanza e resistenza. I coefficienti sono stati monitorati ad ogni iterazione e il calcolo è stato interrotto dopo aver stabilito che i coefficienti avevano raggiunto un certo livello di periodicità oscillando intorno al loro valore medio. Per esempio, la figura 2(a) mostra i coefficienti di portanza e resistenza per ogni iterazione normalizzati rispetto al loro valor medio nel caso della griglia 1024M con schema di discretizzazione p1vq. Dopo meno di  $10^4$  iterazioni i coefficienti raggiunto un andamento stabile e asintotico, oscillante attorno ad un valore medio. Figura 2(b) mostra nel dettaglio queste oscillazioni dei coefficienti per le iterazioni a regime, cioè a valle del transitorio iniziale. In questo caso circa dopo 6,000 iterazioni si raggiunge la condizione a regime su cui i coefficienti medi sono stati poi calcolati.

### *Scale di turbolenza e di risoluzione della griglia*

Le prove in galleria del vento e il modello numerico sono realizzati allo stesso numero di Reynolds (Re). È tuttavia importante osservare come il numero di Reynolds dell'imbarcazione al vero è quasi 10 volte più grande di quello usato nel modello sperimentale poiché il suo valore è di solito irraggiungibile in galleria del vento a causa della fragilità della struttura del modello. Il campo di moto attorno alla vela è principalmente turbolento. Nel presente lavoro, a causa di una precisa scelta metodologica, non sono stati utilizzati modelli di turbolenza. Questi modelli euristici sono necessari per tenere in considerazione l'effetto dissipativo delle forze viscosse al livello di scale spaziali solitamente trascurate dai modelli CFD in questo ambito. Tuttavia nel presente lavoro utilizzando modelli CFD con griglie fino a  $10^9$  celle si vuole esplicitamente esplorare se e come sia possibile

effettuare studi affidabili incrementando la risoluzione della griglia di calcolo invece di inserire modelli dissipativi euristici.

### *Ambiente di calcolo High Performance Computing*

Al fine di raggiungere l'elevata richiesta di risorse di calcolo necessaria per gestire la griglia da un miliardo di celle (1024M), è stato necessario l'uso di un ambiente High Performance Computing. Tutti i calcoli sono stati effettuati su un sistema di calcolo parallelo Hewlett-Packard® sistema operativo Linux 208 dotato di processore dual-blade e nodi con i processori Intel® Xeon® quad-core 3,166 GHz CPU, 16 GB/nodo. Le prestazioni di picco totale del sistema è stata testata essere 22 Teraflops (22 mila miliardi di operazioni in virgola mobile al secondo). Il sistema si era classificato numero 135 sulla lista top-500 dei supercomputer nel giugno del 2008. In particolare, tutti i calcoli sono stati effettuati su 512 CPU con 128 nodi di calcolo. La griglia 1024M ha richiesto un totale di 2 TB di RAM ed il calcolo ha girato per circa 170 ore.

### **3 Risultati**

Di seguito vengono presentati i risultati delle dodici simulazioni effettuate sulle quattro griglie di calcolo (4M, 16M, 128M, 1024M) e utilizzando tre diversi algoritmi di discretizzazione numerica di crescente accuratezza (p1v1, p1vq, p2v2). I valori ottenuti per i coefficienti aerodinamici di portanza e resistenza sono riportati in figura 3 per tutti i casi analizzati. I coefficienti mostrano tendenze asintotiche all'aumentare della risoluzione della griglia e al crescere dell'accuratezza dell'algoritmo di discretizzazione; algoritmi di discretizzazione del primo ordine mostrano un andamento non monotono in accordo con quanto osservato in Viola (2009).

La grande quantità di RAM necessaria per la post-elaborazione e la visualizzazione dei dati del calcolo a più alta risoluzione ha fatto sì che l'analisi fosse focalizzata sulle griglie più piccole 4M e 16M dove le tendenze sono comunque chiaramente visibili. La figura 4 mostra i risultati qualitativi per i casi 4M-p1v1, 4M-p1vq, 4M-p2v2, 16M-p1v1, 16M-p1vq, 16M-p2v2; con queste notazioni si vuole indicare la coppia costituita dai due parametri analizzati in questo lavoro: risoluzione della griglia e accuratezza dell'algoritmo di discretizzazione. In figura 4 vengono mostrate le linee di flusso sulla superficie sottovento dello spinnaker al variare della risoluzione della griglia e accuratezza dell'algoritmo di discretizzazione usato. La figura 4(a) è relativa al caso 4M-p1v1 e si può osservare come la separazione avvenga sul lato sottovento vicino alle estremità superiore e inferiore della vela. La stessa tendenza si osserva anche quando la precisione computazionale in termini di griglia o di algoritmo di discretizzazione è aumentata. In generale i dati analizzati mostrano grandi regioni separate quando la precisione di computazionale è aumentata.

L'analisi delle pressioni locali consentono una migliore comprensione degli effetti legati alla risoluzione della griglia e accuratezza dell'algoritmo di discretizzazione usato. In figura 5 vengono mostrati i risultati per i casi 4M-p1v1, 4M-p1vq, 4M-p2v2, 16M-p1v1, 16M-p1vq, 16M-p2v2 e viene mostrato l'andamento del coefficiente di pressione  $C_p$  lungo una corda per le sezioni a  $z = 0.25 h$ ,  $0.50 h$ ,  $0.75 h$ , rispettivamente. All'aumentare della precisione si nota una maggiore zona di aspirazione ( $C_p$  negativo) in corrispondenza della sezione inferiore ( $z = 0.25 h$ ) e un andamento più oscillante del  $C_p$  nella parte superiore ( $z = 0.75 h$ ), dovuto alla separazione dello strato limite. Concentrandosi sulla sezione più alta, figura 6 mostra per i casi di 4M-p1v1, 4M-p1vq, 4M-p2v2, 16M-p1v1, 16M-p1vq, 16M-p2v2 le isosuperfici del  $C_p$  su un piano orizzontale posto a  $z = 0.75 h$ . All'aumentare della precisione di calcolo, vengono risolti nuclei convettivi di dimensioni inferiore che si riflettono in oscillazioni del  $C_p$ .

## 4 Discussione e conclusioni

### *Tendenze generali*

I risultati presentati consentono in generale di effettuare le seguenti osservazioni:

- Aumentando la risoluzione della griglia e aumentando l'accuratezza dell'algoritmo di discretizzazione si osservano comportamenti analoghi negli indici aerodinamici considerati;
- A questi aumenti si associano i seguenti effetti:
  - Aumenta il valore della forza agente sulla vela;
  - Le regioni separate si allargano;
  - Vengono risolti nuclei convettivi di dimensioni inferiori che si riflettono su oscillazioni del  $C_p$  sul lato sottovento della vela.

Questi andamenti generali ed il comportamento asintotico dei coefficienti di forza riportati in fig. 3a e fig. 3b, sono coerenti con considerazioni teoriche per cui all'aumentare dell'accuratezza del modello CFD è associato un effetto di diminuzione della diffusione numerica ed una maggiore precisione nella descrizione dei campi di moto e dei gradienti di velocità e di pressione del modello CFD nel suo complesso. Coerentemente anche l'utilizzo di un algoritmo di discretizzazione del secondo ordine per pressione e velocità ( $p2v2$ ) aiuta a ottenere un andamento asintotico più forte e, viceversa, l'utilizzo di uno schema al primo ordine ( $p1v1$ ) risulta in un aumento della diffusione numerica. Tuttavia, anche per algoritmi di discretizzazione del primo ordine, aumentando la risoluzione della griglia si evidenzia una tendenza convergente verso gli stessi risultati ottenuti con algoritmi di discretizzazione di ordine superiore.

Come detto aumentando la risoluzione del modello CFD i coefficienti aerodinamici mostrano un andamento asintotico a valori che però sono quasi il 20% più grandi rispetto ai valori ottenuti in galleria del vento. Ciò può essere spiegato con la differente condizione d'ingresso esistente tra la condizione sperimentale e il modello numerico. In particolare, nell'analisi CFD, il flusso in entrata è stato modellato con un flusso laminare con velocità omogenea sulla sezione in ingresso, mentre in galleria il flusso è turbolento e presenta un profilo di velocità verticale non uniforme. Nella condizione misurata facendo il test con la galleria vuota il valore dell'intensità turbolenta è risultato pari al 5% e sono state misurate scale di lunghezza turbolente pari a circa  $0.1 h$ . La condizione di moto laminare considerata nel modello CFD porta di fatto con sé una minore dissipazione energetica ed un aumento conseguente dei gradienti di pressione e velocità rispetto al flusso turbolento sperimentale. Un aumento dei gradienti spaziali di velocità comporta un aumento degli angoli di attacco locali presso il bordo d'ingresso della vela, che quindi sono maggiori in condizioni di flusso laminare che in condizioni di flusso turbolento. Inoltre, questi aumentano all'aumentare della risoluzione della griglia e dell'accuratezza dell'algoritmo di discretizzazione, poiché meno dissipati per via della dissipazione numerica introdotta dalla discretizzazione spaziale. Questo spiegherebbe in parte la crescente sovrastima della forza all'aumentare della accuratezza numerica.

La maggior parte dei lavori scientifici in letteratura riporta risoluzioni della griglia molto inferiore a quella del presente articolo e l'utilizzo di modelli di turbolenza (Hedges, 1993; Hedges et al., 1996 Lasher e Richards, 2007, 2008; Lasher e Sonnenmeier, 2008; Masuyama et al., 2007 Querard e Wilson, 2007; Richter et al). Viola (2009) ha studiato l'effetto della presenza di un modello di turbolenza sui coefficienti forza calcolata con un algoritmo del primo ordine ( $p1v1$ ). Viola ha osservato che senza la turbolenza su due griglie a bassa risoluzione (1M e 5M elementi), una sovrastima della forza fino al 10% è rilevabile. Questo risultato è in accordo con il presente

lavoro. Inoltre, l'introduzione di modelli di turbolenza ha introdotto un'ulteriore sovrastima delle forze in misura diversa per i diversi modelli di turbolenza provati. L'incremento della stima della forza può essere dovuto al fatto che, sebbene il modello di turbolenza introduca una maggiore dissipazione numerica, l'utilizzo di una condizione di flusso turbolento in ingresso introduce una maggiore energia del sistema, che risulta in un incremento della stima delle forze aerodinamiche.

Risultati simili sono stati documentati da Lasher e Richards (2007), che hanno riportato una sovrastima dei coefficienti aerodinamici di circa il 20% quando hanno adottato un modello di turbolenza. Si potrebbe pertanto ipotizzare che la presenza della turbolenza introduce energia nel dominio computazionale che non è adeguatamente dissipata se non vi è una adeguata risoluzione spaziale nella discretizzazione del dominio. La maggiore quantità di energia introdotta ha quindi l'effetto finale di aumentare il carico del vento e le forze calcolate.

In questo lavoro, una ulteriore giustificazione alla sovrastima delle forze potrebbe risiedere nel fatto che non sono stati risolti i termini non stazionari delle equazioni di Navier-Stokes. Pertanto la dinamica temporale della dissipazione energetica delle scale turbolente più piccole non avviene in quanto il termine temporale non è considerato; da qui il conseguente aumento di energia nel sistema e la sovrastima delle forze agenti sulla vela.

Come osservazione finale è da notare che una griglia da un miliardo di celle consente di tener conto delle scale di turbolenza con una lunghezza d'onda dell'ordine della risoluzione della griglia stessa. La risoluzione della griglia è dell'ordine di  $10^{-4} h$  e la velocità del vento è di circa 1 m/s, di conseguenza, la risoluzione della griglia più alta tiene conto delle variazioni dell'ordine di  $10^4$  Hz, ovvero due ordini di grandezza più elevati della frequenza di campionamento nella galleria del vento. Di conseguenza la media delle forze potrebbe essere interessata dalle fluttuazioni di frequenze più alte che di fatto sono invece filtrate nelle misure sperimentali di galleria.

## 5 Conclusioni

Nel presente lavoro l'aerodinamica di un'imbarcazione a vela in andatura portante è stata studiata con un codice CFD commerciale modellando una prova sperimentale realizzata in galleria del vento effettuata precedentemente. I coefficienti di portanza e resistenza calcolati sul modello di galleria del vento sono stati confrontati con quelli calcolati per quattro griglie di calcolo usate per discretizzare la geometria con un numero di celle crescente da 4 milioni fino a oltre un miliardo. Inoltre tre algoritmi numerici di accuratezza crescente sono stati utilizzati per risolvere le equazioni del fluido in queste griglie. Il campo di moto generale e il flusso attorno allo spinnaker sono stati confrontati per due risoluzioni della griglia (4 e 16 milioni di celle) e per tre i algoritmi di discretizzazione. Sia aumentando la risoluzione della griglia che aumentando l'ordine di accuratezza nell'algoritmo di risoluzione, sono stati osservati i seguenti effetti: aumento delle forze, aumento delle dimensioni delle zone di flusso separato, risoluzione di nuclei convettivi di dimensione decrescente. Una spiegazione di questa tendenza generale è stata fornita e discussa, considerando in particolare lo smorzamento dei gradienti spaziali di velocità e di pressione che si osservano per calcoli effettuati con bassa risoluzione (per via della griglia o del algoritmo). La coerenza delle tendenze osservate, e in particolare l'andamento asintotico dei coefficienti forza, osservati sia aumentando la risoluzione della griglia che aumentando l'accuratezza dell'algoritmo di discretizzazione, conferma l'affidabilità dei calcoli effettuati.

I risultati attuali evidenziano l'importanza di eseguire calcoli su una griglia molto raffinata e di utilizzare algoritmi di ordine superiore al primo al fine di verificare l'affidabilità dei risultati ottenuti con simulazioni realizzate con risoluzioni della griglia limitate, quali le simulazioni tipicamente realizzate in fase di progettazione. Infatti, differenze anche consistenti nella descrizione



del campo di moto e nei calcoli delle forze globali potrebbero essere ottenute con diverse griglie e algoritmi numerici; queste variazioni dovrebbe sempre essere prese in considerazione quando la simulazione numerica viene utilizzata per cercare di prevedere valori di forza realistici o nella scelta tra diversi progetti e/o condizioni di navigazione.

## **6 Ringraziamenti**

Gli autori vogliono ringraziare tutti coloro che sono stati coinvolti nella grande sfida per eseguire e risolvere il primo modello CFD di un miliardo di celle per una singola geometria completamente tridimensionale: Claudio Arlandini, Marco Pirola, Paolo Ramieri, Paride Dagna e Silvia Bozzi.

## **7 Bibliografia**

Fallow J.B., 1996. America's Cup Sail Design. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 63, 183-192.

Fossati F., Muggisca S., Viola I.M., Zasso A., 2006. Wind Tunnel Techniques for Investigation and Optimization of Sailing Yachts Aerodynamics, in: *Proceedings of the 2nd High Performance Yacht Design Conference*, Auckland, New Zealand.

Hedges K.L., 1993. Computer Modelling of Downwind Sails. ME Thesis, University of Auckland, New Zealand.

Hedges K.L., Richards P.J., Mallison G.D., 1996. Computer Modeling of Downwind Sails. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 63, 95-110.

Lasher W.C., Richards P.J., 2007. Validation of RANS Simulations for International America's Cup Class Spinnaker Force Coefficients in an Atmospheric Boundary Layer. *Journal of Ship Research*, 51 (1), 22-38.

Lasher W., Sonnenmeier J., 2008. An Analysis of Practical RANS Simulations for Spinnaker aerodynamics. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96, 143-165.

Masuyama Y., Tahara Y., Fukasawa T., Maeda N., 2007. Database of Sail Shapes vs. Sail Performance and Validation of Numerical Calculation for Upwind Condition, in: *Proceeding of The 18th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis, Maryland, USA.

Querard A.B.G., Wilson P.A., 2007. Aerodynamic of Modern Square Head Sails: a Comparative Study Between Wind-Tunnel Experiments and RANS Simulations, in: *Proceedings of In the Modern Yacht*, Southampton, UK.

Richards P.J., Lasher W.C., 2008. Wind Tunnel and CFD Modelling of Pressures on Downwind Sails, in: *Proceedings of VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics & Applications*, July 20-24, Milan, Italy.

Richter H.J., Horrigan K.C., Braun J.B., 2003. Computational Fluid Dynamics for Downwind Sails, in: *Proceedings of the 16th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis, USA.

Viola I.M., 2008. Fluidodinamica Numerica e Sperimentale Applicata alla Dinamica delle Imbarcazioni a Vela (Numerical and Experimental Fluid Dynamics applied to Sailing Yacht Dynamics). Ph.D. Thesis, Politecnico di Milano, Milan, Italy.

Viola I.M., 2009. Downwind Sail Aerodynamics: a CFD Investigation with High Grid Resolution, *Ocean Engineering*, 36 (12-13), 974-984.

**Figure**



Figura 1. Immagine fotografica di una prova sperimentale nella galleria del vento del Politecnico di Milano.

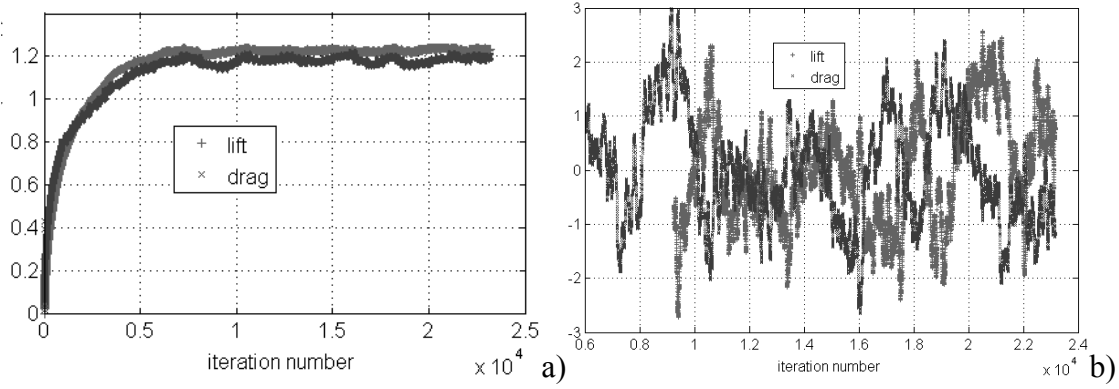


Figura 2. Coefficienti di portanza (Lift) e resistenza (Drag) normalizzati rispetto al valor medio nel caso 1024M-p1vq per il numero complessivo di iterazioni (a) e per le sole iterazioni considerate nell'operazione di media (b).

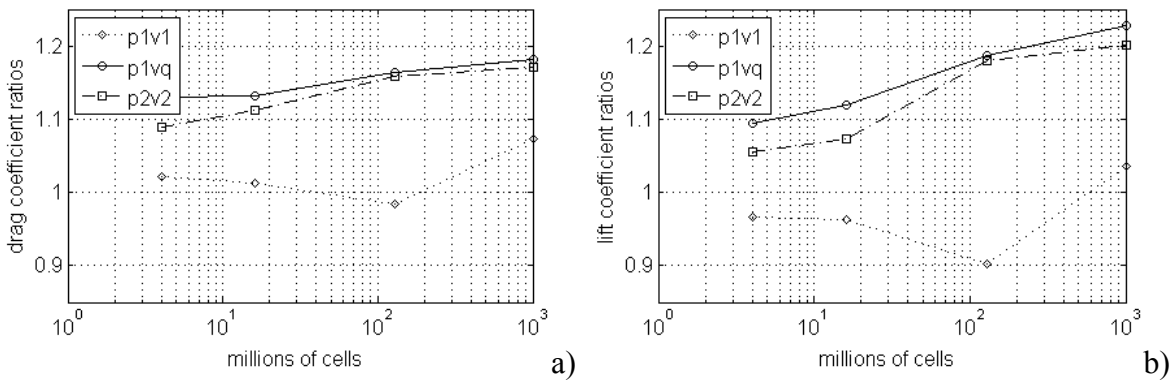


Figura 3. Coefficienti di portanza (a) e di resistenza (b) normalizzati sul dato sperimentale all'aumentare del numero di celle della griglia.

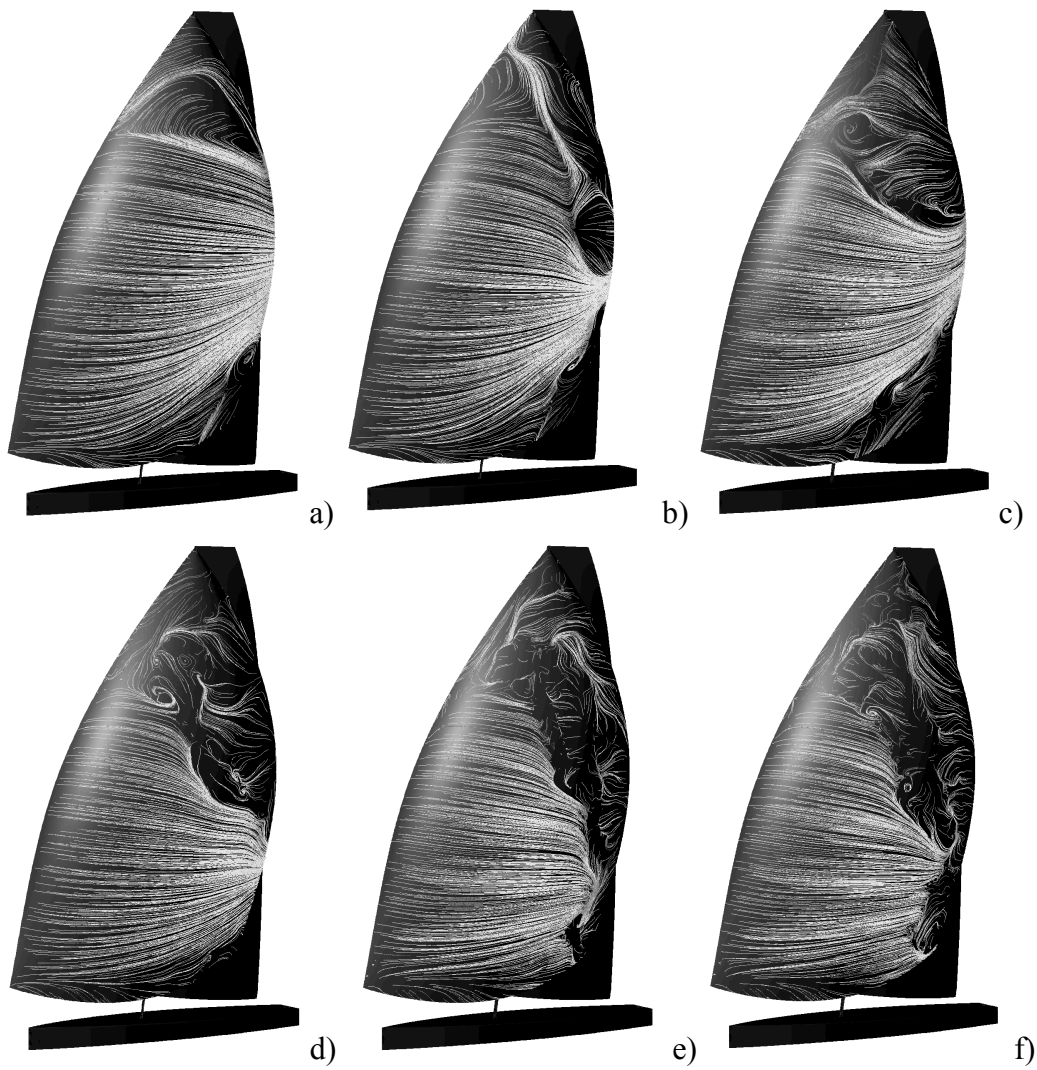


Figura 4. Linee di flusso sulla superficie sottovento dello spinnaker per: (a) 4M-p1v1, (b) 4M-p1vq, (c) 4M-p2v2, (d) 16M-p1v1, (e) 16M-p1vq, (f) 16M-p2v2.

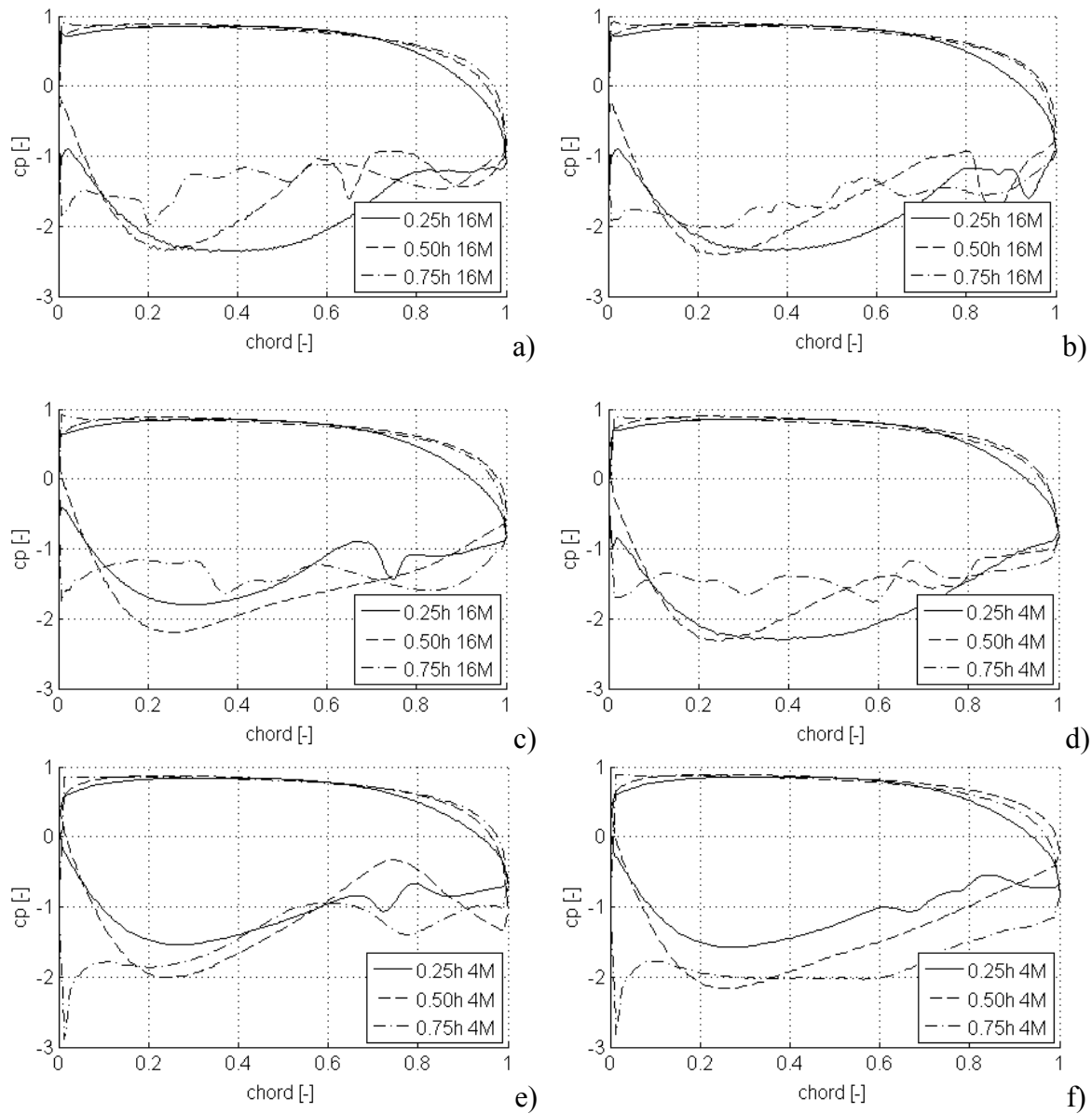


Figura 5.  $C_p$  lungo il valore normalizzato della corda su tre sezioni dello spinnaker a 0.25 h, 0.5 h, e 0.75 h rispettivamente, per: (a) 4M-p1v1, (b) 4M-p1vq, (c) 4M-p2v2, (d) 16M-p1v1, (e) 16M-p1vq, (f) 16M-p2v2.

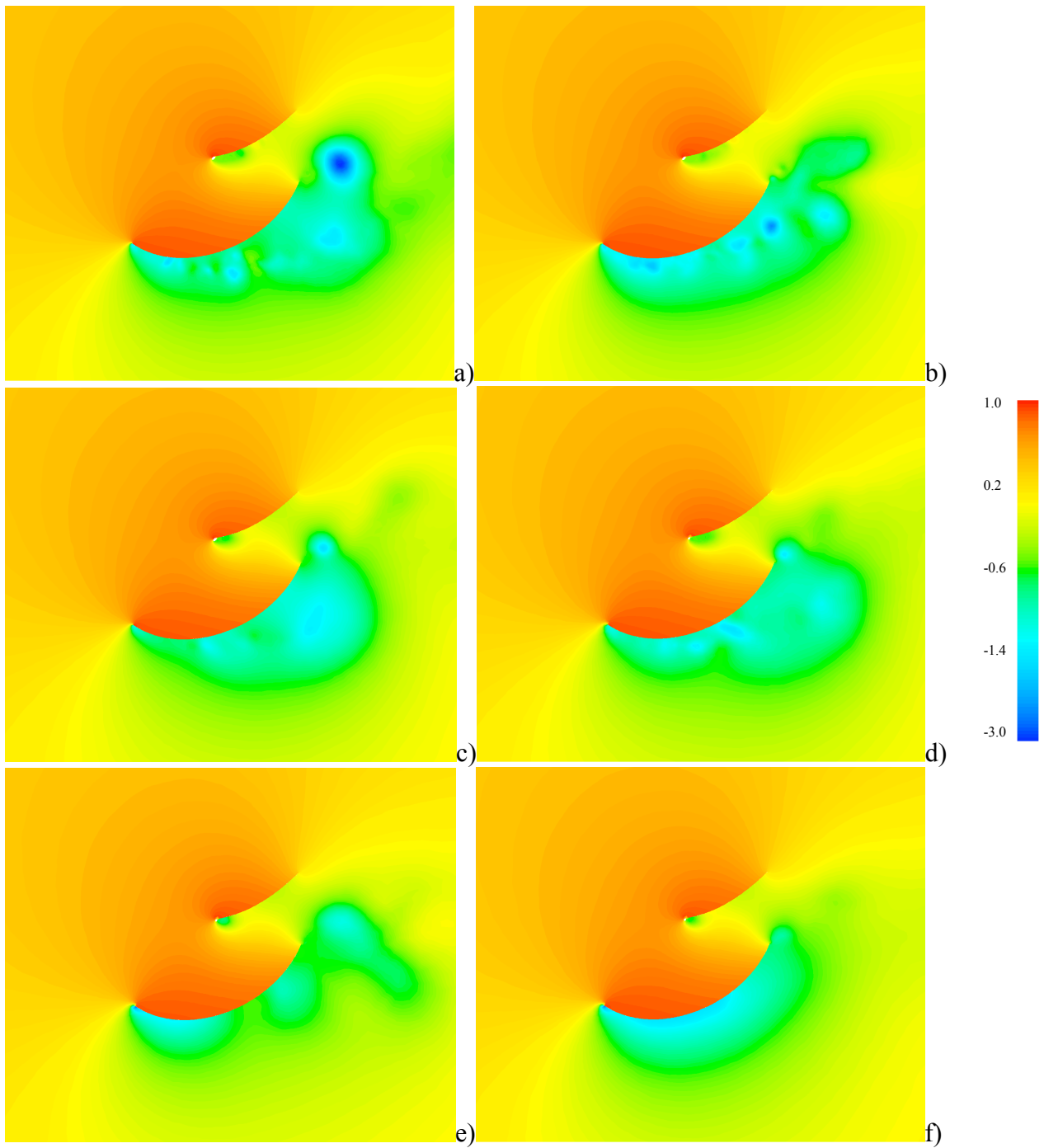


Figura 6. Isosuperficie de  $C_p$  su un piano orizzontale a 0.75 h per: (a) 4M-p1v1, (b) 4M-p1vq, (c) 4M-p2v2, (d) 16M-p1v1, (e) 16M-p1vq, (f) 16M-p2v2.