

POLITECNICO DI TORINO

Collegio di Ingegneria Ingegneria Meccanica, Aerospaziale, dell'Autoveicolo e
della Produzione

**Corso di Laurea Magistrale
in Ingegneria Aerospaziale**

Tesi di Laurea Magistrale

Studio della scia di una vela e applicazioni pratiche in condizioni tipiche di regata



Relatore

prof. Gaetano Iuso

Candidato

Carlo Zorzi

Luglio 2019

Indice

ELENCO DELLE FIGURE E DELLE TABELLE	5
ELENCO DELLE ABBREVIAZIONI	8
SOMMARIO	9
ABSTRACT.....	11
INTRODUZIONE.....	13
CAPITOLO 1 PRINCIPI DELLA NAVIGAZIONE A VELA	15
1.1 – Parti di una barca	15
1.2 - Le andature	18
1.3 - Triangolo di velocità	19
1.4 - Forze generate dalle vele.....	21
1.5 - Forze generate dall’opera viva	23
1.6 - Forze del sistema barca a vela.....	24
CAPITOLO 2 LA REGATA.....	29
2.1 - Regate lunghe.....	30
2.2 - Regate costiere	31
2.3 - Regate a bastone di flotta	32
2.4 - Regate Match Race.....	33
2.5 - Momenti di regata presi in esame	34
2.5.1 Fase di partenza.....	34
2.5.2 Boa di bolina	35
2.5.3 Incroci durante la bolina	36
CAPITOLO 3 ANALISI DELLA SCIA.....	37
3.1 – Approccio numerico	38
3.2 - Approccio sperimentale.....	39
3.3 Approccio CFD.....	41
CAPITOLO 4 INTERFERENZA TRA DUE BARCHE VICINE.....	43
4.1 – Analisi analitica	43
4.2 – Analisi sperimentale	49
4.3 – Analisi CFD.....	51
4.3.1 Blanketing Zone.....	54
4.3.2 Safe Leeward Position	55
CAPITOLO 5 APPLICAZIONE A CASI TIPICI DI REGATA	57
5.1 – Partenza	57
5.1.1 Analisi analitica	58

5.1.2 Analisi sperimentale.....	59
5.1.3 Analisi CFD	60
5.1.4 Risultati	61
5.2 – Boa di Bolina	62
5.2.1 Analisi analitica	63
5.2.2 Analisi sperimentale.....	64
5.2.3 Analisi CFD	65
5.2.4 Risultati	65
5.3 – Incroci durante la Bolina	66
CONCLUSIONI.....	69
BIBLIOGRAFIA	71
RINGRAZIAMENTI.....	72

ELENCO DELLE FIGURE E DELLE TABELLE

- Figura 1.1** – Immagine di un Melges 24 con indicizzazione delle varie parti della barca
- Figura 1.2** – immagine da drone di un melges 24 con indicata la forma della vela
- Figura 1.3** – le andature con angoli indicativi
- Figura 1.4** – parametri per definizione forma vela secondo una lamina curva
- Figura 1.5** – Triangolo di velocità
- Figura 1.6** – Forze aerodinamiche su lamina curva
- Figura 1.7** – Forze aerodinamiche agenti sulla vela
- Figura 1.8** – Esempio di profilo simmetrico (NACA 0015) adatto ad una deriva con le forze fluidodinamiche applicate
- Figura 1.9** – grafico dell'andamento del coefficiente di portanza C_L rispetto all'angolo di incidenza α
- Figura 1.10** – forze generate dal piano di deriva
- Figura 1.11** – combinazione tra le forze prodotte dalle vele e quelle prodotte dalla deriva
- Figura 1.12** – Fireball di bolina con un membro dell'equipaggio appeso al trapezio per controbilanciare la coppia sbandante di vela e deriva
- Figura 1.13** – Le imbarcazioni della classe Imoca di nuova generazione usano vari sistemi per contrastare la coppia sbandante creata dalle vele
- Figura 2.1** – Rotta della Volvo Ocean Race edizione 2017-2018
- Figura 2.2** – arrivo al tramonto allo scoglio della Giraglia
- Figura 2.3** – regate costiere durante la Giraglia Rolex Cup
- Figura 2.4** – Classico percorso a bastone per regate in monotipo
- Figura 2.5** – Partenza di una regata della classe Fireball
- Figura 2.6** – arrivo alla boa di bolina di una regata di classe Fireball
- Figura 2.7** – lotta alla partenza durante una prova del match race world tour
- Figura 2.8** – incrocio tra BMW Oracle e Emirates Team New Zealand durante l'ultima America's Cup di San Francisco
- Figura 2.9** – a sinistra partenza stilizzata, a destra partenza nella classe J70
- Figura 2.10** - a sinistra arrivo alla boa di bolina sulla layline, a destra boa di bolina di monotipi
- Figura 2.11** - a sinistra incroci durante la bolina, a destra bolina durante una regata di J70
- Figura 3.1** – le due zone di una scia di una barca a vela
- Figura 3.2** – filetti fluidi nella scia di una vela calcolata con codice CFD effettuata da Spenkuch
- Figura 3.3** – esempio di scia ricavata da Caponnetto

- Figura 3.4** – Galleria del vento dell'università di Auckland
- Figura 3.5** – Diagramma con i risultati dell'analisi sperimentale
a sinistra è diagrammata la velocità del flusso a $1/3 h$, mentre a destra sono rappresentati i filetti fluidi a $1/2 h$
- Figura 3.6** – scia nelle tre dimensioni in prova sperimentale
- Figura 3.7** – Immagine della scia in 3D
- Figura 3.8** – Tip vortex
- Figura 4.1** – Barca chiave con posizione relativa della “Barca secondaria”
- Figura 4.2** – Forza Propulsiva e Laterale per area a varie distanze ed angoli della barca secondaria rispetto alla barca chiave
- Figura 4.3** – esempio di rappresentazione grafica dell'andamento della scia nel caso di $R = 0.5 h$ e $\Phi = 120^\circ$
- Figura 4.4** – Dati alla distanza di $R = 0.5 h$ elaborati relativamente alle prestazioni della barca singola
- Figura 4.5** - Dati alla distanza di $R = 1 h$ elaborati relativamente alle prestazioni della barca singola
- Figura 4.6** - Dati alla distanza di $R = 2 h$ elaborati relativamente alle prestazioni della barca singola
- Figura 4.7** – a $\Phi = 84^\circ$ e $\Phi = 264^\circ$ le prestazioni della barca chiave (in verde) e di quella secondaria (in bianco) si equivalgono; mentre a $\Phi = 158^\circ$ la barca secondaria ha un grosso vantaggio rispetto a quella chiave
- Figura 4.8** – Andamento della spinta della barca chiave e della barca secondaria rispetto alla spinta della barca isolata a $R = 0.5 h$
- Figura 4.9** – Cambio percentuale della spinta della barca chiave al variare della posizione della seconda barca rispetto alla spinta di una barca isolata
- Figura 4.10** – immagine basata sui dati ottenuti dalla galleria del vento
- Figura 4.11** – diagramma comparativo tra i dati di Caponnetto [3] e i dati sperimentali
- Figura 4.12** – disposizione della barca secondaria rispetto a quella chiave nell'analisi CFD
- Figura 4.13** – Risultato dell'analisi di interferenza tra due barche
- Figura 4.14** – Confronto tra analisi CFD e analisi numerica di Caponnetto [3] a $R=1h$
- Figura 4.15** – la barca chiave (in verde) si trova nella zona di blanketing della scia della barca secondaria (in bianca)
- Figura 4.16** – Streamline attorno alle due imbarcazioni
- Figura 4.17** - pressione sulle due vele in vista 2D dall'alto. Si nota come la barca gialla in zona di backwinding abbia una pressione minore
- Figura 4.18** – Leeward Safe Position con barca chiave (in verde) e barca secondaria (in bianco)
- Figura 5.1** – primo caso di partenza con barca chiave (verde) sopravvento
- Figura 5.2** – secondo caso di partenza con barca chiave (verde) sottovento

Figura 5.3 – grafico delle prestazioni a $R= 0.5h$ con indicati i due angoli dei due casi in cui le barche sono allineate alla linea di partenza (a destra in azzurro la barca chiave è sopravento alla secondaria, a sinistra in arancione la barca chiave è sottovento)

Figura 5.3 – grafico delle prestazioni a $R= 1h$ con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata. Sono indicati i due angoli dei due casi in cui le barche sono allineate alla linea di partenza (a destra in azzurro la barca chiave è sopravento alla secondaria, a sinistra in arancione la barca chiave è sottovento)

Figura 5.4 – grafico delle prestazioni a $R= 1h$ con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata. Sono indicati i due angoli dei due casi in cui le barche sono allineate alla linea di partenza (a destra in azzurro la barca chiave è sopravento alla secondaria, a sinistra in arancione la barca chiave è sottovento)

Figura 5.5 – Risultati dell'analisi in galleria del vento confrontata con analisi analitica con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata a $R= 1h$. Sono indicati i due angoli dei due casi in cui le barche sono allineate alla linea di partenza (a destra in azzurro la barca chiave è sopravento alla secondaria, a sinistra in arancione la barca chiave è sottovento)

Figura 5.6 – Confronto tra CFD, analisi analitica e sperimentale con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata a $R=1h$. Sono indicati i due angoli dei due casi in cui le barche sono allineate alla linea di partenza (a destra in azzurro la barca chiave è sopravento alla secondaria, a sinistra in arancione la barca chiave è sottovento)

Figura 5.7 – Arrivo alla boa di bolina

Figura 5.8 – grafico delle prestazioni a $R= 0.5h$ con indicati il caso di barca chiave davanti alla barca secondaria (simbolo arancione) e di barca chiave dietro (simbolo azzurro). I dati sono dati in relazione della spinta creata dalle due barche rispetto alla spinta di una barca isolata

Figura 5.9 – grafico delle prestazioni a $R= 1h$ con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata. Sono indicati i due il casi di barca chiave davanti (simbolo arancione) e dietro (simbolo azzurro)

Figura 5.10 – Risultati dell'analisi in galleria del vento confrontata con analisi analitica con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata a $R= 1h$. Sono indicati i due il casi di barca chiave davanti (simbolo arancione) e dietro (simbolo azzurro)

Figura 5.11 – Risultati dell'analisi CFD confrontata con analisi analitica e sperimentale con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata a $R= 1h$. Sono indicati i due il casi di barca chiave davanti (simbolo arancione) e dietro (simbolo azzurro)

Figura 5.12 – Incrocio tra due barche su mure opposte durante la bolina

Tabella 5.1 – riassunto dati per la partenza

Tabella 5.2 - riassunto dati per la boa di bolina

ELENCO DELLE ABBREVIAZIONI

AWA	Apparent Wind Angle
AWS	Apparent Wind Speed
TWA	True Wind Angle
TWS	True Wind Speed
CFD	Computer Fluid Dynamics
RANS	Reynolds Averaged Navier Stokes

SOMMARIO

L'obiettivo di questa tesi è di analizzare come il comportamento della scia di una vela influisce sulle prestazioni delle barche attorno durante una regata.

È stata effettuata prima un'analisi sulla scia creata da una vela per poi applicare i concetti all'interazione tra due barche.

L'elaborato termina con lo studio della variazione di prestazione di una barca in alcuni momenti tipici di regata, identificati con l'aiuto di esperti del settore.

La ricerca di dati è stata effettuata attraverso uno studio bibliografico di casi già esistenti; sono state quindi cercate delle pubblicazioni riguardo alla interazione della scia tra diverse barche.

La conoscenza scientifica dell'andamento delle prestazioni a seconda della posizione relativa della barca rispetto ad un'altra rappresenta uno strumento utile al tattico per scegliere la sua strategia.

L'intento finale dello studio ha quindi uno scopo agonistico, per cercare di consegnare al regatante delle nozioni che possono portare ad avere un vantaggio tattico sui competitor.

ABSTRACT

The aim of this thesis is to analyze how the evolution of the wake of a sail affects the performance of the boats around during a race.

First of all an analysis was made on wake created by a sail and then applied this concepts to the interaction between two boats.

The paper ends with the study of the performance variation of a boat in some typical regatta moments, identified with the help of sector experts.

The search for data was carried out through a bibliographic study of existing cases; publications have therefore been sought concerning the interaction of the wake between different boats.

The scientific knowledge of the performance trend, depending on the relative position of a boat compared to another, represents a useful tool for the tactician to choose his strategy. So the final intent of the study has a competitive purpose, to try to give the racer some notions that can lead to having a tactical advantage over other competitors.

INTRODUZIONE

Pochi sport riescono a trasmettere le sensazioni della barca a vela. Sfruttare una forza invisibile come il vento per muoversi da un luogo all'altro è davvero un qualcosa di straordinario. Planare a tutta velocità sulle onde, con metà della barca tirata fuori dall'acqua dalla pressione delle vele, è una emozione indescrivibile.

Le barche a vela sono nate con scopi puramente commerciali dalla necessità di spostare velocemente e senza sforzo merci e persone. Al giorno d'oggi sono usate solo a scopo ricreativo o agonistico, con milioni di appassionati sparsi per tutto il mondo.

L'Italia rappresenta uno dei posti al mondo con la maggiore varietà di luoghi adatti alla navigazione a vela. Posti come il Lago di Garda, la Sardegna o la Toscana rappresentano da sempre una mecca per i velisti di tutto il mondo, sia grazie alle fantastiche condizioni meteorologiche che per la classica ospitalità italiana.

La parte agonistica di questo sport è molto varia e si adatta a chiunque. A differenza della credenza popolare infatti la vela non è uno sport solo per ricchi, ma permette a chiunque di partecipare a delle regate anche a bassi costi. Si può infatti passare dalla vela puramente amatoriale su imbarcazioni di piccole dimensioni dette derivate, trasportabili su carrelli stradali e con costi di gestione paragonabili a quelli di una moto, ai maxi yacht di 20 m o più con costi milionari.

Nella nautica l'ingegneria è sempre stata una presenza costante. La complessità del sistema barca a vela ha sempre appassionato gli ingegneri, sviluppando una ricerca di tecnologie in continua evoluzione per riuscire a rendere le barche sempre più veloci, sicure e di facile gestione.

Nonostante l'ingegneria nautica sia nata molto prima degli aerei, ormai la maggior parte delle soluzioni introdotte su una barca derivano dall'ingegneria aeronautica e aerospaziale. Non c'è quindi da sorprendersi se le tecniche usate per la costruzione degli aerei vengono applicate anche in ambito nautico.

Lo scopo della tesi è quello di investigare l'andamento della scia prodotta dalle vele di imbarcazioni da regata. Lo studio verrà poi applicato a delle classiche condizioni di gara, in modo da quantificare numericamente il calo (o l'aumento) di prestazioni quando due barche si avvicinano tra di loro. Un velista esperto, grazie all'esperienza acquisita in regata e durante gli allenamenti, è perfettamente in grado di riconoscere quando si trova nella scia di una imbarcazione avversaria. Ma avere degli strumenti che ti permettono in modo scientifico di capire dove inizia e dove finisce l'effetto negativo prodotto dalla scia, o sapere effettivamente quanto si sta perdendo in termini di performance, può costituire un vantaggio tattico rispetto ai competitor.

In regate di alto livello (come America's Cup o le olimpiadi), dove gli interessi in gioco e i costi sono alti, anche il più piccolo dettaglio può dare un vantaggio sull'avversario e può fare la differenza tra vincere e perdere. Piccole intuizioni come la winglet sulla deriva di Australia II hanno infatti portato il team alla vittoria dell'America's Cup del 1982.

Naturalmente con questo studio non si riuscirà a vincere un'olimpiade, ma si possono fornire degli spunti interessanti ai regatanti, in modo da avere uno strumento in più per le scelte strategiche.

Al giorno d'oggi disponiamo di molti strumenti per poter compiere un'indagine del genere.

La galleria del vento è sicuramente lo strumento che permette un'indagine più accurata e precisa.

Si tratta però di un tipo di analisi molto costosa, a causa dell'elevata energia elettrica necessaria per la generazione del flusso e per la gestione e costruzione dell'impianto. Inoltre richiede la realizzazione di modelli in scala attrezzati con sonde o bilance aerodinamiche, anch'essi molto costosi.

Un altro metodo molto usato è la Computer Fluid Dynamics (CFD) che consiste nella simulazione virtuale a computer di modelli fluidodinamici.

È uno strumento molto efficace che negli ultimi anni ha avuto un notevole avanzamento, rendendolo molto preciso ed efficace in grado di sostituire efficacemente la più costosa galleria del vento.

Il lavoro compiuto in questa tesi è stato di tipo bibliografico.

È stata quindi effettuata una ricerca (sul web e su testi esterni) per trovare esperimenti ed analisi che trattassero l'analisi della scia di una vela, unita all'interazione della stessa tra diverse barche.

Sono stati trovati diversi articoli con diversi tipi di analisi.

In particolare è stato scelto di riferirsi agli studi compiuti da M. Caponnetto riguardo l'analisi analitica dell'interferenza tra due barche ("The Aerodynamic Interference Between Two Boats Sailing Close-Hauled") [3], all'articolo di P.J. Richards sullo studio sperimentale dell'interazione tra due barche ("A Wind Tunnel Study of the Interaction Between Two Sailing Yachts") [1] e a due studi in CFD, uno dell'università di Kiel ("RANS based CFD investigation of the interference between two boats sailing upwind") [5] e uno compiuto da T. Spenkuch ("Lifting line method for modelling covering and blanketing effects for yacht fleet race simulation") [4].

Una volta completata la raccolta di dati per lo studio del disturbo della scia tra due barche è stato possibile applicare le nozioni trovate per analizzare alcuni momenti tipici di regata.

I momenti di regata da analizzare sono stati scelti in collaborazione con la veleria "Quantum Sails Design Group" di Genova in modo da poter verificare alcune teorie sulla zona di interferenza tra barche nate dall'esperienza diretta acquisita in regata da professionisti del settore.

Il lavoro è suddiviso in 5 capitoli: la prima parte introduce le basi della navigazione a vela, con una vista sulle forze e i momenti applicati sull'imbarcazione.

Il secondo capitolo spiega come avviene una regata velica, introducendo alla fine del capitolo i casi di studio scelti per le analisi.

Nel terzo e quarto capitolo viene analizzata la scia di una barca e l'interazione tra due barche vicine. Per questi capitoli sono state usate le tre analisi (analitica, sperimentale e CFD) citate in precedenza.

Nel quinto e ultimo capitolo i dati acquisiti sono stati elaborati per essere applicati a casi di regata selezionati nel secondo capitolo, analizzando poi i risultati.

CAPITOLO 1

PRINCIPI DELLA NAVIGAZIONE A VELA

In questo capitolo sono presentati i principi della navigazione a vela con una descrizione delle forze che agiscono su una barca, permettendole di avanzare sfruttando la sola forza del vento.

La barca a vela è un sistema molto complesso, dove coesistono molti fattori differenti. Il fatto di convivere tra due fluidi differenti, uno con una densità di tre ordini di grandezza maggiore rispetto all'altro, rende la barca a vela una macchina davvero complicata.

Le vele sono anch'esse una componente difficile da analizzare in quanto, trattandosi di un tessuto e non di un materiale rigido, con l'azione del vento modificano la loro forma in modo difficile da prevedere, rendendo complicata l'analisi.

Con le dovute semplificazioni è comunque possibile andare a vedere quali sono le forze e i momenti che vengono applicati sulla barca.

1.1 - Parti di una barca

Le navi e le barche sono stati i primi mezzi di trasporto utilizzati dall'uomo. Ai giorni d'oggi le barche a vela sono ormai utilizzate solo come mezzo sportivo per svago o per scopi agonistici.

Negli anni la forma e l'armamento delle barche ha subito una notevolissima evoluzione. Si è passati dai vecchi galeoni, con vele a forma quadrata e con il legno come unico materiale disponibile per la costruzione, ai catamarani volanti e ultratecnologici dei giorni moderni.

Al giorno d'oggi molti dei componenti presenti sulle barche provengono dall'ambiente aerospaziale; è quindi frequente l'uso di materiali compositi come vetroresina e carbonio.

Lo schema in figura 1.1 presenta le varie componenti di un melges 24, una delle barche più riuscite della storia della vela dal punto di vista progettuale a parere di molti. È una imbarcazione nata per le regate in monotipo, cioè tra barche tutte uguali, sul quale hanno navigato, e navigano tutt'ora, alcuni tra i velisti più forti al mondo. Questa barca rappresenta quindi il perfetto esempio di barca moderna.

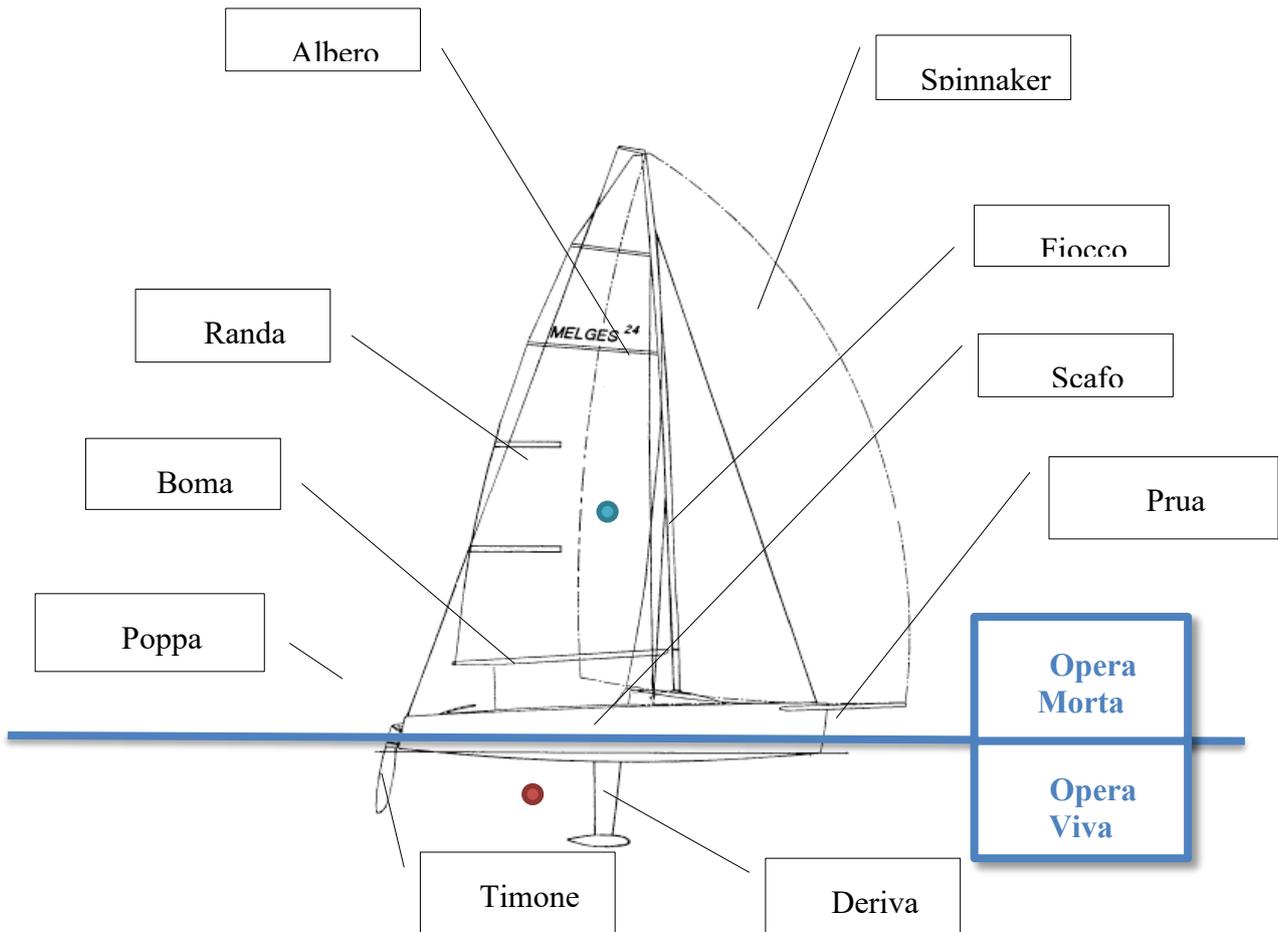


Figura 1.1 – Immagine di un Melges 24 con indicizzazione delle varie parti della barca

- **Prua:** la parte anteriore della barca.
- **Poppa:** parte posteriore della barca
- **Randa:** quella che nell'antichità veniva chiamata la vela maestra. Negli armi velici dei giorni nostri è una vela a forma triangolare posizionata verso poppa e vincolata alla barca tramite l'albero nella sua parte anteriore e al boma nella parte inferiore. Nelle barche da competizione moderna è spesso di forma trapezoidale. Questa soluzione permette di ridurre il tip vortex, riducendo quindi il drag della vela.
- **Fiocco:** la vela anteriore della barca.
Normalmente su ogni barca da competizione ci sono varie tipologie di fiocco, con differenti materiali e forme per essere utilizzati in diverse condizioni di vento.

Sia la randa che il fiocco possono essere viste, in via preliminare, come delle lamine incurvate investite da un flusso d'aria con un certo angolo di incidenza.

Questo permette di semplificare l'analisi e riuscire a trovare un primo dato indicativo per i coefficienti di portanza e resistenza delle due vele.

Per semplificare ancora di più il sistema si è scelto di considerare le due vele in combinazione tra di loro, andando quindi a prendere in esame solo una vela.

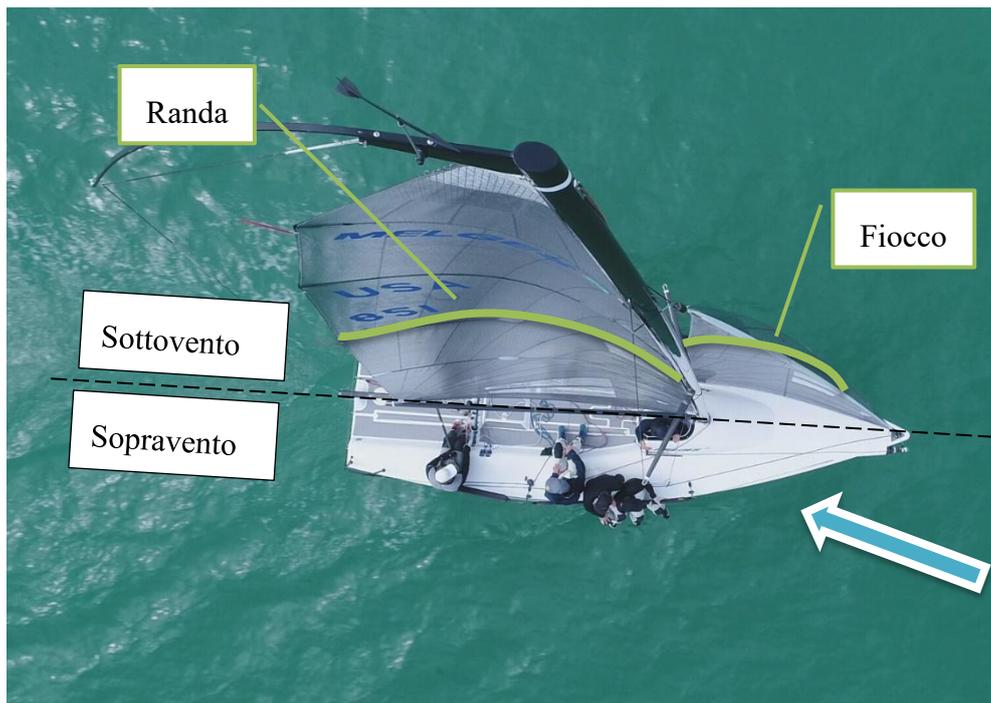


Figura 1.2 – immagine da drone di un melges 24 con indicata la forma della vela

- **Spinnaker:** vela utilizzate nelle andature di poppa. Allo scopo della nostra analisi verrà trascurata in quanto analizzeremo solo l'andatura di bolina.
- **Timone:** serve a dare la direzione alla barca.
Fa parte delle appendici della parte immersa in acqua.
Insieme alla deriva rappresenta la parte dell'opera viva preposta a contrastare la forza laterale velica e permettere alla barca di procedere di bolina.
- **Deriva:** serve a controbilanciare la portanza prodotta dalle vele e permettere quindi alla barca di avanzare in linea quasi retta, senza derivare di lato.
Si tratta di una appendice con una forma simmetrica (es. NACA 0012 / NACA 0015) che ha lo scopo di creare portanza sia che il vento arrivi da destra che da sinistra della barca.
La analizzeremo più in dettaglio successivamente.
- **Opera morta:** comprende ogni parte della barca che si trova al di sopra del livello dell'acqua. Fanno parte dell'opera morta le vele e la parte emersa dello scafo.
È la parte della barca che svolge il compito di propulsione della barca.
Il centro di applicazione delle forze, rappresentato nella figura 1.1 dal pallino azzurro, è detto Centro Velico (CV)
- **Opera viva:** è la parte immersa della barca. Ne fanno parte la deriva, il timone e tutta la parte immersa dello scafo.
È la parte della barca che svolge il compito di contrastare la forza laterale compiuta dalle vele.
Il centro di applicazione delle forze idrodinamiche della deriva, rappresentato nella figura 1.1 dal pallino azzurro, è detto Centro di Deriva (CD).

1.2 - Le andature

A seconda della direzione relativa del vento rispetto alla rotta della barca possiamo andare a identificare quelle che vengono chiamate le andature. La figura 1.3 ce ne mostra uno schema riassuntivo.

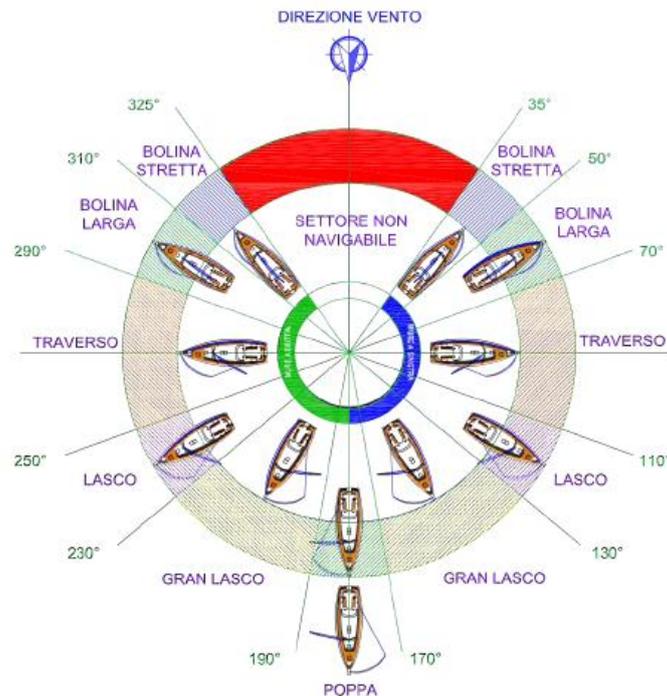


Figura 1.3 – le andature con angoli indicativi

Vediamo che a partire dal prua a vento, cioè con la barca che punta con la prua il vento, e andando di 45° in 45° si trovano le andature di bolina, traverso, lasco e poppa.

Le andature si specchiano simmetricamente rispetto al vento, andando a identificare due condizioni distinte: una con il vento che proviene da destra, detta mure a dritta, e una con il vento che proviene da sinistra, detta mure a sinistra.

Per effettuare il passaggio da una mura all'altra sarà necessario manovrare compiendo una virata, nel caso in cui si passi con la prua al vento, o una strambata, passando con la poppa al vento.

Naturalmente la barca non può muoversi controvento, e quindi tra le due andature di bolina, una mure a dritta e una mure a sinistra, si identifica una zona detta di angolo morto dove la barca non può navigare.

Quindi nel caso si debba raggiungere un punto situato "prua a vento" rispetto a me, dovrò procedere a zig zag passando da un andatura di bolina mure a sinistra a una mure a dritta compiendo varie virate.

L'andatura che più interessa a noi è quella di bolina, con un angolo di circa 45° rispetto al vento, in quanto è quella che viene affrontata per prima durante la regata in quanto.

È l'andatura tecnicamente più complicata perché il regatanti devono essere in grado di navigare il più vicino possibile all'angolo morto senza mai entrarci. Inoltre, dovendo compiere delle virate per raggiungere una boa posta controvento, si creano delle separazioni

lateralmente tra le barche, che nel caso di un cambio di vento in una zona possono portare ad un vantaggio a un'imbarcazione rispetto ad un'altra.

Ad ogni andatura è associata una certa regolazione delle vele, con una diversa forma della stessa.

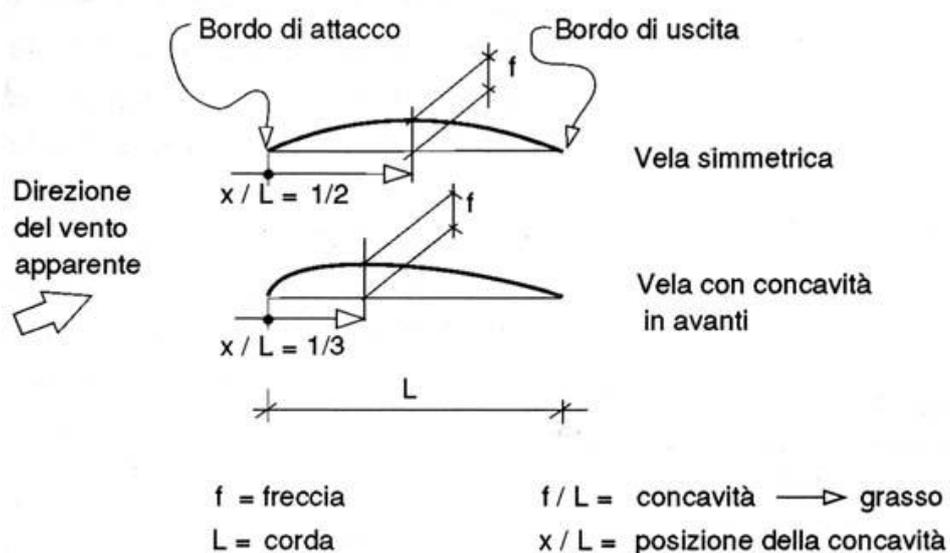


Figura 1.4 – parametri per definizione forma vela secondo una lamina curva

Nello schema in figura 1.4 possiamo andare a identificare i parametri utilizzati per la creazione della lamina rappresentante una vela.

A seconda dell'andatura la concavità (o camber) e la sua posizione cambiano. In generale possiamo dire che nell'andatura di bolina la vela viene tenuta più piatta, cioè con un camber meno accentuato, e con una posizione di massima concavità relativamente più arretrata. Questo permette al flusso di scorrere più facilmente sulla vela e di creare più portanza.

Nelle andature con il vento che arriva alle spalle, come lasco e poppa, si cerca invece di ingrassare le vele, cioè di aumentare il camber ed avanzare la sua posizione. Questo perché a causa dell'eccessivo angolo di incidenza del vento rispetto alla vela il flusso tende a diventare turbolento, ed è quindi necessario avere una maggiore curvatura per poter generare una maggiore spinta.

Un altro parametro da tenere in considerazione per la regolazione della vela è il twist o svergolamento. Il twist è la variazione dell'angolo fra la corda e boma con l'altezza (forma a elica).

Anche il twist viene aumentato quando si va di poppa, per poter diminuire l'angolo di attacco nella parte alta della vela.

Di bolina invece il twist viene contenuto.

1.3 - Triangolo di velocità

Andiamo ora ad introdurre il cosiddetto triangolo di velocità.

Il flusso d'aria che investe le vele può essere scomposto in due differenti componenti: una dovuta al vento realmente presente nell'ambiente v_R , detto vento reale, e uno dovuto alla velocità della barca v_B .

Il vento risultante tra le due componenti è detto vento apparente v_A .

Il vento apparente è quello che agisce realmente sulle vele ed è quindi quello che dobbiamo andare a prendere in esame per le nostre analisi.

L'angolo del vento apparente è detto Apparent Wind Angle (AWA), mentre la sua velocità, misurata in nodi, è detto Apparent Wind Speed (AWS).

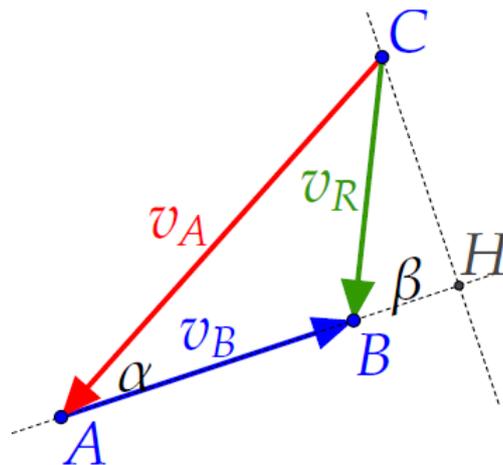


Figura 1.5 – Triangolo di velocità

Dove:

- v_B : vettore della velocità della barca
- v_R : vettore del vento reale
- v_A : vettore del vento apparente
- α : direzione del vento apparente rispetto asse barca
- β : direzione vento reale rispetto asse barca

Per determinare v_A e α a partire da v_B , v_R e β noti basta usare le formule:

$$v_A \cdot \sin(\alpha) = v_R \cdot \sin(\beta) \quad (1.1)$$

$$v_A = v_R \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} \quad (1.2)$$

$$\alpha = \arcsin\left(\frac{v_R \sin(\beta)}{v_A}\right) \quad (1.3)$$

Per decidere quale AWA e quale AWS usare nelle nostre analisi è necessario analizzare i dati statistici delle varie imbarcazioni durante la navigazione di bolina.

Normalmente una barca in bolina naviga con un angolo apparente compreso tra i 20° e i 30°. La scelta di un angolo rispetto ad un altro è dovuto all'efficacia della barca di risalire il vento, dalla sua velocità e quindi anche alle sue dimensioni; una barca della classe America's Cup Challenge (ACC) arriva ad avere AWA di 20°, mentre una deriva olimpica difficilmente arriverà sotto i 35°.

1.4 - Forze generate dalle vele

Andiamo ora a veder più nel dettaglio le forze generate dalle vele.

Come detto randa e fiocco si possono assumere come delle lamine curve investite da un fluido con una certa incidenza.

Esattamente come per le ali di un aereo la differenza di pressione tra intradosso e estradosso della vela, dovuta alla diversa velocità delle particelle, va a creare una forza aerodinamica.

La forza risultante si può andare a scomporre in due componenti: portanza (P oppure lift L) e resistenza (R oppure drag D).

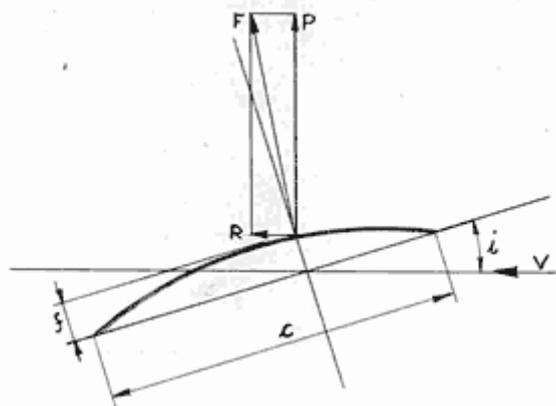


Figura 1.6 – Forze aerodinamiche su lamina curva

Queste due componenti a causa dello svergolamento e della regolazione della vela non risultano uniformi in direzione e intensità, ma saranno dipendenti dall'altezza relativa rispetto al piano della barca.

Un altro parametro che influenza il risultato è dato dal fatto che l'intensità e la direzione del flusso d'aria variano a seconda dell'altezza dal livello del mare a causa della presenza dello strato limite e delle forze di Coriolis.

In questa analisi preliminare questi effetti vengono trascurati e si considera solo una forza risultante di tutto il sistema per quanto riguarda la portanza e la resistenza.

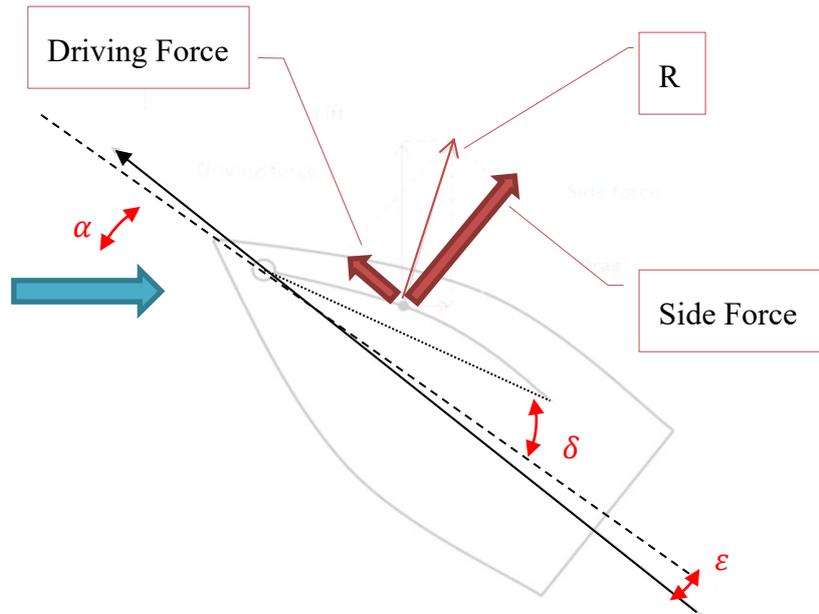


Figura 1.7 – Forze aerodinamiche agenti sulla vela

Lo schema in figura 1.7 mostra come la forza risultante R , data dalla combinazione di Lift e Drag solidali con il sistema di riferimento della vela, può essere scomposta in Driving Force (Forza Avanzante), che è effettivamente la forza che fa avanzare la barca, e in Side Force (Forza Laterale), cioè la componente che tende a far andare di lato la barca.

Nello schema sono indicati:

α : Apparent Wind Angle (AWA) rispetto alla mezzeria della barca

ε : Angolo di scarroccio

δ : Angolo di apertura della vela

$$R = L_{vel} \cdot D_{vel} \quad (1.4)$$

$$C_{L_{vel}} = C_{L_0} + C_{L_\alpha} (\alpha - \delta) \quad (1.5)$$

$$C_{D_{vel}} = C_{D_0} + C_{D_\alpha} (\alpha - \delta) \quad (1.6)$$

$$L_{vel} = C_{L_{vel}} \frac{1}{2} \rho_{aria} (AWS)^2 S_{vel} \quad (1.7)$$

$$D_{vel} = C_{D_{vel}} \frac{1}{2} \rho_{aria} (AWS)^2 S_{vel} \quad (1.8)$$

$$R = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \rho_{aria} (AWS)^2 S_{vel}\right)^2 (C_{L_{vel}} + C_{D_{vel}})^2} \quad (1.9)$$

$$F_{avanzamento} = R \sin(\delta) = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \rho_{aria} (AWS)^2 S_{vel}\right)^2 (C_{L_{vel}} + C_{D_{vel}})^2} \sin(\delta) \quad (1.10)$$

$$F_{vel\ lat} = R \cos(\delta) = \sqrt{\left(\frac{1}{2} \rho_{aria} (AWS)^2 S_{vel}\right)^2 (C_{L_{vel}} + C_{D_{vel}})^2} \cos(\delta) \quad (1.11)$$

1.5 - Forze generate dall'opera viva

Senza una forza che contrasti la forza laterale creata dalle vele la barca avanzerebbe in diagonale, dissipando pressoché tutta la forza avanzante e rendendo impossibile risalire in un'andatura a bolina.

Questo movimento laterale della barca è detto scarroccio.

L'intera opera viva (scafo, timone e deriva) aiuta la barca ad evitare lo scarroccio.

L'elemento che maggiormente compete a questo compito è la deriva.

Come già detto la deriva è un'appendice posta sotto la barca con un profilo aerodinamico simmetrico.

Essendo il profilo simmetrico, per poter creare una certa portanza è necessario che il flusso investa la deriva con un certo angolo di incidenza.

Tale angolo di incidenza è creato dallo scarroccio stesso.

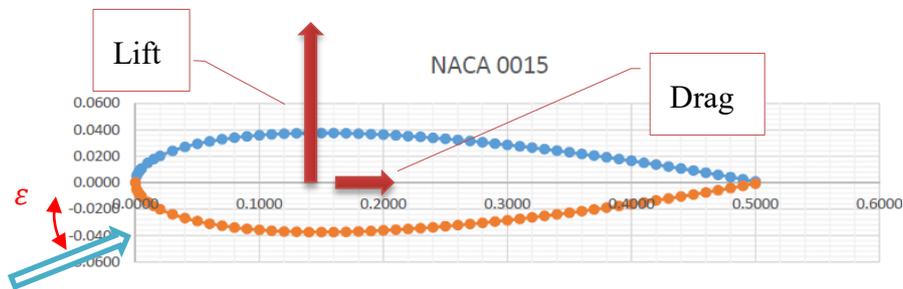


Figura 1.8 – Esempio di profilo simmetrico (NACA 0015) adatto ad una deriva con le forze fluidodinamiche applicate

Raggiunto un certo angolo di incidenza, data la velocità della barca, la deriva creerà una portanza sufficiente a contrastare la forza laterale creata dalle vele.

Lo schema in figura 1.9 presenta la variazione del Coefficiente di portanza C_L a seconda dell'angolo di incidenza di un profilo NACA 0015.

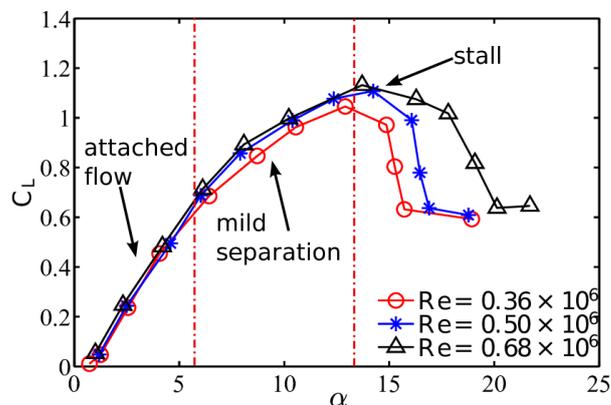


Figura 1.9 – grafico dell'andamento del coefficiente di portanza C_L rispetto all'angolo di incidenza α .

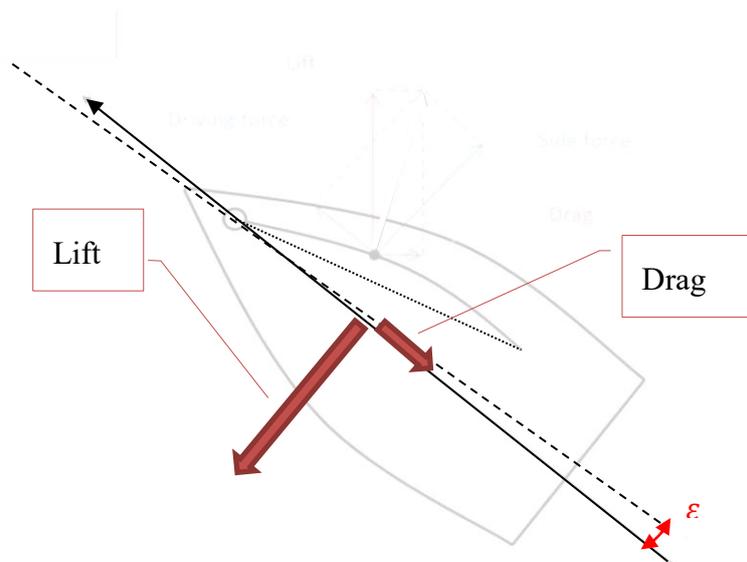


Figura 1.10 – forze generate dal piano di deriva

Il risultato sarà quindi che la barca riuscirà ad avanzare nell'andatura di bolina in linea pressoché retta, con però un certo angolo di scarroccio (normalmente ridotto nell'ordine di pochi gradi) necessario alla deriva per poter compiere il suo lavoro.

$$C_{L_{der}} = C_{L_0} + C_{L_\alpha} \varepsilon \quad (1.12)$$

$$C_{D_{der}} = C_{D_0} + C_{D_\alpha} \varepsilon \quad (1.13)$$

$$L_{der} = C_{der} \frac{1}{2} \rho_{acqua} u^2 S_{der} \quad (1.14)$$

$$D_{der} = C_{D_{der}} \frac{1}{2} \rho_{acqua} u^2 S_{der} \quad (1.15)$$

1.6 - Forze del sistema barca a vela

Andiamo ora a vedere tutte le forze agenti sul sistema barca a vela andando a confrontare le forze date dal piano velico e dal piano di deriva.

Come detto le vele creano una forza rivolta verso avanti che fa avanzare l'imbarcazione e una che tende a farla scarrocciare. Raggiunto un certo angolo di scarroccio e una certa velocità la deriva comincerà a creare una portanza che si oppone al movimento laterale della barca.

La figura 1.11 dimostra come la forza laterale delle vele e la portanza prodotta dalla deriva si vadano a contrastare.

La velocità e l'angolo di scarroccio necessario a raggiungere questo equilibrio dipendono dalla forma e dal profilo dello scafo, del timone e della deriva.

Inoltre all'equilibrio la resistenza creata dall'opera viva equivale la forza propulsiva delle vele, assestando così la velocità della barca ad un certo valore stazionario.

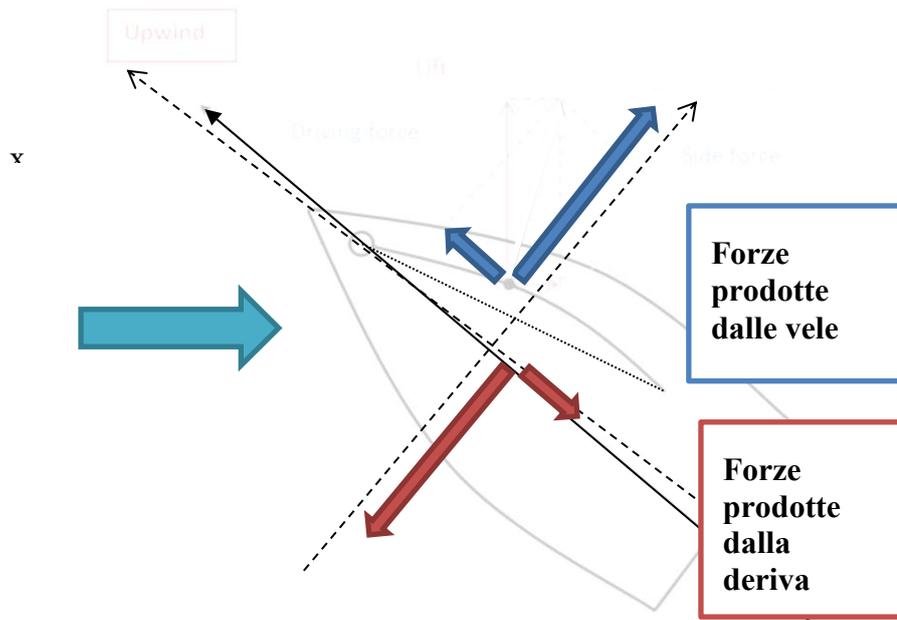


Figura 1.11 – combinazione tra le forze prodotte dalle vele e quelle prodotte dalla deriva

Da notare come in questa analisi si è scelto di trascurare i momenti, in quanto viene assunto che essi siano equilibrati dall'azione del timone.

Inoltre anche il timone contribuisce alle due forze di deriva, ma scegliamo di inglobare il suo contributo in quelli della sola deriva.

All'equilibrio avremo:

$$\text{Lungo asse } x) \quad F_{avanzamento} - D_{der} = 0 \quad (1.16)$$

$$\text{Lungo asse } y) \quad F_{vel\ laterale} - L_{der} = 0 \quad (1.17)$$

Introduciamo nell'equazione le espressioni della portanza e della resistenza della deriva (1.14) e (1.15).

Per la forza di avanzamento e per quella laterale relative sono state usate le reazioni (1.10) e (1.11).

Si può ora andare a combinare l'espressione (1.16) e la (1.17) in un sistema lineare contenente tutte le componenti per andare a prevedere la velocità e a direzione della barca.

$$\begin{cases} \sqrt{\left(\frac{1}{2}\rho_{aria} (AWS)^2 S_{vel}\right)^2 (C_{L_{vel}} + C_{D_{vel}})^2} \sin(\delta) - C_{D_{der}} \frac{1}{2} \rho_{acqua} u^2 S_{der} = 0 \\ \sqrt{\left(\frac{1}{2}\rho_{aria} (AWS)^2 S_{vel}\right)^2 (C_{L_{vel}} + C_{D_{vel}})^2} \cos(\delta) - C_{D_{der}} \frac{1}{2} \rho_{acqua} u^2 S_{der} = 0 \end{cases} \quad (1.18)$$

Le forze veliche e di deriva sono applicate in due punti distinti, rappresentati dai due centri di spinta rispettivamente dell'opera morta e dell'opera viva.

Il centro velico si trova più o meno dietro all'albero nel senso longitudinale e circa ai 2/3 dell'altezza della barca; la posizione esatta varia a seconda della forma delle vele e della posizione dell'albero.

Il centro di deriva invece si trova circa a metà della deriva stessa in altezza e spostato un po' più verso poppa nel senso longitudinale per la presenza anche del timone.

Nel verso longitudinale della barca i due centri di spinta si trovano circa allineati, evitando quindi di creare coppie tra le forze veliche e di deriva.

Lungo l'altezza invece le diverse altezze a cui si trovano i due centri di spinta va a creare una coppia, che tende a far sbandare la barca.

Per equilibrare questa coppia esistono vari metodi.

Nelle barche più piccole (come le derive) si sfrutta il peso dell'equipaggio per creare una coppia contrapposta che mantiene la barca piatta, come si può notare dalla figura 1.12

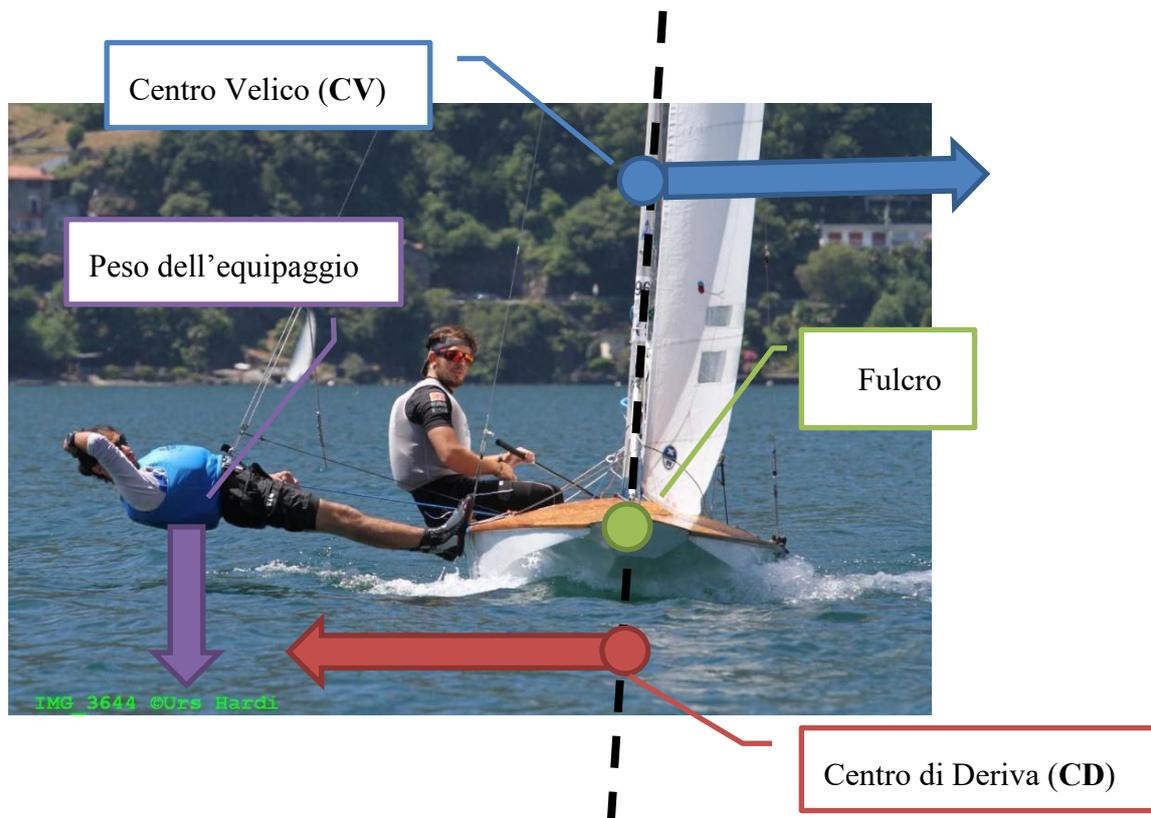


Figura 1.12 – Fireball di bolina con un membro dell'equipaggio appeso al trapezio per controbilanciare la coppia sbandante di vela e deriva

Nelle barche di dimensioni maggiori invece è posizionato un peso, solitamente in piombo, all'estremità immersa della deriva chiamato bulbo.

In questo modo quando la barca è inclinata il bulbo inizia ad aver un braccio sull'orizzontale tra la barca e l'estremità della deriva dove è posizionato, creando una coppia che si contrappone allo sbandamento.

Si raggiunge così un equilibrio tra coppia sbandante di vela e deriva e raddrizzante del bulbo quando la barca raggiunge un certo angolo di inclinazione.

Da considerare anche che quando la barca sbanda il flusso delle vele diventa meno efficace in quanto si espone meno superficie nel verso trasversale. Questo fenomeno aiuta il bulbo a compiere il suo lavoro e a raggiungere prima l'angolo di equilibrio.

In generale le equazioni all'equilibrio attorno all'asse longitudinale della barca sono le seguenti:

$$L_{der} z_{CD} + F_{vel\ laterale} z_{CV} - W_{zavorra} x_{CG} = 0 \quad (1.19)$$

Dove:

z_{CD} : altezza del centro di deriva rispetto al fulcro rappresentato dallo scafo

z_{CV} : altezza del centro velico rispetto al fulcro rappresentato dallo scafo

x_{CG} : posizione trasversale del centro di gravità del bulbo (o del peso dell'equipaggio) rispetto al fulcro rappresentato dallo scafo

$W_{zavorra}$: peso della zavorra, cioè del bulbo o dell'equipaggio.

Nell'equazione (1.19) sono trascurate le coppie raddrizzanti dovute alla spinta idrostatica dello scafo stesso (stabilità di forma dello scafo) e il peso della barca e della sua attrezzatura.

Nelle barche da regata più tecnologiche la deriva viene inclinata attraverso l'uso di un pistone idraulico, in modo da aumentare il braccio del bulbo rispetto allo scafo.

Un'altra soluzione all'avanguardia per ridurre lo sbandamento è rappresentata dall'utilizzo dei foils, che oltre a sollevare la barca, permettendole di diminuire la resistenza della parte immersa in acqua, creano anch'essi una coppia raddrizzante.

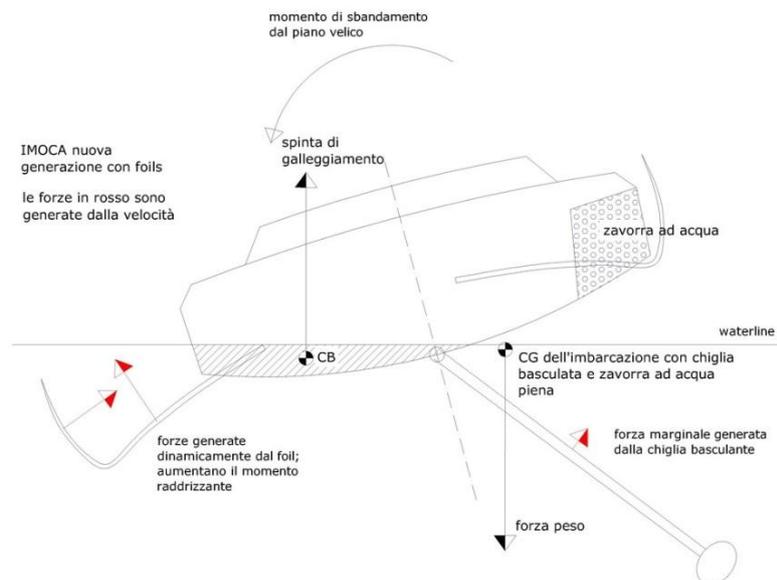


Figura 1.13 – Le imbarcazioni della classe Imoca di nuova generazione usano vari sistemi per contrastare la coppia sbandante creata dalle vele.

La coppia raddrizzante che la barca è in grado di produrre è di fondamentale importanza per riuscire a sfruttare a pieno la barca. Infatti tutti i sistemi per evitare lo sbandamento che abbiamo visto permettono alla barca di essere in grado di contrastare una maggiore forza laterale delle vele; di conseguenza è possibile avere una superficie velica maggiore ed aumentare così la propulsione.

Naturalmente nell'ambiente velico anche il peso è di fondamentale importanza. Bisogna quindi riuscire a trovare il giusto equilibrio tra il peso del bulbo, o dei vari sistemi di raddrizzamento, e di leggerezza della barca.

CAPITOLO 2

LA REGATA

Per poter proseguire la nostra analisi è utile andare a vedere come si svolge una regata velica.

Come abbiamo visto la barca a vela è un sistema estremamente complesso. Durante una gara i regatanti devono tenere in considerazione innumerevoli variabili; le condizioni meteo, la regolazione delle vele, le scelte tattiche e strategiche e l'affiatamento dell'equipaggio sono tutti fattori che devono coesistere perché la regata risulti un successo.

Non sempre avere la barca più veloce è sufficiente a vincere. La scelta di navigare in una zona rispetto ad un'altra o l'abilità nella lotta corpo a corpo con le imbarcazioni nelle immediate vicinanze fanno la differenza tra vittoria e sconfitta.

È necessario molto allenamento e la partecipazione a molte regate per poter acquisire le capacità e l'esperienza per riuscire a tenere a mente ogni variabile che porti alla buona conduzione di una regata.

Esistono vari tipi di regate veliche, ognuna corsa con un certo tipo di barca. Si passa dalle classi olimpiche, con barche di piccole dimensioni e equipaggio composto da due o una sola persona e costi contenuti, fino ad arrivare alle grandi barche oceaniche nate per battere record, con equipaggi di oltre 20 persone e con costi milionari. In ogni barca i ruoli a bordo sono sempre ben definiti. Questa divisione permette ad ognuno di concentrarsi su dei compiti specifici, aiutando così il tattico a "eliminare" alcune variabili dall'equazione.

Ci sarà a bordo quindi una persona che si occuperà solo delle scelte tattiche, uno al timone, una persona per la regolazione della randa, uno per il fiocco, uno per il cambio delle vele fino ad arrivare a chi si occupa solo di fare peso per aiutare a raddrizzare la barca.

Naturalmente più piccola sarà l'imbarcazione e minore sarà l'equipaggio, con più ruoli ricoperti dalla stessa persona; il limite si raggiunge con le imbarcazioni singole (come la classe olimpica laser) dove un solo velista dovrà riuscire da solo a tenere a mente ogni variabile tattica contemporaneamente alla gestione delle vele.

Ogni tipo di barca è pensato e costruito per un certo tipo di regata. Possiamo in prima approssimazione dividere le regate in quattro tipi:

- Lunghe
- Costiere
- Bastone di flotta
- Match Race

2.1 - Regate lunghe

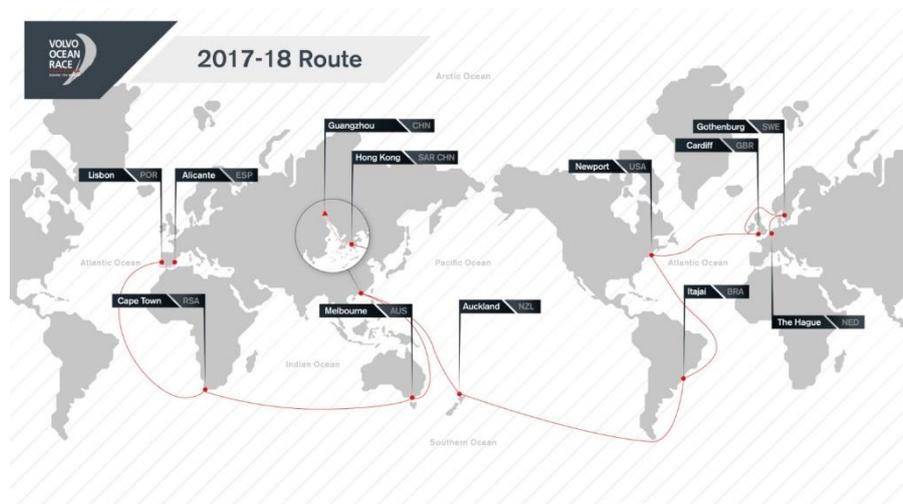


Figura 2.1 – Rotta della Volvo Ocean Race edizione 2017-2018.

Le regate lunghe sono regate che si svolgono su percorsi di lunga durata, con lunghezza variabile da qualche centinaia di miglia nautiche (NB 1 miglio nautico (nm) corrisponde a 1,852 km) a qualche migliaia nel caso delle regate oceaniche. Sono regate che si svolgono su più giorni consecutivi di regata senza che le barche possano effettuare scalo, navigando quindi anche durante la notte e in qualsiasi condizione di vento e mare.

Il percorso di questo tipo di regata prevede spesso dei passaggi ravvicinati a isole, capi o stretti.

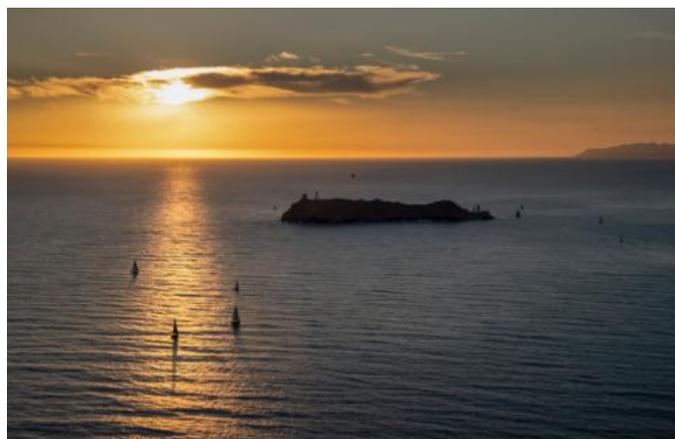


Figura 2.2 – arrivo al tramonto allo scoglio della Giraglia

In Italia le più famose regate lunghe sono la Giraglia Rolex Cup (percorso di 240nm circa con partenza da Saint-Tropez, passaggio all'isola della Giraglia all'estremo nord della Corsica e ritorno a Genova), la 151 miglia (151 nm con partenza da Livorno, passaggio della Giraglia e successivamente delle formiche di Grosseto e arrivo a Punta Ala) e la Middle Sea Race (regata di 600nm circa con partenza nel porto canale di Malta, periplo della Sicilia passando esterni a Stromboli e a Lampedusa, con ritorno a Malta).

Queste regate sono aperte a chiunque, con diverse barche di ogni grandezza che corrono insieme attraverso un sistema di compenso.

Esistono anche delle regate intorno al mondo come la Vande Globe, regata in solitaria corsa una volta ogni 4 anni con partenza e arrivo a Les Sables d'Olone circumnavigando l'Antartide senza scalo. Si corre su imbarcazioni di 60' (Imoca 60, circa 20m di lunghezza) appositamente create dove partecipano i migliori navigatori al mondo con innovazione continua riguardo materiali, strutture e fluidodinamica.

Oltre al Vande Globe tra le regate oceaniche compare anche la Volvo Ocean Race, corsa su imbarcazioni monotipo di 65' (VOR 65) in equipaggio a tappe, a volte massacranti, diverse ad ogni edizione.

In questo tipo di regate è fondamentale la conoscenza del territorio circostante e di come il meteo e la sua evoluzione si adatti ad esso.

La perfetta comprensione delle previsioni meteo e l'adattamento della tattica di regata alle stesse è di fondamentale importanza.

Le barche, a parte le prime fasi della regata, di raro si incontrano e hanno scontri ravvicinati; è proprio a causa della grande distanza tra le barche che anche solo il più piccolo cambiamento nel meteo, che può portare ad avere una zona dove l'intensità del vento o la sua direzione siano più favorevoli rispetto ad un'altra, può creare dei distacchi notevoli tra i vari competitor.

2.2 - Regate costiere

Sono regate di relativa lunga percorrenza che si svolgono comunque nel giro di una giornata, con una lunghezza di qualche decina di miglia nautica.

Anch'esse vengono normalmente svolte su diversi tipi di imbarcazioni che competono tra di loro attraverso un tempo compensato. In alcune manifestazioni di regata tra monotipi (barche tutte uguali) vengono anche inserite nel programma affiancate a regate a bastone di flotta.

Alcuni esempi più famosi sono le In Port Race della Volvo Ocean Race. In queste regate i VOR 65 si sono sfidati in percorsi di circa 30-40 nm, con un classifica parallela a quella delle tappe oceaniche e/o con una classifica combinata.

Un altro esempio famoso sono le regate costiere (dette Inshore Race) che si svolgono a Saint-Tropez prima della regata lunga della Giraglia Rolex Cup. Il vincitore della combinata tra Inshore Race e della regata lunga ottiene in premio il trofeo challenge della Giraglia ed un Rolex per l'armatore della barca.

Valgono più o meno le considerazioni fatte per le regate più lunghe: è infatti fondamentale anche in queste regate la conoscenza del territorio e del meteo.

Da considerare però che le distanze e la separazione tra le barche si riduce di parecchio rispetto alle regate di lunga percorrenza. Questo fa sì che la perfetta conduzione della barca e la velocità sviluppata risulti sempre più importante per posizionarsi in una posizione di vantaggio rispetto alle altre imbarcazioni della flotta.



Figura 2.3 – regate costiere durante la Giraglia Rolex Cup

2.3 - Regate a bastone di flotta

Le regate a bastone sono le regate più tecnicamente più complicate e interessanti.

Sono solitamente corse tra imbarcazioni monotipo, cioè con barche tutte perfettamente uguali tra di loro e dove quindi a fare la differenza è solo l'equipaggio.

Si svolgono su percorsi brevi, solitamente con una durata di un'ora circa a regata, con varie ripartenze e gare durante la giornata.

Sono il tipo di regate che vengono svolte durante le olimpiadi o durante i mondiali. Il livello di competizione durante queste regate è molto alto, con una lotta a tratti anche feroce per guadagnare ogni sinolo centimetro di vantaggio rispetto agli avversari.

Il percorso prevede sempre una partenza in bolina verso una boa di vento per poi compiere una discesa di poppa, la quale può essere anche separata in due laschi nel caso del percorso a triangolo o super olimpico.

In questo tipo di regate la partenza svolge un ruolo fondamentale in quanto permette di trovarsi immediatamente nella parte avanzata della flotta senza ricevere quindi troppi rifiuti o vento sporco da parte delle altre barche.

La partenza si svolge con pre-partenza, di solito della durata di 5 minuti, durante i quali le barche sono libere di muoversi dietro la linea di partenza. Alla fine dei 5 minuti le barche devono riuscire a trovarsi nella migliore posizione possibile sulla linea di partenza, riuscendo a rimanere in aria "pulita" e dalla parte giusta del campo di regata.

Nella figura 4.5 si nota come alcune barche siano riuscite a partire in "prima fila" con aria pulita, mentre altre barche sono rimaste più indietro in "seconda fila" rimangono inevitabilmente con il vento sporco in scia alle altre barche con un inevitabile calo delle prestazioni.



Figura 2.5 – Partenza di una regata della classe Fireball

Altro aspetto fondamentale di questo tipo di regata è la prima bolina. È necessario scegliere il lato migliore del campo di regata, cioè quello con più vento o con il vento che gira in maniera più favorevole, in modo da arrivare prima alla boa.

Oltre alla scelta del lato del campo di regata dove navigare è fondamentale rimanere

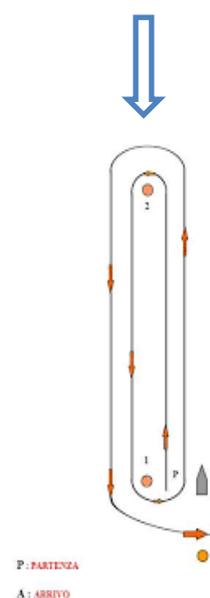


Figura 2.4 – Classico percorso a bastone per regate in monotipo

comunque sempre in aria pulita e senza entrare in scia ad altre barche per non subire un calo delle prestazioni e perdere così spazio prezioso rispetto agli avversari.



Figura 2.6 – arrivo alla boa di bolina di una regata di classe Fireball

Sono le regate più interessanti per la nostra analisi in quanto sono quelle dove è più importante stare attenti alla scia creata dalle imbarcazioni intorno a te. La corretta scelta tattica o la migliore regolazione delle vele può permettere di guadagnare quel metro fondamentale per riuscire a rimanere al di fuori della scia delle imbarcazioni nelle immediate vicinanze durante la bolina.

Durante la poppa invece le cose cambiano radicalmente, in quanto la zona perturbata dalla scia si trova davanti, e non dietro alla singola imbarcazione, in questa fase quindi è chi è dietro di noi a crearci dei problemi.

2.4 - Regate Match Race



Figura 2.7 – lotta alla partenza durante una prova del match race world tour

di vantaggio.

La regata più famosa di questo tipo è sicuramente l'America's Cup, regata corsa sin dalla fine del XIX secolo, con un trofeo Challenge rimesso in palio ogni quattro anni. L'America's Cup rappresenta da sempre la F1 della barca a vela, la regata dove vengono

Sono regate corse tra solo due barche monotipo. Si svolgono su percorsi a bastone esattamente come per le regate a flotta con la stessa procedura di partenza.

Essendo corse solo tra due barche, l'obiettivo è solo quello di controllare e ottenere un leggero vantaggio sull'avversario. Sono quindi spesso regate corse corpo a corpo con frequenti contatti e

dove la conoscenza del regolamento è fondamentale per poter dare una penalità all'avversario o mettersi in una condizione

sempre sperimentate le migliori soluzioni tecnologiche e dove partecipano i migliori velisti al mondo.

Dall'edizione del 2013 la coppa america è corsa su catamarani dotati di foil che permettono alle barche di sollevarsi dall'acqua, diminuendo drasticamente l'attrito e raggiungendo velocità da capogiro superiori ai 40knt (circa 80 km/h) e di andare fino a quattro volte la velocità del vento reale (sfruttando come detto solo il vento apparente creato dalla loro stessa velocità).



Figura 2.8 – incrocio tra BMW Oracle e Emirates Team New Zealand durante l'ultima America's Cup di San Francisco.

2.5 - Momenti di regata presi in esame

I momenti di regata da analizzare sono stati scelti in collaborazione della veleria “Quantum Sails Design Group” di Genova in modo da poter verificare alcune teorie sulla zona di interferenza tra barche nate dall'esperienza diretta acquisita in regata da professionisti del settore.

Nella nostra analisi i momenti più significativi da prendere in esame, e cioè quelli dove la scia ha un ruolo fondamentale nell'economia della regata, sono sicuramente le fasi di partenza, di arrivo in boa e di incrocio durante la bolina.

Andiamo ad analizzare più nel dettaglio queste fasi.

2.5.1 Fase di partenza



Figura 2.9 – a sinistra partenza stilizzata, a destra partenza nella classe J70

Nelle fasi di partenza è fondamentale conoscere la zona dove il calo delle prestazioni comincia ad essere rilevante, in quanto anche solo perdere qualche metro potrebbe farci entrare nella scia di un avversario e rallentare ancora di più la corsa della nostra barca; questo comporterebbe un peggioramento in classifica rilevante vista la compattezza del gruppo.

2.5.2 Boa di bolina

Nel raggiungere la boa di bolina ci si trova spesso in una situazione dove si ricevono i rifiuti dalle barche davanti a noi. È importante in questi casi conoscere la zona di maggior calo di prestazione per cercare di rimanere in un zona dove si possa comunque cercare di contenere i danni.

L'avvicinamento verso la layline (la linea che ci permette di arrivare alla boa di bolina senza dover più effettuare virate) è particolarmente complicata in quanto si trovano una serie di barche tutte in fila tra di loro

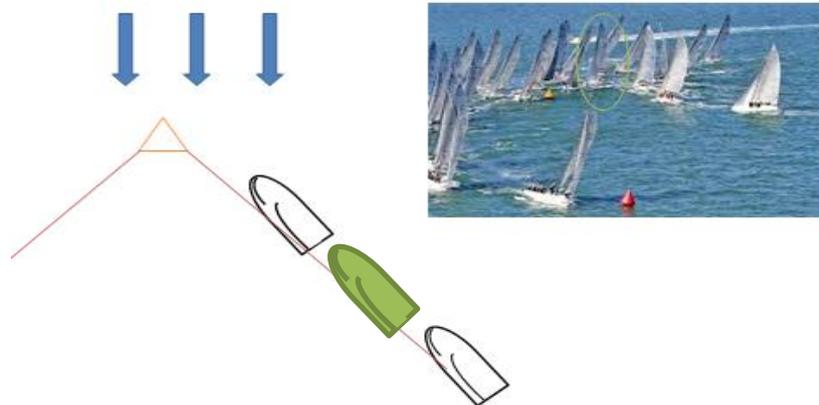


Figura 2.10 - a sinistra arrivo alla boa di bolina sulla layline, a destra boa di bolina di monotypi

2.5.3 Incroci durante la bolina



Figura 2.11 - a sinistra incroci durante la bolina, a destra bolina durante una regata di J70

Non è raro durante il bordo di bolina ritrovarsi in una situazione come quella descritta dalla figura 2.11, dove si incrociano delle barche su mure opposte che ci danno rifiuti. In questo caso l'esperienza suggerisce che il vento sarà sì di minore intensità, ma giungerà con una deviazione nell'angolo positiva, aiutandoci così a perdere meno terreno.

CAPITOLO 3

ANALISI DELLA SCIA

Durante una regata il tattico è alla continua ricerca di una zona dove il vento è più forte e dove rimane più costante, in modo da riuscire a portare la barca alla massima velocità possibile.

Per questa ragione entrare nella scia di una imbarcazione avversaria rappresenta un problema per il regatante.

Dopo aver attraversato una vela il flusso d'aria diventa vorticoso, perdendo gran parte della propria energia e diventando caotico.

La perdita di intensità e l'instabilità del vento fanno rallentare l'imbarcazione, costringendo il tattico a dover trovare una soluzione per ricercare vento pulito.

La scia è dovuta alla viscosità dell'aria.

Ha una forte dipendenza dal numero di Reynolds che descrive il passaggio da regime laminare a turbolento del flusso d'aria.

In ambiente nautico possiamo identificare due differenti zone nella scia di una barca, come si può vedere nella figura 3.1.

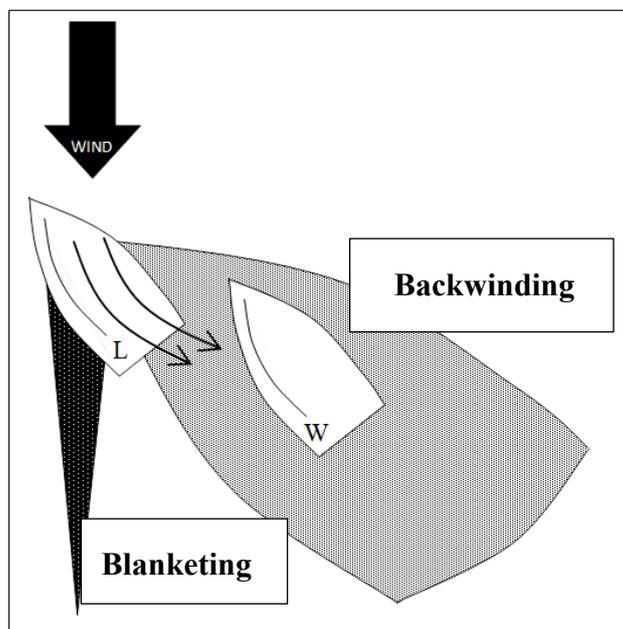


Figura 3.1 – le due zone di una scia di una barca a vela [1]

La prima zona dove l'interferenza è maggiore è detta di Blanketing, dovuta allo stop vero e proprio che la vela esercita sul flusso. È la zona dove il calo della prestazione è più marcato a causa non solo del calo di intensità, ma anche per la forte caoticità del flusso.

L'altra zona è detta di Backwinding dove il vento è leggermente ridotto in intensità, ma è fortemente deviato in direzione.

Dalla figura 3.2 possiamo notare come scia vari lungo l'altezza della vela, culminando con un grosso vertice incrociato nella testa della stessa. Questo vortice, detto tip vortex, rappresenta una grossa fetta della resistenza (Drag) della vela. Lo stesso vortice lo possiamo trovare anche nella parte inferiore della vela, anche se risulta meno intenso in quanto il mare e la barca stessa compiono un'azione di bloccaggio che limita il tip vortex, evitando quindi anche un aumento della resistenza.

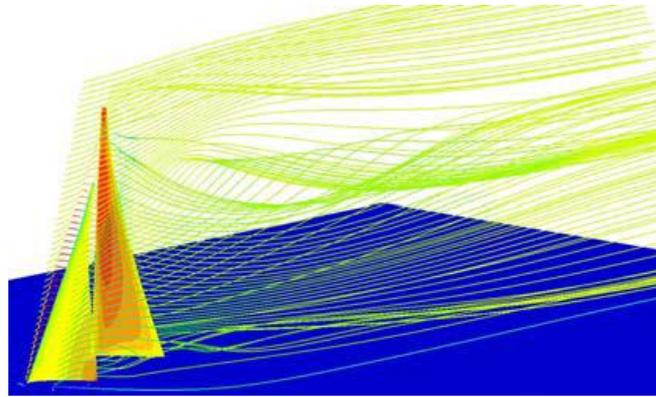


Figura 3.2 – filetti fluidi nella scia di una vela calcolata con codice CFD effettuata da Spenkuch [4]

L'analisi della scia può essere effettuata sia numericamente che per via sperimentale.

Di seguito sono presentati un metodo numerico che sfrutta il Vortex Lattice Method presentato da M.Caponnetto [3], una prova sperimentale dell'università di Auckland [2] ed una analisi CFD presentata da T. Spenkuch [4].

3.1 - Approccio numerico

L'approccio numerico permette di ottenere dei risultati attraverso la risoluzione di equazioni (come le Navier-Stokes o le RANS) introducendo delle ipotesi che rendono più semplice il calcolo utilizzando o meno un computer.

Questo tipo di analisi risultano poco costose rispetto ad una analisi sperimentale o ad una CFD classica. Lo svantaggio risiede nel fatto che, avendo fatto delle semplificazioni, i risultati saranno affetti da errori.

Il lavoro di Caponnetto [3] preso in esame tenta di spiegare come l'interferenza tra due barche provochi un calo delle prestazioni in una delle barche o, in alcuni casi, in entrambe, utilizzando un programma basato sul Vortex Lattice Method (VLM).

Il VLM cerca di risolvere il problema governato dalle leggi di Navier-Stokes in maniera semplificata.

Le equazioni di Navier-Stokes sono equazioni ricavate attraverso la trattazione di tre principi fondamentali della fisica: l'equazione di continuità, la conservazione di quantità di moto e la conservazione dell'energia.

Sono di difficile risoluzione a meno di usare calcolatori con una certa potenza.

La difficoltà principale è racchiusa nel termine della viscosità che compare nelle equazioni.

Il VLM permette di ignorare il fattore viscoso in tutto il dominio a parte un sottile Boundary Layer attorno alla superficie portante, dove gli effetti della viscosità sono sostituiti matematicamente da una distribuzione continua di vortici [6].

Nel metodo il flusso viene considerato irrotazionale grazie al fatto che non è considerata la viscosità dinamica, non permettendo che si vengano a generare vorticosità nel flusso. Prevede inoltre che le superfici vengano discretizzata con un certo numero finito di pannelli quadrilateri.

Le semplificazioni adottate hanno degli effetti sui risultati che si traducono da un lato in una possibile sovrastima della forza propulsiva prodotta e dall'altro da una difficoltà per il modello di predire un eventuale distacco dei filetti fluidi dalla superficie della vela.

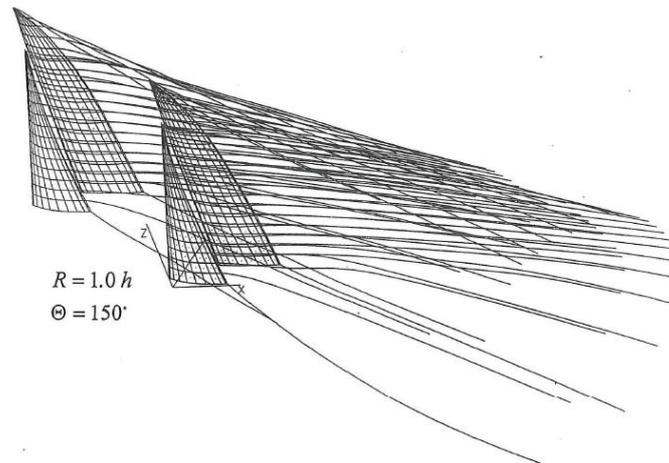


Figura 3.3 – esempio di scia ricavata da Caponnetto [3]

Dalla figura 3.3 si può notare come la scia prodotta dalle barche secondo il programma di Caponnetto [3] risulti pressochè lineare nella parte bassa delle vele, quindi con solo un calo di intensità e un cambio di velocità nel flusso, mentre nella parte alta si riesce a vedere con esattezza l'effetto del tip vortex.

3.2 - Approccio sperimentale

Le analisi sperimentali in galleria del vento risultano essere molto costose, ma permettono di ottenere dei risultati molto attendibili. Proprio grazie all'attendibilità dei risultati ottenuti, questo tipo di analisi è usato per validare i codici di calcolo per l'analisi CFD o numerica.



Figura 3.4 – Galleria del vento dell'università di Auckland

Il costo di questo tipo di analisi è dovuto al costo di affitto dell'impianto, al grande quantitativo di energia elettrica necessario al funzionamento, oltre ai costi per la costruzione dei modelli e della sensoristica necessaria all'esperimento.

Le prove sperimentali compiute dall'università di Auckland [2] sono state fatte attraverso l'utilizzo di una galleria del vento con camera di prova con lato di 7m e un'altezza di 3.5m. La galleria presenta un deviatore del flusso nel verso verticale che fa variare la direzione con l'altezza, in modo da simulare le forze di Coriolis che agiscono nelle vicinanze del terreno.

Sono stati utilizzati dei modelli con un'altezza di 2.25m con un AWA (Apparent Wind Angle) di 20°, verosimile per un'andatura di bolina, con un angolo di inclinazione (heeling) di 25° ed una velocità del flusso indisturbato di 4m/s.

Per l'analisi completa della scia sono state montate delle sonde del tipo cobra, in grado di misurare sia la velocità che la direzione del flusso, a varie altezze (1/3 e 2/3) dietro l'albero del modello. In questo modo è stato possibile andare a vedere come varia la scia nelle tre componenti lungo l'asse verticale.

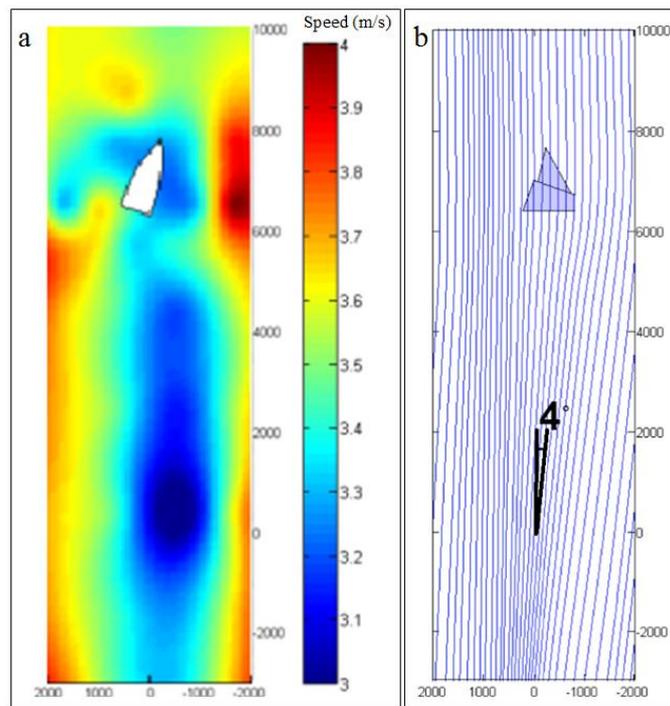


Figura 3.5 – Diagramma con i risultati dell'analisi sperimentale a sinistra è diagrammata la velocità del flusso a 1/3 h, mentre a destra sono rappresentati i filetti fluidi a 1/2 h [2]

Come vediamo dal grafico di destra in figura 3.5, la velocità del flusso cambia già nel primo terzo dell'altezza, riducendosi notevolmente soprattutto in direzione del flusso indisturbato. È interessante vedere come la velocità vari non solo dietro il modello, ma che si ha una interferenza anche davanti alla prua della stessa. Interpolando poi i dati rilevati dalle sonde è possibile andare a diagrammare il flusso a metà altezza dell'albero, come mostrato nella parte destra della figura 3.4, dove si può notare come il flusso a metà altezza presenta anche una deviazione di circa 4° nel punto in cui si ha la minore velocità del flusso nella scia.

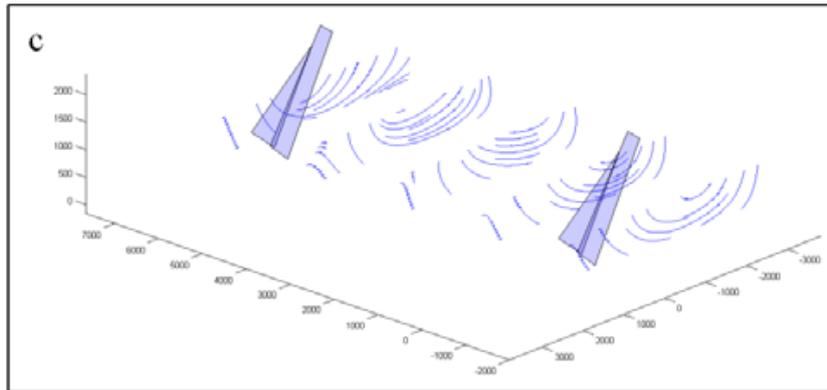


Figura 3.6 – scia nelle tre dimensioni in prova sperimentale [2]

Nella figura 3.6 è invece diagrammato la ricostruzione della scia nei tre assi, compreso lo spostamento dei filetti fluidi nell'asse dell'altezza.

Si può notare anche in questo caso come la parte inferiore sia interessata principalmente da una deviazione e da un cambiamento di intensità. Nella parte superiore della vela invece si manifesta il tip vortex che induce un movimento circolare a elica attorno alla penna della vela.

3.3 Approccio CFD

L'analisi CFD si basa sulla soluzione delle equazioni di Navier-Stokes.

Le equazioni di Navier-Stokes sono equazioni molto complesse, per le quali non esiste attualmente una soluzione in forma chiusa, a meno di usare casi molto semplificati. E' solo grazie all'aiuto di calcolatori che diventa possibile la risoluzione di problemi fluidodinamici mediante la risoluzione di queste equazioni.

Tramite la CFD è possibile predire l'evoluzione di un filetto fluido evitando l'uso della galleria del vento, riducendo quindi notevolmente i costi ed i tempi dell'analisi. Tuttavia per poter confermare la bontà dei risultati è comunque necessario passare per una validazione del modello tramite dati sperimentali.

I codici CFD si basano su algoritmi numerici in grado di risolvere le equazioni di Navier – Stokes, fornendo una soluzione approssimata del problema.

L'analisi è stata compiuta su un modello di ACC, con un AWA di 27°.

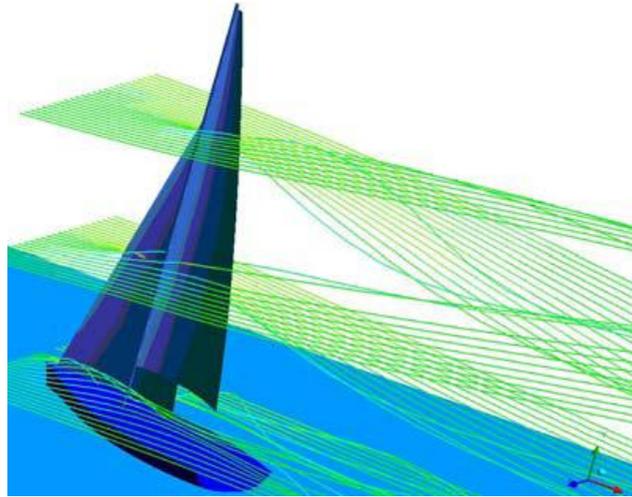


Figura 3.7 – Immagine della scia in 3D [4]

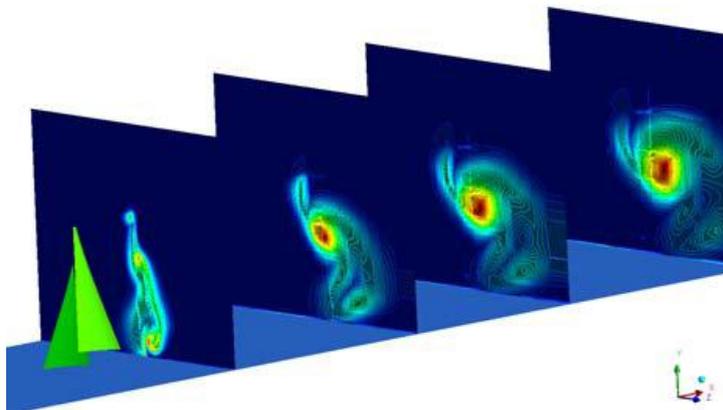


Figura 3.8 – Tip vortex [4]

Le figure 3.7 e 3.8 dimostrano come la scia si sviluppi non solo su un piano, ma anche in 3D.

Lo studio compiuto da Spenkuch afferma che le vele generano tre vortici, di cui due più piccoli a metà dell'altezza della barca e uno più grande nella regione della penna del fiocco e della randa. I due vortici più piccoli decrescono rapidamente in intensità e sono già trascurabili dopo 2-3 lunghezze di barca. Sono loro la causa della zona di blanketing, dove la AWS è minore.

Da questa analisi si conferma come il principale nemico del velista nella scia si è più la variazione di AWA rispetto al calo di AWS.

CAPITOLO 4

INTERFERENZA TRA DUE BARCHE VICINE

Dopo aver studiato nel dettaglio la dinamica e la fluidodinamica della barca, della scia prodotta dalle vele ed aver introdotto lo svolgimento di una regata, possiamo ora andare a vedere come interagiscono tra di loro due barche a distanza ravvicinata.

L'abilità di rimanere al di fuori dalla zona perturbata nella scia di un competitor è fondamentale per un corretto svolgimento di una regata. Ogni buon velista, grazie all'esperienza diretta acquisita con l'allenamento e durante le regate, è perfettamente in grado di riconoscere la zona perturbata da evitare. Grazie all'interpretazione di alcuni segnali chiave, come il continuo e repentino cambio di direzione e intensità del vento e la diminuzione della velocità della barca, il regatante riesce a capire di trovarsi in una zona perturbata, e sarà quindi costretto a cambiare la rotta per andare a ricercare una zona con il vento pulito.

Le prove sperimentali e i calcoli analitici compiuti per andare ad identificare in modo scientifico la zona di aria sporca e perturbata possono rappresentare un valido aiuto al regatante.

Conoscendo in anticipo quando la barca inizierà ad avere un calo delle prestazioni e sapendo quantificare in modo scientifico quanto sarà influente il rallentamento, il velista incaricato della tattica in barca potrà andare a adattare la sua strategia o riformularne una nuova in base ai dati ottenuti.

Sarà quindi compito dell'analisi andare a quantificare il calo di prestazioni della barca, in termini di percentuale rispetto al normale, per ogni posizione relativa rispetto ad un'altra imbarcazione avversaria.

L'analisi compiuta riprende le prove analitiche e sperimentali già viste nel capitolo riguardante l'analisi fluidodinamica della scia.

In entrambi i casi è stata scelta una imbarcazione chiave fissa con una imbarcazione secondaria posizionata a vari angoli relativi e a varie distanze dal primo modello. In questo modo è stato possibile rilevare l'andamento delle prestazioni sia nel caso in cui la barca chiave sia nella zona di perturbazione, che nel caso in cui sia lei a dare vento sporco ad un avversario.

I risultati ottenuti tramite l'analisi analitica e a quella sperimentale sono stati poi inseriti in dei grafici rappresentanti il calo percentuale di forza propulsiva prodotta rispetto alle varie posizioni della barca secondaria.

4.1 - Analisi analitica

Riprende l'analisi compiuta da M.Caponnetto [3] nel suo articolo "the aerodynamic interference between two boats sailing close-hauled".

Caponnetto [3], come già visto nel capitolo riguardante la scia, ha utilizzato il Vortex Lattice Method (VLM) per le sue analisi.

Per il calcolo sono stati usati dei modelli di due imbarcazioni facenti parte della classe America's Cup Challengers (ACC) durante la sfida del 1992, prendendo come riferimento "Il Moro di Venezia" per quanto riguarda il piano velico.

Il Moro di Venezia presentava un albero di altezza $h = 32.2m$ con una superficie velica complessiva di $A = 342 m^2$.

L'analisi è stata effettuata usando un Apparent Wind Angle (AWA) di 25° con una Apparent Wind Speed (AWS) di 10 m/s.

La forma della vela è stata adattata esaminando le foto della barca in navigazione e attraverso l'esperienza personale.

Il mare è stato assunto come perfettamente piatto senza onda.

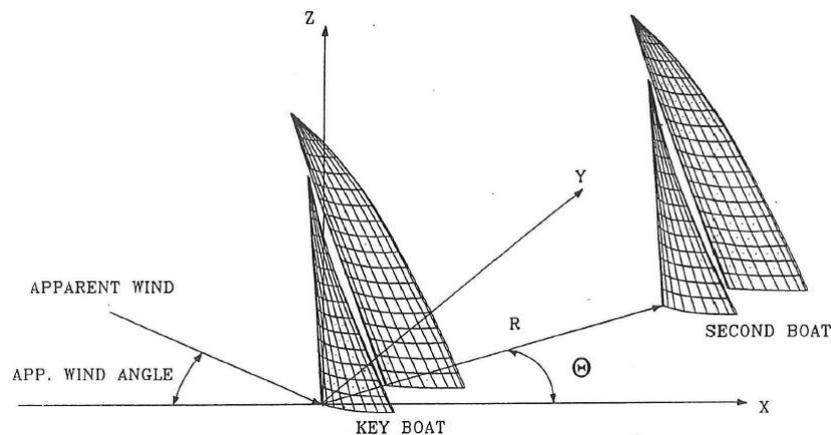


Figura 4.1 – Barca chiave con posizione relativa della "Barca secondaria" [3]

La "barca chiave" è stata fissata nell'origine di un piano di coordinate a due assi, con la "barca secondaria" sistemata sistematicamente a differente distanza (R) ed angolo (Φ) dalla barca chiave.

Si è scelto di usare come riferimento per la distanza tra le barche l'altezza dell'albero, posizionando quindi la barca secondaria a $R = 0.5 h, 1 h, 1.5 h$.

Per quanto riguarda l'angolo relativo è stato scelto di compiere l'analisi su 360° con un salto di 30° ad ogni analisi ($\Phi = 0, 30^\circ, \dots, 330^\circ$), infittendo però l'analisi nei dintorni dei 160° e dei 340° , con un salto di 5° per ogni analisi.

Il programma calcola per ogni caso la Forza Propulsiva e la Forza Laterale creata dalle vele. I risultati sono poi stati elaborati in termini di Forza Propulsiva e Forza Laterale prodotta per Superficie (rispettivamente AF_r e AF_h) dati dalla seguente formula:

$$AF_r = \frac{F_r}{\frac{1}{2}\rho V_{AWS}^2} \quad \text{Forza Propulsiva per Area}$$

$$AF_h = \frac{F_h}{\frac{1}{2}\rho V_{AWS}^2} \quad \text{Forza Laterale per Area}$$

Sono stati ottenuti i seguenti grafici

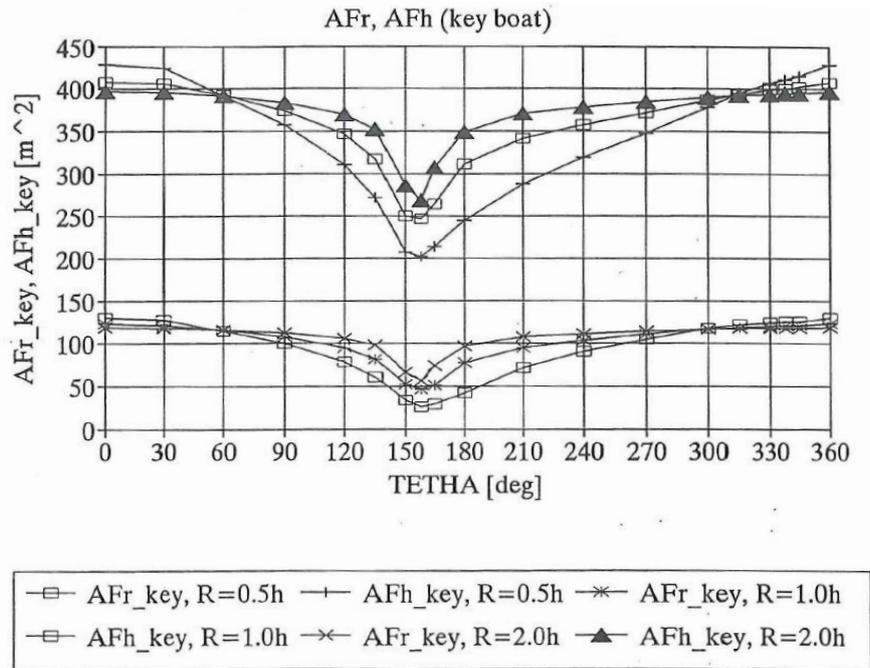


Figura 4.2 – Forza Propulsiva e Laterale per area a varie distane ed angoli della barca secondaria rispetto alla barca chiave [3]

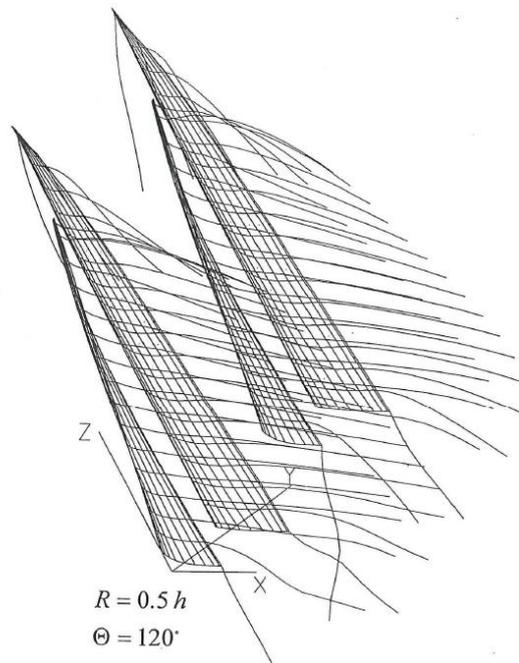


Figura 4.3 – esempio di rappresentazione grafica dell'andamento della scia nel caso di $R = 0.5 h$ e $\Phi = 120^\circ$ [3]

La figura 4.2 presenta i dati assoluti trovati. Già da questa figura si nota come i punti dove la scia presenta la massima interferenza per la barca chiave si riscontra a circa 160° e che, come era intuitivo pensare, diminuisce all'aumentare della distanza tra le due barche.

Per capire meglio la variazione delle prestazioni è utile andare a vedere i dati in relazione alla spinta creata dalle due imbarcazioni, in modo da vedere quando si ha il massimo vantaggio, o svantaggio, ai vari angoli.

Elaborando i dati secondo la formula $\frac{AFr_{2nd}}{AFr_{key}}$ si ottengono i seguenti grafici in scala logaritmica:

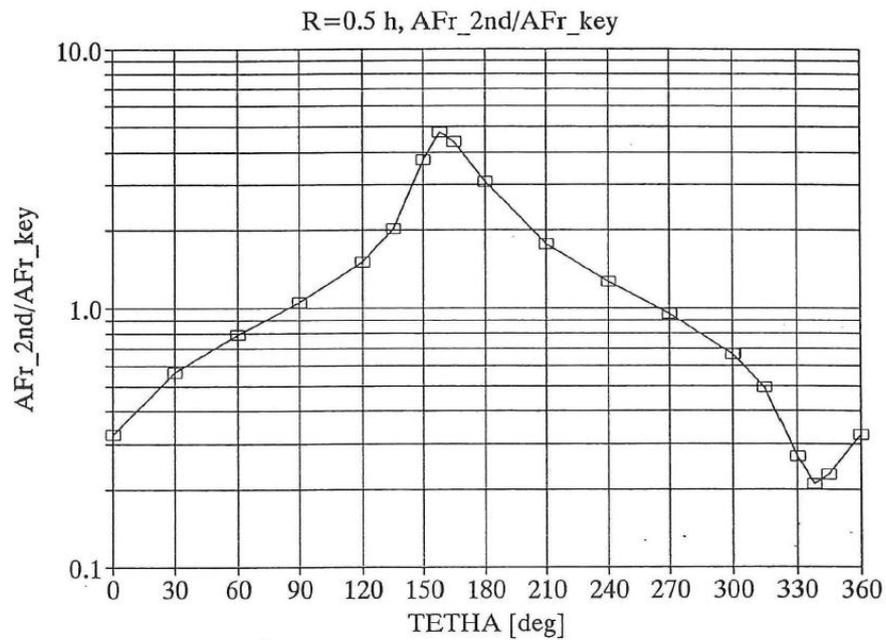


Figura 4.4 – Dati alla distanza di $R = 0.5 h$ elaborati relativamente alle prestazioni della barca singola [3]

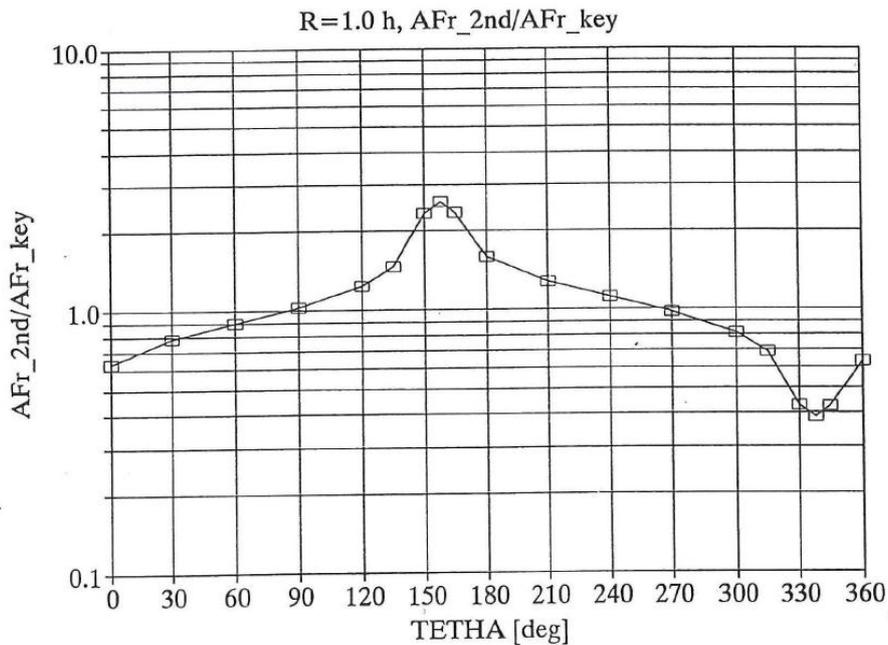


Figura 4.5 - Dati alla distanza di $R = 1 h$ elaborati relativamente alle prestazioni della barca singola [3]

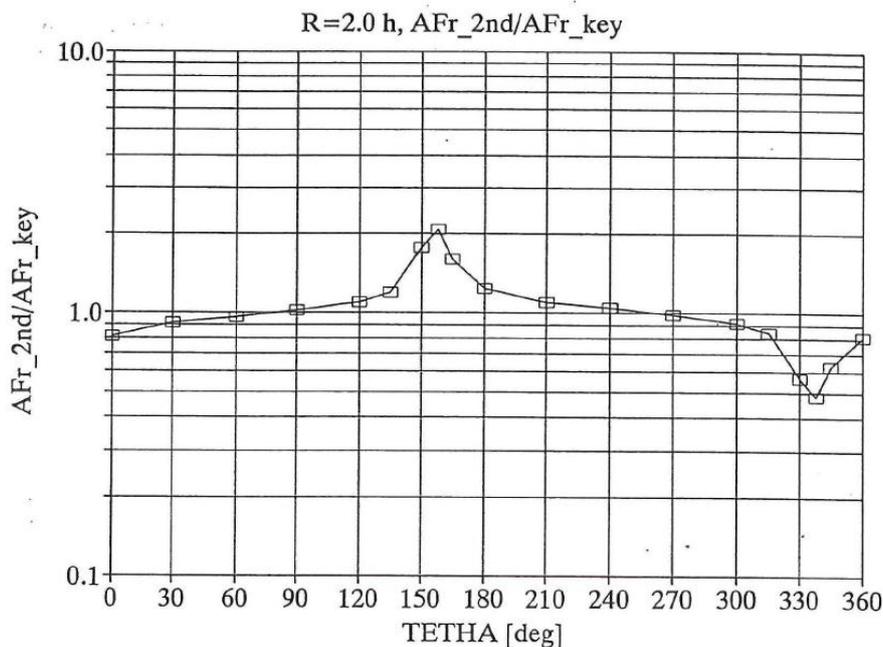


Figura 4.6 - Dati alla distanza di $R = 2 h$ elaborati relativamente alle prestazioni della barca singola [3]

Dalle figure 4.4, 4.5 e 4.6 vediamo che, come già si era notato dalla figura 4.2, in tutte e tre le distanze tra e barche prese in esame ad un angolo $\Phi = 158^\circ$ abbiamo il massimo calo delle prestazioni, con la barca secondaria che genera una spinta fino a quasi 5 volte superiore rispetto a quella chiave nel caso di $R = 0.5 h$.

Questo avviene perché a questo angolo relativo l'imbarcazione chiave si trova perfettamente in linea dietro alla poppa della barca secondaria. In questa posizione la barca chiave riceve il flusso con un angolo apparente decisamente peggiore; infatti la scia dietro la barca secondaria ha una deviazione media di 22° . Essendo l'AWA di 25° è intuitivo capire che tale deviazione risulta particolarmente importante nel caso in cui la barca chiave si trovi nella posizione indicata.

Più precisamente per le tre distanze prese in esame riscontriamo una differenza tra le prestazioni delle due barche pari a $AF_{r_{2nd}}/AF_{r_{key}} = 4.8$ per $R = 0.5 h$, $AF_{r_{2nd}}/AF_{r_{key}} = 2.6$ per $R = 1 h$, $AF_{r_{2nd}}/AF_{r_{key}} = 2.0$ per $R = 2 h$.

Allo stesso modo nel caso delle due barche a posizioni invertite, cioè con $\Phi = 338^\circ$.

Un altro aspetto identificato da questi grafici è che riscontriamo due posizioni dove le prestazioni tra e due barche si equivalgono ($AF_{r_{2nd}}/AF_{r_{key}} = 1$): a $\Phi = 84^\circ$ e a $\Phi = 264^\circ$.

Questi due angoli vanno quindi ad identificare due aree distinte:

- una dove la barca secondaria è in una posizione vantaggiosa rispetto alla barca chiave, ricevendo maggiore spinta rispetto alla primaria, con angolo tra 264° a 84° in senso orario
- una dove è la barca chiave ad avere maggiore spinta, con angolo tra 84° a 264° in senso orario

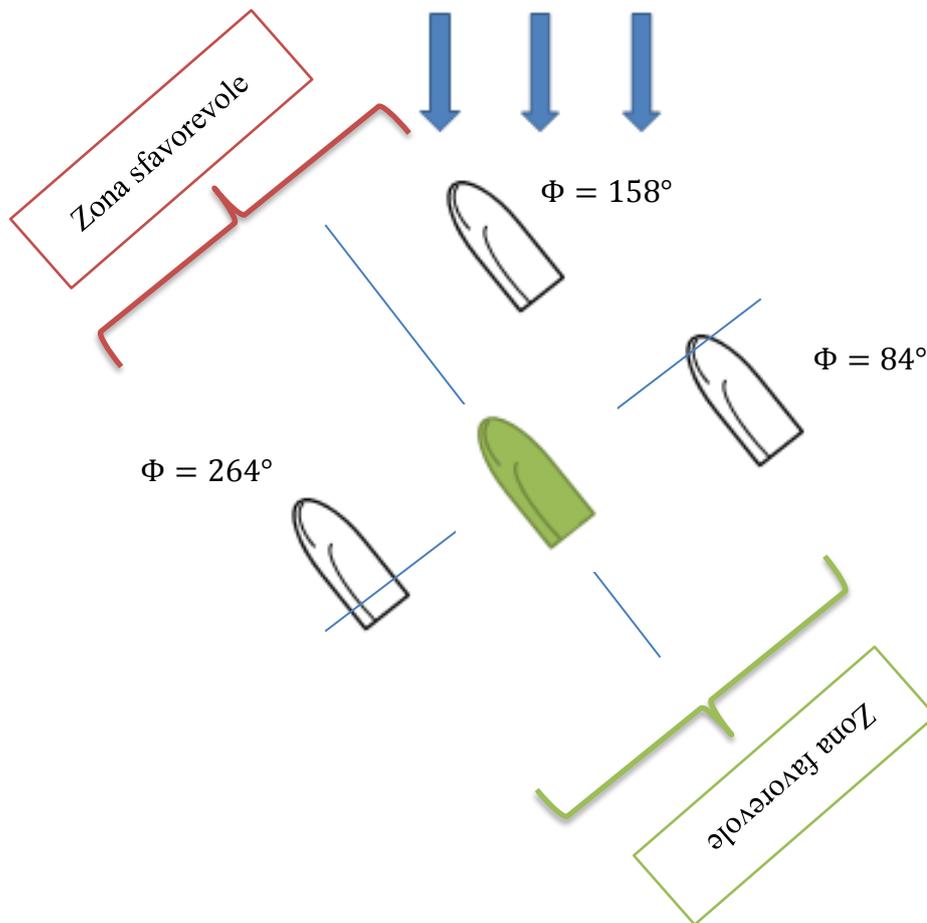


Figura 4.7 – a $\Phi = 84^\circ$ e $\Phi = 264^\circ$ le prestazioni della barca chiave (in verde) e di quella secondaria (in bianco) si equivalgono; mentre a $\Phi = 158^\circ$ la barca secondaria ha un grosso vantaggio rispetto a quella chiave

Un'altra analisi interessante è stata effettuata andando a confrontare i dati trovati rispetto alla spinta della barca isolata.

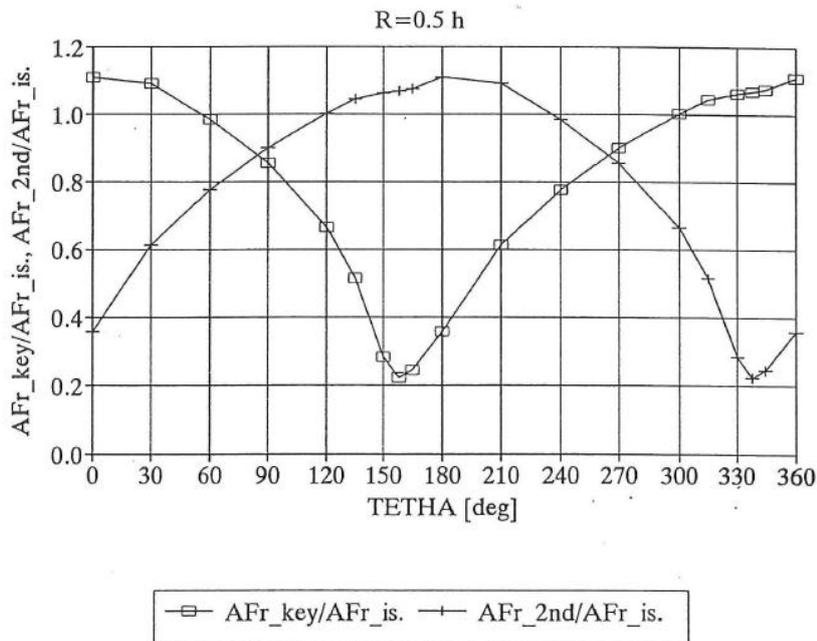


Figura 4.8 – Andamento della spinta della barca chiave e della barca secondaria rispetto alla spinta della barca isolata a $R = 0.5 h$ [3]

Il grafico in figura 4.8 dimostra non solo il calo di spinta quando la barca si trova in scia all'altra, come era lecito aspettarsi, ma che ci sono anche alcune situazioni dove la breve distanza tra le due barche può portare a un incremento delle prestazioni. Viene infatti evidenziato che quando una barca si trova davanti all'altra si può avere un incremento delle prestazioni.

Infatti quando la barca secondaria naviga nel settore tra $\Phi = 120^\circ$ e $\Phi = 235^\circ$ riceve un incremento della spinta rispetto a quanto avrebbe nel caso fosse isolata, con un massimo a $\Phi = 190^\circ$ (cioè davanti leggermente sottovento). Questa zona è detta Safe Leeward Position. Naturalmente questo effetto è tanto più accentuato quanto le due barche sono vicine

La causa di questo incremento della spinta è da ricercare nel benefico effetto di up-wash indotto dalla presenza della barca chiave.

Da notare inoltre come nei due casi in cui le barche presentavano le stesse prestazioni ($\Phi = 84^\circ$ e $\Phi = 264^\circ$) entrambe lamentano comunque una spinta inferiore rispetto alla barca isolata. In particolare si ha un decremento delle prestazioni pari al 3% nel caso di $R = 2.0 h$ e del 12% nel caso di $R = 0.5 h$.

4.2 - Analisi sperimentale

Si riprende l'analisi effettuata dall'università di Auckland [2] che abbiamo già analizzato nella parte riguardante la scia.

In questo caso sono stati usati due modelli in scala di barca con un'altezza dell'albero pari a $h = 2.25 m$ con un AWA pari a 20° e una inclinazione di 25° .

Sulla barca chiave in questo caso è stato montata una bilancia aerodinamica in grado di rilevare le 6 componenti di forze e momenti lungo i tre assi.

Anche in questo caso è stata scelta come distanza di riferimento l'altezza dell'albero h .

A causa delle limitate dimensioni della camera di prova (7m di lato e 3.5m di altezza), per evitare fenomeni di bloccaggio per la vicinanza con le pareti della galleria, è stato scelto di limitare la distanza laterale tra le barche a $R = 1 h$.

La seconda barca, priva di bilance aerodinamiche, è stata fatta ruotare attorno alla barca chiave a diverse distanze, raccogliendo ad ogni posizione i dati della bilancia aerodinamica.

I risultati ottenuti sono poi stati diagrammati interpolando i dati ottenuti.

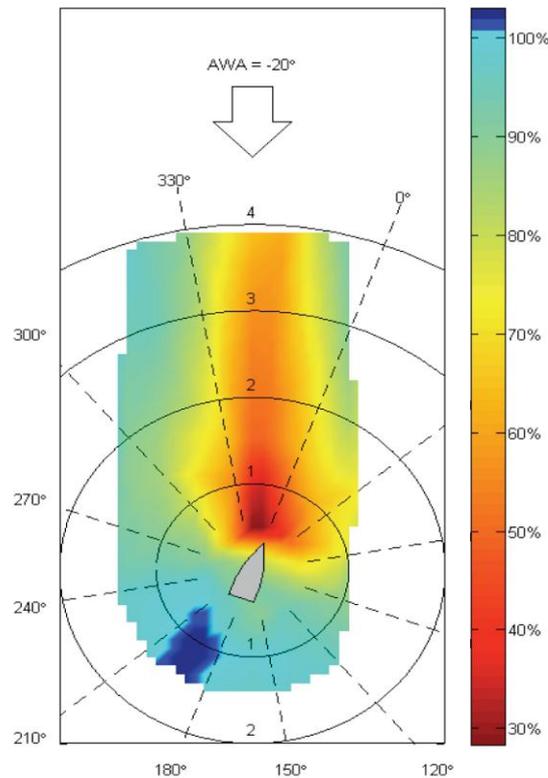


Figura 4.9 – Cambio percentuale della spinta della barca chiave al variare della posizione della seconda barca rispetto alla spinta di una barca isolata [2]

Dalla figura 4.9 si nota come il maggiore calo di prestazioni della barca chiave si abbia quando la barca secondaria si trova più o meno nella direzione del vento apparente, con una leggera flessione di qualche grado verso sinistra a causa della deflessione della scia. Il calo di prestazioni si estende ben oltre $R=4 h$, dove si ha ancora una spinta circa del 30% inferiore rispetto al normale.

Anche in questo caso si nota che quando la barca chiave si trova davanti e leggermente sottovento alla barca secondaria si ha un leggero incremento della spinta, in concomitanza della Safe Leeward Position.

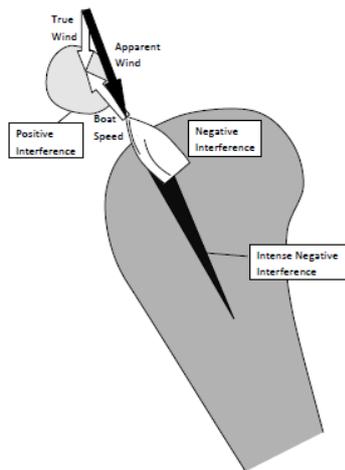


Figura 4.10 – immagine basata sui dati ottenuti dalla galleria del vento [2]

Possiamo andare a graficare l'andamento dei risultati ottenuti dall'analisi sperimentale con i dati ottenuti da Caponnetto [3].

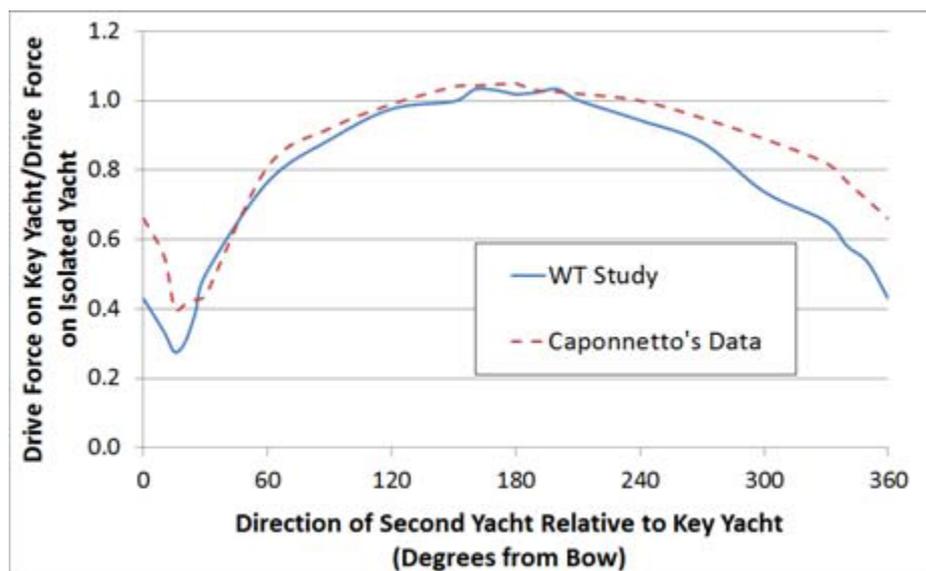


Figura 4.11 – diagramma comparativo tra i dati di Caponnetto e i dati sperimentali [2]

Dalla figura 4.11 vediamo come i dati sono abbastanza simili, soprattutto per quanto riguarda la situazione in cui la barca chiave, con i sensori, si trovi davanti alla barca secondaria.

Si può quindi affermare che Caponnetto sia affidabile per una prima analisi.

4.3 - Analisi CFD

Vediamo anche le analisi compiute dall'analisi CFD dall'università di Kiel [5].

L'analisi è stata compiuta su un modello di Elliot 6m, una imbarcazione usata nel match race alle olimpiadi di Londra 2012.

L'AWA scelto è di 25° con una AWS di 10 m/s.

È stato scelto anche in questo caso di mantenere ferma la barca chiave con una barca secondaria che le ruota intorno a diversi angoli e distanze secondo lo schema in figura 4.11.

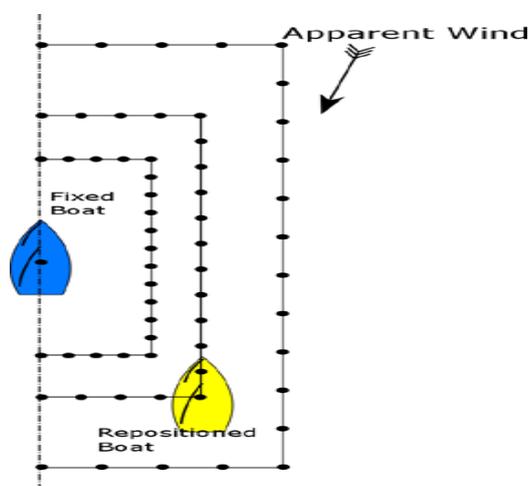


Figura 4.12 – disposizione della barca secondaria rispetto a quella chiave nell'analisi CFD [5]

I risultati sono stati elaborati interpolando i dati ottenuti in modo da essere conformi graficamente all'analisi sperimentale vista in precedenza.

La figura 4.13 presenta la forza propulsiva della barca chiave con la barca secondaria posizionata a varie angolazioni e distanze rispetto alla forza propulsiva prodotta dalla barca isolata.

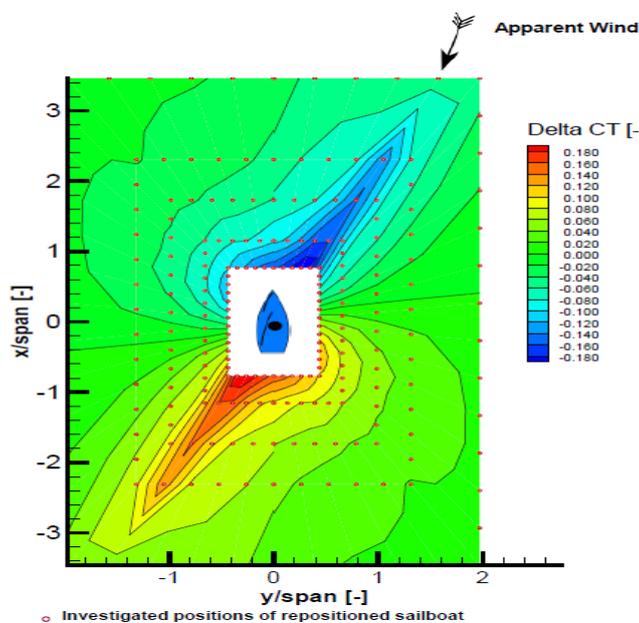


Figura 4.13 – Risultato dell'analisi di interferenza tra due barche [5]

Si può notare come i risultati siano conformi con quanto è stato rilevato dalle prove sperimentali e numeriche.

Infatti la zona dove si ha il maggiore calo di forza propulsiva si trova nella direzione del vento apparente, in prossimità dell'intense blanketing zone.

Anche la zona di influenza positiva (Safe Leeward Position) è ben evidenziata nel caso in cui la barca secondaria si trovi dietro e leggermente sopravento (esattamente a 30°) alla barca chiave.

Secondo i dati ottenuti, in questa zona si può trovare un incremento delle prestazioni della barca chiave fino al 18% rispetto alla barca isolata, mentre la barca secondaria registra un peggioramento del 50%.

Confrontando i dati dell'analisi CFD con quelli ottenuti da Caponnetto [3] e dall'analisi sperimentale di Auckland [2] otteniamo una buona sovrapposizione tra le curve in figura 4.13, confermando la bontà del risultato. Le discrepanze rilevate sono da imputare ai diversi AWA e AWS utilizzati, oltre ai differenti modelli di barca presi in esame.

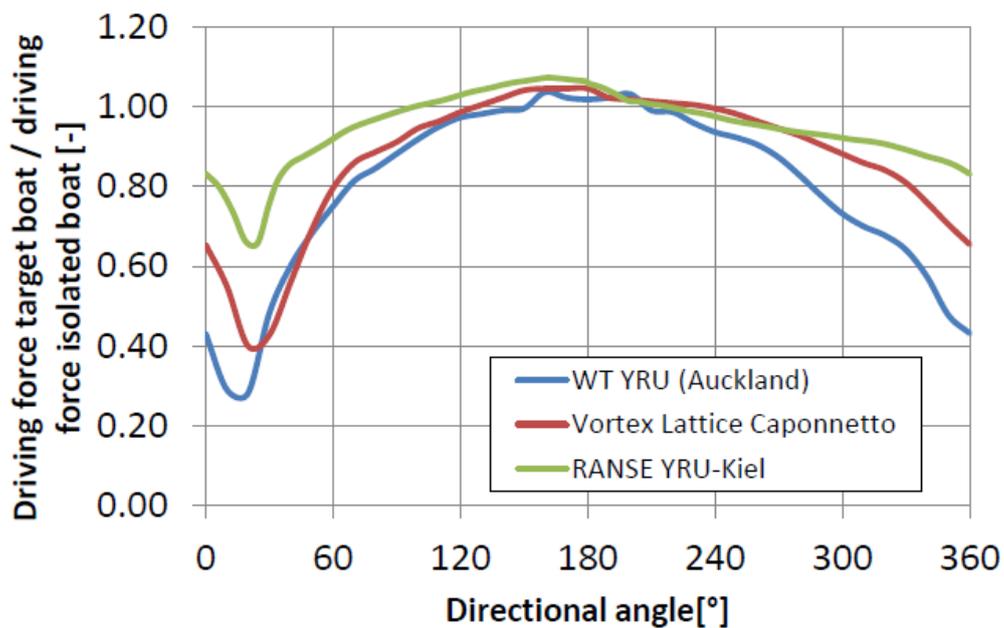


Figura 4.14 – Confronto tra analisi CFD e analisi numerica di Caponnetto a R=1 h [5]

Tramite l'analisi CFD è possibile inoltre andare a vedere più nel dettaglio le zone di blanketing e di safe leeward position.

4.3.1 Blanketing Zone



Figura 4.15 – la barca chiave (in verde) si trova nella zona di blanketing della scia della barca secondaria (in bianca)

La zona di Blanketing si trova allineata con la direzione del vento apparente. In questa zona si manifesta un forte calo dell'intensità del vento legata ad un cambio della direzione che fa crollare l'AWA della barca chiave.

La figura 4.15 dimostra come le linee di flusso davanti alla barca chiave si raddrizzino di parecchi gradi rispetto all'AWA indisturbato. Questo porterà la barca chiave a navigare all'interno dell'angolo morto, costringendo il timoniere e a poggiare e a perdere terreno.

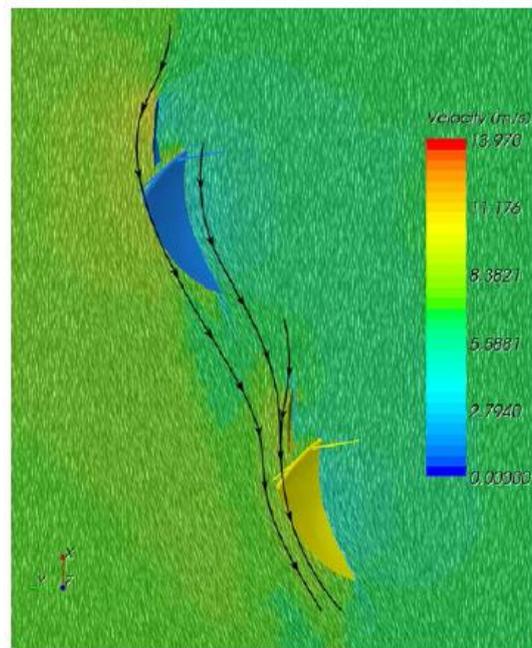


Figura 4.16 – Streamline attorno alle due imbarcazioni [5]

Dalla figura 4.17 si vede la conferma del calo del C_p sulla parte sopravento delle due vele.

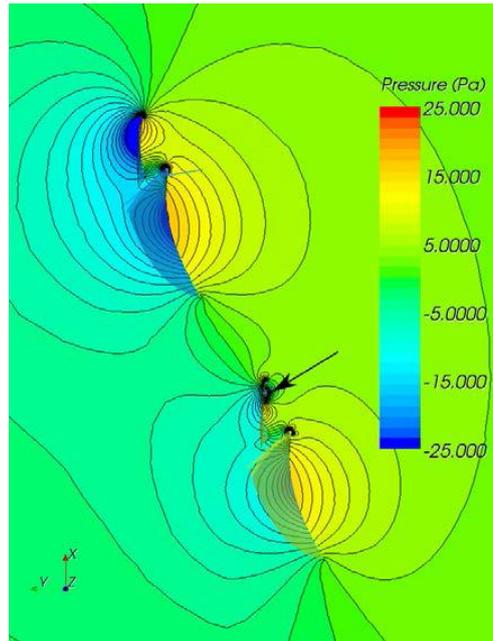


Figura 4.17 - pressione sulle due vele in vista 2D dall'alto. Si nota come la barca gialla in zona di backwinding abbia una pressione minore [5]

Dalla figura 4.13 si può inoltre notare come la zona di Blnketing si estenda oltre $R=3h$, dove risulta un calo delle prestazioni assolute ancora del 6-8%.

4.3.2 Safe Leeward Position

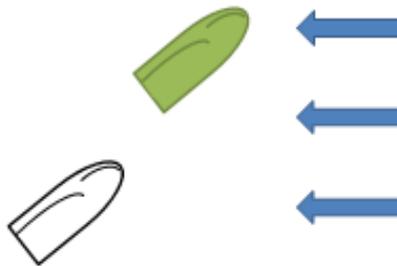


Figura 4.18 – Leeward Safe Position con barca chiave (in verde) e barca secondaria (in bianco)

Quando la barca secondaria si posiziona sopravento alla barca chiave in posizione arretrata e con il corretto allineamento, la barca chiave gode di una maggiore differenza di pressione tra il ventre e il dorso delle sue vele, ottenendo quindi una spinta maggiore. È praticamente il caso opposto rispetto al backwinding.

Riprendendo la figura 4.16 si nota bene il cambio di angolo sulla barca chiave, con un incremento dell'AWA e quindi della velocità, mentre dalla 4.16 si vede l'aumento di pressione, particolarmente marcato sul fiocco.

Questa è la posizione in cui la barca chiave ottiene il maggiore vantaggio rispetto alla barca secondaria. Sarà quindi compito del tattico della secondaria evitare di trovarsi in questa situazione.

CAPITOLO 5

APPLICAZIONE A CASI TIPICI DI REGATA

Con i dati ottenuti attraverso le analisi numeriche, sperimentali e CFD è possibile ora fare una considerazione sui vari momenti di regata dove la scia ha una certa influenza sul risultato..

La precisa conoscenza del comportamento della scia in può infatti rappresentare un vantaggio tattico in alcune situazioni.

Le situazioni di regata che analizzeremo sono le stesse identificate nel secondo capitolo. Confronteremo quindi i dati ottenuti dalle varie analisi con la posizione delle barche in partenza, alla boa di bolina e durante gli incroci.

Per ogni condizione di regata effettueremo quindi un'analisi numerica, basata sui risultati ottenuti da Caponnetto [3], una sperimentale, basata sui dati dell'università di Auckland [2] e una CFD, basata sui risultati del Politecnico di Milano.

Per ogni analisi verranno prese in considerazione solo due barche per rispettare la bontà delle analisi compiute.

5.1 – Partenza

Come visto nel capitolo 2, la partenza rappresenta un momento fondamentale della regata. In questa fase è molto semplice rimanere vittima della scia di un avversario ed è quindi fondamentale comprendere quale sia la zona dove si ha la minore perdita di prestazione.

In partenza le barche si trovano affiancate l'una all'altra, ad una distanza ravvicinata spesso anche inferiore alla lunghezza dello scafo.

Analizziamo quindi due casi principali per la partenza:

- barca chiave sopravvento ed allineata alla linea di partenza con la barca secondaria
Verrà indicata con un simbolo azzurro d'ora in poi.

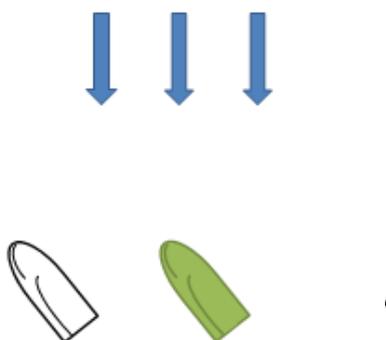


Figura 5.1 – primo caso di partenza con barca chiave (verde) sopravvento

- barca chiave sottovento ed allineata alla linea di partenza con la barca secondaria
Verrà indicata con un simbolo arancione d'ora in poi.

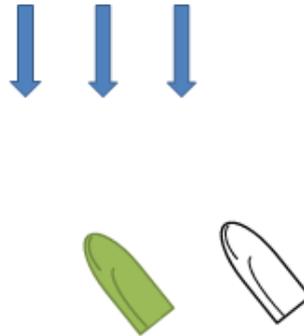


Figura 5.2 – secondo caso di partenza con barca chiave (verde) sottovento

5.1.1 Analisi analitica

Considerando che Caponnetto ha utilizzato un'AWA di 22° con barca mure a destra. .
L'asse di riferimento è allineato con l'asse della barca chiave, quindi per avere le due barche allineate sulla linea di partenza bisogna analizzare i casi a $\Phi = 90^\circ - 22^\circ = 68^\circ$ (nel caso di barca chiave sottovento) e $\Phi = 248^\circ$ (nel caso di barca chiave sopravvento).
L'AWS usata per l'perimento è di 10 m/s.

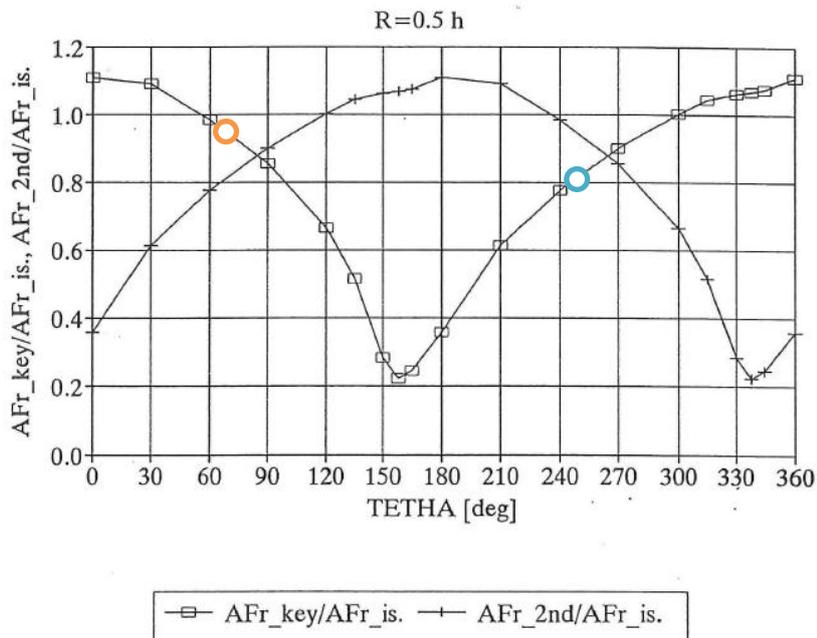


Figura 5.3 – grafico delle prestazioni a $R=0.5h$ con indicati i due angoli dei due casi in cui le barche sono allineate alla linea di partenza (a destra in azzurro la barca chiave è sopravvento alla secondaria, a sinistra in arancione la barca chiave è sottovento) [3]

Notiamo che nel caso in cui la barca chiave è posizionata sottovento ottiene un vantaggio nella spinta del 15% (dato ottenuto graficamente) rispetto alla barca secondaria. Nonostante il vantaggio sulla barca secondaria, la barca chiave sperimenta comunque un calo di prestazione generale del 5%.

Nel caso in cui la barca chiave si trova sopravvento la differenza di prestazione tra le due barche rimane del 15%, stavolta a favore della barca secondaria, con un abbassamento della forza propulsiva della barca chiave del 20%.

Vediamo anche il caso a $R=1h$.

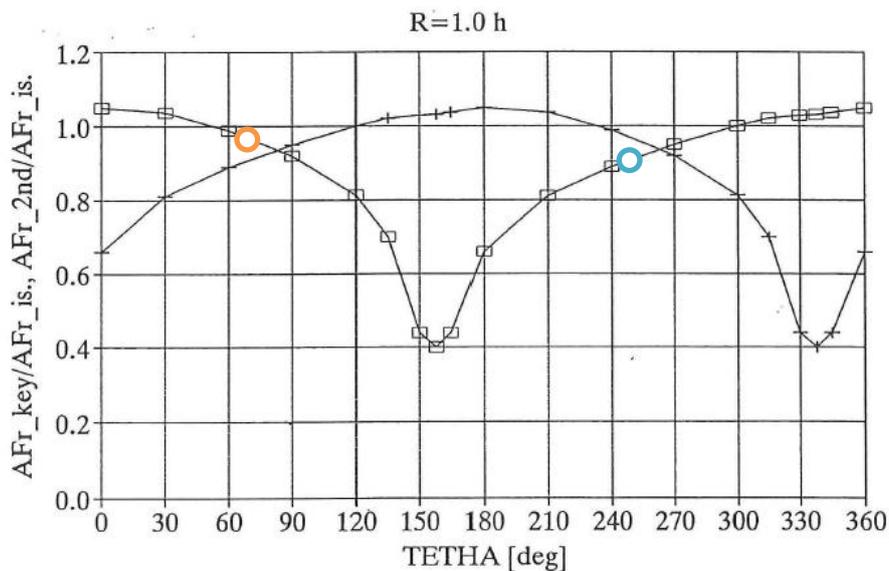


Figura 5.4 – grafico delle prestazioni a $R=1h$ con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata. Sono indicati i due angoli dei due casi in cui le barche sono allineate alla linea di partenza (a destra in azzurro la barca chiave è sopravvento alla secondaria, a sinistra in arancione la barca chiave è sottovento) [3]

In questo caso il vantaggio della barca sottovento è circa del 7%, con un calo delle prestazioni rispettivamente del 3% e del 10%

5.1.2 Analisi sperimentale

L'analisi sperimentale è stata compiuta a 20° di AWA con un sistema di riferimento specchiato rispetto all'analisi analitica.

Si devono quindi ricercare i dati relativi ad angoli $\Phi = 250^\circ$ per avere la barca chiave sottovento e $\Phi = 70^\circ$ per avere la barca chiave sopravvento.

La AWS usata per l'esperimento è di 4 m/s.

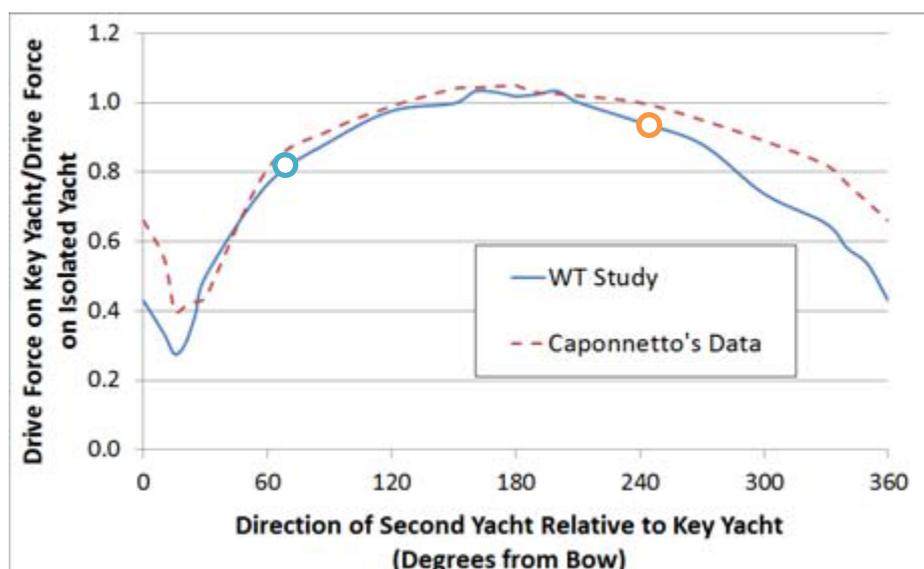


Figura 5.5 – Risultati dell’analisi in galleria del vento confrontata con analisi analitica con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata a $R=1h$. Sono indicati i due angoli dei due casi in cui le barche sono allineate alla linea di partenza (a destra in azzurro la barca chiave è sopravento alla secondaria, a sinistra in arancione la barca chiave è sottovento) [2]

Anche in questo caso quando la barca chiave è sottovento ha un vantaggio di spinta del 10% rispetto alla secondaria, con un calo generale delle prestazioni del 7% nel caso sottovento e del 17% nel caso sopravento.

Questa maggiore severità della scia rispetto al caso analitico è molto probabilmente dovuta al fatto di aver utilizzato imbarcazioni differenti; infatti è plausibile che le imbarcazioni di Coppa America usate nell’analisi numerica abbiano una scia ridotta rispetto a quelle dei modelli usati in galleria del vento.

Un aspetto da non trascurare è la velocità a cui sono effettuate le prove, visto che per la prova sperimentale, per limiti dovuti ai modelli e alla galleria del vento stessa, è stata usata una velocità del vento di 4 m/s, rispetto ai 10 m/s della prova analitica. La maggiore velocità del flusso porta probabilmente a far riallineare più velocemente i filetti fluidi con il flusso indisturbato, diminuendo di fatto l’influenza della scia.

Inoltre anche le semplificazioni introdotte nel modello numerico possono avere una certa influenza.

5.1.3 Analisi CFD

L’analisi CFD [5] è stata compiuta a 25° di AWA su una imbarcazione Elliot 6m e con una AWS di 10 m/s

Considerando il sistema di riferimento utilizzato nell’analisi, bisogna andare a considerare i casi con angolo $\Phi = 65^\circ$ per barca chiave sottovento e $\Phi = 245^\circ$ per barca chiave sopravento.

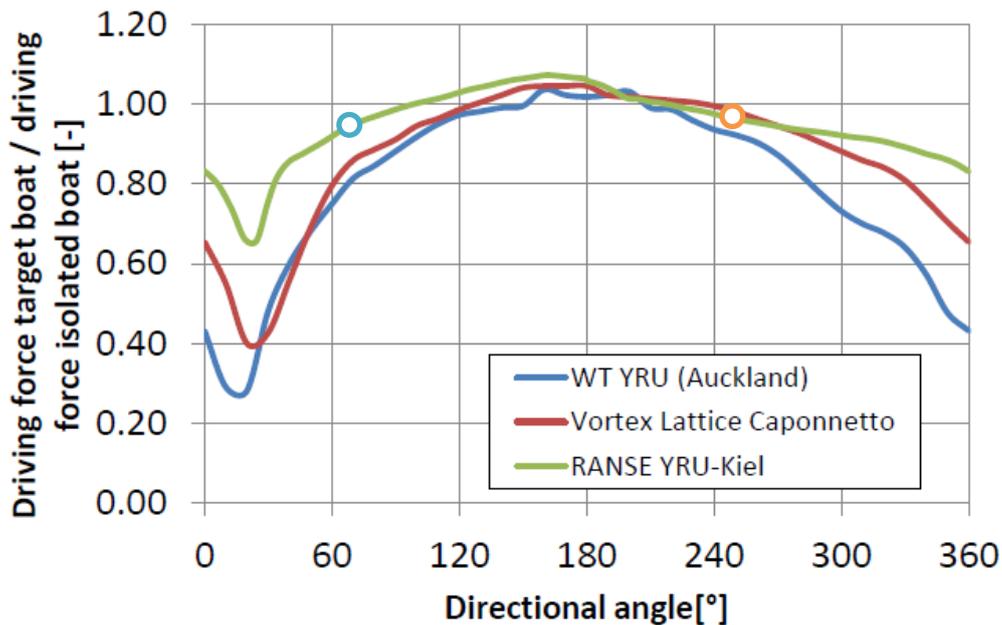


Figura 5.6 – Confronto tra CFD, analisi analitica e sperimentale con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata a $R=1h$. Sono indicati i due angoli dei due casi in cui le barche sono allineate alla linea di partenza (a destra in azzurro la barca chiave è sopravento alla secondaria, a sinistra in arancione la barca chiave è sottovento). [5]

In questo caso quando la barca chiave è sottovento ha un vantaggio di spinta solo del 4% rispetto alla secondaria. Le due barche registrano un calo assoluto di prestazioni del 7% per la barca sopravento e del 3% per la barca sottovento.

La scia risulta meno severa rispetto ai due casi precedenti. La causa è probabilmente da imputare al modello di barca scelto e alla sua modellizzazione in 3D.

5.1.4 Risultati

La tabella 5.1 riassume i dati ottenuti. Da ricordare come questi dati siano stati presi con analisi a velocità del flusso e con modelli di imbarcazione differenti; sono quindi da considerare come puramente indicativi.

Tabella 5.1 – riassunto dati per la partenza

TIPO DI PROVA	flusso prova [m/s]	Tipo imbarc azione	A W A	CASO SOPRAVENTO		CASO SOTTOVENTO	
				Barca chiave - Barca secondaria	Barca chiave - Barca isolata	Barca chiave - Barca secondaria	Barca chiave - Barca isolata
R=1 h							
Analiti ca	10	ACC	22	-7%	-10%	+7%	-3%
Sperim entale	4	IRC	20	-10%	-17%	+7%	-7%
CFD	10	Elliot	25	-30%	-17%	+30%	+13%

In tutti i casi il risultato è che conviene molto di più partire sottovento ad un avversario rispetto che sopravvento.

5.2 – Boa di Bolina

Come abbiamo visto nel capitolo sulla regata la boa di bolina costringe spesso le barche a compattarsi e a mettersi una in coda all'altra sulla layline, formando dei treni di barche che si avvicinano in blocco alla boa.

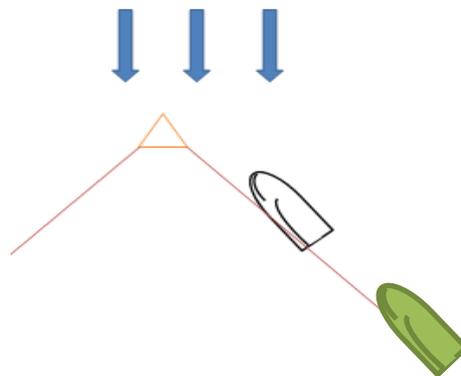


Figura 5.7 – Arrivo alla boa di bolina

Le barche si troveranno quindi una in scia all'altra, allineate lungo il proprio asse, nella zona di Backwinding.

In questa situazione di gara possiamo identificare due differenti condizioni:

- una con la barca chiave davanti alla barca secondaria (identificata da simbolo color arancione), dove quindi la barca chiave si trova in una situazione di vantaggio.
- una con la barca chiave dietro alla barca secondaria (identificata da simbolo color azzurro), dove quindi la barca chiave si trova nei rifiuti della barca secondaria.

Come fatto in precedenza andiamo ad analizzare questa situazione nei vari metodi di analisi.

5.2.1 Analisi analitica

Per l'analisi analitica è stato utilizzato un'AWA di 22° con barca mure a destra. L'asse di riferimento è allineato con l'asse della barca chiave, quindi per avere le due barche allineate una dietro l'altra lungo il proprio asse bisogna ipotizzare $\Phi = 180^\circ$. L'AWS usata per l'esperimento è di 10 m/s.

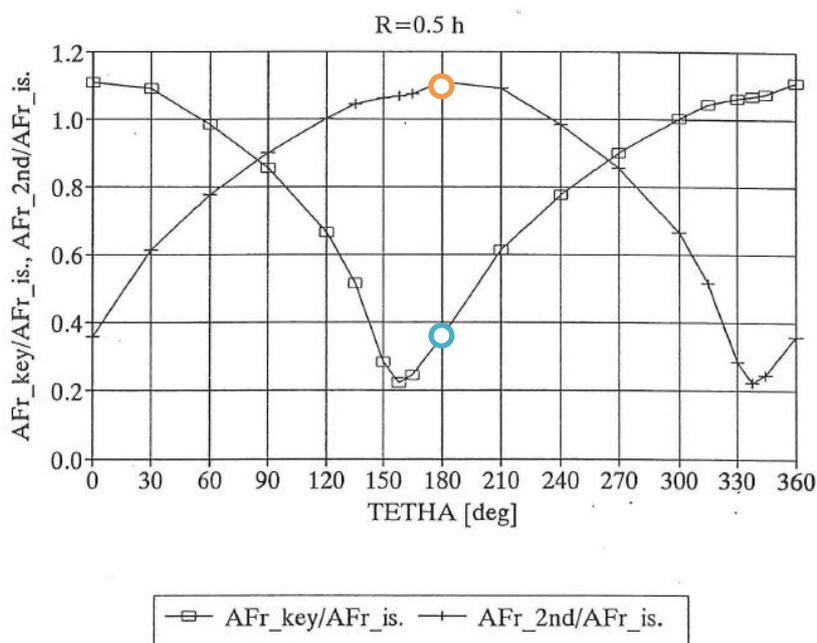


Figura 5.8 – grafico delle prestazioni a $R=0.5h$ con indicati il caso di barca chiave davanti alla barca secondaria (simbolo arancione) e di barca chiave dietro (simbolo azzurro). I dati sono dati in relazione della spinta creata dalle due barche rispetto alla spinta di una barca isolata. [3]

Come ci aspettavamo la differenza di prestazioni tra i due casi è notevole. Il dato, ottenuto graficamente, dimostra come la barca davanti abbia una spinta del 75% maggiore rispetto alla barca dietro.

Inoltre si nota come la barca davanti presenti una spinta del 10% maggiore rispetto al caso della barca isolata. Possiamo quindi affermare che si trova nella Safe Leeward Zone.

Vediamo anche il caso a $R=1h$.

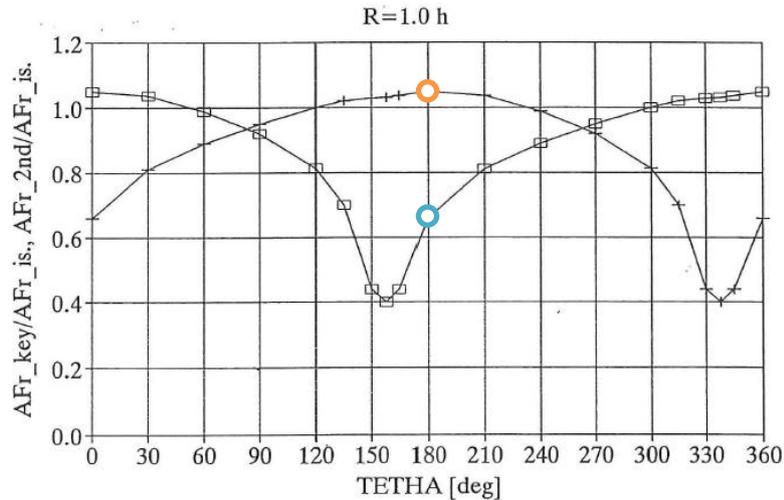


Figura 5.9 – grafico delle prestazioni a $R=1h$ con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata. Sono indicati i due casi di barca chiave davanti (simbolo arancione) e dietro (simbolo azzurro). [3]

Come era lecito aspettarsi, con l'aumento della distanza tra le due barche l'effetto della scia si affievolisce. Ad ogni modo la barca dietro continua ad essere fortemente penalizzata rispetto a quella davanti, con una differenza della spinta tra le due barche del 38% e con un incremento assoluto di prestazioni della barca davanti del 4%.

5.2.2 Analisi sperimentale

L'analisi sperimentale è stata compiuta a 20° di AWA con un sistema di riferimento specchiato rispetto all'analisi analitica. Anche in questo caso l'asse di riferimento è quello della barca, quindi bisogna confrontare i dati relativi a $\Phi = 180^\circ$ e $\Phi = 0^\circ$. La AWS usata per l'esperimento è di 4 m/s.

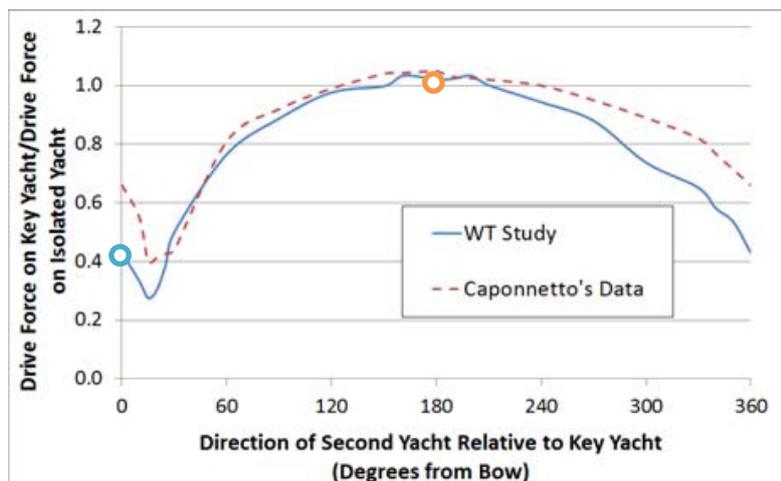


Figura 5.10 – Risultati dell'analisi in galleria del vento confrontata con analisi analitica con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata a $R=1h$. Sono indicati i due casi di barca chiave davanti (simbolo arancione) e dietro (simbolo azzurro). [2]

La differenza tra la spinta della barca davanti e di quella dietro è del 59%, con un incremento di prestazione assoluta per la barca davanti del 2%. Come visto nel capitolo 5.1.2 la maggiore severità dell'interferenza è probabilmente dovuta alla minore velocità del flusso, alla differenza tra i modelli di barca utilizzati e alle approssimazioni introdotte nel modello numerico.

5.2.3 Analisi CFD

L'analisi CFD [5] è stata compiuta a 25° di AWA su una imbarcazione Elliot 6m e con una AWS di 10 m/s

Considerando il sistema di riferimento utilizzato nell'analisi, gli angoli da considerare sono $\Phi = 0^\circ$ per avere la barca chiave davanti a quella secondaria e $\Phi = 180^\circ$ per la barca chiave dietro.

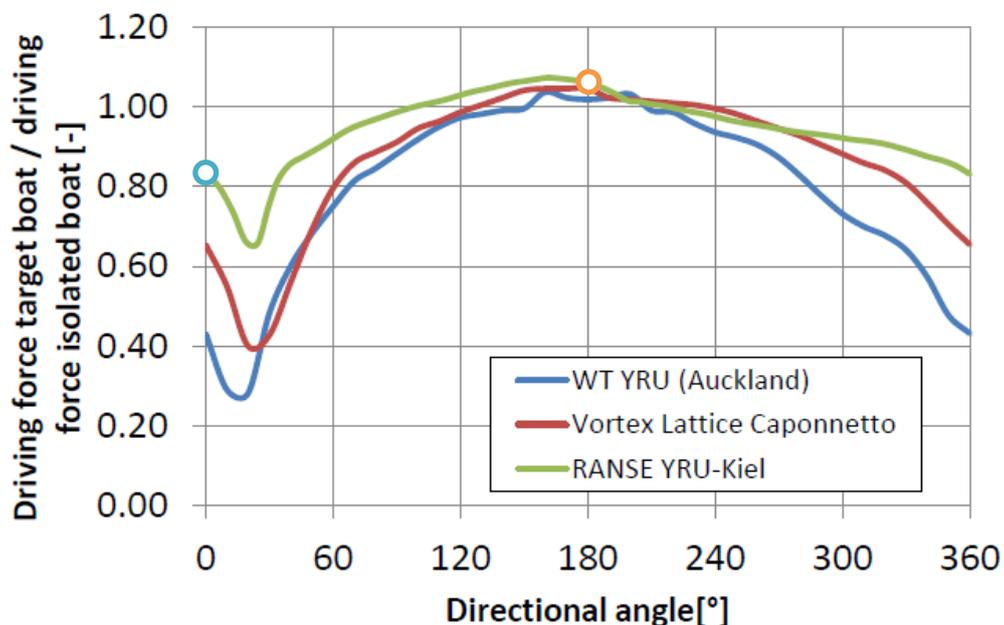


Figura 5.11 – Risultati dell'analisi CFD confrontata con analisi analitica e sperimentale con rapporto tra spinta della barca chiave e barca isolata a $R= 1h$. Sono indicati i due il casi di barca chiave davanti (simbolo arancione) e dietro (simbolo azzurro). [5]

La differenza tra la spinta della barca davanti e di quella dietro è del 23%, con un incremento di prestazione assoluta per la barca davanti del 6%. Anche in questo caso si nota una minore severità della scia rispetto ai due casi visti in precedenza.

5.2.4 Risultati

La tabella 5.2 riassume i dati ottenuti. Da ricordare come questi dati siano stati presi con analisi a velocità del flusso e con modelli di imbarcazione differenti; sono quindi da considerare come puramente indicativi.

Tabella 5.2 - riassunto dati per la boa di bolina

TIPO DI PROVA	flusso prova [m/s]	Tipo imbarcazione	A W A	Prestazioni		
				Barca davanti - Barca dietro	Barca davanti - Barca isolata	Barca dietro - Barca isolata
R=1 h						
Analitica	10	ACC	22	+38%	+4%	-34%
Sperimentale	4	IRC	20	+59%	+2%	-57%
CFD	7	Elliot	25	+79%	+20%	-59%

Come era prevedibile la layline si può rivelare una trappola per il tattico. Gli effetti negativi sono davvero molto marcati e non possono quindi essere trascurati nella scelta della strategia di approccio alla boa.

Se una barca si trova dietro ad un'altra sulla layline non solo la quella dietro si troverà in una zona di rifiuti, ma aiuterà anche la barca davanti ad aumentare la velocità, ottenendo così un doppio effetto negativo.

Sarà quindi compito del tattico evitare di accodarsi nel trenino verso la boa, ma cercare piuttosto di ritardare la virata sulla layline o di anticiparla (facendo in questo caso attenzione a non finire nella zona di blanketing).

5.3 - Incroci durante la Bolina

Un'altra situazione classica delle regate, soprattutto in quelle di flotta, è l'incrocio con barche su mure differenti.

In questa situazione coesistono due effetti contrapposti: uno dovuto al calo del vento e uno dovuto alla variazione dell'angolo.

In pratica durante un incrocio si percepirà un calo di intensità del vento unito a un aumento benefico dell'AWA se si passa dietro ad un'altra barca, mentre si avrà solo un effetto negativo nell'angolazione dell'AWA incrociando davanti ad un'altra barca.



Figura 5.12 – Incrocio tra due barche su mure opposte durante la bolina

L'analisi è effettuata con la barca chiave allineata con l'asse della barca secondaria ma con mure differenti l'una dall'altra, posizionando la barca chiave prima davanti e poi dietro alla barca secondaria (come in figura 5.12).

I dati in nostro possesso non ci permettono di poter effettuare l'analisi in modo analogo ai due casi precedenti. Infatti i dati ricavati sono relativi alla spinta generata dalle vele che è dipendente sia dal AWS che dall'AWA; dati non forniti nelle ricerche bibliografiche effettuate.

CONCLUSIONI

L'analisi effettuata permette di avere una panoramica completa di come variano le prestazioni a seconda della posizione rispetto ad un'altra barca.

I risultati ottenuti ci permettono quindi di quantificare a priori di quanto sarà il calo di prestazione, in senso assoluto e relativo, quando ci avviciniamo alla scia dell'imbarcazione avversaria. In questo modo il tattico potrà effettuare una valutazione accurata della variazione di velocità della propria barca e reagire di conseguenza, valutando se e quando virare per uscire dalla scia dell'altra barca.

Si tratta quindi di un aiuto che il tattico può sfruttare per prendere le sue decisioni.

Il vantaggio ottenuto prendendo coscienza di questa analisi è lieve, in quanto ogni buon velista ha nel proprio bagaglio tecnico e di esperienza gli strumenti necessari a riconoscere e prevedere quando ci si trova in una zona perturbata.

Però in regate dove il livello è molto alto (America's Cup, olimpiadi, mondiali etc...) e dove ogni dettaglio conta, un qualunque possibile aiuto nella scelta tattica può far la differenza tra vincere e perdere.

Molto interessante risulta la scoperta dell'esistenza della Safe Leeward Zone. L'aumento della prestazione assoluta quando si riesce a posizionarsi davanti e sottovento all'imbarcazione avversaria può essere infatti sfruttata e ricercata in varie occasioni, come ad esempio l'arrivo verso la boa di bolina, per ottenere una spinta aggiuntiva.

Anche la determinazione più precisa di quando la barca sottovento si trova in una situazione di vantaggio, di pareggio o di svantaggio rispetto a quella sopravvento può anch'essa essere sfruttata nella determinazione della tattica di regata.

Dalle analisi si riscontra anche un interessante variazione nell'interferenza della scia dipendente dalla velocità del flusso e dal modello di barca utilizzato per le prove. Questo aspetto può essere rilevante nella capire l'effettivo calo della performance.

L'analisi meriterebbe un ulteriore sviluppo per poter studiare più nel dettaglio la situazione di incrocio con mure diverse.

Come già detto in questa situazione abbiamo una componente sfavorevole dovuta al calo di AWS, contrapposto almeno in parte alla variazione favorevole di AWA.

I due effetti contrapposti meriterebbero un'analisi ulteriore per quantificare con precisione il calo di spinta della barca dietro. È infatti possibile che la variazione di AWA riesca a equilibrare il calo di AWS, evitando quindi di perdere terreno.

Un altro aspetto che non è stato possibile approfondire in questo trattato sono le regate di flotta, e cioè dove si ha l'interferenza non solo tra due barche, ma tra un numero maggiore di competitor.

Sarebbe infatti di grande interesse andare a vedere come variano le prestazioni della barca chiave se al posto di avere una sola barca secondaria avessimo una flotta.

L'estensione massima degli effetti della scia, successiva a $R=2h$, potrebbe essere d'aiuto per la tattica di regata nel caso di ulteriori prove.

Anche il fatto che l'analisi sia stata compiuta solo ed esclusivamente considerando il vento proveniente dall'AWA è stata una semplificazione. Infatti la scia, per poter essere studiata correttamente dovrebbe essere sottoposta all'TWA; in questo modo la scia si riallinea con la TWA e non con l'AWA.

Per effettuare un'analisi di questo tipo bisognerebbe però avere dei modelli che corrono su carrelli in galleria del vento o usare un modello dinamico nel caso di analisi in CFD.

In conclusione possiamo quindi affermare che lo studio effettuato, per quanto sia esaustivo ed utilizzabile per una molteplicità di casi durante una regata, presenta ancora delle lacune che meriterebbero di essere colmate con indagini ulteriori.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B.Chèret, 2000, “Le Vele – Comprendere, Regolare, Ottimizzare”, Mursia
- [2] P.J Richards, D.J Le Pelley, D. Jowett and O. Detlefsen, 2013, “A Wind Tunnel Study of the Interaction Between Two Sailing Yachts”, 21th Chesapeake Sailing Yacht Symposium - Annapolis, Maryland
- [3] Mario Caponnetto, 1996, “The Aerodynamic Interference Between Two Boats Sailing Close-Hauled”
- [4] Thomas Spenkuch, Dr. Stephen Turnock, Dr. Matteo Scarponi, Prof. Ajit Sheno, 2008, “Lifting line method for modelling covering and blanketing effects for yacht fleet race simulation”
- [5] Christoph Boehm, Kai Graf, 2016, “RANS based CFD investigation of the interference between two boats sailing upwind”
- [6] Jakob Kutteneuler, 2010, “Predicting the Effects of Interaction between Yachts Sailing Upwind”

RINGRAZIAMENTI

Arrivare alla fine di questo percorso non è stato facile. Ho dovuto superare molte difficoltà e più di una volta sono arrivato al limite, con una voglia di rinunciare sempre presente in fondo alla mia testa.

Se sono arrivato fino in fondo è solo grazie al sostegno delle persone che mi sono care, che mi hanno aiutato nei momenti di difficoltà.

Per prima senza dubbio devo ringraziare la mia famiglia, senza il quale non avrei mai potuto anche solo pensare di iniziare questa avventura. Mi ha sopportato nei miei periodi di stress, quando anche solo parlarci era impossibile e i periodi di incoscienza, quando sparivo anche per intere settimane a fare regate o a fare altri sport in posti sperduti. Hanno gioito con me ad ogni esame superato e mi hanno confortato per ogni bocciatura. Non sarei mai riuscito a finire senza di voi.

Devo ringraziare i miei amici velisti, lacustri e non. Con loro ogni regata, allenamento o lezione è un piacere grazie al quale si riesce evadere dalla normalità per entrare nel nostro universo blu.

Un particolare ringraziamento ai vari prodieri che negli anni hanno sopportato i miei scleri in barca, e a Urs per le meravigliose foto in Fireball.

Ai miei amici del liceo, con cui condivido da sempre passioni e le serate passate a Torino e dintorni.

Ai miei nonni che hanno sempre creduto in me e che grazie alla loro esperienza mi hanno sempre spinto nella direzione giusta.

Ai colleghi/amici della veleria Quantum Sail, con la quale collaboro ormai da anni e grazie al quale ho imparato e sto imparando un'infinità di cose sulla vela.

Grazie alla famiglia Capizzi che mi ha ospitato in casa loro a Genova facendomi sentire come a casa mia.

Agli amici del cammino di Santiago, grazie al quale sono riuscito a rimettere un po' d'ordine nella mia testa.

Un grazie speciale ad Antonio e Giorgio, due persone che anche se non ci sono più sento sempre presenti al mio fianco.

Alla mia barca, non un semplice oggetto ma una fedele compagna di mille avventure.



Campionato italiano Fireball 2019 – Rio Marina



Coppa Europa Melges 24 – Portoroz 2017



Palermo-Montecarlo 2016 su Junoplano



Post laurea triennale a Chiavari



151 Miglia 2019 su Muttley



Giraglia Rolex Cup 2016 su Stupefium