

# POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale  
Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale

Corso di Laurea in  
Ingegneria Aeronautica



## Previsione delle prestazioni stazionarie ed instazionarie di imbarcazioni a vela

Relatore:

Prof. Massimiliano LANZ

Correlatore:

Ing. Alessandro CASTELLI

Tesi di Laurea di:

Paolo MOTTA Matr. 766090

Anno Accademico 2012 – 2013



# Indice

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
1.1	Introduzione ai VPP . . . . .	5
1.2	Introduzione ai DPP . . . . .	7
1.3	Obiettivi e caratteristiche principali del programma . . . . .	8
1.4	Python e la programmazione ad oggetti . . . . .	9
1.5	Descrizione delle imbarcazioni . . . . .	10
1.5.1	Classe C . . . . .	10
1.5.2	Grand Soleil 43 new . . . . .	11
1.5.3	Maxi Yacht . . . . .	12
<b>2</b>	<b>Modello matematico del sistema</b>	<b>15</b>
2.1	Sistemi di riferimento . . . . .	15
2.1.1	Rotazioni . . . . .	19
2.1.2	Valutazione dell'assetto . . . . .	23
2.2	Equazioni di equilibrio statico . . . . .	23
2.3	Equazioni di equilibrio dinamico . . . . .	24
2.3.1	Equazioni cinematiche . . . . .	26
2.3.2	Masse aggiunte . . . . .	28
<b>3</b>	<b>Modello matematico per il calcolo fluidodinamico</b>	<b>29</b>
3.1	Modello del vento . . . . .	29
3.1.1	Vento reale . . . . .	29
3.1.2	Vento apparente . . . . .	31
3.1.3	Teoria quasi stazionaria . . . . .	33
3.2	Equazioni di governo . . . . .	34
3.3	Programmi per l'analisi fluidodinamica . . . . .	35
3.3.1	REVA . . . . .	35
3.3.2	SAILOPT . . . . .	40
3.3.3	SMAR-Azure . . . . .	41
3.3.4	Teoria della linea portante . . . . .	45

<b>4</b>	<b>Fitting dei dati</b>	<b>51</b>
4.1	Radial Basis Function . . . . .	51
4.2	Fitting polinomiale . . . . .	53
<b>5</b>	<b>Forze agenti sul sistema</b>	<b>55</b>
5.1	Scafo . . . . .	56
5.2	Appendici idrodinamiche . . . . .	57
5.2.1	Foil, chiglia e deriva . . . . .	57
5.2.2	Timone . . . . .	59
5.3	Vele . . . . .	59
5.3.1	Vela alare . . . . .	59
5.3.2	Vele classiche . . . . .	60
5.4	Momento raddrizzante . . . . .	62
<b>6</b>	<b>Ottimizzazione con algoritmo SLSQP</b>	<b>65</b>
6.1	Nonlinear programming problem . . . . .	65
6.1.1	Metodo risolutivo . . . . .	66
6.1.2	I metodi SQP . . . . .	67
6.2	Applicazione alle imbarcazioni . . . . .	69
6.2.1	Funzioni obiettivo . . . . .	69
6.2.2	Vincoli . . . . .	71
6.2.3	Variabili di ottimizzazione . . . . .	72
<b>7</b>	<b>Risultati VPP</b>	<b>77</b>
7.1	Classe C . . . . .	77
7.1.1	Analisi dei dati . . . . .	86
7.1.2	Variazione immersione del foil . . . . .	88
7.1.3	Valutazione della VMM ottima . . . . .	90
7.2	Grand Soleil 43 new . . . . .	93
7.2.1	Analisi dei dati . . . . .	102
7.2.2	Valutazione della VMM ottima . . . . .	104
7.3	Maxi Yacht . . . . .	106
7.3.1	Analisi dei dati . . . . .	108
<b>8</b>	<b>Integrazione temporale</b>	<b>111</b>
8.1	Metodo di Runge-Kutta del quarto ordine . . . . .	111
8.2	Passo temporale adattivo . . . . .	113
<b>9</b>	<b>Controllo</b>	<b>115</b>
9.1	Controllore PID . . . . .	115
9.1.1	Discretizzazione temporale . . . . .	117

<b>10 Risultati DPP</b>	<b>119</b>
10.1 Analisi dei risultati . . . . .	120
<b>11 Conclusioni</b>	<b>127</b>
<b>A Analisi del fitting polinomiale</b>	<b>133</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>139</b>



# Elenco delle figure

1.1	Schema di funzionamento di un VPP. Figura tratta da [2] . . . . .	6
1.2	Catamarano di classe C. Figura tratta da [4] . . . . .	10
1.3	Grand Soleil 43 new. Figura tratta da [5] . . . . .	12
1.4	Maxi Yacht di 100 piedi. CAD fornito dai progettisti. . . . .	13
2.1	Rotazione attorno all'asse Z. Figura tratta da [7] . . . . .	21
2.2	Rotazione attorno all'asse Y. Figura tratta da [7] . . . . .	22
2.3	Rotazione attorno all'asse X. Figura tratta da [7] . . . . .	22
2.4	Rotazione 3D rispetto al sistema inerziale. Figura tratta da [7] . . . . .	22
3.1	Intensit� e direzione del vettore vento reale. Figura tratta da [10] . . . . .	32
3.2	Vettore del vento apparente $\vec{V}_a$ . Figura tratta da [10] . . . . .	32
3.3	Effetto della rotazione in beccheggio su AWA. Figura tratta da [11] . . . . .	33
3.4	Sistema di riferimento idrodinamico. Figura tratta da [12] . . . . .	35
3.5	Metodo a reticolo di vortici. Figura tratta da [15] . . . . .	38
3.6	Schema vortice lineare e punto di controllo. Figura tratta da [15]. . . . .	39
3.7	Schema iterazione aeroelastica. Figura tratta da [18] . . . . .	42
3.8	Distribuzione ellittica di vorticit�. Figura tratta da [24] . . . . .	49
5.1	Azioni globali agenti sul sistema. Figura tratta da [23]. . . . .	55
5.2	Porzione di vela alare di Classe C. Figura tratta da [24] . . . . .	59
5.3	Braccio raddrizzante vs angolo di sbandamento . . . . .	62
7.1	Polare della velocit� relativa al Classe C . . . . .	78
7.2	Polare a TWS di 8kn, 12kn e 16kn per differenti percentuali di immersione del foil. . . . .	88
7.3	Polare della velocit� relativa al GS43 . . . . .	94
7.4	Risultati 100 piedi per andature di bolina. VPP sviluppato:curve rosse, VPP di riferimento:curve nere . . . . .	107

7.5	Risultati 100 piedi per andature portanti. VPP sviluppato:curve rosse, VPP di riferimento:curve nere . . . . .	108
8.1	Valutazioni delle funzioni nel passo temporale per metodo RK4. Figura tratta da [28]. . . . .	112
8.2	Valutazioni delle funzioni nel passo temporale per metodo RK4 adattivo. Figura tratta da [28]. . . . .	113
10.1	Dinamica per TWA finale di $45deg$ . . . . .	122
10.2	Dinamica per TWA finale di $55deg$ . . . . .	123
10.3	Dinamica per TWA finale di $65deg$ . . . . .	124
A.1	$F_x$ per HEEL= $10deg$ . . . . .	134
A.2	$F_x$ per HEEL= $17.5deg$ . . . . .	135
A.3	$M_x$ per HEEL= $10deg$ . . . . .	136
A.4	$M_x$ per HEEL= $17.5deg$ . . . . .	137



# Elenco delle tabelle

3.1	Esponenti della legge di potenza. . . . .	31
5.1	Dati forniti per Classe C . . . . .	56
5.2	Dati forniti per GS43 . . . . .	56
5.3	Dati forniti per il 100 piedi . . . . .	57
7.1	Risultati Classe C per $TWS = 6kn$ . . . . .	79
7.2	Risultati Classe C per $TWS = 8kn$ . . . . .	80
7.3	Risultati Classe C per $TWS = 10kn$ . . . . .	81
7.4	Risultati Classe C per $TWS = 12kn$ . . . . .	82
7.5	Risultati Classe C per $TWS = 14kn$ . . . . .	83
7.6	Risultati Classe C per $TWS = 16kn$ . . . . .	84
7.7	Risultati Classe C per $TWS = 18kn$ . . . . .	85
7.8	Risultati Classe C per $TWS = 8kn$ ad immersioni differenti di deriva . . . . .	89
7.9	Risultati Classe C per $TWS = 12kn$ ad immersioni differenti di deriva . . . . .	90
7.10	Risultati Classe C per $TWS = 16kn$ ad immersioni differenti di deriva . . . . .	90
7.11	Risultati VMM reattiva a Classe C per MWA di $0deg$ e $30deg$	91
7.12	Risultati VMM relativa a Classe C per MWA di $180deg$ e $150deg$	92
7.13	Risultati GS43 per $TWS = 6kn$ . . . . .	95
7.14	Risultati GS43 per $TWS = 6kn$ con spinnaker . . . . .	95
7.15	Risultati GS43 per $TWS = 8kn$ . . . . .	96
7.16	Risultati GS43 per $TWS = 8kn$ con spinnaker . . . . .	96
7.17	Risultati GS43 per $TWS = 10kn$ . . . . .	97
7.18	Risultati GS43 per $TWS = 10kn$ con spinnaker . . . . .	97
7.19	Risultati GS43 per $TWS = 12kn$ . . . . .	98
7.20	Risultati GS43 per $TWS = 12kn$ con spinnaker . . . . .	98
7.21	Risultati GS43 per $TWS = 14kn$ . . . . .	99
7.22	Risultati GS43 per $TWS = 14kn$ con spinnaker . . . . .	99
7.23	Risultati GS43 per $TWS = 16kn$ . . . . .	100

7.24	Risultati GS43 per $TWS = 16kn$ con spinnaker . . . . .	100
7.25	Risultati GS43 per $TWS = 18kn$ . . . . .	101
7.26	Risultati GS43 per $TWS = 18kn$ con spinnaker . . . . .	101
7.27	Risultati VMM relativa a GS43 per MWA di $0deg$ e $30deg$ . .	104
7.28	Risultati VMM relativa a GS43 per MWA di $180deg$ e $150deg$	105
10.1	Condizioni a regime . . . . .	120

# Sommario

Il presente elaborato si pone l'obiettivo di mostrare nel dettaglio le caratteristiche del VPP, *Velocity Prediction Program*, sviluppato, come progetto di tesi, nel linguaggio di programmazione *Python*. Il principale intento, alla base di tale lavoro, è stato ottenere un programma fruibile su differenti sistemi operativi e che potesse essere sfruttato per lo studio e l'analisi delle più varie tipologie d'imbarcazioni, dai monoscafi ai multiscafi, da barche con vele classiche a barche dotate di vela alare, da piccole derive con peso ridotto, a grandi yacht caratterizzati da decine di tonnellate di dislocamento. Il programma dunque è stato realizzato col fine di ottenere un prodotto che unificasse le principali caratteristiche ed i punti di forza dei diversi VPP che è stato possibile utilizzare durante lo sviluppo del progetto di tesi.

Con lo scopo, inoltre, di poter analizzare il comportamento delle imbarcazioni a fronte di perturbazioni della condizione d'equilibrio statico, nella quale generalmente opera un VPP, si sono sviluppati alcuni moduli finalizzati alla valutazione delle equazioni della dinamica ed alla loro integrazione temporale nella parte di programma denominata, nell'elaborato, DPP, *Dynamic Prediction Program*.

## Parole chiave

VPP, prestazioni, imbarcazioni, dinamica.



# Abstract

This paper aims to demonstrate in detail the characteristics of the VPP, *Velocity Prediction Program*, which was implemented in *Python* programming language. The main purpose of this work was to obtain a program which could be used on different operating system and that could be able to study and analyze different type of sails, for instance from monohull to multihull, from boats with standard sail plan to boats with wing sail, or from little and light sails to maxi yacht with a weight of tens of tons. So the program was realized with the purpose of obtaining a product that could unify the main characteristics and the strengths of the different VPP with which was possible to operate during the realization of the project.

With the aim also of analyzing the behavior of the sails in the case of a perturbation of the stationary sailing conditions, considered by the VPP study, some scripts were implemented in order to evaluate the dynamic equations set and to perform their time integration, in the part of the program that will be called DPP, *Dynamic Prediction Program*.

## Key words

VPP, performances, sails, dynamic.



# Capitolo 1

## Introduzione

### 1.1 Introduzione ai VPP

Il VPP, come si evince dal nome stesso, é un programma informatico che ha il principale scopo di determinare le prestazioni ottime delle imbarcazioni, in condizioni stazionarie di vento e navigazione, attraverso la variazione di specifici parametri che, se modificati, influenzano le azioni fluidodinamiche ed i momenti gravitazionali agenti sul sistema barca, fornendo la migliore condizione di navigazione possibile alla data andatura ed intensit  del vento. I pi  semplici programmi di ottimizzazione delle performance sono generalmente in grado di analizzare 2 o 3 gradi di libert  dell'imbarcazione, tipicamente la velocit  lungo l'asse longitudinale dello scafo, l'angolo di sbandamento e l'angolo di scarroccio. Questa tipologia di programmi riceve come ingressi l'intensit  del vento reale, *True Wind Speed* e la sua direzione, o angolo del vento reale, *True Wind Angle*, e restituisce la condizione ottima variando i parametri sui quali si ritiene possa agire l'equipaggio in navigazione.   possibile aumentare il livello di complessit  ed accuratezza del VPP introducendo ulteriori gradi di libert  del sistema, come ad esempio il trim, o angolo di beccheggio, e le componenti di velocit  nelle tre direzioni dello spazio. Un'ulteriore modifica rispetto ai pi  semplici programmi pu  consistere nella scelta della funzione obiettivo da ottimizzare. Scegliere la semplice velocit  dell'imbarcazione spesso non porta a risultati significativi dal punto di vista della progettazione, infatti,   preferibile massimizzare la velocit  proiettata lungo la direzione del vento reale VMG *Velocity Made Good*, o nella direzione della congiungente la barca col punto che si intende raggiungere, VMM, *Velocity Made to Mark*. Tale approccio richiede che l'angolo al vento reale divenga un parametro di ottimizzazione e consente, di conseguenza, di determinare la migliore rotta da seguire.

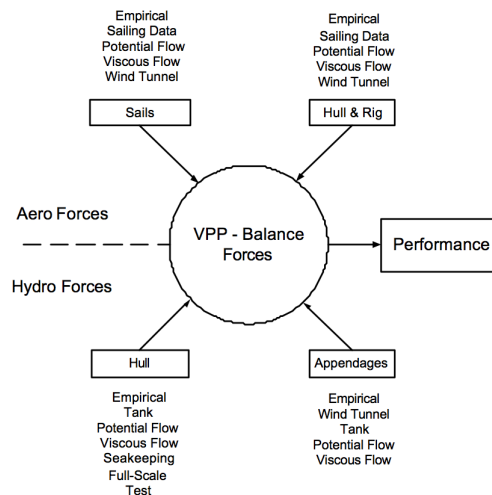
I VPP, non hanno in genere il compito di valutare al proprio interno le

azioni idrodinamiche agenti sullo scafo dell'imbarcazione, ricevendo in input le forze ed i momenti valutati a priori, in funzione dello stato del sistema, identificabile con gli angoli d'assetto e la velocità corrente, o delle variabili d'ottimizzazione sulle quali é in grado di agire il programma, per mezzo di prove sperimentali in vasca o, numericamente, attraverso programmi di fluidodinamica computazionale, .

Puó essere tuttavia richiesto al VPP, come si vedrá nel seguito della trattazione, di determinare le azioni agenti sulle appendici idrodinamiche o sulle vele, ad esempio nel caso in cui il sistema sia dotato di vela alare, attraverso routine implementate appositamente.

I programmi di predizione delle prestazioni presentano il limite di analizzare condizioni di navigazione stazionarie senza, dunque, la possibilità di considerare variazioni nel tempo dell'intensità del vento reale, della sua direzione e del moto ondoso. Nella realtà l'imbarcazione si troverá raramente a dover navigare in condizioni ideali, dell'ambiente circostante, di questo tipo. Per tale motivo i VPP non sono in grado di sostituire completamente le prove al vero svolte in acqua, con le quali tutt'ora si effettua una taratura dei risultati ottenuti dai programmi di predizione delle prestazioni come descritto in [1], ma sono ritenuti fondamentali, nella fase di sviluppo del progetto, per poter determinare le linee guida da percorrere ed analizzare gli effetti dovuti ad eventuali modifiche apportate all'imbarcazione.

Di seguito la fig.1.1 mostra in modo semplificato lo schema di funzionamento di un generico VPP:



**Figura 1.1:** Schema di funzionamento di un VPP. Figura tratta da [2]



## 1.2 Introduzione ai DPP

Considerato il principale limite dei VPP, si é voluta introdurre, all'interno del progetto sviluppato, la possibilità di simulare la dinamica dell'imbarcazione attraverso il DPP. Tale parte dell'elaborato é stata concepita con l'intento di utilizzare le forze ed i momenti fluidodinamici valutati in modo stazionario e considerati nella fase di ottimizzazione delle prestazioni. Tali azioni saranno dunque determinate trascurando gli effetti della dinamica instazionaria, come ad esempio il ciclo di isterisi del coefficiente di portanza a seguito di una condizione di stallo dinamico. Gli unici effetti che si é scelto di considerare sono le variazioni dell'angolo al vento apparente AWA, *Apparent Wind Angle*, o dell'angolo di scarroccio col quale il flusso investe le appendici idrodinamiche, dovute alle velocità angolari del sistema ritenuto rigido. Per le caratteristiche dell'approccio utilizzato, é possibile identificare l'analisi effettuata attraverso la teoria quasi stazionaria che ritiene la fluidodinamica in grado di adattarsi istantaneamente al movimento del corpo caratterizzato, nel caso in esame, dai soli moti rigidi.

Lo scopo del DPP é quello di analizzare il comportamento dinamico dell'imbarcazione in fase di progetto, ovvero studiare le fasi non stazionarie del moto che intercorrono tra due condizioni di navigazione a regime, ottimizzabili con il VPP stazionario, come possono essere ad esempio le manovre, virate e strambate, o il transitorio che porta un moderno catamarano di Coppa America alla condizione di foiling, navigazione con l'intero scafo sottovento emerso dall'acqua grazie al contributo di portanza in direzione verticale dell'appendice idrodinamica.

Tale studio della dinamica del sistema consente di osservare il comportamento dello stesso sottoposto a condizioni, statisticamente realistiche, di variazione dell'intensità del vento e delle condizioni del moto ondoso, introdotte attraverso specifiche funzioni che ne descrivono la densità di probabilità.

In questo elaborato si é scelto di non analizzare il comportamento delle imbarcazioni a fronte di variazioni, nel tempo, delle caratteristiche del vento reale e del moto ondoso. Si é preferito studiare la dinamica dei sistemi durante l'esecuzione di manovre, nello specifico poggiate, ovvero cambi di rotta con allontanamento della prua dalla direzione di provenienza del vento, imposte dall'utilizzatore. A tal fine nella fase d'integrazione delle equazioni della dinamica é possibile introdurre dei regolatori PID, *Proporzionale Integrale Derivativo*, che costituiscono, nel loro insieme, un autopilota in grado di far raggiungere e successivamente mantenere all'imbarcazione la rotta e l'angolo di sbandamento desiderati.

### 1.3 Obiettivi e caratteristiche principali del programma

Il principale obiettivo che ha guidato la realizzazione di questo programma é stato l'intento di ottenere uno strumento che fosse il piú possibile generale, ovvero non limitato a dover lavorare con solo determinati tipi di imbarcazioni e che consentisse all'utilizzatore di studiare in che modo le modifiche delle caratteristiche del sistema influenzassero le prestazioni dello stesso. Nella pratica questa richiesta si é tramutata nello sviluppo di un VPP che presentasse tre caratteristiche principali:

- possibilitá di assemblare il sistema barca, in esame, come un insieme di corpi distinti consentendo tra essi il movimento traslatorio e rotatorio dei gradi di libertá non vincolati;
- capacitá di ottimizzare le prestazioni dell'imbarcazione lavorando su tutti i possibili parametri in grado di fornire significative variazioni delle condizioni di navigazione;
- possibilitá di interfacciarsi con molteplici tipi di programmi, per il calcolo fluidodinamico CFD, o di valutare al proprio interno le azioni agenti sul sistema attraverso tecniche piú approssimative, ma in certi casi efficaci, quale ad esempio la *Teoria della Linea Portante*.

Per quanto riguarda il primo aspetto si puó parlare di una sorta di analisi multicorpo, nella quale peró, non dovendo studiare la dinamica dei vari sottocorpi, costituenti il sistema, si é omesso di introdurre le equazioni di vincolo che definiscono il moto delle parti in esame. Si lascia, semplicemente al programma, la possibilitá di variare la posizione o l'orientazione dei corpi lá dove queste caratteristiche rientrano nell'insieme dei parametri d'ottimizzazione, o controllo, sui quali é in grado di agire l'equipaggio.

Per ottenere la seconda caratteristica si é cercato di generalizzare la trattazione creando un vettore delle variabili di ottimizzazione dal quale le differenti funzioni, presenti all'interno del programma, possono trarre i parametri d'interesse al fine di valutare forze e momenti agenti sul sistema e, modificando i quali, é possibile determinare la migliore condizione di navigazione possibile, alle date caratteristiche del vento reale.

Il terzo punto, infine, consiste nel poter ricevere in input i dati fluidodinamici, forniti dagli appositi programmi, interpolarli sui parametri dai quali essi dipendono, valutarli successivamente nei valori delle variabili d'ottimizzazione correnti e ruotare le forze ed i momenti ottenuti nel sistema di riferimento nel quale si é scelto di definire l'equilibrio dell'imbarcazione. La possibilitá di

utilizzare, su appendici e vele rigide, funzioni che si basino sulla valutazione delle azioni fluidodinamiche attraverso la teoria della linea portante, conferisce al programma una minore dipendenza dai dati, a volte non disponibili in breve tempo, generati esternamente.

## 1.4 Python e la programmazione ad oggetti

Per lo sviluppo del programma si è scelto il linguaggio di programmazione, orientato agli oggetti, *Python*. La scelta è stata dettata dalla particolare semplicità e flessibilità di tale linguaggio, inoltre, rilevante è stata la possibilità di usufruire di pacchetti open source per il calcolo scientifico quali ad esempio *Scipy* e *Numpy*, o per la rappresentazione grafica, *Matplotlib*, considerati di buon livello, che fanno riferimento a [3]. La programmazione orientata agli oggetti è un paradigma di programmazione che consente di definire degli elementi, “oggetti” appunto, caratterizzati da determinati attributi, o caratteristiche, e metodi, o funzioni. Queste ultime ricevono in input tali elementi e sono in grado di modificarne le proprietà. Tali oggetti vengono istanziati all’interno delle classi, parti limitate di codice sorgente, che contengono i metodi e gli attributi. Molto utile, in tale approccio alla programmazione, risulta essere la relazione di ereditarietà che consente di definire nuove classi, “figlie”, i cui oggetti ereditano le proprietà degli oggetti appartenenti alla classe “madre”.

Nel programma sviluppato si sono sfruttate queste peculiarità per definire, con l’intento di rendere il programma più generale possibile, le seguenti classi:

- *body*, alla quale appartengono tutti i corpi costituenti l’imbarcazione, che consentirà di definire il generico oggetto con gli attributi che ne caratterizzano, ad esempio, la posizione, l’orientazione, o le forze ed i momenti su esso agenti, ed i metodi, che su tali proprietà agiscono;
- *system*, i cui oggetti identificano le molteplici imbarcazioni analizzabili, come insieme degli oggetti appartenenti alla classe precedentemente descritta, consentendo, attraverso i metodi implementati, di determinarne la matrice di rotazione, a partire dall’assetto, la posizione del centro di massa, la matrice d’inerzia, necessaria per definire le equazioni della dinamica, o le forze ed i momenti globali, come somma di quelli agenti sui singoli corpi.

## 1.5 Descrizione delle imbarcazioni

Si é voluto analizzare imbarcazioni con caratteristiche molto differenti per mostrare, attraverso i risultati ottenuti, le proprietà del programma descritte finora. In particolare, avendo a disposizione le analisi idrodinamiche ed aerodinamiche delle seguenti imbarcazioni, si é scelto di analizzare le prestazioni di un catamarano di Classe C, del Grand Soleil 43 new, che ha partecipato al campionato del mondo ORC nel giugno 2013 ad Ancona e di un Maxi Yacht di 100 piedi.

### 1.5.1 Classe C



**Figura 1.2:** Catamarano di classe C. Figura tratta da [4]

I catamarani di classe C hanno il merito di aver introdotto nel mondo velico, già dalla manifestazione del 1974, la cosiddetta vela alare, in sostituzione alle vele standard, il cui sviluppo, nel corso degli anni, ha consentito l'introduzione di tale sistema propulsivo, più efficiente delle classiche vele deformabili, nella Coppa America del 2010 sul trimarano del team statunitense

di Oracle.

Si tratta di catamarani di piccole dimensioni,  $7.62m$  di lunghezza,  $4.267m$  di larghezza e  $27.868m^2$  di superficie velica. L'unica limitazione sull'ala riguarda la dimensione della superficie, mentre non vi sono restrizioni sulla forma di essa, ovvero sulla distribuzione in altezza delle corde dei profili alari.

Realizzati in materiali compositi, principalmente carbonio e vetroresina, hanno una massa complessiva, della sola struttura, di circa  $190kg$ , mentre l'equipaggio é costituito da due persone, timoniere e prodire con peso complessivo di  $170kg$ , entrambi con possibilità di disporsi al trapezio. Da questi due valori si può facilmente intuire che la disposizione dell'equipaggio giocherà un ruolo determinante nella valutazione della condizione d'equilibrio ottima in cui si desidera che navighi il catamarano.

Questa tipologia d'imbarcazioni, come osservabile dalla fig.1.2, é caratterizzata da foils dotati di angoli di diedro, nella trattazione fissati a  $15deg$ , che consentono loro di generare una componente di forza in direzione verticale ed aiutare il sostenamento dello scafo, modificando il dislocamento complessivo e facilitando il raggiungimento della condizione planante, con rilevante diminuzione della resistenza idrodinamica.

### 1.5.2 Grand Soleil 43 new

Si tratta di una barca realizzata dal cantiere navale Del Pardo, progettata dall'architetto navale Claudio Maletto, design d'esterni realizzato da Attivo Creative Grand Soleil Design Team e design d'interni da Harry Miesbauer Yacht Design Grand Soleil Design Team.

É un monoscafo di 43 piedi di lunghezza, pari a  $13.1m$ , in produzione dal 2012, progettato per essere un'imbarcazione da diporto con fini turistici. Caratterizzato dalle scelte progettuali piú comuni sui monoscafi di questo tipo, presenta vele deformabili standard di superficie variabile da  $108m^2$  a  $207m^2$ , a seconda della configurazione scelte per le differenti andature, chiglia con bulbo zavorrato, non basculante e, di conseguenza, assenza di deriva, che generalmente viene aggiunta nel caso in cui la chiglia abbia la possibilità di essere ruotata attorno all'asse longitudinale al fine di aumentare il momento raddrizzante, ma perdendo efficacia nel generare una forza laterale che contrasti quella dovuta al piano velico.

L'analisi effettuata considera un dislocamento di  $9983kg$  dei quali  $850kg$  costituiscono il peso dell'equipaggio.

Questa imbarcazione, dunque, differisce sotto molti aspetti dal catamarano precedentemente descritto e questo richiederá opportuni accorgimenti, nello sviluppo del programma, legati principalmente al differente approccio utiliz-

zato per il calcolo di forze e momenti agenti sul piano velico, o del momento raddrizzante, che dipenderá in modo meno rilevante dal posizionamento dell'equipaggio. Inoltre, come si avrá modo di approfondire nel seguito dell'elaborato, il VPP sviluppato dovrá consentire di analizzare le imbarcazioni considerando differenti parametri per l'ottimizzazione e differenti set di equazioni di vincolo a cui quest'ultima é sottoposta.

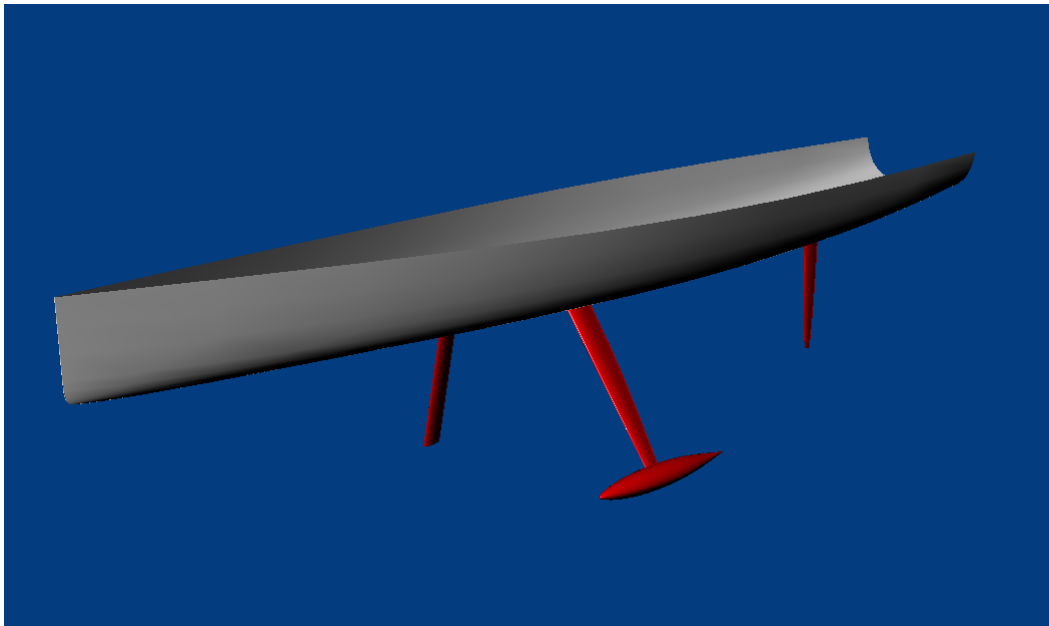


**Figura 1.3:** Grand Soleil 43 new. Figura tratta da [5]

### 1.5.3 Maxi Yacht

Monoscafo di 100 piedi, é caratterizzato, nella configurazione studiata, da un peso di  $30473kg$ , una superficie velica, per andature di bolina, di circa  $600m^2$ , alla quale si sommano i quasi  $900m^2$  di spinnaker nelle andature portanti. Dal punto di vista delle appendici idrodinamiche é dotato di una chiglia basculante, due derive, poste anteriormente alla chiglia, delle quali si estrae quella posizionata sottovento, un timone centrale, a circa  $5m$  dallo specchio di poppa, ed una pinna orizzontale retrattile, che é possibile estrarre dal lato sottovento al fine di aumentare il momento raddrizzante agente sull'imbarcazione e variare l'angolo di beccheggio del sistema per ottenere la migliore prestazione possibile.

Risulta chiaro che questo progetto richieda uno sforzo maggiore da parte del VPP sviluppato, poiché, come verrà descritto in seguito, il programma dovrà essere in grado di agire su un numero elevato di parametri di ottimizzazione e di trattare una mole di dati, provenienti dall'analisi fluidodinamica, maggiore rispetto ai casi presentati precedentemente.



**Figura 1.4:** Maxi Yacht di 100 piedi. CAD fornito dai progettisti.





# Capitolo 2

## Modello matematico del sistema

Nel presente capitolo la trattazione si concentrerà sugli aspetti legati alla definizione del sistema in esame ed alle equazioni che ne governano l'equilibrio statico, nel caso di VPP, e dinamico, nel caso di DPP.

### 2.1 Sistemi di riferimento

Al fine di descrivere un qualsiasi oggetto in moto nello spazio occorre prima definire i sistemi di riferimento considerati e le matrici di rotazione che consentono il passaggio di forze e momenti tra essi. Tutti i sistemi di riferimento che verranno descritti nel seguente paragrafo sono ortogonali e definiti da terne destrorse.

Occorre prima di tutto distinguere due principali categorie di sistemi come descritto in [6]:

- *globali*, che si riferiscono all'intera barca;
- *locali*, legati ad una parte di essa o ad un modello fisico.

Alla prima categoria appartengono i sistemi di riferimento che comunemente vengono utilizzati per la risoluzione delle equazioni della dinamica. In particolare se ne possono distinguere due tipologie:

- un sistema  $(O, X, Y, Z)$ , che chiameremo principale. Esso ha come centro un punto qualsiasi della superficie terrestre, scelto come riferimento della posizione dell'imbarcazione in esame, ed ha gli assi allineati con gli assi solidali al corpo in condizione di riposo all'istante iniziale. In particolare il piano  $X$ - $Y$  è parallelo alla superficie terrestre. Tale sistema di

riferimento rimane fisso, non seguendo il moto dell'imbarcazione, e rispetto ad esso vengono definiti posizione ed assetto della stessa durante l'integrazione temporale delle equazioni della dinamica;

- un sistema solidale con l'imbarcazione  $(G, x, y, z)$ , che chiameremo secondario, la cui origine corrisponde col centro di rotazione del corpo, tipicamente identificato col baricentro. Esso presenta asse  $x$  longitudinale diretto da poppa a prua, asse  $y$  positivo verso sinistra ed asse  $z$  diretto verso l'alto secondo la regola della mano destra. Nella fase di integrazione delle equazioni della dinamica verranno determinate la posizione e l'orientazione di tale sistema, rispetto al sistema di riferimento principale, definendo in questo modo il moto dell'imbarcazione considerata come corpo rigido.

Il sistema di riferimento principale, essendo solidale con un punto della superficie terrestre, con buona approssimazione si può considerare come *inerziale*, e per questo indicabile con la lettera  $\mathcal{I}$ . Ovvero, definite in tale sistema, le equazioni della dinamica non presentano termini relativi alle forze apparenti fornendo equazioni vettoriali, del moto traslatorio e del moto rotatorio, completamente disaccoppiate.

Nonostante tale apparente semplificazione delle equazioni, non è opportuno scegliere questo sistema di riferimento per la definizione della dinamica, poiché risulterebbe una matrice d'inerzia variabile nei differenti istanti d'integrazione, e ciò porterebbe a notevoli aumenti del costo computazionale, prevalentemente legato all'inversione di tale matrice. Si ricorda infatti che l'inversione di una matrice di ordine  $n$  richiede un numero di operazioni pari a  $n^3$ .

A differenza del sistema principale, quello identificato come secondario, o con la lettera  $\mathcal{B}$ , "body", è da ritenersi *non inerziale*. In tale sistema di riferimento le equazioni della dinamica presenteranno dei termini non lineari dovuti alle forze apparenti. La matrice d'inerzia, in esso descritta, risulta essere costante e dunque invertibile una sola volta, a meno di modifiche dovute allo spostamento delle masse sull'imbarcazione, finalizzate al raggiungimento dell'equilibrio di quest'ultima.

La categoria dei sistemi di riferimento *locali* è anch'essa suddivisibile in altre due sottocategorie:

- *sistemi propri dei corpi*, ovvero quei sistemi di riferimento solidali alle singole parti costituenti l'imbarcazione;
- *sistemi fluidodinamici*, nei quali vengono definite le forze ed i momenti idrodinamici ed aerodinamici.

## Sistemi di riferimento dei corpi

Nel seguente paragrafo verranno brevemente descritti i sistemi solidali ai corpi, nei quali vengono definite le principali caratteristiche di quest'ultimi. Assemblando, in fase di definizione della geometria, tali sottosistemi, risulta possibile modellare qualsiasi tipo d'imbarcazione.

**Scafo.** Ha origine posizionata all'intersezione tra lo specchio di poppa e la *Design Water Line*, DWL. Esso é caratterizzato da un asse  $X$  diretto come l'asse longitudinale della barca da poppa verso prua, asse  $Y$  diretto verso sinistra ed asse  $Z$  verso l'alto. Questo sistema di riferimento riveste un ruolo fondamentale, poiché rispetto ad esso vengono definite posizione ed orientazione dei sistemi legati agli altri corpi. In tale sistema verrà dunque fornita la descrizione geometrica dell'imbarcazione assemblata, e ciò consentirà di valutare la posizione del baricentro globale. Si possono distinguere i casi di barca monoscafo, nei quali l'origine é posizionata nel piano  $X-Z$  di simmetria, dai casi di multiscafo, dove invece l'asse  $X$  coincide con l'asse longitudinale dello scafo posizionato sottovento, e quindi con l'asse attorno al quale ruota in rollio l'imbarcazione.

**Appendici idrodinamiche.** É il sistema di riferimento utilizzato per i foils, per i timoni o per le derive. Posizionato, per rotazione nulla, alla radice del bordo d'attacco del corpo, presenta asse  $X$  diretto verso prua, asse  $Y$  verso sinistra ed asse  $Z$  verso l'alto, secondo la convenzione adottata nella trattazione.

**Piano velico.** Ha origine nella parte anteriore del piede dell'albero e presenta anch'esso asse  $X$  parallelo all'asse longitudinale dell'imbarcazione diretto verso prua, asse  $Y$  diretto a sinistra ed asse  $Z$  verso l'alto. É il sistema di riferimento nel quale verranno inizialmente ricondotte la forze ed i momenti aerodinamici, agenti sul piano velico, prima di essere definiti in quello nel quale si valutano le equazioni di equilibrio.

**Chiglia.** É fissato al bordo d'attacco che si trova alla radice della chiglia. Caratterizzato, secondo la convenzione adottata, da asse  $X$  diretto verso prua, asse  $Y$  verso sinistra ed asse  $Z$  verso l'alto. Ha un'orientazione rispetto al sistema scafo che descrive l'assetto della chiglia ed in particolare é in grado di seguire la rotazione attorno all'asse  $X$  di quest'ultima, importante nel caso di chiglie basculanti, ora maggiormente diffuse sui monoscafi ad alte prestazioni.

**Equipaggio.** Non é caratterizzato da una rotazione propria, risulterà sempre allineato al sistema scafo, poiché si considera l'equipaggio della barca come

un punto materiale dotato di massa, ed é dunque necessario solo definirne la posizione dell'origine, che varierá dipendentemente alla ricerca di equilibrio dell'imbarcazione.

**Riferimento del VPP.** Identifica il riferimento nel quale vengono definite le equazioni di equilibrio statico dell'imbarcazione, utilizzate, dal VPP appunto, per determinare la condizione ottima vincolata di navigazione. Nel programma sviluppato é possibile scegliere il punto, espresso in coordinate del riferimento scafo, nel quale porre l'origine di tale sistema, rispetto al quale dunque determinare i momenti globali agenti sull'imbarcazione. In generale si é deciso di fissarlo nel punto rispetto al quale vengono valutati i momenti idrodinamici forniti dai programmi di CFD utilizzati. Questo sistema di riferimento é caratterizzato dall'avere il piano  $X$ - $Y$  parallelo al pelo libero ed asse  $Z$  rivolto verso l'alto, nello specifico l'asse  $X$  sará diretto da poppa a prua e l'asse  $Y$  ottenibile con la convenzione delle terne destrorse. Risulterà dunque ruotato, rispetto al sistema inerziale, attorno all'asse  $Z$  di un angolo pari all'angolo di imbardata.

In ciascuno dei sistemi di riferimento descritti vengono definiti tutti gli attributi che caratterizzano i corpi considerati, la posizione del centro di massa, del punto di applicazione delle forze ed il polo rispetto al quale sono definiti i momenti. Tutte queste proprietá sono riconducibili al sistema di riferimento assi barca attraverso opportune rotazioni, legate agli angoli d'assetto dei corpi, che verranno definite nel seguito della trattazione.

### Sistemi di riferimento fluidodinamici

Nello studio di un'imbarcazione si devono definire le forze ed i momenti aerodinamici ed idrodinamici che si generano a causa del moto all'interno dei due fluidi. La definizione dei sistemi di riferimento nei quali sono espresse tali forze e momenti richiede una particolare attenzione. Di seguito vengono illustrati i sistemi associati a questi modelli fisici.

**Sistema idrodinamico.** Identifica gli assi nei quali vengono definite le forze idrodinamiche agenti sul corpo. Presenta piano  $X$ - $Y$  parallelo al pelo libero ed asse  $Z$  positivo verso l'alto. L'asse  $X$  é diretto come la velocità relativa del flusso d'acqua che investe lo scafo e le appendici. É importante notare che il passaggio da tale sistema di riferimento al sistema del VPP puó avvenire mediante una semplice rotazione planare attorno all'asse  $Z$ , legata all'angolo di leeway, o scarroccio, dell'imbarcazione. Nel caso di calcolo delle forze e dei momenti idrodinamici attraverso il programma di fluidodinamica

computazionale REVA ©, descritto nel paragrafo 3.3.1, dal quale vengono tratti i valori utilizzati nel corso dell'elaborato, le azioni dovute al flusso che investe lo scafo e le appendici sono espresse rispetto ad un sistema di riferimento centrato a prua dell'imbarcazione all'intersezione con la DWL.

**Sistema vento reale.** Anch'esso caratterizzato da un piano  $X$ - $Y$  parallelo al pelo libero, ha asse  $X$  diretto come il vettore del vento reale. Risulta dunque essere ruotato rispetto al sistema inerziale attorno all'asse  $Z$  di un angolo che definisce la direzione di provenienza del vento.

**Sistema vento apparente.** Per quanto riguarda la definizione di tale sistema di riferimento occorre prima valutare la velocità dell'imbarcazione. Eseguendo una semplice somma vettoriale tra tale vettore e quello del vento reale, come verrà mostrato in seguito, si ottiene il cosiddetto vento apparente, differente in modulo e direzione rispetto a quello in input, che rappresenterà il campo vettoriale effettivamente visto dalla parte di imbarcazione emersa. Le considerazioni fatte per il caso di vento reale valgono anche per il sistema legato al vento apparente.

Occorre precisare che, per la valutazione degli angoli di incidenza dei flussi fluidodinamici che investono le appendici ed al piano velico, i vettori del vento apparente e del flusso idrodinamico, generati dal moto dell'imbarcazione, sono stati ruotati nei sistemi di riferimento locali legati ai corpi in esame. Tramite questa operazione si è giunti a poter valutare gli effettivi angoli d'incidenza tramite la formula:

$$AoA = atan\left(\frac{v}{u}\right) \quad (2.1)$$

dove  $v$  ed  $u$  rappresentano rispettivamente la componente lungo gli assi  $Y$  ed  $X$  delle velocità dei flussi incidenti nei sistemi di riferimento dei corpi. In particolare lo scarroccio identifica l'angolo d'incidenza idrodinamica dell'intera barca, valutato con l'eq. (2.1), considerando le componenti  $u$  e  $v$  della velocità espresse nel sistema di riferimento del VPP.

### 2.1.1 Rotazioni

Ora che sono stati presentati i sistemi di riferimento adottati nel corso della trattazione, occorre definire le matrici di rotazione che consentono di muoversi dall'uno all'altro.

Nel seguente paragrafo si farà riferimento alla tipologia di rotazione più generica, ovvero quella in tre dimensioni che definisce ad esempio il passaggio

dei vettori dal sistema di riferimento inerziale a quello non inerziale, solidale con la barca, o che consente di definire gli attributi dei singoli corpi nel sistema dello scafo. Le altre rotazioni, presenti nel programma, sono facilmente definibili con le basi di seguito fornite.

### Rotazioni piane

Nello spazio tridimensionale si possono definire tre rotazioni piane, pari al numero dei gradi di libertà rotazionali.

Rotazione attorno all'asse  $X$  di un angolo  $\alpha$ .

$$\mathbf{R}_x = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) \\ 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) \end{bmatrix} \quad (2.2)$$

Rotazione attorno all'asse  $Y$  di un angolo  $\beta$ .

$$\mathbf{R}_y = \begin{bmatrix} \cos(\beta) & 0 & \sin(\beta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\beta) & 0 & \cos(\beta) \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

Rotazione attorno all'asse  $Z$  di un angolo  $\gamma$ .

$$\mathbf{R}_z = \begin{bmatrix} \cos(\gamma) & -\sin(\gamma) & 0 \\ \sin(\gamma) & \cos(\gamma) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

### Rotazioni tridimensionali

Nel programma implementato si è scelto di definire le rotazioni in tre dimensioni tramite la sequenza  $321$  degli angoli di Eulero. Il seguente vettore identifica tale terna di angoli:

$$\mathbf{e} = \begin{pmatrix} \phi \\ \theta \\ \psi \end{pmatrix} \quad (2.5)$$

In tale convenzione si effettuano in successione:

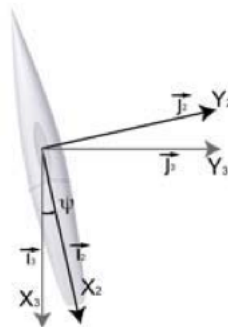
- una rotazione bidimensionale di un angolo  $\psi$ ,  $\mathbf{e}(3)$ , attorno all'asse  $Z_0$  del sistema di partenza
- seguita da una rotazione di un angolo  $\theta$ ,  $\mathbf{e}(2)$ , attorno all'asse  $Y_1$  del nuovo sistema di riferimento
- infine una rotazione di un angolo  $\phi$ ,  $\mathbf{e}(1)$ , attorno all'asse  $X_2$  del secondo sistema di riferimento intermedio ottenuto.

La matrice che identifica la generica rotazione in tre dimensioni si ottiene attraverso i prodotti matriciali che seguono:

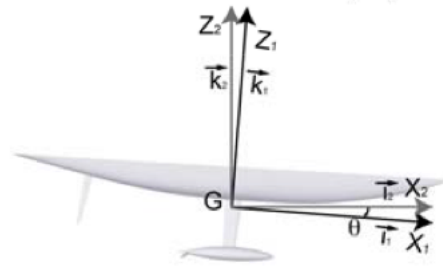
$$\begin{aligned} \mathbf{R}_{I \rightarrow B} &= \mathbf{R}_z(\psi) \mathbf{R}_y(\theta) \mathbf{R}_x(\phi) = \\ &= \begin{bmatrix} \cos(\psi) & -\sin(\psi) & 0 \\ \sin(\psi) & \cos(\psi) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & 0 & \sin(\theta) \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin(\theta) & 0 & \cos(\theta) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi) & \cos(\phi) \end{bmatrix} = \\ &= \begin{bmatrix} c(\psi)c(\theta) & c(\psi)s(\theta)s(\phi) - s(\psi)c(\phi) & c(\psi)s(\theta)c(\phi) + s(\psi)s(\phi) \\ s(\psi)c(\theta) & s(\psi)s(\theta)s(\phi) + c(\psi)c(\phi) & s(\psi)s(\theta)c(\phi) - c(\psi)s(\phi) \\ -s(\theta) & c(\theta)s(\phi) & c(\theta)c(\phi) \end{bmatrix} \quad (2.6) \end{aligned}$$

dove con  $c()$  e  $s()$  si sono indicate rispettivamente le funzioni trigonometriche  $\cos()$  e  $\sin()$ .

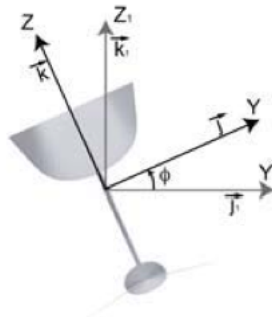
Nelle immagini riportate si mostrano le rotazioni descritte al fine di renderne piú chiara la comprensione.



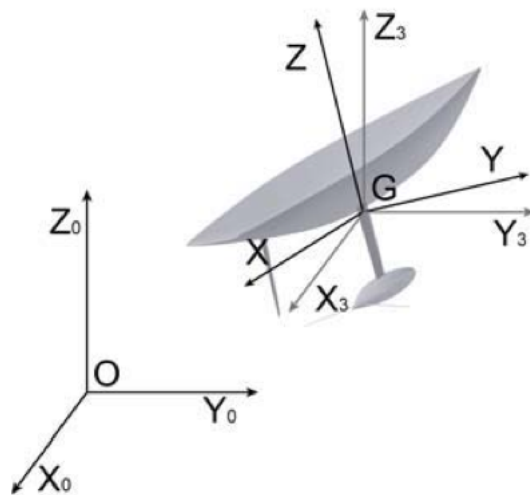
**Figura 2.1:** Rotazione attorno all'asse Z. Figura tratta da [7]



**Figura 2.2:** Rotazione attorno all'asse Y. Figura tratta da [7]



**Figura 2.3:** Rotazione attorno all'asse X. Figura tratta da [7]



**Figura 2.4:** Rotazione 3D rispetto al sistema inerziale. Figura tratta da [7]



### 2.1.2 Valutazione dell'assetto

Dalla matrice di rotazione tridimensionale determinata é possibile risalire agli angoli che descrivono l'assetto dell'imbarcazione rispetto al sistema di riferimento inerziale.

*Angolo di elevazione* compreso tra l'asse  $x$  del sistema secondario ed il piano  $X-Y$  del sistema principale:

$$\theta = -asin(R(3, 1)) \quad (2.7)$$

*Angolo d'inclinazione laterale* compreso tra l'asse  $y$  del sistema non inerziale ed il piano  $X-Y$  del sistema inerziale:

$$\Phi = asin(R(3, 2)) \quad (2.8)$$

ovvero

$$\sin(\Phi) = \cos(\theta)\sin(\phi) \quad (2.9)$$

## 2.2 Equazioni di equilibrio statico

Come descritto nel capitolo introduttivo, nel VPP si esegue un'ottimizzazione, della funzione obiettivo scelta, variando opportuni parametri e vincolando il sistema ad essere in una condizione in equilibrio statico. Tale condizione é descritta da un bilancio nullo di forze e momenti agenti sull'imbarcazione.

$$\mathbf{F}_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \mathbf{F}_i = 0 \quad (2.10)$$

$$\mathbf{M}_{\text{tot}} = \sum_{i=1}^n \mathbf{M}_i = 0 \quad (2.11)$$

Dove  $n$  indica il numero di corpi che compongono il sistema.

Come indicato dalle eq.(2.10) e (2.11), le forze ed i momenti globali sono ottenibili come somma di quelli agenti sui singoli corpi. Il sistema di riferimento utilizzato per definire tali equazioni é quello del VPP, collocato in un punto, dell'imbarcazione in esame, che, come già descritto, coincide col punto

rispetto al quale vengono valutati i momenti fluidodinamici dai programmi di CFD. Occorre dunque ruotare le azioni, che non sono già espresse in tale sistema, a partire da quelli dei corpi a cui si riferiscono, premoltiplicandole per le matrici di rotazione opportune. Inoltre si devono trasportare i momenti nell'origine considerata attraverso l'equazione:

$$\mathbf{M}_{new} = \mathbf{M}_{old} + \mathbf{F} \times (\mathbf{x}_{new} - \mathbf{x}_{old}) \quad (2.12)$$

## 2.3 Equazioni di equilibrio dinamico

Gli equilibri statici di forze e momenti, utilizzati nel VPP, vengono sostituiti dalle equazioni di equilibrio dinamico nel caso di studio del moto dell'imbarcazione svolto dal DPP. L'imbarcazione analizzata viene trattata come corpo rigido la cui dinamica é descritta dalle equazioni di variazione della quantità di moto  $\mathbf{Q}$ :

$$\frac{d\mathbf{Q}}{dt} = \mathbf{F}_{tot} \quad (2.13)$$

e della variazione del momento angolare  $\mathbf{\Gamma}$ :

$$\frac{d\mathbf{\Gamma}}{dt} = \mathbf{M}_{tot} \quad (2.14)$$

L'eq. (2.13) valutata nel baricentro, espressa nel sistema di riferimento inerziale, assume la forma:

$$m\ddot{\mathbf{X}}_G = \mathbf{F}_{tot} \quad (2.15)$$

dove  $\ddot{\mathbf{X}}_G$  indica l'accelerazione lineare del baricentro del sistema espressa in assi inerziali ed  $m$  la massa dell'imbarcazione.

Piú complicata risulta essere l'eq.(2.14) che presenta al suo interno la matrice di rotazione tridimensionale di passaggio dal sistema di riferimento principale a quello secondario,  $\mathbf{T} = \mathbf{R}_{I \rightarrow B}$ . Per una trattazione piú dettagliata dei passaggi che conducono all'equazione che segue si rimanda a [8].

L'equazione assume dunque la forma:

$$\mathbf{TI}_G\mathbf{T}^{-1}\dot{\mathbf{\Omega}} + \mathbf{\Omega} \times \mathbf{TI}_G\mathbf{T}^{-1}\mathbf{\Omega} = \mathbf{M}_{Gtot} \quad (2.16)$$

con  $\mathbf{\Omega}$  la velocità angolare espressa nel sistema di riferimento inerziale, e  $\mathbf{I}_G$  la matrice dei momenti d'inerzia del sistema valutati rispetto al sistema di riferimento secondario, solidale con lo scafo e centrato nel baricentro.

$$\mathbf{I}_G = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

La matrice di rotazione, descritta precedentemente, varierá ad ogni passo d'integrazione temporale con la modifica d'assetto del sistema. Questo varierá la matrice delle inerzie rotazionali  $\mathbf{TI}_G\mathbf{T}^{-1}$ , e richiederá dunque di valutare l'inversione di tale prodotto matriciale un numero elevato di volte, aumentando sensibilmente il costo computazionale del processo integrativo.

La valutazione delle forze globali,  $\mathbf{F}_{tot}$ , e dei momenti attorno al baricentro,  $\mathbf{M}_{Gtot}$ , é effettuata nel sistema di riferimento primario. Nel programma implementato si sfruttano le stesse funzioni, per la determinazione di forze e momenti, utilizzate nel caso del VPP statico. Occorre dunque premoltiplicarli per la matrice che descrive il passaggio dal sistema di riferimento delle equazioni di equilibrio statico ad  $\mathcal{I}$  e trasportare i momenti nel baricentro secondo l'eq.(2.12).

Di seguito verrà mostrata la procedura per la determinazione delle equazione della dinamica espresse nel sistema di riferimento non inerziale  $\mathcal{B}$ .

La velocità di un generico punto Q dell'imbarcazione é definita dall'espressione:

$$\mathbf{v}_Q = \mathbf{v}_G + \omega \times \mathbf{r}_{GQ} \quad (2.18)$$

essendo G il baricentro del sistema,  $\omega$  la velocità angolare di  $\mathcal{B}$  rispetto ad  $\mathcal{I}$  ed  $\mathbf{r}_{GQ}$  il vettore che collega i punti indicati a pedice, costante nel caso di corpo rigido. Eseguendo la derivazione temporale nel sistema di riferimento non inerziale é possibile dimostrare che si ottiene l'accelerazione:

$$\mathbf{a}_Q = \frac{d\mathbf{v}_G}{dt} + \omega \times (\mathbf{v}_G - \mathbf{r}_{GQ} \times \omega) - \mathbf{r}_{GQ} \times \frac{d\omega}{dt} \quad (2.19)$$

Integrando ora tale equazione puntuale su tutta l'imbarcazione, ritenendo le velocità e le loro derivate temporali costanti sul corpo, ed indicando, come già visto, con  $m$  e  $\mathbf{I}_G$ , rispettivamente la massa ed i momenti d'inerzia del sistema, si ottengono le sei equazioni cardinali che governano il moto rototraslatorio del corpo nello spazio, espresse nel sistema di riferimento solidale ad esso.

Assumendo come variabili del sistema di equazioni il vettore delle velocità  $\mathbf{w}$ , espresse in  $\mathcal{B}$ :

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} \mathbf{v}_G \\ \omega \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} u \\ v \\ w \\ p \\ q \\ r \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

si giunge ad avere sei equazioni differenziali del prim'ordine con incognite la velocità lineare ed angolare del sistema ritenuto corpo rigido.

$$\begin{cases} m\dot{\mathbf{v}}_G + \omega \times m\mathbf{v}_G = \mathbf{F}_{tot} \\ \mathbf{I}_G\dot{\omega} + \omega \times \mathbf{I}_G\omega = \mathbf{M}_{Gtot} \end{cases} \quad (2.21)$$

Si osservi che le eq.(2.21) sono accoppiate in modo unidirezionale, da quelle relative al moto rotatorio a quelle che descrivono il moto traslatorio, poiché si sono assunti i momenti statici dell'imbarcazione nulli, avendo considerato il sistema di riferimento non inerziale,  $\mathcal{B}$ , baricentrico. Le forze ed i momenti totali, dopo essere stati ruotati in un sistema allineato con  $\mathcal{I}$  e centrato nell'origine del sistema di riferimento del VPP, sono stati ulteriormente ruotati, attraverso la matrice  $\mathbf{R}_{I \rightarrow B}^T$ , che consente di definirli nel sistema di riferimento secondario a partire da quello principale. Inoltre, attraverso l'eq.(2.12), i momenti sono stati trasportati nel centro di massa nel quale ha origine il sistema non inerziale. È importante notare che il tensore dei momenti d'inerzia, così come è espressa nelle equazioni appena determinate, risulta essere costante nel tempo, consentendo di poter valutare un'unica inversione matriciale, come già descritto. Per quest'ultimo motivo, nel programma implementato, si è scelto di considerare le equazioni di equilibrio dinamico espresse in questo modo.

### 2.3.1 Equazioni cinematiche

Considerando come incognite il vettore delle velocità si è scelto di trasformare un sistema di equazioni differenziali, inizialmente del second'ordine, in uno del prim'ordine richiedendo, di fatto, di raddoppiare il numero delle incognite e quindi delle equazioni. Infatti, ai fini della completa definizione dello stato di un corpo in moto nello spazio, occorre valutarne anche la posizione e l'assetto. In particolare la posizione sarà descritta dal vettore,  $\mathbf{X}_G$ , espresso nel sistema di riferimento inerziale, la cui variazione nel tempo fornirà la traiettoria seguita dal corpo, mentre l'assetto verrà indicato dalla terna di angoli d'Eulero scelta.

Le derivate prime temporali che, se integrate, descrivono la posizione del corpo espressa in  $\mathcal{I}$ , si ottengono ruotando, con la matrice di rotazione  $\mathbf{R}_{I \rightarrow B}$ , il vettore delle velocità lineari  $\mathbf{v}_G$ , descritte nel sistema di riferimento secondario.

$$\dot{\mathbf{X}}_G = \mathbf{R}_{I \rightarrow B} \mathbf{v}_G \quad (2.22)$$

La definizione delle equazioni d'assetto richiede che si presti attenzione agli assi rispetto ai quali vengono definite le rotazioni del sistema. L'intento dell'integrazione è di ottenere gli angoli di Eulero, utilizzati nella sequenza 321 precedentemente descritta. In  $\omega$ ,  $p$  indica la velocità angolare attorno all'asse  $x$ ,  $q$  attorno all'asse  $y$  ed  $r$  attorno a  $z$ , del sistema di riferimento non inerziale.

Si dovrà dunque premoltiplicare il vettore  $\omega$  per la matrice  $\mathbf{S}_{321}$  che lo trasforma nel vettore indicante le velocità angolari relative agli angoli di Eulero:

$$\dot{\mathbf{e}} = \begin{pmatrix} \dot{\phi} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} \quad (2.23)$$

L'equazione risulta essere:

$$\dot{\mathbf{e}} = \mathbf{S}_{321}\omega \quad (2.24)$$

con

$$\mathbf{S}_{321} = \begin{bmatrix} 1 & \sin(\phi)\tan(\theta) & \cos(\phi)\tan(\theta) \\ 0 & \cos(\phi) & -\sin(\phi) \\ 0 & \sin(\phi)/\cos(\theta) & \cos(\phi)/\cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Di seguito é riportato il sistema completo delle 12 equazioni scalari della dinamica a cui si giunge seguendo il procedimento descritto.

$$\begin{cases} m\dot{\mathbf{v}}_G + \omega \times m\mathbf{v}_G = \mathbf{F}_{tot} \\ \mathbf{I}_G\dot{\omega} + \omega \times \mathbf{I}_G\omega = \mathbf{M}_{Gtot} \\ \dot{\mathbf{X}}_G = \mathbf{R}_{I \rightarrow B}\mathbf{v}_G \\ \dot{\mathbf{e}} = \mathbf{S}_{321}\omega \end{cases} \quad (2.26)$$

### 2.3.2 Masse aggiunte

Nel caso di moto instazionario di un corpo immerso in un fluido, si devono considerare effetti aggiuntivi nella valutazione delle azioni fluidodinamiche, agenti sul corpo stesso, rispetto al semplice caso stazionario. Tali effetti sono rappresentabili dalle cosiddette *masse aggiunte*,  $m_a$ , ovvero da termini inerziali, quindi legati all'instazionarietà del moto, che compaiono nelle equazioni della dinamica a causa dell'accelerazione che il corpo imprime sul fluido circostante. La massa globale del sistema strutturale,  $m$ , viene quindi maggiorata da un termine supplementare e risulta pari a:

$$m_{tot} = m + m_a \quad (2.27)$$

Il moto del sistema, all'interno del programma sviluppato, viene descritto dalle 6 equazioni precedentemente presentate, dunque le masse aggiunte saranno definite da una matrice dei coefficienti delle masse aggiunte  $\mathbf{A}$ , di dimensioni  $6 \times 6$ , che andrà a sommarsi alle inerzie strutturali identificando nuove condizioni di equilibrio dinamico del sistema. In ambito della progettazione navale, tale matrice, relativa a barche simmetriche rispetto al piano verticale  $x-z$ , presenta la struttura a scacchiera sottoriportata:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} A_{11} & 0 & A_{13} & 0 & A_{15} & 0 \\ 0 & A_{22} & 0 & A_{24} & 0 & A_{26} \\ A_{31} & 0 & A_{33} & 0 & A_{35} & 0 \\ 0 & A_{42} & 0 & A_{44} & 0 & A_{46} \\ A_{51} & 0 & A_{53} & 0 & A_{55} & 0 \\ 0 & A_{62} & 0 & A_{64} & 0 & A_{66} \end{bmatrix} \quad (2.28)$$

Una trattazione esaustiva di tale argomento é reperibile in [9].

Il programma realizzato consente la definizione di tale matrice come input della funzione che valuta le equazioni della dinamica.

# Capitolo 3

## Modello matematico per il calcolo fluidodinamico

Nel seguente capitolo verranno presentati i programmi di calcolo fluidodinamico utilizzati per determinare le forze ed i momenti agenti sull'imbarcazione, sulla base dei quali il VPP ed il DPP eseguiranno l'ottimizzazione dei parametri di navigazione, nel primo caso, e l'analisi della dinamica del sistema, nel secondo. Occorre precisare che il VPP sviluppato si limita a ricevere in input, e ad elaborare con opportune interpolazioni e trasformazioni nei differenti sistemi di riferimento, i dati generati dai programmi di seguito descritti.

### 3.1 Modello del vento

Prima di tutto occorre descrivere come si é modellato il vento che investe l'imbarcazione e grazie al quale quest'ultima é in moto.

#### 3.1.1 Vento reale

Nella definizione di un flusso che lambisce un corpo solido, sulla superficie del quale sono imposte le condizioni al contorno di non penetrabilitá, ovvero di componente della velocitá normale alla parete nulla:

$$\mathbf{u} \cdot \hat{n} = 0 \quad (3.1)$$

e non slittamento, che annulla invece la componente tangenziale:

$$\mathbf{u} \cdot \hat{t} = 0 \quad (3.2)$$

con  $\hat{n}$  e  $\hat{t}$  rispettivamente il versore normale ed il versore tangenziale alla parete, si definisce strato limite quella regione del campo di moto del fluido

caratterizzato da vorticità non nulla

$$\nabla \times \mathbf{u} \neq 0 \quad (3.3)$$

In tale regione la velocità varia dal valore nullo, a contatto col corpo, fino al valore asintotico  $\mathbf{U}_{\text{inf}}$ . Occorre dunque definire delle funzioni, della quota dalla superficie, che descrivano il profilo medio di velocità, indicante la componente tangenziale al piano,  $U(z)$ , alle quali si sommeranno gli effetti delle fluttuazioni legate alla turbolenza.

$$\mathbf{u}(x, y, z, t) = \begin{pmatrix} U(z, t) + u(x, y, z, t) \\ v(x, y, z, t) \\ w(x, y, z, t) \end{pmatrix} \quad (3.4)$$

Se si considera dunque la terra come un corpo lambito dai venti atmosferici é possibile definire la regione adiacente la superficie terrestre come lo strato limite atmosferico, ABL, nel quale valgono tutte le considerazioni fatte precedentemente, e si deve definire una funzione che descriva l'andamento del profilo medio del vento con la quota. Le scelte possibili per tale funzione sono generalmente due:

- *profilo logaritmico*
- *legge di potenza*

Nella trattazione seguente si é scelto di adottare il secondo tipo di descrizione, con scelta opportuna dei parametri legati alla natura della superficie terrestre sopra la quale viene valutata. Infatti tali leggi devono essere opportunamente tarate per descrivere lo strato limite in maniera, quanto piú possibile, accurata. Quanto si estenderá in quota e quanto saranno intense le fluttuazioni turbolente al suo interno, dipenderá dalla tipologia di terreno. Nei centri urbani giungerá fino a quote di circa  $600m$  con alta rilevanza delle fluttuazioni, a causa della presenza di edifici che costituiscono una rilevante rugosità superficiale, mentre sull'acqua risulterà piú omogeneo e meno esteso, presentando comunque una certa differenza tra le zone costiere ed il mare aperto. Di seguito viene riportata la tabella che indica gli esponenti della legge di potenza da adottare coi relativi tipi di terreno:



Terreno	$\alpha$
Mare aperto	0.10-0.15
Aperta campagna	0.14-0.17
Zone suburbane	0.24-0.28
Cittá	0.33-0.40

**Tabella 3.1:** Esponenti della legge di potenza.

Le imbarcazioni, nel loro moto, sono completamente immerse in tale regione ed é necessario dunque definire il profilo del vento reale che le investe come segue:

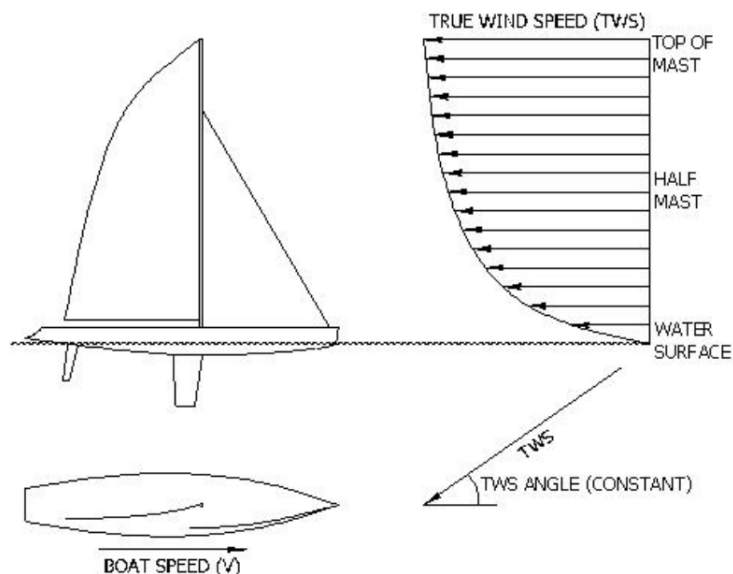
$$TWS(Z) = TWS_{ref} \left( \frac{Z}{Z_{ref}} \right)^\alpha \quad (3.5)$$

avendo scelto la quota  $Z_{ref}$ , costante, pari a  $10m$  e l'esponente  $\alpha$ , secondo la tabella sopra riportata, di 0.11. Ciò che sarà consentito variare al fine di definire un nuovo campo di vento é l'intensitá,  $TWS_{ref}$ , alla quota di riferimento, e la quota,  $Z$ , alla quale se ne vuole valutare il modulo. Per definire completamente il campo del vento reale, occorre ora impostarne la direzione di provenienza. Per fare ciò l'utilizzatore potrà fornire al programma l'angolo del vento reale costante con la quota, TWA, del quale il vettore é ruotato, attorno all'asse  $z$ , rispetto al sistema di riferimento inerziale come rappresentato in fig.3.1.

In alcune analisi della dinamica dell'imbarcazione, non trattate nell'elaborato, é possibile che si voglia determinare il comportamento del sistema all'interno di un campo di vento variabile nel tempo, secondo, ad esempio, alle condizioni meteorologiche tipiche del campo di regata scelto. A tal fine, generalmente, si determina la funzione densitá di probabilitá dell'intensitá del vento effettuando un'analisi statistica dei dati rilevati con anemometri posizionati nell'area d'interesse.

### 3.1.2 Vento apparente

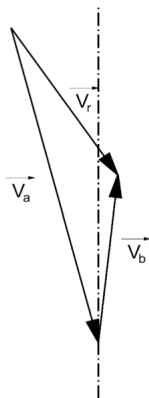
Qualsiasi corpo che si muova all'interno di un fluido in quiete, vede, nel sistema di riferimento solidale col corpo stesso, il fluido in moto con una velocitá relativa uguale, in modulo, ed opposta, in direzione, alla propria. Avendo precedentemente definito il campo del vento reale, é facilmente intuibile che esso si comporrá con la velocitá relativa dell'aria, dovuta al moto dell'imbarcazione, a generare il vento apparente effettivamente visto dalle parti emerse del sistema. Il modulo del nuovo vettore é detto AWS, *Apparent Wind Speed*,



**Figura 3.1:** Intensità e direzione del vettore vento reale. Figura tratta da [10]

mentre l'angolo compreso tra esso e l'asse  $x$  dell'imbarcazione, è l'AWA, *Apparent Wind Angle*, valutato attraverso l'eq.(2.1).

Di seguito è rappresentata la somma vettoriale che conduce alla definizione del vento apparente.



**Figura 3.2:** Vettore del vento apparente  $\vec{V}_a$ . Figura tratta da [10]

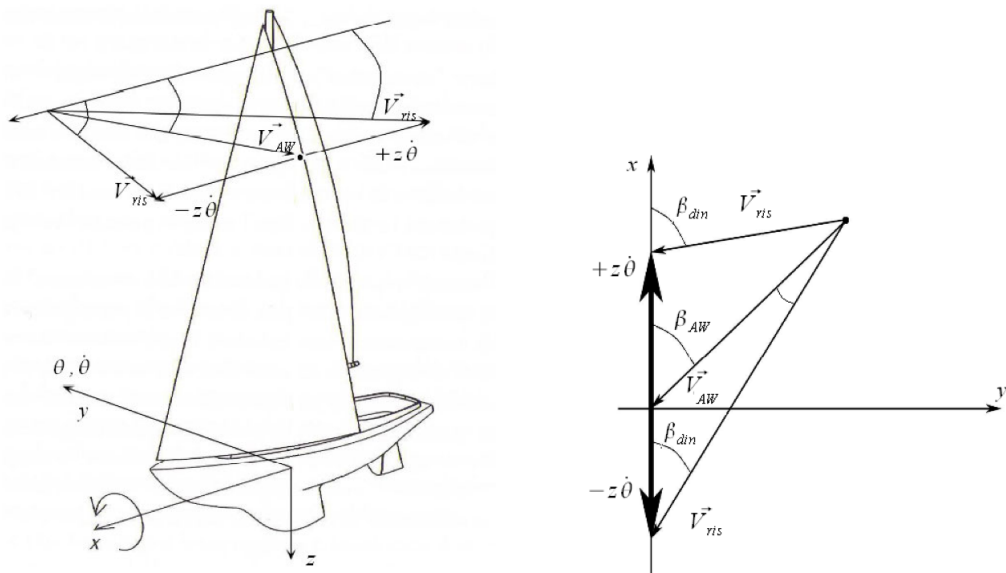
Si noti che il vettore del vento reale, precedentemente descritto, varia in modulo in funzione della quota dal livello del mare e questo produrrà, nella composizione con la velocità dell'imbarcazione, un vettore del vento apparente con direzione, e dunque AWA, variabile lungo l'altezza dell'albero. Questo

determinerá un certo svergolamento della randa, piú o meno accentuato, finalizzato ad assecondare tale variazione del flusso incidente ed evitare che il profilo alare stalli.

### 3.1.3 Teoria quasi stazionaria

Nel caso di analisi dinamica si é adottata la teoria quasi stazionaria che ritiene la fluidodinamica in grado di adattarsi istantaneamente ai movimenti del corpo, che nel caso in esame é ritenuto rigido. Tale teoria prevede l'utilizzo di forze e momenti valutati appunto in modo stazionario, forniti per il calcolo effettuato nel VPP statico, anche nel caso di analisi della dinamica. Secondo questo approccio si é scelto di determinare l'angolo al vento apparente, o l'angolo di scarroccio, considerando il contributo, alla variazione di essi, delle velocità angolari legate al moto rotatorio del sistema ritenuto rigido. Occorre dunque definire una funzione che tenga conto di tali aspetti e fornendo, come input, il punto dell'imbarcazione nel quale si vuole valutare l'angolo in esame, ne determini la velocità secondo l'eq.(2.18).

Di seguito l'immagine riportata mostra il contributo, nella variazione dell'angolo al vento apparente e del modulo di tale vettore, della velocità angolare di beccheggio.



**Figura 3.3:** Effetto della rotazione in beccheggio su AWA. Figura tratta da [11]

## 3.2 Equazioni di governo

In questo paragrafo verranno brevemente presentate le equazioni che governano il moto dei fluidi sulle quali sono basati i programmi di seguito descritti.

Considerando un fluido Newtoniano isoterma, esse sono identificate dal sistema di equazioni di Navier-Stokes:

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0 \\ \frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \otimes \mathbf{u}) = \nabla \cdot T(\mathbf{u}, p) + G \end{cases} \quad (3.6)$$

dove la prima equazione indica l'equazione di continuità, mentre la seconda rappresenta la conservazione della quantità di moto.

In tale sistema  $\rho$  indica la densità del fluido,  $\mathbf{u}$  è il campo di velocità,  $p$  il campo di pressione,  $G$  indica il termine che racchiude gli effetti dovuti al campo gravitazionale, mentre  $T(\mathbf{u}, p)$  rappresenta il tensore degli sforzi che segue:

$$T(\mathbf{u}, p) = \mu(\nabla \mathbf{u} + \nabla \mathbf{u}^T) - pI \quad (3.7)$$

essendo  $\mu$  il coefficiente di viscosità relativo al fluido considerato.

Nel caso in cui si consideri un fluido incomprimibile a densità costante, l'equazione di continuità si riduce al solo vincolo:

$$\nabla \cdot \mathbf{u} = 0 \quad (3.8)$$

e la pressione perde il proprio significato fisico divenendo un semplice moltiplicatore di Lagrange che introduce nel problema la condizione (3.8).

Nei flussi irrotazionali caratterizzati da vorticità nulla:

$$\nabla \times \mathbf{u} = 0 \quad (3.9)$$

è possibile definire un *potenziale della velocità*,  $\Phi$ , per il quale vale la relazione:

$$\mathbf{u} = \nabla \Phi \quad (3.10)$$

In tale modo sostituendo l'eq.(3.10) nella (3.8) si ottiene l'equazione di Laplace del potenziale:

$$\nabla^2 \Phi = 0 \quad (3.11)$$

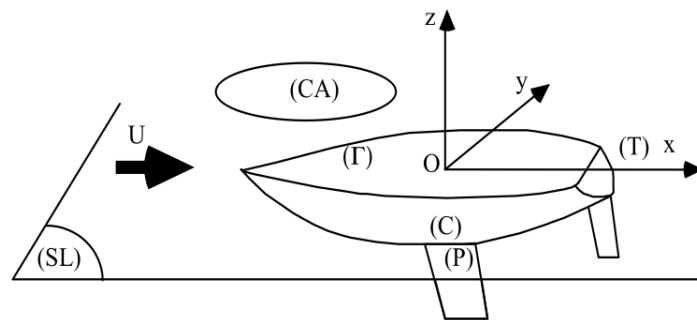
utilizzata nei metodi numerici a pannelli e nella teoria della linea portante, presentati nel seguito della trattazione, nel caso di analisi di flussi incomprimibili ed irrotazionali.

### 3.3 Programmi per l'analisi fluidodinamica

Nel seguente capitolo verranno presentati i programmi informatici ed i metodi numerici utilizzati per la determinazione dei coefficienti aerodinamici ed idrodinamici relativi alle forze ed ai momenti agenti sull'imbarcazione.

#### 3.3.1 REVA

REVA © è il programma utilizzato per l'analisi idrodinamica dello scafo e delle appendici ad esso collegate, qualora queste ultime non vengano modellate con la teoria della linea portante descritta nel seguito della trattazione. Nella fig.3.4 è rappresentato il sistema di riferimento nel quale tale programma valuta le azioni agenti sul sistema, si osserva che la collocazione di tale terna di assi differisce dai casi analizzati dove l'origine è stata posta a prua delle imbarcazioni.



**Figura 3.4:** Sistema di riferimento idrodinamico. Figura tratta da [12]

In REVA è consentito introdurre due file, uno indicante le caratteristiche geometriche del corpo ed uno il metodo numerico scelto per risolvere le equazioni di governo. Il programma si occupa inizialmente di definire la discretizzazione spaziale, in porzioni di superficie quadrilatera, dello scafo, definendo per ciascuna di esse un sistema di riferimento locale e la matrice di rotazione che consente il passaggio da tale sistema a quello globale raffigurato in fig.3.4. Si tratta ora di approssimare il flusso come fosse un flusso irrotazionale a potenziale, poiché gli angoli d'incidenza con i quali investe lo scafo sono limitati essendo pari all'angolo di scarroccio che raggiunge valori massimi di circa 6-7 deg, e di conseguenza è possibile determinarne il campo di moto risolvendo l'eq.(3.11) di Laplace. Per fare ciò si utilizzano opportuni metodi a pannelli, descritti in modo generico di seguito, che consentono di definire la funzione  $\Phi$  come somma di singolarità virtuali distribuite sulla superficie del corpo. La descrizione approfondita del procedimento computazionale seguita da REVA

viene descritta in [13].

Nell'analisi delle forze idrodinamiche agenti sulla parte immersa dell'imbarcazione occorre definire delle equazioni aggiuntive finalizzate alla trattazione del pelo libero, ovvero di quel piano che suddivide l'acqua dall'aria. Il sistema risultante, comprendente le condizioni al contorno necessarie, definirá il cosiddetto problema di Neumann-Kelvin ottenuto dal problema della resistenza d'onda con linearizzazione dell'equazione che definisce la superficie libera. Definendo  $\Omega$  il dominio di calcolo,  $\Sigma$  la superficie del corpo immerso e  $F$  il fondale, il sistema risultante é:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla^2 \Phi = 0 \quad in \Omega \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \hat{n}} = \mathbf{U} \cdot \hat{n} \quad su \Sigma \\ \frac{\partial^2 \Phi}{\partial x^2} + \frac{g}{|\mathbf{U}|^2} \frac{\partial \Phi}{\partial z} = 0 \quad su SL \\ \frac{\partial \Phi}{\partial \hat{n}'} = 0 \quad su F \\ \lim_{x \rightarrow -\infty} |\nabla \Phi| = 0 \end{array} \right. \quad (3.12)$$

con  $\hat{n}$  il versore normale alla superficie del corpo,  $\hat{n}'$  il versore normale al fondale e  $\frac{g}{|\mathbf{U}|^2}$  la frequenza spaziale delle onde di superficie. La seconda equazione rappresenta la condizione di tangenza del flusso alla carena, la terza equazione indica la condizione di superficie libera, la quarta rappresenta la condizione di non penetrabilitá sulla superficie del fondale, mentre l'ultima impone campo di velocità nullo all'infinito a monte dove il fluido é imperturbato. La terza equazione é stata ottenuta dalla relazione cinematica del campo di moto sul pelo libero dove é stato imposto che fosse soddisfatto il teorema di Bernoulli. Per una trattazione esaustiva dell'argomento si rimanda a [12] [14].

### Metodo a pannelli

Nel caso di analisi fluidodinamica tridimensionale di flussi irrotazionali ed inviscidi, che lambiscono un corpo, si dimostra che il potenziale  $\Phi$ , soluzione dell'eq.(3.11), puó essere espresso come somma di singolaritá virtuali, ovvero sorgenti e doppiette, distribuite sulla superficie del corpo opportunamente discretizzata al fine di risolvere il problema numericamente. La piú semplice distribuzione di singolaritá virtuali in 3D prevede che esse siano quadrilatere

ed abbiano valore costante sull'elemento di superficie.

La descrizione del metodo a pannelli e della teoria della linea portante definita nel paragrafo 3.3.4 fanno riferimento a [15].

In generale si può dimostrare che scegliendo una distribuzione continua, sulla superficie del corpo  $S_B$ , di sorgenti e doppiette, rispettivamente d'intensità  $\sigma$  e  $\mu$ , si ottiene una funzione del potenziale pari a:

$$\Phi(x, y, z) = \frac{-1}{4\pi} \int_{S_B} \left[ \sigma \left( \frac{1}{r} \right) - \mu \hat{n} \cdot \nabla \left( \frac{1}{r} \right) \right] dS + \Phi_\infty \quad (3.13)$$

somma del potenziale asintotico,  $\Phi_\infty$ , e di perturbazione.

Considerando inoltre la scia costituita da una superficie di sole doppiette, poiché priva di spessore, si ha:

$$\Phi(x, y, z) = \frac{1}{4\pi} \int_{S_B+S_W} \mu \hat{n} \cdot \nabla \left( \frac{1}{r} \right) dS - \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \sigma \left( \frac{1}{r} \right) dS + \Phi_\infty \quad (3.14)$$

La condizione al contorno di Neumann di non penetrabilità, espressa dalla seconda equazione del sistema (3.12), valutata nei punti di controllo scelti sulla superficie del corpo, consente di determinare le intensità delle singolarità e da esse i carichi fluidodinamici agenti. In particolare in [15] si trova la dimostrazione che conduce a determinare un valore delle sorgenti che soddisfino:

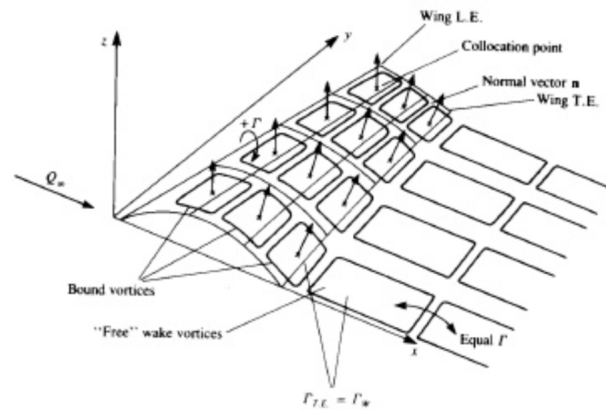
$$\sigma = \hat{n} \cdot \mathbf{V}_\infty \quad (3.15)$$

Discretizzando ora la superficie solida del corpo in pannelli ed imponendo la condizione al contorno di Neumann si ha:

$$\sum_{k=1}^{N_B} \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \mu \hat{n} \cdot \nabla \left( \frac{1}{r} \right) dS + \sum_{k=1}^{N_W} \frac{1}{4\pi} \int_{S_W} \mu \hat{n} \cdot \nabla \left( \frac{1}{r} \right) dS - \sum_{k=1}^{N_B} \frac{1}{4\pi} \int_{S_B} \sigma \left( \frac{1}{r} \right) dS = 0 \quad (3.16)$$

che definisce un set di equazioni lineari aventi come incognite il vettore  $\mu$  delle intensità delle doppiette di ciascun pannello, determinate le quali è possibile definire i carichi agenti sul corpo.

Nei paragrafi seguenti si farà riferimento al metodo vortex lattice. Esso consiste in una semplificazione della teoria generale dei metodi a pannelli appena presentata, poiché definisce la distribuzione di circolazione sulla superficie del corpo, ritenuto avere spessore infinitesimo come è lecito considerare nel caso di analisi del piano velico, come un'insieme di anelli di vorticità la cui intensità  $\Gamma$  è costante lungo la linea che racchiude la porzione di superficie a cui si riferiscono, come rappresentato in fig.3.5. Tale configurazione risulta essere equivalente a considerare una distribuzione di doppiette di intensità



**Figura 3.5:** Metodo a reticolo di vortici. Figura tratta da [15]

costante  $\mu$ , sulla porzione di superficie, con  $\Gamma = \mu$ . Si consideri la velocità indotta, normalmente alla superficie del corpo, dagli anelli di vorticità che rivestono il corpo solido e la scia, nei punti di controllo posti a  $\frac{3}{4}$  di corda della porzione di superficie analizzata. Imponendo la condizione al contorno di tangenza del flusso, si ottiene un sistema di  $N_c$  equazioni, pari al numero dei punti di controllo.

La condizione al contorno assume la forma:

$$\mathbf{V}_i \cdot \hat{n}_j + \mathbf{V}_\infty \cdot \hat{n}_j = 0 \quad (3.17)$$

avendo ritenuto la velocità del flusso nel punto di controllo  $j$ -esimo pari alla somma della velocità indotta dai vortici,  $\mathbf{V}_i$ , e di quella asintotica,  $\mathbf{V}_\infty$ , ed avendo considerato con  $\hat{n}_j$  il versore normale alla superficie del corpo in tale punto.

La velocità indotta dai vortici può essere definita, in funzione dell'intensità dei vortici stessi, valutando i coefficienti della velocità indotta tramite la legge di Biot-Savart. In particolare, per il modello descritto, le componenti di velocità indotta dal vortice rettilineo nel punto P rappresentato in fig.(3.6) sono:

$$\begin{aligned} u &= K(\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2)_x \\ v &= K(\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2)_y \\ w &= K(\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2)_z \end{aligned} \quad (3.18)$$

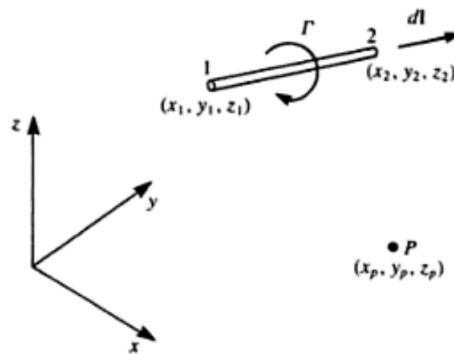
con :

$$K = \frac{\Gamma}{4\pi|\mathbf{r}_1 \times \mathbf{r}_2|^2} \left( \frac{\mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{r}_1}{r_1} - \frac{\mathbf{r}_0 \cdot \mathbf{r}_2}{r_2} \right) \quad (3.19)$$



avendo assunto:

$$\begin{aligned} \mathbf{r}_0 &= (x_2 - x_1, y_2 - y_1, z_2 - z_1) \\ \mathbf{r}_1 &= (x_P - x_1, y_P - y_1, z_P - z_1) \\ \mathbf{r}_2 &= (x_P - x_2, y_P - y_2, z_P - z_2) \end{aligned} \quad (3.20)$$



**Figura 3.6:** Schema vortice lineare e punto di controllo. Figura tratta da [15].

Ripetendo l'operazione per tutti i lati dell'anello si ottiene la  $\mathbf{V}_i$ , relativa al vortice considerato, nel punto di controllo P. Sommando ora i vettori delle velocità indotte da tutti i vortici ad anello si ottiene il valore di velocità indotta complessiva nel  $j$ -esimo punto di controllo. Tale operazione si tramuta a livello computazionale nella definizione del sistema di equazioni lineari avente come incognita il vettore delle intensità dei vortici  $\Gamma$  premoltiplicato per la matrice dei coefficienti d'influenza delle velocità indotte definiti precedentemente. Il termine noto sarà costituito da un vettore avente come elementi le componenti della velocità asintotica normali alla superficie del corpo nei punti di controllo.

La soluzione di tale sistema non è unica. Per questo motivo occorre aggiungere la condizione di Kutta che impone circolazione lineare,  $\gamma_{T.E.}$ , nulla sul bordo d'uscita, consentendo di determinare l'intensità della vorticità di scia,  $\mu_w$ , che risulta essere pari al valore della vorticità  $\mu_{T.E.}$ . Imponendo ora che la circolazione lineare sulla scia,  $\gamma_w$ , sia diretta parallelamente al vettore di velocità ed osservando, come descritto in [15], che tale condizione equivale ad imporre una vorticità costante sulla superficie di quest'ultima, è possibile determinare la forma che la caratterizza.

Risulta possibile dunque determinare univocamente la distribuzione di circolazione e di conseguenza i carichi aerodinamici agenti sul corpo.

### 3.3.2 SAILOPT

Per la valutazione, nello studio delle andature di bolina, dei coefficienti aerodinamici relativi al piano velico, di tipo deformabile, é stato utilizzato il programma SAILOPT©, concepito dall'ing. Mario Caponnetto, attualmente membro del design team di Oracle USA. Tali valori sono stati successivamente forniti come input al VPP. Sviluppato durante il programma di ricerca, relativo alla campagna svizzera di Coppa America del 2000, presso il Politecnico Federale di Losanna, tale programma viene ora utilizzato dall'azienda ELVSTROM SAILS per la progettazione di vele su barche sia da regata che da diporto, come descritto nel sito [16].

Le vele, in andatura di bolina, devono funzionare come profili alari con flusso il piú possibile non separato, con l'obiettivo di sviluppare la massima forza motrice ed il minimo momento sbandante. Per raggiungere tale scopo, il programma si occupa di valutare la forma ottima delle vele ricevendo in input:

- le dimensioni caratteristiche del piano velico e del sartame;
- le condizioni di navigazione, quali gli angoli d'assetto, la velocità dell'imbarcazione e la configurazione del vento reale;
- il momento sbandante che deve generare, a fronte del momento rad-drizzante prodotto dall'idrostatica al dato angolo di rollio.

Come risultato, restituisce le forze ed i momenti aerodinamici, utili per valutare le prestazioni dell'imbarcazione, a fronte di differenti tipologie di piani velici a disposizione. L'aspetto principale di tale programma é la capacità di determinare la forma 3D e la regolazione ottima del piano velico, ovvero i valori di curvatura e di svergolamento di ciascuna sezione in cui é stata suddivisa la vela.

Per ottenere dunque la massima spinta propulsiva, alle date condizioni di vento reale, SAILOPT utilizza un metodo a *reticolo di vortici inverso* in tre dimensioni, descritto in [17]. Basato sul metodo descritto nel paragrafo precedente, esso valuta la distribuzione di circolazione, e quindi i carichi aerodinamici sviluppati dal piano velico, necessaria per ottenere la massima forza motrice sottostando ai vincoli imposti, prevalentemente sul momento sbandante generato. Infatti, fissato l'angolo di sbandamento a cui si trova l'imbarcazione e le caratteristiche del vento reale, il programma é in grado di determinare la curvatura delle sezioni della vela e gli angoli di svergolamento, dei quali sono ruotate, al fine di evitare che il piano velico produca un momento sbandante che la barca non é in grado di contrastare. Come osservabile, dunque, il metodo utilizzato opera in modo inverso rispetto ad

un classico metodo vortex lattice nel quale la circolazione viene valutata in funzione della forma del profilo alare.

La procedura di ottimizzazione viene effettuata attraverso un algoritmo genetico sviluppato dall'ing. Mario Caponnetto nel quale l'ottimo viene raggiunto aggiungendo, ad ogni iterazione, un piccolo disturbo alla forma iniziale delle vele scelta arbitrariamente. Con tale approccio é possibile introdurre differenti vincoli sulle variabili di ottimizzazione, come ad esempio il massimo coefficiente di portanza, relativo alla sezione considerata, con lo scopo di evitare lo stallo del "profilo". Il metodo vortex lattice, essendo un metodo a pannelli, si basa sull'analisi di un flusso a potenziale con fluido inviscido. Per questo motivo i coefficienti di resistenza viscosa vengono valutati, a priori, attraverso il programma di CFD Fluent©, con un'analisi bidimensionale del profilo velico effettuata a differenti valori di curvatura dello stesso e con diverse dimensioni dell'albero dietro il quale si genera una zona di ricircolo che influisce notevolmente sulla resistenza prodotta.

Utilizzando questo codice é dunque possibile determinare la polare relativa alla migliore forma del piano velico progettato per andature di bolina.

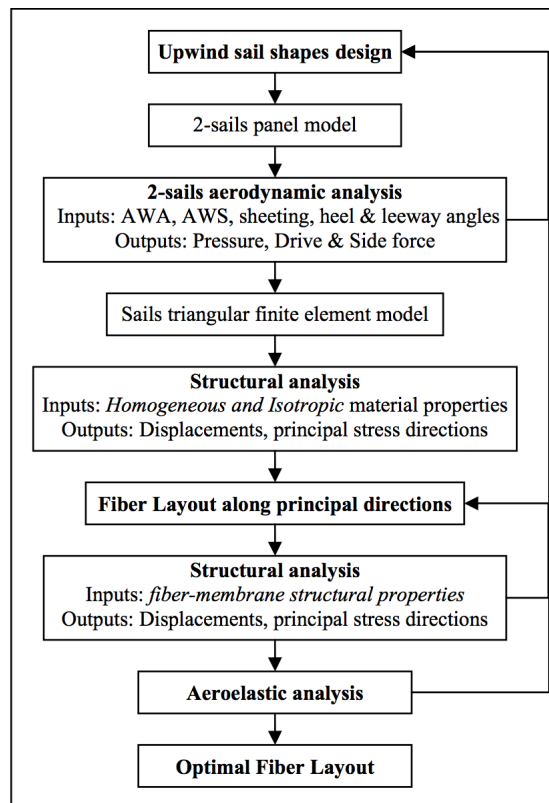
### 3.3.3 SMAR-Azure

Si tratta di un programma per l'analisi aeroelastica delle vele e della parte strutturale, sartame ed albero, che trasmette le forze ed i momenti aerodinamici allo scafo. Esso si occupa di ottimizzare la forma delle vele sia per le andature upwind che per quelle downwind, perciò é in grado di considerare carichi aerodinamici valutati sia con metodo a reticolo di vortici, all'interno del programma stesso, che attraverso la risoluzione di equazioni RANS che fornisce in input la distribuzione della pressione sul piano velico. Lo studio effettuato sul GS43, finalizzato a questo progetto di tesi, non ha previsto tra gli obiettivi l'analisi aeroelastica dell'imbarcazione, si é scelto quindi di non sfruttare l'analisi eseguibile da parte della SMAR-Azure Ltd. In generale però, nei progetti dove essa viene richiesta, il processo per la determinazione della forma ottima delle vele e della configurazione della parte strutturale si compone di 5 fasi principali:

- *design dell'albero e del sartame*, definendo le caratteristiche dei materiali utilizzati;
- *design del piano velico*, con possibilità di disporre le fibre e definire le proprietà strutturali dei materiali;
- *analisi aerodinamica*, tramite metodo vortex lattice o risoluzione di equazioni RANS con programma opportuno;

- *analisi strutturale delle vele*, studio delle deformazioni e distribuzione dei carichi;
- *analisi strutturale delle sartie e dell'albero*, che riceve come input i carichi valutati nella fase precedente.

Di seguito si riporta uno schema, riguardante la progettazione di un piano velico di bolina, che mostra come tali processi siano in relazione l'uno con l'altro e qual é la procedura iterativa che porta alla progettazione definitiva della forma e della composizione strutturale delle vele e dei supporti.



**Figura 3.7:** Schema iterazione aeroelastica. Figura tratta da [18]

In tale procedura il piano velico viene modellato come una membrana, con le caratteristiche riportate in [18] [19], ed alla fine del processo di ottimizzazione si perviene alla definizione della distribuzione delle fibre di materiale composito costituente le vele e della migliore forma per la sezione dell'albero e del sartame a fronte del minor peso possibile.

## Equazioni RANS

Nell'analisi aerodinamica delle vele per andature portanti non é consentito utilizzare il metodo a reticolo di vortici, poiché in tale configurazione gli angoli d'incidenza, con cui il flusso investe il piano velico, sono elevati e vengono a meno le ipotesi di flusso irrotazionale completamente attaccato alla superficie del corpo.

Per tale motivo occorre determinare la distribuzione di pressione sul piano velico, e di conseguenza i carichi aerodinamici generati, con un'analisi CFD effettuata risolvendo le equazioni di Navier-Stokes (3.6) mediate alla Reynolds.

Nel presente progetto di tesi l'analisi fluidodinamica delle vele per andature portanti é stata svolta, utilizzando il programma open source OpenFoam©, dalla Wolfson Unit dell'universitá di Southampton. Ci si é limitati all'analisi delle vele ritenute rigide senza dunque studiarne l'aeroelasticitá.

Le equazioni mediate alla Reynolds, considerate nell'analisi CFD fornita, valutano una media statistica della soluzione, poiché si considerano le incognite del problema come una somma di una parte media e di una fluttuazione:

$$\mathbf{u} = \bar{\mathbf{u}} + \mathbf{u}' \quad p = \bar{p} + p' \quad \rho = \bar{\rho} + \rho' \quad (3.21)$$

nella soluzione numerica delle equazioni di Navier-Stokes non viene considerata la parte fluttuante che si definisce attraverso il modello di turbolenza scelto. La parte media indica il valore:

$$\bar{\mathbf{u}} = \frac{1}{\Delta t} \int_t^{t+\Delta t} \mathbf{u} dt \quad (3.22)$$

con  $\Delta t$  un intervallo di tempo grande rispetto alle scale temporali delle fluttuazioni turbolente e piccolo rispetto al passo temporale scelto per la soluzione delle equazioni di Navier-Stokes.

Sostituendo le variabili (3.21) nelle eq.(3.6), considerando il vincolo d'incompressibilitá (3.8), si ottengono le equazioni mediate alla Reynolds che seguono sfruttando le proprietá della media (3.22):

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \tilde{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{\rho} = 0 \\ \frac{\partial \bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \tilde{\mathbf{u}} \otimes \tilde{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot T(\bar{\mathbf{u}}, \bar{p}) + \nabla \cdot (\mathbf{R} + \mathbf{S}) \\ \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0 \end{cases} \quad (3.23)$$

dove  $\tilde{\mathbf{u}} = \frac{\bar{\rho} \mathbf{u}}{\rho}$  indica la densitá mediata alla Favre ed  $\mathbf{R}$  rappresenta il tensore degli sforzi di Reynolds derivante dal termine di trasporto non linea-

re. Il tensore  $\mathbf{S}$  é legato alle fluttuazioni della viscosit  e nel caso di fluido incomprimibile con viscosit  costante le eq.(3.23) si riducono alla forma:

$$\begin{cases} \frac{\partial \bar{\rho}}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \bar{\rho} = 0 \\ \frac{\partial \bar{\rho} \bar{\mathbf{u}}}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \bar{\mathbf{u}} \otimes \bar{\mathbf{u}}) = \nabla \cdot T(\bar{\mathbf{u}}, \bar{p}) + \nabla \cdot (\mathbf{R}) \\ \nabla \cdot \bar{\mathbf{u}} = 0 \end{cases} \quad (3.24)$$

Si osserva dunque che per determinare la soluzione di tale sistema é necessario modellare opportunamente il tensore degli sforzi di Reynolds. Per una trattazione pi  dettagliata del procedimento che conduce alla scrittura delle eq.(3.23) e della modellazione del tensore  $\mathbf{R}$  si rimanda a [20].

Per fare ci  esistono due categorie di metodi:

- modelli basati sulla *viscosit  turbolenta*  $\mu_t$
- modelli basati sulle *equazioni di trasporto del tensore*  $\mathbf{R}$

La prima categoria, largamente utilizzata, si suddivide a sua volta in tre sottogruppi in relazione al numero di equazioni differenziali che i differenti metodi aggiungono alle eq.(3.23). Vi sono i metodi a *zero equazioni*, che considerano una sola equazione di tipo algebrico, i metodi ad *una equazione*, che considerano un'equazione differenziale nella sole incognite  $\mu_t$  o  $k$ , ed i metodi a *due equazioni*, che definiscono la viscosit  turbolenta in funzione di due variabili nelle quali vengono scritte le equazioni differenziali aggiuntive. A quest'ultimo gruppo appartiene il modello  $k - \omega$  SST utilizzato nell'analisi aerodinamica delle vele per andature portanti del GS43 e del Maxi da 100 piedi. La viscosit   $\mu$ , presente nella seconda delle eq.(3.23), viene modificata aggiungendo il termine di viscosit  turbolenta  $\mu_t$ . Quest'ultimo valore si definisce secondo la formula:

$$\mu_t = C_\mu \rho \frac{k}{\omega} \quad (3.25)$$

essendo  $C_\mu$  una opportuna costante empirica,  $k$  l'energia cinetica turbolenta ed  $\omega$  la frequenza della turbolenza o il rateo di dissipazione specifico. In particolare si avr :

$$\omega = \frac{\epsilon}{k} \quad (3.26)$$

con  $\epsilon$  indicante il tasso di dissipazione della turbolenza.

Occorrer  dunque definire due equazioni differenziali per determinare i valori

di  $k$  ed  $\omega$ . Tali equazioni sono riportate di seguito e, come descritto, andranno a completare il sistema (3.23).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla k = P_k - \beta k \omega + \nabla \cdot [(\nu + \sigma_k \nu_T) \nabla k] \quad (3.27)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + \bar{\mathbf{u}} \cdot \nabla \omega = -\beta_2 \omega^2 + \nabla \cdot [(\nu + \sigma_\omega \nu_T) \nabla \omega] + 2(1 - F) \sigma_{\omega_2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega \quad (3.28)$$

Si osserva che si é considerata la viscosità cinematica  $\nu$  al posto di quella dinamica  $\mu$  dividendo le equazioni per la densità del fluido ritenuta costante. Senza entrare nello specifico della definizione dei rimanenti valori presenti nelle eq.(3.27) e (3.28) si evidenzia che  $P_k$  indica il termine di energia turbolenta prodotta dalle forze turbolente viscosi,  $\sigma_k$ ,  $\sigma_\omega$ ,  $\sigma_{\omega_2}$ ,  $\beta$  e  $\beta_2$  indicano delle costanti empiriche, mentre  $F$  rappresenta un valore funzione delle costanti e delle variabili del problema.

Nel modello utilizzato dalla Wolfson Unit sono state introdotte specifiche funzioni al fine di modellare la legge di parete ed evitare la risoluzione del flusso in tale regione. Ciò consente l'utilizzo di una mesh piú lasca a parete, riducendo il costo computazionale complessivo.

Il metodo scelto in particolare si comporta bene nell'analisi di flussi separati, come é il caso dell'aria che circonda le vele nelle andature portanti, risulta essere meno sensibile del modello  $k - \omega$  alle condizioni al contorno del dominio di calcolo e non richiede l'introduzione di apposite funzioni di smorzamento della viscosità turbolenta vicino alla parete del corpo.

### 3.3.4 Teoria della linea portante

Per quanto sia lecito ritenere che i metodi precedentemente descritti forniscano risultati piú accurati di quelli ottenibili con il metodo della linea portante, vi sono certe componenti dell'imbarcazione che é possibile studiare con questo approccio senza perdere rilevante accuratezza nei risultati. In generale é opportuno utilizzarlo nella valutazione delle azioni idrodinamiche agenti su appendici quali i timoni, i foil, le chiglie e le derive, e nella determinazione dell'aerodinamica nel caso di imbarcazioni dotate di vela alare.

#### Definizione del problema

Si consideri un'ala di apertura finita con profilo sottile, come nel caso delle appendici idrodinamiche o della vela alare, investita da un flusso stazionario, caratterizzato da velocità asintotica,  $V_\infty$ , e da piccoli angoli d'incidenza,

$\alpha$ , rispetto al profilo alare. Come richiesto dalle condizioni considerate per l'utilizzo del metodo a pannelli, anche in questo caso il flusso deve essere completamente attaccato al profilo, senza separazione dello strato limite. Si tratta ancora una volta di un problema con flusso a potenziale descritto dall'equazione di Laplace (3.11).

La condizione al contorno di non penetrabilità sulla superficie dell'ala, corrispondente alla quota  $z = 0$ , viene espressa dalla seguente equazione:

$$\frac{\partial \Phi}{\partial z}(x, y, 0\pm) = V_\infty \left( \frac{\partial \eta}{\partial x} - \alpha \right) \quad (3.29)$$

dove  $\eta$  indica la curvatura della superficie considerata.

### Linea portante di Prandtl

La teoria della linea portante costituisce il piú semplice metodo per la risoluzione del problema descritto dall'eq.(3.29). La forza fluidodinamica é generata da una distribuzione di vorticitá posta sulla superficie alare, come nel caso di approssimazione tramite metodo a pannelli, che in questo caso però risulta essere concentrata lungo una retta, posta ad un quarto della corda del profilo e diretta come l'apertura dell'ala. Il posizionamento ad un quarto di corda garantisce che la condizione di Kutta, di circolazione nulla sul bordo d'uscita del profilo, sia soddisfatta.

La teoria dei vortici impone che un vortice non inizi o finisca improvvisamente all'interno di un fluido, di conseguenza ai bordi dell'ala il bound vortex, indicato dalla lettera  $\Gamma$ , non termina, ma cambia direzione di  $90deg$  a formare i vortici d'estremitá della scia tipici delle ali di apertura finita, e tanto piú rilevanti quanto piú é ridotto l'allungamento dell'ala.

Un modello piú dettagliato di teoria della linea portante fú proposto dal ricercatore tedesco Ludwig Prandtl che suddivise il vortice, finora descritto, in molteplici vortici a ferro di cavallo, scomponendo l'ala in apertura in molteplici sezioni. Ciascun vortice, cosí definito, risulta avere intensitá costante e due vortici alle estremitá della porzione di ala, a cui é associato, diretti longitudinalmente a formare il tappeto vorticoso della scia. Ciascun vortice di scia é generato dalla variazione, in questo caso discreta, dell'intensitá che il vortice, posto al quarto di corda, presenta nel passaggio da una sezione ad un'altra.

Definita la distribuzione di vorticitá considerata, é possibile determinare i contributi che essa fornisce al primo termine dell'eq.(3.29). Suddividendo quest'ultimo in una componente di velocitá indotta dai vortici dell'ala,  $w_b$ , ed una indotta da quelli di scia,  $w_i$ , é possibile riscrivere la condizione di non penetrabilità, per ala priva di curvatura, come segue:



$$\frac{\partial \Phi_{wing}}{\partial z} + \frac{\partial \Phi_{wake}}{\partial z} = V_{\infty} \alpha \quad (3.30)$$

La componente di velocità indotta dalla linea portante,  $\Delta w_b$ , sulla sezione considerata, può essere valutata utilizzando il modello a vortici concentrati, nel quale si considera il downwash calcolato in un punto di controllo posto a  $\frac{3}{4}$  della corda. La legge di Biot-Savart consente di determinare il valore di tale velocità indotta e per somma dei contributi dovuti alle singole sezioni si giunge a valutare la  $w_b$  complessiva.

Considerando  $y$  la coordinata lungo l'apertura dell'ala si ottiene:

$$w_b = \frac{-\Gamma(y)}{2\pi [c(y)/2]} \quad (3.31)$$

Nel caso della velocità indotta dai vortici di scia, essa, essendo dovuta a vortici semi-infiniti, ha un valore pari alla metà di quella indotta da vortici bidimensionali di lunghezza infinita. Nel caso in cui si consideri un punto di controllo posto alla coordinata  $y_c$  e vortici di scia in  $y_0$ , si ottiene un downwash pari a:

$$w_i(y_c) = \frac{\Delta \Gamma(y_0)}{4\pi(y_c - y_0)} \quad (3.32)$$

che considerando il contributo dovuto a tutta la scia, ritenuta d'intensità continua lungo  $y$ , su un'ala di apertura  $b$  con asse longitudinale posto al centro di essa, diviene:

$$w_i = \frac{1}{4\pi} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{[-d\Gamma(y_0)/dy] dy_0}{y_c - y_0} \quad (3.33)$$

Sostituendo tali espressioni nell'eq.(3.30) si ottiene l'equazione integro-differenziale della linea portante di Prandtl.

$$\frac{-\Gamma(y)}{2\pi [c(y)/2]} - \frac{1}{4\pi} \int_{-b/2}^{b/2} \frac{[-d\Gamma(y_0)/dy] dy_0}{y - y_0} + V_{\infty} \alpha = 0 \quad (3.34)$$

Dividendo ora i termini per la velocità asintotica si ottiene una espressione del legame tra l'angolo d'incidenza geometrico,  $\alpha$ , l'angolo d'incidenza indotto dal downwash,  $\alpha_i$ , e l'angolo d'incidenza effettivo  $\alpha_e$ .

$$\alpha - \alpha_i - \alpha_e = 0 \quad (3.35)$$

É da osservare che l'effetto della vorticitá si manifesta in una riduzione dell'angolo d'incidenza effettiva rispetto a quello geometrico ed in una conseguente rotazione delle forze fluidodinamiche che provoca il generarsi di una componente aggiuntiva di resistenza dovuta alla forza portante e detta resistenza indotta.

La portanza globale si ottiene attraverso l'integrazione, lungo la coordinata in apertura, della portanza locale determinata dal teorema di Kutta-Joukowski. La circolazione  $\Gamma(y)$ , che compare nell'equazione della portanza (3.36), si ottiene risolvendo l'eq.(3.34).

$$L = \rho V_\infty \int_{-b/2}^{b/2} \Gamma(y) dy \quad (3.36)$$

Per piccoli angoli d'incidenza  $\alpha_i$  si ha una resistenza indotta pari a:

$$D_i = \rho V_\infty \int_{-b/2}^{b/2} \alpha_i \Gamma(y) dy \quad (3.37)$$

che si sommerá alla componente costante di resistenza,  $D_0$ , a determinare la resistenza globale.

### Distribuzione ellittica di vorticitá

Al fine di risolvere in modo analitico l'equazione integro-differenziale di Prandtl (3.34) é possibile considerare una distribuzione di vorticitá con profilo ellittico lungo la linea portante come raffigurato in fig.(3.8).

$$\Gamma(y) = \Gamma_{max} \left[ 1 - \left( \frac{y}{b/2} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (3.38)$$

Tale espressione deve essere sostituita nell'eq.(3.34) per consentire di determinare il valore massimo della circolazione  $\Gamma_{max}$ . Svolgendo i passaggi matematici presenti in [15] si ottiene la seguente velocitá indotta dai vortici di scia e l'angolo d'incidenza  $\alpha_i$  che ne deriva:

$$w_i = -\frac{\Gamma_{max}}{2b} \quad (3.39)$$

$$\alpha_i = \frac{\Gamma_{max}}{2bV_\infty} \quad (3.40)$$

É possibile dimostrare inoltre che i coefficienti di portanza e di resistenza, da

esso dipendente, assumono le espressioni:

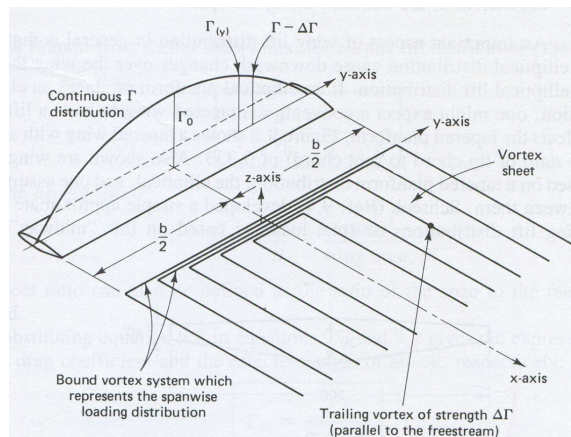
$$C_L = \frac{2\pi}{1 + 2/AR}(\alpha - \alpha_0) \quad (3.41)$$

$$C_{D_i} = \frac{1}{\pi AR} C_L^2 \quad (3.42)$$

con  $\alpha_0$ , angolo d'incidenza al quale la portanza é nulla, ed  $AR$ , l'aspect ratio dell'ala, ovvero il rapporto tra il quadrato dell'apertura  $b$  e la sua superficie  $S$ . Il valore complessivo del coefficiente di resistenza sará pari a:

$$C_D = C_{D_0} + C_{D_i} \quad (3.43)$$

con  $C_{D_0}$  il termine costante del  $C_D$  dovuto agli effetti viscosi trascurati utilizzando tale approccio.



**Figura 3.8:** Distribuzione ellittica di vorticit . Figura tratta da [24]



# Capitolo 4

## Fitting dei dati

Come già descritto, i programmi di previsione delle prestazioni si limitano a ricevere in ingresso i valori delle azioni fluidodinamiche agenti sui corpi del sistema, evitando dunque di aumentare il costo computazionale che risulterebbe altrimenti da un'ottimizzazione contenente al proprio interno la risoluzione delle equazioni di governo dei fluidi. Si vuole dunque fare in modo che il programma esegua il fitting dei dati forniti in  $n$ -dimensioni, tante quanti sono i parametri dai quali dipendono le forze ed i momenti valutati, fornendo curve che costituiscano il miglior compromesso tra l'essere vicine ai dati e ridurre le oscillazioni ed i problemi di instabilità numerica.

Durante lo sviluppo del programma, per effettuare ciò, si sono scelti due metodi differenti, che il VPP è in grado di selezionare a discrezione dell'utilizzatore. Nel caso di analisi delle prestazioni del catamarano e del Grand Soleil sono state scelte le *RadialBasisFunction*, già implementate nel pacchetto di calcolo scientifico di Python, *Scipy*, mentre nel caso del Maxi Yacht si è preferito implementare una funzione che svolgesse un fitting polinomiale multidimensionale a causa dei problemi di instabilità riscontrati con l'utilizzo del primo metodo citato. Di seguito si riporta una breve descrizione di entrambi gli approcci.

### 4.1 Radial Basis Function

Questo tipo di interpolazione si basa sulla valutazione della funzione interpolante attraverso la sommatoria di apposite funzioni a base radiale. Ciò significa che, fornito il vettore  $\mathbf{f}_c$ , delle valutazioni della funzione  $f(\mathbf{x})$  che nel nostro caso identifica una forza o un momento, nel set di punti di controllo  $\mathbf{x}_c$ , valori dei parametri considerati, la funzione  $f(\mathbf{x})$  nel generico punto  $\mathbf{x}$

sarà determinata dalla somma pesata delle funzioni a base radiale:

$$\phi(r) = \phi(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_c|) \quad (4.1)$$

dipendenti dalla norma euclidea  $r = |\mathbf{x} - \mathbf{x}_c|$ . L'espansione descritta risulta quindi:

$$f(\mathbf{x}) = \sum_{j=1}^{N_c} w_j \phi(|\mathbf{x} - \mathbf{x}_c|) \quad (4.2)$$

dove  $w_j$  identifica il peso  $j$ -esimo ed  $N_c$  indica il numero dei punti di controllo considerati. Al fine di ottenere il valore del vettore dei pesi  $\mathbf{w}$ , occorre imporre la condizione di interpolazione:

$$f(\mathbf{x}_{c_j}) = f_{c_j} \quad j = 1, 2, \dots, N_c \quad (4.3)$$

dove  $f_{c_j}$  indica il  $j$ -esimo elemento del vettore  $\mathbf{f}_c$ .

Applicando la condizione d'interpolazione (4.3) all'eq.(4.2) si ottiene un sistema di equazioni lineari che, risolto, consente di determinare il vettore dei pesi dell'espansione nelle funzioni definite dall'eq.(4.1).

Essendo il vettore dei pesi così definito:

$$\mathbf{w} = \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{N_c} \end{pmatrix} \quad (4.4)$$

il sistema che si ottiene risulterà essere:

$$\begin{bmatrix} \phi_{11} & \phi_{12} & \dots & \phi_{1N_c} \\ \phi_{21} & \phi_{22} & \dots & \phi_{2N_c} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \phi_{N_c1} & \phi_{N_c2} & \dots & \phi_{N_cN_c} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} w_1 \\ w_2 \\ \vdots \\ w_{N_c} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_{c1} \\ f_{c2} \\ \vdots \\ f_{cN_c} \end{pmatrix} \quad (4.5)$$

avendo considerato:

$$\phi_{ij} = \phi(|\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j|) \quad (4.6)$$

Per garantire che il problema in esame sia definito positivo viene sommato all'eq.(4.2) un polinomio, che solitamente viene assunto di primo grado, come segue:

$$P(\mathbf{x}_j) = \beta^T \mathbf{x}_j + \beta_0 \quad (4.7)$$

ed in aggiunta alla condizione d'interpolazione si impone che la sommatoria, valutata nei punti di controllo, dei polinomi, ottenuti considerando come coefficienti i pesi dell'espansione (4.2), sia nulla come segue.

$$\sum_{j=0}^{N_c} w_j p(\mathbf{x}_{c_j}) = 0 \quad (4.8)$$

Per vedere una delle possibili applicazioni di tale tipo di funzioni interpolanti si rimanda a [22]. Nella funzione interpolante, fornita dal pacchetto specifico di Python, sono disponibili differenti tipi di funzioni a base radiale riportate nell'elenco seguente.

- Splines multiquadriche (MQ):

$$\phi(r) = \sqrt{1 + (\epsilon r)^2} \quad (4.9)$$

- Splines multiquadriche inverse (IMQ):

$$\phi(r) = \frac{1}{\sqrt{1 + (\epsilon r)^2}} \quad (4.10)$$

- Funzioni di Gauss:

$$\phi(r) = e^{-(\epsilon r)^2} \quad (4.11)$$

- Thin Plate splines (TP):

$$\phi(r) = r^2 \log(r) \quad (4.12)$$

- Lineare:

$$\phi(r) = r \quad (4.13)$$

- Cubica:

$$\phi(r) = r^3 \quad (4.14)$$

- Quintica:

$$\phi(r) = r^5 \quad (4.15)$$

Nello studio delle prestazioni del catamarano e del Grand Soleil 43 si é scelto di utilizzare le funzioni a base radiale di tipo cubico, poiché esse hanno mostrato minori problemi numerici nell'eseguire il fitting dei dati forniti dall'analisi idrodinamica.

## 4.2 Fitting polinomiale

Come già descritto la funzione che esegue tale metodo é stata sviluppata per evitare che sorgessero problemi di instabilità nel fitting dei dati relativi al 100 piedi.

Prima di determinare i coefficienti del polinomio, occorre associare a ciascun

corpo, costituente il sistema, un vettore contenete i gradi massimi coi quali si vuole che i parametri, dai quali dipendono le forze ed i momenti, siano presenti all'interno del polinomio stesso. Questo consente, limitando opportunamente il grado massimo delle variabili, di evitare eccessive oscillazioni numeriche mantenendo comunque una buona fedeltá ai valori delle azioni forniti.

Si assuma, per semplicitá nella descrizione, di considerare la componente di forza lungo l'asse  $x$ , di un qualsiasi corpo costituente l'imbarcazione, dipendente da due soli parametri. Il primo parametro  $p$  puó assumere tre valori,  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$ , mentre il secondo  $q$  puó assumerne due,  $q_1$  e  $q_2$ .

Supponendo ora di avere una matrice dei dati forniti piena, ovvero contenente sei combinazioni delle variabili ed altrettante corrispondenti valutazioni della forza  $F_x$ , si associa ai parametri il massimo grado consentito, ovvero si sviluppa un polinomio di secondo grado in  $p$  e di primo grado in  $q$ . In tal caso i coefficienti incogniti saranno 6, come le possibili combinazioni. Qualora la matrice dei dati non fosse piena, o il polinomio risultante oscillasse eccessivamente, occorrerebbe ridurre opportunamente il grado delle variabili, osservando l'andamento della curva risultante attraverso la funzione *fit\_check*, opportunamente implementata nel programma, descritta in appendice A.

La funzione che esegue il fitting sviluppa un sistema lineare del seguente tipo:

$$\begin{bmatrix} 1 & p_1 & q_1 & p_1q_1 & p_1^2 & p_1^2q_1 \\ 1 & p_2 & q_1 & p_2q_1 & p_2^2 & p_2^2q_1 \\ 1 & p_3 & q_1 & p_3q_1 & p_3^2 & p_3^2q_1 \\ 1 & p_1 & q_2 & p_1q_2 & p_1^2 & p_1^2q_2 \\ 1 & p_2 & q_2 & p_2q_2 & p_2^2 & p_2^2q_2 \\ 1 & p_3 & q_2 & p_3q_2 & p_3^2 & p_3^2q_2 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ c_4 \\ c_5 \\ c_6 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{x1} \\ F_{x2} \\ F_{x3} \\ F_{x4} \\ F_{x5} \\ F_{x6} \end{pmatrix} \quad (4.16)$$

dove il vettore delle incognite  $\mathbf{c}$  contiene i coefficienti del polinomio.

A questo punto, utilizzando il metodo dei minimi quadrati, già implementato nel pacchetto di calcolo scientifico *Scipy*, si determina il vettore dei coefficienti che minimizza lo scarto quadratico tra il polinomio determinato ed i valori delle azioni forniti in tabella.

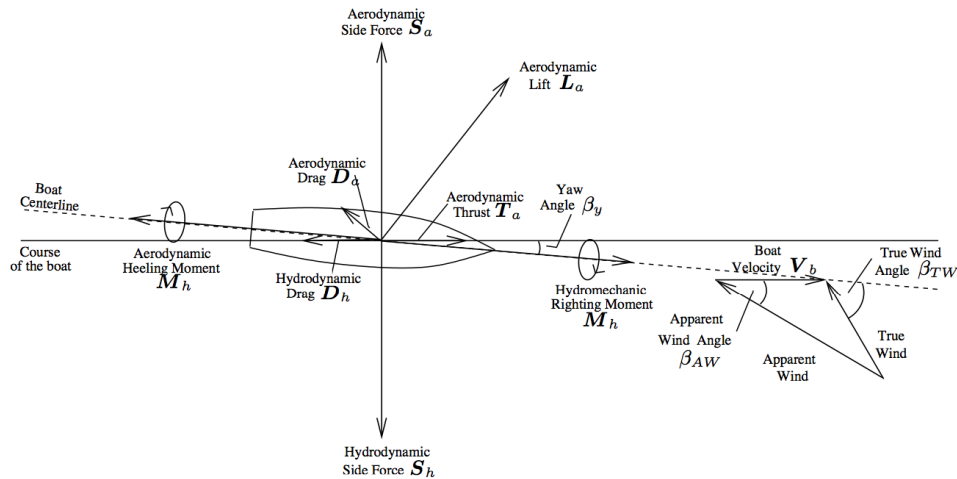
Quanto descritto potrà essere eseguito, dal programma sviluppato, in un numero maggiore di dimensioni e per tutte le componenti di forze e momenti che l'utilizzatore sceglierá di considerare. Tale procedimento verrà svolto un'unica volta ed i valori dei coefficienti determinati verranno salvati in un file di testo, all'interno della cartella relativa al corpo considerato, per essere successivamente richiamati dal VPP nella valutazione delle azioni agenti alla corrente condizione di navigazione.



# Capitolo 5

## Forze agenti sul sistema

In questo capitolo verranno presentati i procedimenti seguiti per la determinazione delle forze e dei momenti agenti sui corpi del sistema. Per ciascuna parte verranno definiti gli input fornibili, le variabili che influenzano in modo significativo il calcolo delle azioni ed i metodi utilizzati per valutare quest'ultime facendo riferimento alle descrizioni effettuate nei capitoli precedenti. Di seguito la fig.5.1 mostra le forze ed i momenti globali agenti sull'imbarcazione definiti dalla somma delle azioni descritte nel presente capitolo.



**Figura 5.1:** Azioni globali agenti sul sistema. Figura tratta da [23].

## 5.1 Scafo

I valori delle forze e dei momenti idrodinamici agenti sullo scafo vengono valutati a priori, come già detto, dal programma REVA© precedentemente descritto. Tali azioni saranno dunque definite nel sistema di riferimento proprio di questo programma, posto a prua dell'imbarcazione, avente asse  $x$  diretto verso poppa, asse  $z$  verso l'alto ed asse  $y$  risultante dalla regola della mano destra. Esse sono definite in funzione degli angoli d'assetto dello scafo, scelti opportunamente per ciascuna barca in esame, e della velocità dell'imbarcazione.

In particolare il programma riceverà in input una tabella dalla quale determinerà, attraverso i metodi di fitting dei dati descritti nel capitolo precedente, il valore delle forze e dei momenti alla data condizione di navigazione.

$DSPL$	$LW$	$TRIM$	$BS$	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

**Tabella 5.1:** Dati forniti per Classe C

avendo indicato con  $DSPL$  il dislocamento dell'imbarcazione, con  $LW$  l'angolo di scarroccio, con  $TRIM$  l'angolo di beccheggio e con  $BS$  la velocità dello scafo. La tab.(5.1) si riferisce al caso del catamarano di Classe C dove si considerano cinque parametri e tutte le componenti di forze e momenti relative ai sei gradi di libertà di moto rigido, mentre nel caso del Grand Soleil 43 new ci si è limitati alla considerazione di soli tre parametri e quattro componenti delle azioni idrodinamiche come riportato nella tab.(5.2), trascurando il movimento attorno all'asse di beccheggio dell'imbarcazione e l'equilibrio della traslazione verticale, poiché si ritiene che non influenzino in modo rilevante i risultati.

$LW$	$HEEL$	$BS$	$F_x$	$F_y$	$M_x$	$M_z$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$

**Tabella 5.2:** Dati forniti per GS43

Nel caso del Maxi da 100 piedi si sono presi in considerazione tutti i 6 gradi di libertà del sistema, e di conseguenza tutte le componenti di forze e momenti idrodinamici agenti sullo scafo. L'analisi idrodinamica, effettuata con REVA©, ha considerato lo scafo e la chiglia basculante, comprensiva di bulbo, come fossero un unico corpo rigido, fissando dunque la rotazione

della chiglia ad un angolo che il programma non ha potuto variare durante la fase di ottimizzazione delle prestazioni. La tabella fornita si presenta nel seguente modo:

<i>BS</i>	<i>DSPL</i>	<i>LW</i>	<i>TRIM</i>	<i>HEEL</i>	$F_x$	$F_y$	$F_z$	$M_x$	$M_y$	$M_z$
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮

**Tabella 5.3:** Dati forniti per il 100 piedi

In tutti i casi dunque, le condizioni di navigazione considerate all'interno delle tabelle saranno definite dalle molteplici combinazioni dei valori dei parametri scelti.

## 5.2 Appendici idrodinamiche

Esse possono essere analizzate sia con REVA<sup>©</sup>, che attraverso il metodo della linea portante, essendo caratterizzate da profili sottili che lavorano prevalentemente a bassi angoli d'incidenza. In tutti gli studi effettuati si è scelto il secondo approccio valutando i carichi idrodinamici a partire dai coefficienti relativi ai profili alari che identificano le differenti parti analizzate.

### 5.2.1 Foil, chiglia e deriva

Per queste componenti si è valutato l'angolo d'incidenza con cui il flusso idrodinamico investe il profilo. Per fare ciò si sono determinate le componenti di velocità del flusso nel sistema di riferimento solidale all'appendice in modo tale da rilevare l'angolo nel piano normale alla superficie dell'ala con l'eq.(2.1).

Da un'analisi idrodinamica sul profilo scelto per l'appendice considerata, effettuata all'esterno del programma sviluppato, si ricevono in input i valori di  $C_{D_0}$ ,  $C_{L_0}$ ,  $C_{D_{slope}}$  e  $C_{L_{slope}}$  che indicano, rispettivamente, i termini costanti del coefficiente di portanza e di resistenza, il coefficiente che moltiplica il quadrato del  $C_L$  nell'espressione (3.42) ed il coefficiente che moltiplica l'angolo d'incidenza nell'espressione (5.1) equivalente all'eq.(3.41). Si deve precisare che il valore del  $C_{D_0}$  deve essere opportunamente determinato considerando gli effetti viscosi che altrimenti si trascurerebbero considerando la sola teoria della linea portante. Si ottengono dunque le espressioni dei coefficienti fluidodinamici seguenti:

$$C_L = C_{L_0} + C_{L_{slope}} AoA \quad (5.1)$$

$$C_D = C_{D_0} + C_{D_{slope}} C_L^2 \quad (5.2)$$

Noti tali valori e l'area della superficie dell'appendice,  $S_a$ , si determinano la portanza e la resistenza espresse nel sistema di riferimento idrodinamico avente piano  $x-y$  normale al corpo.

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 S_a C_L \quad (5.3)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 S_a C_D \quad (5.4)$$

Attraverso opportune rotazioni e trasporti dei momenti si perviene all'espressione delle azioni nel sistema del VPP nel quale si valuteranno le equazioni di vincolo per l'ottimizzatore.

Le azioni valutate saranno applicate in un punto le cui coordinate, espresse nel sistema di riferimento solidale al corpo, verranno determinate tramite un'interpolazione di dati definiti in funzione dell'angolo d'incidenza del flusso.

Nel caso della chiglia, alla quale é collegato il bulbo col fine di creare momento raddrizzante sull'imbarcazione, si deve considerare un ulteriore coefficiente di resistenza, ritenuto costante, che andrà a sommarsi a quello determinato per la sola parte di deriva.

I foil sono dotati di maggiori parametri di regolazione rispetto alla chiglia, per questo motivo occorre che i valori dei coefficienti e delle coordinate del punto d'applicazione delle forze, siano forniti in funzione, oltre che dell'angolo d'incidenza, anche dell'angolo di diedro e della porzione di appendice immersa.

Per quanto riguarda l'analisi del Maxi Yacht la chiglia basculante ha richiesto l'aggiunta di una deriva che contrastasse la forza laterale sviluppata dal piano velico ed inoltre si é considerata una pinna laterale estraibile dal lato sottovento dell'imbarcazione. Tali componenti sono state studiate, dagli ingegneri idrodinamici che hanno svolto le analisi CFD, nello stesso modo delle altre appendici idrodinamiche, attraverso linea portante, fornendo successivamente in input al programma una tabella, come nel caso dello scafo, considerando gli opportuni parametri di regolazione delle appendici. Ciò, dal punto di vista implementativo, ha dunque consentito di considerare tutti i corpi, costituenti l'imbarcazione, nello stesso modo ed attraverso le medesime funzioni di interpolazione dei dati e valutazione delle forze.

### 5.2.2 Timone

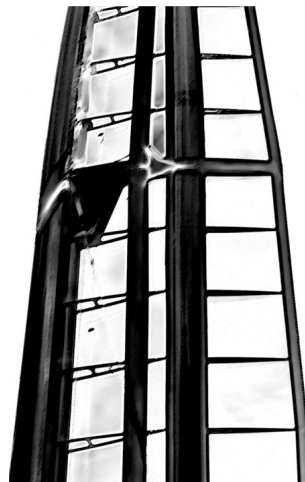
Il timone richiede un approccio uguale a quello utilizzato per i foil e la chiglia. L'unica differenza consiste nel dover considerare l'angolo di barra come parametro di regolazione delle forze e dei momenti, generati da tale corpo, e regolato dall'ottimizzatore al fine di ottenere l'equilibrio dell'imbarcazione, soprattutto nella rotazione attorno all'asse d'imbardata.

Per fare ciò si considera il sistema di riferimento solidale col timone ruotato in yaw, rispetto al sistema di riferimento dello scafo, dell'angolo di barra regolato opportunamente dall'ottimizzatore. Questa rotazione dunque influenzerà l'angolo d'incidenza con cui il flusso idrodinamico investe il timone e di conseguenza, secondo il procedimento descritto per chiglia e foil, anche le forze ed i momenti generati.

## 5.3 Vele

La trattazione di questa parte dell'imbarcazione richiede di differenziare il caso di vela alare utilizzata sul catamarano di Classe C da quello delle vele standard del GS43 e del 100 piedi.

### 5.3.1 Vela alare



**Figura 5.2:** Porzione di vela alare di Classe C. Figura tratta da [24]

A causa della sua forma, simile a quella dell'ala di un aereo, e dei bassi angoli d'incidenza ai quali viene fatta lavorare, può essere studiata attraverso la teoria della linea portante. Come visibile nella fig.(5.2) l'ala é dotata di

un flap regolabile col quale modificare la curvatura del profilo ed ottenere la migliore efficienza propulsiva.

Caricate all'interno del programma le caratteristiche geometriche dell'ala, essa viene suddivisa in un numero desiderato di sezioni, lungo l'altezza, nelle quali si riterrà la circolazione costante a tratti secondo quanto descritto nel paragrafo 3.3.4. Inoltre vengono forniti i valori dei coefficienti aerodinamici in funzione dell'angolo d'incidenza e dell'angolo di flap  $\beta$ .

Il primo passo prevede che vengano valutati gli angoli al vento apparente al centro di ciascuna delle sezioni, secondo l'approccio descritto nel paragrafo 3.1.2. Vengono definite successivamente delle funzioni che determinano i valori degli angoli d'incidenza e del flap al fine di fornire il minimo coefficiente di resistenza in funzione del coefficiente di portanza sviluppato dal profilo alare. L'ottimizzatore impone la distribuzione dei coefficienti di portanza, lungo l'apertura dell'ala, che garantisce la massima velocità dell'imbarcazione alle date condizioni di vento reale, ed interpolando tali valori, lungo la quota, è possibile trovare il coefficiente di portanza richiesto alla sezione considerata. In tale valore di  $C_L$  si valutano le funzioni precedentemente descritte determinando la regolazione da attuare sul flap e lo svergolamento da imporre all'ala.

Dai coefficienti di portanza, relativi alle sezioni, si trova inoltre il valore della velocità indotta, dalla circolazione corrispondente, in ciascuna sezione, si determina l'angolo d'incidenza indotto e di conseguenza la resistenza risultante espressa nell'eq.(3.37). Sommando tale valore a quello fornito dalle caratteristiche del profilo si valuta il coefficiente di resistenza complessivo.

Procedendo attraverso le eq.(5.3) e (5.4) si ottengono i valori di portanza e resistenza relativi a ciascuna sezione e sommandoli si perviene al valore totale delle azioni aerodinamiche agenti sulla vela. Le forze ed i momenti complessivi ottenuti dovranno essere ruotati e trasportati nel sistema di riferimento del VPP a partire da quello relativo al piano velico.

Si osserva che difficilmente l'equipaggio sarà in grado di regolare l'ala, alle singole quote scelte per la discretizzazione, con la dovuta accuratezza, ma si dovrà comunque scegliere una suddivisione sufficientemente fitta per garantire una buona accuratezza dei carichi valutati, quanto più possibile vicina ad una distribuzione continua di vorticità.

### 5.3.2 Vele classiche

Sono vele classiche con spessore approssimativamente nullo e possibilità di essere modificate nella curvatura e nella superficie. Si vedrà nel capitolo successivo che l'ottimizzatore può agire proprio su tali parametri, *flat* e *reef*, al fine di ottenere le migliori prestazioni dell'imbarcazione.

Al VPP, nel caso di analisi del Grand Soleil 43, sono stati forniti i valori dei coefficienti aerodinamici e della posizione del punto d'applicazione delle forze sul piano velico, espresso nel sistema di riferimento ad esso associato, in funzione dell'angolo al vento apparente. Come descritto tali valori sono stati valutati utilizzando SAILOPT, nel caso di vele da bolina, ed OpenFoam, da parte della Wolfson Unit, per quanto riguarda le vele per andature portanti. Si interpolano dunque tali valori sul vettore degli AWA forniti e si valutano le funzioni ottenute all'angolo corrente.

Il coefficiente di portanza che si ottiene indica il valore massimo che il piano velico riesce a produrre al dato angolo d'incidenza, di conseguenza, al fine di consentire all'ottimizzatore, e quindi all'equipaggio nella realtà, di regolare la spinta prodotta dalle vele, si è adottato il modello di Kerwin che lega il valore del  $C_L$  ai parametri di *reef* e *flat* come segue:

$$C_L = C_{L_{max}} \cdot flat \cdot reef^2 \quad (5.5)$$

Riducendo dunque la curvatura della vela o la sua superficie, ovvero rispettivamente il parametro di *flat* e di *reef* a valori minori di 1, si fa in modo che il piano velico generi un coefficiente di portanza inferiore al valore massimo. Inoltre si è considerato un coefficiente di resistenza legato al parametro di *flat* in questo modo:

$$C_D = (0.5 + 1.0(flat - 0.5)) C_{D_{max}} \quad (5.6)$$

determinato da un precedente studio effettuato su tale imbarcazione da parte degli ingegneri coi quali ho collaborato. In [25] è possibile trovare altre leggi, di uso più diffuso, che descrivono l'andamento del coefficiente di resistenza aerodinamica. In generale è possibile definire il modello aerodinamico adatto dai valori dei coefficienti forniti dal programma SAILOPT. Esso, come descritto, fornisce le forze generate dal piano velico imponendo la condizione d'equilibrio dell'imbarcazione ai differenti valori degli angoli d'assetto. Per tale motivo, consentendo al programma di variare i parametri scelti per la regolazione della potenza del piano velico, risulta possibile definire, in funzione di essi, delle funzioni opportune che descrivano l'andamento dei coefficienti aerodinamici, per la barca in esame, eseguendo un fitting della nuvola di dati alla quale si perviene.

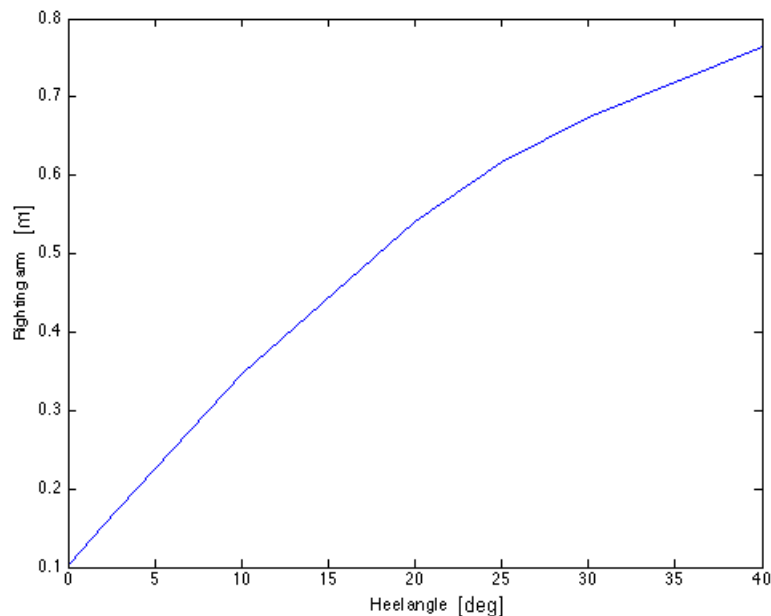
Nell'analisi delle prestazioni del 100 piedi tali calcoli sono stati eseguiti esternamente al VPP, fornendo ad esso una tabella contenente forze e momenti aerodinamici in funzione dell'angolo al vento apparente e del parametro di curvatura del profilo delle vele. Questo ha consentito di effettuare quanto descritto nel paragrafo precedente e trattare tutti i corpi nel medesimo modo. Le forze ed i momenti aerodinamici forniti sono stati valutati rispetto al

sistema di riferimento posizionato al piede d'albero e solidale con lo scafo, di conseguenza si é considerata una rotazione delle azioni nel sistema del VPP ed il trasporto dei momenti nella sua origine.

## 5.4 Momento raddrizzante

Nel caso del catamarano di Classe C il momento raddrizzante varia prevalentemente in funzione della posizione dell'equipaggio. Per tale motivo non si considera, come si vedrá nel successivo paragrafo, l'angolo di sbandamento tra le variabili di ottimizzazione.

Nel caso invece del Grand Soleil 43 e del Maxi Yacht esso é fortemente legato al valori di tale angolo d'assetto. Come osservabile dalla fig.(5.3) relativa al GS43, il braccio raddrizzante, ovvero la distanza, valutata lungo l'asse  $y$  del sistema di riferimento del VPP, tra il baricentro ed il punto d'applicazione della spinta di galleggiamento idrostatica, cresce al crescere dell'angolo di sbandamento.



**Figura 5.3:** Braccio raddrizzante vs angolo di sbandamento

La curva rappresentata tiene conto anche della posizione dell'equipaggio, ritenuto approssimativamente un punto materiale, valutando il valore del braccio raddrizzante come somma di due contributi. Uno determinato considerando



il solo peso dell'imbarcazione ed uno considerando lo spostamento del centro di massa complessivo dovuto al movimento dell'equipaggio. Interpolando i dati che definiscono la curva raffigurata, è possibile valutare il valore del braccio raddrizzante all'angolo di sbandamento corrente e determinare dunque il momento in rollio, che ne deriva, moltiplicandolo per il peso complessivo del sistema.

In tutte le imbarcazioni studiate, la funzione che valuta la somma delle forze e dei momenti agenti sul sistema si occupa di valutare il contributo a tali azioni della forza peso, considerando fisso il baricentro sui grossi monoscafi, e variandone la posizione, col movimento dell'equipaggio, sul catamarano. Considerando il nuovo assetto, determinato ad ogni passo del processo di ottimizzazione, si determina la distanza del baricentro dal punto di valutazione delle forze e dei momenti globali e si trova il valore dei momenti dovuti alla forza peso.



# Capitolo 6

## Ottimizzazione con algoritmo SLSQP

### 6.1 Nonlinear programming problem

Come ormai chiaro, il VPP si occupa di ottimizzare le prestazioni delle imbarcazioni attraverso la variazione di molteplici parametri e vincolandole alle equazioni di equilibrio statico di forze e momenti, considerando le componenti relative ai gradi di libertà d'interesse.

Il problema in esame si presenta dunque come un generico problema di programmazione non lineare di ricerca del minimo di una funzione obiettivo  $f(x)$ :

$$(NLP) : \min_{x \in \mathcal{R}^n} f(x) \quad (6.1)$$

soggetto ai vincoli:

$$g_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, m_e, \quad (6.2)$$

$$g_j(x) \geq 0, \quad j = m_e + 1, \dots, m, \quad (6.3)$$

$$x_l \leq x \leq x_u \quad (6.4)$$

dove le eq.(6.2) e (6.3) rappresentano rispettivamente i vincoli di uguaglianza e disuguaglianza ai quali é soggetto il problema, mentre le eq.(6.4) indicano i valori minimi e massimi tra i quali sono comprese le variabili di ottimizzazione. Sia la funzione obiettivo che i vincoli sono assunti avere derivata prima continua.

Nel programma sviluppato l'ottimizzazione viene eseguita con il metodo SLSQP, *Sequential Least Squares Quadratic Programming*, un algoritmo SQP,

*Sequential Quadratic Programming*, di seguito descritto con maggiore dettaglio, implementato nel pacchetto per il calcolo scientifico di Python, *Scipy.optimize*, descritto in [26].

### 6.1.1 Metodo risolutivo

Il problema descritto viene risolto iterativamente partendo da un vettore iniziale dei parametri  $x^0$ . Il valore delle variabili al passo  $(k + 1)$  viene determinato dalla soluzione al passo  $k$  tramite l'equazione:

$$x^{k+1} = x^k + \alpha^k d^k \quad (6.5)$$

con  $\alpha^k$  indicante la lunghezza del passo e  $d^k$  la direzione di discesa al minimo della funzione obiettivo.

Ad ogni passo iterativo é necessario determinare la direzione di ricerca della soluzione. Questo si effettua risolvendo un sottoproblema di programmazione quadratica, la cui scelta verrà motivata nel successivo paragrafo, formulato minimizzando lo sviluppo al second'ordine del Lagrangiano,  $L(x, \lambda)$ , del problema non lineare presentato:

$$L(x, \lambda) = f(x) - \sum_{j=1}^m \lambda_j g_j(x) \quad (6.6)$$

con  $\lambda$  i moltiplicatori di Lagrange che introducono i vincoli nel problema, che ai fine di ottenere la soluzione del QP(6.7) saranno linearizzati.

Il problema si presenta nella forma standard della programmazione quadratica come segue:

$$(QP) : \min_{d \in \mathcal{R}^n} \frac{1}{2} d^T B^k d + \nabla f(x^k) d \quad (6.7)$$

soggetto ai vincoli:

$$\nabla g_j(x^k) d + g_j(x^k) = 0, \quad j = 1, \dots, m_e \quad (6.8)$$

$$\nabla g_j(x^k) d + g_j(x^k) \geq 0, \quad j = m_e + 1, \dots, m \quad (6.9)$$

La matrice  $B^k$  identifica l'Hessiano del Lagrangiano rispetto al vettore delle variabili indipendenti.

$$B^k = \nabla_{xx}^2 L(x^k, \lambda^k) \quad (6.10)$$

La valutazione della derivata seconda della funzione di Lagrange richiederebbe un costo computazionale eccessivo, per questo motivo esse vengono

approssimate a partire dalle derivate prime note a ciascun passo iterativo. Gli algoritmi di ottimizzazione che utilizzano questa procedura per la valutazione della matrice delle derivate seconde vengono classificati come *quasi Newtoniani*.

### 6.1.2 I metodi SQP

In tale sezione verranno descritte le caratteristiche principali degli algoritmi di ottimizzazione SQP ai quali appartiene il metodo SLSQP. Essi sono metodi analoghi ai metodi di Newton comunemente utilizzati per la risoluzione di sistemi non lineari. La loro peculiarità risiede nel fatto che risolvono il NLP (6.1) attraverso la soluzione di una sequenza di problemi vincolati più semplici (6.7). Di seguito viene mostrato l'insieme delle condizioni di Khun-Tucker necessarie per l'ottimizzazione del problema non lineare:

$$(KT) : \nabla_x L(x, \lambda) = 0 \quad (6.11)$$

$$g_j(x) = 0, \quad j = 1, \dots, m_e, \quad (6.12)$$

$$g_j(x) \geq 0, \quad j = m_e + 1, \dots, m, \quad (6.13)$$

$$\lambda_j(x) \geq 0, \quad j = m_e + 1, \dots, m, \quad (6.14)$$

$$g_j(x)\lambda_j(x) = 0, \quad j = m_e + 1, \dots, m \quad (6.15)$$

Per semplicità nella trattazione verrà presentato il caso di problema non lineare soggetto a soli vincoli d'uguaglianza, per la trattazione del caso più generico con vincoli di disuguaglianza si rimanda a [27].

La condizione necessaria (6.11) impone che:

$$e(x, \lambda) = \begin{pmatrix} \nabla f(x) - A(x)\lambda \\ g(x) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (6.16)$$

avendo definito  $A(x)$  lo Jacobiano dei vincoli d'uguaglianza, di dimensioni  $n \times m_e$ , con  $n$  numero di variabili indipendenti  $x$ .

Applicando il metodo di Newton al sistema (6.19), solitamente non lineare, nelle  $n + m_e$  incognite  $(x, \lambda)$ , indicando con  $(x^k, \lambda^k)$  l'iterata  $k$ -esima del processo, si ottiene la seguente equazione:

$$\nabla e(x^k, \lambda^k) \begin{pmatrix} \Delta x \\ \Delta \lambda \end{pmatrix} = -e(x^k, \lambda^k) \quad (6.17)$$

espressa negli incrementi delle incognite.

In particolare lo Jacobiano del gradiente del Lagrangiano avrà la forma che segue:

$$\nabla e(x^k, \lambda^k) = \begin{bmatrix} H(x^k, \lambda^k) & -A(x^k) \\ A(x^k)^T & 0 \end{bmatrix} \quad (6.18)$$

con  $H(x^k, \lambda^k)$  Hessiano, rispetto ad  $x$ , del Lagrangiano.

L'equazione (6.17), dopo opportune manipolazioni, risulta essere:

$$\begin{bmatrix} H(x^k, \lambda^k) & -A(x^k) \\ A(x^k)^T & 0 \end{bmatrix} \begin{pmatrix} d^k \\ \lambda^{k+1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \nabla f(x^k) \\ g(x^k) \end{pmatrix} \quad (6.19)$$

dove  $d^k$  indica il vettore degli incrementi delle variabili  $x^k$  ovvero la direzione di ricerca della soluzione descritta nel paragrafo precedente.

É possibile dimostrare che le eq.(6.19) sono equivalenti al sistema che si otterrebbe applicando le condizioni di Khun-Tucker (6.11), per soli vincoli d'uguaglianza, al QP (6.7). Questa equivalenza motiva sostanzialmente l'utilizzo del programma quadratico (6.7) per la determinazione della direzione di discesa al minimo del funzionale, ovvero costituisce un'alternativa al risolvere il sistema non lineare, determinato dalle condizioni di Khun-Tucker, attraverso il metodo di Newton.

In [27], la descrizione dettagliata dell'algoritmo mostra la formula BFGS, modificata per il caso specifico di problemi vincolati, sviluppata da Powell ed utilizzata nel metodo SLSQP per l'approssimazione dell'Hessiano ad ogni passo iterativo.

Nell'algoritmo scelto si utilizza il metodo NNLS, *Non-negative Least Squares*, che risolve il problema SQP attraverso l'utilizzo dei minimi quadrati. Si ricorda che il metodo SLSQP é già implementato in Python, nel pacchetto adibito al calcolo scientifico *SciPy*, e viene richiamato attraverso il comando:

$$\text{scipy.optimize.fmin\_slsqp}(obj, x_0, f_{eqcons}, f_{ieqcons}, bounds, args, iter, acc, \epsilon) \quad (6.20)$$

essendo:

- $obj$ , la funzione obiettivo della quale si vuole determinare la condizione ottima
- $x_0$ , il vettore delle condizioni iniziali sui parametri di ottimizzazione
- $f_{eqcons}$ , la funzione che fornisce i vincoli di uguaglianza a cui é sottoposto il problema

- $f_{ieqcons}$ , la funzione che fornisce i vincoli di disuguaglianza
- $bounds$ , il vettore dei limiti superiore ed inferiore relativi a ciascuna variabile
- $args$ , il vettore delle variabili aggiuntive sulle quali l'ottimizzatore non agisce
- $iter$ , il massimo numero di iterazioni consentite al processo di ottimizzazione
- $acc$ , l'accuratezza con la quale si vuole che siano soddisfatte le condizioni di vincolo
- $\epsilon$ , la dimensione del passo per la determinazione delle derivate, della funzione obiettivo e dei vincoli, attraverso differenza finite.

## 6.2 Applicazione alle imbarcazioni

Entrando nel caso specifico di studio delle prestazioni di un'imbarcazione occorre definire, al fine di effettuare l'ottimizzazione attraverso l'algoritmo descritto nel paragrafo precedente, i seguenti aspetti del problema:

- le funzioni obiettivo che si intende massimizzare;
- i vincoli di uguaglianza, o disuguaglianza, ai quali esse sono sottoposte;
- il vettore delle variabili  $\mathbf{x}$  di ottimizzazione.

Di seguito verranno descritti tali aspetti per il caso specifico delle barche prese in esame.

### 6.2.1 Funzioni obiettivo

#### Modulo della velocità

La prima funzione analizzata è stata il modulo della velocità della barca:

$$BS = \sqrt{U^2 + V^2 + W^2} \quad (6.21)$$

con  $U$ ,  $V$ ,  $W$  rispettivamente la componente longitudinale di velocità, la componente trasversale e quella verticale, espresse nel sistema di riferimento del VPP. Generalmente si assume nulla la componente  $W$  nel caso di analisi delle condizioni ideali con assenza di onde.

Tale funzione non esprime però le effettive prestazioni dell'imbarcazione nel

caso di avvicinamento ad una boa di regata o, piú in generale, ad un obiettivo in navigazione. Infatti un'alta velocità ad angoli al vento reale pari a  $90 - 100deg$  non implica una buona capacità di raggiungere la boa, di bolina ad esempio, nel minor tempo possibile, poiché la componente di velocità che sarà diretta verso tale obiettivo risulterà molto piccola.

### Velocity Made Good

É opportuno dunque analizzare una differente funzione obiettivo, ovvero la *Velocity Made Good*, VMG. Tale funzione esprime la componente di velocità valutata lungo la direzione di provenienza del vento reale e risulta essere pari a:

$$VMG = BScos(CWA) \quad (6.22)$$

dove CWA, *Course Wind Angle*, indica l'angolo compreso tra la direzione di provenienza del vento reale e la direzione della velocità dell'imbarcazione, tenendo conto dunque dell'angolo di scarroccio dovuto alla componente non nulla di velocità lungo l'asse trasversale del sistema di riferimento del VPP. Tale funzione obiettivo risulta avere segno positivo, nel caso di CWA minori di  $90deg$  e segno negativo nel caso di CWA compresi tra  $90$  e  $180deg$  richiedendo opportuni accorgimenti nella fase di ottimizzazione al fine di determinare se la funzione obiettivo dovrà essere massimizzata o minimizzata. Occorre inoltre osservare che tale funzione risulta diretta verso l'obiettivo da raggiungere solo qualora la congiungente la barca e l'obiettivo stesso fosse perfettamente allineata col vento reale.

### Velocity Made to Mark

Per ovviare a questi problemi si é scelto di ottimizzare l'espressione della velocità che segue:

$$VMM = BScos(CWA - MWA) \quad (6.23)$$

detta *Velocity Made to Mark*, identifica la proiezione della BS verso l'obiettivo da raggiungere. Il MWA, *Mark Wind Angle*, indica l'angolo compreso tra la direzione del vento e la retta congiungente la barca con la boa, e sottraendolo al CWA si ottiene una funzione con segno sempre positivo e si é certi di ottimizzare la componente di velocità d'interesse.

Nell'analisi della VMG o della VMM, a differenza del caso di semplice studio della BS, si considera, tra i parametri d'ottimizzazione, anche il TWA, ovvero si lascia al programma il compito di determinare in che direzione porre la barca, rispetto al vento reale, al fine di ottenere sempre il massimo valore della velocità di avvicinamento alla boa.



### 6.2.2 Vincoli

Come descritto nel capitolo relativo al modello matematico adottato per la trattazione del sistema barca, i vincoli a cui é sottoposta l'ottimizzazione delle prestazioni sono le equazioni d'equilibrio statico del sistema, ovvero la somma nulla di forze e momenti agenti sull'imbarcazione valutati lungo i gradi di libert  di interesse. Proprio la scelta di quest'ultimi determina dunque il set di equazioni di vincolo che entreranno nel problema non lineare (6.7).

#### Classe C

Per quanto riguarda il caso del catamarano di classe C si é adottata una configurazione dello studio delle prestazioni a *6gdl*, considerando l'equilibrio rispetto tutti i gradi di libert  disponibili, traslazionali e rotazionali, valutati nel sistema di riferimento del VPP. Nell'ottimizzatore sono state per  introdotte solo cinque di queste equazioni, poich  si é scelto di valutare l'equilibrio delle forze in direzione verticale a priori. Questo si é tradotto, in termini implementativi, nel valutare ad ogni passo iterativo le forze ed i momenti idrodinamici agenti sullo scafo in funzione del dislocamento, che su una barca con massa ridotta come quella in esame, viene condizionato, oltre che dal peso del sistema, anche dalle componenti, valutate lungo l'asse  $z$ , delle forze dovute al timone, al foil ed alle vele. Variando ad ogni iterazione lo stato del sistema ed i parametri di ottimizzazione da cui dipendono le azioni agenti su di esso, occorre determinare il nuovo dislocamento e valutare l'interpolante delle azioni idrodinamiche, in funzione di quest'ultimo, al valore trovato.

Si osserva che nel caso del catamarano di Classe C il sistema di riferimento del VPP, avente le caratteristiche descritte nel paragrafo 2.1, é collocato a prua dell'imbarcazione all'intersezione dello scafo con la DWL. Il set di equazioni di vincolo risultante é:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \mathbf{F}x_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{F}y_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{M}x_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{M}y_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{M}z_i \end{pmatrix} = 0 \quad (6.24)$$

con  $n$  numero dei corpi costituenti il sistema.

#### Grand Soleil 43 new

La differenza principale rispetto al caso sopra descritto consiste nella scelta di soli quattro gradi di libert  escludendo l'equilibrio traslazionale in di-

reazione verticale, avendo osservato che le forze ed i momenti idrodinamici, valutati con REVA©, non dipendono in modo significativo dal valore del dislocamento, e l'equilibrio rotazionale attorno all'asse  $y$ , avendo ritenuto fisso il valore dell'angolo di beccheggio.

In questo secondo caso, il sistema di riferimento del VPP é invece posizionato al piede dell'albero, poiché i momenti idrodinamici forniti sono stati valutati rispetto a tale punto. Per il programma sviluppato questo non comporta alcuna modifica, occorre solo prestare attenzione nella fase di trasporto dei momenti dai sistemi di riferimento dei singoli corpi al punto descritto. Le equazioni di vincolo risultano dunque essere ridotte alle sole quattro riportate di seguito:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \mathbf{F}x_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{F}y_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{M}x_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{M}z_i \end{pmatrix} = 0 \quad (6.25)$$

### Maxi Yacht

In tale caso si sono considerati tutti i gradi di liberta del sistema rigido nello spazio. A differenza dello studio effettuato sul catamarano, si é considerato il dislocamento come parametro effettivo di regolazione delle azioni agenti sui corpi costituenti l'imbarcazione, con particolare effetto sullo scafo. Non ricercando dunque a priori l'equilibrio in direzione verticale, determinando in tale modo nella fase di ottimizzazione il valore del dislocamento, é risultato necessario introdurre la sommatoria nulla delle forze in direzione  $z$  tra le equazioni di vincolo di seguito riportate:

$$\begin{pmatrix} \sum_{i=1}^n \mathbf{F}x_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{F}y_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{F}z_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{M}x_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{M}y_i \\ \sum_{i=1}^n \mathbf{M}z_i \end{pmatrix} = 0 \quad (6.26)$$

### 6.2.3 Variabili di ottimizzazione

Si tratta di un vettore contenente le variabili indipendenti del problema, ovvero quelle variabili dalle quali dipendono le azioni agenti sui corpi del sistema e che verranno di conseguenza modificate nel corso del processo di ottimizzazione al fine di determinare la migliore condizione di navigazione. Esso differirá da studio a studio, poiché, relativamente alla tipologia d'imbarcazione, si determineranno quali sono le variabili che influenzano maggiormente le sue prestazioni.

## Classe C

Come già descritto si tratta di un catamarano molto leggero, di piccole dimensioni, dotato di vela alare con flaps, e che fornisce ad entrambi i membri dell'equipaggio la possibilità di posizionarsi al trapezio.

Nell'analisi idrodinamica effettuata sullo scafo, come già mostrato, le variabili da cui sono fatte dipendere le forze ed i momenti agenti sullo stesso sono l'angolo di scarroccio, l'angolo di beccheggio, la velocità dell'imbarcazione ed il dislocamento la cui variazione risulta essere rilevante, al fine della ricerca della condizione d'equilibrio, su barche aventi peso molto ridotto. L'angolo di sbandamento é mantenuto fisso a  $4deg$  senza ledere alla generalità della trattazione, poiché generalmente su barche di questo tipo, a differenza dei monoscafi, tale angolo d'assetto é mantenuto a valori bassi in navigazione non essendo legato al braccio del momento raddrizzante dovuto alla forza gravitazionale.

L'equilibrio della rotazione attorno all'asse d'imbardata viene gestito principalmente attraverso la regolazione dell'angolo di timone, mentre quello in rollio richiede che l'ottimizzatore determini il miglior compromesso tra la potenza del piano velico, ovvero la distribuzione dei coefficienti di portanza lungo la quota che entreranno nel modello di linea portante, la posizione dell'equipaggio, a determinare il momento raddrizzante, ed i momenti idrodinamici generati dalle forze agenti sulla parte immersa dello scafo e sulle appendici.

Queste caratteristiche consentono di scegliere il vettore delle variabili di ottimizzazione che segue:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} leeway \\ pitch \\ U \\ \psi_r \\ x_{crew} \\ y_{crew} \\ \mathbf{C}_L \end{pmatrix} \quad (6.27)$$

Occorre precisare che le prime tre variabili in realtà differiscono, nel significato che assumono, dalle successive, poiché esse identificano lo stato del sistema, mentre le altre costituiscono l'insieme dei parametri che l'equipaggio é in grado di regolare durante la navigazione. Si può ritenere che le modifiche effettuate dall'equipaggio indirettamente siano una regolazione dell'assetto della barca, anch'esso finalizzato al raggiungimento della migliore prestazione possibile.

Per quanto riguarda lo stato dell'imbarcazione la prima variabile identifica lo scarroccio a cui essa é soggetta, la seconda é l'angolo di beccheggio, mentre

la variabile  $U$  indica la componente di velocità lungo l'asse  $x$  del sistema di riferimento del VPP. Dalla componente lungo  $x$  e dall'angolo di scarroccio é possibile determinare la componente lungo l'asse  $y$ , invertendo l'eq.(2.1), e di conseguenza il modulo della velocità dell'imbarcazione che costituisce la funzione obiettivo in esame.

Le rimanenti variabili indicano in successione, l'angolo di timone, la posizione lungo gli assi  $x$  ed  $y$ , nel sistema di riferimento dello scafo, dell'equipaggio, ed il vettore dei coefficienti di portanza lungo l'altezza della vela con dimensione arbitraria, che, come già visto, non coincide con il numero di sezioni in cui é stata suddivisa l'ala nel corso dell'analisi con modello di linea portante. Nel caso analizzato, in particolare, si sono scelti sette coefficienti a fronte di una suddivisione della vela, nel modello aerodinamico, in venti sezioni.

### **Grand Soleil 43 new**

Questo monoscafo differisce sotto svariati aspetti dal catamarano di Classe C e richiede un processo di ottimizzazione che agisca su un vettore delle variabili in parte differente da quello precedentemente descritto. La barca ha un peso di un ordine di grandezza maggiore rispetto al peso dell'equipaggio, ipotizzato composto da 10 membri e con una massa complessiva di  $850kg$ , di conseguenza pur considerando come variabili la posizione, lungo gli assi  $x$  ed  $y$ , dell'equipaggio sull'imbarcazione, generalmente si mantengono fissi tali valori non modificando in modo significativo il risultato e contribuendo a velocizzare la procedura di ottimizzazione.

Nell'analisi eseguita su tale barca l'angolo di beccheggio é stato considerato fisso a  $0deg$  ed é stato introdotto, come variabile di ottimizzazione sull'assetto del sistema, l'angolo di sbandamento dal quale, come é stato descritto, dipende in modo rilevante il braccio del momento raddrizzante legato alle forze idrostatiche.

Un altro aspetto rilevante é costituito dalla scelta dei parametri che determinano la potenza del piano velico. Mentre nel caso del catamarano di classe C essa era determinata direttamente dalla scelta, da parte dell'ottimizzatore, della distribuzione dei coefficienti di portanza lungo l'apertura alare, sul monoscafo, con vele standard, il programma determina come l'equipaggio debba agire sui parametri di *flat* e *reef* al fine di modificare la posizione del centro velico ed il valore dei coefficienti di portanza e di resistenza complessivi, secondo le eq.(5.5) e (5.6). Si osserva però che il parametro di *reef*, nelle prove eseguite, é stato mantenuto costante pari ad 1 consentendo all'equipaggio di modificare solo la curvatura del profilo velico e non di ridurre la superficie dello stesso.

Infine si é considerato, anche in questo caso, l'angolo di barra del timone come parametro fondamentale al fine di ottenere la condizione di equilibrio attorno all'asse di imbardata.

Il vettore delle variabili che ne risulta avrà dunque dimensione minore rispetto a quello precedentemente descritto e sarà:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} leeway \\ heel \\ U \\ \psi_r \\ x_{crew} \\ y_{crew} \\ flat \\ reef \end{pmatrix} \quad (6.28)$$

### Maxi Yacht

A causa delle numerose appendici idrodinamiche, che caratterizzano questo progetto, e della accuratezza con la quale si sono svolte le analisi CFD delle componenti, da parte degli ingegneri che vi hanno lavorato, il numero dei parametri sui quali ha potuto agire l'ottimizzatore é risultato essere elevato. Di seguito si riporta il vettore delle variabili considerato:

$$\mathbf{x} = \begin{pmatrix} leeway \\ pitch \\ heel \\ U \\ \psi_r \\ \phi_k \\ flat \\ reef \\ dag_{ext} \\ dag_{cant} \\ rud_{cant} \\ rud_{rake} \\ sb_{cant} \\ sb_{rake} \\ dspl \end{pmatrix} \quad (6.29)$$

In aggiunta alle variabili già presentate si hanno delle regolazioni tipiche delle appendici idrodinamiche, ovvero la variazione dell'immersione e dell'angolo di inclinazione della deriva,  $dag_{ext}$  e  $dag_{cant}$ , dell'inclinazione e del rake del timone,  $rud_{cant}$  e  $rud_{rake}$ , e della pinna laterale,  $sb_{cant}$  e  $sb_{rake}$ . Inoltre, come

giá descritto si é tenuto conto del valore del dislocamento indicato dal parametro *dspl*.

Ai tre vettori presentati occorre aggiungere il parametro indicante l'angolo compreso tra la direzione del vento reale e la velocità dell'imbarcazione, *CWA*, nel caso si voglia determinare l'ottimo della funzione obiettivo VMM, dove il programma dispone l'imbarcazione con l'angolo al vento migliore per ottenere la massima velocità di avvicinamento ad un obiettivo.

In tutti i casi analizzati occorre inoltre definire i limiti, superiore ed inferiore, ai quali sono soggette le variabili presentate.

# Capitolo 7

## Risultati VPP

Nel presente capitolo verranno presentati i risultati relativi all'analisi delle prestazioni svolta sulle imbarcazioni descritte. Si presterá particolare attenzione soprattutto sulle variazioni alle quali sono soggetti i parametri di ottimizzazione e sugli effetti che questi hanno sulla funzione obiettivo.

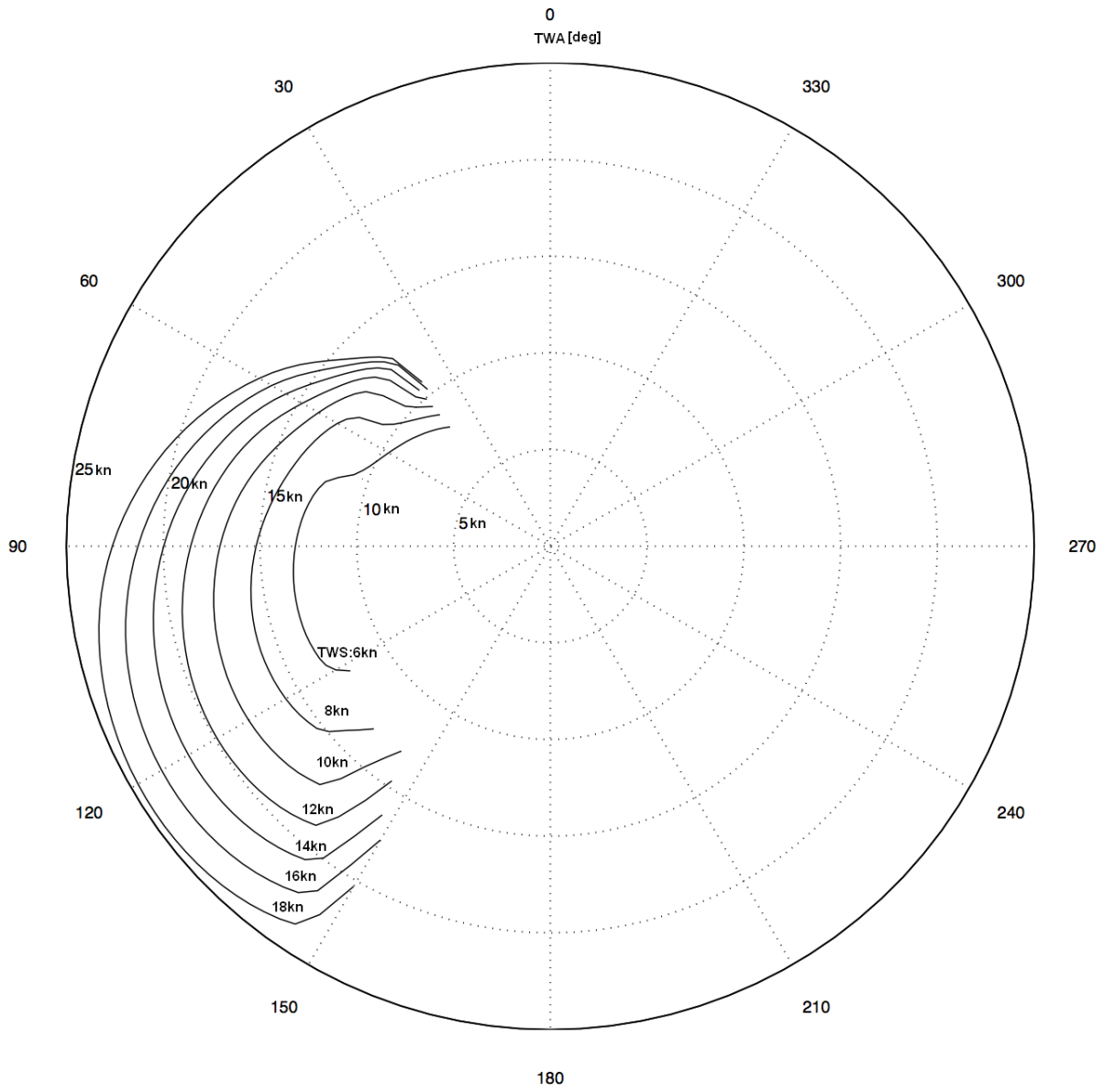
### 7.1 Classe C

Prima di procedere all'esposizione dei risultati si ricorda che l'analisi su questa imbarcazione é stata svolta considerando un angolo di sbandamento fisso pari a  $4deg$ , che dunque non comparirá tra le variabili presentate, ed un angolo di diedro, relativo al foil, di  $15deg$ , anch'esso bloccato durante il processo di ottimizzazione.

Le curve di velocità e le tabelle che seguono si riferiscono al caso di foil completamente immerso. Nel seguito della trattazione verranno confrontati i casi in cui esso sará parzialmente retratto analizzando, in particolare, l'effetto che tale variazione comporta sulla velocità dell'imbarcazione e sulla variabile che ne risulta maggiormente influenzata, ovvero l'angolo di scarroccio.

In fig.7.1 sono presentate le curve relative alla velocità dell'imbarcazione ai vari angoli ed intensitá del campo di vento reale. In particolare, partendo dalla curva a valori minori, ci si riferisce, in ordine crescente, ad intensitá del vento pari a  $6kn$ ,  $8kn$ ,  $10kn$ ,  $12kn$ ,  $14kn$ ,  $16kn$  e  $18kn$ .

A seguire le tabelle riportano i parametri determinati dall'ottimizzatore al fine di raggiungere le prestazioni rappresentate nel grafico. Si ricorda che tutte le velocità e gli angoli presentati saranno definiti rispettivamente in nodi, pari a  $0.514 \frac{m}{s}$ , e gradi.



**Figura 7.1:** Polare della velocità relativa al Classe C



TWS: 6 kn												
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	PITCH [deg]	$X_{crew}$ [m]	$Y_{crew}$ [m]	$C_L$ a partire dall'alto						
						1.654	2.075	1.929	1.813	1.629	1.364	0.587
40.0	8.0471	2.679	-0.15	2.955	4.2	1.600	1.994	1.889	1.803	1.638	1.385	0.600
44.0	8.4079	2.460	-0.01	2.752	4.2	1.552	1.935	1.866	1.804	1.658	1.415	0.618
48.0	8.7343	2.275	0.109	2.565	4.2	1.502	1.895	1.852	1.811	1.684	1.452	0.638
52.0	9.0433	2.109	0.212	2.390	4.2	1.452	1.868	1.845	1.822	1.713	1.491	0.658
56.0	9.3450	1.954	0.299	2.231	4.2	1.415	1.849	1.844	1.835	1.741	1.530	0.678
60.0	9.6524	1.800	0.380	2.080	4.2	1.378	1.830	1.841	1.846	1.764	1.563	0.694
64.0	9.9911	1.634	0.461	1.936	4.2	1.318	1.790	1.818	1.837	1.769	1.579	0.704
68.0	10.444	1.414	0.557	1.799	4.2	1.114	1.586	1.678	1.731	1.683	1.513	0.684
72.0	11.506	0.945	0.722	1.682	4.2	1.009	1.464	1.580	1.667	1.637	1.486	0.676
76.0	12.340	0.651	0.822	1.612	4.2	1.007	1.469	1.594	1.685	1.660	1.509	0.686
80.0	12.675	0.551	0.884	1.523	4.2	1.030	1.503	1.633	1.719	1.695	1.541	0.698
84.0	12.913	0.482	0.933	1.441	4.2	1.071	1.564	1.687	1.761	1.735	1.578	0.710
88.0	13.097	0.430	0.972	1.369	4.2	1.138	1.649	1.750	1.811	1.780	1.619	0.724
92.0	13.239	0.388	0.999	1.313	4.2	1.235	1.750	1.822	1.878	1.833	1.665	0.738
96.0	13.345	0.356	1.013	1.276	4.2	1.336	1.848	1.917	1.975	1.902	1.715	0.753
100.0	13.414	0.335	1.021	1.255	4.2	1.416	1.965	2.047	2.084	1.986	1.765	0.773
104.0	13.449	0.321	1.027	1.244	4.2	1.609	2.141	2.160	2.176	2.091	1.843	0.798
108.0	13.447	0.318	1.005	1.266	4.2	1.945	2.331	2.310	2.291	2.200	1.950	0.822
112.0	13.384	0.333	0.945	1.342	4.2	2.027	2.55	2.55	2.541	2.293	2.020	0.824
116.0	13.261	0.357	0.911	1.410	4.2	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.318	0.953
120.0	12.799	0.352	0.672	1.724	3.625	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.318	0.953
122.0	12.187	0.269	0.641	1.796	2.887	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.388	0.954

Tabella 7.1: Risultati Classe C per  $TWS = 6kn$

TWS: 8 kn												
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	PITCH [deg]	X <sub>crew</sub> [m]	Y <sub>crew</sub> [m]	C <sub>L</sub> a partire dall'alto						
40.0	8.8712	2.247	0.169	2.441	4.2	0.957	1.318	1.350	1.368	1.313	1.177	0.537
44.0	9.2730	2.046	0.297	2.222	4.2	0.884	1.262	1.328	1.372	1.341	1.220	0.564
48.0	9.6988	1.843	0.415	2.014	4.2	0.816	1.208	1.308	1.378	1.368	1.263	0.590
52.0	10.246	1.585	0.546	1.809	4.2	0.741	1.143	1.276	1.373	1.384	1.296	0.612
56.0	11.902	0.881	0.793	1.643	4.2	0.522	0.920	1.103	1.254	1.309	1.256	0.603
60.0	12.703	0.634	0.929	1.486	4.2	0.438	0.846	1.054	1.227	1.303	1.266	0.614
64.0	13.150	0.518	1.039	1.312	4.2	0.412	0.827	1.050	1.236	1.323	1.293	0.629
68.0	13.518	0.428	1.139	1.142	4.2	0.400	0.825	1.058	1.255	1.349	1.325	0.646
72.0	13.852	0.349	1.226	0.986	4.2	0.398	0.831	1.074	1.279	1.378	1.357	0.663
76.0	14.174	0.273	1.302	0.847	4.2	0.403	0.845	1.095	1.306	1.408	1.390	0.679
80.0	14.490	0.200	1.371	0.721	4.2	0.415	0.865	1.120	1.335	1.440	1.424	0.695
84.0	14.792	0.129	1.434	0.608	4.2	0.434	0.891	1.151	1.368	1.476	1.458	0.711
88.0	15.071	0.064	1.496	0.503	4.2	0.462	0.926	1.188	1.405	1.516	1.495	0.726
92.0	15.319	0.006	1.555	0.405	4.2	0.498	0.970	1.233	1.448	1.563	1.536	0.741
96.0	15.529	-0.03	1.534	0.4	4.2	0.538	1.022	1.284	1.500	1.618	1.580	0.757
100.0	15.697	-0.07	1.511	0.4	4.2	0.590	1.090	1.346	1.566	1.677	1.626	0.771
104.0	15.819	-0.10	1.489	0.4	4.2	0.663	1.180	1.426	1.644	1.736	1.672	0.783
108.0	15.893	-0.12	1.470	0.4	4.2	0.770	1.297	1.532	1.732	1.795	1.718	0.795
112.0	15.913	-0.14	1.455	0.4	4.2	0.911	1.449	1.666	1.824	1.863	1.769	0.811
116.0	15.877	-0.15	1.451	0.4	4.2	1.052	1.633	1.804	1.946	1.971	1.837	0.833
120.0	15.781	-0.14	1.460	0.4	4.2	1.248	1.819	1.986	2.115	2.105	1.926	0.853
124.0	15.607	-0.13	1.418	0.450	4.2	1.613	2.165	2.204	2.248	2.208	2.024	0.874
128.0	15.310	-0.08	1.317	0.597	4.2	1.849	2.515	2.55	2.55	2.351	2.118	0.899
132.0	14.243	-0.11	0.847	1.259	3.047	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	0.985
136.0	13.128	-0.33	0.753	1.593	1.680	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	1.073

**Tabella 7.2:** Risultati Classe C per TWS = 8kn

TWS: 10 kn												
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	PITCH [deg]	$X_{crew}$ [m]	$Y_{crew}$ [m]	$C_L$ a partire dall'alto						
40.0	9.4347	2.053	0.355	2.114	4.2	0.523	0.868	1.004	1.114	1.147	1.092	0.529
44.0	9.9982	1.796	0.503	1.874	4.2	0.437	0.802	0.976	1.118	1.179	1.142	0.561
48.0	11.620	1.080	0.779	1.649	4.2	0.263	0.631	0.860	1.046	1.147	1.144	0.572
52.0	12.799	0.708	0.970	1.464	4.2	0.154	0.527	0.793	1.011	1.140	1.159	0.588
56.0	13.346	0.574	1.124	1.233	4.2	0.115	0.496	0.781	1.017	1.163	1.193	0.608
60.0	13.820	0.467	1.264	1.009	4.2	0.087	0.477	0.778	1.030	1.191	1.231	0.629
64.0	14.295	0.363	1.394	0.800	4.2	0.063	0.461	0.778	1.045	1.219	1.268	0.650
68.0	14.792	0.254	1.527	0.596	4.2	0.043	0.448	0.779	1.060	1.246	1.303	0.671
72.0	15.295	0.145	1.661	0.4	4.2	0.027	0.439	0.782	1.076	1.273	1.337	0.690
76.0	15.776	0.059	1.619	0.4	4.2	0.007	0.430	0.788	1.095	1.301	1.370	0.709
80.0	16.208	-0.01	1.577	0.4	4.2	-0.00	0.431	0.800	1.118	1.331	1.404	0.727
84.0	16.586	-0.07	1.534	0.4	4.2	-0.00	0.441	0.820	1.147	1.365	1.440	0.745
88.0	16.917	-0.12	1.490	0.4	4.2	0.005	0.462	0.848	1.182	1.402	1.478	0.761
92.0	17.204	-0.17	1.446	0.4	4.2	0.025	0.494	0.884	1.222	1.444	1.518	0.777
96.0	17.449	-0.21	1.403	0.4	4.2	0.055	0.537	0.929	1.268	1.491	1.562	0.792
100.0	17.653	-0.24	1.362	0.4	4.2	0.098	0.592	0.984	1.320	1.545	1.611	0.806
104.0	17.816	-0.27	1.322	0.4	4.2	0.156	0.662	1.050	1.382	1.605	1.659	0.821
108.0	17.935	-0.30	1.284	0.4	4.2	0.230	0.752	1.131	1.456	1.670	1.707	0.837
112.0	18.008	-0.32	1.248	0.4	4.2	0.324	0.866	1.229	1.547	1.738	1.753	0.852
116.0	18.031	-0.34	1.215	0.4	4.2	0.448	1.009	1.351	1.654	1.809	1.802	0.864
120.0	17.999	-0.36	1.190	0.4	4.2	0.612	1.185	1.503	1.772	1.896	1.864	0.877
124.0	17.908	-0.36	1.185	0.4	4.2	0.793	1.382	1.678	1.914	2.039	1.955	0.903
128.0	17.753	-0.36	1.182	0.4	4.2	1.024	1.658	1.898	2.109	2.155	2.039	0.915
132.0	17.509	-0.37	1.182	0.4	4.2	1.452	2.098	2.194	2.276	2.261	2.128	0.940
136.0	17.136	-0.34	1.235	0.4	4.2	1.976	2.55	2.55	2.55	2.55	2.309	1.011
140.0	14.882	-0.55	0.882	1.142	1.821	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	1.236
144.0	13.100	-0.80	0.732	1.662	0.212	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	1.512

Tabella 7.3: Risultati Classe C per  $TWS = 10kn$

TWS: 12 kn												
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	PITCH [deg]	X <sub>crew</sub> [m]	Y <sub>crew</sub> [m]	C <sub>L</sub> a partire dall'alto						
40.0	9.9221	1.942	0.493	1.898	4.2	0.220	0.554	0.771	0.946	1.042	1.046	0.531
44.0	11.920	1.082	0.816	1.671	4.2	0.036	0.382	0.657	0.887	1.029	1.069	0.555
48.0	12.971	0.775	1.030	1.432	4.2	-0.04	0.307	0.614	0.873	1.042	1.101	0.579
52.0	13.581	0.634	1.222	1.153	4.2	-0.08	0.274	0.602	0.881	1.067	1.140	0.603
56.0	14.158	0.509	1.404	0.883	4.2	-0.11	0.247	0.593	0.891	1.095	1.181	0.628
60.0	14.783	0.375	1.597	0.613	4.2	-0.14	0.220	0.584	0.900	1.122	1.222	0.652
64.0	15.443	0.240	1.749	0.4	4.2	-0.18	0.193	0.575	0.910	1.149	1.262	0.676
68.0	16.076	0.134	1.712	0.4	4.2	-0.21	0.164	0.567	0.921	1.178	1.302	0.699
72.0	16.641	0.046	1.673	0.4	4.2	-0.25	0.144	0.566	0.937	1.209	1.342	0.723
76.0	17.146	-0.02	1.630	0.4	4.2	-0.27	0.133	0.570	0.958	1.241	1.381	0.746
80.0	17.604	-0.09	1.584	0.4	4.2	-0.28	0.131	0.581	0.981	1.275	1.420	0.768
84.0	18.022	-0.15	1.535	0.4	4.2	-0.29	0.136	0.598	1.009	1.310	1.460	0.789
88.0	18.403	-0.20	1.486	0.4	4.2	-0.29	0.148	0.621	1.041	1.349	1.500	0.808
92.0	18.745	-0.25	1.436	0.4	4.2	-0.28	0.169	0.650	1.078	1.390	1.543	0.825
96.0	19.046	-0.29	1.383	0.4	4.2	-0.26	0.200	0.686	1.119	1.435	1.589	0.841
100.0	19.304	-0.33	1.327	0.4	4.2	-0.23	0.242	0.732	1.166	1.484	1.637	0.855
104.0	19.517	-0.36	1.268	0.4	4.2	-0.19	0.299	0.788	1.221	1.538	1.684	0.870
108.0	19.684	-0.39	1.206	0.4	4.2	-0.13	0.373	0.858	1.286	1.597	1.731	0.886
112.0	19.802	-0.42	1.142	0.4	4.2	-0.05	0.469	0.944	1.362	1.662	1.775	0.902
116.0	19.868	-0.44	1.079	0.4	4.2	0.041	0.589	1.049	1.455	1.732	1.821	0.918
120.0	19.880	-0.45	1.021	0.4	4.2	0.167	0.738	1.176	1.566	1.812	1.875	0.931
124.0	19.833	-0.47	0.975	0.4	4.2	0.325	0.918	1.331	1.695	1.914	1.950	0.942
128.0	19.722	-0.47	0.946	0.4	4.2	0.524	1.133	1.520	1.850	2.053	2.043	0.963
132.0	19.539	-0.48	0.917	0.4	4.2	0.783	1.440	1.770	2.063	2.170	2.115	0.978
136.0	19.258	-0.49	0.894	0.4	4.2	1.225	1.905	2.125	2.259	2.288	2.202	1.000
140.0	18.845	-0.47	0.933	0.4	4.2	1.797	2.448	2.55	2.55	2.55	2.392	1.031
144.0	16.254	-0.79	1.019	0.829	1.527	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	1.444
146.0	14.637	-0.93	0.833	1.287	0.260	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	1.829

Tabella 7.4: Risultati Classe C per TWS = 12kn

TWS: 14 kn												
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	PITCH [deg]	X <sub>crew</sub> [m]	Y <sub>crew</sub> [m]	C <sub>L</sub> a partire dall'alto						
40.0	10.516	1.803	0.633	1.760	4.2	-0.00	0.318	0.590	0.821	0.968	1.017	0.536
44.0	12.817	0.939	0.993	1.544	4.2	-0.16	0.164	0.491	0.773	0.966	1.050	0.567
48.0	13.539	0.768	1.232	1.224	4.2	-0.20	0.126	0.474	0.778	0.991	1.091	0.594
52.0	14.210	0.624	1.464	0.904	4.2	-0.25	0.094	0.462	0.787	1.020	1.136	0.622
56.0	14.961	0.462	1.744	0.548	4.2	-0.29	0.061	0.449	0.795	1.048	1.180	0.650
60.0	15.757	0.313	1.851	0.4	4.2	-0.34	0.022	0.433	0.803	1.077	1.226	0.678
64.0	16.494	0.195	1.827	0.4	4.2	-0.39	-0.01	0.420	0.814	1.109	1.273	0.706
68.0	17.152	0.098	1.799	0.4	4.2	-0.43	-0.04	0.413	0.828	1.143	1.320	0.734
72.0	17.754	0.013	1.765	0.4	4.2	-0.47	-0.06	0.411	0.845	1.176	1.364	0.761
76.0	18.317	-0.06	1.731	0.4	4.2	-0.5	-0.08	0.413	0.865	1.211	1.408	0.787
80.0	18.845	-0.13	1.692	0.4	4.2	-0.5	-0.09	0.420	0.886	1.246	1.451	0.813
84.0	19.331	-0.20	1.649	0.4	4.2	-0.5	-0.10	0.431	0.911	1.282	1.494	0.836
88.0	19.772	-0.26	1.600	0.4	4.2	-0.5	-0.09	0.448	0.939	1.321	1.538	0.857
92.0	20.168	-0.31	1.546	0.4	4.2	-0.5	-0.08	0.470	0.971	1.362	1.585	0.877
96.0	20.518	-0.36	1.485	0.4	4.2	-0.5	-0.06	0.499	1.009	1.406	1.634	0.894
100.6	20.821	-0.40	1.414	0.4	4.2	-0.5	-0.02	0.537	1.053	1.454	1.683	0.911
104.0	21.077	-0.43	1.330	0.4	4.2	-0.46	0.018	0.586	1.103	1.504	1.728	0.928
108.0	21.284	-0.46	1.235	0.4	4.2	-0.41	0.081	0.647	1.161	1.557	1.771	0.945
112.0	21.440	-0.48	1.133	0.4	4.2	-0.34	0.162	0.723	1.230	1.617	1.813	0.962
116.0	21.543	-0.50	1.030	0.4	4.2	-0.26	0.265	0.817	1.313	1.684	1.859	0.978
120.0	21.590	-0.52	0.930	0.4	4.2	-0.15	0.393	0.930	1.412	1.762	1.913	0.992
124.0	21.578	-0.52	0.842	0.4	4.2	-0.03	0.549	1.066	1.531	1.859	1.988	1.001
128.0	21.503	-0.53	0.764	0.4	4.2	0.136	0.745	1.236	1.675	1.977	2.073	1.011
132.0	21.358	-0.54	0.689	0.4	4.2	0.368	1.010	1.459	1.860	2.105	2.141	1.034
136.0	21.129	-0.54	0.625	0.4	4.2	0.693	1.379	1.762	2.099	2.220	2.208	1.041
140.0	20.790	-0.54	0.604	0.4	4.2	1.167	1.882	2.147	2.328	2.447	2.347	1.077
144.0	19.933	-0.60	0.701	0.4	3.700	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	1.310
148.0	16.386	-1.06	1.021	0.863	0.365	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.055

Tabella 7.5: Risultati Classe C per TWS = 14kn

TWS: 16 kn												
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	PITCH [deg]	X <sub>crew</sub> [m]	Y <sub>crew</sub> [m]	C <sub>L</sub> a partire dall'alto						
38.0	10.297	2.053	0.590	1.835	4.2	-0.10	0.194	0.483	0.732	0.900	0.970	0.523
42.0	12.831	1.074	0.999	1.613	4.2	-0.27	0.047	0.392	0.696	0.914	1.022	0.565
46.0	13.627	0.888	1.284	1.253	4.2	-0.32	0.008	0.375	0.703	0.942	1.067	0.595
50.0	14.399	0.722	1.581	0.876	4.2	-0.37	-0.02	0.361	0.711	0.971	1.114	0.626
54.0	15.292	0.528	1.989	0.4	4.2	-0.41	-0.06	0.346	0.719	1.002	1.163	0.659
58.0	16.202	0.374	1.985	0.4	4.2	-0.48	-0.11	0.326	0.728	1.036	1.217	0.691
62.0	17.014	0.249	1.973	0.4	4.2	-0.5	-0.16	0.311	0.737	1.070	1.269	0.723
66.0	17.752	0.143	1.956	0.4	4.2	-0.5	-0.20	0.301	0.748	1.105	1.320	0.756
70.0	18.451	0.043	1.940	0.4	4.2	-0.5	-0.24	0.294	0.761	1.141	1.369	0.787
74.0	19.115	-0.05	1.925	0.4	4.2	-0.5	-0.27	0.290	0.778	1.177	1.418	0.818
78.0	19.734	-0.13	1.905	0.4	4.2	-0.5	-0.29	0.290	0.796	1.214	1.465	0.848
82.0	20.306	-0.21	1.879	0.4	4.2	-0.5	-0.31	0.294	0.818	1.253	1.514	0.876
86.0	20.829	-0.28	1.845	0.4	4.2	-0.5	-0.32	0.303	0.842	1.292	1.565	0.901
90.0	21.304	-0.35	1.796	0.4	4.2	-0.5	-0.33	0.316	0.870	1.333	1.616	0.924
94.0	21.730	-0.40	1.730	0.4	4.2	-0.5	-0.32	0.336	0.900	1.375	1.666	0.945
98.0	22.108	-0.45	1.644	0.4	4.2	-0.5	-0.30	0.363	0.936	1.417	1.713	0.965
102.0	22.431	-0.49	1.542	0.4	4.2	-0.5	-0.26	0.399	0.978	1.463	1.758	0.986
106.0	22.698	-0.52	1.421	0.4	4.2	-0.5	-0.21	0.446	1.028	1.511	1.800	1.005
110.0	22.908	-0.54	1.285	0.4	4.2	-0.5	-0.14	0.506	1.088	1.563	1.841	1.024
114.0	23.061	-0.55	1.142	0.4	4.2	-0.5	-0.05	0.580	1.160	1.623	1.887	1.040
118.0	23.160	-0.56	0.993	0.4	4.2	-0.47	0.051	0.672	1.245	1.693	1.940	1.053
122.0	23.203	-0.56	0.843	0.4	4.2	-0.37	0.175	0.783	1.343	1.776	2.009	1.060
126.0	23.188	-0.56	0.697	0.4	4.2	-0.24	0.331	0.922	1.464	1.876	2.084	1.067
130.0	23.111	-0.56	0.550	0.4	4.2	-0.07	0.540	1.103	1.617	1.991	2.150	1.081
134.0	22.960	-0.56	0.411	0.4	4.2	0.164	0.819	1.340	1.816	2.118	2.207	1.102
138.0	22.721	-0.56	0.297	0.4	4.2	0.492	1.197	1.657	2.070	2.251	2.286	1.106
142.0	22.374	-0.55	0.281	0.4	4.2	0.930	1.650	2.044	2.308	2.55	2.55	1.102
146.0	21.491	-0.61	0.303	0.4	3.729	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	1.437
150.0	17.545	-1.22	1.255	0.456	0.091	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55

Tabella 7.6: Risultati Classe C per TWS = 16kn

TWS: 18 kn												
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	PITCH [deg]	X <sub>crew</sub> [m]	Y <sub>crew</sub> [m]	C <sub>L</sub> a partire dall'alto						
38.0	10.765	2.001	0.685	1.820	4.2	-0.23	0.057	0.377	0.657	0.859	0.958	0.531
42.0	13.158	1.147	1.112	1.577	4.2	-0.38	-0.06	0.308	0.639	0.885	1.019	0.577
46.0	13.988	0.963	1.458	1.159	4.2	-0.43	-0.09	0.293	0.647	0.915	1.068	0.610
50.0	14.928	0.756	1.931	0.618	4.2	-0.48	-0.13	0.277	0.655	0.947	1.119	0.645
54.0	15.974	0.552	2.0	0.529	4.2	-0.5	-0.18	0.257	0.656	0.973	1.166	0.679
58.0	16.925	0.387	2.0	0.509	4.2	-0.5	-0.22	0.239	0.657	0.997	1.211	0.711
62.0	17.786	0.248	2.0	0.483	4.2	-0.5	-0.25	0.226	0.660	1.022	1.256	0.743
66.0	18.609	0.117	2.0	0.455	4.2	-0.5	-0.28	0.216	0.665	1.046	1.298	0.773
70.0	19.397	-0.00	2.0	0.427	4.2	-0.5	-0.30	0.209	0.671	1.069	1.338	0.804
74.0	20.140	-0.11	2.0	0.4	4.2	-0.5	-0.32	0.205	0.680	1.096	1.380	0.835
78.0	20.835	-0.21	2.0	0.4	4.2	-0.5	-0.35	0.202	0.698	1.135	1.432	0.869
82.0	21.483	-0.30	2.0	0.4	4.2	-0.5	-0.38	0.202	0.721	1.180	1.489	0.904
86.0	22.083	-0.37	2.0	0.4	4.2	-0.5	-0.41	0.205	0.748	1.230	1.552	0.936
90.0	22.628	-0.43	2.0	0.4	4.2	-0.5	-0.45	0.210	0.779	1.285	1.623	0.968
94.0	23.104	-0.49	2.0	0.4	4.2	-0.5	-0.48	0.219	0.817	1.350	1.701	1.001
98.0	23.504	-0.53	1.971	0.4	4.2	-0.5	-0.5	0.217	0.852	1.423	1.785	1.039
102.0	23.832	-0.56	1.883	0.4	4.2	-0.5	-0.5	0.250	0.900	1.479	1.838	1.070
106.0	24.097	-0.59	1.787	0.4	4.2	-0.5	-0.5	0.295	0.959	1.542	1.895	1.099
110.0	24.303	-0.60	1.608	0.4	4.2	-0.5	-0.44	0.348	1.012	1.590	1.942	1.116
114.0	24.458	-0.60	1.386	0.4	4.2	-0.5	-0.34	0.414	1.070	1.635	1.985	1.126
118.0	24.564	-0.60	1.153	0.4	4.2	-0.5	-0.21	0.498	1.142	1.689	2.032	1.131
122.0	24.623	-0.60	0.917	0.4	4.2	-0.5	-0.06	0.606	1.233	1.755	2.083	1.133
126.0	24.632	-0.59	0.671	0.4	4.2	-0.42	0.112	0.744	1.345	1.835	2.130	1.138
130.0	24.586	-0.58	0.424	0.4	4.2	-0.23	0.324	0.920	1.486	1.933	2.177	1.148
134.0	24.476	-0.56	0.197	0.4	4.2	-0.02	0.588	1.145	1.673	2.057	2.230	1.166
138.0	24.287	-0.55	0.002	0.4	4.2	0.260	0.927	1.435	1.920	2.205	2.307	1.179
142.0	24.002	-0.54	-0.05	0.4	4.2	0.602	1.281	1.780	2.169	2.55	2.55	1.203
146.0	23.572	-0.52	-0.29	0.4	4.2	1.447	2.161	2.402	2.55	2.55	2.55	1.207
150.0	20.321	-0.99	0.707	0.4	1.095	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.55	2.289

Tabella 7.7: Risultati Classe C per TWS = 18kn

### 7.1.1 Analisi dei dati

#### Velocità dell'imbarcazione

Osservando il grafico 7.1 si nota che, per tutte le velocità del vento reale considerate, le prestazioni di tale tipologia d'imbarcazione subiscono forti cali sia alle andature di bolina stretta che a quelle portanti ad ampi angoli di vento reale. Questo è dovuto al fatto che, le alte velocità raggiunte, relativamente al valore dell'intensità del vento, fanno sì che il catamarano veda angoli al vento apparenti sempre molto stretti, a bassi TWA, non consentendo alla vela alare di generare una buona spinta propulsiva, poiché la maggior parte della forza aerodinamica prodotta sarà diretta trasversalmente allo scafo generando un momento sbandante. Alle andature portanti invece questa tipologia di piano velico, progettato per lavorare ad AWA ridotti, non riesce a sviluppare una forza aerodinamica in grado di sostenere il moto dell'imbarcazione a buoni livelli anche per TWA molto ampi.

È infatti alle andature comprese tra la bolina larga ed il lasco che il catamarano è in grado di sviluppare le prestazioni migliori raggiungendo angoli al vento apparente ottimali. In particolare si osserva che il massimo valore di velocità risulta compreso, al crescere dell'intensità del vento reale, tra  $104deg$ , per velocità di  $6kn$ , e  $126deg$  a  $18kn$ .

#### Angolo di scarroccio

Dalle tabelle presentate è possibile osservare che il valore dell'angolo di scarroccio, indicato con l'acronimo LW, caratterizzante il moto dell'imbarcazione nelle condizioni di navigazione analizzate, risulta assumere i valori maggiori in bolina, come è ovvio attendersi, diminuendo ad angoli del vento reale maggiori fino a divenire negativo nelle andature portanti.

In particolare tale parametro, a parità di angolo del vento reale, risulta maggiore alle intensità del vento minori.

Lo scarroccio negativo è dovuto ad una eccessiva area del foil immersa nelle andature a TWA maggiori, dove non si necessita di elevata forza trasversale da parte dell'appendice idrodinamica, poiché l'ala genera una forza lungo l'asse  $y$  minore essendo maggiori gli angoli al vento apparente. Per migliorare le prestazioni in tali andature è possibile diminuire l'immersione della deriva come verrà presentato nel successivo paragrafo.

#### Posizione dell'equipaggio

Nel VPP sviluppato, come già detto, è possibile modificare la posizione dell'equipaggio durante l'ottimizzazione delle prestazioni.

Osservando i valori di tale variabile lungo gli assi  $x$  ed  $y$  dell'imbarcazione,



dalle tabelle riportate, si può notare come su di una barca molto leggera sia rilevante lo spostamento del baricentro dell'equipaggio.

A bassi valori di TWA l'ottimizzatore colloca l'equipaggio più a prua rispetto al caso di andature ad angoli al vento reale maggiori, dove viene indietreggiato fino a raggiungere il limite inferiore fissato a  $0.4m$  dallo specchio di poppa. Mediamente la posizione lungo  $x$  risulta più avanzata nel caso di intensità del vento minori.

Per quanto riguarda invece la posizione lungo l'asse  $y$ , si osserva che l'equipaggio viene posizionato prevalentemente al trapezio, ovvero ad una distanza del baricentro dell'equipaggio stimata di  $4.2m$  dallo scafo sottovento. È interessante notare che, ad angoli del vento reale sempre maggiori, per intensità del vento crescenti, il baricentro dell'equipaggio viene spostato all'interno dell'imbarcazione, al fine di aiutare il piano velico a sbandare quest'ultima, consentendo allo scafo sopravento di uscire dall'acqua e ridurre così la resistenza idrodinamica. Quando la variabile  $Y_{crew}$  è prossima allo zero, fissato come limite inferiore, significa che il prodiere si trova posizionato al trapezio sullo scafo sottovento.

### Distribuzione di portanza sull'ala

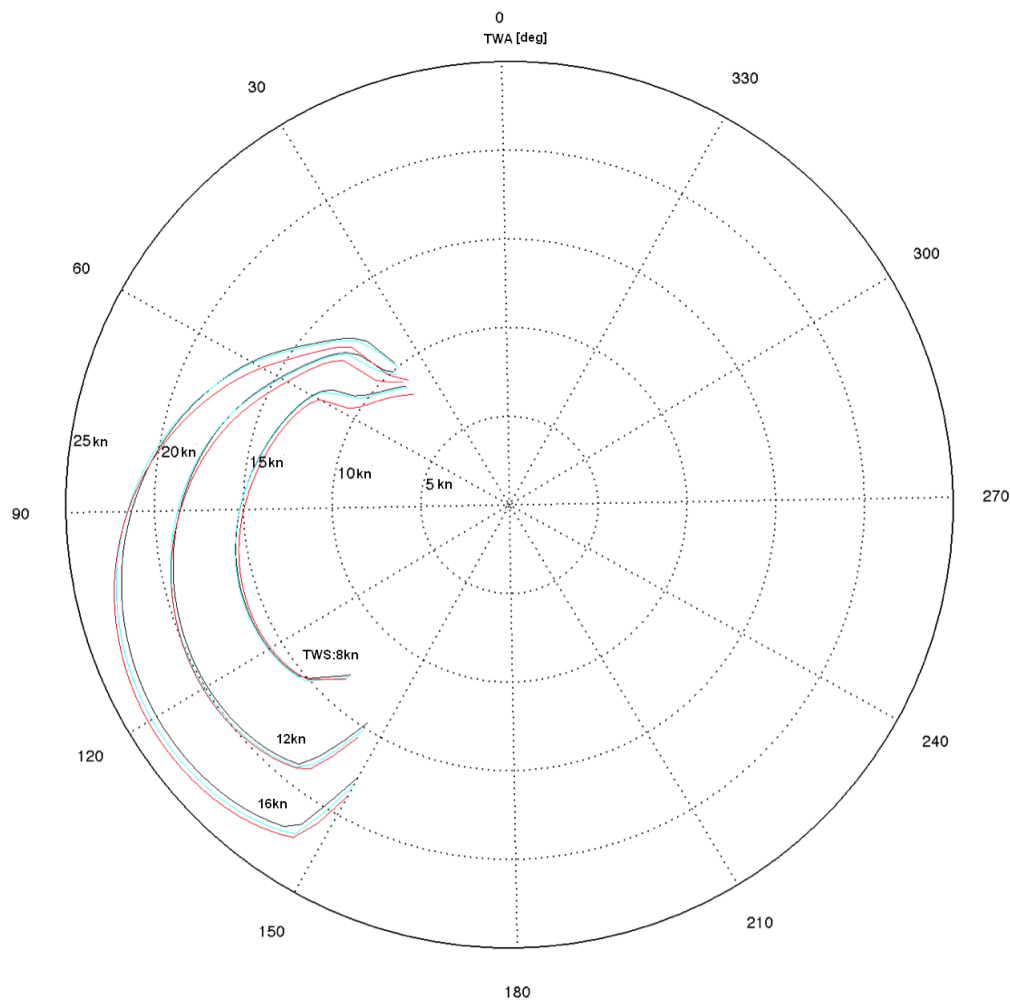
I valori dei coefficienti di portanza presentati si riferiscono a sette differenti quote lungo l'albero dell'imbarcazione. L'aspetto principale relativo a tale parametro risiede nella regolazione finalizzata a raggiungere il migliore compromesso tra equilibrio del momento di rollio e massima spinta propulsiva. Alle TWS minori si osserva che ad angoli al vento reale bassi vengono aumentati i  $C_L$  relativi alle quote maggiori, al fine di generare il momento sbandante necessario per mantenere lo scafo sopravento fuori dall'acqua. Col crescere dei valori di TWA si raggiunge la configurazione più comune di coefficienti elevati alle quote più basse e vela meno carica alle quote alte.

Al crescere dell'intensità del vento le sezioni più alte vengono scaricate, ovvero si associa ad esse valori dei  $C_L$  negativi fino ad un minimo fissato a  $-0.5$ , e si riduce dunque il momento sbandante dovuto all'aerodinamica che altrimenti l'equipaggio non potrebbe contrastare.

Per tutte le velocità del vento considerate, alle andature portanti i coefficienti di portanza vengono aumentati, essendo maggiori gli angoli al vento apparenti e dunque minori le componenti sbandanti delle forze aerodinamiche generate, fino al valore massimo di  $2.55$ , relativo al valore antecedente lo stallo per il profilo alare considerato. Al fine di variare i valori dei coefficienti lungo l'altezza dell'ala il programma modifica l'angolo d'incidenza del vento sulla stessa e quello del flap. L'ala risulterà dunque opportunamente svergolata per fornire le azioni aerodinamiche richieste.

### 7.1.2 Variazione immersione del foil

In questo sottoparagrafo verrà mostrato l'effetto che la variazione della percentuale d'immersione del foil ha sulle prestazioni dell'imbarcazione. In fig.7.2 sono raffigurate le polari della velocità dell'imbarcazione per tre valori dell'intensità del vento reale e tre valori di immersione dell'appendice, al 60%, 80% e 100%. Quest'ultimo é equivalente alla configurazione utilizzata nell'analisi finora descritta.



**Figura 7.2:** Polare a TWS di 8kn, 12kn e 16kn per differenti percentuali di immersione del foil.

Le curve rosse si riferiscono ad una deriva immersa al 60%, quelle azzurre all'80%, mentre quelle nere al 100%. Si nota che, alle andature dove gli angoli di scarroccio richiesti sono maggiori, ovvero in bolina stretta a bassi

angoli di vento reale, le prestazioni decadono diminuendo l'area di deriva immersa, mentre ad angoli elevati si ha l'effetto opposto, con un aumento delle prestazioni per foil immerso al 60%, lá dove, dalle tabelle mostrate precedentemente, si osserva che l'angolo di scarroccio diviene negativo. In particolare l'effetto diviene piú rilevante al crescere della velocità del vento reale. Inoltre al crescere della TWS risulta minore l'angolo al quale si ha prestazione migliore con immersione ridotta della deriva rispetto al caso di immersione completa.

Confrontando i risultati presentati nelle tabelle 7.8, 7.9 e 7.10 rispettivamente con quelli forniti nelle tabelle 7.2, 7.4 e 7.6, si osserva che le prestazioni migliori si ottengono con deriva completamente immersa, ad angoli del vento reale ridotti, con deriva immersa all'80%, nel caso di andature con TWA intermedi, e con deriva immersa al 60% per andature piú ampie. In particolare é possibile concludere che non si ottengono vantaggi dal retrarre il foil nelle condizioni di intensità del vento paria  $8kn$ , dove degradano a causa degli eccessivi angoli di scarroccio richiesti, mentre per valori di TWS maggiori il vantaggio tratto da tale accorgimento aumenta. Si osserva inoltre che l'angolo di scarroccio, con deriva immersa solo parzialmente, diviene negativo solo alle velocità del vento maggiori per TWA elevati, in particolare nel caso di foil immerso al 60%.

Foil immerso al 60%			Foil immerso all'80%		
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]
40.0	8.2298	4.0	40.0	8.7464	3.156
44.0	8.6916	4.0	44.0	9.1506	2.954
52.0	9.5854	3.950	52.0	10.073	2.498
56.0	10.110	3.683	56.0	11.404	1.835
64.0	12.853	2.328	64.0	13.112	1.216
72.0	13.603	2.086	72.0	13.824	1.027
80.0	14.234	1.893	80.0	14.473	0.858
88.0	14.831	1.706	88.0	15.074	0.702
96.0	15.331	1.545	96.0	15.555	0.575
104.0	15.669	1.432	104.0	15.865	0.487
112.0	15.804	1.362	112.0	15.973	0.429
120.0	15.691	1.348	120.0	15.844	0.431
128.0	15.239	1.415	128.0	15.375	0.495
136.0	13.445	1.010	136.0	13.337	0.191

**Tabella 7.8:** Risultati Classe C per  $TWS = 8kn$  ad immersioni differenti di deriva

Foil immerso al 60%			Foil immerso all'80%		
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]
40.0	9.1567	4.0	40.0	9.7262	2.883
44.0	9.8181	4.0	44.0	10.840	2.347
52.0	13.175	2.524	52.0	13.504	1.371
60.0	14.323	2.213	60.0	14.705	1.093
68.0	15.644	1.872	68.0	16.048	0.797
76.0	16.880	1.600	76.0	17.180	0.5863
84.0	17.901	1.347	84.0	18.106	0.417
92.0	18.751	1.123	92.0	18.873	0.272
100.0	19.418	0.9308	100.0	19.466	0.154
108.0	19.879	0.774	108.0	19.869	0.062
116.0	20.117	0.659	116.0	20.067	0.00
124.0	20.110	0.578	124.0	20.036	-0.05
132.0	19.811	0.557	132.0	19.735	-0.07
140.0	19.100	0.608	140.0	19.036	-0.04
146.0	15.629	0.00	146.0	15.103	-0.55

**Tabella 7.9:** Risultati Classe C per  $TWS = 12kn$  ad immersioni differenti di deriva

Foil immerso al 60%			Foil immerso all'80%		
TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	TWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]
38.0	9.0792	4.0	38.0	9.9414	3.086
46.0	13.035	2.922	46.0	13.496	1.684
54.0	14.556	2.536	54.0	15.136	1.320
62.0	16.402	2.120	62.0	16.955	0.942
70.0	18.076	1.741	70.0	18.485	0.700
78.0	19.602	1.444	78.0	19.857	0.459
86.0	20.934	1.116	86.0	21.030	0.245
94.0	22.023	0.833	94.0	21.990	0.072
102.0	22.851	0.611	102.0	22.726	-0.05
110.0	23.412	0.442	110.0	23.221	-0.15
118.0	23.712	0.307	118.0	23.479	-0.21
126.0	23.749	0.207	126.0	23.501	-0.25
134.0	23.507	0.149	134.0	23.262	-0.27
142.0	22.896	0.115	142.0	22.643	-0.52
150.0	18.758	-0.40	150.0	18.118	-0.86

**Tabella 7.10:** Risultati Classe C per  $TWS = 16kn$  ad immersioni differenti di deriva

### 7.1.3 Valutazione della VMM ottima

Verranno ora presentati i risultati relativi alla VMM ottima, presentata nel paragrafo 7.2.1, nel caso di quattro differenti angoli compresi tra la direzione di provenienza del vento e la retta congiungente l'imbarcazione col punto da raggiungere in navigazione.

Per il caso di andature risalenti il vento si sono scelti MWA pari a  $0deg$ , ovvero il caso in cui si voglia raggiungere la boa di bolina in regata, e  $30deg$ , mentre per le andature portanti si presentano i risultati a MWA pari a  $180deg$ , nel caso di navigazione verso la boa di poppa, e  $150deg$ . Di seguito le tabelle mostrano i valori della VMM ed i rispettivi angoli del vento reale ai quali si ottengono.

<b>MWA:0deg</b>		
TWS [kn]	TWA [deg]	VMM [kn]
6	38.435	6.1771
8	56.377	6.6685
10	49.503	8.0006
12	45.880	8.7463
14	43.891	9.2199
16	42.866	9.5449
18	42.521	9.7813
<b>MWA:30deg</b>		
TWS [kn]	TWA [deg]	VMM [kn]
6	73.534	8.6985
8	60.107	11.001
10	57.030	12.000
12	62.092	12.815
14	62.554	13.687
16	62.479	14.430
18	63.290	15.091

**Tabella 7.11:** Risultati VMM relativa a Classe C per MWA di  $0deg$  e  $30deg$

<b>MWA:180deg</b>		
TWS [ <i>kn</i> ]	TWA [ <i>deg</i> ]	VMM [ <i>kn</i> ]
6	121.52	6.4970
8	129.42	9.6145
10	136.47	12.368
12	140.64	14.495
14	143.52	16.366
16	145.59	18.063
18	147.12	19.633
<b>MWA:150deg</b>		
TWS [ <i>kn</i> ]	TWA [ <i>deg</i> ]	VMM [ <i>kn</i> ]
6	118.13	11.127
8	128.82	14.206
10	133.30	16.665
12	135.85	18.686
14	137.54	20.519
16	138.78	22.229
18	140.17	23.790

**Tabella 7.12:** Risultati VMM relativa a Classe C per MWA di 180deg e 150deg

Si osserva che nel caso di MWA pari a 0deg l'angolo del vento reale al quale si ottiene la migliore VMM diminuisce al crescere della TWS, con la sola eccezione di velocità del vento pari a 6kn, poiché l'incremento rilevante delle prestazioni in tale condizione avviene per angoli di navigazione alti, di circa 70-80deg, come riscontrabile dai dati riportati in tab.7.1 ed in fig.7.1. Per MWA di 180deg l'angolo al vento reale cresce all'aumentare della TWS in accordo con i dati forniti precedentemente, nei quali risulta che alle TWS maggiori l'imbarcazione riesce a mantenere buone prestazioni fino ad angoli del vento sempre maggiori. Ai valori di MWA intermedi, per direzione del vento non allineata con l'obiettivo da raggiungere, la VMM cresce e l'ottimizzatore consente di raggiungere angoli al vento maggiori nelle andature di bolina ed angoli al vento minori nelle andature portanti, cercando di navigare nella regione di TWA dove la velocità dell'imbarcazione è maggiore, come visto in fig.7.1.

## 7.2 Grand Soleil 43 new

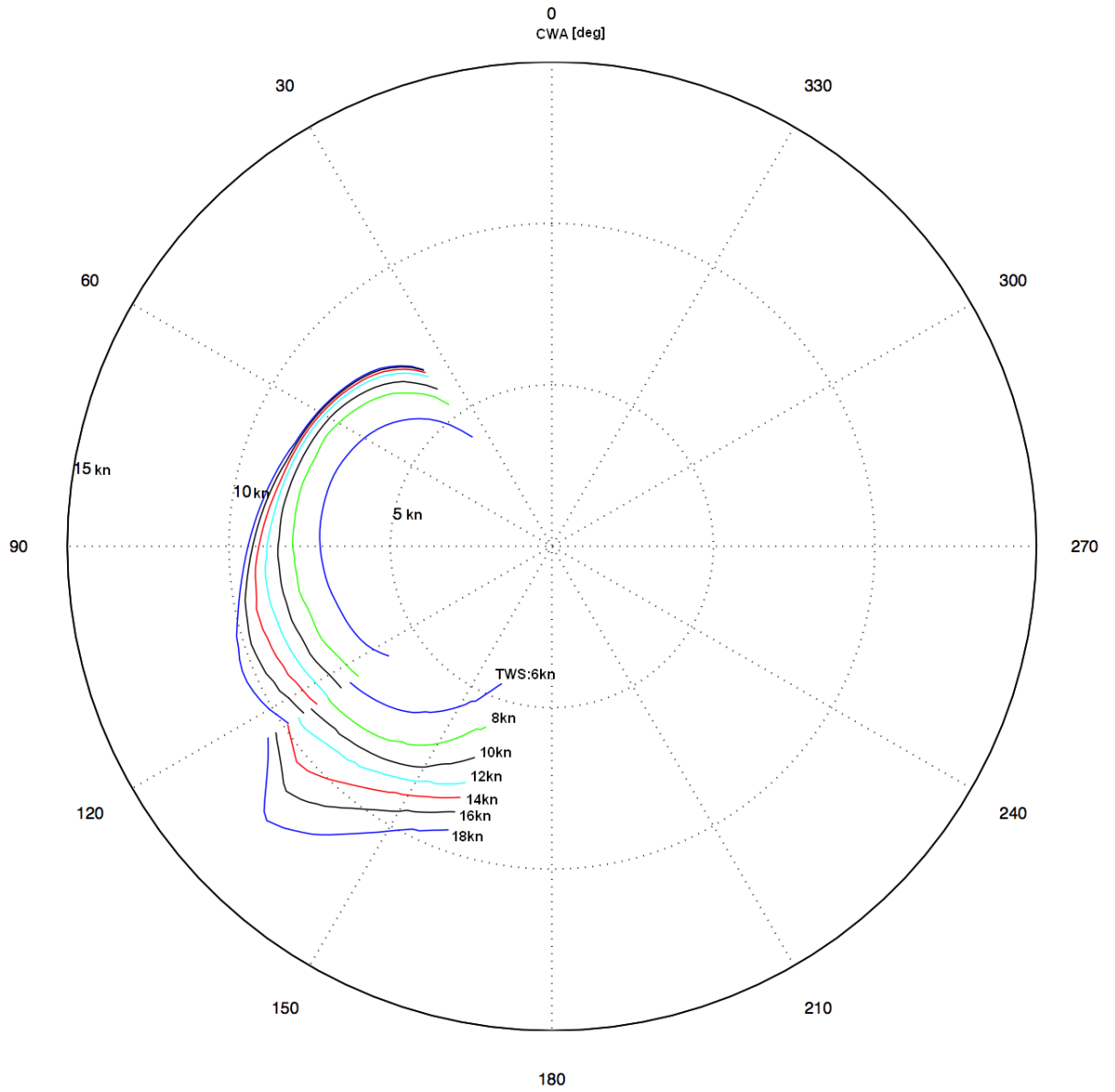
Nell'analisi che ha fornito i risultati presentati nel seguente capitolo si é ritenuto che l'imbarcazione avesse un angolo di beccheggio nullo, che dunque non verrà presentato tra i valori che descrivono l'assetto del sistema nella condizione ottima di navigazione. Inoltre si é considerato il baricentro dell'equipaggio fisso lungo l'asse  $x$  del sistema di riferimento dello scafo, a  $3.8m$  dallo specchio di poppa. Nelle andature risalenti la direzione di provenienza del vento si é scelto di posizionare manualmente il baricentro dell'equipaggio lungo l'asse  $y$ , in particolare al crescere dell'intensità del vento é stato collocato maggiormente sopravento per fornire un momento raddrizzante superiore, con limite fissato a  $1.2m$  dall'asse longitudinale di simmetria. Nelle andature portanti, invece, si é lasciato l'ottimizzatore libero di determinare il migliore compromesso tra i momenti, attorno all'asse di rollio, generati dallo sbandamento dell'imbarcazione e dal peso delle persone a bordo, poiché a tali angoli del vento reale, con spinnaker armato, ci si può trovare in condizioni di piano velico sbandante o raddrizzante, al variare del valore di CWA considerato, rendendo difficile determinare la condizione ottima di navigazione mantenendo fissa la posizione dell'equipaggio.

Si osserva che, a differenza dello studio effettuato sul catamarano, al posto dell'angolo del vento reale si é scelto di considerare il Course Wind Angle, ottenuto dunque, secondo la definizione posta nel paragrafo 6.2.1, sommando al TWA l'angolo di scarroccio.

Il parametro che influenza la potenza del piano velico é solo il *flat*, mentre si é ritenuto costante pari a 1 il parametro di *reef*.

In fig. 7.3 viene presentata la polare relativa alla velocità del GS43, valutata per intensità del vento pari a  $6kn$ ,  $8kn$ ,  $10kn$ ,  $12kn$ ,  $14kn$ ,  $16kn$  e  $18kn$ . La seconda famiglia di curve, relativa agli angoli del vento reale maggiori, si riferisce alla configurazione del piano velico, comprendente lo spinnaker, analizzata dalla Wolfson Unit di Southampton tramite il programma di fluidodinamica computazionale OpenFoam ©.

A seguire le tabelle riportano i valori delle variabili di ottimizzazione nelle condizioni di navigazione analizzate.



**Figura 7.3:** Polare della velocità relativa al GS43



TWS: 6 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
36.0	9.5893	21.177	4.1736	5.250	8.083	-0.5	1.0
42.0	10.367	22.358	5.2078	3.507	9.793	-0.5	1.0
48.0	10.760	24.018	5.8851	2.787	10.88	-0.5	1.0
54.0	10.927	25.870	6.3680	2.329	11.39	-0.5	1.0
60.0	10.916	27.877	6.7024	1.996	11.35	-0.5	1.0
66.0	10.772	29.987	6.9332	1.734	10.90	-0.5	1.0
72.0	10.535	32.143	7.0992	1.510	10.21	-0.5	1.0
78.0	10.182	34.481	7.1683	1.341	9.254	-0.5	1.0
84.0	9.7712	36.859	7.2019	1.204	8.195	-0.5	1.0
90.0	9.2860	39.396	7.1760	1.083	7.010	-0.5	1.0
96.0	8.7363	42.138	7.0942	0.972	5.768	-0.5	1.0
102.0	8.1404	45.087	6.9727	0.893	4.538	-0.5	1.0
108.0	7.5093	48.282	6.8183	0.842	3.335	-0.5	1.0
114.0	6.8679	51.624	6.6609	0.799	2.261	-0.5	1.0
120.0	6.1534	56.043	6.3839	0.780	1.227	-0.5	1.0
124.0	5.6235	60.326	6.0796	0.771	0.563	-0.5	1.0

Tabella 7.13: Risultati GS43 per  $TWS = 6kn$ 

TWS: 6 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
124.0	6.4714	49.027	7.5389	0.180	7.807	-1.08	1.0
126.0	6.2236	50.006	7.4641	0.135	7.955	-0.76	1.0
128.0	5.9723	51.044	7.3834	0.090	8.119	-0.45	1.0
130.0	5.7174	52.153	7.2962	0.044	8.313	-0.14	1.0
132.0	5.4590	53.351	7.2022	-0.00	8.617	0.177	1.0
134.0	5.1994	54.626	7.1040	-0.07	9.769	0.720	1.0
136.0	4.9323	56.104	6.9902	-0.09	9.429	0.870	1.0
138.0	4.6603	57.802	6.8631	-0.13	9.314	1.071	1.0
140.0	4.3819	59.831	6.7169	-0.15	8.958	1.2	1.0
142.0	4.0828	62.712	6.5160	-0.18	8.080	1.2	1.0
144.0	3.8109	65.370	6.3562	-0.18	5.871	0.786	1.0
146.0	3.5345	68.817	6.1632	-0.23	5.842	0.960	1.0
148.0	3.2668	72.943	5.9563	-0.28	5.838	1.121	1.0
150.0	3.0143	77.848	5.7385	-0.32	5.610	1.2	1.0
152.0	2.7825	83.915	5.4987	-0.34	5.175	1.2	1.0
154.0	2.5836	89.682	5.3115	-0.08	1.915	0.325	1.0
156.0	2.4246	98.626	5.0204	-0.11	1.931	0.419	1.0
158.0	2.3196	107.86	4.7528	-0.16	1.920	0.498	1.0
160.0	2.2562	116.69	4.5247	-0.22	1.835	0.536	1.0

Tabella 7.14: Risultati GS43 per  $TWS = 6kn$  con spinnaker

<b>TWS: 8 kn</b>							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
36.0	12.648	21.418	5.4173	4.905	15.98	-0.7	1.0
42.0	13.303	23.281	6.3803	3.529	18.57	-0.7	0.982
48.0	13.553	25.523	6.9724	2.906	20.47	-0.7	0.987
54.0	13.550	27.980	7.3473	2.415	20.19	-0.7	0.976
60.0	13.409	30.498	7.6250	2.050	20.08	-0.7	0.985
66.0	13.054	33.360	7.7972	1.802	18.75	-0.7	1.0
72.0	12.730	35.948	7.8776	1.442	15.09	-0.7	0.942
78.0	12.323	38.590	7.9783	1.273	15.11	-0.7	0.997
84.0	11.745	41.710	7.9970	1.160	12.75	-0.7	1.0
90.0	11.235	44.377	8.0308	0.998	10.92	-0.7	1.0
96.0	10.565	47.705	7.9514	0.933	8.726	-0.7	1.0
102.0	9.9098	50.863	7.8886	0.842	6.908	-0.7	1.0
108.0	9.1663	54.620	7.7355	0.777	5.052	-0.7	1.0
114.0	8.4217	58.475	7.5996	0.724	3.436	-0.7	1.0
120.0	7.6178	63.298	7.3521	0.697	1.834	-0.7	1.0
124.0	7.0983	66.604	7.2129	0.665	0.962	-0.7	1.0

**Tabella 7.15:** Risultati GS43 per  $TWS = 8kn$

<b>TWS: 8 kn</b>							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
124.0	7.6341	58.581	8.3738	-0.18	11.72	-1.19	1.0
126.0	7.3742	59.554	8.3555	-0.17	10.95	-1.04	1.0
128.0	7.0963	60.764	8.3039	-0.20	10.96	-0.68	1.0
130.0	6.8156	62.034	8.2472	-0.23	10.96	-0.34	1.0
132.0	6.5321	63.382	8.1848	-0.26	10.96	-0.02	1.0
134.0	6.2459	64.826	8.1156	-0.28	10.96	0.281	1.0
136.0	5.9571	66.397	8.0379	-0.30	10.96	0.583	1.0
138.0	5.6657	68.136	7.9497	-0.33	10.96	0.880	1.0
140.0	5.3718	70.102	7.8480	-0.34	10.95	1.164	1.0
142.0	5.0587	73.010	7.6705	-0.32	9.875	1.2	1.0
144.0	4.7790	75.130	7.5838	-0.25	7.649	0.841	1.0
146.0	4.4887	78.224	7.4308	-0.29	7.945	1.157	1.0
148.0	4.2068	81.837	7.2614	-0.29	6.942	1.115	1.0
150.0	3.9371	86.348	7.0562	-0.29	6.499	1.183	1.0
152.0	3.6907	91.653	6.8319	-0.30	5.939	1.2	1.0
154.0	3.4774	97.850	6.5879	-0.33	5.360	1.2	1.0
156.0	3.3091	105.00	6.3218	-0.38	4.801	1.2	1.0
158.0	3.1826	112.33	6.0763	-0.43	4.365	1.2	1.0
160.0	3.0443	118.01	5.9545	-0.26	1.861	0.510	1.0

**Tabella 7.16:** Risultati GS43 per  $TWS = 8kn$  con spinnaker

TWS: 10 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
36.0	15.111	22.462	6.0177	4.510	17.98	-0.9	0.822
42.0	15.614	24.893	6.8643	3.485	21.06	-0.9	0.821
48.0	15.728	27.653	7.3586	2.771	20.11	-0.9	0.791
54.0	15.636	30.544	7.6932	2.318	20.03	-0.9	0.789
60.0	15.413	33.496	7.9425	1.980	20.01	-0.9	0.801
66.0	15.060	36.570	8.1004	1.742	20.02	-0.9	0.832
72.0	14.631	39.680	8.2250	1.537	20.03	-0.9	0.877
78.0	14.143	42.790	8.3372	1.339	20.05	-0.9	0.937
84.0	13.594	45.938	8.4272	1.134	19.28	-0.9	1.0
90.0	12.974	49.206	8.4770	0.933	15.59	-0.9	1.0
96.0	12.276	52.725	8.4619	0.838	12.23	-0.9	1.0
102.0	11.521	56.504	8.4007	0.791	9.251	-0.9	1.0
108.0	10.730	60.527	8.3150	0.744	6.684	-0.9	1.0
114.0	9.9094	64.899	8.1990	0.701	4.401	-0.9	1.0
120.0	9.0346	70.318	7.9541	0.684	2.218	-0.9	1.0
124.0	8.4799	73.806	7.8578	0.644	1.016	-0.9	1.0

Tabella 7.17: Risultati GS43 per  $TWS = 10kn$ 

TWS: 10 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
124.0	8.8629	66.754	8.9907	-0.70	16.97	-1.2	1.0
126.0	8.5477	68.387	8.9220	-0.71	16.60	-0.75	1.0
128.0	8.2320	70.099	8.8496	-0.73	16.37	-0.31	1.0
130.0	7.9173	71.879	8.7764	-0.73	15.86	0.033	1.0
132.0	7.6200	73.328	8.7587	-0.55	12.33	-0.27	1.0
134.0	7.3056	75.281	8.6796	-0.53	11.68	-0.02	1.0
136.0	6.9970	77.213	8.6144	-0.29	7.998	-0.49	1.0
138.0	6.6887	79.314	8.5399	-0.28	7.507	-0.27	1.0
140.0	6.3833	81.548	8.4629	-0.31	7.503	0.034	1.0
142.0	6.0808	83.995	8.3766	-0.32	7.498	0.312	1.0
144.0	5.7829	86.753	8.2743	-0.32	7.497	0.556	1.0
146.0	5.4928	89.777	8.1648	-0.32	7.497	0.793	1.0
148.0	5.2131	93.148	8.0438	-0.34	7.499	1.023	1.0
150.0	4.9486	97.032	7.9009	-0.35	7.320	1.2	1.0
152.0	4.7177	102.18	7.6773	-0.35	6.393	1.2	1.0
154.0	4.4977	106.78	7.5296	-0.28	4.261	0.811	1.0
156.0	4.3164	112.24	7.3398	-0.36	4.597	1.082	1.0
158.0	4.1669	117.98	7.1522	-0.42	4.475	1.2	1.0
160.0	4.0546	124.04	6.9602	-0.47	4.005	1.2	1.0

Tabella 7.18: Risultati GS43 per  $TWS = 10kn$  con spinnaker

TWS: 12 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
36.0	17.457	23.382	6.4876	4.656	23.11	-1.2	0.741
42.0	17.796	26.308	7.1929	3.748	24.44	-1.2	0.717
48.0	17.819	29.444	7.6307	3.115	24.86	-1.2	0.710
54.0	17.642	32.719	7.9147	2.681	24.91	-1.2	0.716
60.0	17.350	36.040	8.1356	2.334	24.96	-1.2	0.734
66.0	16.953	39.431	8.3003	2.051	24.97	-1.2	0.766
72.0	16.475	42.877	8.4307	1.798	24.96	-1.2	0.811
78.0	15.937	46.340	8.5518	1.546	24.94	-1.2	0.870
84.0	15.348	49.796	8.6755	1.301	23.75	-1.2	0.924
90.0	14.721	53.195	8.8194	1.014	22.46	-1.2	0.995
96.0	14.013	56.778	8.9097	0.727	16.57	-1.2	1.0
102.0	13.201	60.852	8.8805	0.673	12.02	-1.2	1.0
108.0	12.331	65.376	8.7805	0.702	8.158	-1.2	1.0
114.0	11.434	70.339	8.6416	0.714	4.916	-1.2	1.0
120.0	10.522	75.965	8.4454	0.715	2.117	-1.2	1.0
124.0	9.9279	79.835	8.3434	0.675	0.477	-1.2	1.0

**Tabella 7.19:** Risultati GS43 per  $TWS = 12kn$

TWS: 12 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
124.0	10.184	73.638	9.4604	-1.11	22.37	-1.2	0.935
126.0	9.8825	74.786	9.5217	-1.18	21.87	-1.11	1.0
128.0	9.5398	76.820	9.4322	-1.20	21.88	-0.46	1.0
130.0	9.2002	78.947	9.3405	-1.22	21.87	0.142	1.0
132.0	8.8646	81.176	9.2470	-1.24	21.85	0.722	1.0
134.0	8.5324	83.589	9.1408	-1.25	21.16	1.2	1.0
136.0	8.2176	85.148	9.1741	-1.12	16.90	0.966	1.0
138.0	7.8918	88.044	9.0290	-1.05	15.94	1.2	1.0
140.0	7.5769	90.381	8.9792	-0.82	12.64	0.898	1.0
142.0	7.2701	93.448	8.8513	-0.79	12.33	1.2	1.0
144.0	6.9732	96.500	8.7467	-0.54	9.095	0.780	1.0
146.0	6.6904	99.869	8.6254	-0.49	8.052	0.842	1.0
148.0	6.4188	103.31	8.5180	-0.48	7.539	1.015	1.0
150.0	6.1638	107.02	8.4033	-0.48	7.144	1.2	1.0
152.0	5.9410	111.33	8.2459	-0.46	6.093	1.2	1.0
154.0	5.7037	115.04	8.1794	-0.36	4.023	0.838	1.0
156.0	5.5059	119.45	8.0610	-0.41	4.019	1.018	1.0
158.0	5.3350	124.14	7.9348	-0.46	4.024	1.182	1.0
160.0	5.2053	129.24	7.7837	-0.49	3.577	1.2	1.0

**Tabella 7.20:** Risultati GS43 per  $TWS = 12kn$  con spinnaker

TWS: 14 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
36.0	19.523	24.457	6.6460	4.778	23.70	-1.2	0.621
42.0	19.828	27.650	7.3443	3.778	24.58	-1.2	0.598
48.0	19.799	31.074	7.7565	3.157	24.90	-1.2	0.592
54.0	19.575	34.633	8.0238	2.739	24.93	-1.2	0.598
60.0	19.240	38.241	8.2356	2.402	24.97	-1.2	0.614
66.0	18.806	41.914	8.4010	2.121	24.98	-1.2	0.641
72.0	18.293	45.640	8.5402	1.862	25.01	-1.2	0.680
78.0	17.728	49.355	8.6881	1.464	28.16	-1.2	0.783
84.0	17.132	52.965	8.8814	1.105	29.10	-1.2	0.859
90.0	16.474	56.589	9.0712	0.769	29.16	-1.2	0.941
96.0	15.685	60.680	9.2184	0.693	25.13	-1.2	1.0
102.0	14.935	64.242	9.3495	0.423	17.62	-1.2	1.0
108.0	14.001	69.082	9.2684	0.469	11.63	-1.2	1.0
114.0	13.044	74.392	9.1029	0.583	6.992	-1.2	1.0
120.0	12.082	80.305	8.9104	0.641	3.259	-1.2	1.0
124.0	11.450	84.643	8.7589	0.642	1.035	-1.2	1.0

Tabella 7.21: Risultati GS43 per  $TWS = 14kn$ 

TWS: 14 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
124.0	11.606	79.206	9.8635	-1.20	17.80	-1.2	0.734
126.0	11.290	80.195	10.005	-1.29	17.80	-1.2	0.808
128.0	10.968	81.116	10.160	-1.38	17.81	-1.2	0.893
130.0	10.639	81.957	10.328	-1.48	17.82	-1.2	0.993
132.0	10.271	84.244	10.231	-1.41	16.44	-0.76	1.0
134.0	9.9045	87.151	10.045	-1.40	16.77	-0.15	1.0
136.0	9.5529	90.143	9.8684	-1.39	16.89	0.406	1.0
138.0	9.2165	93.231	9.7000	-1.39	16.95	0.957	1.0
140.0	8.9017	96.775	9.4844	-1.31	15.43	1.2	1.0
142.0	8.5791	99.291	9.4515	-1.09	12.69	1.092	1.0
144.0	8.2962	103.01	9.2572	-0.96	11.09	1.2	1.0
146.0	8.0061	106.15	9.1731	-0.78	9.162	1.156	1.0
148.0	7.7592	110.08	8.9977	-0.68	7.750	1.2	1.0
150.0	7.5056	113.63	8.9002	-0.56	5.849	1.059	1.0
152.0	7.2851	117.60	8.7670	-0.57	5.255	1.2	1.0
154.0	7.0844	121.68	8.6389	-0.55	4.289	1.2	1.0
156.0	6.8980	125.81	8.5261	-0.55	3.477	1.2	1.0
158.0	6.7433	130.18	8.3992	-0.57	2.814	1.2	1.0
160.0	6.6121	134.65	8.2752	-0.59	2.237	1.2	1.0

Tabella 7.22: Risultati GS43 per  $TWS = 14kn$  con spinnaker

TWS: 16 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
36.0	21.529	25.408	6.7322	4.940	24.03	-1.2	0.529
42.0	21.817	28.816	7.4362	3.852	24.65	-1.2	0.506
48.0	21.753	32.473	7.8358	3.234	24.93	-1.2	0.501
54.0	21.495	36.265	8.0931	2.826	24.95	-1.2	0.505
60.0	21.127	40.106	8.3013	2.495	24.98	-1.2	0.518
66.0	20.665	44.009	8.4704	2.213	25.02	-1.2	0.541
72.0	20.126	47.960	8.6207	1.940	25.94	-1.2	0.586
78.0	19.569	51.771	8.8421	1.506	29.85	-1.2	0.682
84.0	18.938	55.620	9.0515	1.173	29.60	-1.2	0.731
90.0	18.243	59.486	9.2627	0.828	29.51	-1.2	0.801
96.0	17.486	63.360	9.4835	0.460	29.32	-1.2	0.893
102.0	16.654	67.378	9.6734	0.180	27.41	-1.2	1.0
108.0	15.739	71.739	9.7586	0.139	16.33	-1.2	1.0
114.0	14.730	77.083	9.6852	0.342	9.675	-1.2	1.0
120.0	13.698	83.519	9.4042	0.541	4.447	-1.2	1.0
124.0	13.037	87.959	9.2528	0.591	1.731	-1.2	1.0

**Tabella 7.23:** Risultati GS43 per  $TWS = 16kn$

TWS: 16 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
124.0	13.117	83.375	10.301	-1.38	17.86	-1.2	0.640
126.0	12.776	84.392	10.486	-1.47	17.90	-1.2	0.709
128.0	12.425	85.377	10.677	-1.57	18.01	-1.2	0.789
130.0	12.065	86.223	10.897	-1.68	18.35	-1.2	0.887
132.0	11.696	86.894	11.149	-1.78	18.46	-1.2	1.0
134.0	11.307	89.020	11.110	-1.37	13.64	-1.2	1.0
136.0	10.922	91.684	10.984	-1.02	10.81	-1.2	1.0
138.0	10.555	94.950	10.768	-0.73	8.401	-1.2	1.0
140.0	10.212	98.437	10.540	-0.59	7.014	-0.93	1.0
142.0	9.8998	102.20	10.291	-0.48	5.609	-0.68	1.0
144.0	9.6130	106.05	10.055	-0.55	5.760	-0.03	1.0
146.0	9.3478	109.92	9.8446	-0.61	5.783	0.479	1.0
148.0	9.1016	113.78	9.6574	-0.68	5.787	0.932	1.0
150.0	8.8795	117.75	9.4763	-0.70	5.230	1.2	1.0
152.0	8.6806	121.78	9.3039	-0.53	2.360	0.790	1.0
154.0	8.4910	125.76	9.1629	-0.60	2.353	1.103	1.0
156.0	8.3265	129.85	9.0222	-0.63	1.747	1.2	1.0
158.0	8.1949	134.07	8.8717	-0.65	0.832	1.2	1.0
160.0	8.0687	138.22	8.7512	-0.68	0.043	1.2	1.0

**Tabella 7.24:** Risultati GS43 per  $TWS = 16kn$  con spinnaker

TWS: 18 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
36.0	23.483	26.266	6.7545	5.139	24.12	-1.2	0.455
42.0	23.776	29.840	7.4848	3.964	24.70	-1.2	0.434
48.0	23.692	33.683	7.8836	3.335	24.96	-1.2	0.427
54.0	23.406	37.670	8.1347	2.934	24.98	-1.2	0.430
60.0	23.014	41.706	8.3414	2.607	25.01	-1.2	0.440
66.0	22.529	45.802	8.5147	2.326	25.11	-1.2	0.459
72.0	22.005	49.830	8.7311	1.997	30.64	-1.2	0.553
78.0	21.415	53.861	8.9531	1.626	30.10	-1.2	0.580
84.0	20.753	57.917	9.1750	1.280	29.84	-1.2	0.622
90.0	20.026	61.990	9.4048	0.924	29.65	-1.2	0.682
96.0	19.238	66.066	9.6529	0.538	29.48	-1.2	0.764
102.0	18.392	70.106	9.9345	0.103	29.32	-1.2	0.878
108.0	17.451	74.488	10.200	-0.05	22.27	-1.2	0.969
114.0	16.454	79.012	10.327	0.018	12.58	-1.2	1.0
120.0	15.363	85.296	10.100	0.369	6.029	-1.2	1.0
124.0	14.658	90.245	9.8242	0.516	2.479	-1.2	1.0

Tabella 7.25: Risultati GS43 per  $TWS = 18kn$ 

TWS: 18 kn							
CWA [deg]	AWS [kn]	AWA [deg]	BS [kn]	LW [deg]	HEEL [deg]	$Y_{crew}$ [m]	flat
124.0	14.675	87.235	10.595	-1.44	18.05	-1.2	0.551
126.0	14.311	88.165	10.850	-1.58	18.47	-1.2	0.622
128.0	13.935	88.821	11.172	-1.79	19.57	-1.2	0.712
130.0	13.545	89.218	11.549	-1.91	19.65	-1.2	0.813
132.0	13.140	89.380	11.973	-2.0	19.52	-1.2	0.930
134.0	12.718	90.153	12.248	-1.70	15.27	-1.2	1.0
136.0	12.299	92.992	12.076	-1.32	12.00	-1.2	1.0
138.0	11.900	96.180	11.858	-1.00	9.431	-1.2	1.0
140.0	11.524	99.549	11.632	-0.71	6.975	-1.2	1.0
142.0	11.188	103.36	11.346	-0.46	4.453	-1.2	1.0
144.0	10.898	107.51	11.024	-0.51	4.326	-0.42	1.0
146.0	10.640	111.68	10.726	-0.59	4.320	0.235	1.0
148.0	10.412	115.86	10.452	-0.71	4.470	0.870	1.0
150.0	10.216	120.07	10.192	-0.73	3.805	1.2	1.0
152.0	10.043	124.26	9.9569	-0.68	2.236	1.2	1.0
154.0	9.9200	128.61	9.7003	-0.67	0.608	1.2	1.0
156.0	9.7028	132.16	9.6388	-0.66	-5.0	-0.62	1.0
158.0	9.5707	136.20	9.4850	-0.74	-5.0	-0.34	1.0
160.0	9.4540	140.23	9.3478	-0.82	-5.0	-0.10	1.0

Tabella 7.26: Risultati GS43 per  $TWS = 18kn$  con spinnaker

## 7.2.1 Analisi dei dati

### Velocità dell'imbarcazione

La velocità dell'imbarcazione cresce al crescere dell'intensità del vento reale. Si osserva che in bolina la differenza tra le prestazioni ottenute ai differenti valori di TWS si riduce al crescere del modulo del vento. Questo si verifica poiché a bassi angoli del vento apparente si ha una forte componente trasversale di forza aerodinamica e di conseguenza un forte momento sbandante, che non consente di sfruttare a pieno la potenza del piano velico. Per angoli del vento reale maggiori il divario aumenta in quanto il minore momento sbandante prodotto consente di non depotenziare le vele generando la massima spinta propulsiva ottenibile. Si osserva inoltre che al crescere dell'intensità del vento il valore massimo di velocità dell'imbarcazione si ottiene ad angoli del vento reale maggiori.

Nel caso di analisi delle andature portanti le prestazioni aumentano significativamente grazie all'utilizzo dello spinnaker e si osserva che, anche in questo caso, al crescere del valore di TWS considerato il massimo di velocità dell'imbarcazione si ottiene ad angoli del vento reale maggiori.

### Angolo di scarroccio

Tale variabile, come nel caso del catamarano di Classe C, assume i valori maggiori nelle andature più strette per poi diminuire all'aumentare dell'angolo del vento. Se si considerasse l'angolo di sbandamento fisso si otterrebbero angoli di scarroccio inferiori alle intensità del vento maggiori, dove l'imbarcazione è più veloce, ma in questo caso la tendenza si inverte, poiché alle TWS maggiori lo sbandamento dell'imbarcazione risulta essere più accentuato e ciò riduce l'efficacia della chiglia. Infatti lo scopo di tale parte è contrastare la componente trasversale della forza aerodinamica, prodotta dal piano velico, ed una rotazione in rollio riduce la forza, efficace in tal senso, prodotta dall'appendice richiedendo maggiori angoli d'incidenza del flusso idrodinamico sulla stessa.

Per angoli del vento reale maggiori di  $124deg$  l'angolo di scarroccio assume valori negativi come già osservato nell'analisi dei risultati relativi al Classe C.

### Angolo di sbandamento

Aumenta al crescere dell'intensità del vento a causa del maggiore momento sbandante prodotto dal piano velico. Fissato il valore di TWS si osserva che tale variabile cresce con l'angolo del vento reale fino ad un massimo che, per le velocità del vento minori, si ha a CWA di circa  $50-60deg$ , mentre per



quelle maggiori di  $70-80deg$ . Successivamente decresce al crescere dell'angolo di provenienza del vento, e dunque del valore di AWA, poiché a tali andature la componente sbandante delle azioni aerodinamiche si riduce.

Quando si considera il contributo dello spinnaker, per angoli prossimi ai  $125-130deg$ , il momento sbandante prodotto dal piano velico risulta molto elevato e di conseguenza cresce nuovamente anche l'angolo di sbandamento. Tale variabile d'assetto diminuisce nuovamente agli angoli del vento reale maggiori fino ad assumere valori negativi nel caso di TWS pari a  $18kn$  e CWA maggiori di  $156deg$ , poiché in questa condizione il piano velico produce un momento di rollio raddrizzante e la barca tende a sbandare sopravento con valori di tale angolo opposti a quelli finora considerati.

### Posizione dell'equipaggio

Come già accennato, nelle andature risalenti la direzione di provenienza del vento si è scelto di fissare manualmente la posizione dell'equipaggio, mentre nelle andature portanti si è lasciato tale compito al programma. In quest'ultimo caso si osserva che per CWA di circa  $124-140deg$ , a seconda dell'intensità del vento considerata, l'equipaggio viene posizionato completamente sopravento, a valori negativi di  $Y_{crew}$ , al fine di contrastare il momento sbandante prodotto dal piano velico, mentre al crescere degli angoli del vento l'ottimizzatore determina il miglior compromesso tra questo parametro e l'angolo di sbandamento, per determinare l'equilibrio della rotazione attorno all'asse di rollio, collocando spesso l'equipaggio sottovento a produrre momento sbandante.

### Potenza del piano velico

Essa è legata in modo linearmente dipendente al valore del parametro di *flat*, come descritto dall'eq.(5.5). Dalle tabelle riportate si osserva che tale parametro assume valori inferiori a 1 per angoli del vento reale ridotti, ad eccezione del caso di TWS pari a  $6kn$ , dove la potenza del piano velico non eccede mai i valori che consentono l'equilibrio in rollio dell'imbarcazione.

Si osserva che, tanto maggiore è l'intensità del vento, tanto minore sarà il parametro di *flat*, ed inoltre quest'ultimo raggiungerà il valore unitario ad angoli del vento reale maggiori.

Montando lo spinnaker risulta necessario depotenziare il piano velico alle intensità del vento maggiori per i valori più bassi di CWA considerati nel caso di analisi delle andature portanti.

### 7.2.2 Valutazione della VMM ottima

Come per il caso del catamarano di Classe C si presentano i risultati della VMM per i quattro differenti valori di MWA visti nel paragrafo 8.1.3. Nella tab. 7.27 si osserva che, in bolina, al crescere dell'intensità del vento l'angolo al quale si ottiene la massima velocità di avvicinamento all'obiettivo si riduce. In prossimità dei valori di TWS maggiori tale effetto risulta meno marcato, fino ad invertire l'andamento per intensità del vento di  $18kn$ , poiché il momento sbandante generato dal piano velico non consente di ridurre ulteriormente l'angolo al vento, essendo elevata la velocità dell'imbarcazione e dunque minore il valore di AWA visto dal sistema.

Quando il valore di MWA considerato è di  $30deg$ , gli angoli del vento reale ottimi aumentano e con essi la velocità di avvicinamento all'obiettivo, poiché l'imbarcazione si trova a navigare ai valori di CWA dove la velocità della stessa risulta più elevata.

MWA:0deg		
TWS [kn]	CWA [deg]	VMM [kn]
6	46.44	3.971
8	43.46	4.739
10	42.33	5.032
12	41.63	5.213
14	41.29	5.319
16	41.24	5.372
18	41.41	5.385
MWA:30deg		
TWS [kn]	CWA [deg]	VMM [kn]
6	55.42	5.815
8	53.25	6.696
10	52.42	6.986
12	51.84	7.168
14	51.26	7.275
16	50.92	7.331
18	50.76	7.352

**Tabella 7.27:** Risultati VMM reattiva a GS43 per MWA di 0deg e 30deg

In tab.7.28 si riportano i valori di VMM ottima relativi all'analisi delle andature portanti.

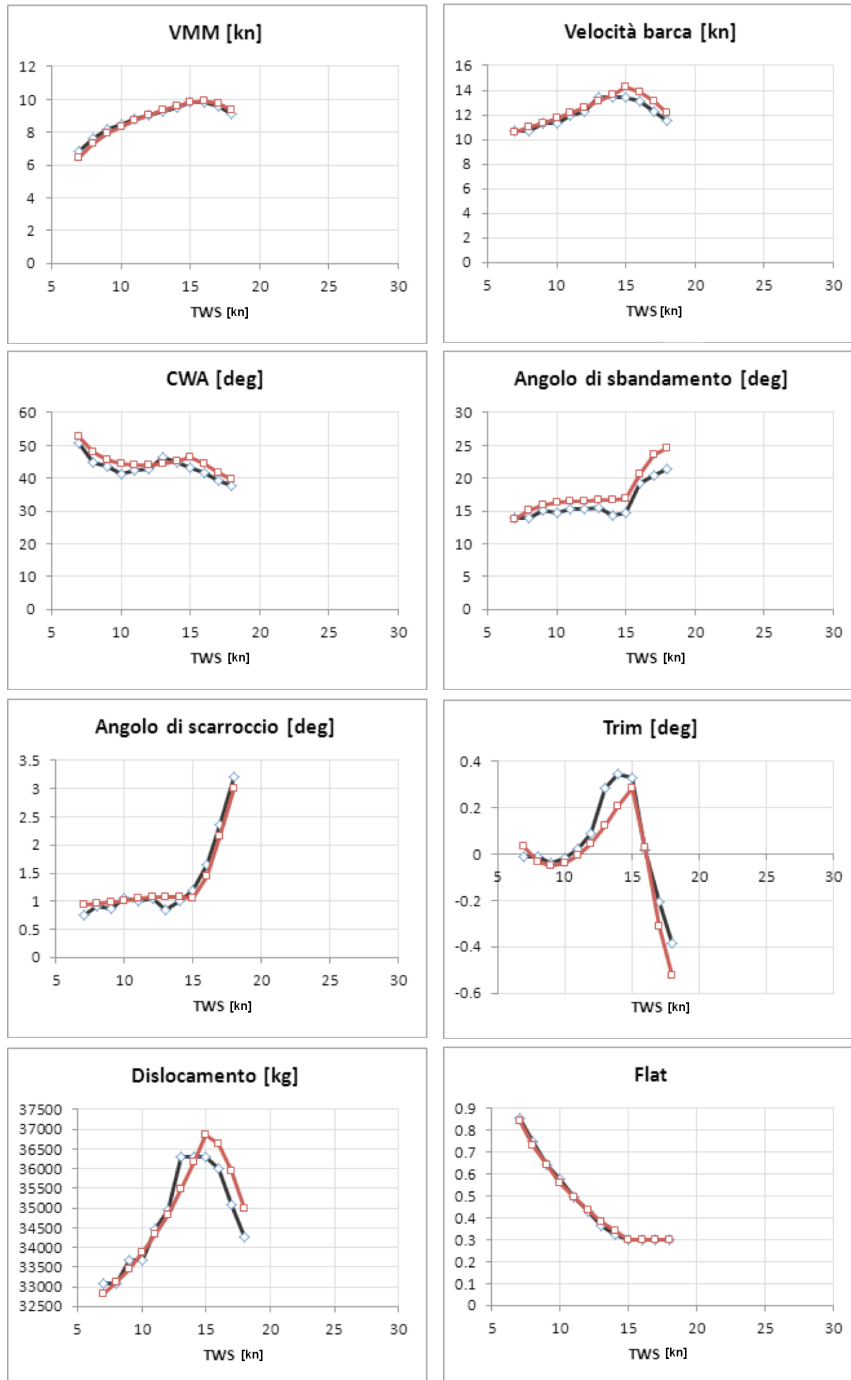
<b>MWA:180deg</b>		
TWS [ <i>kn</i> ]	CWA [ <i>deg</i> ]	VMM [ <i>kn</i> ]
6	144.60	5.121
8	148.53	6.056
10	152.63	6.748
12	153.76	7.326
14	155.99	7.736
16	157.90	8.295
18	156.06	8.898
<b>MWA:150deg</b>		
TWS [ <i>kn</i> ]	CWA [ <i>deg</i> ]	VMM [ <i>kn</i> ]
6	131.98	7.121
8	136.35	7.959
10	136.12	8.499
12	137.61	9.020
14	136.72	9.833
16	136.91	10.693
18	137.03	11.799

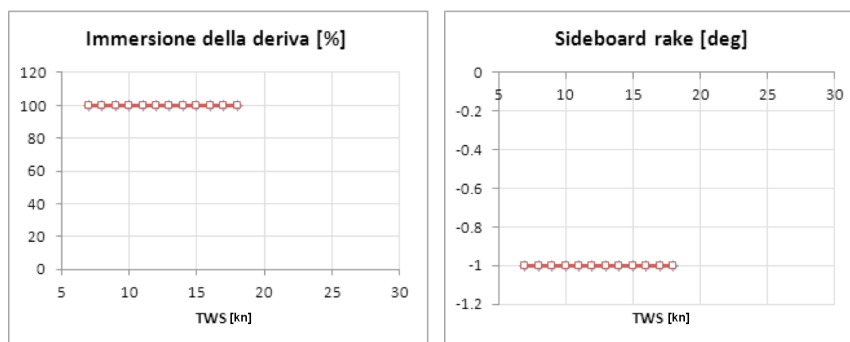
**Tabella 7.28:** Risultati VMM relativa a GS43 per MWA di 180deg e 150deg

Per MWA pari a 180deg si osserva che l'angolo del vento reale al quale si ottiene la condizione ottima di navigazione cresce all'aumentare dell'intensità del vento. L'unica eccezione si ha a valori di TWS pari a 18kn per MWA di 180deg, poiché oltre i 156deg di angolo del vento reale l'imbarcazione ha tendenza a sbandare sopravento. L'ottimizzatore dunque riduce l'angolo del vento reale tornando in una condizione di barca sbandata sottovento. Per quanto riguarda invece il caso di MWA ridotto a 150deg gli angoli al vento reale ottimi diminuiscono, come già osservato nel caso del catamarano di Classe C, ed inoltre, potendo navigare a CWA minori, si nota che non si verifica l'effetto appena descritto.

## 7.3 Maxi Yacht

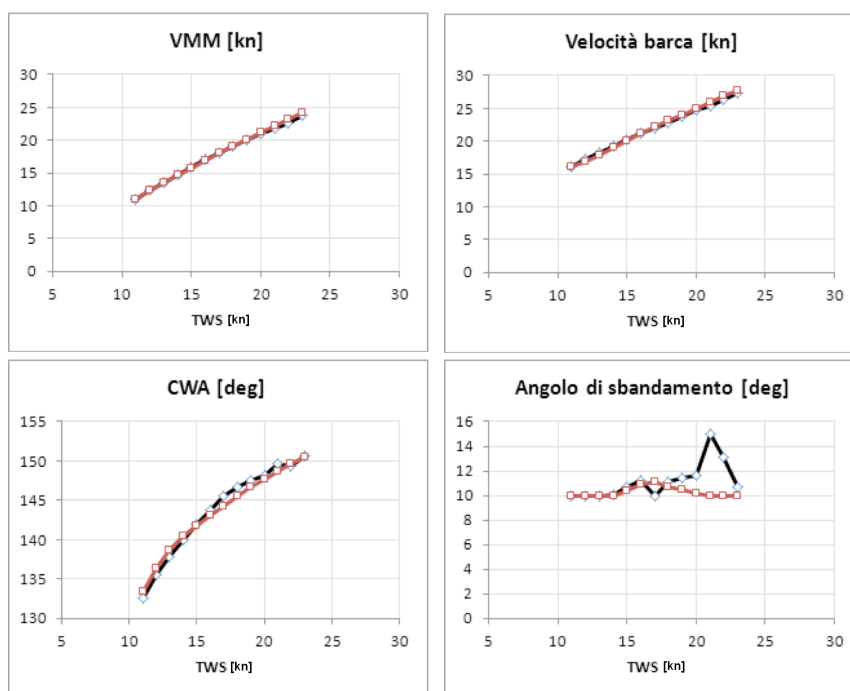
### Upwind

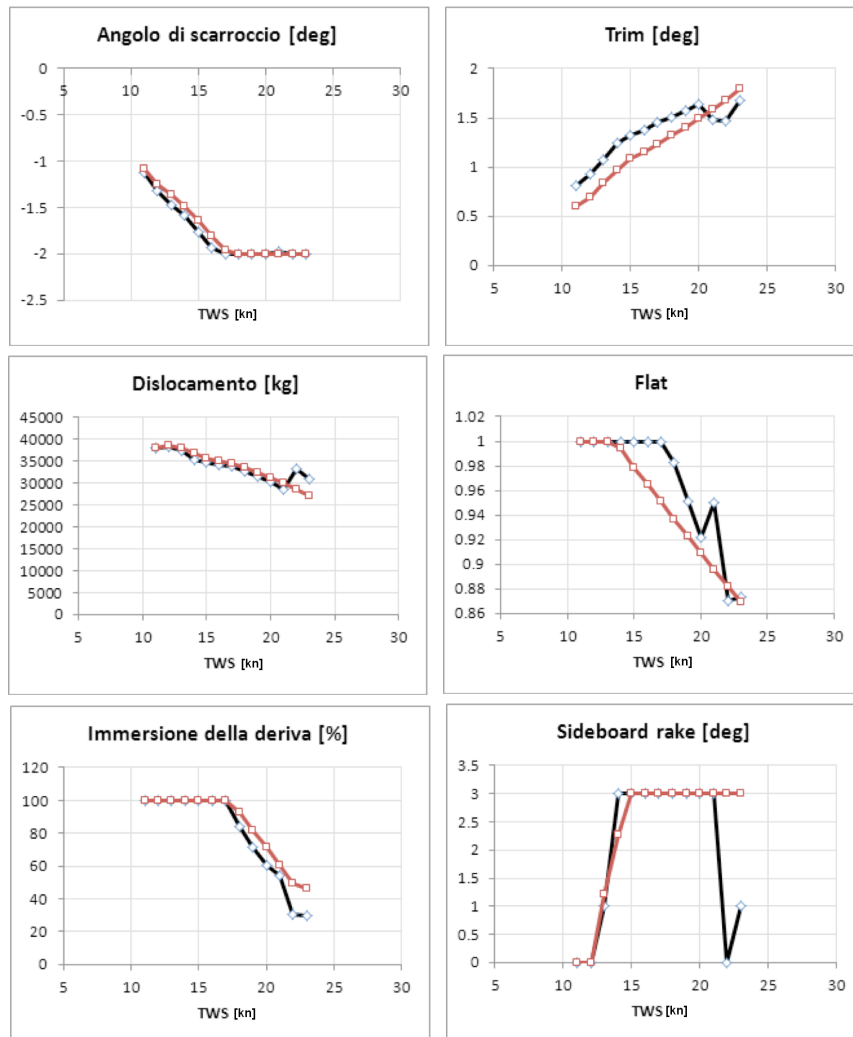




**Figura 7.4:** Risultati 100 piedi per andature di bolina. VPP sviluppato:curve rosse, VPP di riferimento:curve nere

### Downwind





**Figura 7.5:** Risultati 100 piedi per andature portanti. VPP sviluppato:curve rosse, VPP di riferimento:curve nere

### 7.3.1 Analisi dei dati

In tale paragrafo si commenteranno i risultati ottenuti dall'analisi delle prestazioni effettuata sul Maxi Yacht. In particolare si é limitato lo studio all'ottimizzazione della VMM con MWA pari a  $0deg$ , nel caso *upwind*, e  $180deg$ , nel caso *downwind*, con piano velico modificato dalla presenza dello spinnaker.

Nei grafici vengono rappresentati gli andamenti dei parametri di ottimizzazione, comprendenti gli stati del sistema ovvero gli angoli d'assetto e la

velocità dell'imbarcazione, e della funzione obiettivo al variare dell'intensità del vento reale. È interessante confrontare i valori determinati dal programma sviluppato, identificati dalle curve rosse, con quelli del VPP utilizzato dai team neozelandese ed italiano, che prenderanno parte alla Coppa America nel settembre 2013 a San Francisco, indicati dalle curve nere.

Nel caso di analisi delle andature di bolina si è considerato un vento reale d'intensità compresa tra 7 e 18kn, mentre nel caso delle andature portanti tra 11 e 23kn, come presente nei risultati valutati dal VPP di riferimento, al fine di poter comparare i valori delle variabili e della soluzione. Si osserva che all'ottimizzatore è stato consentito di variare solo alcuni dei parametri presentati nel paragrafo 7.2.3, in base a ciò che era stato deciso dagli ingegneri che hanno effettuato lo studio sul 100 piedi in precedenza.

Dai grafici è evidente che le soluzioni della funzione obiettivo presentano gli stessi andamenti, pur essendo puntualmente differenti i valori delle variabili in certe condizioni di intensità del vento. Analizzando nel dettaglio il funzionamento del programma sviluppato e di quello fornito si è osservato che le differenze sono dovute principalmente ai diversi valori di forze e momenti determinati col fitting polinomiale, soprattutto relativi allo scafo. Considerata la discrezionalità, da parte dell'utilizzatore, nel scegliere i gradi delle variabili all'interno del polinomio, ed il fatto che le funzioni che eseguono il fitting differiscano per certi aspetti, è comprensibile che i parametri assumano valori in certe condizioni differenti.

Si ricorda che gli angoli sono espressi in gradi, ed in particolare il trim è ritenuto positivo a cabrare, mentre lo scarroccio è positivo sottovento, per tale motivo è coerente ottenere un angolo di scarroccio negativo nelle andature portanti. Il sideboard rake è un angolo che indica la torsione rigida della pinna laterale estratta sottovento. In particolare quando questo parametro assume valore positivo significa che l'appendice è stata ruotata facendo salire il bordo d'attacco e scendere il bordo d'uscita, ad aumentare dunque l'angolo d'incidenza, mentre per valori negativi è stata imposta la rotazione opposta.





# Capitolo 8

## Integrazione temporale

Nel caso di analisi delle prestazioni instazionarie si deve integrare nel tempo il sistema di equazioni della dinamica 2.26 al fine di determinare completamente lo stato del sistema definendo le velocità, lineari ed angolari, e la cinematica, posizione ed assetto, del corpo. Nel programma sviluppato si é scelto di effettuare tale integrazione utilizzando il metodo di Runge-Kutta del quart'ordine con passo temporale adattivo. Questo fornisce notevoli vantaggi, in termini di stabilit  computazionale, che verranno descritti nei successivi paragrafi.

### 8.1 Metodo di Runge-Kutta del quarto ordine

In generale, esplicitandole rispetto alle derivate prime degli stati del sistema, le eq.(2.26) possono essere scritte come:

$$\dot{\mathbf{y}} = \mathbf{f}(t, \mathbf{y}) \quad (8.1)$$

dove  $\mathbf{y}$  indica il vettore delle variabili del sistema ed  $\mathbf{f}(t, \mathbf{y})$  il vettore delle funzioni, del tempo  $t$  e delle variabili, che definiscono le derivate prime di  $\mathbf{y}$ . Il metodo di Runge-Kutta del quart'ordine, scelto nella trattazione, integra tale sistema utilizzando la discretizzazione temporale e la valutazione delle funzioni  $\mathbf{f}(t, \mathbf{y})$  che seguono:

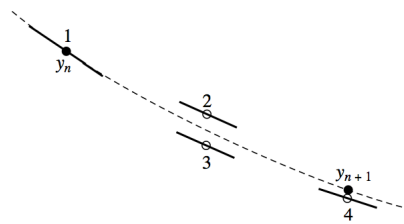
$$\begin{aligned} \mathbf{k}_1 &= h\mathbf{f}(t_n, \mathbf{y}_n) \\ \mathbf{k}_2 &= h\mathbf{f}\left(t_n + \frac{h}{2}, \mathbf{y}_n + \frac{\mathbf{k}_1}{2}\right) \\ \mathbf{k}_3 &= h\mathbf{f}\left(t_n + \frac{h}{2}, \mathbf{y}_n + \frac{\mathbf{k}_2}{2}\right) \end{aligned}$$

$$\mathbf{k}_4 = hf(t_n + h, \mathbf{y}_n + \mathbf{k}_3)$$

$$\mathbf{y}_{n+1} = \mathbf{y}_n + \frac{\mathbf{k}_1}{6} + \frac{\mathbf{k}_2}{3} + \frac{\mathbf{k}_3}{3} + \frac{\mathbf{k}_4}{6} + O(h^5) \quad (8.2)$$

nella quale i vettori  $\mathbf{k}_i$ , con  $i = 1, \dots, 4$ , indicano le valutazioni del sistema (2.26) in quattro combinazioni differenti del valore delle variabili e dell'istante temporale. Il passo temporale é indicato da  $h$ , mentre  $O(h^5)$  rappresenta un termine del quint'ordine, errore di troncamento del metodo numerico scelto. Infatti si ricorda che, in generale, un metodo di ordine  $n$  é caratterizzato da un errore, nella valutazione del vettore delle variabili del sistema al nuovo istante temporale, pari a  $O(h^{n+1})$ .

Il passo temporale ha inizio all'istante  $t_n$  e termina all'istante  $t_{n+1} = t_n + h$ . Come intuibile dunque, i vettori  $\mathbf{y}_n$  e  $\mathbf{y}_{n+1}$  indicano i valori delle variabili del problema rispettivamente all'inizio ed alla fine del passo considerato. In fig.8.1 vengono indicati i punti, del passo d'integrazione, nei quali si valutano i vettori  $\mathbf{k}_i$ .

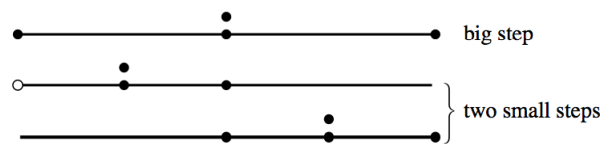


**Figura 8.1:** Valutazioni delle funzioni nel passo temporale per metodo RK4. Figura tratta da [28].

Il metodo utilizzato, descritto con maggiore dettaglio in [29], appartiene alla categoria dei metodi d'integrazione espliciti, ovvero quei metodi che, nella valutazione del vettore delle derivate prime,  $\mathbf{f}(t, \mathbf{y})$ , considerano solo il valore delle variabili del problema all'istante iniziale,  $\mathbf{y}_n$ , e non a quello finale,  $\mathbf{y}_{n+1}$ . Essi non sono incondizionatamente stabili, infatti non sono stabili per qualsiasi dimensione del passo temporale d'integrazione scelto, e di conseguenza per valori di quest'ultimo troppo elevati potrebbero verificarsi problemi nella convergenza del metodo. Per evitare tale inconveniente si é scelto di utilizzare il metodo appena descritto modificato al fine di ottenere un metodo in grado di variare opportunamente ed automaticamente la dimensione del passo temporale.

## 8.2 Passo temporale adattivo

La tecnica piú utilizzata per la valutazione automatica, ad ogni passo d'integrazione, del valore di  $h$ , é il dimezzamento del passo temporale. In tale approccio si valuta prima il valore di  $\mathbf{y}_{n+1}$ , come descritto, ed in seguito, dalla successione di due iterazioni effettuate considerando un passo temporale dimezzato. In fig.8.2 viene mostrato, in modo simbolico, tale approccio indicando con un punto pieno l'istante temporale nel quale viene valutato il valore delle derivate e con un punto vuoto dove si utilizza il valore di  $\mathbf{f}(t, \mathbf{y})$  già determinato nell'iterazione a passo intero, indicata dalla prima linea.



**Figura 8.2:** Valutazioni delle funzioni nel passo temporale per metodo RK4 adattivo. Figura tratta da [28].

Indicando con  $\Delta$  la differenza tra le stime delle soluzioni ottenute, con passo intero e con passo dimezzato, facendo riferimento a [28] si considera tale valore come buon indicatore dell'errore di troncamento.

Si deve ora legare tale parametro alla dimensione del passo temporale. Avendo considerato in entrambi i casi un metodo del quart'ordine, gli errori di troncamento che ne risultano, come già descritto, sono termini del quint'ordine in  $h$ . Ovvero vale la relazione:

$$\Delta \sim h^5 \Rightarrow h \sim \Delta^{0.2} \quad (8.3)$$

Ne segue che, indicando con  $h_1$  il passo temporale che fornisce un errore  $\Delta_1$ , é possibile definire un valore  $h_0$  che restituisce un errore  $\Delta_0$  come segue:

$$h_0 = h_1 \left| \frac{\Delta_0}{\Delta_1} \right|^{0.2} \quad (8.4)$$

Assumendo  $\Delta_0$  il valore dell'errore desiderato, si può facilmente determinare la dimensione del passo temporale opportuna. A questo punto, se tale valore é maggiore di quello utilizzato nell'iterazione a passo intero, si aggiorna il passo temporale, al fine di ottenere piú rapidamente la soluzione, altrimenti si sostituisce il valore ottenuto e si ripete l'iterazione per evitare instabilità

numeriche del metodo. La descrizione implementativa di tale modifica del metodo di Runge-Kutta del quart'ordine é reperibile in [28].

# Capitolo 9

## Controllo

Dopo aver implementato le funzioni che svolgono l'integrazione temporale della dinamica del sistema, occorre sviluppare un controllore in grado di manovrare l'imbarcazione come richiesto dall'utilizzatore. La scelta del controllore PID é stata dettata dalla semplicitá implementativa che lo caratterizza. I controllori sviluppati, in particolare, si occupano di determinare l'angolo di barra del timone, al fine di portare l'imbarcazione all'angolo del vento reale desiderato, ed il parametro di *flat*, che determina la potenza del piano velico qualora si voglia imporre un determinato angolo di sbandamento. Risulta quindi che nella fase d'integrazione temporale i valori delle rimanenti variabili del vettore 6.29 resteranno fissi, ad eccezione di quelli relativi agli stati del sistema, come gli angoli d'assetto o la velocità dell'imbarcazione, che varieranno di passo in passo.

### 9.1 Controllore PID

I controllori PID implementati ricevono in ingresso il valore dell'angolo al vento o dell'angolo di sbandamento desiderati, nel caso rispettivamente di controllore posto a determinare l'angolo di barra del timone o la potenza del piano velico. In uscita essi forniscono i valori dei comandi descritti,  $u(t)$ , ottenuti dalla somma di tre contributi, uno proporzionale all'errore  $e(t)$ , valutato come differenza tra stato corrente  $y(t)$  e stato desiderato  $y_d(t)$ , uno integrale ed uno derivativo, legato alla variazione nel tempo dell'errore appena descritto. Il primo contributo lega algebricamente il comando all'errore corrente, il secondo annulla l'errore a transitorio esaurito, mentre il terzo riduce le oscillazioni dello stato del sistema attorno al valore desiderato. Definendo  $K_p$ , il guadagno proporzionale del controllore,  $T_i$ , il tempo integrale, e  $T_d$ , il tempo derivativo, i tre contributi risultano essere:

- azione proporzionale:

$$u_p(t) = K_p e(t) \quad (9.1)$$

- azione integrale:

$$u_i(t) = \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(r) dr + u(0) \quad (9.2)$$

- azione derivativa:

$$u_d(t) = K_p T_d \frac{de(t)}{dt} \quad (9.3)$$

Ne risulta dunque un'uscita complessiva pari a:

$$u(t) = K_p \left( e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(r) dr + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (9.4)$$

In termini di trasformata di Laplace la funzione di trasferimento che definisce il rapporto tra la trasformata dell'uscita  $U(s)$  e quella dell'errore  $E(s)$  assume la forma:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) \quad (9.5)$$

mentre considerando un filtro del prim'ordine sull'azione derivativa, con lo scopo di limitare il livello di amplificazione del rumore, si ha:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{sT_i} + \frac{sT_d}{1 + sT_d/N} \right) \quad (9.6)$$

con  $N$  che generalmente assume un valore compreso tra 5 e 10.

Nei controllori implementati si é adottata la definizione dell'uscita secondo la forma *standard ISA*, che rappresenta una generalizzazione della forma precedentemente descritta. Secondo tale legge l'uscita, nello spazio di Laplace, risulta essere:

$$U(s) = K_p \left[ bY_d(s) - Y(s) + \frac{1}{sT_i} E(s) + \frac{sT_d}{1 + sT_d/N} (cY_d(s) - Y(s)) \right] \quad (9.7)$$

dove  $b$  e  $c$  sono coefficienti che assumono valori compresi tra 0 e 1, ed in particolare il coefficiente  $b$  é detto *peso sul setpoint*.

### 9.1.1 Discretizzazione temporale

L'implementazione del controllore all'interno della procedura d'integrazione temporale delle equazioni della dinamica, descritta nel capitolo precedente, richiede che l'uscita  $u(t)$ , funzione continua del tempo, sia discretizzata col passo temporale  $h$  del metodo d'integrazione utilizzato. Nel programma sviluppato si è scelto di effettuare la discretizzazione tramite il metodo di *Eulero implicito* che risulta essere stabile per qualsiasi valore del passo temporale  $h$ .

All' $n$ -esimo passo d'integrazione il tempo  $t_n$  sarà pari a  $t_0 + hn$ , con  $t_0$  l'istante iniziale.

I tre contributi all'uscita del controllore in tale passo risultano essere:

- azione proporzionale:

$$u_p(t_n) = K_p(by_d(t_n) - y(t_n)) \quad (9.8)$$

- azione integrale:

$$u_i(t_n) = u_i(t_{n-1}) + K_p \frac{h}{T_i} e(t_n) \quad (9.9)$$

- azione derivativa con filtro:

$$u_d(t_n) = \frac{T_d}{Nh + T_d} u_d(t_{n-1}) + K_p \frac{NT_d}{Nh + T_d} [c(y_d(t_n) - y_d(t_{n-1})) - (y(t_n) - y(t_{n-1}))] \quad (9.10)$$

si osserva che per il calcolo dei contributi integrale e derivativo al primo passo d'integrazione occorre fornire i valore  $u_i(t_0)$ ,  $u_d(t_0)$  ed  $e(t_0)$ . La somma delle tre azioni determina l'uscita del controllore al passo considerato.

#### Wind-up dell'integratore

Nel caso in cui la variabile di controllo raggiunga i limiti superiore ed inferiore ad essa imposti, tipicamente nel caso di transitori molto ampi o rapidi, accade che il processo evolva come se fosse in anello aperto, senza dunque che la retroazione sull'errore contribuisca al controllo del sistema. Essendo l'integratore un sistema dinamico non asintoticamente stabile, può accadere che tale contributo cresca in modo eccessivo fornendo un valore della variabile errato per tutta la fase di integrazione che segue. Tale fenomeno è definito *wind-up* dell'integratore.

Per evitare ciò, nel controllore implementato, si è imposto che la variabile

assumesse il valore del limite superiore, qualora fosse maggiore di quest'ultimo, e di quello inferiore, se minore di esso. In entrambi tali casi non si é aggiornato il contributo integrale, limitando l'utilizzo dell'eq.9.9 solo al caso in cui la variabile assumesse valori ammissibili.

Il controllo al passo d'integrazione  $n$ -esimo, sulla saturazione della variabile, genera una valutazione del contributo integrale,  $u_i(t_n)$ , che verrá utilizzata al passo successivo. L'aggiornamento dell'integratore risulta quindi essere ritardato di un passo temporale.

Per una descrizione piú dettagliata riguardo i controllori di tipo PID é si rimanda a [30].



# Capitolo 10

## Risultati DPP

In tale capitolo verranno presentati i risultati ottenuti nell'analisi dinamica del moto del monoscafo di 100 piedi.

Si tratta di uno studio preliminare del comportamento dinamico, poiché é possibili introdurre diverse migliorie all'analisi effettuata, che sono state trascurate nell'ottenere i seguenti risultati.

Non é stata introdotta la matrice delle masse aggiunte, presentata nel paragrafo 3.3.2, le forze ed i momenti idrodinamici ed aerodinamici sono stati valutati trascurando gli effetti delle instazionarietá, considerando un approccio quasi stazionario descritto in precedenza, si é limitato lo studio alla considerazione di una manovra semplice, quale la poggiate, che porta ad angoli al vento reale maggiori di quelli indicati dalle condizioni iniziali, non considerando virate o strambate che impongono cambi di mura all'imbarcazione, con conseguente variazione della matrice d'inerzia dovuta allo spostamento dell'equipaggio ed alla rotazione della chiglia basculante.

L'analisi dinamica puó risultare utile nel valutare il comportamento dell'imbarcazione a fronte di variazioni dell'intensitá e della direzione di provenienza del vento o se sottoposta ad un moto ondoso del pelo libero, entrambi aspetti che non si sono considerati in tale analisi. Nonostante siano stati implementati due controllori PID, uno agente sull'angolo di barra del timone ed uno sul parametro di *flat*, che determina la potenza del piano velico per ottenere l'angolo di sbandamento desiderato, nel seguente studio ci si é limitati a considerare il solo controllo della rotta mantenendo costanti le forze ed i momenti aerodinamici generati dalle vele. Tale approccio non rispecchia ciò che solitamente avviene nella realtá, dove l'equipaggio regola la potenza del piano velico al fine di ottenere l'assetto dell'imbarcazione ottimo, ovvero quello indicato dall'analisi effettuata dal VPP. Ha consentito però di ottenere risultati che, nella fase di transitorio, non presentassero valori dell'angolo di scarroccio, molto sensibile alle manovre, al di fuori dei limiti presenti nelle

matrici di dati CFD forniti e che non consentissero una valutazione coerente di forze e momenti tramite il fitting polinomiale. Questo comportamento di tale parametro rispecchia ciò che avviene nella realtà, ma avendo considerato i valori di forze e momenti valutati per uno studio stazionario, non si è considerato, al di fuori del programma sviluppato, di analizzare condizione di navigazione proprie delle fasi instazionarie e non si dispone dunque dei dati necessari a realizzare uno studio completo della dinamica.

Nonostante i molti limiti imposti all'analisi dinamica proposta, si ritiene che essa possa essere una buona base per sviluppi e miglioramenti futuri che consentiranno di determinare il comportamento dell'imbarcazione durante le fasi di navigazione instazionarie, nelle manovre ed in condizioni che non siano quelle ideali di mare piatto e vento costante, in intensità e direzione, forniti dal VPP.

## 10.1 Analisi dei risultati

Nei grafici riportati nel seguito del paragrafo sono rappresentati gli andamenti dell'angolo del vento reale, sul cui valore si basa l'azione del controllore posto sul timone, dell'angolo di sbandamento scelto tra gli angoli d'assetto, essendo quello maggiormente soggetto a variazioni, come indicatore del raggiungimento di una condizione d'equilibrio del sistema, e della velocità dell'imbarcazione, indicante le prestazioni della stessa e la cui massimizzazione è alla base dell'intero progetto di tesi.

In particolare sono state studiate tre manovre differenti, effettuate ad intensità del vento reale di  $12kn$ . Nel primo caso si è imposto all'imbarcazione di mantenere l'angolo del vento reale iniziale, pari a  $45deg$ , nel secondo caso di poggiare fino ad arrivare ad un angolo di  $55deg$  e nel terzo caso di raggiungere i  $65deg$ .

Tra gli aspetti interessanti di tali grafici vi sono le medesime condizioni d'equilibrio, raggiunte nelle tre manovre, riportate di seguito. Ciò è giustificato dall'imposizione delle stesse azioni aerodinamiche nei tre casi analizzati.

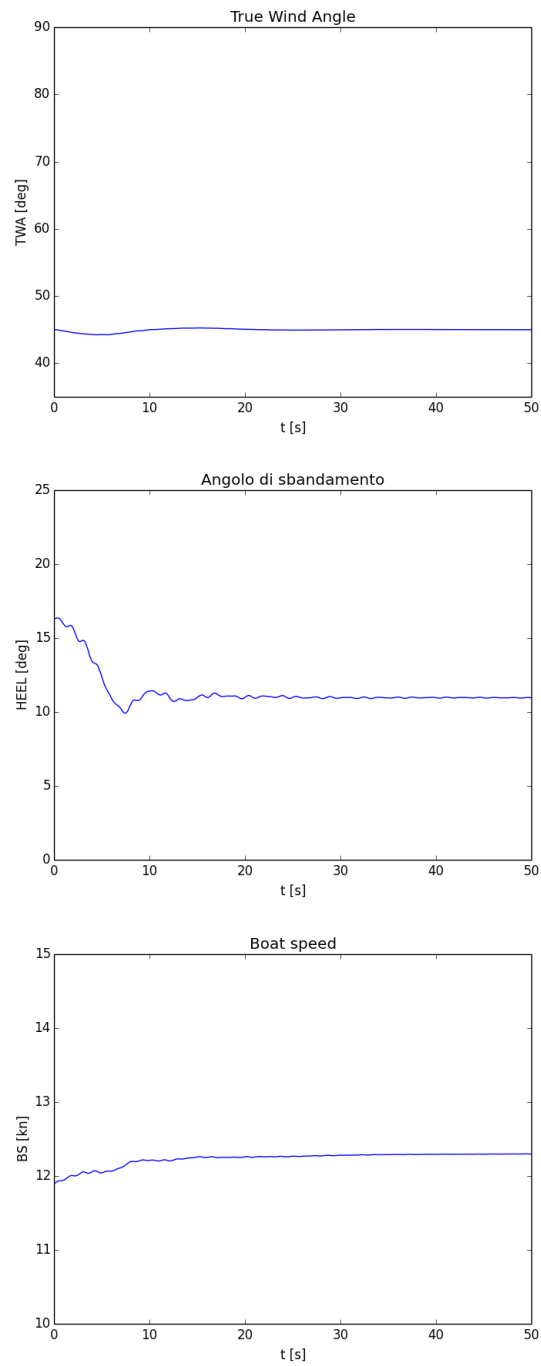
TWA [ <i>deg</i> ]	HEEL [ <i>deg</i> ]	BS [ <i>kn</i> ]
45	10.960	12.296
55	11.035	12.331
65	11.051	12.419

**Tabella 10.1:** Condizioni a regime

La minima differenza tra i valori è riconducibile ai differenti angoli del vento apparente con i quali vengono calcolate le forze ed i momenti legati agli effet-

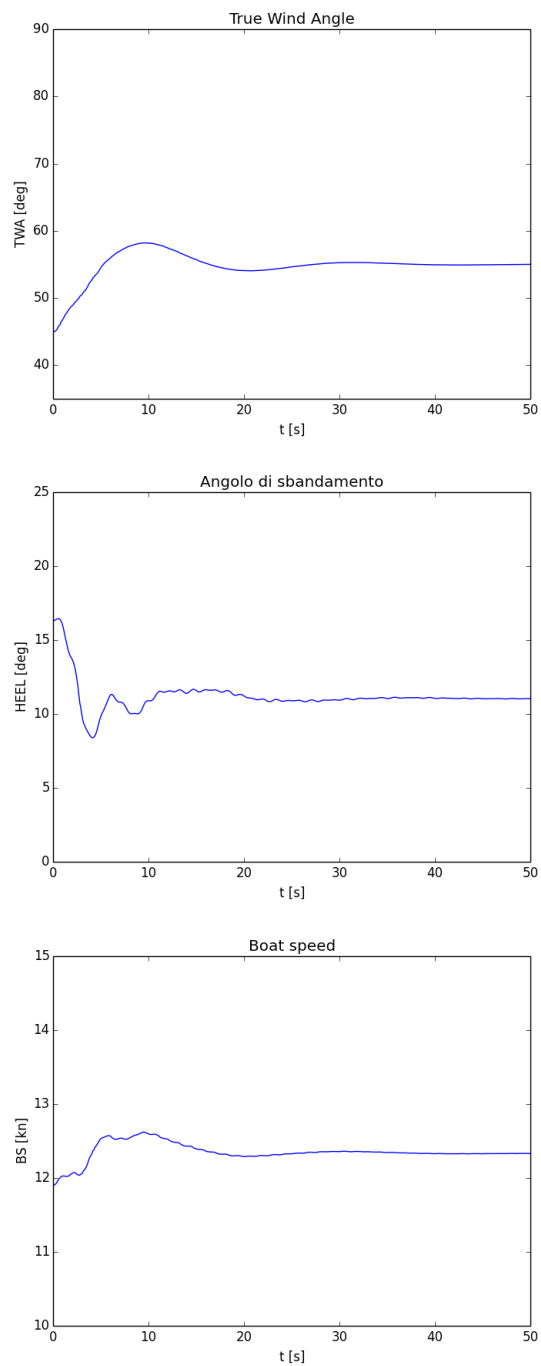
ti aerodinamici su sartie ed albero, o alla possibile differenza degli angoli di scarroccio agenti sulle appendici idrodinamiche e che sono influenzati dalle velocità angolari secondo quanto descritto dalla teoria quasi stazionaria nel paragrafo 4.1.3.

## Mantenimento dell'angolo al vento reale



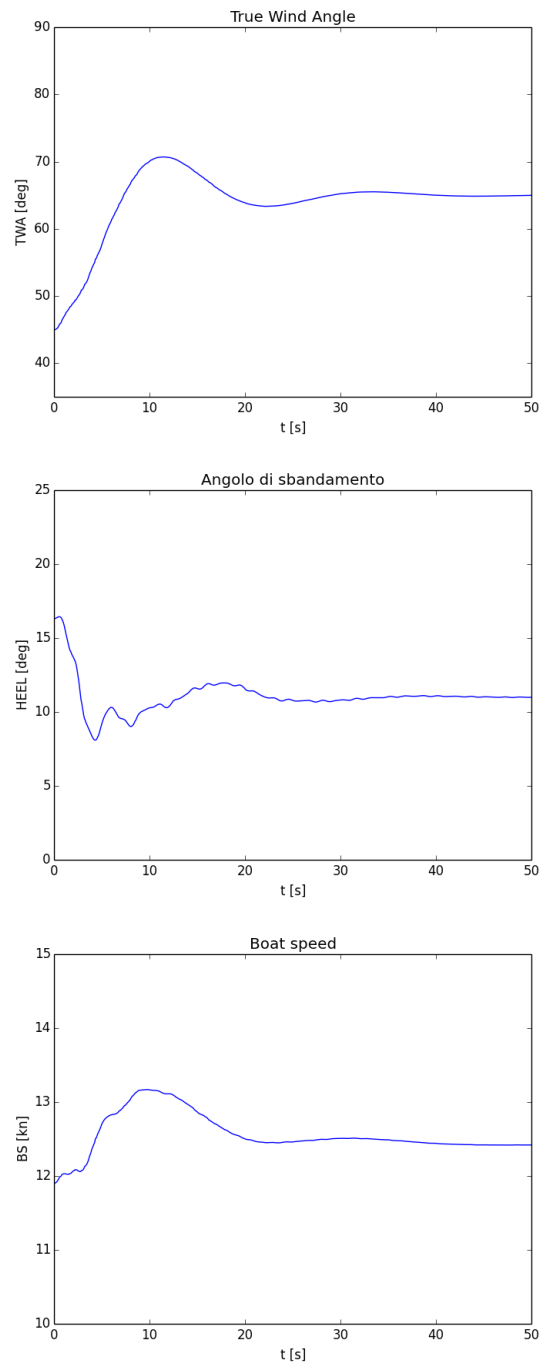
**Figura 10.1:** Dinamica per TWA finale di  $45deg$

## Raggiungimento di TWA pari a 55deg



**Figura 10.2:** Dinamica per TWA finale di 55deg

### Raggiungimento di TWA pari a 65deg



**Figura 10.3:** Dinamica per TWA finale di 65deg

Di seguito si riportano i vettori, a regime, delle velocità lineari ed angolari, espresse in assi corpo, della posizione del centro di massa rispetto al sistema di riferimento inerziale, rimasto fisso nel punto in cui era posizionata l'imbarcazione all'istante iniziale, e degli angoli d'assetto, espressi nella terna di angoli di Eulero 321 descritta. Le velocità lineari sono espresse in  $m/s$ , quelle angolari in  $rad/s$ , gli spostamenti in  $m$  e gli angoli d'assetto in  $rad$ .

- Mantenimento della rotta:

$$\mathbf{v}_G = \begin{pmatrix} 6.326 \\ 0.064 \\ 0.010 \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} 0.0013 \\ -0.0001 \\ -0.0001 \end{pmatrix} \quad (10.1)$$

$$\mathbf{X}_G = \begin{pmatrix} 287.7 \\ 2.844 \\ -0.014 \end{pmatrix} \quad \mathbf{e} = \begin{pmatrix} -0.19 \\ -0.0046 \\ -0.00007 \end{pmatrix} \quad (10.2)$$

- Poggiata a TWA di 55 deg:

$$\mathbf{v}_G = \begin{pmatrix} 6.344 \\ 0.07 \\ -0.021 \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} -0.0002 \\ -0.00006 \\ 0.00007 \end{pmatrix} \quad (10.3)$$

$$\mathbf{X}_G = \begin{pmatrix} 281.8 \\ 51.09 \\ -0.013 \end{pmatrix} \quad \mathbf{e} = \begin{pmatrix} -0.192 \\ -0.0047 \\ 0.174 \end{pmatrix} \quad (10.4)$$

- Poggiata a TWA di 65 deg:

$$\mathbf{v}_G = \begin{pmatrix} 6.389 \\ 0.065 \\ -0.025 \end{pmatrix} \quad \boldsymbol{\omega} = \begin{pmatrix} -0.0003 \\ 0.0003 \\ 0.0007 \end{pmatrix} \quad (10.5)$$

$$\mathbf{X}_G = \begin{pmatrix} 279.2 \\ 98.1 \\ -0.006 \end{pmatrix} \quad \mathbf{e} = \begin{pmatrix} -0.191 \\ -0.0052 \\ 0.348 \end{pmatrix} \quad (10.6)$$

I vettori riportati indicano che le velocità angolari sono in tutti i casi molto basse, dimostrando che l'imbarcazione ha raggiunto una condizione d'equilibrio, il terzo termine dei vettori  $\mathbf{e}$ , che rappresenta l'angolo d'imbardata del

sistema, indica la rotazione imposta all'imbarcazione per raggiungere l'angolo del vento reale desiderato, lo spostamento verticale é in ogni caso molto ridotto, mentre quello laterale cresce al crescere dell'angolo del vento che si vuole raggiungere.

Nella fase di transitorio si osserva dai grafici che l'angolo di sbandamento e la velocità dell'imbarcazione dipendono in modo significativo dalle manovre attorno all'asse d'imbarcata imposte dal timone. In particolare si ha che, maggiore é l'ampiezza della poggia, maggiore é l'oscillazione dell'angolo di sbandamento e della velocità del sistema. Durante tale manovra infatti, mantenendo costanti le forze ed i momenti aerodinamici dovuti al piano velico, l'angolo di scarroccio si riduce e ciò diminuisce il momento sbandante e la resistenza prodotti dalle appendici idrodinamiche. Questo si traduce in una riduzione dell'angolo di sbandamento e nell'aumento della velocità durante la fase instazionaria corrispondente alla manovra.

Come accennato, tale studio costituisce solo un primo approccio all'analisi dei comportamenti dinamici del sistema e non consente di trarre ulteriori informazioni sulle caratteristiche, in condizioni di moto instazionario, dell'imbarcazione.



# Capitolo 11

## Conclusioni

In questo progetto di tesi é stato sviluppato un programma VPP, in linguaggio di programmazione Python, che si é dimostrato in grado di determinare le prestazioni ottime di un'imbarcazione considerando un numero arbitrario di variabili di ottimizzazione e di gradi di libert  del sistema.

Tale programma riceve in ingresso i valori di forze e momenti fluidodinamici agenti sull'imbarcazione, valutati con appositi programmi di CFD descritti nel corso della trattazione, organizzati in matrici. Questi valori costituiscono i nodi sui quali verr  eseguito il fitting delle azioni, che sar  di tipo polinomiale o svolto utilizzando le Radial Basis Function, gi  implementate in *Scipy*, a discrezione dell'utilizzatore. Nel caso in cui i valori di forze e momenti non siano stati valutati precedentemente, in funzione dei parametri di ottimizzazione, si sono implementati appositi moduli in grado di valutare le azioni utilizzando la tecnica della linea portante, basandosi sui valori dei coefficienti fluidodinamici e sulle caratteristiche geometriche relative all'appendice idrodinamica considerata.

Per eseguire l'ottimizzazione vincolata di una funzione dipendente da molteplici variabili, quale é ad esempio la velocit  dell'imbarcazione, si é scelto di utilizzare l'ottimizzatore, implementato nel pacchetto di calcolo scientifico *Scipy.optimize*, SLSQP. Tale funzione ha consentito di considerare come vincoli le equazioni d'equilibrio del sistema lungo i gradi di libert  desiderati e dipendenti da un numero arbitrario di parametri.

Il programma sviluppato é stato successivamente utilizzato per determinare le prestazioni ottime di tre imbarcazioni, un catamarano di Classe C, il monoscafo di 43 piedi "Grand Soleil 43 new" ed un Maxi Yacht di 100 piedi, scelte per dimostrare la possibilit  del VPP implementato di operare su barche con caratteristiche molto differenti. In tutti i casi sono stati ottenuti risultati coerenti e conformi ai comportamenti attesi.

Si ritiene che l'analisi del monoscafo di 100 piedi abbia mostrato la capacit 

del programma di ottimizzare le prestazioni anche su progetti molto complessi, dotati di numerose appendici idrodinamiche, un numero elevato di parametri di ottimizzazione e di tutti i 6 gradi di libertà del sistema nello spazio. Su quest'ultima imbarcazione è stato inoltre possibile confrontare i risultati ottenuti con quelli prodotti dal VPP utilizzato nell'attuale campagna di Coppa America, dai team neozelandese ed italiano, dimostrando una buona vicinanza tra i valori ed una buona concordanza tra gli andamenti assunti dalle variabili di ottimizzazione in funzione dell'intensità del vento reale.

Al fine di rendere più completa l'analisi delle prestazioni delle imbarcazioni, che limitandosi al VPP considererebbe solo condizioni di navigazione stazionarie, si è sviluppata una parte di programma finalizzata allo studio della dinamica del sistema durante le fasi di moto instazionario, tipiche delle manovre o dovute alle variazioni dell'ambiente circostante, soggetto a cambiamenti dell'intensità o della direzione del vento ed al moto ondoso della superficie libera.

Per l'integrazione temporale delle equazioni del moto si è scelto di utilizzare il metodo di Runge Kutta del quart'ordine, modificato al fine di ottenere un metodo in grado di adattare automaticamente il passo temporale, per evitare problemi di divergenza numerica, considerando, a tale scopo, la tecnica del dimezzamento del passo d'integrazione.

Si sono sviluppati due controllori PID, uno agente sull'angolo di barra del timone col compito di seguire la rotta imposta, in grado dunque di imporre all'imbarcazione l'esecuzione di determinate manovre, ed uno agente sulla potenza del piano velico, con lo scopo di far mantenere al sistema l'angolo di sbandamento desiderato. Nello studio eseguito durante il progetto di tesi si è scelto di utilizzare solo il controllore agente sul timone, imponendo forze e momenti aerodinamici, dovuti alle vele, costanti. Un ulteriore sviluppo di tale parte del programma, che costituisce attualmente solo uno studio preliminare della dinamica, potrebbe eliminare i limiti imposti all'analisi consentendo un controllo integrato dei due gradi di libertà rotazionali di imbardata e rollio. Sviluppi futuri del progetto intendono valutare le azioni fluidodinamiche, agenti sul sistema, considerando gli effetti dovuti all'instazionarietà del moto, superando il concetto di teoria quasi stazionaria considerato fino ad ora, valutare in modo opportuno le masse aggiunte del sistema analizzato, trascurate nell'attuale studio della dinamica, e considerare manovre dell'imbarcazione che includano cambi di mura.

A fronte della crescente produzione di imbarcazioni realizzate in materiali compositi, molto leggere e deformabili sotto l'azione dei carichi idrodinamici, sarebbe interessante non adottare il concetto di corpo rigido considerando la deformabilità strutturale e valutando le forze idrodinamiche tenendo conto

dell'interazione fluido-struttura che si verrebbe a generare.



# Lista degli acronimi

AoA: *Angle of Attack*  
AWA: *Apparent Wind Angle*  
AWS: *Apparent Wind Speed*  
BFGS: *Broyden Fletcher Goldfarb Shanno*  
BS: *Boat Speed*  
CFD: *Computational Fluid Dynamic*  
CWA: *Course Wind Angle*  
DPP: *Dynamic Prediction Program*  
DWL: *Design Water Line*  
GS43: *Grand Soleil 43 new*  
IMQ: *Inverse Multiquadric*  
KT: *Khun-Tucker*  
LW: *Leeway*  
MQ: *Multiquadric*  
MWA: *Mark Wind Angle*  
NLP: *Nonlinear Problem*  
NNLS: *Non-negative Least Squares*  
ORC: *Offshore Racing Council*  
PID: *Proportional Integrative Derivative*  
QP: *Quadratic Programming*  
RBF: *Radial Basis Function*  
T.E.: *Trailing Edge*  
TP: *Thin Plate*  
SLSQP: *Sequential Least Squares Quadratic Programming*  
SQP: *Sequential Quadratic Programming*  
TWA: *True Wind Angle*  
TWS: *True Wind Speed*  
VMG: *Velocity Made Good*  
VMM: *Velocity Made to Mark*  
VPP: *Velocity Prediction Program*



# Appendice A

## Analisi del fitting polinomiale

Questa appendice presenta la funzione *fit\_check* implementata nel programma al fine di valutare la qualità del fitting polinomiale eseguito.

Per il corpo preso in considerazione vengono in particolare prodotti i grafici rappresentanti l'andamento del polinomio, in funzione delle variabili considerate per quella parte dell'imbarcazione, e dei punti indicanti i valori assunti dalle componenti di forze e momenti, considerate, nei nodi indicati dalla matrice dei risultati ottenuti dall'analisi fluidodinamica.

Di seguito vengono riportati, a titolo d'esempio, i grafici restituiti dalla funzione per i valori di forza e momento, valutati lungo l'asse  $x$ , relativi allo scafo del 100 piedi, per angoli di sbandamento di 10 e 17.5deg, angoli di scarroccio e di beccheggio indicati a titolo dei grafici, asse delle ascisse rappresentante i valori della velocità dell'imbarcazione e le differenti curve relative a differenti valori del dislocamento.

La funzione descritta è risultata molto utile al fine di determinare la qualità del fitting eseguito ed ha consentito di scegliere, per ciascun corpo, gli opportuni gradi massimi delle variabili all'interno dei polinomi.

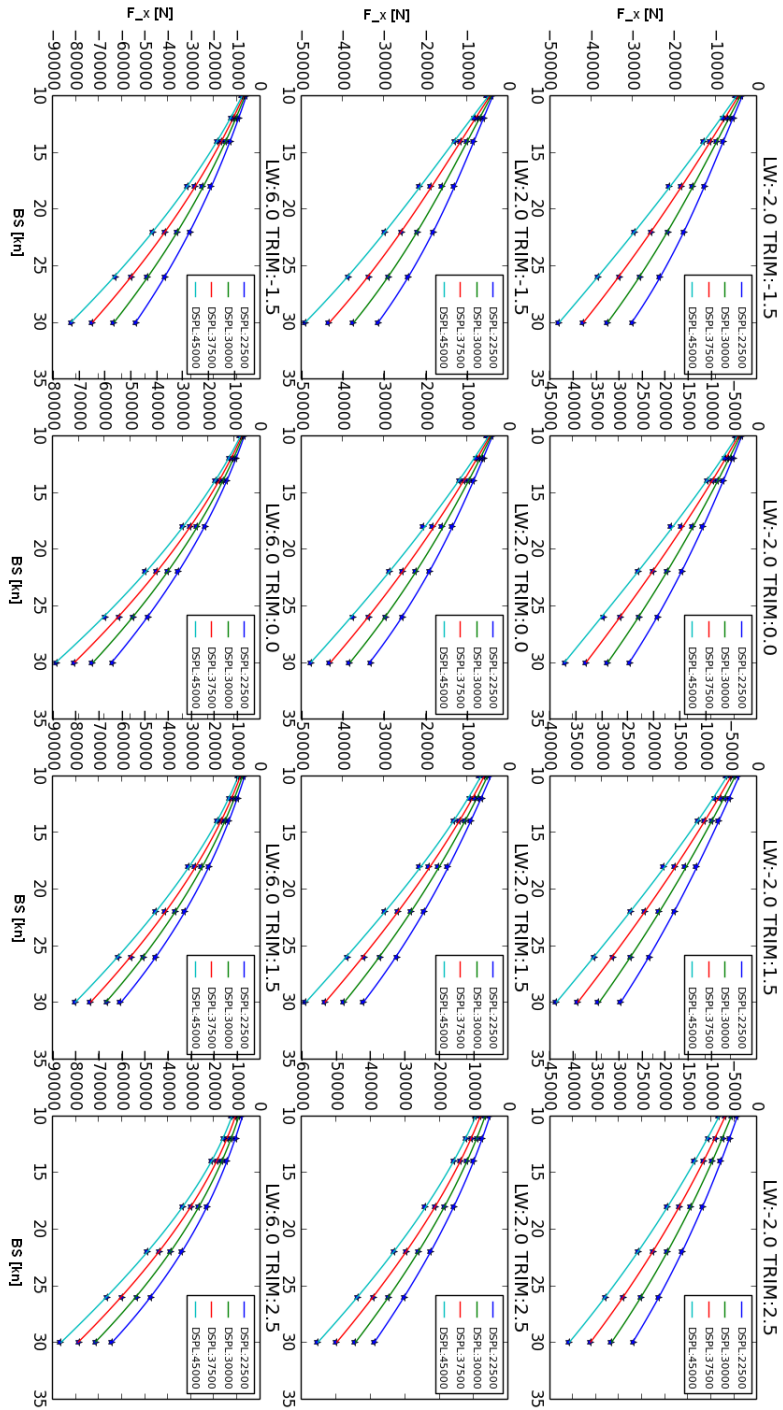


Figura A.1:  $F_x$  per HEEL=10deg



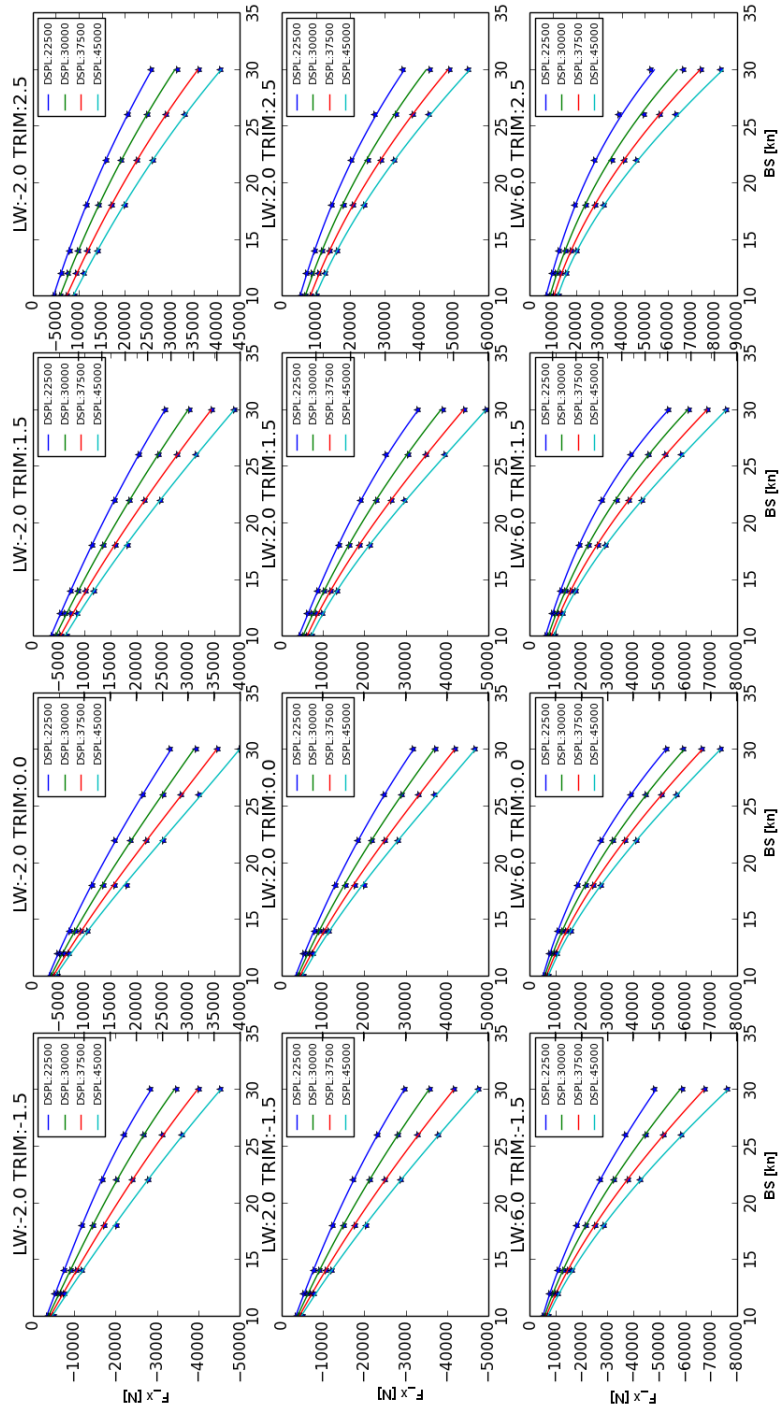


Figura A.2:  $F_x$  per HEEL=17.5deg

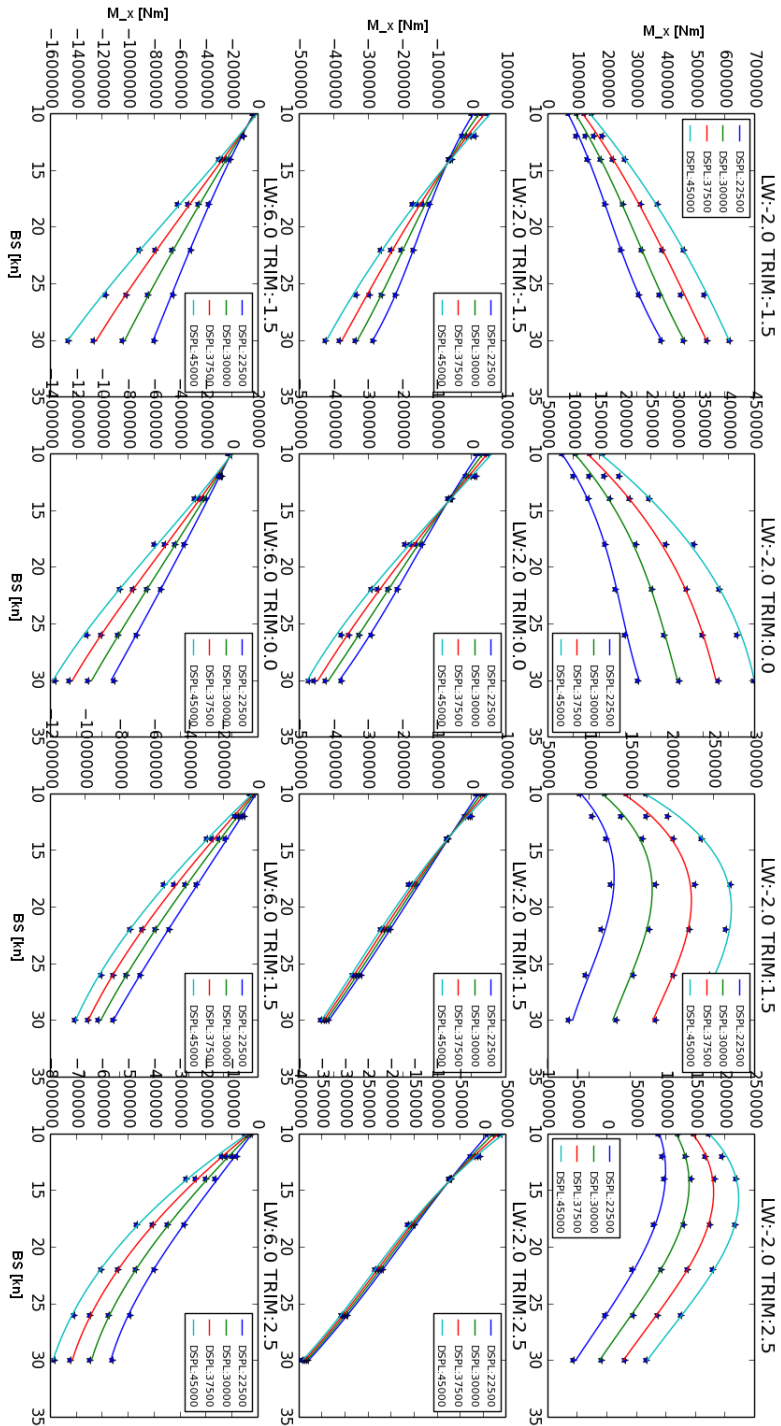


Figura A.3:  $M_x$  per HEEL=10deg

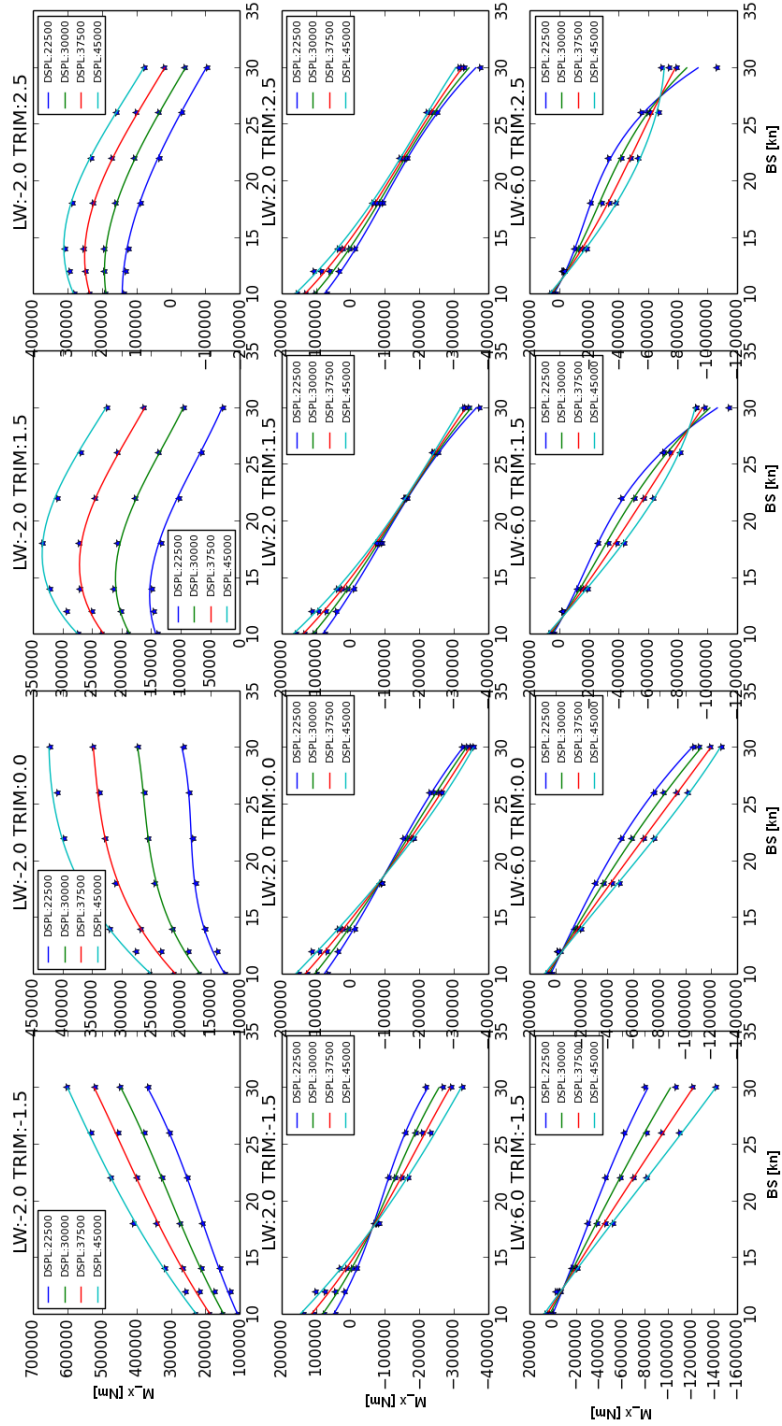


Figura A.4:  $M_x$  per HEEL=17.5deg



# Bibliografia

- [1] A. Philpott, A. Mason, Advances in optimization in yacht performance analysis, *High Performance Yacht Design Conference*, Auckland, Nuova Zelanda, 4-6 Dicembre 2002.
- [2] F. DeBord Jr., J. Reichel, B. Rosen, C. Fassardi, Design optimization for the international America's Cup class.
- [3] <http://www.scipy.org>
- [4] <http://www.challengeitalia.org>
- [5] <http://www.grandsoleil.net>
- [6] J. Védrenne, Simulation dynamique du comportement mécanique de navires, application à la propulsion éolienne, Thèse de Doctorat, Université de Nantes, Ottobre 2010.
- [7] E. Jacquin, Y. Roux, P.E. Guillerm, B. Alessandrini, Towards numerical VPP with the full coupling of hydrodynamic and aerodynamic solvers for ACC yacht, *In Proceeding of the 17<sup>th</sup> Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, Annapolis, Maryland, Marzo 2005.
- [8] R. Azcueta, Computation of turbulent free surface flows around ships and floating bodies, PhD Thesis, 2001.
- [9] Dispensa del corso di idrodinamica navale, Ecole Nationale Supérieure de Techniques Avancées
- [10] <http://syr.stanford.edu/SAILFLOW.HTM>
- [11] F. Fossati, S. Muggiasca, Experimental investigation of sail aerodynamic behavior in dynamic conditions, *Journal of Sailboat Technology*, Article 2011-02, *The Society of Naval Architects and Marine Engineers*, 2011.

- [12] G. Delhommeau, Les problemes de diffraction-radiation et de resistance de vagues: etude theorique et resolution numerique par la methode des singularites, Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Superieure de Mecanique de Nantes, 1987.
- [13] G. Delhommeau, Notice d'utilisation de REVA Version 4.6, Ecole Central de Nantes, Division Hydrodynamique Navale, Nantes, Gennaio 2008.
- [14] D. Pierotti, Problemi lineari e non lineari di flusso intorno ad ostacoli, *Le Matematiche vol. LX (2005) - Fasc. II pp.329-338*.
- [15] J. Katz, A. Plotkin, *Low-speed aerodynamic, second edition*, Cambridge University Press, 2001, pp.167-178, 206-217, 244-258.
- [16] [http://www.elvstrom-sobstad.it/it/regata/studio\\_aero/aero\\_a.htm](http://www.elvstrom-sobstad.it/it/regata/studio_aero/aero_a.htm)
- [17] M. Caponnetto, P. Rolla, M. Porro, A New Propeller Design Method for Fast Planing Hull Applications, *FAST 97*, Sydney, Australia, 21-23 Luglio 1997.
- [18] S. Malpede, A. Baraldi, A fully integrated method for optimising fiber-membrane sails, *3<sup>rd</sup> High Performance Yacht Design Conference*, Auckland, Nuova Zelanda, 2-4 Dicembre 2008.
- [19] S. Malpede, F. Nasato, A fully integrated sail-rig analysis method, *Royal Institution of Naval Architects*, 2010.
- [20] S. B. Pope, *Turbulent flows*, Cambridge University Press, 2000, pp. 83-92, 358-462.
- [21] <http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.interpolate.Rbf.html>
- [22] M. Lombardi, N. Parolini, A. Quarteroni, Radial basis functions for inter-grid interpolation and mesh motion in FSI problems MOX-Report no. 40/2012.
- [23] N. Parolini, A. Quarteroni, Modelling of numerical simulation for yacht engineering, MOX-Report no. 10/2007.
- [24] <http://www.scoop.it/t/wing-sail-technology>
- [25] F. Fossati, S. Muggiasca, I.M. Viola, An investigation of aerodynamic force modelling for IMS ruleusing wind tunnel techniques, *HISWA Symposium*, Amsterdam, Olanda, 2006.

- [26] [http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.fmin\\_slsqp.html](http://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.optimize.fmin_slsqp.html)
- [27] D. Kraft, Software package for sequential quadratic programming, Hannover 1988.
- [28] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling, B. P. Flannery, *Numerical recipes in C, The art of scientific computing, Second Edition*, Cambridge University Press, 1988-1992, capitolo 16.
- [29] A. Quarteroni, F. Saleri, *Calcolo scientifico, quarta edizione*, Springer, Milano 2008.
- [30] G. Magnani, G. Ferretti, P. Rocco, *Tecnologie dei sistemi di controllo, Seconda edizione*, McGraw-Hill, pp. 191-212.