

POLITECNICO DI MILANO

Facoltà di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in
Ingegneria Aeronautica



Studio di una procedura integrata di ottimizzazione delle vele rigide dei catamarani Classe AC72, progettati per le regate della 34th America's Cup

Relatore: Prof. Marco ANGHILERI

Co-relatore: Ing. Davide TAGLIAPIETRA

Tesi di laurea di:

Vincenzo CARABELLI Mart. 724683

Anno Accademico 2010/2011

Indice

Sommario	ix
1 Introduzione	1
1.1 Principi base della navigazione a vela	1
1.2 Storia della America's Cup	3
1.3 Storia e sviluppo delle vele rigide sui catamarani da regata	5
1.3.1 Little America's Cup	6
1.3.2 Coppa America	12
2 Vincoli di progetto	15
2.1 Regolamento AC72	15
2.2 Marstrom - M32	18
2.3 Effetti della scalatura	20
2.4 Condizioni di navigazione dimensionanti	22
2.5 Struttura dell'ala	22
2.6 Regolazioni dell'ala	24
3 Modello Aerodinamico	27
3.1 Modello 2D	28
3.1.1 Aspetti teorici	29
3.1.2 Analisi del Gap	30
3.1.3 Polari del profilo	32
3.2 Modello 3D	34
3.2.1 Aspetti teorici	34
3.2.2 Gradiente di vento	35
3.2.3 Modello della vela con Tornado	36
3.2.4 Correzione del modello Tornado	39
3.2.5 Risultati	40
4 Modello strutturale della vela	45
4.1 Geometria	45
4.2 Modello FEM	47
4.2.1 Materiali	48

4.2.2	Proprietà	49
4.2.3	Elementi	51
4.2.4	Carichi	53
4.2.5	Vincoli	54
4.3	Analisi	55
5	Modello di resistenza idrodinamica	57
5.1	Resistenza degli scafi	57
5.2	Resistenza aerodinamica aggiunta	60
5.3	Verifica della resistenza tramite VPP	60
6	Sviluppo di un ciclo di calcolo delle prestazioni	61
6.1	Vento apparente	61
6.2	Equilibrio laterale	63
6.3	Equilibrio longitudinale	64
6.4	Ciclo iterativo	65
7	Ciclo di ottimizzazione strutturale integrato	67
7.1	Calcolo della deformata strutturale	67
7.2	Parametri da ottimizzare	67
7.3	Aggiornamento del modello aerodinamico	68
8	Risultati	69
8.1	Analisi aerodinamica	69
8.2	Analisi strutturale	75
8.3	Verifica dei carichi aerodinamici	80
8.4	Ottimizzazione delle laminazioni	82
9	Conclusioni	83
9.1	Sviluppi futuri	84
A	Termini velici	85
	Bibliografia	87

Elenco delle figure

1.1	Vento reale - Vento apparente	2
1.2	Il trofeo della Coppa America	4
1.3	Flusso e distribuzione di pressione attorno a una vela e ad un'ala .	5
1.4	Nave da carico equipaggiata con vele rigide	6
1.5	Imbarcazioni di Classe C	7
1.6	Catamarano Clase C - Miss Nylex	9
1.7	Diverse soluzioni di ala rigida su Classe-C	10
1.8	Stars & Stripes equipaggiata con vela rigida	12
1.9	Catamarano BMW-Oracle BOR90, 2010	13
1.10	Confronto tra BMW-Oracle BOR90 e un A380	14
2.1	Limiti geometrici della vela rigida di un classe AC72	17
2.2	Catamarano Marstrom - M32	18
2.3	Limiti geometrici della vela e geometria effettiva	19
2.4	Confronto curve $C_L - \alpha$ al variare di Re	21
2.5	Polari del profilo al variare di Re	21
2.6	Zona di regata della 34th America's Cup	22
2.7	Struttura completa di un AC45	23
2.8	Sistema di controllo dell'ala di un AC45	24
2.9	Delta di collegamento ala-flap di un AC45	25
3.1	Forma del profilo con Flap al 45%	28
3.2	Distribuzione di pressione attorno al profilo con $\delta = 30^\circ$	29
3.3	Campo di flusso attorno al profilo, $\alpha = 0$, $\delta = 30^\circ$	30
3.4	Polari al variare del Gap per $\delta = 20^\circ$	31
3.5	Polari al variare del Gap per $\delta = 30^\circ$	31
3.6	Curve $C_L - \alpha$ al variare di δ	32
3.7	Polari $C_L - C_D$ al variare di δ	32
3.8	Valori di C_L in funzione di α e δ	33
3.9	Valori di C_D in funzione di α e δ	33
3.10	Gradiente di vento con $V_{Ref} = 10m/s$ a 10m	36
3.11	Distribuzione di portanza sulla vela	37
3.12	Geometria del modello Tornado	37

3.13	Suddivisione in pannelli del modello Tornado	38
3.14	Punti di collocazione del modello Tornado	38
3.15	Modello di verifica Tornado	39
3.16	Punti di collocazione sul modello di verifica	39
3.17	Confronto curve $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 10^\circ$	40
3.18	Confronto curve $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 20^\circ$	40
3.19	Confronto curve $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 30^\circ$	41
3.20	Differenza di C_L prima della correzione	41
3.21	Confronto curve corrette $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 10^\circ$	42
3.22	Confronto curve corrette $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 20^\circ$	43
3.23	Confronto curve corrette $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 30^\circ$	43
3.24	Differenza di C_L dopo la correzione	44
4.1	Geometria della vela rigida	46
4.2	Modello FEM della vela	48
4.3	Dettaglio del modello ad elementi finiti	51
4.4	Dettaglio della centina alla base della vela	52
4.5	Nodi su cui sono applicati i carichi aerodinamici	53
4.6	Punti di vincolo del FEM	54
5.1	Modello dello scafo per il VPP	59
6.1	Variazione di angolo del vento apparente in altezza	62
6.2	Forze che contribuiscono al momento ribaltante	64
6.3	Schema del ciclo di calcolo delle prestazioni	65
6.4	Angoli di massima spinta della vela al variare di δ	66
7.1	Punti di calcolo della deformazione della vela	68
8.1	Spinta della vela in funzione dell'angolo al vento	69
8.2	Angolo di deflessione del flap (alla base, a metà, in cima)	70
8.3	Velocità della barca	70
8.4	<i>Velocity made good</i> nelle diverse andature	71
8.5	Deflessione del profilo principale e dei flaps	72
8.6	Distribuzione di C_P sull'ala	73
8.7	Taglio sull'ala	73
8.8	Carico alare in apertura	74
8.9	Distribuzione di C_L in apertura	74
8.10	Spostamento massimo dei nodi	75
8.11	Spostamento massimo in testa d'albero	76
8.12	Spostamento massimo, vista frontale	77
8.13	Failure index degli elementi sulle centine	77
8.14	Failure index sugli elementi dell'ala	78
8.15	Failure index degli elementi alla base della vela	78

8.16	Primo modo di buckling locale alla base	79
8.17	Secondo modo di buckling locale	79
8.18	Distribuzione di C_L , ala indeformata e deformata	81
8.19	Centine di un ala di un AC45	82

Elenco delle tabelle

1.1	Elenco edizioni della Little America's Cup	11
2.1	Tabella confronto AC72-M32	20
4.1	Caratteristiche del tessuto unidirezionale	49
4.2	Caratteristiche dell'acciaio	49
4.3	Caratteristiche del laminato del longherone anteriore	50
4.4	Caratteristiche del laminato delle centine	50
4.5	Elementi del modello	51
5.1	Moduli del VPP	58
8.1	Risultati dell'analisi aerodinamica	72
8.2	Autovalori analisi di buckling	76
8.3	Risultati dell'analisi aerodinamica sulla struttura deformata	80
8.4	Variazioni nelle dimensioni del gap ala-flap	81

Sommario

Il presente lavoro di tesi riguarda lo sviluppo di una procedura per il calcolo delle prestazioni di un catamarano da regata dotato di vela rigida. L'obiettivo finale è quello di simulare il comportamento della vela in funzione del vento alle diverse andature, così da poter stimare le prestazioni dei catamarani classe AC72, che prenderanno parte alla 34esima Coppa America di vela nel 2013. Queste imbarcazioni, grazie all'utilizzo di moderne tecnologie e materiali all'avanguardia, saranno in grado di raggiungere velocità fino a tre volte quella del vento e avranno a bordo i migliori velisti a livello mondiale.

Lo studio delle prestazioni integra un modello aerodinamico di tipo *Vortex Lattice* per il calcolo dei carichi agenti sulla vela; un modello strutturale ad elementi finiti per il calcolo delle sollecitazioni e un modello idrodinamico per il calcolo della resistenza degli scafi.

L'obiettivo della tesi è l'implementazione di un metodo di analisi ingegneristico che integri lo studio aerodinamico e quello strutturale così da poter creare un ciclo di ottimizzazione valido per il dimensionamento di una generica vela rigida.

Parole chiave: vela rigida, catamarano, Coppa America, modellazione parametrica, ciclo integrato di ottimizzazione

Abstract

This thesis concerns the development of a procedure for calculating the performance of a racing catamaran with wing sail. The objective is to simulate the behaviour of the wing sail in different wind condition at many points of sailing, in order to estimate the performance of the AC72 Class catamarans. Boat which will take part in the 34th America's Cup in 2013. These vessels, by using modern technologies and materials, will be able to reach speeds up to three times the wind speed and will be conducted by the best sailors in the world.

The study of the performance includes a *Vortex Lattice* aerodynamic model for calculating the loads on the sail, a finite element model for the stress evaluation in the structure and an hydrodynamic model for the resistance of the hulls.

The aim of the thesis is the implementation of an engineering method of analysis that integrates structural and aerodynamic model to create a cycle of optimization valid for the design of a generic wing sail.

Key word: wing sail, catamaran, America's Cup, parametric modeling, integrated optimization cycle

Capitolo 1

Introduzione

1.1 Principi base della navigazione a vela

La barca a vela è un mezzo estremamente complesso che si muove grazie all'interazione tra due fluidi di densità diverse: l'aria e l'acqua, che scorrono con velocità differenti rispetto alla barca. Spinta solamente dalla forza del vento è grado di risalirlo e, in certi casi, di andare più veloce di esso.

Grazie alle superfici aerodinamiche, le vele, una barca recupera energia dall'aria trasformandola in movimento e per mezzo delle superfici immerse, la carena e le appendici, si mantiene su una rotta rettilinea.

La barca, per muoversi, sfrutta sostanzialmente gli stessi principi base che consentono agli aerei di mantenersi in volo: l'utilizzo di superfici portanti. Da questo derivano le affinità tra l'ambiente aeronautico e il mondo della vela e la possibilità di utilizzare gli stessi strumenti di calcolo per caratterizzarne il comportamento.

Il movimento della barca nell'acqua genera sulle vele, oltre al *vento reale*, anche una componente di vento opposta alla direzione di moto, detto *vento di velocità*. La risultante vettoriale tra vento reale e vento di velocità genera il cosiddetto *vento apparente*, che nelle andature di bolina può avere intensità anche doppia di quella del vento reale.

L'azione del vento apparente su tutta la parte emersa della barca (scafo, attrezzatura e vele) provoca una forza aerodinamica distribuita, la cui risultante viene applicata in un punto della vela detto *centro velico*. Questa forza può essere scomposta in una componente di resistenza avente la stessa direzione del flusso apparente e in una di portanza avente direzione perpendicolare ad esso. Tuttavia tipicamente si preferisce utilizzare una diversa scomposizione che consiste

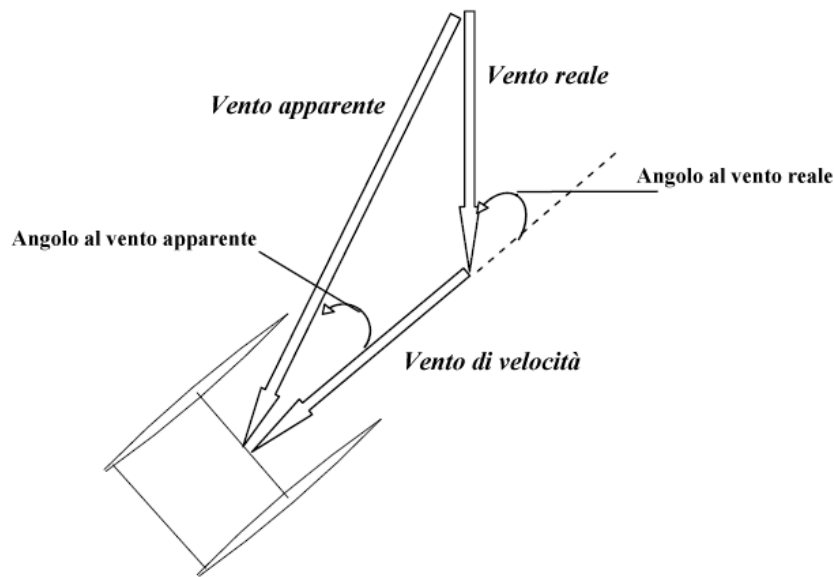


Figura 1.1: Vento reale - Vento apparente

nel considerare una componente di *forza propulsiva*, parallela alla direzione di avanzamento della barca e una componente di *forza laterale*, perpendicolare a questo asse.

La forma appiattita delle vele fa sì che queste si comportino come un profilo alare molto sottile. Si viene quindi a creare una notevole componente di portanza aerodinamica e solo una piccola componente di resistenza, che si traduce in un'elevata efficienza aerodinamica. La composizione di queste due forze genera la spinta necessaria che permette all'imbarcazione di avanzare.

Andando ad analizzare la situazione sotto la linea di galleggiamento si scopre che anche le appendici svolgono un ruolo analogo a quello delle vele. Infatti la pinna di deriva, il timone e l'opera viva si trovano investite da un flusso di acqua posto in moto relativo rispetto ad essi. Il risultato di tale interazione è la produzione di una forza idrodinamica applicata in un punto della chiglia chiamato *centro di deriva*.

Sia le vele che le appendici sono soggette ad una forza laterale che provoca un momento *ribaltante* sulla barca, il quale deve essere equilibrato dal momento *rad-drizzante* generato dalla forza peso dello scafo e dell'equipaggio affinché la barca si mantenga stabile in navigazione.

A causa della spinta laterale esercitata dalle vele, la rotta percorsa dallo scafo risulta deviata sottovento di un piccolo angolo, detto *angolo di scarroccio*, che rappresenta l'incidenza con cui il flusso d'acqua lambisce la parte immersa dello scafo. Maggiore è la velocità della barca, minore sarà l'angolo di scarroccio che serve a generare le forze sulle appendici. Anche in questo caso la forza idrodinamica può essere scomposta in due componenti, una resistenza idrodinamica diretta come la velocità relativa ed una portanza idrodinamica diretta perpendicolarmente alla velocità relativa.

Nel momento in cui l'imbarcazione è in navigazione le forze aerodinamiche e quelle idrodinamiche devono trovarsi in equilibrio per mantenere una condizione di navigazione statica. Altrimenti si instaura un equilibrio dinamico tra tutte le forze agenti che provoca delle accelerazioni, le quali determinano le manovre che la barca è in grado di compiere.

Un altro aspetto molto importante da considerare è che i due contributi aerodinamico ed idrodinamico non possono sussistere singolarmente, ma devono coesistere producendo entrambi un effetto positivo per il movimento (la forza motrice aerodinamica e la portanza idrodinamica) ed uno nocivo (la resistenza idrodinamica e la forza sbandante aerodinamica).

Trovandosi libera di muoversi all'interno di due fluidi, nel calcolo della stabilità bisogna prendere in considerazione l'equilibrio attorno a tutti i sei gradi di libertà rigidi della barca.

Infatti l'equilibrio laterale delle forze consente alla barca di andare dritta, l'equilibrio longitudinale la fa avanzare, quello verticale la sostiene sulla superficie dell'acqua. Allo stesso modo i tre momenti principali devono dare risultante nulla.

In questo senso i catamarani risultano avvantaggiati rispetto alle imbarcazioni con un solo scafo perché la larghezza maggiore consente di posizionare i pesi più distanti dall'asse rotazione longitudinale e sviluppare un maggior momento raddrizzante, che si traduce in una maggiore spinta avanzante.

1.2 Storia della America's Cup

La America's Cup è il trofeo velico, ma anche sportivo, più antico al mondo per cui si compete tuttora. La prima edizione si svolse nel 1851 attorno all'Isola di White, mentre l'ultima, la 33esima, è stata disputata nel 2010 nelle acque antistanti Valencia. Si tratta di una serie di regate *match-race*, ovvero tra due imbarcazioni a vela che gareggiano una contro l'altra: le regate vedono contrapporsi il *Defender* (detentore della Coppa) e il *Challenger* (sfidante), appartenenti a due Yacht Club diversi.



Figura 1.2: Il trofeo della Coppa America

La prima edizione della coppa vide contrapposti gli americani del New York Yacht Club con lo schooner *America* e il *Royal Yacht Squadron* britannico con 14 imbarcazioni: gli americani ebbero la meglio e la coppa, inizialmente chiamata *Coppa delle cento ghinee*, prese il nome dell'imbarcazione vincitrice. Secondo quanto riportato dalle cronache dell'epoca, la regina inglese chiedendo quale barca fosse giunta seconda si vide rispondere: “*There is no second, your Majesty*”, frase che divenne il motto della competizione.

Fin dalle prime edizioni i partecipanti dedicarono enormi sforzi economici e nella progettazione finalizzati alla ricerca della vittoria, tanto che gli yacht partecipanti sono sempre stati di grandi dimensioni e con caratteristiche innovative, avendo poche restrizioni su come dovessero essere costruite. Nelle varie edizioni si passò da scafi in alluminio, utilizzati fino al 1988, a scafi in fibra di vetro più leggeri e performanti, per arrivare ai recenti scafi in fibra di carbonio che garantiscono elevata resistenza con pesi molto ridotti. Nonostante l'elevato livello innovativo, quasi tutte le edizioni del trofeo furono disputate su barche monoscafo e con velatura tradizionale, ad eccezione di due, in cui il comitato organizzativo formato dai membri dei vari team non riuscì a trovare un accordo sulle regole della competizione: in questi casi si ricorre al cosiddetto *Deed of Gift*, un documento redatto e depositato dal New York Yacht Club presso la Suprema Corte di New York nel 1852 in cui sono contenute le poche regole che in questi casi governano la sfida tra Defender e Challenger per aggiudicarsi il trofeo. Il *Deed of Gift* è stato applicato fino ad oggi in due sole occasioni: nel 1988 e nel 2010, dando un grande slancio all'innovazione e alla sperimentazione di nuove soluzioni. Infatti le poche regole lasciano grande libertà nella costruzione delle imbarcazioni per la sfida.

In entrambe queste edizioni della America's Cup le regate furono vinte da imbarcazioni multiscafo che prevedevano l'utilizzo di una vela rigida: nel primo caso sul catamarano americano *Stars and Stripes* e nel secondo caso sul trimarano *BMW Oracle Racing*.

1.3 Storia e sviluppo delle vele rigide sui catamarani da regata

Seppur con diverse forme e dimensioni, per migliaia di anni sono state utilizzate su tutti i tipi di imbarcazioni vele costituite da un materiale flessibile montato su un supporto rigido. Fino a quando lo studio di profili alari utilizzati per le ali degli aerei ha portato a sviluppare in analogia delle vele costituite da un profilo rigido.

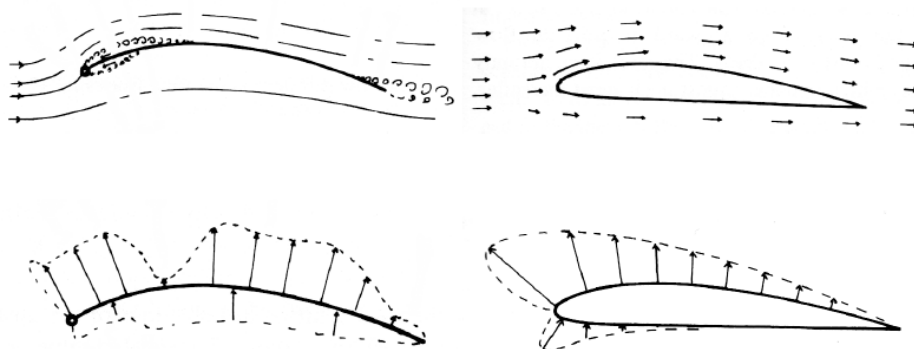


Figura 1.3: Flusso e distribuzione di pressione attorno a una vela e ad un'ala

Negli anni 80 vennero condotti numerosi studi per sviluppare le vele rigide in ambito commerciale, tuttavia questi studi erano finalizzati alla movimentazione di grandi imbarcazioni da trasporto con l'energia del vento, piuttosto che alla ricerca di elevate prestazioni.

Il maggiore sviluppo si ebbe invece nella ricerca dei record di velocità a vela e su imbarcazioni da regata altamente competitive. Negli ultimi anni imbarcazioni come *Sailrocket* o *Wotrocket*, progettate con l'unico scopo di battere il record di velocità sono state equipaggiate con un'unica vela rigida.



Figura 1.4: Nave da carico equipaggiata con vele rigide

Soltanto di recente le vele rigide hanno fatto la loro comparsa in regate ad alto livello, in particolare su imbarcazioni di Classe-C e su alcune barche partecipanti alla Coppa America.

Sulle imbarcazioni da turismo invece le vele rigide non hanno sinora riscosso grande successo per due principali motivi: non possono essere ridotte facilmente in caso di vento forte e risultano notevolmente più fragili e costose rispetto ad una vela tradizionale.

Lo sviluppo della vela rigida come la conosciamo oggi nel mondo della vela ad alte prestazioni iniziò con la definizione di nuove classi di catamarani nei primi anni 60. Quattro classi principali vennero definite: Classe A, B, C e D, in ognuna delle quali erano vincolate solamente la lunghezza e la larghezza massime degli scafi e la massima superficie velica, lasciando notevole libertà allo sviluppo. Di queste la Classe-C è quella che ha avuto le maggiori innovazioni portando tutte le imbarcazioni ad adottare una soluzione a vela rigida.

1.3.1 Little America's Cup

Il nome “Little America's Cup” deriva dal fatto che si tratta di una competizione disputata in eventi match-race così come la vera e propria America's Cup, anche se in realtà i due eventi non hanno molto in comune: la denominazione ufficiale di questa competizione è infatti “The International Catamaran Challenge Trophy” (ICCT). Da una parte il nome fu scelto perché richiamava l'attenzione dei media

e degli sponsor, ma dall'altra a molti non piacque la connotazione diminutiva che veniva affibbiata all'evento, che avrebbero voluto fosse chiamata "Fast America's Cup".



Figura 1.5: Imbarcazioni di Classe C

Negli anni successivi alla Seconda Guerra Mondiale, materiali da costruzione leggeri a basso costo, prodotti durante la guerra, in particolare il compensato marino, la fibra di vetro, estrusi in alluminio e tessuti sintetici, divennero disponibili sul mercato comune rilanciando la costruzione di barche a vela a basso costo e i progetti innovativi. Con l'obiettivo di raggiungere velocità sempre più elevate, alcuni progettisti si lanciarono nella costruzione di barche a due o più scafi. Fu in questi anni che nacquero in diverse parti del mondo, dall'America all'Australia, svariate classi di piccoli catamarani leggeri, che in breve tempo riscossero grande successo.

Nel 1959 la barca Americana *Tigercat*, progettata da Bob Harris, vinse un'importante regata in Florida, la *Yachting's One of a Kind Regatta* e venne definita l'imbarcazione più veloce al mondo. Questo attirò l'attenzione di Roderick Macalpine-Downie, pioniere dei catamarani inglesi, che volle sfidare la *Eastern Multihull Association* degli Stati Uniti in una serie di regate match-race, con un formato simile a quello della Coppa America. La sfida si costituiva di 7 regate tra il defender e lo sfidante di un diverso Paese, delle quali il primo team a vincerne quattro si sarebbe portato a casa il trofeo. Si decise di regatare su catamarani

derivati dal modello della classe *RYA Open 300* per assicurare che entrambi gli equipaggi non partissero da zero nella progettazione della barca.

Nel 1962 la classe RYA Open 300 venne definita dall'ISAF, l'organismo velico internazionale, *Classe-C* e rimase la classe utilizzata nei successivi 34 anni per le regate della *Little America's Cup*.

Le semplici regole su cui si basa sono:

- Lunghezza dello scafo di 25ft (7.62 m)
- Larghezza complessiva di 14ft (4.27 m)
- Superficie velica di 300 ft^2 (27.87 m^2)
- La superficie velica deve comprendere l'area dell'albero e del boma
- Equipaggio di 2 persone con 1 singolo trapezio (fino al 2004)
- Scafi simmetrici
- Nessun peso minimo

La semplicità di queste regole, che tutt'oggi sono rimaste pressoché invariate, ha incoraggiato i progettisti a trovare innovazioni sempre maggiori, dato che virtualmente qualsiasi cosa era ammessa. Inoltre diverse nazioni sono state coinvolte in questo trofeo a testimonianza della internazionalità della competizione, vinta negli anni da Inghilterra, Danimarca, Australia e Stati Uniti (Italia, Francia e Nuova Zelanda hanno partecipato senza successo).

Verso la metà degli anni sessanta si iniziò a capire che per ottenere prestazioni migliori era necessario concentrarsi sull'efficienza delle vele: si iniziò a fare dei parallelismi con il mondo aeronautico, immaginando il piano velico come un'ala di aereo posta in verticale, con la differenza che gli aerei necessitano di portanza in una sola direzione mentre le barche a vela necessitano di utilizzare entrambe le direzioni per generare una forza portante. La prima soluzione adottata fu l'introduzione di alberi alari (wing-mast) che permettevano di migliorare la forma aerodinamica delle vele: l'albero divenne quindi più grande (dal 20% al 40% della corda totale) e a questo si affiancavano ancora vele tradizionali.

La supremazia inglese durò fino al 1969 quando i Danesi riuscirono a vincere il trofeo con il catamarano *Opus III* in cui fu adottato per la prima volta un sistema di precisione per il controllo della torsione della vela, che fu vincente nonostante la maggiore resistenza introdotta dal sistema. La naturale evoluzione dell'albero alare fu la vela rigida, in cui tutta la superficie velica diventa parte di una struttura rigida: il primo catamarano che introdusse questo sistema fu *Miss*

Nylex sviluppata dagli Australiani, che tra il 1970 e il 1976 furono detentori del trofeo.

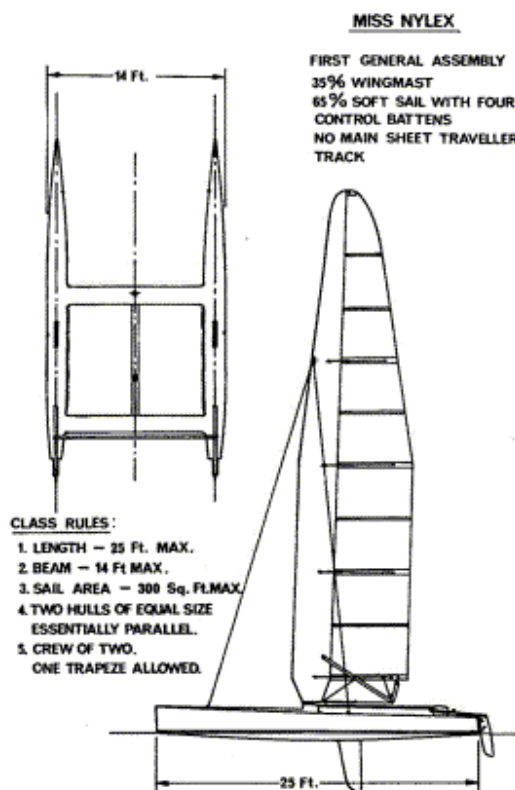


Figura 1.6: Catamarano Clase C - Miss Nylex

Questa innovazione permise di aumentare le prestazioni della barca. Infatti introducendo il controllo della curvatura del profilo alare attraverso un flap fu possibile ottenere coefficienti di portanza decisamente più elevati rispetto alla configurazione tradizionale, e quindi la soluzione ad ala rigida divenne da subito lo stato dell'arte per i catamarani di Classe-C.

Nel corso degli anni furono provate diverse soluzioni con ala dotata di flap, molte delle quali erano ali simmetriche con un flap esterno in grado di modificare la forma del profilo su entrambi i lati.

La figura 1.7 mostra quattro imbarcazioni con differenti configurazioni ad ala rigida che hanno partecipato alla competizione.



(a) Hinge 1987



(b) Wingmill 1987



(c) Edge III 1991



(d) Ronstan 2004

Figura 1.7: Diverse soluzioni di ala rigida su Classe-C

Dal 2004 la formula è cambiata e le regate non sono più di tipo match race ma di flotta, aperte a più sfidanti di diverse Nazioni.

L'edizione del 2010 ha visto sfidarsi sei imbarcazioni nelle acque di New York: Canaan (CAN), Alpha (AUS), Invictus(GBR), Orion(CAN), Patient Lady IV (FRA), Aethon (USA). A vincere è stata Canaan, con a bordo Fred Eaton e Magnus Clarke, che nella conclusiva regata match-race contro Alpha, degli australiani Glenn Ashby e James Spithill, ha avuto la meglio in tre delle quattro prove disputate.

La prossima edizione della coppa, prevista per il 2013, sarà ospitata in Inghilterra dal *Team Invictus* e dovrebbe vedere la presenza di un team italiano, *Challenge Italia*.

La tabella seguente riporta i vincitori di tutte le edizioni del trofeo.

Anno	Luogo	Defender	Sfidante	Risultato
1961	Southend on Sea, UK	Hellcat II (UK)	Wildcat 300 (USA)	4-1
1962	Thorpe Bay, UK	Hellcat I (UK)	Beverly (USA)	4-1
1963	Thorpe Bay, UK	Hellcat III (UK)	Quest (Aust)	4-0
1964	Thorpe Bay, UK	Emma Hamilton (UK)	Sealion (USA)	4-1
1965	Thorpe Bay, UK	Emma Hamilton (UK)	Quest II (Aust)	4-3
1966	Thorpe Bay, UK	Lady Helmsman (UK)	Weathercock (USA)	4-2
1967	Thorpe Bay, UK	Lady Helmsman (UK)	Quest III (Aust)	4-2
1968	Thorpe Bay, UK	Lady Helmsman (UK)	Yankee Flyer (USA)	4-3
1969	Thorpe Bay, UK	Ocelot (UK)	Opus III (Denmark)	3-4
1970	Sejlkлуб, Den,	Sleipner (Den)	Quest III (Aust)	3-4
1972	Sorrento, AU	Quest III (Aust)	Gamecock (USA)	4-0
1974	Sorrento, AU	Miss Nylex (Aust)	Miss Stars (NZ)	4-0
1976	Sorrento, AU	Miss Nylex (Aust)	Aquarius V (USA)	3-4
1977	Cabrillo Beach, USA	Patient Lady III (USA)	Miss Nicholas (Aust)	4-0
1978	Roton Point, USA	Patient Lady IV (USA)	Miss Lancia (Italia)	4-0
1980	Roton Point, USA	Patient Lady V (USA)	Signor G (Italia)	4-0
1982	Roton Point, USA	Patient Lady V (USA)	Signor G (Italia)	4-0
1985	Roton Point, USA	Patient Lady VI (USA)	Victoria 150 (Aust)	4-0
1987	McCrae, AU	The Edge (Aust)	The Hinge (UK)	4-0
1989	McCrae, AU	Edge II (Aust)	Wingmill (USA)	no race
1991	McCrae, AU	Edge III (Aust)	Freedom's Wing (USA)	4-1
1996	McCrae, AU	Edge III (Aust)	Cogito (USA)	0-4
2007	Royal Canadian YC, CAN	Cogito (USA)	Alpha (CAN)	0-5
2010	New York YC, USA	Canaan (CAN)	Alpha (AUS)	3-1

Tabella 1.1: Elenco edizioni della Little America's Cup

Oltre che su catamarani di Classe C, nel 1985 e nel 2007 le vele rigide comparvero anche su alcune imbarcazioni partecipanti al Campionato del Mondo di Classe A, tuttavia gli equipaggi continuarono a preferire le vele tradizionali sostenendo che le prestazioni erano molto simili a quelle ottenute in precedenza, ma la barca risultava più difficile da portare. Infatti la maggiore massa della vela rigida spostava il centro di gravità più in alto, aumentando il beccheggio in condizioni di mare formato.

In generale, anche sui Classe-C, i punti a sfavore di questa soluzione innovativa, che ne continuano a limitare la diffusione, sono:

- La minor facilità di utilizzo
- La costruzione più costosa e complessa della vela rigida
- Le difficoltà di montaggio/smontaggio
- L'impossibilità di ridurre la vela in condizioni di vento forte

1.3.2 Coppa America

Un ambiente dove questi problemi sono facilmente superabili data la notevole disponibilità economica e tecnologica è sicuramente la Coppa America. La prima vela rigida fu montata su uno dei catamarani di *Stars and Stripes*, realizzati per difendere la America's Cup nel 1988: il team Challenger neozelandese aveva lanciato la sfida agli americani costruendo un enorme monoscafo della lunghezza di 120 ft (36.57 m) spinto da vele tradizionali, decisamente più grande delle imbarcazioni fino ad allora utilizzate nelle regate.



Figura 1.8: Stars & Stripes equipaggiata con vela rigida

Il tempo a disposizione del Defender per presentarsi alla sfida non era molto, solo 10 mesi, e quindi si decise di intraprendere una soluzione molto radicale: costruire un catamarano di circa 60 ft (18 m) di lunghezza, che avrebbe garantito tempi di realizzazione inferiori e prestazioni in termini di velocità migliori rispetto al monoscafo. Inoltre vennero realizzati due catamarani, uno equipaggiato con vele tradizionali e il secondo con una rivoluzionaria vela rigida, realizzata grazie ad un perfetto connubio tra architettura navale ed ingegneria aeronautica: il team che sviluppò questa ala comprendeva persone di grande esperienza sui catamarani di Classe C che già utilizzavano vele rigide, tra cui Dave Hubbard e Duncan MacLane, ma coinvolse anche Burt Rutan per la sua esperienza aeronautica. La prima ala che venne realizzata mostrava di essere meno efficiente delle vele tradizionali in venti leggeri ma garantiva una maggiore velocità con venti sostenuti, anche se ci si rese conto che i rischi di rottura erano elevati. Per questi motivi il team decise di sviluppare una vela rigida del 40% più grande rispetto alla precedente e con una resistenza strutturale maggiore, raggiungendo un'altezza di 32 metri, che portò il team alla vittoria.

Più di recente la soluzione ad ala rigida è stata adottata da BMW Oracle nel 2010 in occasione della 33esima Coppa America, svoltasi anch'essa sotto le regole del Deed of Gift, che ha consentito agli Americani di dominare le regate disputate contro gli svizzeri di Alinghi, detentori del trofeo.



Figura 1.9: Catamarano BMW-Oracle BOR90, 2010

Il progetto di questo trimarano di 90 ft (27 m), sia in lunghezza che in larghezza, anche in questo caso non partì subito con l'idea di essere spinto da una vela rigida, ma fu durante le prime fasi di costruzione che il team iniziò a prendere confidenza con le potenzialità di questa soluzione. Vennero condotti test su un catamarano di Classe A (18 ft) spinto da vela rigida: la capacità di raggiungere coefficienti di portanza più elevati e quindi di generare una maggiore spinta, soprattutto con venti leggeri, diede il via libera alla costruzione dell'enorme ala necessaria al trimarano.

L'enorme ala, la più grande mai realizzata, raggiungeva l'altezza di 68 metri, superando per dimensioni quella di un A380.



Figura 1.10: Confronto tra BMW-Oracle BOR90 e un A380

Capitolo 2

Vincoli di progetto

Lo sviluppo di una vela rigida parte dall'esigenza di costruire imbarcazioni con prestazioni sempre più elevate, in grado di vincere nelle più importanti competizioni veliche. Tra queste grande importanza, sia come risalto internazionale che come capitali investiti, ha sicuramente la *America's Cup*, cui partecipano i più importanti velisti mondiali. L'ultima edizione, la 33esima, svoltasi nelle acque di Valencia nel 2010, ha visto trionfare il team di BMW Oracle con un innovativo trimarano dotato di vela rigida. Questa novità ha generato molto interesse riguardo alla nuova soluzione tecnologica e molti studi sono in corso per cercare di caratterizzarne il comportamento nelle diverse andature, soprattutto in vista della prossima edizione della *America's Cup* in cui una vela rigida sarà obbligatoria su ogni imbarcazione.

In base a queste considerazioni si è scelto di utilizzare come modello di riferimento su cui sviluppare il progetto l'AC72, catamarano di 72 piedi con albero alto 40 metri, e sviluppare poi soluzioni in scala ridotta su cui poter svolgere delle analisi sperimentali.

2.1 Regolamento AC72

Le specifiche per la costruzione di una barca che possa partecipare alle regate della 34esima Coppa America, prevista per il 2013, sono contenute nel regolamento di classe degli AC72.

Nel regolamento vengono indicate tutte le principali dimensioni, i limiti di peso e i principali materiali da utilizzare per gli scafi e per le vele.

L'intento è quello di ridurre al minimo le differenze tra le barche, mettendo così in evidenza il valore aggiunto degli equipaggi nel corso delle regate. Questo spinge i progettisti alla ricerca di soluzioni sempre più efficienti con l'obiettivo di raggiungere le massime prestazioni.

Le principali caratteristiche dell'AC72, presenti nella versione 1.1 del regolamento, attualmente la più recente (emessa il 22 Febbraio 2011) sono:

- La barca deve avere 2 scafi: ciascuno dei quali dotato di 1 deriva e 1 timone, e nessun'altra appendice
- Vele ammesse: 1 ala rigida, 1 fiocco, 1 Code 0, 1 Gennaker
- Lunghezza massima degli scafi: $22m$
- Larghezza massima della barca: $14m$
- Pescaggio massimo: $4.4m$
- Lunghezza massima dei timoni: $5.5m$
- Peso complessivo: $5700 - 5900Kg$
- Altezza massima dell'albero: $40m$
- Nessun trattamento elettrico, magnetico, termico, chimico a vele e scafi
- Gli scafi non devono contenere acqua per limitare lo sbandamento
- Nessun movimento relativo tra scafi e traverse ad eccezione della deformazione strutturale
- Equipaggio: 11 persone (957 - 1012 Kg)
- Vento consentito: tra 5 kn e 30 kn

Di particolare interesse sono le limitazioni imposte all'ala rigida:

- Forma simmetrica
- Geometria imposta (vedi figura 2.1)
- Punto di rotazione unico posto a 1.9 - 2.4 m dal piano di galleggiamento
- Superficie velica: $255 - 260m^2$ sul piano medio
- Sezione massima del profilo: $5.5m^2$ alla base, $2.25m^2$ all'estremità
- Peso minimo: $1325Kg$ (inclusi 21 Kg di attrezzature audio-video)
- Baricentro sopra i 17 m di altezza dalla base
- Materiali: fibra di carbonio

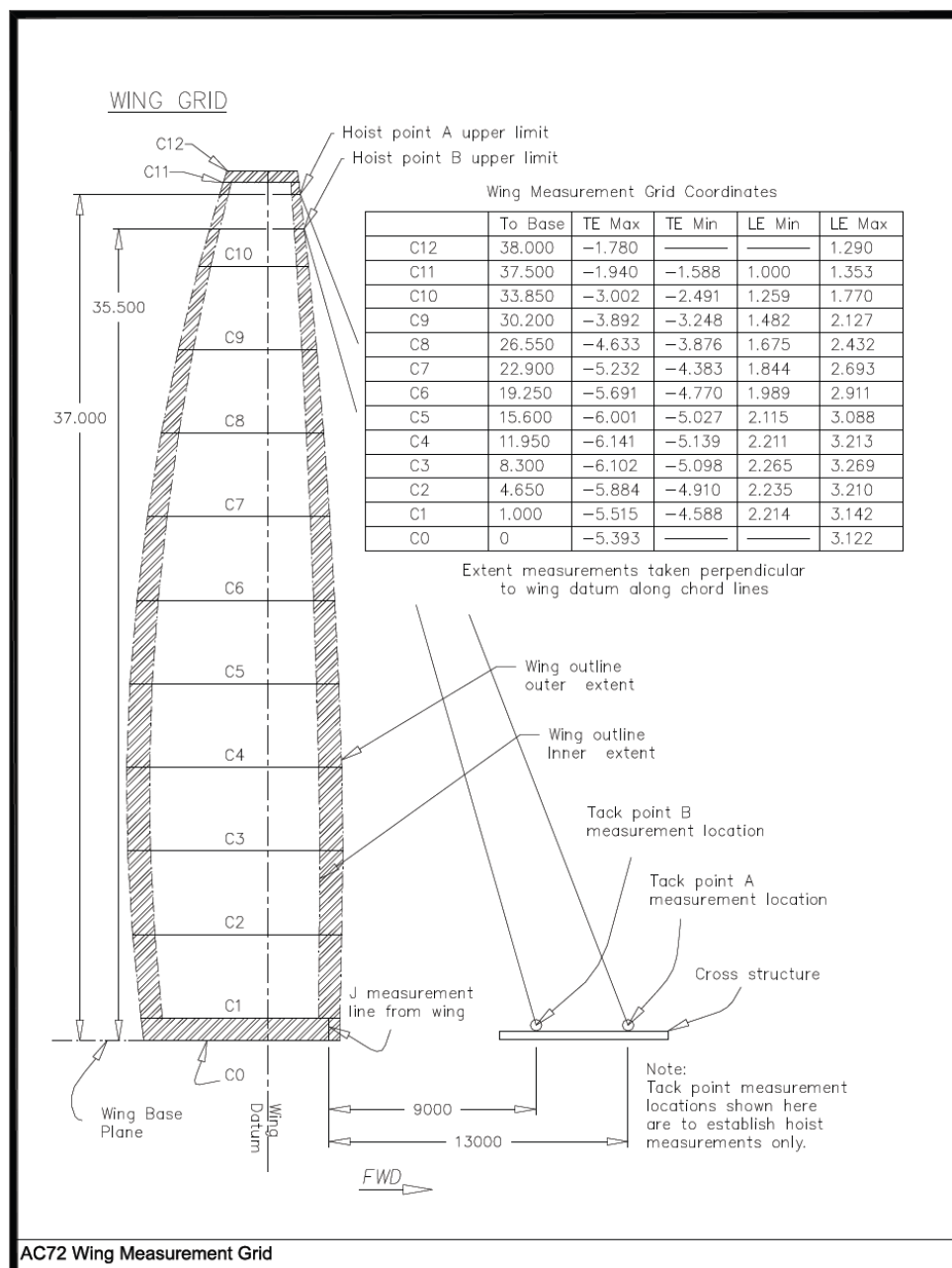


Figura 2.1: Limiti geometrici della vela rigida di un classe AC72

Non vengono invece imposte regole riguardo il numero e la dimensione dei flaps, la forma del profilo, la deformazione sotto carico della vela. Questi dovranno quindi essere considerati parametri di progetto e ottimizzati al fine di massimizzare le prestazioni.

2.2 Marstrom - M32

Per poter determinare sperimentalmente i carichi agenti sulla vela rigida di un AC72 si è pensato di sviluppare una procedura di calcolo che integri modello aerodinamico e strutturale. La verifica sperimentale del modello potrà così essere fatta su una barca di dimensioni più ridotte e con tempi di realizzazione e costi più contenuti.

La scelta è ricaduta sul catamarano M32 del cantiere svedese Marstrom, attualmente in commercio, ma non ancora dotato di una vela rigida.



Figura 2.2: Catamarano Marstrom - M32

Il vantaggio di questa barca, oltre alle ottime prestazioni, è che può essere manovrata senza grossi problemi da due sole persone e, con un peso totale di soli 450 Kg, può essere trasportata con relativa facilità e con costi ridotti.

Lo scafo e le appendici del catamarano, già costruiti, non sono ritenuti oggetto di modifiche, mentre l'albero e il sartiame viene adattato per supportare la vela rigida. Affinché venga garantito l'assetto ottimale dell'imbarcazione non devono essere modificati eccessivamente la superficie velica e il punto di applicazione dei carichi aerodinamici.

Nel grafico 2.3 sono riportati i limiti imposti dal regolamento di classe AC72 e la geometria in scala, scelta in modo da ottenere una superficie totale di $52m^2$ sul piano medio.

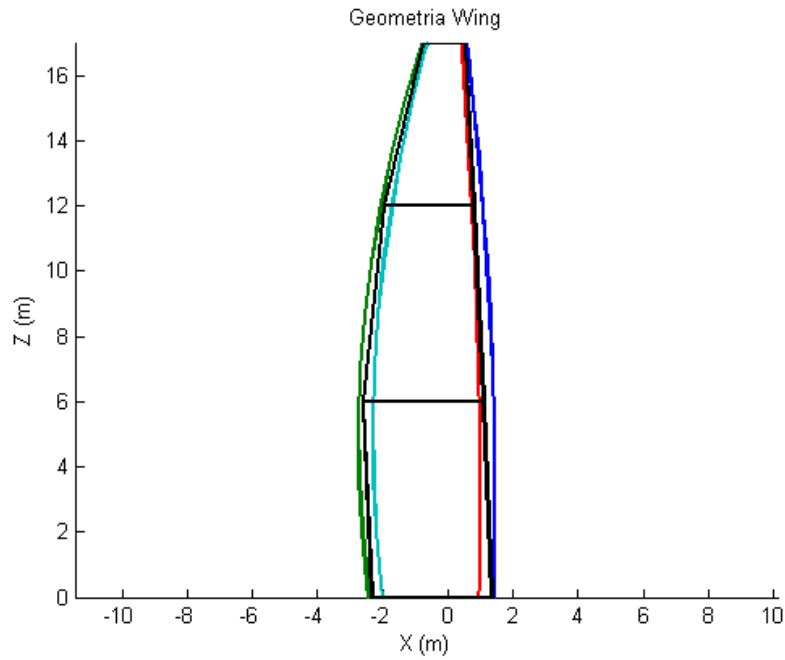


Figura 2.3: Limiti geometrici della vela e geometria effettiva

L'ala possiede un allungamento di 5.56 e il rapporto tra corda di radice e corda di estremità è pari a $C_R/C_T = 2.84$. Ne risulta una corda massima alla base $C_{ROOT} = 3.67m$ e una corda all'estremità di $C_{TIP} = 1.29m$. Della superficie velica totale il 45% posteriore è costituito dai flaps.

Il bordo di attacco ha un'inclinazione uniforme di 2.76° rispetto alla verticale.

2.3 Effetti della scalatura

Per poter studiare i carichi previsti per l'AC72 su un modello in scala bisogna per prima cosa analizzare gli effetti della similitudine dal punto di vista aerodinamico, geometrico e strutturale.

Le principali dimensioni geometriche delle due imbarcazioni sono riportate nella tabella 2.1.

	AC 72	M32	Rapporto
S	$260m^2$	$52m^2$	0.2
b	$38m$	$17m$	0.45
Largh.	14	$5.8m$	0.41
Lungh.	$22m$	$9.75m$	0.44
Peso	$5700Kg$	$450Kg$	0.07

Tabella 2.1: Tabella confronto AC72-M32

Dalla tabella si può notare come tutte le principali lunghezze delle due barche siano facilmente rapportabili tramite un fattore di scala $s^2 = 0.2$ relativo alla superficie velica ($s = 0.45$).

Il rapporto tra i pesi è invece inferiore a quello tra le lunghezze, non consentendo una proporzione diretta; ne consegue un minor momento raddrizzante che porta a condizioni di equilibrio diverse in navigazione. Tuttavia per la caratterizzazione della vela e dei carichi agenti su di essa questo non rappresenta un particolare problema.

Più complesso è il rapporto tra i coefficienti aerodinamici che vanno calcolati sulla base del numero di Reynolds:

$$Re = \frac{Vc}{\nu}$$

dove V è la velocità del vento apparente, c la corda del profilo, ν la viscosità cinematica dell'aria ($\nu = 1.5 \cdot 10^{-5} m^2/s$).

Per un AC72 il Re caratteristico, calcolato sulla corda media della vela rigida, è intorno a $5 \cdot 10^6$, mentre per l'M32 il Re medio è circa $2 \cdot 10^6$. Ne nasce una differenza nei coefficienti C_L e C_D del profilo e di conseguenza un diverso fattore di scala tra i carichi aerodinamici agenti sull'ala dell'AC72 e quella del M32.

Sono state quindi analizzate le polari del profilo scelto con deflessione del flap di 20° , al variare del numero di Reynolds da $2 \cdot 10^6$ a $5 \cdot 10^6$. I risultati mostrati nel grafico evidenziano come le differenze in termini di C_L siano minime, mentre per i valori di C_D l'errore è nell'ordine del 10%.

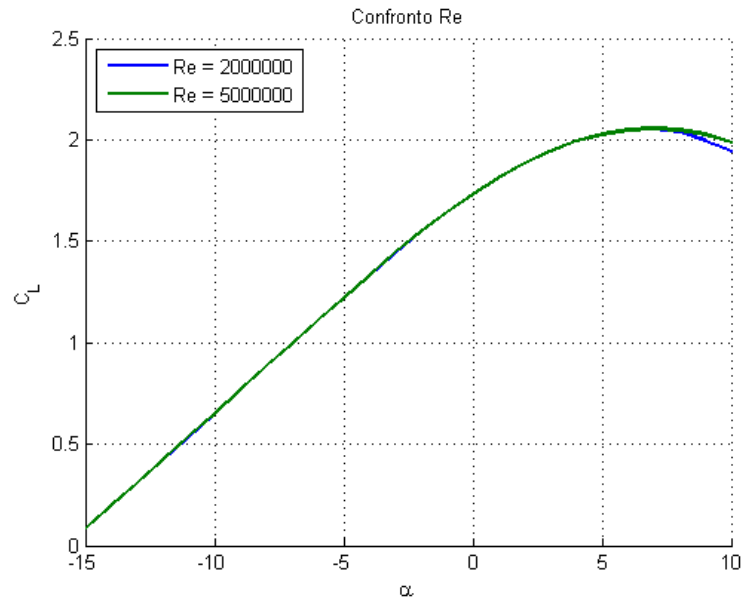


Figura 2.4: Confronto curve $C_L - \alpha$ al variare di Re

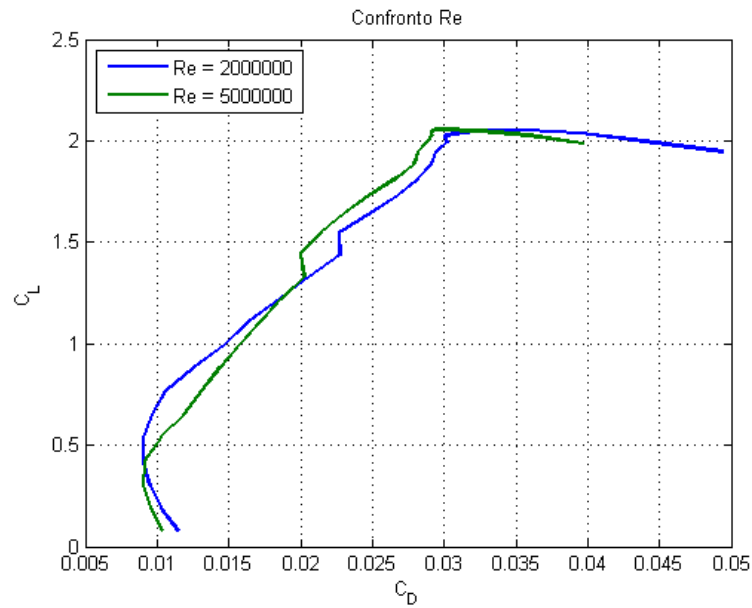


Figura 2.5: Polari del profilo al variare di Re

In base a queste considerazioni si ritiene di poter effettuare tutti i calcoli aerodinamici a Re fissato a $5 \cdot 10^6$, senza commettere eccessivi errori nella determinazione dei carichi e poter così utilizzare lo stesso modello per entrambe le imbarcazioni.

2.4 Condizioni di navigazione dimensionanti

La scelta delle condizioni dimensionanti è di fondamentale importanza per un corretto dimensionamento dell'ala e per la sua ottimizzazione.

Innanzitutto bisogna considerare il luogo in cui si svolgeranno le regate degli AC72, il golfo della Baia di San Francisco. Uno specchio d'acqua chiuso, simile ad un lago, nel quale le onde sono generalmente di dimensioni ridotte e i venti di intensità medio-forte.

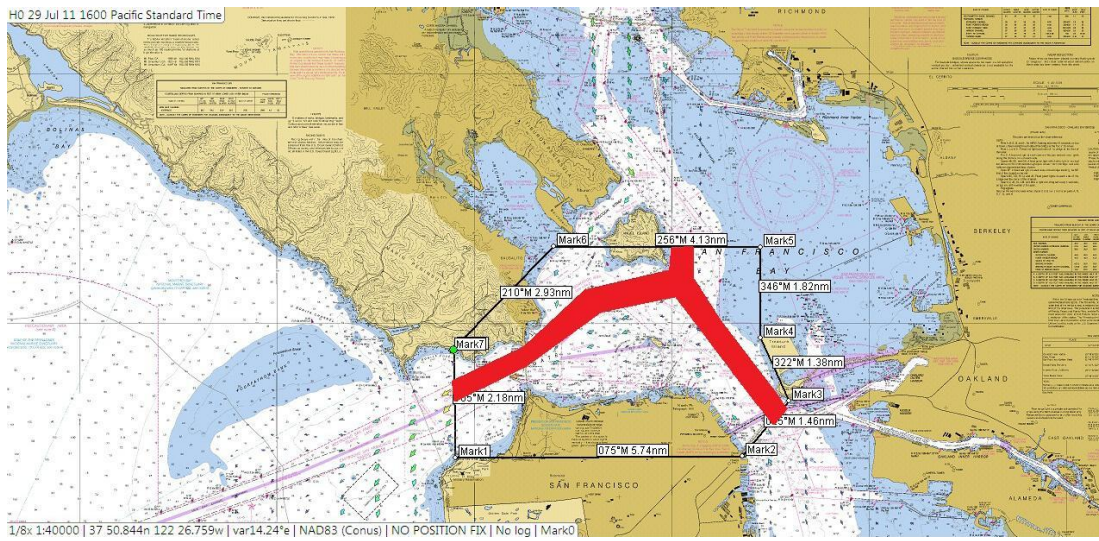


Figura 2.6: Zona di regata della 34th America's Cup

I limiti di vento entro i quali le regate possono essere svolte vanno da 5 a 30 kn, per cui la vela deve essere in grado di lavorare alla massima efficienza all'interno di questo range.

Come condizioni di simulazione vengono quindi prese una con vento medio, 10kn a 10 m di altezza e una con vento forte, 20kn, entrambe in assenza di onda. Risulta tuttavia indispensabile una verifica delle prestazioni della vela all'interno dell'intero range di vento previsto una volta effettuato il primo dimensionamento.

2.5 Struttura dell'ala

Osservando le immagini relative ai catamarani di Classe C ed ultimamente alle soluzioni adottate sugli AC45, si nota come la struttura dell'ala ricalchi le configurazioni adottate in campo aeronautico.

L'ala è composta da un elemento anteriore, che incorpora la struttura portante, e un flap posteriore, composto da vari segmenti in altezza, anche con diversi assi di rotazione, ma collegati alle giunzioni da bracci di controllo e perni sul bordo di uscita con limitata rigidità torsionale. Infine, la centina inferiore del flap è rinforzata e incorpora una grossa piastra triangolare, il Delta, che consente di orientare il flap tramite cavi.

Elemento anteriore e flap adottano classici profili NACA a 4 cifre, che variano a seconda del tipo di imbarcazione, ma generalmente sono uno 0020 (con il naso appena più arrotondato) davanti e uno 0010 dietro, con una ripartizione della corda complessiva tra profilo principale e flap sul 55/45 %. Le due parti sono incernierate in modo che il flap sia libero di ruotare da entrambe le parti e con la particolarità che l'asse non è sulla giunzione ma rimane circa un 10% all'interno dell'elemento anteriore. In questo modo, quando il flap viene angolato si forma una fessura che crea il *soffiaggio* indispensabile per mantenere attaccato il flusso dell'aria sul flap anche ad elevate incidenze.



Figura 2.7: Struttura completa di un AC45

La parte principale è costituita da una cella di bordo d'attacco, che svolge la funzione dell'albero, ed una di bordo d'uscita, rispettivamente pari al 25% e al 10% della corda del profilo. Il resto della sezione è riempito solamente dalle centine, distanziate di circa 600mm tra loro. In corrispondenza dei punti di

collegamento con i flaps sono presenti delle centine di forza che consentono di trasferire il carico aerodinamico del flap sul profilo principale. La struttura dei flaps è costruita in modo analogo a quella della parte principale, ma alleggerita data la ridotta entità degli sforzi.

Tutta l'ala è montata su un perno posto al 25% della corda che consente di regolare l'incidenza del profilo compressivo per mezzo di un'unica scotta. La struttura è mantenuta in posizione da sue ordini di sartie poste circa a $2/3$ e nell'ultimo quarto superiore dell'ala e da uno strallo di prua collegato a metà tra i due scafi.

Si riporta come esempio l'ala di un Classe AC45, in quanto molto simile a quella che verrà utilizzata sugli AC72.

2.6 Regolazioni dell'ala

Esistono oggi diverse possibilità per controllare un'ala rigida, ma tutte fanno riferimento al meccanismo ideato 35 anni fa da Dave Hubbard, il progettista del Classe C Patient Lady. Qualcosa di relativamente semplice, affidabile e azionabile da un numero ridotto di persone, oltre che autovirante per tutte le regolazioni.



Figura 2.8: Sistema di controllo dell'ala di un AC45

Il sistema di controllo è gestito da tre regolazioni principali: il primo è l'angolo di attacco dell'intera ala, che viene manovrato tramite una scotta per lato che collega la centina inferiore del flap (il boma) a un winch su ogni scafo; il secondo controllo è la curvatura (camber) del profilo complessivo, prima alla base e poi in cima. Siccome sotto la spinta del vento e con il flap bloccato dalla scotta, elemento anteriore e flap tendono a chiudersi a forbice sulla cerniera, vi è un prolungamento in avanti del Delta, collegato in mezzeria dell'elemento anteriore, con regolazione sui due lati, che limita la rotazione dell'albero.

Ultimo comando, è lo svergolamento (twist) dei flap che può essere fatto in diversi modi, ma sempre tramite cavi collegati alla parte esterna del Delta e rinviati all'interno dell'albero.



Figura 2.9: Delta di collegamento ala-flap di un AC45

Lo step successivo, per arrivare ai capolavori dei Classe C, è avere il twist anche sull'elemento anteriore, dal momento che la resistenza minima si ottiene per bassi angoli di attacco e il gradiente del vento fa sì che al lasco l'angolo del vento apparente cambi molto tra base e parte alta. La presenza di vele di prua (che raddrizzano il flusso alla base e molto meno in alto) accentua il problema, e in certi casi lo rende sensibile anche di bolina. Per ottenere questo svergolamento la soluzione adottata è quella di sostituire la struttura portante a D (il naso) con un grosso tubo interno. L'elemento anteriore, con attaccato il flap e tutto il sistema di controlli, diventa una carenatura ed è infilato sopra il tubo, solidale dall'attacco delle sartie in su, ma potendo ruotare sotto. In questo modo diventa possibile un controllo completo dello svergolamento dell'ala.

Con un numero molto ridotto di controlli risulta così possibile regolare l'ala in tutte le andature così da farla lavorare sempre alla massima efficienza.

Capitolo 3

Modello Aerodinamico

Nell’ambito del progetto il modello aerodinamico ricopre sicuramente una parte importante. La forza del vento è infatti il “motore” della barca e il modo in cui questa si ripartisce sulla struttura influisce direttamente sulle prestazioni.

Per riuscire a determinare nel modo più accurato possibile i carichi sulla vela si è partiti dall’analisi 2D del profilo, da cui si sono ricavati i coefficienti C_L e C_D caratteristici della sezione. In seguito si è passati allo sviluppo di un modello 3D di tutta la vela basato su uno schema a reticolo di vortici a scia libera, il quale è stato poi corretto sulla base delle analisi condotte sul profilo per tenere conto degli effetti legati allo stallo e al gap tra profilo e flap.

La difficoltà nella creazione di un buon modello aerodinamico risiede nel fatto che anche piccoli errori nella valutazione dei carichi aerodinamici possono portare alla perdita delle condizioni di equilibrio e di conseguenza ad un’errata stima delle prestazioni. Affinché il modello possa quindi riprodurre delle condizioni di carico paragonabili con quelle reali, si rende necessaria la creazione di uno schema completo e dettagliato dell’aerodinamica generato tramite modelli CFD, che consenta di determinare con precisione anche gli effetti locali e di turbolenza generati dal flusso del vento.

Tuttavia all’interno di questo lavoro si è cercato di sviluppare una procedura generale che integri modello aerodinamico, strutturale e idrodinamico per il calcolo delle prestazioni della barca a partire dalla geometria della vela. Da qui la necessità di utilizzare un metodo aerodinamico semplice e versatile, che non richieda tempi di calcolo eccessivamente elevati e che possa essere facilmente adattato a variazioni di geometria. Questo ha portato alla decisione di non utilizzare un modello CFD. Rimane tuttavia aperta la possibilità di sostituire all’interno del ciclo di ottimizzazione un modello CFD per migliorare la modellazione aerodinamica.

3.1 Modello 2D

Il desiderio di base nell'utilizzare vele rigide al posto delle vele tradizionali risiede nella loro capacità di generare coefficienti di portanza più elevati in tutti i punti della vela.

Tuttavia per riuscire a raggiungere C_L elevati con un profilo alare rigido è necessario che questo abbia una certa curvatura.

Il problema risiede nel fatto che su una barca a vela bisogna poter navigare in entrambe le direzioni rispetto al vento relativo, per cui il profilo non può che essere simmetrico.

La soluzione storicamente adottata è quella di utilizzare profili dotati di grandi flap che possono essere deflessi da entrambi i lati rispetto al profilo principale.

Il tipo di profilo scelto in questo caso (vedi figura 3.1), sulla base di dati storici, è un NACA 0020 per la parte fissa e un profilo più sottile, NACA 0008 per il flap, la cui dimensione è pari al 45% della corda totale. Questa scelta è dettata dalla necessità di ottenere alti coefficienti di portanza senza però raggiungere il completo stallo dell'ala alle alte incidenze.

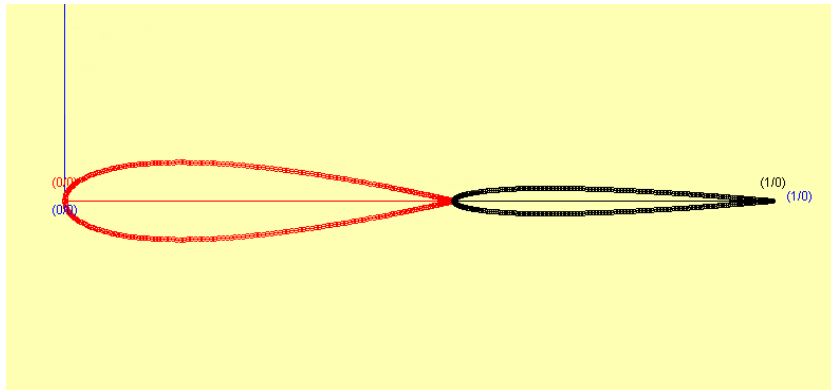


Figura 3.1: Forma del profilo con Flap al 45%

Dato che, come mostrato, la massima spinta avanzante si ottiene per incidenze prossime allo stallo, è stata condotta un'analisi dettagliata della dimensione della fessura tra profilo principale e flap che “soffia” una parte del flusso sul dorso del flap e consente di raggiungere angoli di incidenza più elevati, ritardando lo stallo.

Le polari del profilo sono state create tramite il software JavaFoil [1], un programma open source in grado svolgere contemporaneamente analisi a potenziale e sul flusso viscoso attorno ad un profilo bidimensionale.

Per ricreare gli effetti della fessura tra profilo principale e flap il programma consente di utilizzare due profili messi in tandem con asse di cerniera del flap

coincidente con il bordo di uscita della parte fissa.

Ognuno dei due profili è costituito da 300 punti, concentrati principalmente sul bordo di attacco e sul bordo di uscita dove il gradiente di pressione è maggiore.

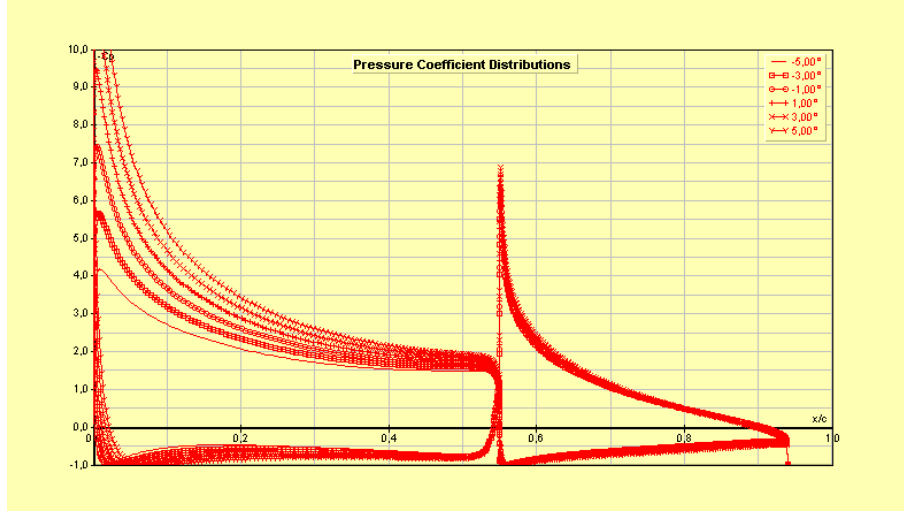


Figura 3.2: Distribuzione di pressione attorno al profilo con $\delta = 30^\circ$

3.1.1 Aspetti teorici

La stima dei coefficienti di portanza e resistenza attorno al profilo viene fatta calcolando la distribuzione di velocità su pannelli piani generati attorno alla superficie del profilo, con la condizione di non compenetrazione. Il programma utilizza un metodo a pannelli del secondo ordine con variazione lineare della distribuzione di vortici. Il calcolo dello strato limite, da cui deriva la resistenza viscosa e le correzioni di C_L e C_D in prossimità dello stallo, si basa sul modello di Eppler esteso, che valuta empiricamente il criterio di transizione secondo la formula, valida per numeri di $Re > 5 \cdot 10^5$:

$$\ln(Re_{\delta_2}) > 18.4H_{32} - 21.74 - 0.36r + 0.125(H_{32} - 1.573)^2$$

dove:

δ_2 è lo spessore del momento di strato limite

$H_{32} = \delta_3/\delta_2$ è il fattore di forma dello strato limite

r è il fattore di rugosità della superficie

La separazione dello strato limite avviene per $H_{32} < 1.5151$ se il flusso nella zona considerata del profilo è laminare, per $H_{32} < 1.46$ se il flusso è turbolento.

3.1.2 Analisi del Gap

Ad alte incidenze la presenza di una fessura che separa il profilo principale dal flap aiuta a ritardare la separazione del flusso, consentendo di raggiungere incidenze del flap maggiori. Si sono quindi analizzati gli effetti della dimensione della fessura sui valori di C_L e C_D .

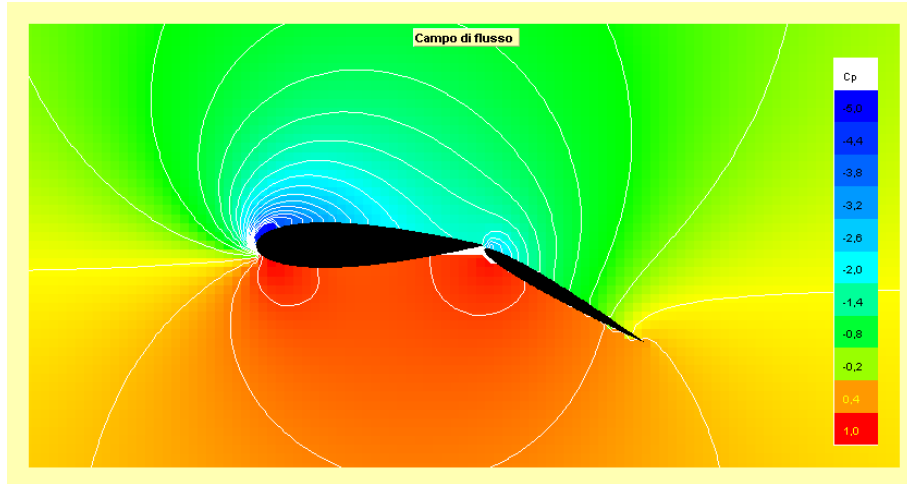


Figura 3.3: Campo di flusso attorno al profilo, $\alpha = 0$, $\delta = 30^\circ$

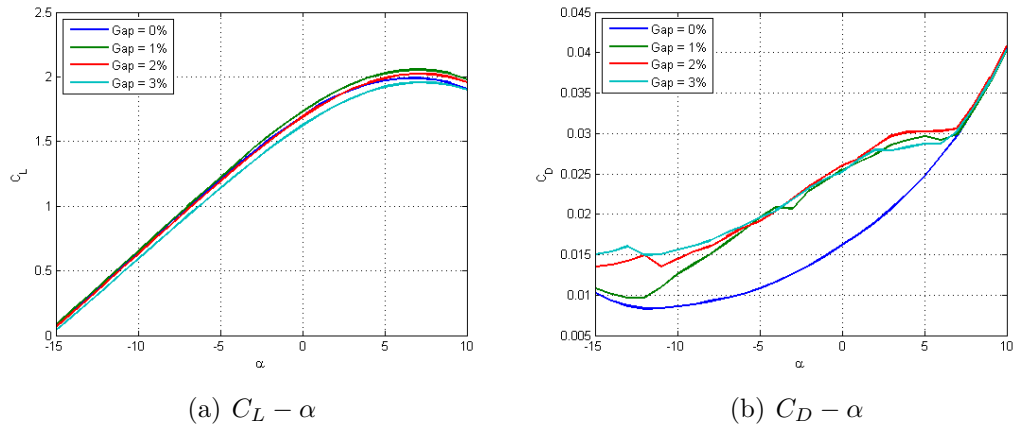
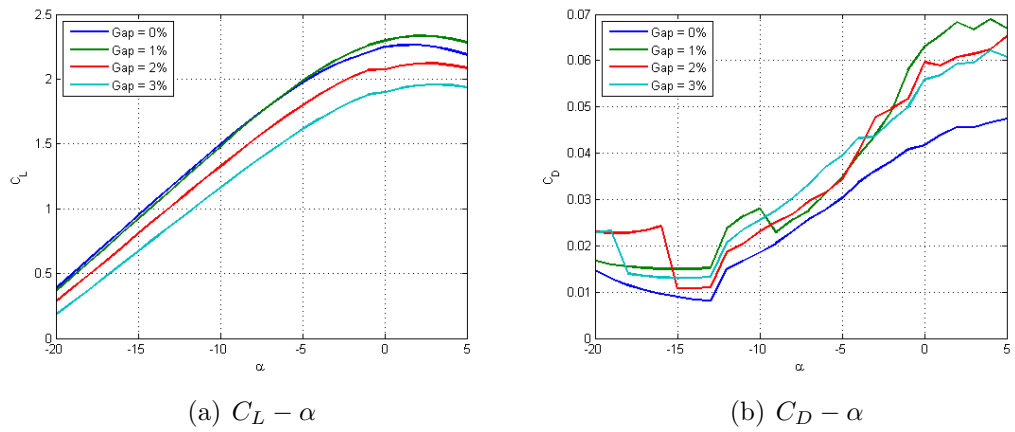
Per deflessioni inferiori a 20° gli effetti risultano trascurabili, mentre quando la deflessione supera i 30° la variazione di C_L diventa apprezzabile.

Di seguito sono riportati i risultati in termini di curve $C_L - \alpha$ per deflessioni del flap di 20° (figura 3.4) e 30° (figura 3.5) e per dimensioni della fessura variabili dallo 0% al 3% della corda del profilo.

I valori di C_D non sono particolarmente accurati e non si possono considerare affidabili, tuttavia mostrano un incremento di resistenza all'aumentare delle dimensioni del gap. La quantità di resistenza in più che si viene a creare è comunque compensata dall'aumento di C_L .

Dall'analisi svolta emerge che la soluzione più vantaggiosa è quella con dimensioni del gap pari all'1% della corda del profilo. Infatti già ad una percentuale del 2% il C_L assume valori inferiori a quelli calcolati con i due profili attaccati.

Questa indagine, data la semplicità del modello, non garantisce risultati estremamente precisi ed affidabili, ma evidenzia come le dimensioni della fessura non debbano essere troppo elevate per non perdere gli effetti benefici del soffiaggio.

Figura 3.4: Polari al variare del Gap per $\delta = 20^\circ$ Figura 3.5: Polari al variare del Gap per $\delta = 30^\circ$

Il risultati ottenuti concordano con quelli di un precedente studio [2] condotto sulla vela rigida di un catamarano di Classe C e confermato da prove sperimentali.

3.1.3 Polari del profilo

I valori di C_L e C_D sono calcolati con numero di Re fissato a $5 \cdot 10^6$ e con dimensione del gap = 1% c. Come modello per lo stallo si è utilizzato il modello di Eppler standard, mentre come modello di transizione dello strato limite il modello di Eppler esteso.

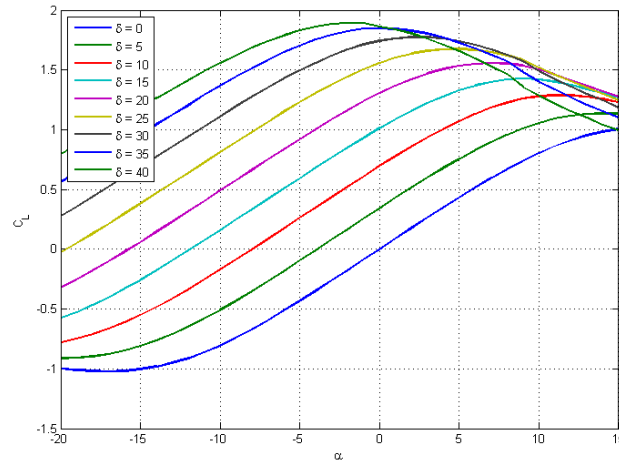


Figura 3.6: Curve $C_L - \alpha$ al variare di δ

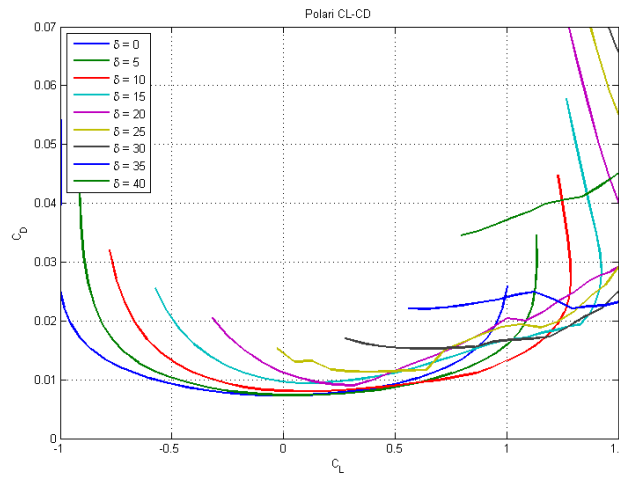


Figura 3.7: Polari $C_L - C_D$ al variare di δ

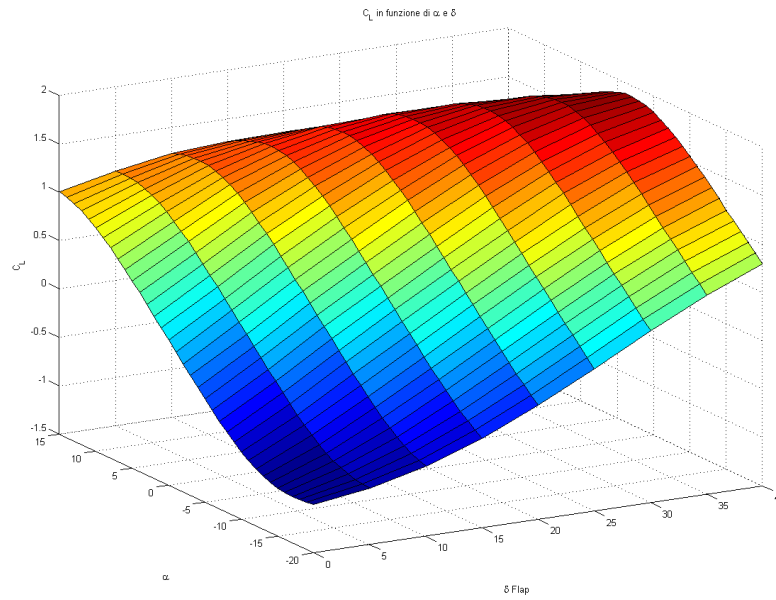


Figura 3.8: Valori di C_L in funzione di α e δ

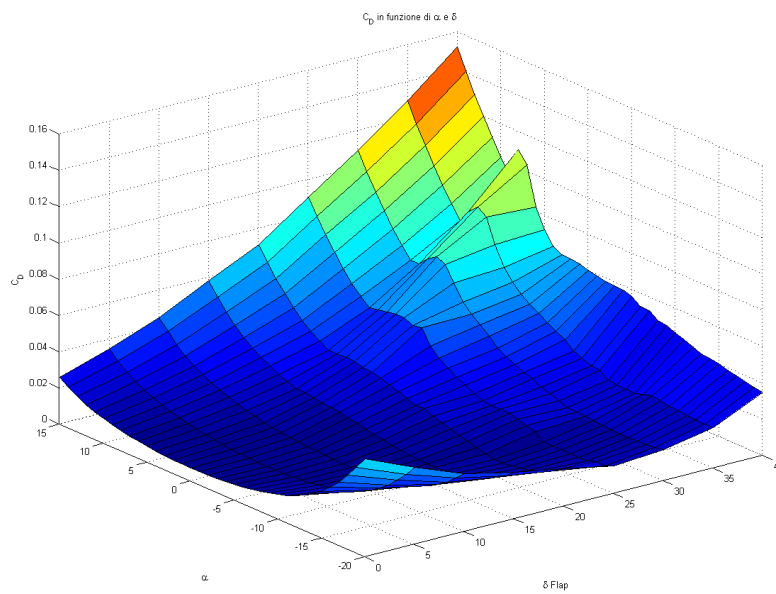


Figura 3.9: Valori di C_D in funzione di α e δ

3.2 Modello 3D

Nell'ambito di questo lavoro si è scelto come modello tridimensionale di utilizzare Tornado, un codice a potenziale tipicamente aeronautico che si basa su uno schema a reticolo di vortici a scia libera. Il vantaggio di Tornado è di essere libero e accessibile, in quanto scritto in linguaggio Matlab. Al codice sono state apportate alcune modifiche per renderlo compatibile con il tipo di analisi da effettuare. Le principali sono riportate di seguito.

- In primo luogo la presenza della superficie dell'acqua crea uno strato limite che crea un gradiente di vento in funzione dell'altezza, di conseguenza è necessario generare una funzione che modifichi l'intensità del vento lungo l'apertura alare.
- La resistenza calcolata con un metodo a potenziale è solamente quella indotta, mentre la resistenza totale è dovuta anche ad un termine di resistenza viscosa, che può non essere trascurabile in presenza di elevati angoli di deflessione del flap. Per questo è stato aggiunto un termine di resistenza viscosa il cui coefficiente C_{Dv} è calcolato tramite i dati ottenuti sul profilo bidimensionale.
- La massima spinta avanzante per la barca si ottiene quando la vela si trova a lavorare in prossimità dello stallo, che nei metodi lineari a potenziale non viene considerato. Per questo si è resa necessaria una correzione del metodo per ridurre il coefficiente di portanza in prossimità dell'angolo di stallo.
- Un'altra caratteristica importante da considerare è la fessura tra il profilo principale e il flap, che consente di raggiungere angoli di incidenza più elevati senza che il profilo stalli, come visto per il caso bidimensionale. Anche in questo caso, non essendo modellata la fessura nel metodo a potenziale si è dovuto ricorrere ad una funzione correttiva costruita a partire dai dati del profilo.

3.2.1 Aspetti teorici

Tornado utilizza il classico schema a reticolo di vortici, derivante dalla teoria del flusso a potenziale. La scia che si genera sul bordo di uscita di ogni superficie portante viene lasciata libera di deformarsi in funzione della condizione analizzata.

La vela è suddivisa in un certo numero di pannelli sia in apertura che in corda e su ognuno di questi è collocato un vortice a staffa. Ogni vortice è posizionato

al 25% di corda del pannello, mentre il punto di controllo si trova al 75%. Il campo di flusso di tutti i vortici crea un flusso indotto verso il basso che deve essere bilanciato tramite l'imposizione di condizioni al contorno sul flusso libero e sull'angolo di attacco.

La soluzione si ottiene imponendo che la velocità normale al pannello sia nulla nel punto di controllo.

Dal Teorema di Kutta-Jukovski si ha che la forza agente sul singolo pannello per unità di apertura si ottiene come:

$$F = \rho(V_{ind} \wedge \Gamma)$$

I pannelli sono poi combinati in un sistema di equazioni per determinare la portanza complessiva:

$$\begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdot \\ w_{21} & \ddots & \cdot \\ \cdot & \cdot & w_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Gamma_1 \\ \cdots \\ \Gamma_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_1 \\ \cdots \\ b_n \end{bmatrix}$$

dove w_{ij} sono le velocità indotte su ogni pannello e b_i le condizioni al contorno geometriche legate ad α e δ .

3.2.2 Gradiente di vento

L'effetto del suolo sull'intensità del vento non può essere ritenuto trascurabile e può modificare sostanzialmente la distribuzione di vento sulla vela. Secondo uno studio condotto da *Wortman* nel 1982 il gradiente di vento può essere espresso con un profilo logaritmico.

Vicino al suolo l'equazione di momento si riduce a:

$$\frac{\partial p}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial z} \tau_{xz}$$

dove x e z sono le coordinate orizzontale e verticale, p è la pressione, τ_{xz} è lo sforzo di taglio in direzione x la cui normale coincide con z .

Vicino al suolo la pressione non dipende da z , per cui integrando si ottiene:

$$\tau_{xz} = \tau_0 + z \frac{\partial p}{\partial x}$$

dove τ_0 è lo sforzo di taglio sulla superficie del suolo.

Tramite la teoria della *mixing length* di Prandtl si può esprimere lo sforzo come:

$$\tau_{xz} = \rho l^2 \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2$$

dove ρ è la densità dell'aria, V la componente orizzontale di velocità del vento, l la lunghezza di mescolamento.

In questo caso gli effetti della turbolenza sono stati mediati tramite una velocità di agitazione media. Integrando sull'altezza si ottiene un'equazione logaritmica che esprime la velocità del vento in funzione della quota z :

$$V(Z) = V_{wind} \frac{\log(z/z_0)}{\log(10/z_0)}$$

dove la velocità del vento di riferimento V_{wind} è convenzionalmente misurata a 10 m di altezza, mentre $z_0 = 0.0002$ m rappresenta il valore di riferimento per una superficie di acqua piatta.

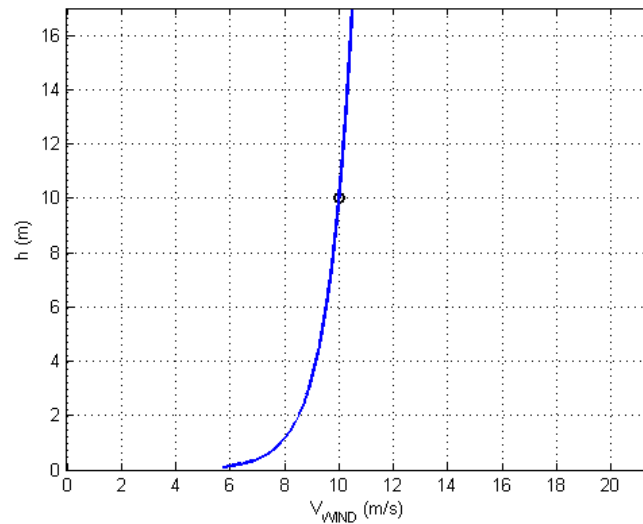


Figura 3.10: Gradiente di vento con $V_{Ref} = 10m/s$ a 10m

3.2.3 Modello della vela con Tornado

La vela modellata è divisa in 3 sezioni in altezza per semplicità di analisi e due in apertura (parte fissa e flap), ognuna delle quali è ulteriormente suddivisa in pannelli per un totale di 1050 su ogni semiala.

Dall'analisi delle vele degli AC45, gli scafi propedeutici agli AC72, risulta una tendenza ad adottare flap con deflessione continua, ovvero senza che vi sia separazione tra ogni sezione del flap. Questo consente di migliorare le prestazioni aerodinamiche, ma richiede un controllo più accurato della deformazione strutturale. Nel modello, non potendo introdurre una deflessione variabile in apertura, ogni sezione è stata divisa in più parti, ad ognuna della quale è stata associata

una diversa deflessione del flap.

Per ottenere una stima ragionevole del momento ribaltante è necessario valutare correttamente la distribuzione di portanza sull'ala, in particolare come questa venga influenzata dalla distanza tra gli scafi e la base della vela.

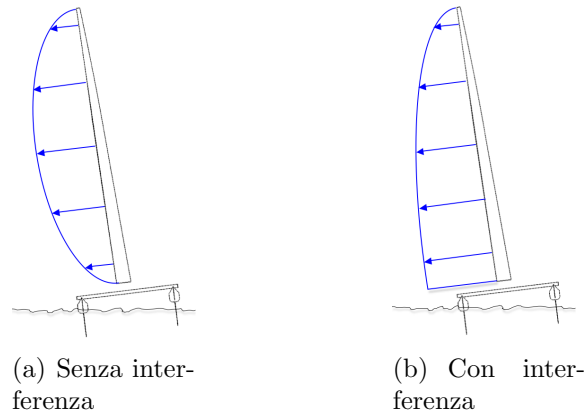


Figura 3.11: Distribuzione di portanza sulla vela

Il modello aerodinamico è quindi specchiato rispetto alla base della vela per tener conto della minor perdita di estremità legata all'interferenza con lo scafo e la base della vela è posta ad una distanza dall'asse di riferimento proporzionale alla dimensione della vela stessa.

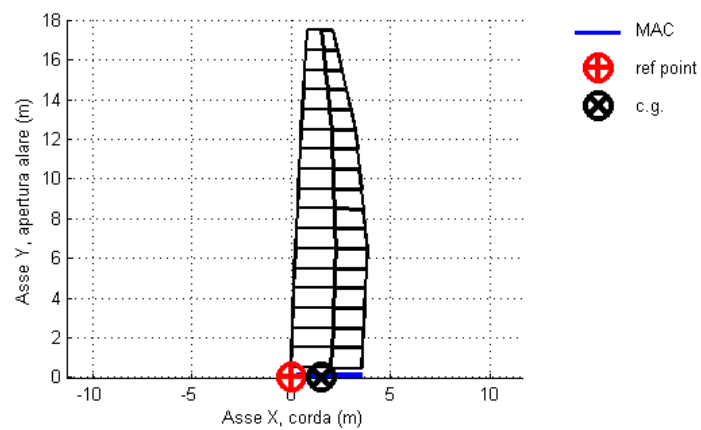


Figura 3.12: Geometria del modello Tornado

L'ala è suddivisa in 10 pannelli in corda per la parte fissa e 20 sul flap, mentre in apertura vi sono un totale di 30 pannelli per ogni semilala.

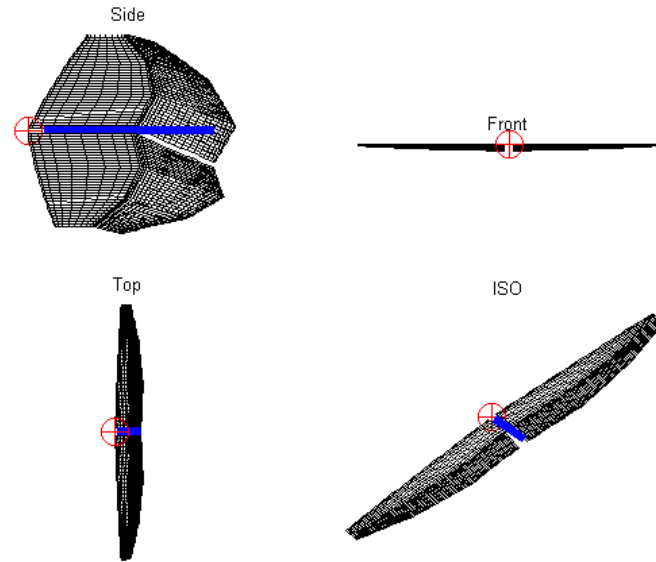


Figura 3.13: Suddivisione in pannelli del modello Tornado

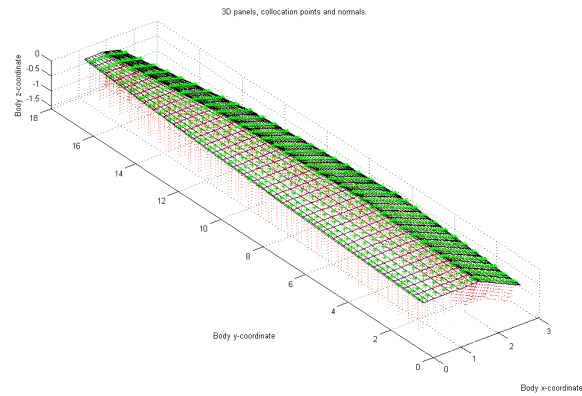


Figura 3.14: Punti di collocazione del modello Tornado

3.2.4 Correzione del modello Tornado

Per poter confrontare il C_L delle polari del profilo 2D con quello restituito da Tornado, è stato creato un modello di ala rettangolare, di corda unitaria e allungamento $\lambda = 25$, suddiviso in 30 pannelli in apertura e 20 in corda, con flap lungo tutta l'apertura alare. In questo modo il C_L calcolato alla radice alare risulta poco affetto dai vortici in estremità e si può ritenere paragonabile con quello ottenuto sul modello bidimensionale.

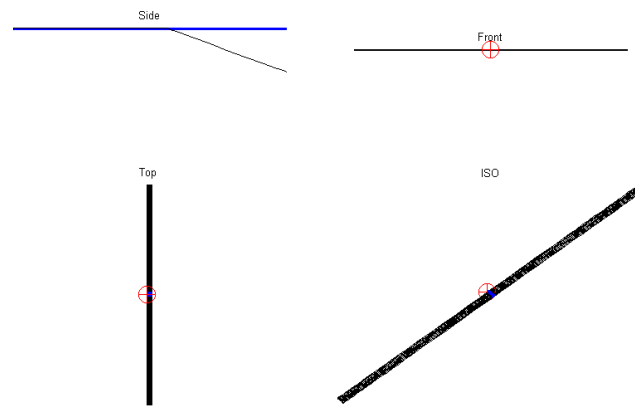


Figura 3.15: Modello di verifica Tornado

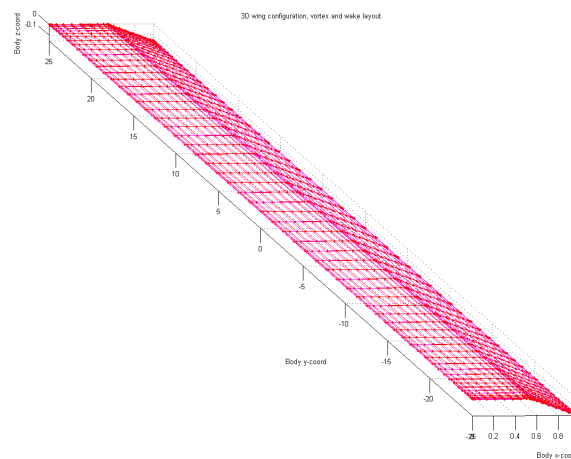


Figura 3.16: Punti di collocazione sul modello di verifica

3.2.5 Risultati

I valori confrontati sono con deflessione del flap a 10° , 20° e 30° .

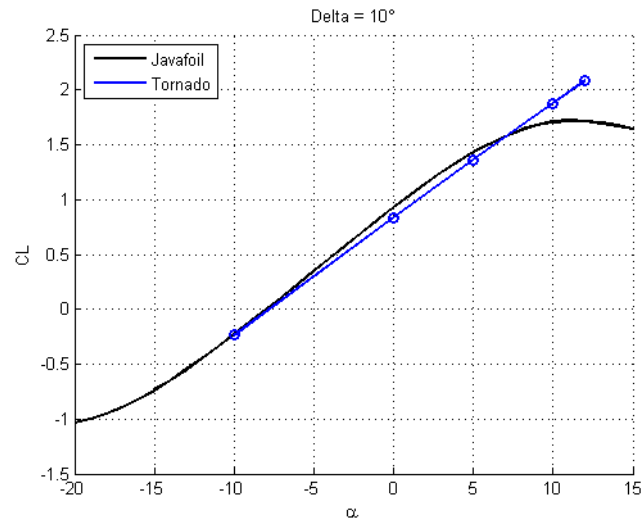


Figura 3.17: Confronto curve $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 10^\circ$

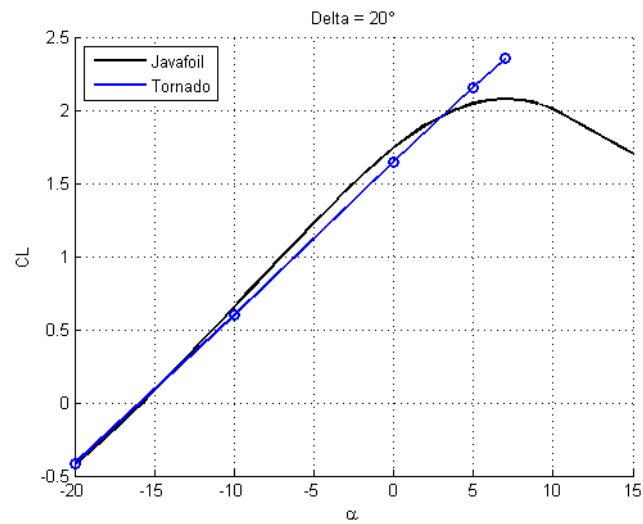


Figura 3.18: Confronto curve $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 20^\circ$

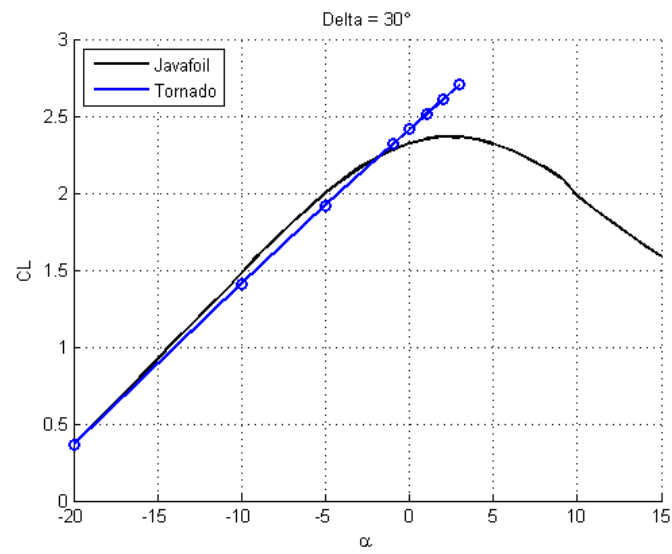


Figura 3.19: Confronto curve $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 30^\circ$

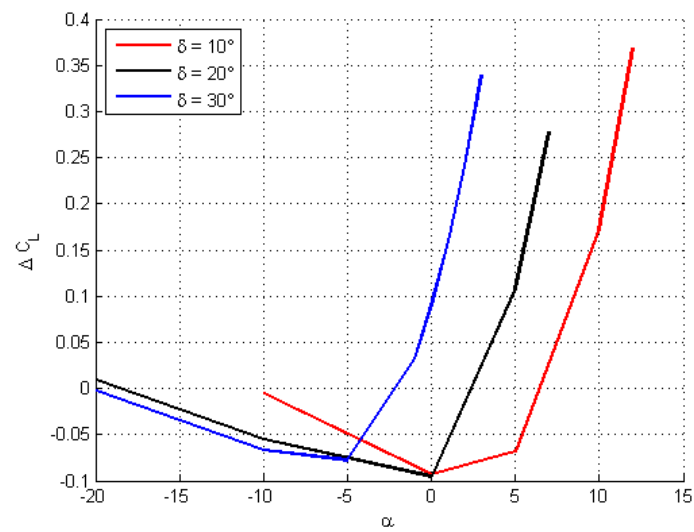


Figura 3.20: Differenza di C_L prima della correzione

Dall'analisi dei risultati è emerso che nel tratto lineare le curve calcolate da Tornado risultavano inferiori in media del 5% rispetto a quelle del profilo, mentre in prossimità dello stallo la differenza diventava più evidente, non essendo questo considerato nel metodo a potenziale.

Introducendo una opportuna funzione correttiva, dipendente dalla deflessione δ del flap, è stato possibile ridurre l'errore iniziale a circa $1/10$.

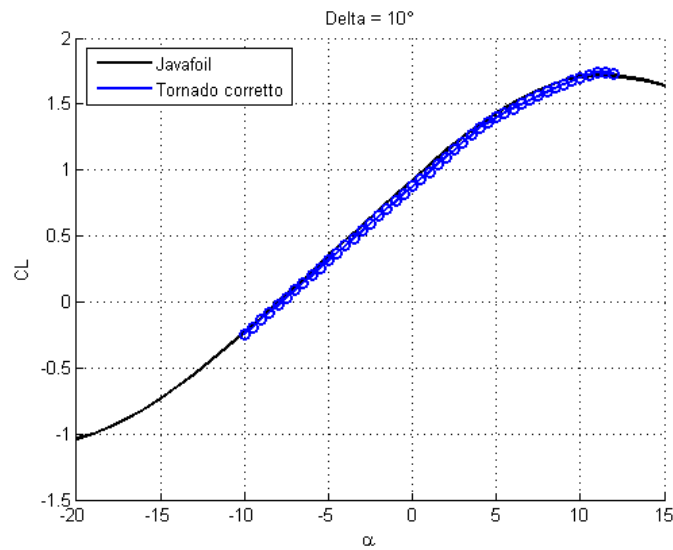


Figura 3.21: Confronto curve corrette $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 10^\circ$

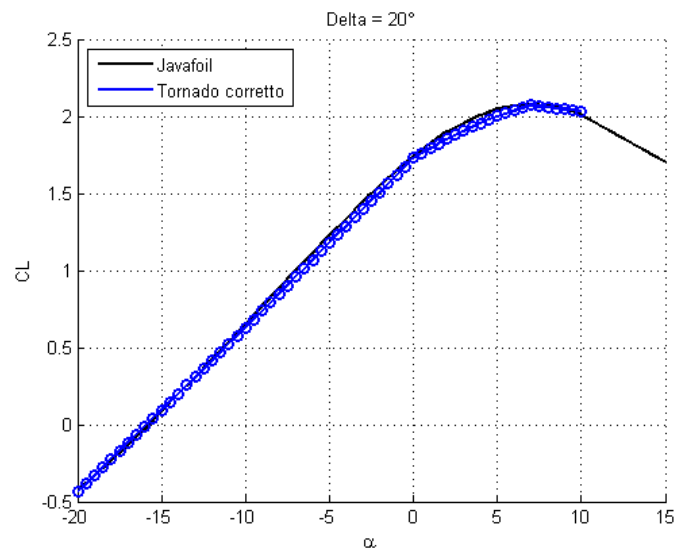


Figura 3.22: Confronto curve corrette $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 20^\circ$

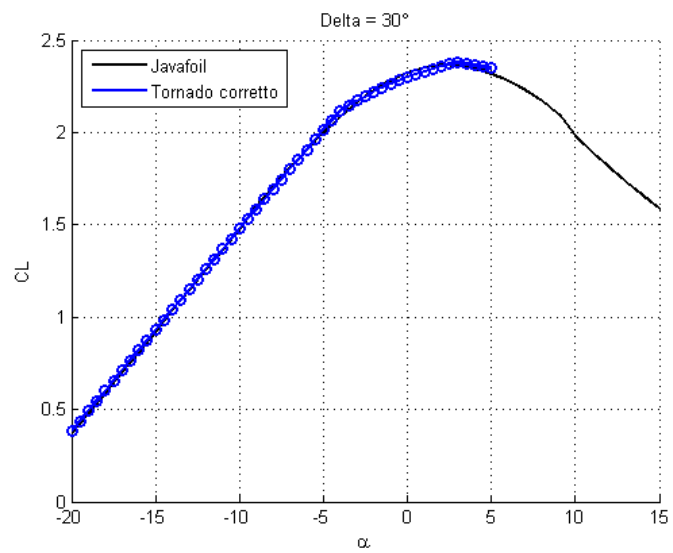


Figura 3.23: Confronto curve corrette $C_L - \alpha$ di JavaFoil e Tornado, $\delta = 30^\circ$

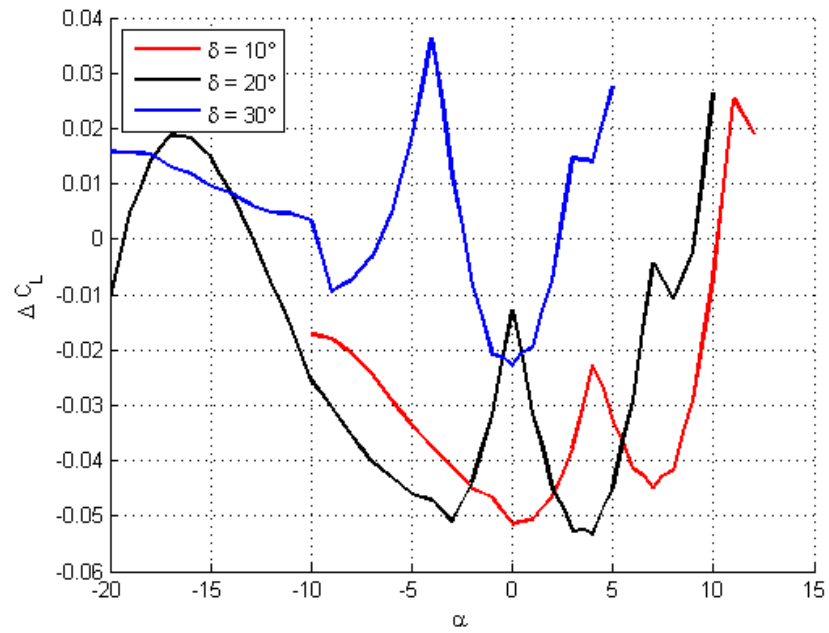


Figura 3.24: Differenza di C_L dopo la correzione

Capitolo 4

Modello strutturale della vela

4.1 Geometria

Sulla base della geometria definita dal regolamento di Classe degli AC72 è stato costruito un modello parametrico dell'ala tramite il software ProE, sul quale poi si definisce la mesh ad elementi finiti.

Il modello è stato inizialmente sviluppato per una imbarcazione di 40 piedi da Andrea Campiglio [3] nel corso della sua tesi di Laurea. In questo lavoro si sono apportate le modifiche tali da renderlo completamente parametrico, così da poter essere utilizzato per qualsiasi tipo di imbarcazione.

I parametri che governano la geometria sono:

- Corda di radice (C_R)
- Rapporto di rastremazione (C/C_R) per ogni sezione
- Spessore massimo del profilo principale (in % di corda)
- Spessore massimo del profilo del flap (in % di corda)
- Altezza di ogni sezione
- Altezza massima dell'albero
- Angolo di freccia rispetto alla verticale
- Spaziatura delle centine
- Dimensione del flap in % di corda
- Dimensione dei longheroni anteriore/posteriore del profilo principale

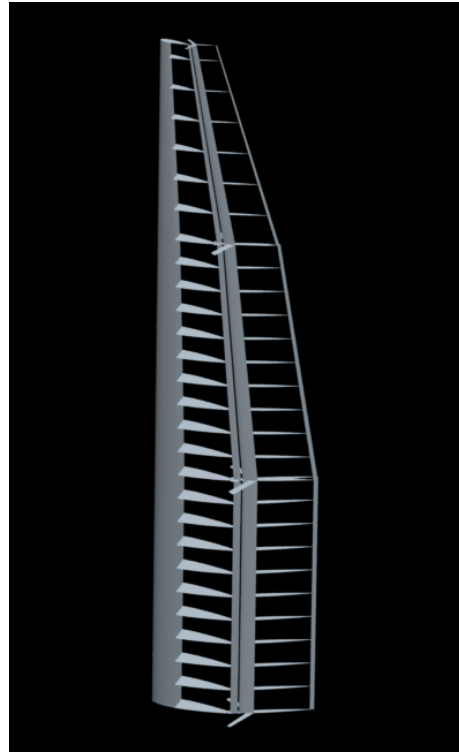
- Dimensione dei longheroni anteriore/posteriore dei flap
- Dimensione del gap tra profilo principale e flap
- Posizione degli assi di rotazione dei flap

Sono fissati: il tipo di profilo, che è un NACA simmetrico a 4 cifre, e il numero di sezioni, 3, in cui è divisa l'ala in altezza.

La geometria definita ha una struttura analoga a quella delle vele degli AC45 (vedi figura 4.1), scafi propedeutici alla Coppa America e molto simili agli AC72, di cui ne conservano le caratteristiche, ma con dimensioni ridotte.



(a) Vela di un AC45



(b) Modello della vela

Figura 4.1: Geometria della vela rigida

Lo schema su cui si basa è di tipo prettamente aeronautico: gli elementi strutturali sono divisi in centine e longheroni. Tuttavia, a differenza di un'ala, le dimensioni dei flap sono molto accentuate per consentire al profilo di assumere la massima curvatura complessiva su entrambi i lati, così da rendere la navigazione simmetrica.

La struttura della vela è quasi completamente ricoperta da un rivestimento plastico, che non possiede funzioni strutturali, se non quella di trasferire i carichi aerodinamici alla struttura interna, e non è stato in questo caso modellato.

Il modello pensato per l'M32 è diviso in tre sezioni: le prime due dal basso hanno un'altezza di 6 m, ognuna delle quali possiede 11 centine equispaziate. La sezione più alta, lunga 5 m, è costituita di sole 8 centine. La distanza tra le centine, variabile tra 600mm e 625mm è scelta in modo da mantenere il più possibile invariata la forma dell'ala sotto carico, riducendo nel contempo al minimo il peso della struttura.

La dimensione del longheroni anteriore e posteriore del profilo principale, di forma semicircolare il primo e triangolare il secondo, sono rispettivamente del 30% e dell'8% in rapporto alla corda; quelli del flap invece sono pari al 20% e al 6%.

Le cerniere dei flaps, anziché trovarsi sul bordo di uscita del primo profilo, sono spostate in avanti di 200 mm, per consentire la formazione della fessura di soffiaggio tra i due profili. In questo modo all'aumentare della deflessione del flap aumentano quelle della fessura.

Nelle zone di collegamento tra ala e flap la dimensione delle centine è maggiore, in modo da creare dei punti di forza a cui attaccare tramite cerniere gli elementi a Delta, che sostengono i cavi per la movimentazione dei flaps.

La centina alla base della vela è ulteriormente rinforzata in quanto, oltre ai carichi aerodinamici, deve sostenere il peso stesso della struttura.

4.2 Modello FEM

La modellazione ad elementi finiti viene definita sulla geometria parametrica una volta stabiliti i parametri di progetto. Imponendo semplicemente dei vincoli dimensionali e di deformazione agli elementi il software ProE è in grado di costruire in modo autonomo la mesh, che nel modello utilizzato per le analisi risulta composta da 25868 elementi.

Vengono utilizzati principalmente elementi piani, che sono in grado di riprodurre il comportamento di un laminato in composito tramite la definizione delle caratteristiche delle singole lamine.

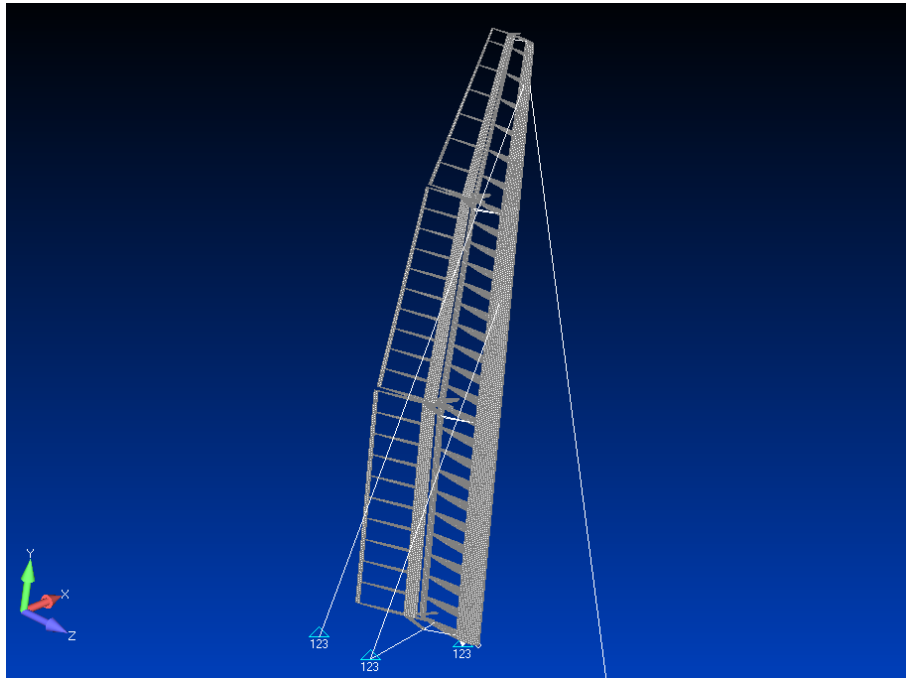


Figura 4.2: Modello FEM della vela

4.2.1 Materiali

Per ciò che riguarda la definizione dei materiali si è deciso di utilizzare come base una tipologia di tessuti in fibra di carbonio ad alto modulo elastico, largamente utilizzati nelle laminazioni degli alberi di imbarcazioni a vela [4].

Nella Tabella 4.1 sono riassunte le caratteristiche di interesse per il modello ad elementi finiti. Questi dati fanno riferimento ad una lamina di preimpregnato di 200 g/m^2 con fibre unidirezionali (UDR) in carbonio. La maggior parte degli elementi della struttura necessita di lamine orientate secondo una direzione principale di sforzo, ma è necessario prevedere delle lamine disposte anche in direzione trasversale per garantire una adeguata resistenza e coesione del laminato complessivo.

Per ottenere un comportamento bidirezionale, dove necessario, sono state aggiunte nella laminazione due lamine di unidirezionale a $\pm 45^\circ$ rispetto alla direzione principale di sforzo.

All'interno del laminato è previsto l'inserimento di un riempitivo che ne aumenta lo spessore complessivo e migliora il comportamento a flessione, mantenendone ridotto il peso.

Le caratteristiche del laminato sono descritte in dettaglio nel paragrafo relativo alle proprietà degli elementi.

Spessore	t	0.196 mm
Fibra	M40J	
Matrice	MTM28-1	
Modulo Elastico principale	E_X	222000 MPa
Modulo Elastico trasversale	E_Y	7810 MPa
Modulo di Taglio	G	4390 MPa
Densità	ρ	1.5 g/cm^3
Resistenza a trazione (direzione principale)	σ_{XT}	2418 MPa
Resistenza a compressione (direzione principale)	σ_{XC}	1211 MPa
Resistenza a trazione (direzione trasversale)	σ_{YT}	56 MPa
Resistenza a compressione (direzione trasversale)	σ_{YC}	179 MPa
Resistenza a taglio	σ_{xy}	66.2 MPa

Tabella 4.1: Caratteristiche del tessuto unidirezionale

Gli elementi strutturali principali, centine e longheroni, sono tutti costituiti da laminati in materiale composito di diverso spessore. Il sartame e i cavi che permettono la movimentazione dei flap sono in acciaio inox AISI 316 a 19 fili, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 4.2.

Modulo Elastico	E	196000 MPa
Coeff. di Poisson	ν	0.3
Densità	ρ	7 g/cm^3
Resistenza a trazione	σ_T	1250 MPa
Coeff. di dilatazione termica	α	0.011 mm/m/C

Tabella 4.2: Caratteristiche dell'acciaio

4.2.2 Proprietà

La definizione delle laminazioni avviene attraverso la sovrapposizione di lamine differenti: è stata posta molta attenzione alla direzione di orientazione delle fibre, in quanto avendo a che fare con materiali ortotropi la direzione delle fibre gioca un ruolo fondamentale nella redistribuzione dei carichi. Per tenere in giusta considerazione questo aspetto si sono definiti all'interno del modello una serie di sistemi di riferimento orientati come i singoli componenti strutturali in modo da posizionare nel modo corretto le fibre dei laminati. Inoltre, le superfici modellate sono state opportunamente suddivise in modo da poter utilizzare proprietà differenti per gli elementi e poter ottimizzare lo spessore delle laminazioni, soprattutto lungo l'apertura alare. Gli spessori utilizzati rappresentano una stima iniziale e sono oggetto di ottimizzazione una volta determinati i carichi agenti sulla strut-

tura.

Il laminato principale che serve da base per le laminazioni della sezione principale, quella dei longheroni, è di tipo sandwich, costituito da lamine di tessuto unidirezionale in fibra di carbonio e da riempitivo in PVC specifico per costruzioni marine. Nei punti più sollecitati della struttura vengono aggiunti strati di rinforzo per aumentarne la rigidità.

N. Lamine	Tipo	Spessore	Orientazione
1	Unidir M40J	0.196 mm	0
1	Unidir M40J	0.196 mm	-45
1	Unidir M40J	0.196 mm	45
1	Unidir M40J	0.196 mm	90
1	Foam Airex C70.75	4 mm	
1	Unidir M40J	0.196 mm	90
1	Unidir M40J	0.196 mm	45
1	Unidir M40J	0.196 mm	-45
1	Unidir M40J	0.196 mm	0

Tabella 4.3: Caratteristiche del laminato del longherone anteriore

Le centine, che hanno invece il compito di mantenere invariata la forma della sezione, sono principalmente soggette ad un carico flessionale fuori dal piano. Per questo viene previsto uno spessore maggiore del riempitivo, che migliora il comportamento a flessione del laminato.

Anche in questo caso sono previste lamine di rinforzo per le zone più sollecitate.

N. Lamine	Tipo	Spessore	Orientazione
1	Unidir M40J	0.196 mm	0
1	Unidir M40J	0.196 mm	-45
1	Unidir M40J	0.196 mm	45
1	Unidir M40J	0.196 mm	90
1	Foam Airex C70.75	6 mm	
1	Unidir M40J	0.196 mm	90
1	Unidir M40J	0.196 mm	45
1	Unidir M40J	0.196 mm	-45
1	Unidir M40J	0.196 mm	0

Tabella 4.4: Caratteristiche del laminato delle centine

4.2.3 Elementi

Tutta la struttura è modellata con elementi bidimensionali di tipo piastra (CQUAD4 e CTRIA3) che riproducono fedelmente la geometria dato che non vi sono zone con particolari curvature. Gli elementi creati sulla geometria hanno una dimensione caratteristica che varia tra i 30 e i 50 mm e di questi meno dell'1% non rispettano i limiti di tolleranza geometrica verificati da Nastran.

Per gli elementi di cerniera dei flaps sono stati utilizzati elementi *Beam* (CBEAM), ai quali è lasciata libertà di ruotare attorno al proprio asse per consentire ai flap di muoversi. Anche i cavi che regolano la deflessione dei flaps sono modellati con elementi di trave a sezione circolare, il cui diametro è di 4 mm.

Vi sono poi elementi rigidi utilizzati per distribuire il carico, evitando concentrazioni di sforzo, sulle zone di vincolo e agli attacchi delle sartie e dei flaps.

Num. di elementi CQUAD4	25409
Num. di elementi CTRIA	256
Num. di elementi CBEAM	18
Num. di elementi RBE2	185

Tabella 4.5: Elementi del modello

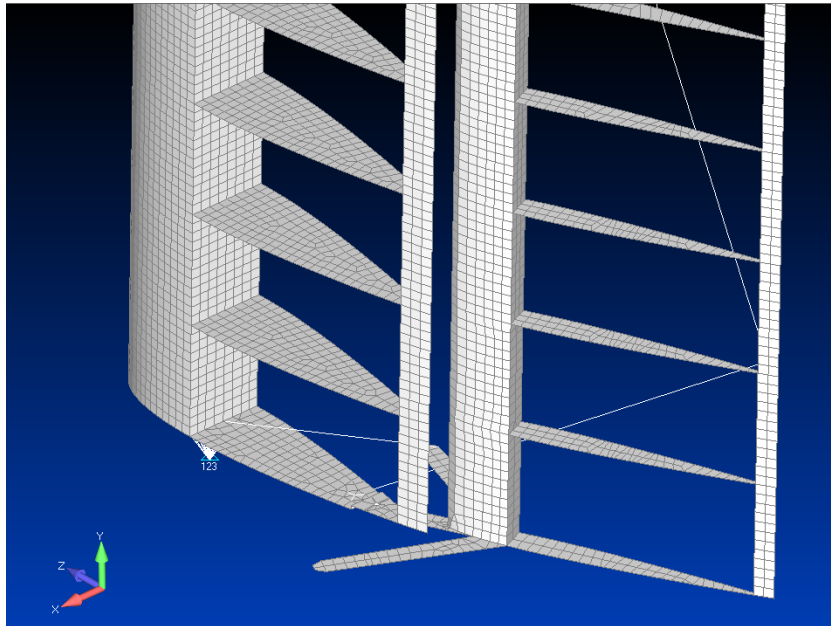


Figura 4.3: Dettaglio del modello ad elementi finiti

Alla base della vela, sull'asse di rotazione principale, vengono utilizzati elementi rigidi per collegare due serie concentriche di nodi del modello al punto di vincolo. La scelta di non modellare l'elemento di supporto della vela è dettata dalla maggior rigidità di quest'ultimo rispetto agli elementi modellati. Tuttavia si è reso necessario un elevato numero di elementi rigidi per evitare eccessive deformazioni, essendo la zona sottoposta all'intero carico dell'ala.

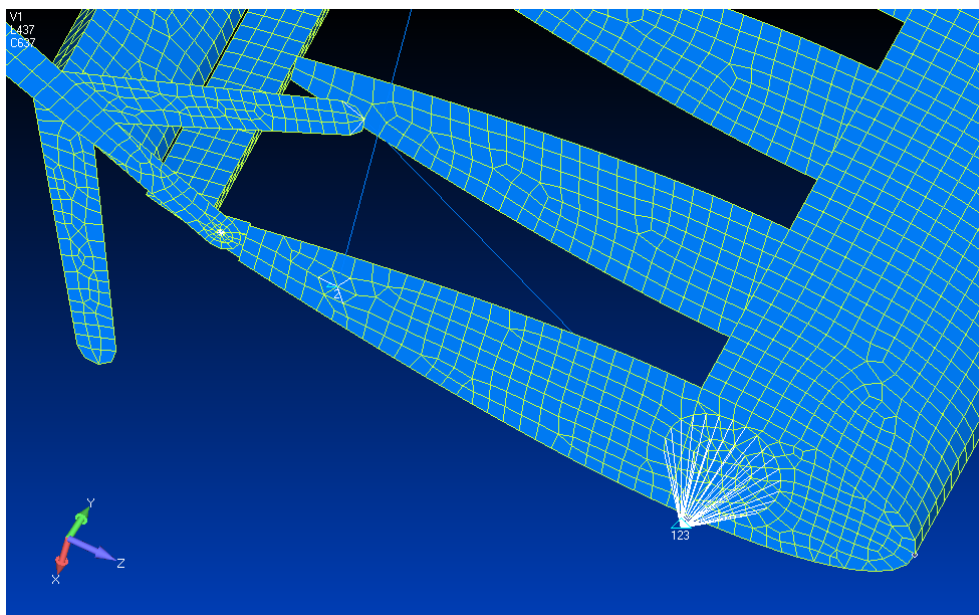


Figura 4.4: Dettaglio della centina alla base della vela

4.2.4 Carichi

I carichi aerodinamici applicati al modello strutturale derivano da quelli calcolati al centro dei pannelli del modello bidimensionale Tornado. Al fine di ottenere un'interfaccia che non modificasse l'entità del carico complessivo, questi sono poi stati discretizzati, sia in apertura che in corda, e ridistribuiti sui nodi esterni delle centine del modello strutturale.

Per cercare di ottenere una rappresentazione più coerente del carico, questo è stato suddiviso tra profilo principale e ogni singolo flap prima di procedere alla discretizzazione, facendo attenzione a mantenere invariato il lavoro totale delle forze. Sul modello ad elementi finiti sono stati applicati solamente le componenti di forza in direzione Z e X, corrispondenti rispettivamente alle direzioni di Portanza e Resistenza, mentre si è ritenuta trascurabile la componente in direzione verticale (Y) e i momenti locali.

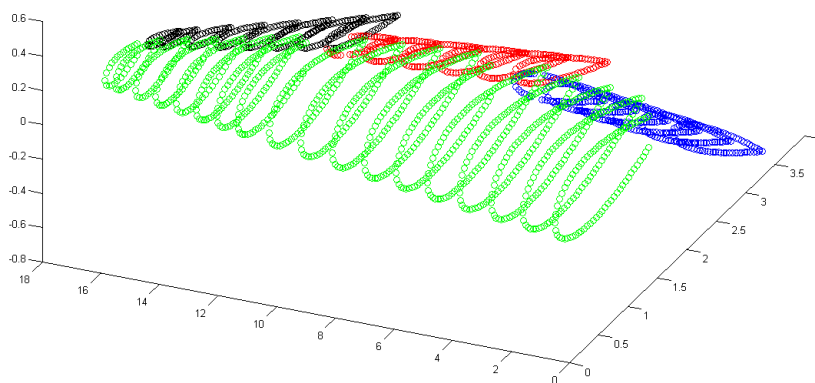


Figura 4.5: Nodi su cui sono applicati i carichi aerodinamici

Sono stati poi aggiunti i carichi dovuti al pretensionamento delle sartie che limitano la flessione dell'albero, pari a 1000N sulla sartia alta, 500N sullo strallo di prua e 1500 N sulla sartia bassa.

4.2.5 Vincoli

Il sistema di vincoli utilizzato tenta di riprodurre la condizione reale.

Sono vincolate le 3 traslazioni dei punti di attacco delle sartie allo scafo e il punto di rotazione alla base dell'albero.

I punti di vincolo sono applicati solamente sul lato di dritta della barca dal momento che vengono analizzate solamente condizioni di navigazione con vento proveniente da dritta e la vela è simmetrica.

Le due sartie laterali sono collegate in punti centrali dello scafo, mentre lo strallo di prua è vincolato in un punto posto sull'asse di simmetria della barca. Inoltre per eliminare la labilità dovuta alla rotazione dell'albero attorno al suo perno è stato aggiunto un elemento BEAM che simula la scotta principale, il quale per un capo è attaccato alla prima centina della vela e per l'altro è vincolato allo scafo.

Siccome l'analisi è concentrata sulla vela, gli scafi e le appendici in questo ambito sono ritenuti rigidi e i punti di vincolo sono direttamente collegati a terra.

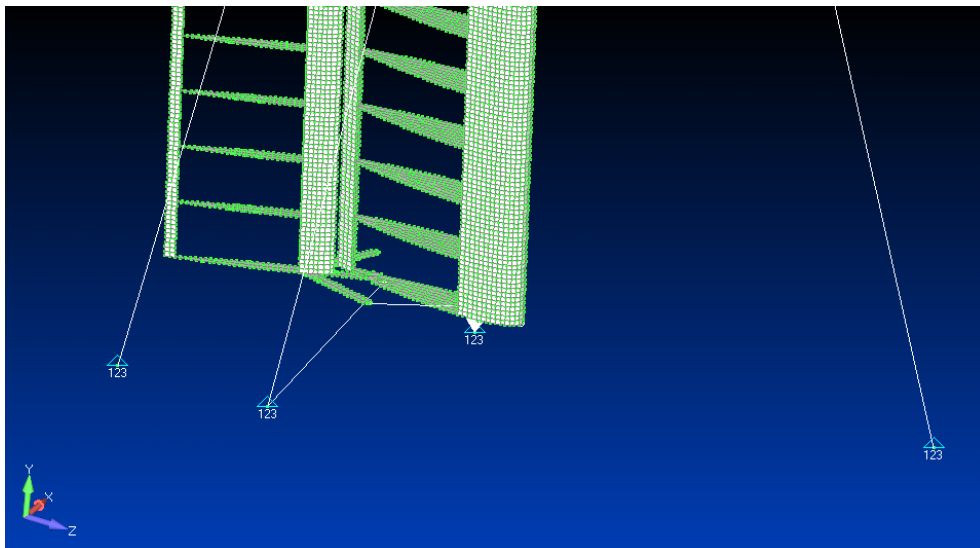


Figura 4.6: Punti di vincolo del FEM

4.3 Analisi

Le condizioni da analizzare derivano dall'equilibrio al ribaltamento e dai relativi carichi aerodinamici calcolati tramite Tornado.

In particolare, a seconda della condizione di navigazione vengono definite: la deflessione dei flaps, l'angolo di incidenza del profilo principale, l'entità dei carichi aerodinamici.

Fissate queste variabili viene condotta tramite Nastran un'analisi statica per calcolare gli sforzi all'interno della struttura e la deformata statica con cui poter valutare i punti di massimo spostamento.

Dall'analisi dei dati della deformata strutturale viene poi corretto il modello aerodinamico per valutare l'effetto della deformazione sui carichi.

Nel capitolo 8 sono riportati i risultati relativi all'analisi statica effettuata con 5m/s di vento reale.

L'analisi ad elementi finiti consente inoltre di determinare il peso totale della struttura e il relativo baricentro.

I tempi di calcolo sul modello di circa 27000 elementi, utilizzando un processore Intel(R) Core I5 750@2.67GHz e 4Gb di RAM, sono dell'ordine dei 30-40 secondi.

Capitolo 5

Modello di resistenza idrodinamica

La determinazione delle prestazioni della barca è legato all'equilibrio longitudinale delle forze e richiede, oltre ad un modello aerodinamico della vela, anche un modello delle superfici immerse che consenta di stimare la resistenza idrodinamica. Inoltre per un calcolo più accurato va tenuta in conto anche la resistenza aerodinamica generata dallo scafo stesso, dal sartame e dalle superfici non portanti.

Una volta noti dal modello aerodinamico i carichi che agiscono sulla vela, si procede con il calcolo della resistenza, per mezzo di un modello idrodinamico dello scafo e delle appendici (deriva e timone). Le prestazioni della barca, in termini di velocità di navigazione in funzione dell'angolo al vento si determinano risolvendo l'equazione di equilibrio longitudinale in funzione della velocità.

Il calcolo risulta complicato dal fatto che il modello aerodinamico necessita, per determinare la spinta avanzante, della velocità della barca, la quale però viene calcolata proprio in funzione della forza aerodinamica.

La soluzione adottata è di ripetere il calcolo in modo iterativo fino a quando la differenza tra velocità stimata ed effettiva è inferiore ad una tolleranza imposta. Questo processo è descritto in dettaglio nel capitolo 6.

Per quanto riguarda la parte immersa il modello non è stato sviluppato in dettaglio in quanto l'interesse di questo lavoro si concentra sullo studio della vela rigida.

5.1 Resistenza degli scafi

La stima della resistenza degli scafi è effettuata con l'ausilio di FS-Equilibrium [5], un software VPP (*Velocity Prediction Program*) che è in grado di determinare

le condizioni di navigazione mettendo a zero la somma delle forze in tutti i sei gradi di libertà rigidi della barca.

Se la somma delle forze non è nulla nascono delle accelerazioni sugli scafi che portano ad identificare delle condizioni instazionarie che possono caratterizzare le capacità di manovra della barca.

FS-Equilibrium è implementato con una serie di moduli aperti, ognuno dei quali rappresenta una forza o una funzione di risposta, che possono essere combinati liberamente a seconda della configurazione che si vuole analizzare. Il calcolo stazionario viene fatto ricercando la condizione di equilibrio, in funzione della velocità del vento e il relativo angolo, tramite un algoritmo di Newton-Raphson. Una serie di parametri consentono di ottimizzare la regolazione delle vele per massimizzare le prestazioni.

Le capacità del programma non si limitano alla stima della velocità della barca in funzione delle forze applicate, ma può svolgere anche calcoli idrostatici a partire dalla geometria degli scafi.

In questo caso il VPP è stato utilizzato solamente per calcolare l'equilibrio delle forze in direzione verticale e definire la linea di galleggiamento dal quale si ricava il volume di scafo immerso.

I moduli che sono stati definiti per il calcolo della resistenza sono riportati in tabella 5.1.

Modulo	Tipo	Descrizione
Hull Buoy port	<i>BuoyantForce</i>	Superficie scafo sinistro
Hull Buoy stbd	<i>BuoyantForce</i>	Superficie scafo destro
Boat Mass	<i>Mass</i>	Peso complessivo della barca
Crew Mass	<i>IMS Crew</i>	Peso dell'equipaggio
Hull Res port	<i>GenericHull</i>	Resistenza di attrito scafo sinistro
Hull Res stbd	<i>GenericHull</i>	Resistenza di attrito scafo destro
Daggerboard port	<i>LowAspectFoil</i>	Superficie deriva sinistra
Daggerboard stbd	<i>LowAspectFoil</i>	Superficie deriva destra
Rudder port	<i>LowAspectFoil</i>	Superficie timone sinistro
Rudder stbd	<i>LowAspectFoil</i>	Superficie timone destro

Tabella 5.1: Moduli del VPP

Essendo i due scafi simmetrici si è utilizzato un unico modello della superficie esterna dello scafo, tramite la quale viene calcolato il volume interno. Si determina poi la parte immersa dello scafo, dipendente dal peso dell'imbarcazione, che contribuisce a generare resistenza idrodinamica.

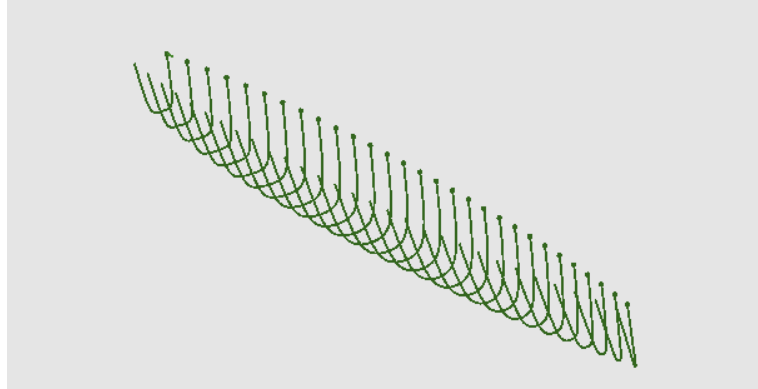


Figura 5.1: Modello dello scafo per il VPP

Vista la difficoltà di inserire una superficie di risposta generale per la vela rigida, si è preferito utilizzare il VPP per il solo calcolo idrostatico e verificare a posteriori la resistenza.

La resistenza idrodinamica totale dello scafo è calcolata come somma di un termine di resistenza d'onda R_W e un termine di resistenza di attrito R_F [6], a cui va aggiunta la resistenza generata dalle appendici (deriva e timone) R_{APP} .

$$R_{TOT} = R_F + R_W + R_{APP}$$

dove:

$$R_F = (1 + k) \frac{1}{2} \rho_{H2O} V_B^2 S C_F$$

$$R_W = \frac{1}{2} \rho_{H2O} V_B^2 \Delta^{(2/3)} C_R$$

$$R_{APP} = \frac{1}{2} \rho_{H2O} V_B^2 S_{APP} C_D$$

con

$$(1 + k) = 1.1$$

$$V_B$$

$$S = 0.05 \text{ m}^2$$

$$C_F = \frac{0.075}{(\log(Re)-2)^2} = 0.003$$

$$\Delta = 0.73 \text{ m}^3$$

$$C_R = 0.015$$

$$S_{APP} = 1 \text{ m}^2$$

$$C_D = 0.01$$

Fattore di forma

Velocità della barca

Sezione massima dello scafo

Coefficiente di resistenza di attrito

Volume immerso dello scafo

Coefficiente di resistenza d'onda (funzione di Fr)

Superficie totale delle appendici

Coefficiente di resistenza delle appendici

5.2 Resistenza aerodinamica aggiunta

Per le superfici non portanti viene considerato un valore medio di resistenza legato al totale delle superfici, che comprendono: il sartame, la superficie emersa degli scafi esposta al vento, le traverse che collegano i due scafi.

$$R_{AER} = \frac{1}{2} \rho V_{WIND}^2 S_{TOT} C_D$$

con

$$\begin{array}{ll} \rho = 1.2 \text{ Kg/m}^3 & \text{Densità dell'aria a livello del mare} \\ S_{TOT} = 4.2 \text{ m}^2 & \text{Totale delle superfici non portanti} \\ C_D = 0.3 & \text{Coefficiente di resistenza medio} \end{array}$$

5.3 Verifica della resistenza tramite VPP

La resistenza calcolata con il metodo sopra descritto è stata confrontata con quella restituita dal software FS Equilibrium.

In questo caso si è utilizzato l'equilibrio verticale delle forze per determinare il volume immerso dello scafo e l'equilibrio longitudinale per calcolare la resistenza totale.

Il valore di resistenza stimato per una velocità della barca di 6m/s è pari a:

$$\begin{array}{rcl} R_{CALCOLATA} & = & 987N \\ R_{VPP} & = & 931N \end{array}$$

L'errore è del 6% e può essere ritenuto, in questo ambito, accettabile ma richiede una modellazione più accurata degli scafi e delle superfici immerse per una stima più attendibile delle prestazioni.

Capitolo 6

Sviluppo di un ciclo di calcolo delle prestazioni

La definizione di condizioni di navigazione significative è subordinata al calcolo dell'equilibrio attorno all'asse di rollio della barca, ovvero cercare di evitare che la barca *scuffi*.

Le forze che danno un contributo in questo senso sono le forze aerodinamiche laterali e le forze di massa che tendono a riequilibrare l'imbarcazione.

La componente laterale della forza aerodinamica è direttamente proporzionale al vento apparente che agisce sulla vela, il quale però necessita della velocità della barca per essere calcolato. Siccome la velocità di avanzamento della barca è proprio la variabile da determinare, bisogna ricorrere ad una stima iniziale in funzione del vento, che deve poi essere verificata una volta noti i carichi aerodinamici.

Per questo è stato definito in Matlab un ciclo di calcolo che integra il modello aerodinamico, quello idrodinamico e il calcolo dell'equilibrio al ribaltamento. Iterando si riesce così a definire, in funzione della forza del vento, l'assetto della vela, ovvero l'incidenza e la deflessione dei flaps, che permettono alla barca di mantenersi in una condizione di equilibrio. Una volta noti i carichi si ripete il calcolo con la nuova velocità della barca, ottenuta dall'equilibrio longitudinale delle forze (aerodinamiche e idrodinamiche) fino quando la differenza tra stima e velocità effettiva scende al di sotto di un valore minimo.

6.1 Vento apparente

Il programma consente di scegliere un'intensità di vento reale V_{wind} e l'angolo di navigazione rispetto a questo α_{wind} con i quali avviare il calcolo, dopodiché si effettua una stima iniziale della velocità della barca basata sulla relazione:

$$V_{boat} = 2 V_{wind} \sin(\alpha_{wind})$$

Il calcolo del vento apparente V_{app} e dell'angolo al vento apparente α_{app} sfrutta le relazioni trigonometriche tra i vettori:

$$V_{app} = \sqrt{V_{wind}^2 + V_{boat}^2 + 2V_{wind}V_{boat} \cos(\alpha_{wind})}$$

$$\alpha_{app} = \arcsin\left(\frac{V_{wind}}{V_{app}} \sin(\alpha_{wind})\right)$$

Come già evidenziato nel paragrafo 3.2.2, la velocità del vento reale non è costante in altezza, ma legata ad una distribuzione logaritmica, il vento apparente possiede un'intensità e una direzione variabile con l'altezza. In particolare salendo dalla base alla cima della vela il vento ruota di alcuni gradi verso poppa aumentando di intensità. In figura 6.1 sono riportati gli angoli al vento apparente per angoli di navigazione di 40° e 90° .

Bisogna quindi prevedere un minor angolo di incidenza in alto affinché i profili della vela possano lavorare tutti alla massima efficienza.

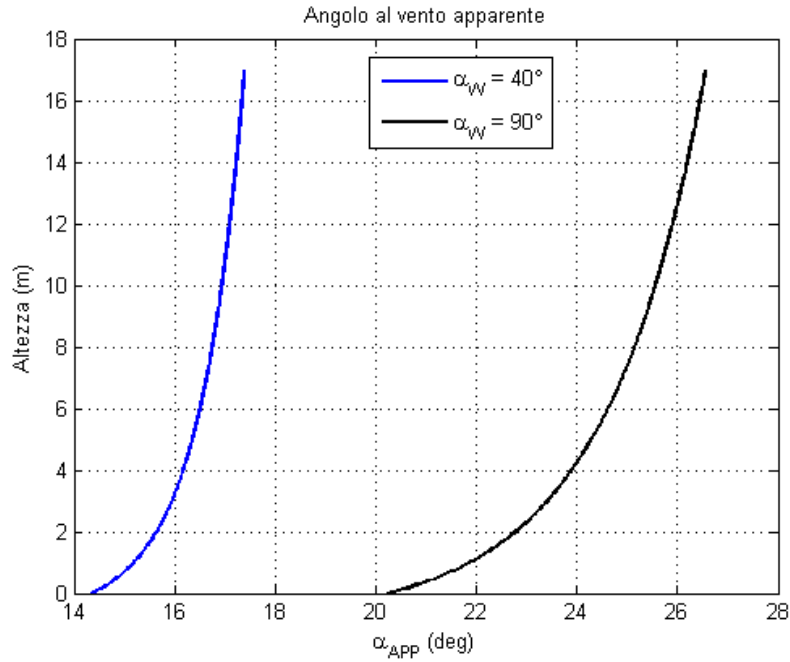


Figura 6.1: Variazione di angolo del vento apparente in altezza

Avendo scelto di mantenere costante l'incidenza del profilo principale si è deciso di ridurre gradualmente la deflessione del flap dalla base alla cima della vela.

6.2 Equilibrio laterale

Nota la distribuzione di vento sulla vela si procede con il calcolo dei carichi aerodinamici, in particolare le componenti di portanza e resistenza tramite il modello sviluppato con Tornado, descritto in dettaglio nel capitolo 3.2.3. Di queste, la componente di forza laterale (combinazione di portanza e resistenza), moltiplicata per la distanza dallo scafo è l'unica che dà un contributo al *Momento ribaltante*.

$$M_{rib} = L \cos(\alpha_{app}) + R \sin(\alpha_{app})$$

Le forze di massa invece dipendono esclusivamente dal peso della barca e dell'equipaggio e possono essere ritenute costanti. I termini che danno origine ad un *Momento raddrizzante* sono: il peso di uno scafo e quello dell'equipaggio, moltiplicati per la larghezza della barca, e il peso dell'ala per la distanza albero-scafo. In questo senso i multiscafi (catamarani e trimarani) hanno la possibilità di raggiungere velocità superiori grazie al maggior momento raddrizzante sviluppato rispetto ad un monoscafo.

$$M_{raddr} = \frac{1}{2}(bW_S + bW_W) + bW_E$$

con:

b = larghezza della barca

W_S = peso degli scafi

W_W = peso dell'ala

W_E = peso dell'equipaggio

L'equilibrio tra questi due momenti, calcolati rispetto allo scafo di sottovento che costituisce l'asse di rotazione, determina una possibile condizione di navigazione.

Determinando questa condizione per tutti gli angoli rispetto al vento reale e per diverse intensità di vento è possibile costruire i diagrammi completi delle prestazioni della barca. In particolare si determina l'angolo ottimale di bolina, ovvero quello per cui la componente di velocità opposta alla direzione la cui proviene il vento è massima e che consente di risalire il più velocemente possibile il vento.

Vengono trascurate in questo ambito le forze generate dalle superfici immerse, in quanto trovandosi molto vicino all'asse di rotazione il loro contributo al momento ribaltante è minimo.

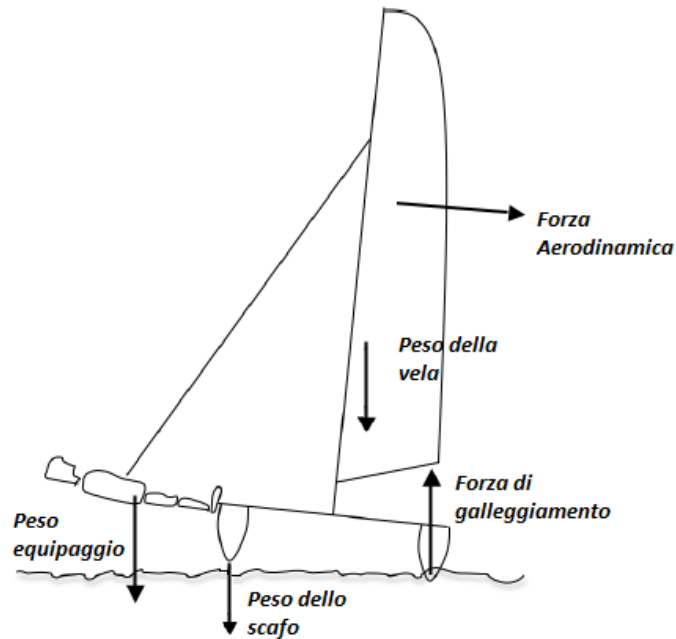


Figura 6.2: Forze che contribuiscono al momento ribaltante

6.3 Equilibrio longitudinale

Le forze che agiscono in direzione parallela a quella di moto sono la componente di trazione aerodinamica, la resistenza idrodinamica legata alle superfici immerse e la resistenza aerodinamica generata da tutte le superfici non portanti (sartame, attrezzature).

L'equilibrio di queste forze consente di determinare direttamente la velocità della barca e confrontarla con quella stimata nelle fasi iniziali del calcolo.

$$V_{Boat} = \sqrt{\frac{2T}{\rho_{H2O} S_{Equi} C_{DEqui}}}$$

con:

T = spinta aerodinamica

ρ_{H2O} = densità dell'acqua

S_{scafo} = superficie totale equivalente

C_{Dscafo} = coefficiente di resistenza equivalente

6.4 Ciclo iterativo

Lo sviluppo di un ciclo iterativo permette di variare gradualmente l'assetto dell'ala (incidenza, deflessione del flap) fino a raggiungere la condizione di equilibrio con una tolleranza inferiore all'1% del momento ribaltante calcolato. Questo processo viene ripetuto all'interno di un ulteriore ciclo nel quale viene aggiornata la velocità della barca, calcolata tramite l'equilibrio longitudinale.

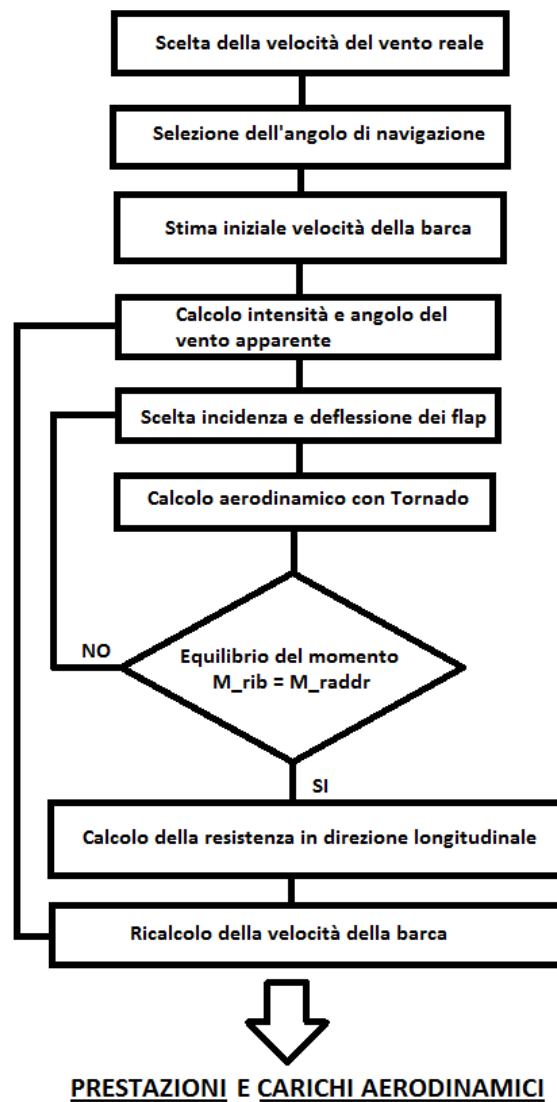


Figura 6.3: Schema del ciclo di calcolo delle prestazioni

Al fine di ottenere valori ragionevoli sono state imposte delle limitazioni sulla deflessione dei flaps e sul massimo angolo di incidenza della vela: $\delta_{MAX} = 35^\circ$, $\delta_{MIN} = 5^\circ$, δ decrescente dalla base alla cima della vela, angolo di incidenza massimo $\alpha = 15^\circ$ e α sempre inferiore all'angolo di stallo (in funzione di δ). All'inizio di ogni ciclo il programma cerca il δ ottimale in funzione dell'intensità di vento e l'angolo di incidenza viene scelto in modo da massimizzare la spinta avanzante (vedi figura 6.4) in funzione di δ , dopodiché si varia α e, se necessario, anche δ fino al raggiungimento dell'equilibrio.

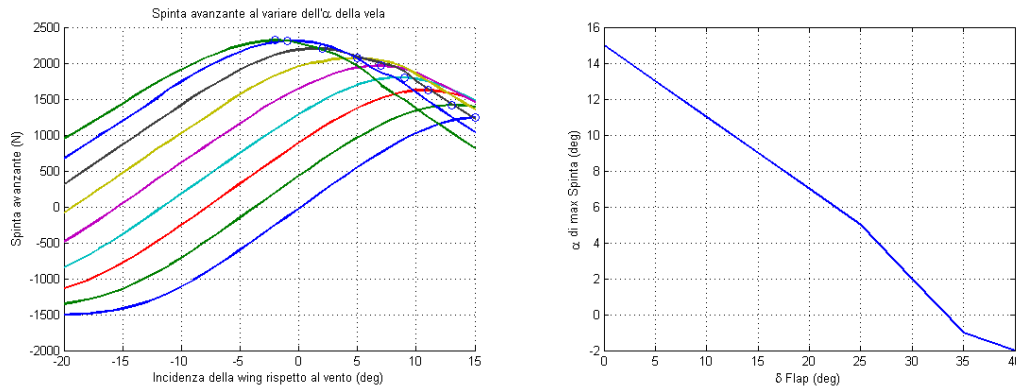


Figura 6.4: Angoli di massima spinta della vela al variare di δ

Come si può vedere, l'angolo di incidenza per cui si ottiene la massima spinta avanzante viene a trovarsi sempre in prossimità dell'angolo di stallo. Da questo nasce la necessità di modificare il modello aerodinamico per tenere conto degli effetti legati allo stallo dell'ala. Sicuramente per un'analisi più dettagliata dell'aerodinamica si rimanda a studi condotti con modello CFD.

Capitolo 7

Ciclo di ottimizzazione strutturale integrato

Determinate le prestazioni generali della barca si è cercato di andare ad indagare più in dettaglio il comportamento aeroelastico della vela e valutare gli effetti che questo può avere sulle prestazioni.

7.1 Calcolo della deformata strutturale

Si analizzano i dati relativi all'analisi statica condotta sul modello ad elementi finiti per valutare gli effetti della deformazione strutturale sull'aerodinamica.

Per fare questo si estraggono dal modello FEM gli spostamenti, nel piano orizzontale, di alcuni nodi sul bordo di attacco del profilo, dei nodi sulle cerniere dei flaps e dei nodi ai vertici dei flaps, dai quali si ricostruiscono gli spostamenti relativi e le deformazioni delle diverse sezioni.

Inoltre vengono prese coppie di nodi a metà dei flaps, a cavallo del gap tra profilo principale e flap, per valutare quanto la deformazione influisce sulle dimensioni della fessura. Infatti, come già evidenziato nella creazione del modello aerodinamico (capitolo 3.1.2), anche una piccola variazione delle dimensioni può causare la perdita degli effetti benefici legati al soffiaggio.

7.2 Parametri da ottimizzare

Come parametri di verifica si valutano lo svergolamento del profilo principale e la variazione di incidenza dei flaps. In questo modo si mettono in evidenza gli effetti globali che gli spostamenti della struttura hanno sull'aerodinamica, mentre

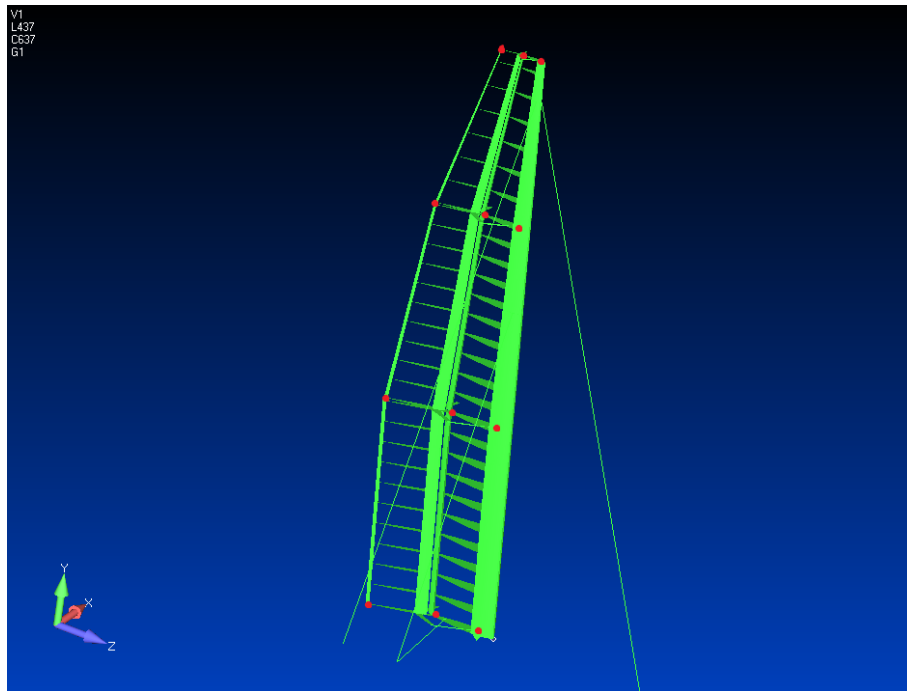


Figura 7.1: Punti di calcolo della deformazione della vela

si ritengono trascurabili le deformazioni locali, ad eccezione di quelle legate al gap tra ala e flap.

7.3 Aggiornamento del modello aerodinamico

Una volta determinati i parametri caratteristici del modello aerodinamico nella condizione di navigazione da analizzare, si effettua nuovamente il calcolo dei carichi tramite il modello Tornado e si valuta la variazione di questi ultimi rispetto alla condizione indeformata. In questo modo viene rappresentata l'effettiva distribuzione di carico della vela rigida soggetta alla forza del vento in condizioni statiche.

Capitolo 8

Risultati

Sono riportati di seguito i risultati ottenuti tramite il codice scritto in Matlab nella condizione con 5m/s (circa 10kn) di vento reale con la geometria progettata per il catamarano M32.

8.1 Analisi aerodinamica

I grafici sono relativi alla condizione di equilibrio per un'andatura con un angolo al vento reale variabile tra 30° e 110°.

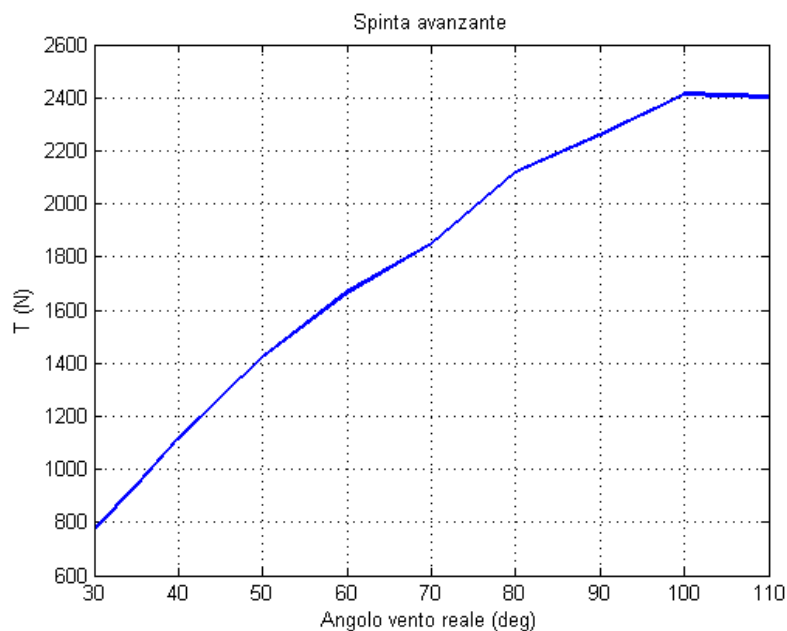


Figura 8.1: Spinta della vela in funzione dell'angolo al vento

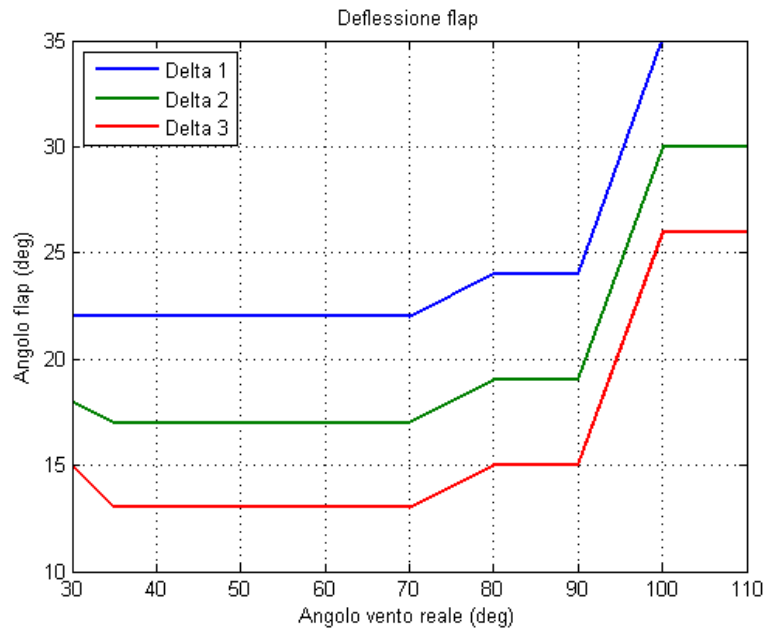


Figura 8.2: Angolo di deflessione del flap (alla base, a metà, in cima)

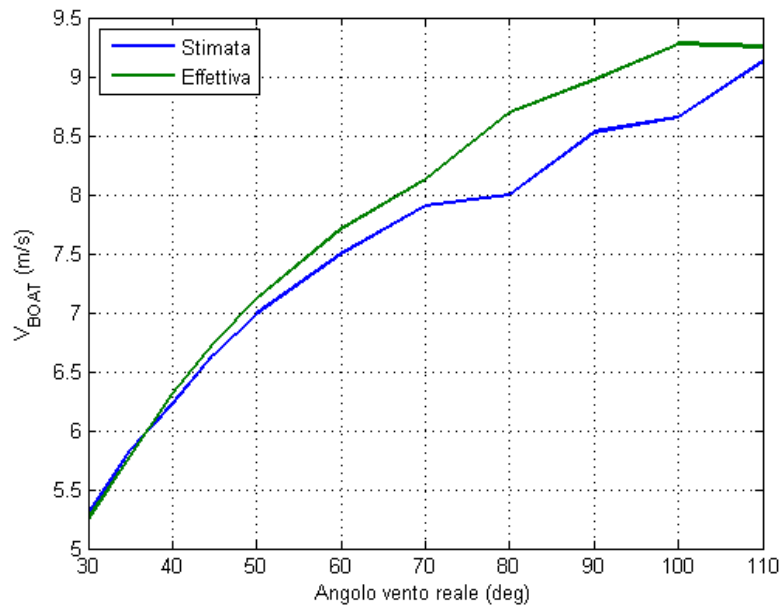


Figura 8.3: Velocità della barca

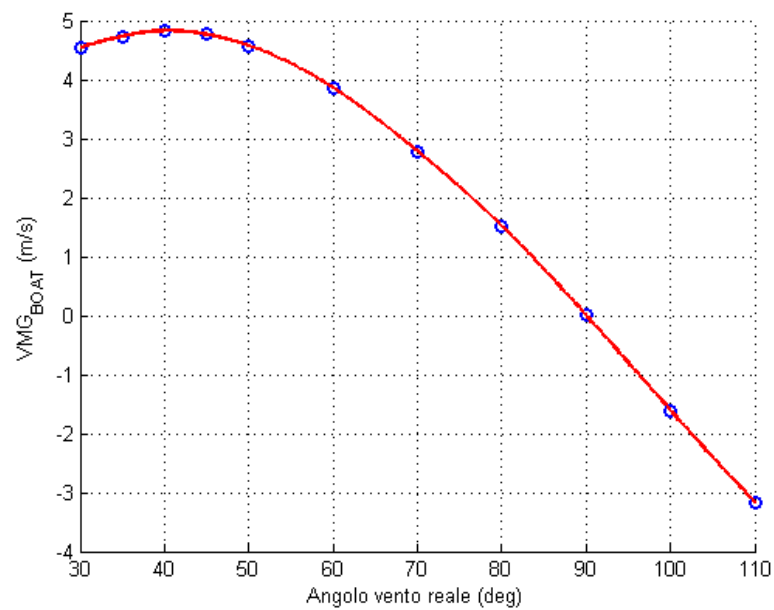


Figura 8.4: *Velocity made good* nelle diverse andature

La VMG (Velocity made good), determina la componente di velocità di risalita verso il vento. L'angolo al vento per cui questa componente è massima determina l'andatura ottimale di bolina, ovvero quella che consente di raggiungere nel minore tempo possibile un punto, ad esempio una boa, posto sopravento.

Di seguito ci sono i grafici relativi alla condizione ottimale di bolina che, come si può vedere nel grafico 8.4, corrisponde ad un angolo al vento di 40° .

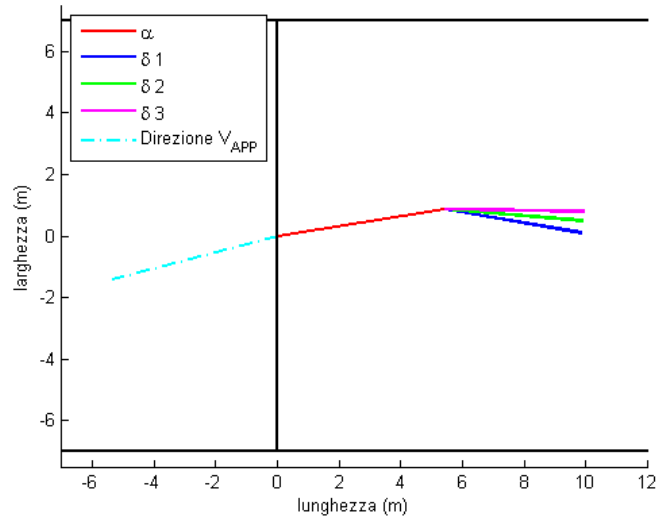


Figura 8.5: Deflessione del profilo principale e dei flaps

In tabella sono riportati i risultati caratteristici dell'analisi aerodinamica.

V_{WIND}	=	5	m/s	Velocità del vento reale
V_{APP}	=	10.5	m/s	Velocità media del vento apparente
V_{BOAT}	=	6.3	m/s	Velocità di avanzamento
α_{WIND}	=	40°		Angolo al vento reale
α_{APP}	=	17.75°		Angolo al vento apparente
α	=	4.5°		Incidenza della vela
δ_{MAX}	=	22°		Deflessione massima del flap (alla base)
δ_{MIN}	=	13°		Deflessione minima del flap (in cima)
L	=	4045.1	N	Portanza aerodinamica
R	=	129.3	N	Resistenza aerodinamica
D	=	3892	N	Componente di forza laterale
T	=	1110	N	Componente di spinta
h_{APPL}	=	7.55	m	Altezza del punto di applicazione del carico
M_{RIB}	=	29429	Nm	Momento ribaltante
M_{RIB}	=	29871	Nm	Momento raddrizzante
C_L	=	1.27		Coefficiente di portanza medio dell'ala

Tabella 8.1: Risultati dell'analisi aerodinamica

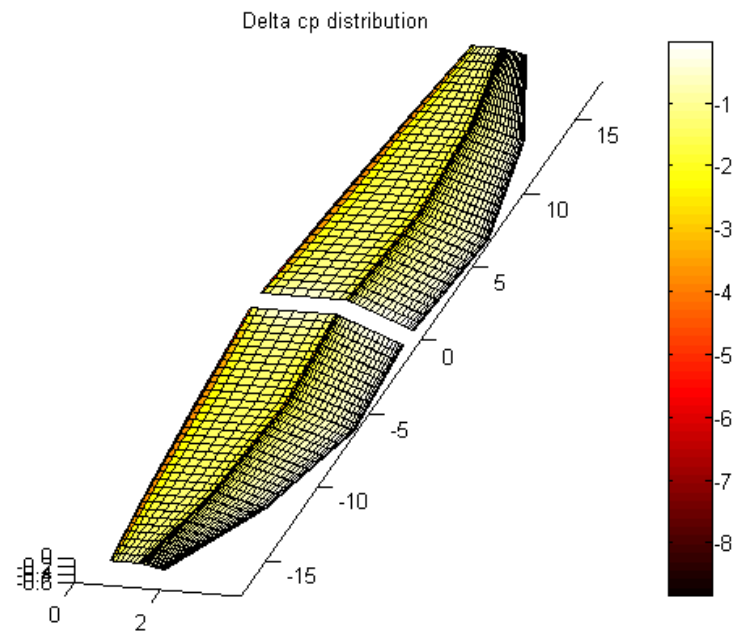
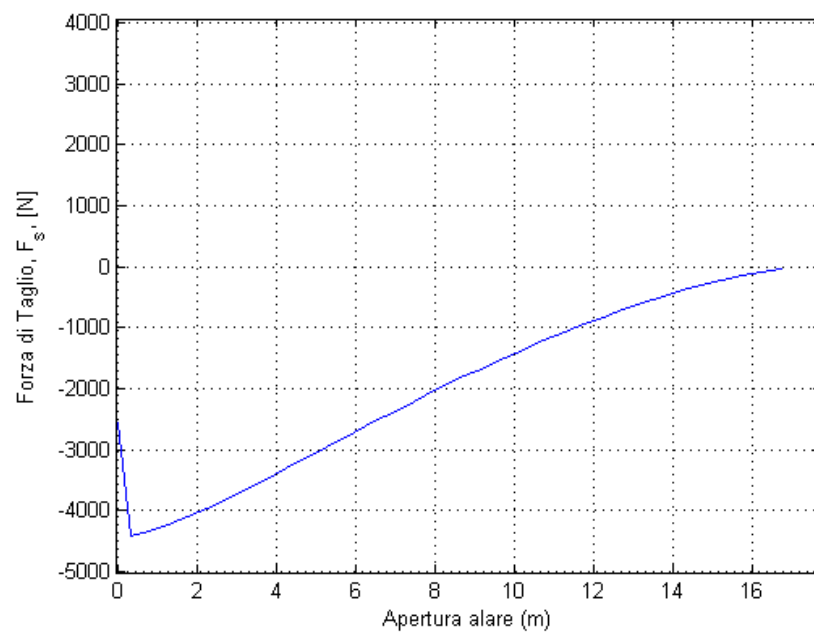
Figura 8.6: Distribuzione di C_P sull'ala

Figura 8.7: Taglio sull'ala

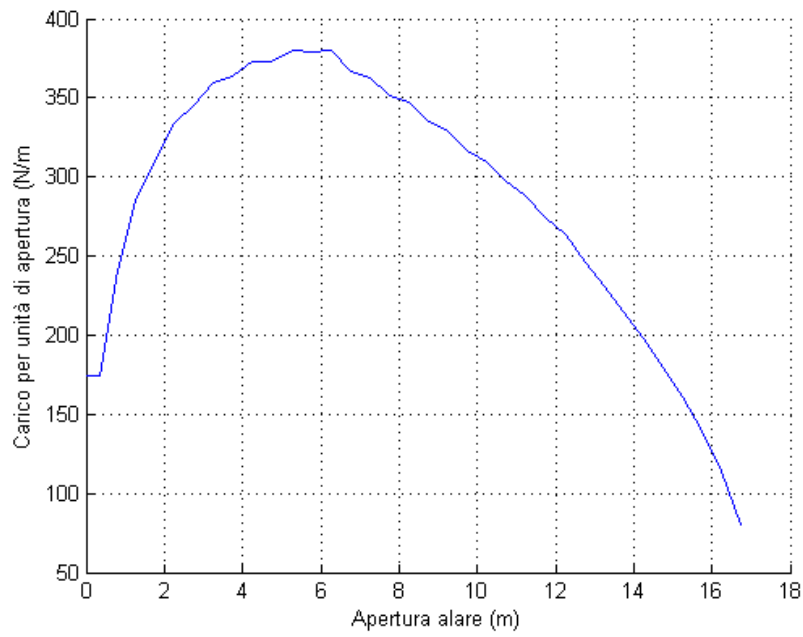
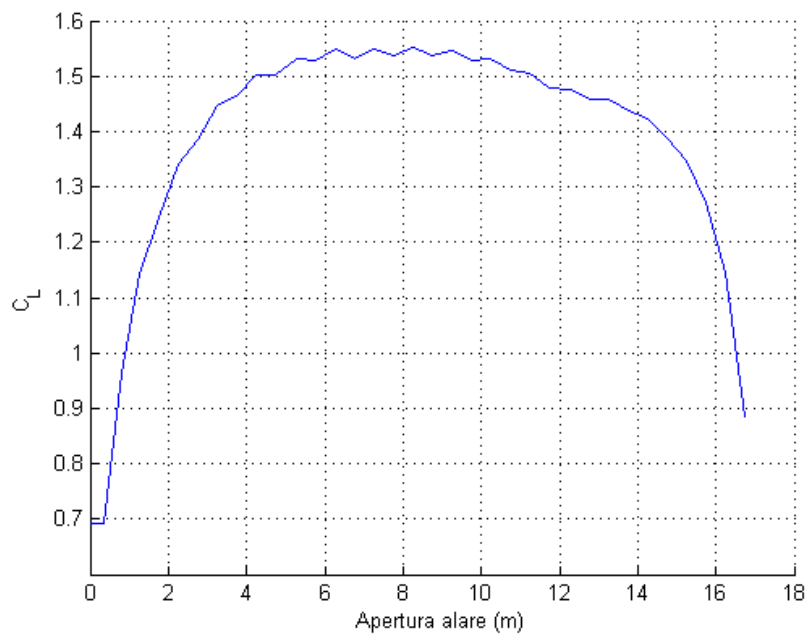


Figura 8.8: Carico alare in apertura

Figura 8.9: Distribuzione di C_L in apertura

8.2 Analisi strutturale

Con i carichi determinati in precedenza per la condizione ottimale di bolina vengono ora riportare le analisi condotte sul modello ad elementi finiti.

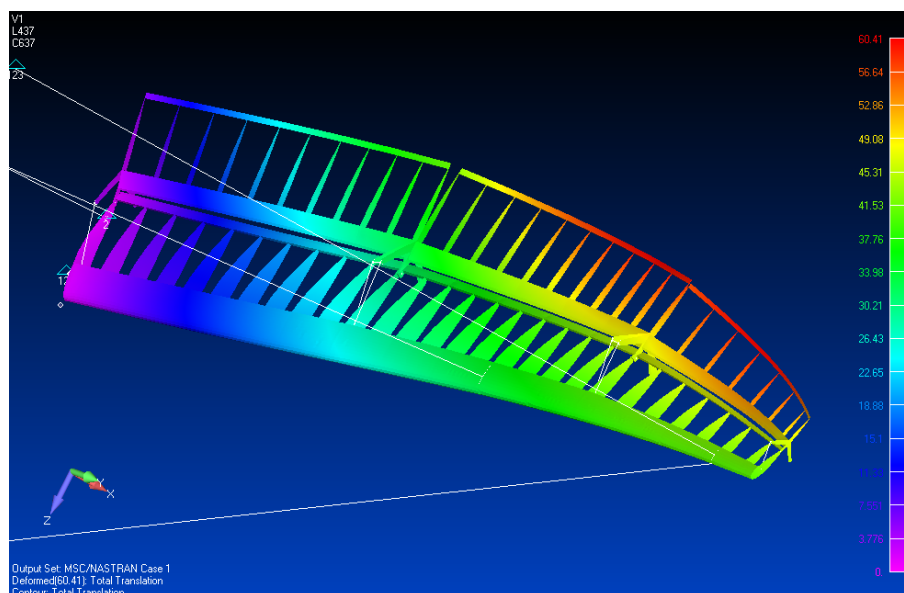


Figura 8.10: Spostamento massimo dei nodi

Il peso totale della struttura, compresi 16 Kg delle sartie, è di 257 Kg e il baricentro si viene a trovare a $Y = 6.78\text{m}$ in altezza e $X = 1.25\text{m}$ dal bordo di attacco alla base preso come riferimento.

Lo spostamento massimo rispetto alla condizione indeformata si verifica sul flap più alto ed è pari a 60mm, mentre lo spostamento laterale della testa d'albero, dovuto alla flessione, è pari a 40 mm.

Sono inoltre riportati i Failure Index del laminato in composito calcolati con il criterio di Tsai Wu.

Gli sforzi all'interno della struttura risultano abbastanza modesti dal momento che il carico applicato rappresenta una condizione ottimale e non una condizione dimensionante legata ad esempio alle manovre di virata o strambata con vento più sostenuto. Tuttavia, analizzando la figura 8.13, si può notare come le centine siano praticamente scariche. Si può quindi pensare di ottimizzare il peso della struttura andando ad alleggerire le zone centrali delle centine.

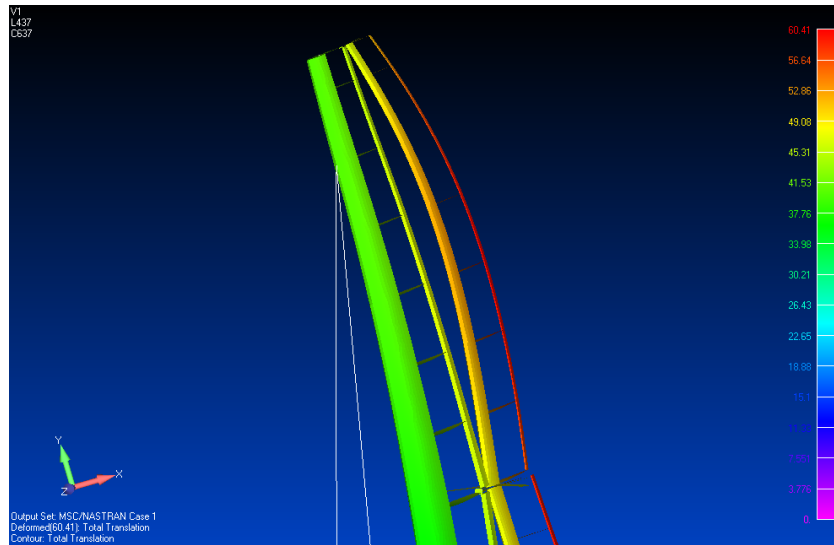


Figura 8.11: Spostamento massimo in testa d'albero

La deformazione dei flap, qui aumentata per metterla in evidenza, modifica la dimensione della fessura tra i due profili e richiede una verifica aerodinamica sulla struttura deformata.

Per completare il dimensionamento della struttura è stata condotta un'analisi di bucking per verificare che nessun elemento si instabilizzasse. I risultati sono riportati nelle figure 8.16 e 8.17.

I primi autovalori, i più significativi, sono riportati in tabella 8.2 ed evidenziano come vi siano margini di miglioramento nell'ottimizzazione della struttura essendo l'autovalore più basso pari a 2.05.

N. modo	Autovalore
1	2.0492
2	2.0493
3	2.1043
4	2.1614
5	2.3409
6	2.4518
7	2.5804
8	2.6409
9	2.7073
10	2.7569

Tabella 8.2: Autovalori analisi di buckling

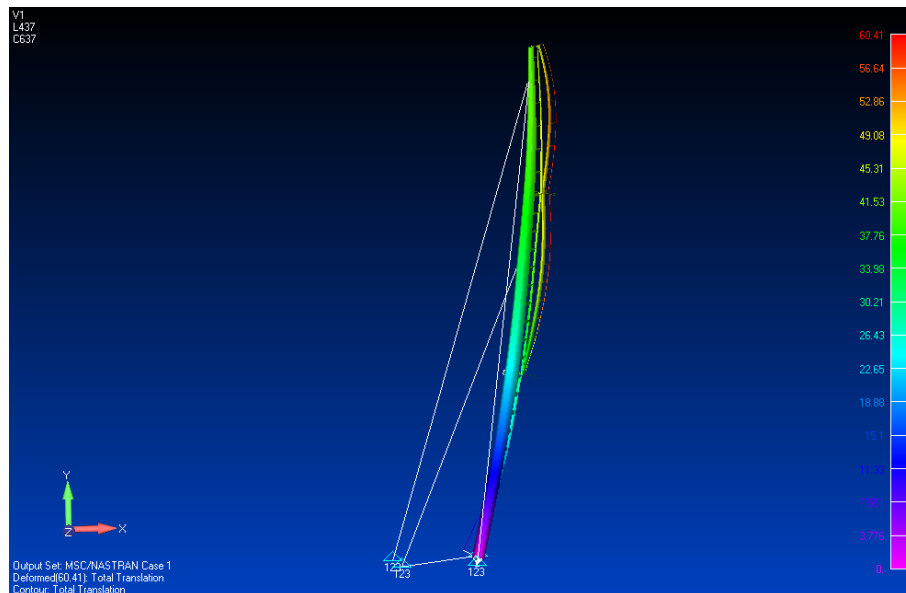


Figura 8.12: Spostamento massimo, vista frontale

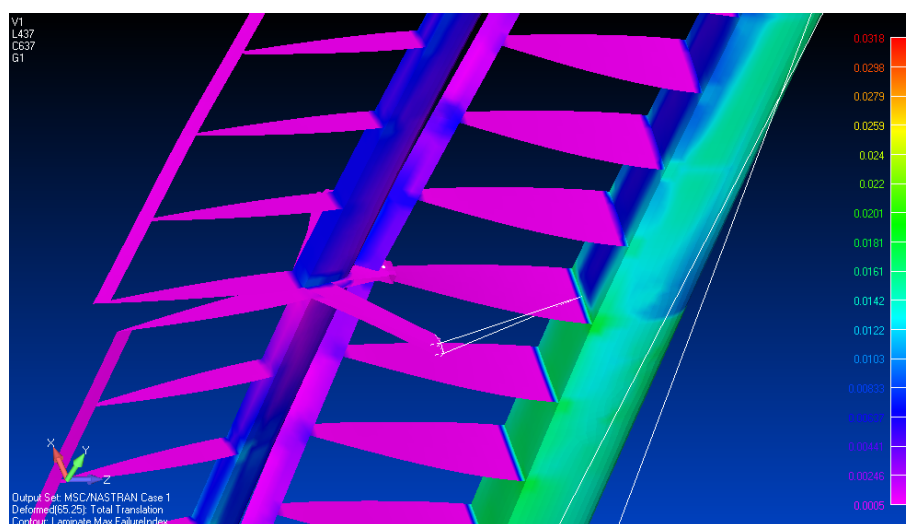


Figura 8.13: Failure index degli elementi sulle centine

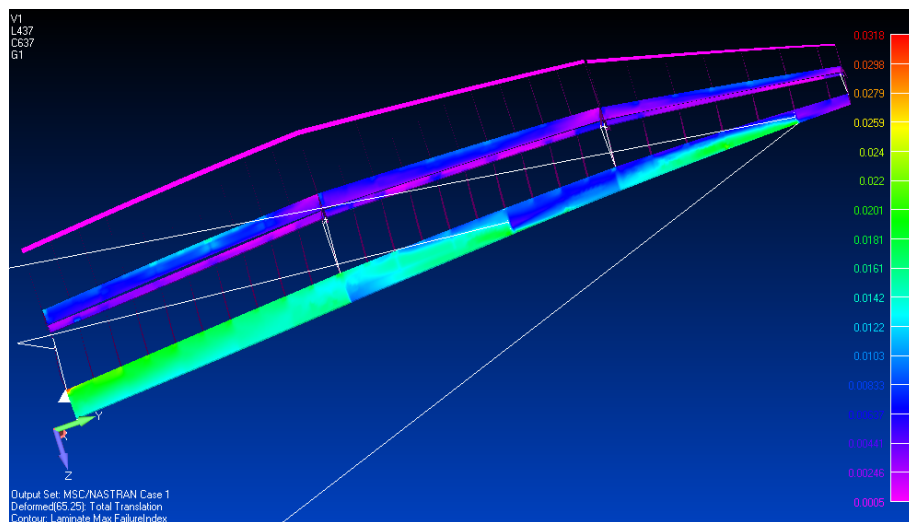


Figura 8.14: Failure index sugli elementi dell'ala

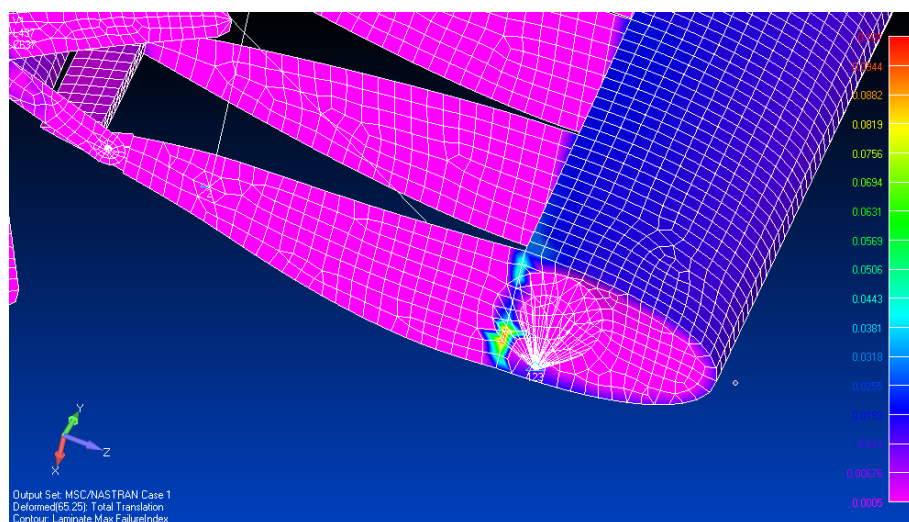


Figura 8.15: Failure index degli elementi alla base della vela

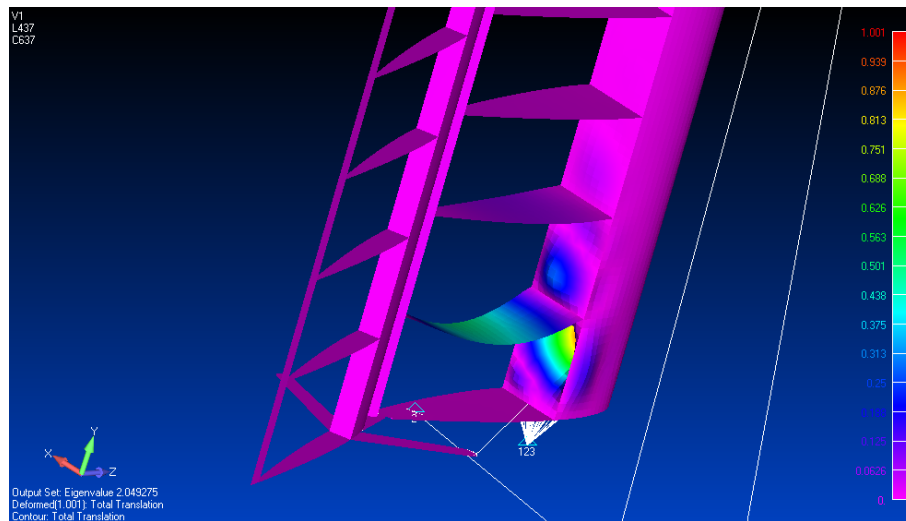


Figura 8.16: Primo modo di buckling locale alla base

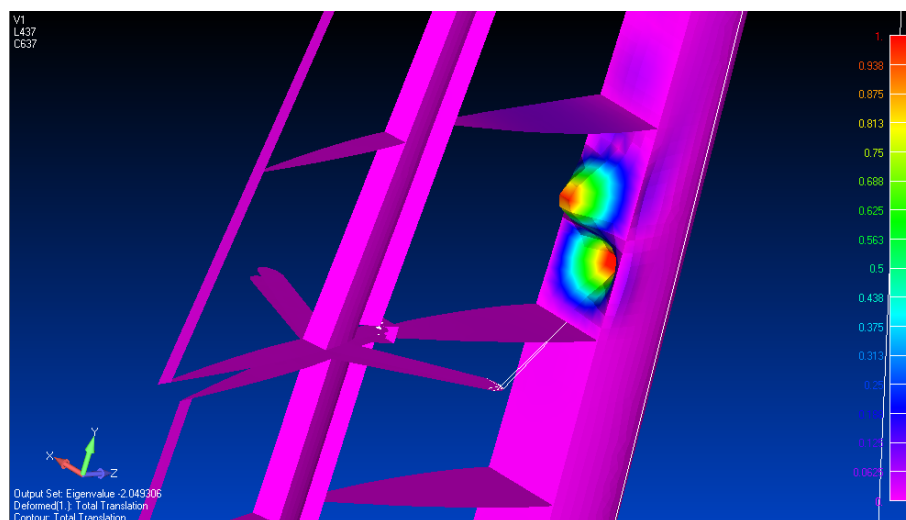


Figura 8.17: Secondo modo di buckling locale

8.3 Verifica dei carichi aerodinamici

Data la ridotta entità del carico prodotto da un vento di 5m/s le deformazioni strutturali sono modeste, ma consentono ugualmente di verificare la deformata globale della struttura.

Analizzando i risultati dell'analisi strutturale, in particolare lo spostamento dei nodi nel piano orizzontale, è stato inserito nel modello aerodinamico lo svergolamento lungo l'apertura e sono state corrette le deflessioni dei flaps.

h (m)	Svergolamento (gradi)	δ_{FLAP} (gradi)	δ_{FLAP} deformato (gradi)
0	0	22.0	22
1	0.05	21.5	21.3
2	0.10	21.0	20.8
3	0.15	20.5	20.3
4	0.20	20.0	19.8
5	0.25	19.5	19.2
6	0.30	19.0	18.7
7	0.34	18.5	18.2
8	0.38	18.0	17.6
9	0.43	17.5	17.1
10	0.47	17.0	16.5
11	0.49	16.5	16
12	0.50	16.0	15.4
13	0.52	15.5	14.9
14	0.54	15.0	14.4
15	0.55	14.5	13.9
16	0.57	14.0	13.3
17	0.58	13.5	12.8

Tabella 8.3: Risultati dell'analisi aerodinamica sulla struttura deformata

Ripetendo l'analisi aerodinamica con questi parametri si è ottenuta una riduzione di portanza totale del 4%. Questa differenza è dovuta al fatto che lo svergolamento tende a scaricare la vela, soprattutto nella parte alta, e la riduzione della deflessione dei flaps provoca una generale riduzione di portanza.

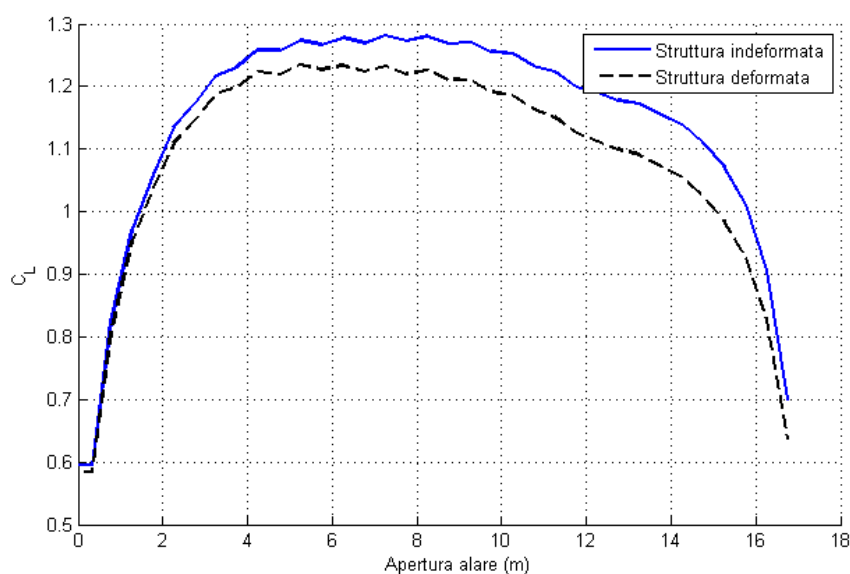


Figura 8.18: Distribuzione di C_L , ala indeformata e deformata

Per ridurre l'effetto legato ai flaps si può pensare di non apportare alcuna modifica strutturale, ma semplicemente tendere i cavi che regolano la deflessione del flap una volta che la struttura è sotto carico, quindi direttamente in navigazione. Per limitare lo svergolamento generale invece è necessario agire sul numero e sull'orientazione delle lamine che compongono la parte frontale della vela, quella che svolge la funzione dell'albero, per cercare di ridurre al minimo la deformabilità torsionale.

La curvatura del bordo di attacco dei flaps fa sì che il gap si riduca di qualche millimetro in particolare nelle zone lontano dalle cerniere dove la deformazione è più evidente. Tuttavia questa variazione è contenuta rispetto alle dimensioni iniziali, per cui gli effetti sull'aerodinamica sono limitati. Le distanze tra i profili prima e dopo che venga applicato il carico sono riportate in tabella 8.4.

Flap	gap (mm)	gap deformato (mm)	Variazione %
1	79.00	76.19	-3.55
2	53.05	48.98	-7.67
3	27.20	22.60	-16.9

Tabella 8.4: Variazioni nelle dimensioni del gap ala-flap

8.4 Ottimizzazione delle laminazioni

In seguito all'ottimizzazione delle laminazioni è stato possibile ridurre il peso complessivo della struttura dai 257Kg iniziali a 190Kg, senza che la deformata strutturale venisse eccessivamente modificata. Rimane tuttavia un buon margine di riduzione del peso legato all'alleggerimento delle centine, che come si può vedere già sull'ala degli AC45 (figura 4.1) o sulle vele dei Classe C, non sono piene come nel modello, bensì quasi completamente vuote all'interno.



Figura 8.19: Centine di un ala di un AC45

Capitolo 9

Conclusioni

In questo lavoro di tesi si è cercato di sviluppare una procedura di calcolo che permettesse di integrare in un'unica struttura la modellazione aerodinamica e quella strutturale della vela, con l'obiettivo di ottenere un dimensionamento preliminare. Si è cercato di mantenere la struttura di calcolo il più possibile semplice e versatile, così da renderla adatta a qualunque tipo di imbarcazione da regata dotata di vela rigida. Questo scopo è stato raggiunto con la creazione di modelli (aerodinamico e strutturale) basati su un'unica geometria, dipendente da un numero limitato di parametri di facile modifica, e l'implementazione in un processo di calcolo in Matlab che interfacciasse i diversi programmi per rendere il calcolo più rapido.

Per quanto riguarda il comportamento strutturale si sono studiati gli effetti legati alla deformabilità sotto carico e si è cercato di ottimizzare il più possibile il peso della struttura agendo sulle laminazioni. In questo caso si è riusciti a creare una procedura semi-automatica che, a partire dal carico aerodinamico, andasse ad analizzare gli spostamenti di alcuni nodi del modello ad elementi finiti, ricostruendo la variazione di geometria complessiva in termini di svergolamento e deflessione del flap. L'analisi aerodinamica condotta sulla nuova geometria ha messo poi in evidenza la riduzione delle prestazioni legata alla deformabilità consentendo di ridurre questo effetto con l'ottimizzazione della disposizione delle lamine in materiale composito.

Lo studio condotto sulla vela rigida del catamarano Marstrom M32 è stato condotto con l'obiettivo di essere in futuro validato per mezzo di analisi sperimentali, così da poter poi utilizzare il modello di calcolo per il progetto preliminare delle più grandi vele rigide dei Classe AC72.

9.1 Sviluppi futuri

Un importante complemento al lavoro svolto consiste sicuramente nella modifica del modello aerodinamico tramite l'utilizzo di un codice CFD, più accurato soprattutto per quanto riguarda gli aspetti legati allo stallo. Questo dovrebbe consentire anche di analizzare in dettaglio gli effetti delle dimensioni della fessura tra profilo principale e flap.

Per migliorare il calcolo delle prestazioni è necessario sviluppare un modello completo degli scafi e delle appendici e inserire le relative componenti di forza nel calcolo degli equilibri. Questo può essere fatto con l'aiuto di un software VPP, prendendo in considerazione anche l'equilibrio laterale e quello attorno all'asse verticale che in questo caso non sono stati considerati.

Il tutto andrebbe poi inserito in un ciclo di ottimizzazione automatico, quale ad esempio *Nexus*, capace minimizzare il peso dell'intera struttura limitandone allo stesso tempo la deformabilità sotto carico.

Per il dimensionamento completo dell'ala andranno analizzate altre condizioni di carico statiche con vento più sostenuto e condizioni dinamiche, che possono portare ad avere Failure Index più vicini al carico critico e margini di sicurezza inferiori a buckling.

Oppure situazioni particolari quali l'impatto della testa d'albero con l'acqua durante una scuffia.

Il passo successivo consiste nella realizzazione materiale dell'ala per la determinazione sperimentale dei carichi e delle prestazioni della barca, così da consentire la validazione del modello numerico sia per la parte aerodinamica che per quella strutturale.

Appendice A

Termini velici

Randa	Vela principale della barca
Fiocco	Vela triangolare di prua
Bolina	Andatura che permette di risalire il vento
Lasco	Andatura che allontana dal vento
Virare	Cambiare di mure con il vento in prua
Strambare	Cambiare di mura con il vento in poppa
Andatura	Direzione della rotta rispetto al vento reale
VMG	Compromesso ottimale tra velocità e rotta
Sopravento	Lato esposto al vento
Sottovento	Lato opposto al vento
Mure (a dritta o sinistra)	Navigare con vento da destra o da sinistra
Sartia	Cavo che sostiene l'albero lateralmente
Strallo	Cavo che sostiene l'albero a prua
Scotta	Cima utilizzata per tendere (cazzare o lascare) la vela

Match Race	Particolare tipologia di regata con due sole imbarcazioni che segue uno specifico regolamento.
Scuffia	Capovolgimento della barca di 90° o 180°
Centro velico	Punto di applicazione delle forze aerodinamiche
Centro di deriva	Punto di applicazione delle forze idrodinamiche
Sbandamento	Inclinazione laterale della barca
Scarroccio	Spostamento laterale della barca rispetto alla rotta

Bibliografia

- [1] “Aerodynamics of Model Aircraft.” <http://www.mh-aerotools.de/airfoils/>.
- [2] N. Haack, “C-Class Catamaran Wing Performance Optimisation,” Master’s thesis, University of Manchester, School of Mechanical, Aerospace and Civil Engineering, 2011.
- [3] A. Campiglio, “Ottimizzazione delle laminazioni dello scafo e progettazione di una vela rigida per un catamarano da regata di 40 piedi,” Master’s thesis, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Aerospaziale, 2011.
- [4] “Torayca material M40J Data Sheet.” Specifiche del materiale, <http://www.toraycfa.com/pdfs/M40JDataSheet.pdf>.
- [5] FutureShip, “FS Equilibrium User Manual,” <http://www.futureship.de>.
- [6] S. Hoerner, *Fluid Dynamic Drag*. Hoerner Fluid Dynamics, 1965.
- [7] B. Chéret, *Le Vele, Comprendere, Regolare, Ottimizzare*. Mursia.
- [8] F. Bethwaite, *High Performance Sailing*. Adlard Coles Nautical.
- [9] A. R. J.F. Mannwell, J.G. McGowan, *Wind Energy Explained*. Wiley.
- [10] V. Radhakrishnan, *From square sails to wing sails: The physics of sailing craft*. Currens Science.
- [11] K. Bathe, *Finite Element Procedures in Engineering Analysis*. Prentice-Hall.
- [12] A. Gentry, “A review of modern sail theory,” *11th AIAA Symposium on the Aero/Hydronautics of Sailing*, 1981.
- [13] D. Pelly, “Little America’s Cup,” *Yachting World*, 1968.
- [14] H. Martin, “The catamaran Miss Nylex,” *The SAE-Australasia*, 1976.
- [15] D. T. MacLane, “The Cogito Project: Design and Development of an International C-Class Catamaran,” *Marine Technology Vol.37*, 2000.

-
- [16] MSC-Corporation, “MSC Nastran Quick Refernce Guide,” 2004. <http://www.mscsoftware.com>.
 - [17] G. H. Elkaim, “An Energy scavenging autonomous surface vehicle for littoral surveillance,”
 - [18] S. Killing, “Alpha and Rocker,” *The 19th Chesapeake Sailing Yacht Symposium*, 2009.
 - [19] C. Bögle, “Evaluation of the performance of a hydro-foiled Moth by stability and force balance criteria,” *31th Symposium Yachtbau und Yachtenwurf, Hamburg*, 2010.
 - [20] T. Melin, “User’s guide and reference manual for Tornado,” 2000. <http://www.redhammer.se/tornado>.
 - [21] “The Protocol governing the 34th America’s Cup,” 2010.
 - [22] “AC72 Class Rule Version 1.1,” 2011. <http://www.americascupmedia.com/>.
 - [23] “Team Invictus.” <http://www.teaminvictus.com/>.
 - [24] “C-Class Catamaran: The Cogito Project.” <http://www.stanschreyer.com/?p=62>.
 - [25] “The Winged World of C-Cats.” <http://www.sailmagazine.com/cclasscats/>.
 - [26] “Shape of (America’s Cup) Wings to come.” <http://www.boats.com/blog/2010/09/shape-of-americas-cup-wings-to-come/>.
 - [27] I. M. Viola, *Fluidodinamica Numerica e Sperimentale Applicata alla Dinamica delle Imbarcazioni a Vela*. PhD thesis, Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Meccanica, 2008.
 - [28] D. W. Atkins, *The CFD assisted design and experimental testing of a wingsail with high lift devices*. PhD thesis, University of Salford, 1996.