



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO**

Ingegneria dell'Innovazione Tecnologica  
Dipartimento di Ingegneria  
ING-IND/15

**SVILUPPO DI METODOLOGIE DI PROGETTAZIONE  
INTEGRATA PER BARCHE A VELA  
DA COMPETIZIONE**

**IL DOTTORE  
ING. ANTONIO SAPORITO**

**IL COORDINATORE  
PROF. SALVATORE GAGLIO**

**IL TUTOR  
CH.MO PROF. ANTONIO MANCUSO**

CICLO XXXIII  
ANNO CONSEGUIMENTO TITOLO 2021



## **Sommario**

Introduzione.....	1
1. Definizioni .....	3
Definizioni Generali.....	3
Definizioni Tecniche .....	6
Andature.....	9
Triangolo delle Velocità .....	11
Percorsi di Regata .....	12
2. Equilibrio Aero/Idrodinamico.....	15
Le Forze in Gioco.....	15
La Simmetria della Vela.....	16
3. Progettazione Nautica .....	19
Approccio al Problema.....	19
CAD – Computer Aided Design .....	24
VPP – Velocity Prediction Programs .....	28
CFD – Computational Fluids Dynamics .....	30
FEM – Finite Element Method .....	32
Ottimizzazione Topologica e Additive Manufacturing.....	33
Analisi Fluido-Struttura.....	35
CAM – Computer-Aided Manufacturing .....	37
4. Nuovo Approccio al CAD per la Nautica.....	40
Input Dati Geometria .....	46
Disegno delle Curve di Bézier .....	54
Visualizzazione delle Curve di Bézier .....	55
5. Integrazione degli Strumenti di Progettazione .....	59

Generazione dei file di scambio .....	59
Generazione del Modello 3D .....	60
Analisi della Curvatura .....	63
Calcolo dei Coefficienti .....	65
Studio delle Prestazioni .....	66
VPP.....	66
CFD .....	68
FEM.....	71
6. Caso Studio – Replica e Disegno di uno SKIFF.....	74
Dati Sperimentali .....	75
Impostazioni CFD.....	78
Verifica & Validazione (V&V).....	80
Ricostruzione di Scafi Esistenti .....	82
Disegno di un Nuovo Scafo .....	88
7. Caso Studio – Analisi Topologica .....	108
Impostazioni del Modello .....	109
Valutazione delle Forze e delle Deformazioni.....	110
Analisi Topologica .....	112
Conclusioni.....	116
Ringraziamenti.....	118
Appendice A – Curve Razionali di Bézier .....	120
Appendice B – Curve di Regressione .....	126
Appendice C – V & V .....	130
Appendice D – VPP.....	134
Appendice E – Tavole.....	136
Bibliografia.....	142

## Indice delle Figure

Fig. 1 - Assonometria di uno SKIFF

Fig. 2 - Modello CAD di uno SKIFF completo di alberatura, appendici e vele

Fig. 3 - Definizione delle principali linee di una barca a vela.

Fig. 4 - Area piano d'acqua di una barca a vela.

Fig. 5 - Massima area trasversale di una barca a vela.

Fig. 6 - Volume immerso di una barca a vela.

Fig. 7 - Le andature di una barca a vela.

Fig. 8 - Triangolo delle velocità di una barca di bolina.

Fig. 9 - Triangolo delle velocità di una barca di lasco.

Fig. 10 - Il percorso della Palermo-Montecarlo

Fig. 11 - Tipici percorsi di regata in-shore, a sinistra un percorso a bastone e a destra un percorso a quadrilatero.

Fig. 12 - Schema dell'equilibrio Aero/Idrodinamico di una barca a vela (Larsson et al, 2014).

Fig. 13 - Spirale di progettazione nautica (Larsson et al., 2014).

Fig. 14 - Spirale di progettazione ottimizzata.

Fig. 15 - Disegni e immagini di un galeone (a), di un J Class (b) e di un Imoca 60 (c).

Fig. 16 - CAD di un Imoca 60

Fig. 17 - Ambiente CAE (Computer Aided Engineering)

Fig. 18 - Esempio di VPP per il calcolo delle polari di un Optimist.

Fig. 19 - Confronto numerico/sperimentale delle prestazioni di uno scafo; scafo in vasca navale (sinistra) e corrispondente modello numerico (destra).

Fig. 20 - Esempio di ottimizzazione topologica di componenti ottenuti per additive manufacturing.

Fig. 21 - Disposizione delle fibre di carbonio in una vela.

Fig. 22 - Disegno CAD della barca di Ocore (a) e presentazione del prototipo realizzato mediante stampa 3D.

Fig. 23 - Taglio delle sezioni interne di uno SKIFF mediante una fresa a controllo numerico.

Fig. 24 - Deposizione delle fibre di lino sullo stampo del timone di uno SKIFF.

Fig. 25 - Suddivisione dello scafo mediante tre sezioni e individuazione dei punti chiave per la costruzione delle curve di Bézier.

Fig. 26 - Schema di flusso del nuovo metodo di progettazione.

Fig. 27 - Esempio di curve fondamentali, le tre sezioni con evidenziate le due curve di Bézier che le compongono.

Fig. 28 - Esempio di interfaccia grafica per inserire i dati per curve che giacciono in un piano.

Fig. 29 - Schema del poligono di controllo delle due curve di Bézier che compongono le sezioni.

Fig. 30 - Esempio di interfaccia grafica per inserire i dati per curve tridimensionali

Fig. 31 - La curva di spigolo e la curva di falchetta con evidenziate le due curve di Bézier che le compongono, in alto il piano XY e in basso il piano XZ.

Fig. 32 - Schema del poligono di controllo delle due curve di Bézier che compongono la curva di spigolo e di falchetta.

Fig. 33 - Esempio di determinazione di un unico punto di controllo per curve tridimensionali

Fig. 34 - Viste dello scafo secondo i piani YZ (a), XZ (b) e XY (c)

Fig. 35 - Rappresentazione delle curve di Bézier che replicano le tre sezioni di uno scafo con spigolo.

Fig. 36 - Rappresentazione delle curve di Bézier che replicano il dritto di prua di uno scafo con spigolo.

Fig. 37 - Rappresentazione delle curve di Bézier che replicano linee di falchetta, spigolo e chiglia di uno scafo con spigolo.

Fig. 38 - Rappresentazione delle curve di Bézier che replicano linee di falchetta e spigolo di uno scafo con spigolo.

Fig. 39 - Interfaccia grafica in cui sono presenti le curve di Bézier e l'userform mediante la quale il progettista può effettuare le modifiche sulle curve.

Fig. 40 - Esempio di file di scambio, la curva inferiore della sezione centrale

Fig. 41 - Importazione delle nuvole di punti per tutte le curve generate e disegno delle curve ad essi interpolanti

Fig. 42 - Creazione dei primi tre blend di superficie dello scafo a partire dalla rete di curve.

Fig. 43 - Modello CAD tridimensionale dello scafo su Creo 4.0 Parametric

Fig. 44 - Analisi curvatura delle curve che definiscono uno scafo a spigolo (a) e uno scafo tondeggiante (b)

Fig. 45 - Analisi della curvatura gaussiana della superficie di uno scafo con spigolo.

Fig. 46 - Esempio di curva di resistenza calcolata con riferimento a un Mini650.

Fig. 47 - Esempio di curve polari calcolate con VPP con riferimento al Mini650 della start-up Ocore.

Fig. 48 - Confronto tra mesh non strutturata (alto) e mesh strutturata (basso).

Fig. 49 - Schema di flusso dell'integrazione CAD e CFD.

Fig. 50 - Topologia della mesh strutturata a blocchi per le analisi CFD.

Fig. 51 - Rappresentazione della mesh della parte prossima alla prua di LED (a) e TryAgain (b).

Fig. 52 - Modello del dominio per lo studio CFD dello scafo.

Fig. 53 - Schema delle forze applicate allo scafo e la mesh applicata allo scafo.

Fig. 54 - SKIFF durante le regate di 1001VELAcup® a La Spezia

Fig. 55 - Una delle barche che ha partecipato alla manifestazione MIDWINTER prima di una prova di tiro.

Fig. 56 - Curve di resistenza nelle prove della manifestazione MIDWINTER.

Fig. 57 - Piani di costruzione di uno scafo tondeggiante, LED, (a) e di uno scafo con spigolo, TryAgain, (b)

Fig. 58 - Imbarcazioni in navigazione a sinistra LED e a destra TryAgain.

Fig. 59 - Curva di regressione calcolata utilizzando il Least Square Root method basato su quattro griglie.

Fig. 60 - Confronto tra diversi modelli numerici aventi diversi valori di incertezza numerica, il modello del Secondo Ordine (verde) e il modello HRIC (blu).

Fig. 61 - Confronto tra le curve degli scafi ricostruiti (rosso) e originali (nero) di LED (sinistra) e TryAgain (destra).

Fig. 62 - Linee longitudinali (verde), linee d'acqua (blu) e sezioni (rosso) di LED (sinistra) e TryAgain (destra).

Fig. 63 - Curve di resistenza calcolate mediante (Keuning e Katgert, 2008) per gli scafi originali e ricostruiti di LED e TryAgain.

Fig. 64 - Plot dell'andamento della resistenza per diverse condizioni di navigazione 2, 3 e 4 m/s e il confronto tra LED originale e LED ricostruita.

Fig. 65 - Confronto delle sezioni a 500 mm, 1000 mm e 4000 mm di LED Originale (nero) e LED Ricostruita (rosso)

Fig. 66 - Plot dell'andamento della resistenza per diverse condizioni di navigazione 2, 3 e 4 m/s e il confronto tra LED e TryAgain.

Fig. 67 - Ipotetiche curve di resistenza al variare di LCB (a), BWL (b), TC (c) e AX (d).

*Fig. 68 - Piano di costruzione di LED\_UP\_06*

Fig. 69 - Assonometria di LED\_UP\_06, in cui sono mostrate le sezioni (rosso), le linee longitudinali (verde) e le linee d'acqua (blu).



Fig. 70 – Confronto tra le curve di resistenza di LED (blu), LED\_UP\_06 (rosso) e TryAgain (verde)

Fig. 71 – Plot dell'andamento della resistenza per diverse condizioni di navigazione 2, 3 e 4 m/s e il confronto tra LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_UP\_06 (rosso).

Fig. 72 - Confronto tra la distribuzione del coefficiente di attrito a 2 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_Up\_06 (basso)

Fig. 73 - Confronto tra la distribuzione del coefficiente di attrito a 3 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_Up\_06 (basso)

Fig. 74 - Confronto tra la distribuzione del coefficiente di attrito a 4 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_Up\_06 (basso)

Fig. 75 - Confronto tra le altezze d'onda nell'intono dello scafo a 2 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_UP\_06 (basso).

Fig. 76 - Confronto tra le altezze d'onda nell'intono dello scafo a 3 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_UP\_06 (basso).

Fig. 77 - Confronto tra le altezze d'onda nell'intono dello scafo a 4 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_UP\_06 (basso).

Fig. 78 - Confronto tra l'andamento della pressione lungo la linea al galleggiamento a 2 m/s (alto), 3 m/s (centro) e 4 m/s (basso) di LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_Up\_06 (rosso)

Fig. 79 - Confronto tra la formazione ondosa a 3 m/s di LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_Up\_06 (rosso)

Fig. 80 - Confronto tra la formazione ondosa a 4 m/s di LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_Up\_06 (rosso)

Fig. 81 - Confronto tra l'andamento della pressione lungo la linea di chiglia a 3 m/s di LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_Up\_06 (rosso)

Fig. 82 - Rappresentazione delle forze applicate su Led Ricostruita.

Fig. 83 - Risultati dell'analisi FEM, in termini di deformazione lungo l'asse z (sinistra) e di valori della tensione di Von Mises (destra).

Fig. 84 - Risultati ottenuti con le analisi topologiche dei cinque casi, a sinistra il modello di metà scafo e a destra le sezioni centrali.

Fig. 85 - Confronto tra le linee di chiglia deformate di LED con rinforzi "classici" (Original) e i cinque casi O1-O5.

Fig. 86 - Tangenza delle curve di Bézier con il poligono di controllo nei punti finali della curva.

Fig. 87 - Esempio di sezione tondeggiante realizzata mediante due curve di Bézier razionali.

Fig. 88 - Definizione dei parametri "a" e "h" per il calcolo del valore della curvatura alle estremità di una curva di Bézier.

Fig. 89 - Esempio di curva di resistenza di una barca a vela.

Fig. 90 - Confronto tra la curva di resistenza di riferimento (blu) e una curva calcolata variando il valore di LCF del 5%.

Fig. 91 - Schermata relativa al programma per il calcolo dell'incertezza della griglia scritto in VBA di Excel.

Fig. 92 - Esempio di curva di regressione calcolata mediante il Least Square Root method.

Fig. 93 - Interfaccia grafica di Sailpowercalc.

## **Indice delle Tabelle**

Tab. 1 - Classifica finale della manifestazione MIDWINTER.

Tab. 2 - Risultati test sperimentali LED a 2.0 m/s.

Tab. 3 - Risultati ottenuti a seguito delle analisi numeriche per le quattro griglie.

Tab. 4 - Risultati dello studio sull'incertezza numerica condotti utilizzando il Least Square Root method per le quattro griglie.

Tab. 5 – Confronto tra i coefficienti dello scafo di LED Originale e Ricostruito

Tab. 6 – Confronto tra i coefficienti dello scafo di TRYAGAIN Originale e Ricostruito

Tab. 7 – Coefficienti di LED e TryAgain

Tab. 8 – Coefficienti di LED, TryAgain e LED\_UP\_06

Tab. 9 - Risultati numerici della resistenza di attrito, pressione e totale di LED, TryAgain e LED\_UP\_06

Tab. 10 - Forze che insistono su LED Ricostruita.

Tab. 11 - Distribuzione del valore dei pesi nella funzione obiettivo dell'ottimizzazione topologica.

Tab. B12 - Valori dei coefficienti per il calcolo della resistenza.

## **Introduzione**

In questo lavoro di tesi sono presi in esame i metodi di progettazione integrata con riferimento al disegno nautico delle piccole imbarcazioni a vela da competizione.

La progettazione di una barca a vela, in tutte le sue parti, è un processo molto complesso in quanto richiede una profonda esperienza in questo campo ed inoltre necessita di diverse competenze dal punto di vista tecnico in aree anche molto distanti tra loro. Nella vita di tutti i giorni spesso risolviamo problemi relativamente semplici e quindi troviamo la soluzione anche in modo intuitivo, in ingegneria solitamente si affrontano problemi un po' più complessi e seguire una procedura strutturata aiuta molto per trovare soluzioni valide al problema. Nel corso della tesi verrà presentato il principio alla base del moto di una barca a vela esponendo come si generano i sistemi di forze, aereo/idrodinamici, e come si auto-equilibrano, quindi si procederà con il presentare i più diffusi ed efficaci metodi di progettazione nel settore nautico. A seguito di ciò verranno presentati gli strumenti digitali che ad oggi assistono i progettisti nautici come i programmi di modellazione geometrica, programmi di calcolo delle prestazioni di tipo analitico, programmi per la risoluzione di problemi fluidodinamici, programmi agli elementi finiti e programmi in grado di convertire i risultati digitali in prodotti reali. Il passo successivo consisterà nel presentare un nuovo approccio al problema che può essere utilizzato dai progettisti al fine di integrare gli strumenti introdotti e velocizzare la fase di progettazione di uno scafo, sia per quanto riguarda la replica di un'imbarcazione già esistente sia nel caso del disegno di un nuovo scafo. La tesi presenta anche cinque appendici nelle quali vi sono approfondimenti riguardo la definizione delle

curve razionali di Bézier (Appendice A), la formulazione di curve di regressione per la valutazione delle curve di resistenza di una barca a vela (Appendice B), il metodo di Verifica e Validazione dei modelli numerici (Appendice C), l'utilizzo di VPP per il calcolo in forma chiusa delle forze agenti su una barca a vela in moto (Appendice D) ed infine le tavole relative al nuovo scafo trovato con il metodo proposto nella tesi (Appendice E).

# 1. Definizioni

Di seguito troviamo le definizioni dei principali termini che verranno usati nel testo e l'ordine scelto per la loro presentazione è alfabetico. Sono state divise in “generalì”, cioè presenti nel linguaggio comune sia dei progettisti che dei velisti, e in “tecniche”, cioè utilizzate principalmente dai progettisti.

## Definizioni Generali



Fig. 1 - Assonometria di uno SKIFF



*Fig. 2 - Modello CAD di uno SKIFF completo di alberatura, appendici e vele*

**Albero:** è una trave a sezione circolare/ellittica necessaria per sorreggere le vele.

**Balumina:** è il lato della vela posizionato nella parte più a poppa.

**Base:** è il lato della vela posizionato nella parte inferiore. In Fig. 2 la base della randa è indicata con “E” mentre la base del fiocco è indicata con “J”.

**Boma:** è una trave che si vincola all’albero ed è necessaria per regolare la randa. In Fig. 2 l’altezza del boma rispetto lo scafo è indicata con “BAS”.

**Bugna:** è l’angolo terminale di una vela posizionato nella parte più a poppa.

**Crocette:** sono degli elementi vincolati all'albero la cui funzione è quella di trasmettere le forze tra albero e sartie. La loro regolazione ha influenza sul modo di flettere dell'albero.

**Diagonali:** sono dei cavi di acciaio vincolati alla parte bassa dell'albero e nello scafo. Hanno il compito di controllare la flessione dell'albero nella parte bassa.

**Drizza:** è una cima necessaria per issare e ammainare le vele.

**Fiocco:** è la vela di prua di una barca. In Fig. 2 la sovrapposizione del fiocco è indicata con "LP" e il punto di attacco del fiocco sull'albero con "I".

**Gennaker:** è la vela di prua di una barca a vela che viene utilizzata nelle andature portanti. Il termine nasce dal sincretismo tra genoa e spinnaker. Differisce dallo spinnaker in quanto non è simmetrico.

**Inferitura:** è il lato della vela posizionato nella parte più a prua. In Fig. 2 l'inferitura della randa è indicata con "P".

**Mura:** è l'angolo terminale di una vela posizionato nella parte più a prua.

**Penna:** è l'angolo terminale di una vela posizionato nella parte più in alto.

**Poppa:** è la parte posteriore della barca.

**Prua:** è la parte anteriore della barca.

**Randa:** è la vela principale di una barca a vela.

**Sartie:** sono dei cavi vincolati all'albero e allo scafo. Queste passano attraverso le crocette e hanno il compito di opporsi al carico dello strallo, delle forze delle vele e del peso dell'equipaggio.

**Scotta:** è una cima necessaria per regolare le vele.



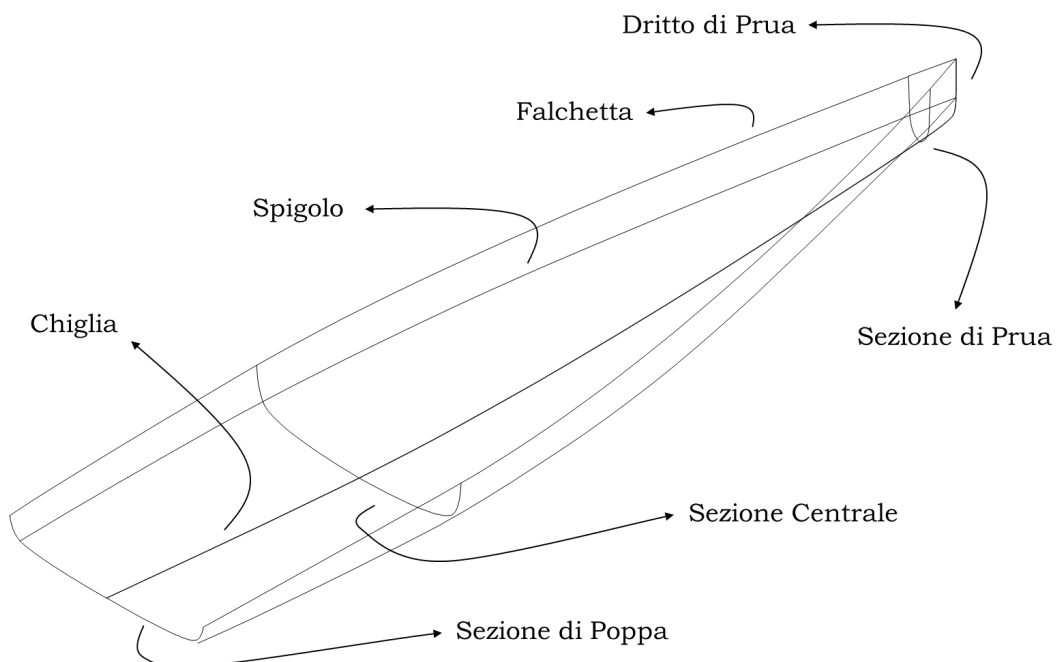
**Strallo:** è un cavo vincolato all'albero e allo scafo nella parte più a prua. Il suo compito è quello di mettere in tensione le sartie in maniera tale da rendere l'albero stabile.

**Terrazze:** è una struttura vincolata allo scafo che permette all'equipaggio di potersi muovere in zone in cui lo scafo non arriva. Il suo scopo è quello di permettere all'equipaggio di aumentare il momento raddrizzante.

**Trapezio:** sono dei cavi di acciaio vincolati all'albero e con un anello nella parte terminale bassa utilizzato dall'equipaggio per vincolarsi ad esso. Il trapezio permette all'equipaggio di aumentare il momento raddrizzante.

### **Definizioni Tecniche**

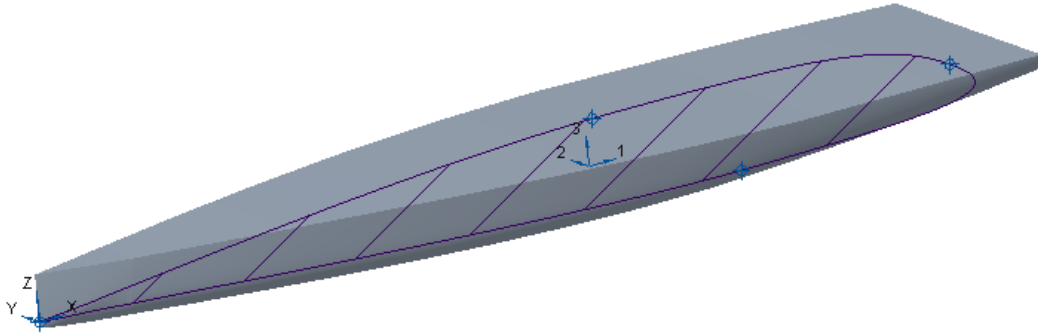
In Fig. 3 la rappresentazione grafica delle linee dello scafo, l'ordine scelto per la loro presentazione è alfabetico.



*Fig. 3 - Definizione delle principali linee di una barca a vela.*

**Altezza (D):** è la distanza tra il punto più profondo della barca e la linea di falchetta.

**Area piano d'acqua (A<sub>w</sub>):** si ottiene tagliando lo scafo con un piano parallelo al pelo libero e contenente la linea d'acqua al galleggiamento, Fig. 4.



*Fig. 4 - Area piano d'acqua di una barca a vela.*

**Centro di Galleggiamento / Longitudinal Center of Buoyancy (LCB):** è il centro di gravità della sola parte immersa della barca.

**Centro di Gravità / Longitudinal Center of Gravity (LCG):** è il centro di gravità della barca e deve trovarsi sulla stessa verticale del centro di galleggiamento.

**Falchetta:** è una linea libera nello spazio che definisce la parte superiore dello scafo.

**Froude Number:** è un numero adimensionale dato dal rapporto tra le forze d'inerzia e le forza peso, definito dall'Eq.

$$Fr = \frac{V_0}{\sqrt{gL_0}} \quad (1)$$

Dove  $V_0$  è una velocità di riferimento [m/s],  $g$  è l'accelerazione di gravità [m/s<sup>2</sup>], e  $L_0$  è una lunghezza di riferimento [m].

**Larghezza / Beam (B o B<sub>MAX</sub>):** è la massima larghezza della barca.

**Larghezza linea d'acqua / Beam of Water Line ( $B_{WL}$ ):** è la massima larghezza della linea d'acqua.

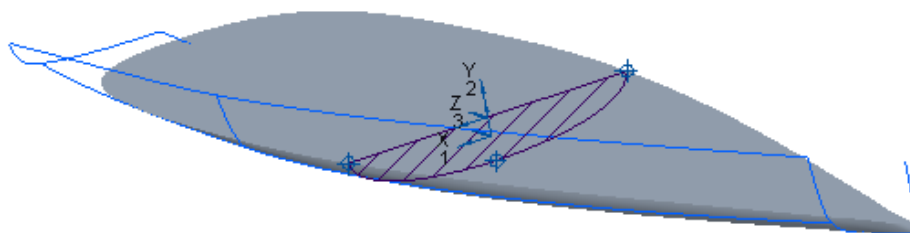
**Linea di Chiglia:** si ottiene tagliando lo scafo con un piano perpendicolare al pelo libero e contenente l'asse longitudinale dello scafo.

**Lunghezza fuori tutto / Length Over All ( $L_{OA}$ ):** è la massima lunghezza dell'imbarcazione dal punto più estremo della prua fino all'estremo di poppa.

**Lunghezza linea d'acqua / Length of Water Line ( $L_{WL}$ ):** è la lunghezza prua-poppa della linea d'acqua.

**Lunghezza tra le perpendicolari ( $L_{PP}$ ):** è la lunghezza tra la perpendicolare di prua, che si trova in corrispondenza dell'estremità della linea d'acqua a prua, e la perpendicolare di poppa, che si trova in corrispondenza dell'estremità della linea d'acqua di poppa.

**Massima area trasversale ( $A_x$ ):** è la massima area che si può ottenere intersecando lo scafo con un piano perpendicolare al pelo libero dell'acqua e avente per normale l'asse longitudinale dello scafo, Fig. 5.



*Fig. 5 - Massima area trasversale di una barca a vela.*

**Pescaggio ( $T$ ):** è la distanza tra la linea d'acqua e il punto più profondo della barca.

**Reynolds Number:** è un numero adimensionale dato dal rapporto tra le forze d'inerzia e le forze viscosi, definito dall'Eq.

$$Re = \frac{uL}{\nu} \quad (2)$$

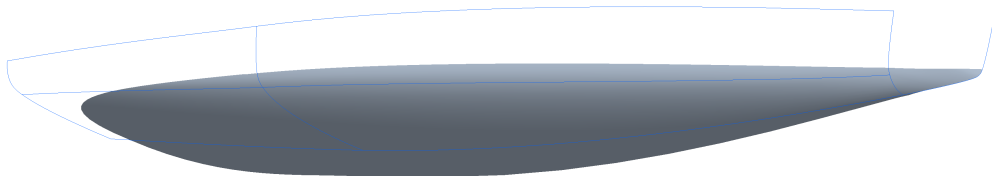
Dove  $u$  è la velocità del flusso [m/s],  $L$  è la lunghezza caratteristica, nel caso di un profilo alare la lunghezza della sua corda [m], e  $\nu$  è la diffusività cinematica [m<sup>2</sup>/s].

**Sezione:** si ottiene tagliando lo scafo con un piano perpendicolare al pelo libero e avente per normale l'asse longitudinale dello scafo.

**Spigolo:** è una curva libera nello spazio che corre dalla prua alla poppa. Nelle barche con spigolo vi è una discontinuità di ordine G1 in corrispondenza di tale curva, nelle barche tondeggianti vi è continuità di ordine G2 anche in corrispondenza di questa curva.

**Superficie bagnata (Sc):** è la superficie della parte immersa dello scafo della barca.

**Volume (V):** è il volume della parte immersa della barca, Fig. 6.



*Fig. 6 - Volume immerso di una barca a vela.*

### **Andature**

In Fig. 7 sono presentate le possibili andature di una barca a vela nelle mura a dritta e mura a sinistra.

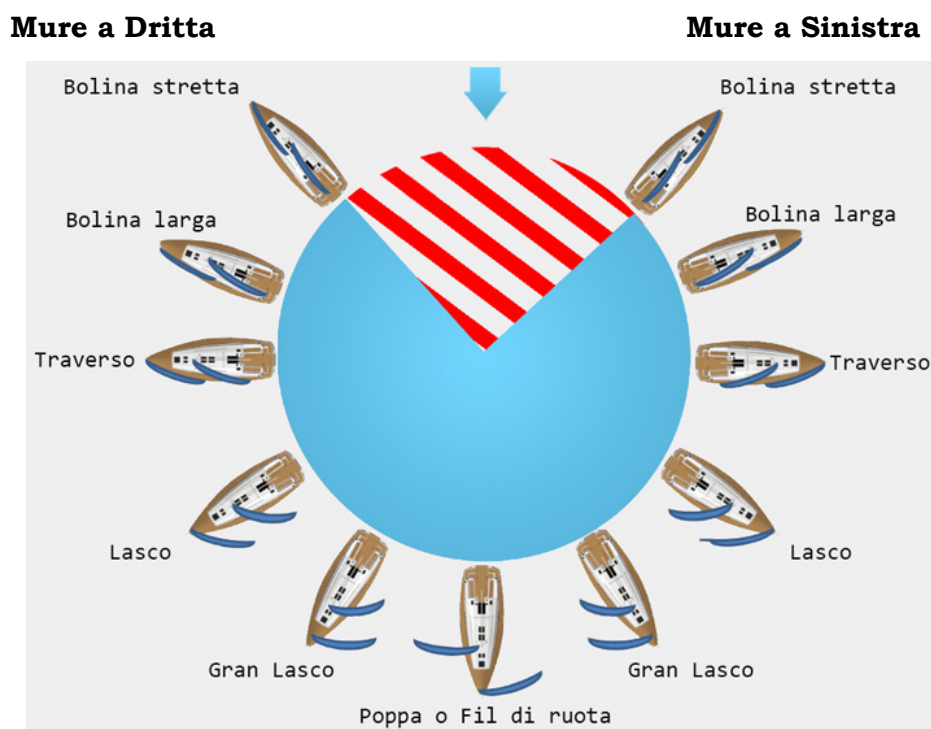


Fig. 7 - Le andature di una barca a vela.

**Mure a Dritta:** una barca procede mura a dritta quando il vento incide nella fiancata destra dello scafo. In queste condizioni si ha precedenza sulle barche nelle altre mura.

**Mure a Sinistra:** una barca procede mura a sinistra quando il vento incide nella fiancata sinistra dello scafo. In queste condizioni si deve dare precedenza alle barche nelle altre mura.

**Bolina:** è l'andatura a vela più prossima alla direzione del vento, tipici angoli tra la direzione del vento e la direzione della barca sono compresi tra  $30^\circ$  e  $60^\circ$ .

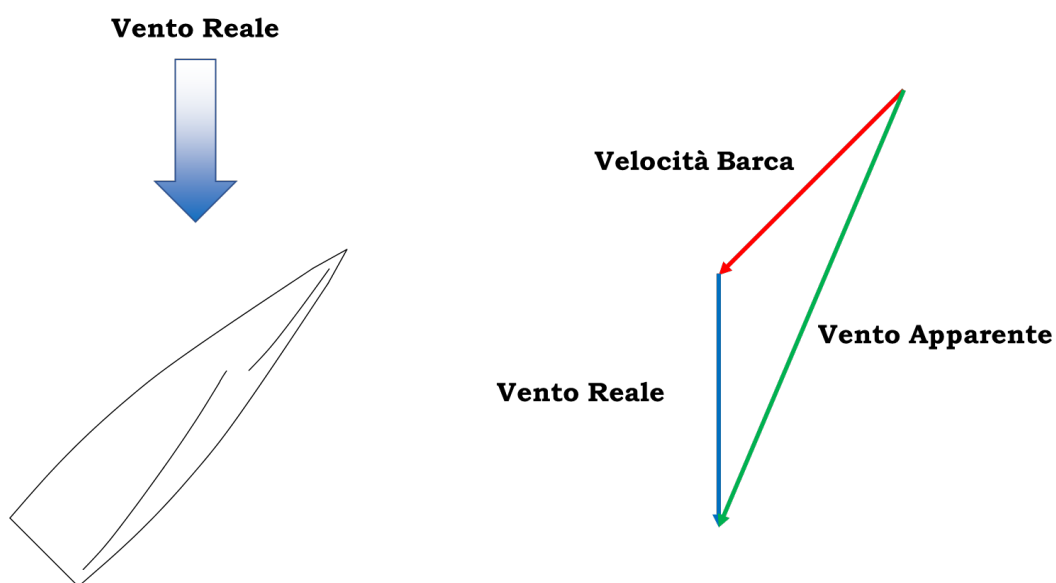
**Traverso:** la direzione della barca e la direzione del vento formano un angolo di  $90^\circ$ .

**Lasco:** la direzione della barca e la direzione del vento formano un angolo compreso tra  $120^\circ$  e  $160^\circ$ .

**Poppa:** è l'andatura a vela più lontana alla direzione del vento, angoli tipici variano tra  $150^\circ$  e  $180^\circ$ .

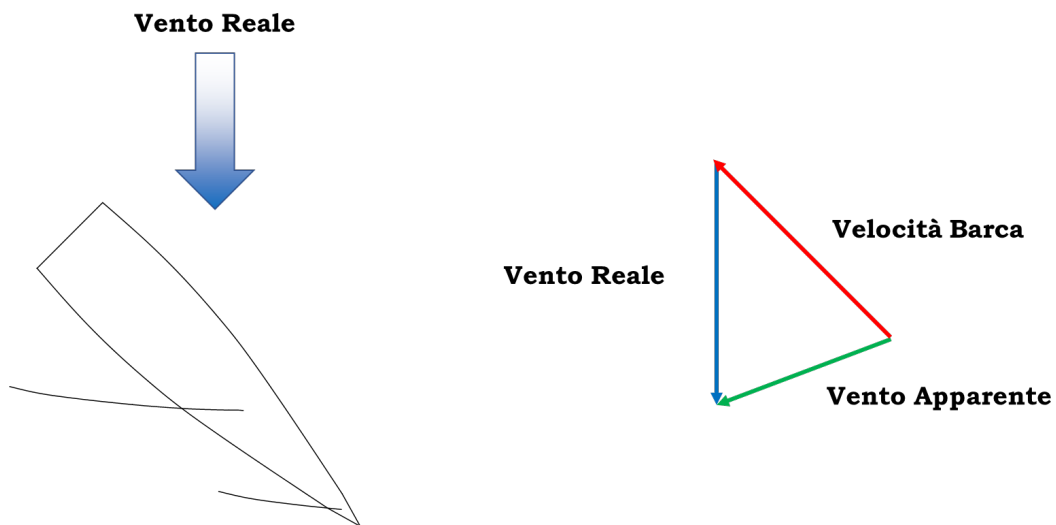
## **Triangolo delle Velocità**

Come già accennato una barca a vela si può muovere in quasi tutte le direzioni, solitamente non è possibile navigare con un angolo al vento inferiore ai 30°. Quando una barca naviga oltre a considerare la velocità e la direzione del vento, anche chiamato vento reale, bisogna tenere in considerazione altri due fattori: la velocità della barca e il cosiddetto vento apparente. Al fine di rendere più chiara la comprensione di come si definisce il vento apparente introduciamo il triangolo delle velocità, il quale esprime semplicemente la somma vettoriale del vettore vento reale e della velocità della barca. In Fig. 8 è mostrato il triangolo di velocità di una barca di bolina mura a sinistra.



*Fig. 8 - Triangolo delle velocità di una barca di bolina.*

Come è possibile notare dalla precedente figura, il vento apparente di bolina risulta essere ruotato di un certo angolo rispetto al vento reale ed anche il suo valore in modulo risulta essere differente, in particolare maggiore. Grazie a tale fenomeno le barche a vela più performanti riescono a raggiungere velocità pari o superiori al vento reale. In Fig. 9 è mostrato il triangolo delle velocità di una barca a vela che naviga al lasco.



*Fig. 9 - Triangolo delle velocità di una barca di lasco.*

Simili considerazioni si possono trarre per una barca che procede al lasco e quindi con angoli al vento superiori a  $90^\circ$ . In questo caso la velocità della barca gioca a sfavore della somma vettoriale risultando in un vettore di modulo ridotto rispetto al vento reale, inoltre in questo caso l'angolo che si forma tra il vento reale e il vento apparente è più ampio del caso di bolina.

### **Percorsi di Regata**

Non tutte le barche a vela nascono per competere nelle regate ma essendo argomento di questa tesi le imbarcazioni da competizione, è importante comprendere quali sono i più comuni percorsi di regata e come questi possano influenzare gli aspetti di progettazione. Iniziamo con la distinzione più significativa, le regate off-shore e le regate in-shore. Le due categorie di regate si distinguono principalmente per la durata e per la distanza da percorrere. Nelle regate off-shore si stabilisce un punto di partenza e un punto di arrivo situati a distanze geografiche considerevoli, alcuni esempi possono essere la Palermo-Montecarlo, la Middle Sea Race o la Giraglia per citarne alcune delle più importanti nel Mediterraneo o ancora la Vendée Globe che consiste nel giro del

mondo in solitario senza scalo su di una barca a vela. Come è possibile notare in Fig. 10, essendo la distanza tra partenza e arrivo molto lontani le imbarcazioni possono alternare tutte le andature durante il trasferimento da un punto al successivo; le manovre non sono molto frequenti e durando diversi giorni bisogna prevedere luoghi utili al riposo e alla preparazione dei pasti.

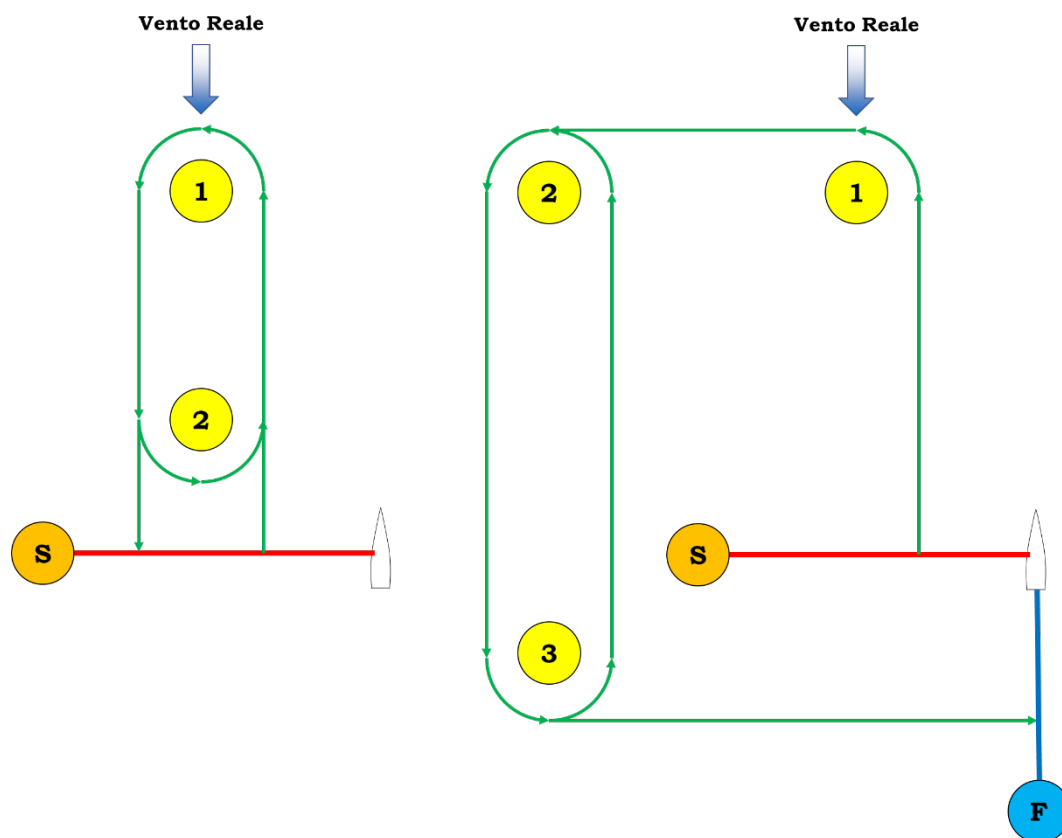


*Fig. 10 - Il percorso della Palermo-Montecarlo*

Diversamente dalle regate off-shore, le regate in-shore hanno breve durata e le distanze da percorrere sono relativamente brevi, generalmente dell'ordine di qualche miglio nautico. In Fig. 11 sono mostrati due esempi di percorsi comunemente impiegati nelle regate in-shore, il percorso a bastone, a sinistra, in cui le imbarcazioni dopo aver tagliato la linea di partenza, mostrata con la linea rossa, girano le boe nella sequenza 1-2-1, le barche procedono sempre o di bolina o di poppa. Sempre in Fig. 11 è mostrato a destra il percorso a quadrilatero in cui la sequenza in cui vengono girate le boe dopo la partenza è 1-2-3-2-3. In questo secondo percorso le andature sono in ordine bolina, lasco, poppa, bolina, poppa, traverso. Come si può immaginare in questo



secondo percorso il progettista non si deve limitare ad ottimizzare la barca per le andature di bolina e poppa ma deve tener conto di un più ampio ventaglio di andature.



*Fig. 11 - Tipici percorsi di regata in-shore, a sinistra un percorso a bastone e a destra un percorso a quadrilatero.*

## 2. Equilibrio Aero/Idrodinamico

### Le Forze in Gioco

La progettazione di una barca a vela è una vera e propria sfida. A sostegno di questa affermazione possiamo richiamare alcune parole tratte da uno tra i più importanti libri che discutono di nautica, “La Fisica della Vela” (Garrett, R, 1990). Nel suo libro, Garrett, afferma che la comprensione del movimento e del comportamento di una barca a vela è molto meno intuitiva di quella di una automobile da corsa, anche se questa sembra più complicata. Il moto di una barca a vela si basa sulla simmetria delle forze aerodinamiche, agenti principalmente sulle vele, e delle forze idrodinamiche, agenti nell’opera viva dello scafo (la parte di scafo immersa in acqua). In Eq.(3) sono presentate le formule per il calcolo dell’equilibrio delle forze e dei momenti.

$$\begin{aligned}\sum F &= F_H + F_K + F_R + F_S = w_C + W_Y \\ \sum M &= M_H + M_K + M_R + M_S = M_C\end{aligned}\tag{3}$$

Dove H (Hull) rappresenta lo scafo, K (Keel) la chiglia, R (Rudder) il timone, S (Sails) le vele, C (Crew) l’equipaggio e Y (Yacht) la barca. In particolare, nella prima delle Eq. (3) troviamo l’equilibrio delle forze, nella seconda equazione delle Eq. (3) troviamo l’equilibrio dei momenti. Dall’equilibrio di questi due sistemi di forze nasce il moto di una barca a vela, in Fig. 12 è mostrato lo schema delle forze agenti in uno scafo in movimento.

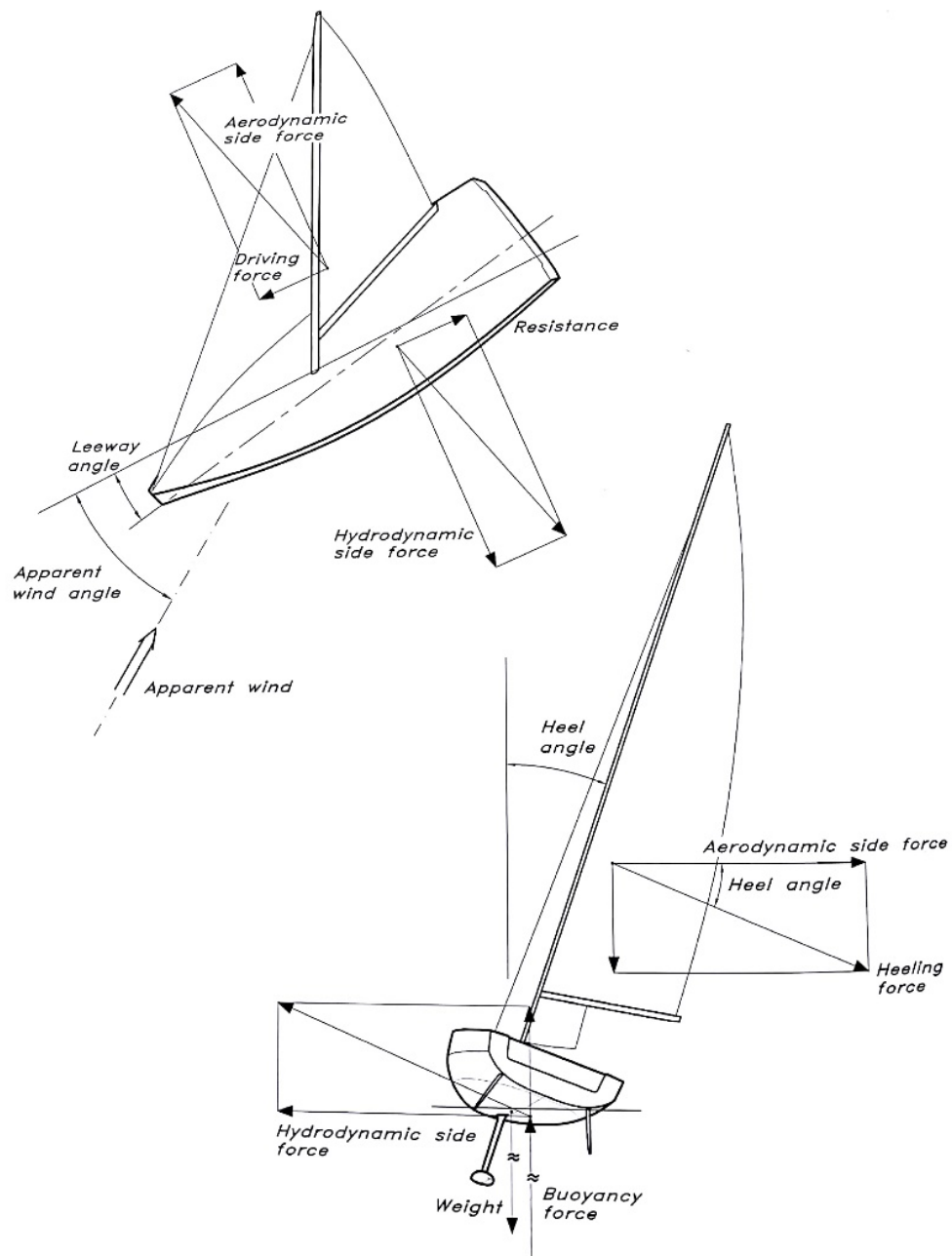


Fig. 12 - Schema dell'equilibrio Aero/Idrodinamico di una barca a vela (Larsson et al, 2014).

### **La Simmetria della Vela**

Perché le forze aerodinamiche e quelle idrodinamiche dovrebbero essere esattamente uguali e opposte? Dipende dalla simmetria delle forze in gioco nelle barche a vela. Per comprendere fino in

fondo come si creano e come si orientano tali sistemi di forze possiamo citare (Garrett, R, 1990):

*“Immaginiamo di armare il fiocco e la randa e di regolarle tenendo però la barca ormeggiata al molo con delle cime. La barca non può muoversi rispetto all’acqua ma si muove rispetto al vento, la forza generata dalle vele viene bilanciata dalle cime. Se tagliamo improvvisamente le cime, in quell’istante sulla barca agisce una sola forza, quella prodotta dal vento. Questa forza è principalmente laterale, per cui la barca inizialmente viene spinta di lato. A questo punto, nell’acqua si formano dei grandi vortici, in quanto la chiglia e il timone sono trascinati lateralmente nell’acqua. Questo movimento dà luogo a delle forze idrodinamiche. La chiglia agisce come una vela troppo cazzata al lasco; anche se risulta insufficiente, esiste una componente di questa forza che sommata a quella prodotta dalle vele, oltre ad opporsi alla forza laterale del vento dà luogo ad una spinta verso prua. La barca ora si sta muovendo sia lateralmente sia verso prua e l’angolo di incidenza dell’acqua sulla chiglia diminuisce. Essa diventa man mano una superficie idrodinamica sempre più efficiente, così come avviene quando al lasco si lasca la randa, riducendo la forza sbandante e incrementando la spinta propulsiva. Fino a quando la forza aerodinamica e quella idrodinamica non sono allineate, esiste una forza diretta verso prua che accelera la barca. Man mano che la barca acquista velocità, la forza prodotta dalla chiglia ruota fino ad opporsi direttamente alla forza delle vele. Alla fine, quando risultano uguali e opposte, la risultante diventa nulla. Questa condizione si ha solo quando la barca si muove.”*

Abbiamo visto come si creano le forze che agiscono su una barca a vela in movimento, e si è quindi compreso come il risultato prodotto dell’azione del vento sulle vele equivale a dare solo metà della risposta. La barca, essendo parzialmente immersa in

entrambi i mezzi, è capace di sfruttare questo moto relativo in un moto suo proprio in quasi ogni direzione. Quando si procede di bolina, si risale il vento, la forza prodotta dalle vele è dovuta a un flusso d'aria che incide con un angolo di circa  $30^\circ$  con il boma. Se non c'è moto relativo fra aria e vela non si produce alcuna forza, allo stesso modo se la barca non si muove rispetto all'acqua, la chiglia e lo scafo non producono forze. La forza idrodinamica è presente solamente se la barca si muove rispetto all'acqua. Le forze idro e aerodinamiche possono essere uguali e opposte in quanto la barca si muove relativamente all'aria e all'acqua. La chiglia e l'opera viva della barca, essendo simmetriche, devono muoversi con il flusso incidente a qualche grado rispetto all'asse per produrre forza laterale. Quest'angolo viene detto angolo di scarroccio; senza scarroccio non è possibile navigare controvento, perché non ci sarebbe forza laterale da opporre a quella prodotta dal vento e la barca sarebbe trascinata semplicemente nella direzione del vento. Questo "difetto" della barca a vela è ciò che rende possibile l'avanzamento controvento.

### **3. Progettazione Nautica**

#### **Approccio al Problema**

Nella progettazione nautica vi sono moltissime variabili da considerare e la ripetibilità degli esperimenti, in condizioni di vera navigazione, è praticamente impossibile da raggiungere in quanto legata alle condizioni meteo-marine in continuo mutamento come anche ci suggerisce l'esperienza quotidiana di tutti noi. Il fascino della vela però è legato a doppio filo con tale aleatorietà in quanto i progettisti si devono affidare in larga misura alle proprie intuizioni e soprattutto alla propria esperienza ma anche a quella dei velisti professionisti cui si rivolgono per ricevere quante più informazioni riguardo le sensazioni che un determinato scafo gli suggerisce durante la navigazione. Di fianco agli esperimenti sul campo, è ormai pratica consolidata affidare al campo numerico la campagna sperimentale creando modelli numerici, opportunamente tarati e validati, al fine di controllare al meglio le condizioni al contorno e comprendere come una, anche piccola, modifica possa avere effetti rilevanti sulle performance dei diversi disegni proposti. Al fine di procedere con ordine nell'affrontare un problema complesso, quanto quello della progettazione di una barca a vela, è fondamentale seguire un metodo rigoroso nel quale si faccia riferimento a tutti gli aspetti più importanti da considerare ma anche che si utilizzino strumenti efficaci per riuscire ad avere un sufficiente controllo sulla geometria dello scafo e di tutti gli elementi che ad esso sono vincolati. Uno dei maggiori riferimenti presenti in bibliografia nel campo del disegno nautico è sicuramente rappresentato dal libro "Principles of Yacht Design" (Larsson et al., 2014) la cui prima edizione risale al 1994. Larsson nel suo libro ha avuto il merito di riuscire a raccogliere e uniformare le procedure e i requisiti necessari per ottenere un

buon disegno nautico. Ancor oggi il disegno di un nuovo scafo passa dal processo “trial and error” e questo, se non affrontato con un approccio puramente scientifico e ingegneristico può condurre il progettista verso un incredibile costo, in termini di tempo, da dover spendere per arrivare a un risultato concreto. In “Principles of Yacht Design”, viene definito il metodo a spirale, Fig. 13, mediante il quale il progettista percorre diverse volte undici fasi, avvicinandosi sempre più al centro ottenendo quindi ad ogni giro un disegno più prossimo alla versione finale.

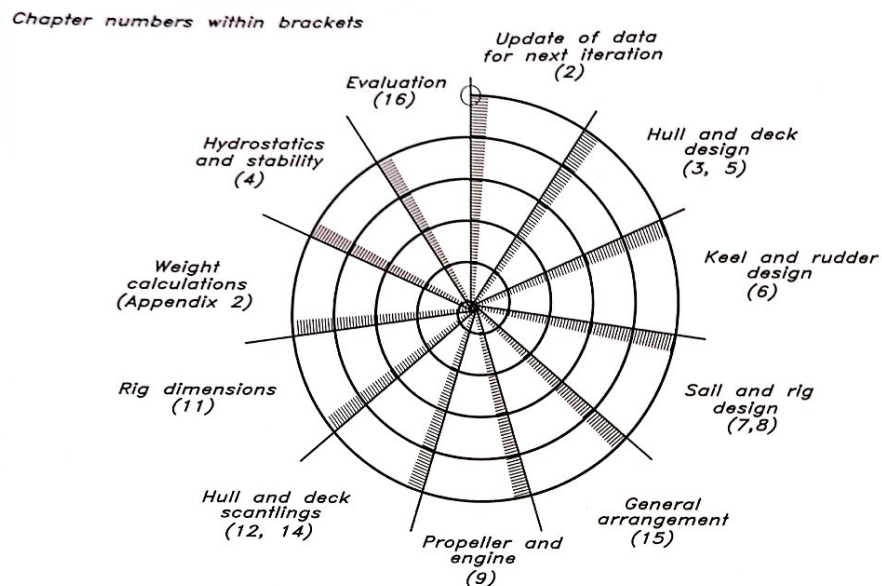
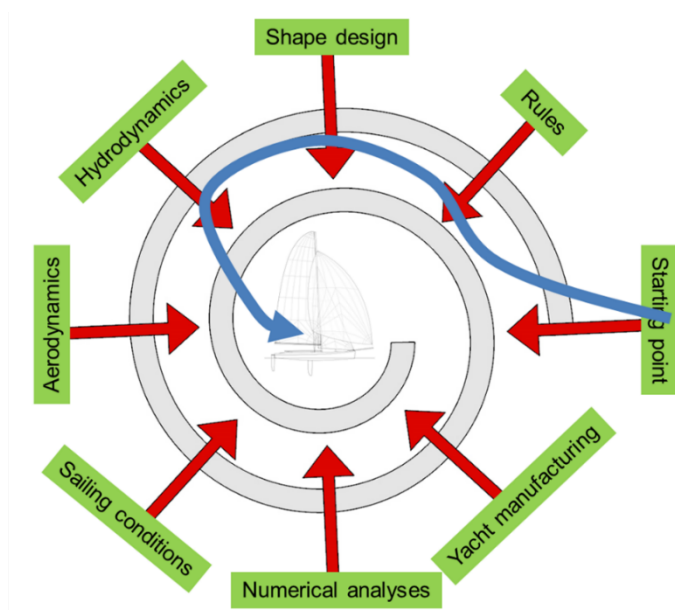


Fig. 13 - Spirale di progettazione nautica (Larsson et al., 2014).

Tale approccio consente al progettista di affrontare il problema in maniera completa senza tralasciare nessun aspetto. Di fianco al lavoro di (Larsson et al., 2014), possiamo trovare numerosi contributi tra cui Sailing Yacht Design (Claughton et al., 1998) e Aero-Hydrodynamics and the Performance of Sailing Yachts (Fossati, 2009). L’obiettivo che molti ricercatori ed esperti progettisti si stanno ponendo è proprio quello di fare un ulteriore passo in avanti riguardo l’approccio del disegno nautico al fine di rompere gli schemi esistenti e di tagliare le linee della spirale in maniera tale da raggiungere il disegno finale in maniera ancor più

rapida e valutando un più ampio raggio di possibili soluzioni, come mostrato in Fig. 14.



*Fig. 14 - Spirale di progettazione ottimizzata.*

Quando si approccia al disegno nautico bisogna, in primo luogo, effettuare alcune scelte per iniziare a dare una direzione al proprio lavoro essendo il campo della progettazione nautica molto vasto e differente a seconda dell'uso che si intende fare dell'imbarcazione. Non è pensabile applicare le stesse idee e fissare gli stessi obiettivi di progettazione per due barche che devono essere impiegate per scopi completamente diversi. Per fare alcuni esempi, la progettazione di una barca di piccole dimensioni, che nel mondo della nautica prende il nome di deriva/dinghy, è completamente diversa da una barca di grandi dimensioni, che prende il nome di "cabinato", che viene impiegata per trascorrere le vacanze o anche per competere in regate costiere ma anche in mare aperto. Allo stesso modo, all'interno delle due categorie è necessario individuare almeno tre grandi famiglie: le barche progettate per le regate (competizioni sportive); le barche per uso puramente ricreativo, cioè per la crociera estiva; ed infine troviamo una categoria ibrida cioè barche a vela pensate per avere buone



performance ma che non siano troppo estreme consentendo agli armatori di utilizzarle per trascorrere le vacanze ma rimanendo divertenti durante le veleggiate. I principali parametri e coefficienti impiegati nella progettazione nautica permettono ai progettisti più esperti di collocare un determinato disegno in una famiglia di barche che ottiene performance migliori a seconda delle condizioni al contorno cui essa è soggetta. Bisogna comunque considerare che i valori e i range di variazione da selezionare non sono di facile comprensione per chi affronta il disegno nautico da un punto di vista amatoriale e per comprenderne a fondo il significato sono necessari anni di esperienza nel settore. I principali parametri e coefficienti impiegati nel disegno nautico dai progettisti sono qui elencati:

- **Volume ( $V_c$ ):** è il volume della parte immersa dello scafo e coincide con il dislocamento dell'imbarcazione.
- **LCB:** Centro longitudinale di carena. Rappresenta il punto di applicazione di tutte le forze sull'opera viva dello scafo.
- **$S_c$ :** è la superficie bagnata dello scafo.
- **$L_{WL}$ :** è la lunghezza prua-poppa della linea d'acqua.
- **$B_{WL}$ :** è la larghezza della linea d'acqua.
- **$A_w$ :** è l'area che si ottiene tagliando lo scafo con un piano coincidente con il pelo libero dell'acqua.
- **LCF:** Centro longitudinale della figura al galleggiamento. Rappresenta il centro di rotazione dell'opera viva dello scafo.

- **T<sub>c</sub>**: è il pescaggio e coincide con la profondità della parte immersa dell'imbarcazione.
- **A<sub>x</sub>**: è la massima area trasversale considerando la parte immersa dello scafo. Si ottiene tagliando la parte immersa dello scafo con un piano ortogonale al pelo libero dell'acqua e avente come normale l'asse longitudinale dello scafo.
- **Prismatic coefficient (C<sub>P</sub>)**: è il rapporto tra il volume (V) e la massima area trasversale (A<sub>X</sub>) moltiplicata per la lunghezza della linea d'acqua (L<sub>WL</sub>), come mostrato nell'Eq.(4).

$$C_P = \frac{V}{A_X L_{WL}} \quad (4)$$

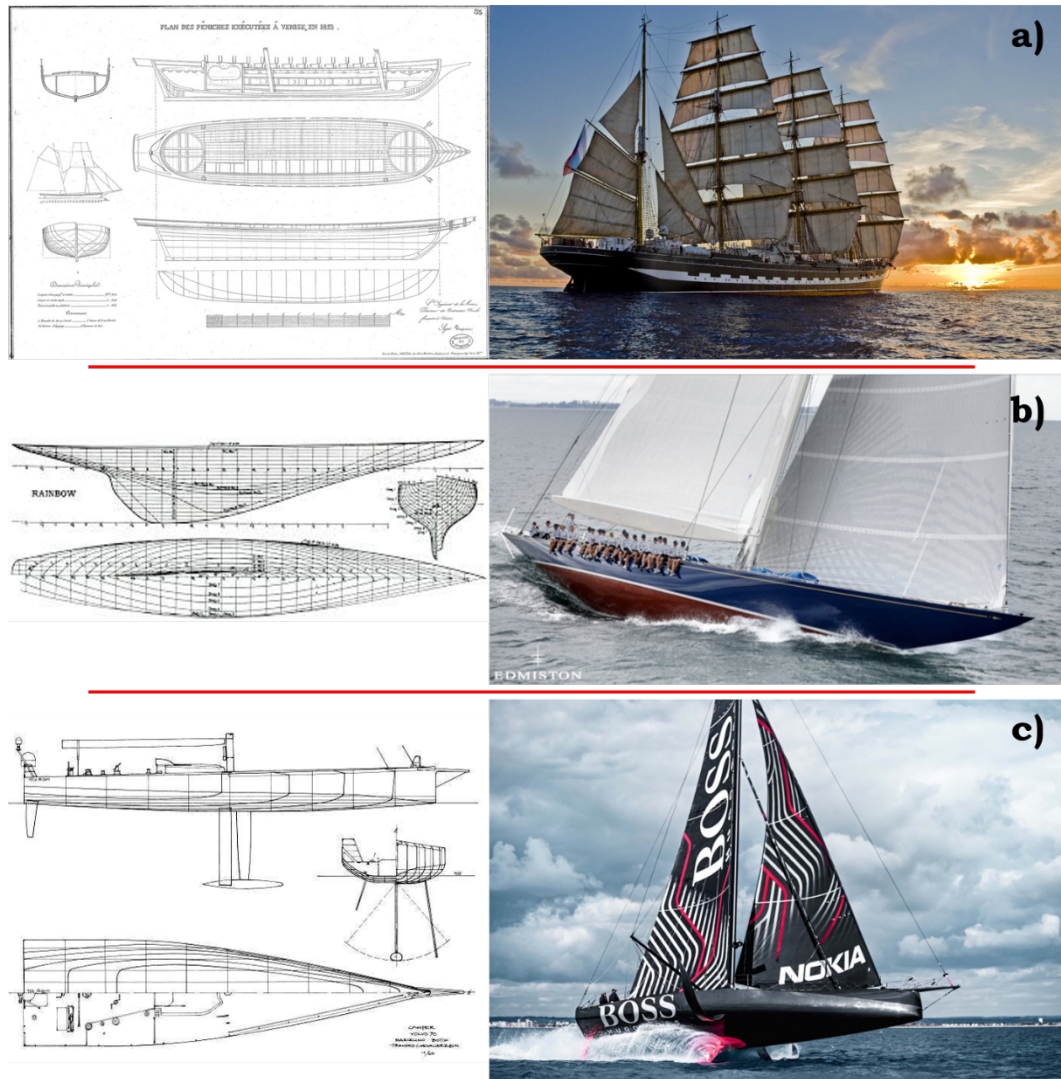
Il valore del C<sub>P</sub> è indice della pienezza delle estremità dell'imbarcazione; più è alto il suo valore più le estremità saranno piene. Il valore ottimo dipende fortemente dalla velocità di progetto dell'imbarcazione. I valori tipicamente variano da 0.5, per condizioni di bolina con poco vento, fino a 0.70, per condizioni di poppa con vento teso.

- **Midship section coefficient (C<sub>M</sub>)**: è il rapporto tra la massima area trasversale (A<sub>X</sub>) e il prodotto tra la larghezza al galleggiamento (B<sub>WL</sub>) e il pescaggio (T<sub>C</sub>), come mostrato nell'Eq.(5).

$$C_M = \frac{A_X}{B_{WL} T_C} \quad (5)$$

## **CAD – Computer Aided Design**

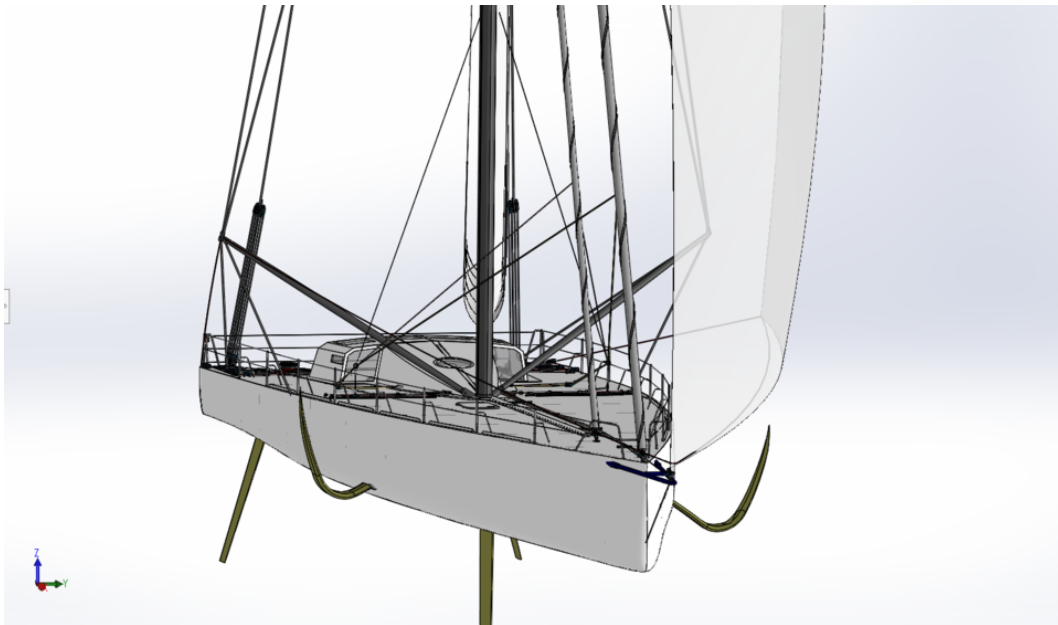
In Fig. 15 sono presentati i piani di costruzione e le immagini relative a tre imbarcazioni molto diverse tra loro ed appartenenti ad epoche molto distanti nel tempo.



*Fig. 15 - Disegni e immagini di un galeone (a), di un J Class (b) e di un Imoca 60 (c).*

Da questi tre esempi si può comprendere come il disegno nautico sia cambiato nel corso del tempo in termini di soluzioni geometriche e tecnologiche ma che una cosa si sia conservata, l'utilizzo dei piani di costruzione. Ad oggi questi rimangono centrali nelle fasi di progettazione e sono fondamentali per disegnare un

nuovo scafo o per ricostruirne uno esistente. Ciò che è cambiato nel tempo sono gli strumenti che permettono al progettista di disegnarli e di valutarli. Se per disegnare un galeone si faceva uso di carta e matita, oggi per disegnare un Imoca 60 si fa certamente uso di un software di CAD, come si può osservare nell'esempio di Fig. 16.

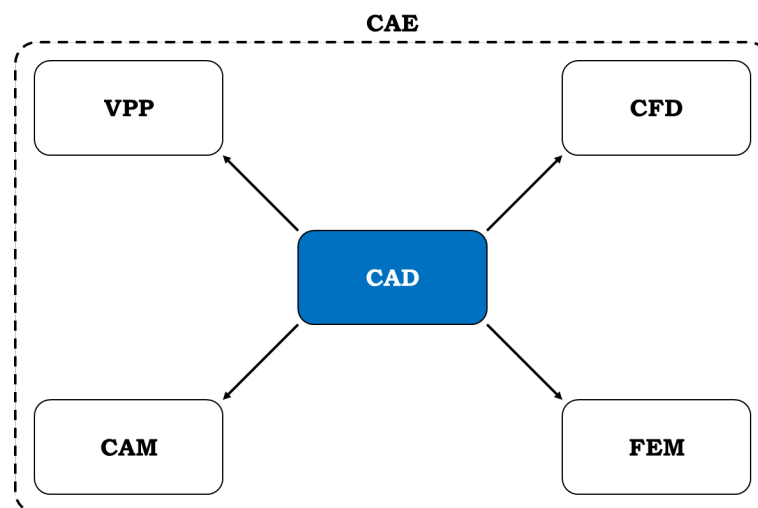


*Fig. 16 - CAD di un Imoca 60*

Inoltre, è possibile osservare come diverse scelte in termini di geometrie dello scafo siano più o meno indicate per ottenere elevate performance in date condizioni di navigazione. Se si ricerca uno scafo che sia in grado di sfruttare al massimo le proprie caratteristiche in condizioni di bolina sicuramente si ricercherà uno scafo stretto e lungo come quello mostrato in Fig. 15 (b) che è caratterizzato da valori del coefficiente prismatico molto bassi. Al contrario se si vuole una barca altamente performante nelle andature di poppa il progettista si orienterà verso bassi pescaggi e alti valori del coefficiente prismatico; pertanto, un disegno indicato per tali condizioni è quello mostrato in Fig. 15 (c).

Oggi la progettazione di barche a vela sta vivendo un momento di grande evoluzione grazie alle sempre crescenti potenze di calcolo a disposizione dei progettisti ma anche, e soprattutto, agli studi su nuovi materiali, metodi di progettazione e realizzazione del prodotto finito. Potenze di calcolo maggiori hanno permesso ai progettisti di passare da modelli analitici molto semplificati fino a modelli molto più accurati ed avanzati ottenuti mediante software che rientrano in diverse categorie quali, FEM (Finite Element Method), CFD (Computational Fluid Dynamics), VPP (Velocity Prediction Program), TO (Topology Optimization), per citarne alcuni.

Tutti questi metodi numerici richiedono un CAD (Computer Aided Design) che dovrà essere versatile, robusto e accurato. L'insieme e l'integrazione in generale di tutti questi strumenti viene chiamato ambiente CAE (Computer Aided Engineering) dove più esigenze progettuali sono gestite ed elaborate in modo condiviso. Come mostrato in Fig. 17, la progettazione di una barca a vela non si ferma alla sola geometria da attribuire allo scafo ma consta di numerosi aspetti.



*Fig. 17 – Ambiente CAE (Computer Aided Engineering)*

Ognuno di questi ricopre un ruolo di estrema importanza per quanto riguarda il prodotto finale ed effettuare uno studio completo

di tutte le caratteristiche e possibili combinazioni dei parametri che definiscono tali problemi risulta essere già questo un lavoro che necessita un'impostazione ingegneristica. In tale senso è possibile trovare in letteratura studi come quelli condotti da Khan (Khan et al., 2017, Khan et al., 2019) in cui viene presentato un innovativo approccio, denominato GenYacht, il cui scopo è quello di creare forme di scafo ottimali mettendo al centro del processo il progettista che tramite un sistema ibrido generativo-interattivo può dar forma a una grande varietà di scafi; questi vengono analizzati fino a quando si raggiunge un risultato soddisfacente considerando i vincoli e le preferenze imposte a monte dell'analisi dallo stesso progettista. Precedentemente a Khan, diversi altri ricercatori hanno affrontato il problema fornendo interessanti soluzioni (Calkins et al., 2001, Pérez-Arribas, 2014, Mancuso, 2006 and Pérez et al., 2008) ognuno di questi con un focus specifico all'interno del vasto mondo delle categorie di geometrie degli scafi. In (Calkins et al., 2001) viene presentato un metodo di progettazione definito per mezzo di un certo numero di curve polinomiali utilizzate per modellare piccole imbarcazioni a motore prevalentemente plananti, scafi progettati per alte velocità, quindi le soluzioni indagate in questo studio sono scafi dotati sempre di spigolo. In (Pérez-Arribas, 2014) il target è ancora una volta quello degli scafi plananti con spigolo. Qui lo scafo è definito mediante curve B-Spline basate sui vincoli imposti dal progettista. Le curve sono tutte costruite considerando le loro proiezioni nei tre piani ortogonali. In (Mancuso, 2006) viene presentata una tecnica di ottimizzazione basata su un algoritmo che sfrutta il metodo del gradiente. In questo lavoro vi è un interesse maggiore verso le carene tondeggianti, in assenza di spigolo, in quanto il target è rivolto alle imbarcazioni a vela e non a motoscafi. Sono scelte superfici B-Spline al fine di modellare la parte immersa dello scafo e il disegno di questa è definita a partire dalle principali caratteristiche

geometriche e da un set di coefficienti adimensionali di comune uso in ambito di progettazione nautica. In (Pérez et al., 2008) viene presentato un ulteriore approccio per la modellazione di scafi utilizzando curve B-Spline; in particolare la geometria che si ricerca viene guidata dalla scelta di determinate caratteristiche fluidodinamiche imposte dal progettista.

### **VPP – Velocity Prediction Programs**

I Velocity Prediction Programs, sono impiegati in maniera estensiva nella pratica del disegno nautico. Tali programmi sono in grado di prevedere la velocità, lo sbandamento, l'angolo di scarroccio e molti altri parametri necessari per valutare le performance di una barca a vela (Larsson et al., 2014). La maggior parte dei VPP si basa sulla campagna sperimentale condotta dal gruppo di ricerca di TU Delft University of Technology. Il principio alla base dei VPP consiste nel risolvere le equazioni del moto di una barca a vela nei sei gradi di libertà. In altre parole, si ricercano le posizioni di equilibrio possibili per diverse condizioni di moto dell'imbarcazione. Esistono molti modelli, dai più semplici che si limitano alla soluzione di solo tre delle sei equazioni del moto, a VPP che riescono a gestirle tutte, fino ai più moderni programmi di predizione che tengono in conto le azioni dinamiche, VPP dinamici, o con l'emergere del fenomeno del foiling, di VPP ottimizzati per controllare il comportamento e le performance di questo tipo di nuova generazione di scafi.

In Appendice B, è presentato in dettaglio il metodo adottato in questa tesi (Keuning e Katgert, 2008) per il calcolo delle curve di resistenza di barche a vela. In tale studio sono stati analizzati 70 modelli in diverse condizioni di navigazione, ( $Fr$  da 0.15 a 0.75), al fine di basare le formule presentate su una solida campagna sperimentale. Oltre al calcolo delle curve di resistenza sono

presenti anche VPP in grado di determinare le curve polari di una imbarcazione; in Fig. 18 è mostrato un esempio con riferimento ad un Optimist.

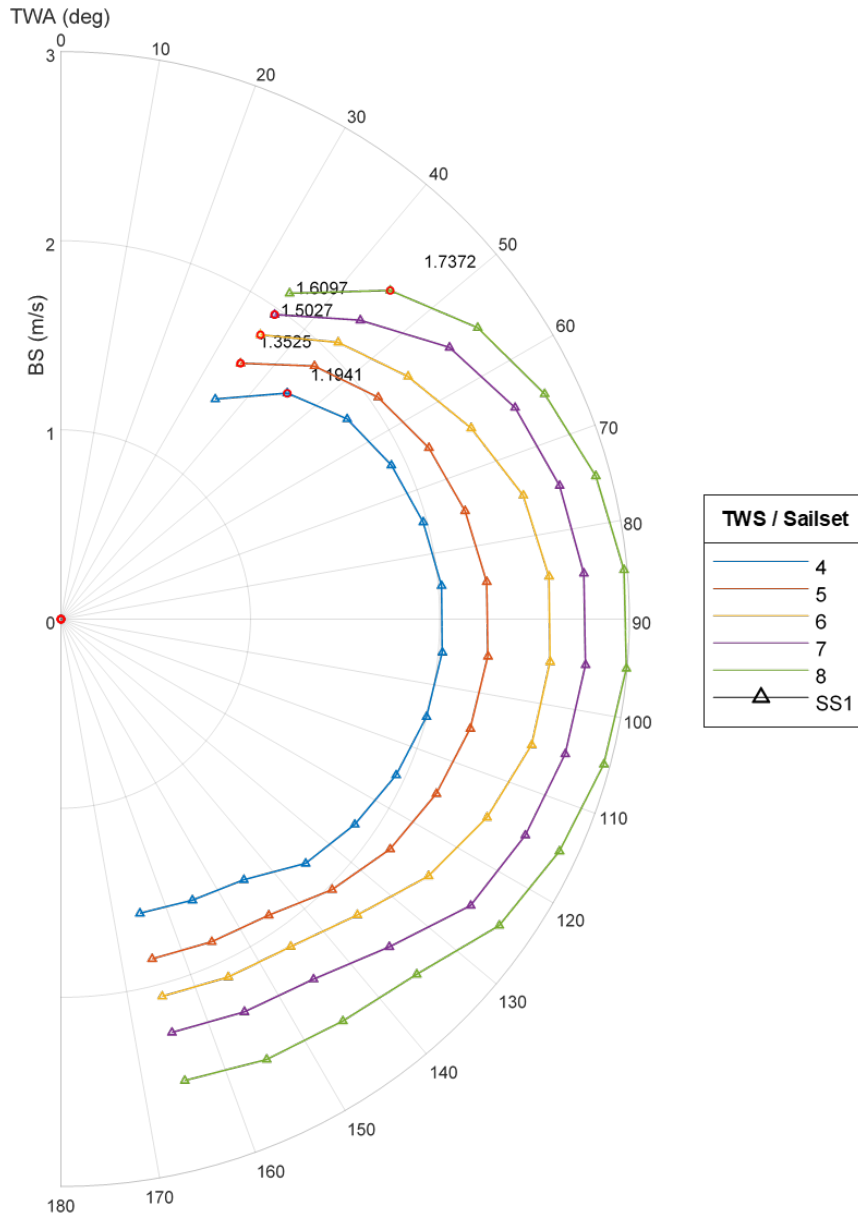


Fig. 18 - Esempio di VPP per il calcolo delle polari di un Optimist.

Le curve polari di una barca a vela danno informazioni al progettista riguardo la massima velocità raggiungibile per dato angolo rispetto al vento. Ogni curva rappresenta diverse intensità del vento reale, da 4.0 m/s fino a 8 m/s. I valori riportati lungo la circonferenza indicano l'angolo rispetto al vento reale della barca e

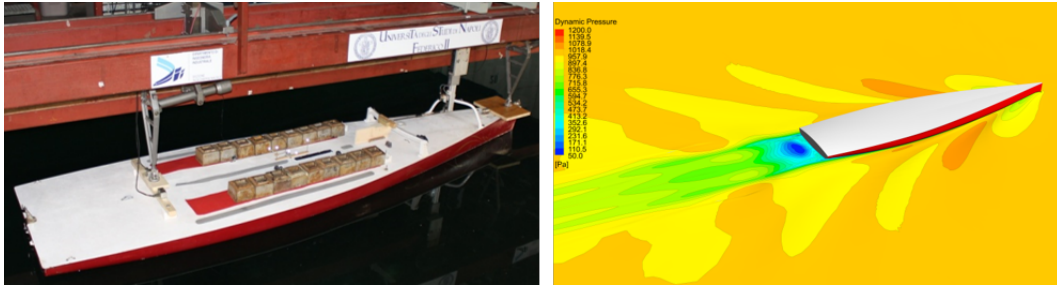


ogni triangolino fornisce indicazioni sulla velocità massima che la barca può raggiungere per quel dato angolo al vento e per data intensità di vento.

### **CFD – Computational Fluids Dynamics**

Il CFD, Computational Fluids Dynamics, è un potente strumento comunemente impiegato nel campo nautico per valutare le prestazioni di una barca a vela. Tale metodo si basa sulla risoluzione delle equazioni fondamentali della fluidodinamica, le equazioni di Navier-Stokes. Il grande vantaggio del CFD consiste nel poter effettuare numerosissimi test a parità delle condizioni di navigazione e ciò sarebbe impossibile da ottenere nelle prove di vera navigazione. Come nel CFD anche nelle prove in vasca navale si possono ricreare le stesse condizioni ad ogni test ma in questo secondo metodo si incontrano problemi legati ai costi in quanto se il progettista vuole effettuare una modifica della geometria della barca per investigare gli effetti sulla prestazione, ciò richiede la costruzione di un nuovo modellino. Comunemente si impiegano i test in vasca per stabilire un riferimento per tarare il modello numerico, CFD, e una volta che questo è validato si può procedere indipendentemente dai test sperimentali. Il concetto base della verifica e della validazione consiste nello stabilire se si stiano risolvendo le equazioni correttamente e che inoltre queste siano le giuste equazioni da risolvere (Eca e Hoekstra, 2014). Una volta validato il modello è possibile procedere in maniera indipendente dai dati sperimentali esplorando un numero elevato di soluzioni e generando anche modelli di predizione delle performance come visto in (Raymond e Cudby, 2012) dove alla base di tutto vi è un buon modello CAD parametrico il quale permette una rapida modifica delle caratteristiche e quindi la generazione di un elevato numero di varianti.

Nell'ambito nautico è ormai pratica comune impiegare il CFD al fine di misurare in che modo una determinata caratteristica, quale ad esempio l'angolo di trim, può influenzare la resistenza dello scafo sull'acqua (Viola et al., 2014). Il CFD è inoltre ampiamente usato anche per prevedere i valori ottimali dell'assetto di una barca a vela in maniera tale da avere un gran numero di informazioni utili da fornire agli equipaggi. Negli ultimi anni la letteratura scientifica si è arricchita di applicazioni numeriche orientate verso piccole barche a vela di classi olimpiche (Pennanen et al., 2016, Day, 2017) oltre che, naturalmente, impiegato nella progettazione delle più blasonate barche di Coppa America (Viola et al., 2012). Una delle principali motivazioni che rendono l'utilizzo del CFD uno strumento molto importante nella fase di progettazione è la possibilità di ricreare le stesse condizioni al contorno tra un test ed il prossimo. Sembra un fatto scontato, ma nella vela è praticamente impossibile mantenere le condizioni al contorno costanti in quanto variano sia con il trascorrere del tempo che con l'avanzare dell'imbarcazione. Un buon metodo per condurre prove sperimentali con facilità di ripetizione delle condizioni al contorno consiste nell'impiegare vasche navali (Viola et al., 2014) ma tale metodo costringe spesso i progettisti a dover fare uso di modelli in scala e ciò provoca problemi dovuti alla discordanza dei risultati tra le prove in scala ridotta e il prodotto finale in scala naturale. Tuttavia, quando si analizzano barche di piccole dimensioni, quali le derive, è possibile effettuare test sperimentali in scala naturale riuscendo a validare il modello numerico con accuratezza (Begovic et al., 2020). La Fig. 19, che segue, mostra la valutazione delle performance di uno scafo confrontando un modello in vasca navale ed il corrispondente numerico.



*Fig. 19 - Confronto numerico/sperimentale delle prestazioni di uno scafo; scafo in vasca navale (sinistra) e corrispondente modello numerico (destra).*

### **FEM – Finite Element Method**

Finite Element Method, o Metodo agli Elementi Finiti, trova le sue prime applicazioni intorno al 1940-50 grazie agli studi effettuati da Courant, Argyris, Turner e Clough. Qualche anno dopo sulla base di tali conoscenze Zienkiewicz, tra il 1957 e il 1965, pubblica un'opera divisa in due volumi per un totale di 1400 pagine (Gupta e Meek, 1996). Il metodo agli elementi finiti ad oggi risulta particolarmente efficace ed è molto attrattivo da un punto di vista pratico. Gli elementi finiti possono gestire domini che hanno forme arbitrarie, quindi anche molto complessi, alcuni tipici esempi sono le fusoliere degli aerei, le parti costituenti automobili, treni ed anche navi e barche a vela. L'idea alla base di questo metodo si basa sul principio del dividi e conquista, quindi un generico dominio all'interno del quale sono definite le equazioni differenziali viene suddiviso in molte piccole partizioni che prendono il nome di elementi che vengono rappresentate con funzioni polinomiali di ordine inferiore e quindi più semplici da risolvere (Whiteley, 2017). L'uso del Finite Element Method nel campo nautico ha avuto sempre più un ruolo prevalente; è fondamentale per una corretta progettazione delle barche a vela ed è impiegato sia per il disegno dello scafo, sia per le vele che per l'alberatura o anche la deriva o il timone (Ingrassia et al., 2017).

### Ottimizzazione Topologica e Additive Manufacturing

Negli ultimi anni una tecnica innovativa e molto interessante incomincia ad essere sempre più utilizzata nelle fasi di progettazione e ottimizzazione di componenti di automobile, aerei ed anche imbarcazioni. Le metodologie costruttive basate su tecniche additive (Additive Manufacturing) consentiranno al progettista di concepire il prodotto svincolandosi dai rigidi schemi imposti delle tecniche attuali. Si pensi, ad esempio, ai sottosquadri la cui gestione è certamente più semplice con queste tecniche rispetto a quanto non lo sia con quelle per asportazione di truciolo. Pertanto, si potrebbe affrontare la progettazione rispondendo alla domanda: come distribuire in modo ottimale il materiale relativamente ai carichi di esercizio? Un approccio di questo tipo può dare origine a forme difficilmente immaginabili o prevedibili a priori proprio perché svincolate dall'utilizzo di geometrie convenzionali consentendo, inoltre, di abbattere i costi di prototipazione (Mirzendehtel et al., 2018). Come tutti i processi tecnologici è importante conoscere quali sono le principali caratteristiche dei manufatti per poter sviluppare la progettazione in maniera tale da ridurre gli errori. In particolare, si cerca di progettare i modelli al fine di ridurre lo staircase effect (Di Angelo et al., 2017) e le Required Post-Machining Region (RPMR) (Ahna et al., 2007). Altri aspetti molto interessanti riguardano le strategie di deposizione del materiale, al fine di minimizzare il tempo necessario per ottenere il prodotto finito (Ahsan et al., 2015) e per ridurre il verificarsi di zone sporgenti le quali necessitano di materiale di supporto (Zwier e Wits, 2016). In questo senso, l'ottimizzazione topologica consente di progettare il componente o più in generale, la struttura, in maniera tale da ridurre la quantità di materiale necessaria a garantire le prestazioni attese concentrandola laddove è più necessario. L'ottimizzazione topologica può essere vista, nella sua forma più generale, come un

processo attraverso il quale lo spazio di progetto assegnato viene suddiviso in due regioni; una occupata dal materiale e l'altra vuota (a densità nulla). È uno strumento matematico che permette di ricercare il valore ottimo di una funzione obiettivo, solitamente minimizzare la massa o massimizzare la rigidità. In questo tipo di studi si definiscono le condizioni al contorno, quindi i carichi agenti sul componente e le reazioni vincolari, il dominio di analisi, la zona del componente in cui è possibile effettuare l'ottimizzazione, e le zone da escludere da tale processo a causa di vincoli progettuali, come ad esempio la presenza di fori per i quali si deve preservare la forma o la superficie esterna di uno scafo di una barca a vela che per motivi legati alla fluidodinamica non devono subire modifiche geometriche. Quando si imposta come funzione obiettivo dell'ottimizzazione la minimizzazione della massa, si deve allo stesso tempo imporre la costanza delle caratteristiche meccaniche (Rezaie et al., 2013) al fine di ottenere risultati che rientrino nelle specifiche di progetto. Se non si considerano anche tali aspetti, si possono trovare soluzioni che presentano minore peso ma che non sono in grado di resistere alle condizioni di carico. L'ottimizzazione topologica divide il componente in un certo numero di celle chiamate Representative Unit Cell (RUC) che si ripetono per tutto il dominio e mediante diversi algoritmi quali il Solid Isotropic Materials with Penalization (SIMP), Level-Set Method (LSM), Evolutionary Structural Optimization (ESO) and Bi-Directional ESO (BESO) Method (Da et al., 2017) si procede verso la soluzione del problema.

Un altro tipo di approccio è rappresentato dagli Algoritmi Genetici (AG) (Cappello e Mancuso, 2003, Prendes Gero et al., 2006, Yildiz et al., 2007) con i quali è possibile condurre analisi anche di strutture molto complesse (Zhong-Wei et al., 2015).

La Fig. 20 che segue mostra un esempio di applicazione di ottimizzazione topologica di un componente realizzato per additive manufacturing e soggetto a determinate condizioni di carico.

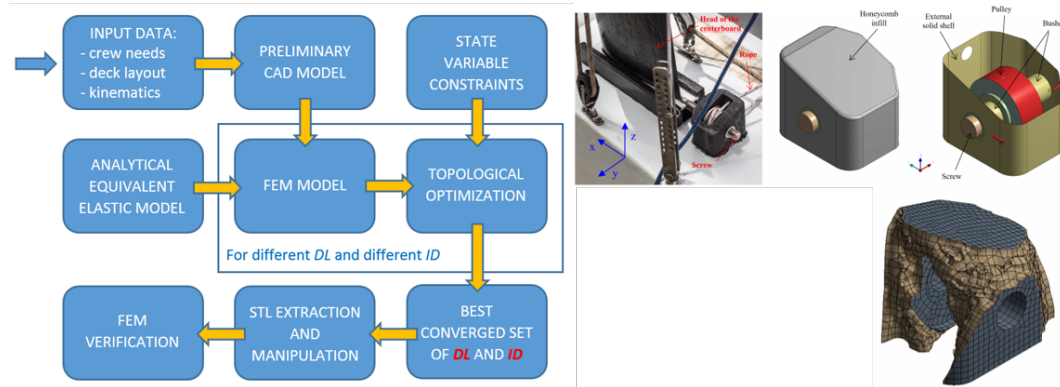


Fig. 20 - Esempio di ottimizzazione topologica di componenti ottenuti per additive manufacturing.

### Analisi Fluido-Struttura

Un ulteriore esempio dell'applicazione del FEM nel campo nautico si può ricercare nello sviluppo di nuove soluzioni per migliorare le performance delle vele. Inizialmente il principale materiale impiegato per la realizzazione delle vele era il Dacron, un tessuto di colore bianco ancora oggi utilizzato per realizzare vele per imbarcazioni principalmente impiegate per la crociera e la vela di piacere o per alcune piccole imbarcazioni da regata come ad esempio l'Optimist, il 420, il 470 o il Laser.

Grazie agli studi su nuovi materiali e la voglia di velisti, progettisti e produttori di vele di spingere le performance di queste sempre più in alto si è passati gradualmente dal principale utilizzo di Dacron all'uso di materiali compositi contenenti in percentuali rilevanti fibre di carbonio e kevlar. Utilizzando fibre per la realizzazione delle vele, i produttori possono sfruttare diverse caratteristiche di queste, in particolare affiancati da un attento studio condotto da parte dei progettisti, possono porre le fibre nelle zone, e secondo le direzioni, più sollecitate delle vele; così facendo il prodotto finale

risulta molto più rigido, cioè riesce a mantenere la forma anche in condizioni meteo-marine impegnative e soprattutto, aspetto da non sottovalutare, sono molto più leggere a parità di rigidità.

Il fattore peso in una vela è determinante in quanto una imbarcazione di 40 piedi, equivalenti circa a 12.20 metri, è armato tipicamente con un albero alto all'incirca 18 metri. Poste queste condizioni risulta intuitivo il fatto che anche una piccola riduzione in termini di peso delle vele porta vantaggi importanti principalmente in termini di stabilità, considerando appunto l'estensione verticale della superficie velica considerata.

Al fine di progettare correttamente una vela, o un set di vele (in quanto la maggior parte delle barche a vela non è armata solamente con una vela ma con due o tre di queste) sono stati indagati diversi metodi di progettazione e di test. In bibliografia sono molto diffusi articoli scientifici riguardanti gli studi condotti sulle vele. In (Viola e Flay, 2011), è presentato un lavoro molto completo riguardo un approccio sia sperimentale, full-scale test e test condotti all'interno di galleria del vento, che numerico, analisi CFD, condotti sulle vele in condizioni di bolina e di poppa. Altri approcci a tale aspetto della progettazione delle vele sono esposti in (Masuyama et al., 2009), dove numerose forme di vele vengono analizzate nelle condizioni di bolina al fine di creare un database di dati di aiuto ai progettisti per la progettazione delle vele in queste condizioni di navigazione. In (Cirello et al., 2019) è presentato un nuovo metodo di analisi basato su una tecnica molto interessante ed efficace di studio che considera gli effetti combinati di tipo fluido-struttura. In questo studio i risultati provenienti dalle analisi CFD si interfacciano con le simulazioni FEM al fine di dettagliare il comportamento della randa e del gennaker e quindi cercando di prevedere le modifiche in termini di geometria di queste vele in condizioni di poppa. Considerando questi tre aspetti che riescono a

riassumere la maggior parte dei metodi e dei risultati che si possono condurre nello studio delle vele, i velai possono avere una migliore visione dei fenomeni e delle forze agenti sulle vele e pertanto creare nuovi modelli più efficienti.

Una delle maggiori aziende del settore, North Sails, grazie proprio agli studi FEM, ha sviluppato un metodo per minimizzare il peso delle vele ma al contempo massimizzare la rigidità di queste. In Fig. 21 è mostrato un addetto intento nel controllo della disposizione dei rinforzi in fibra di carbonio in una vela.



*Fig. 21 - Disposizione delle fibre di carbonio in una vela.*

### **CAM – Computer-Aided Manufacturing**

Il CAM, Computer-Aided Manufacturing, negli ultimi anni sta prendendo sempre più piede all'interno di aziende e startup. Il punto di partenza anche in questo caso è un buon disegno CAD. Il CAD generato viene inviato ad una macchina la quale ha il compito di tracciare i percorsi degli utensili necessari per replicare in

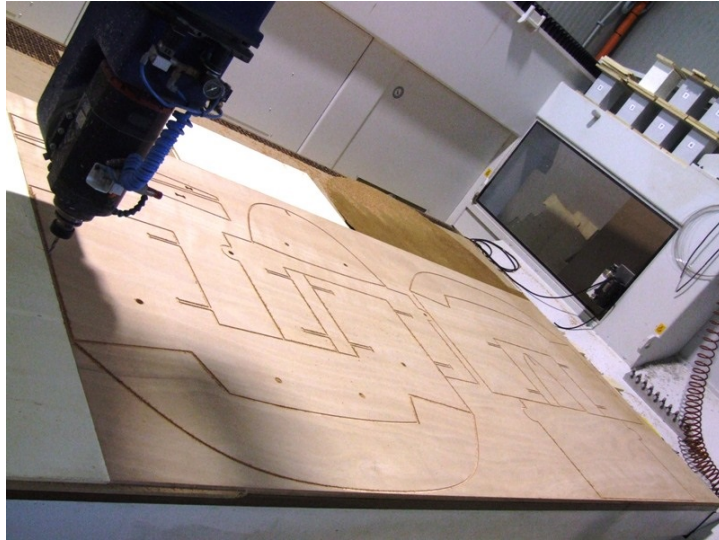


maniera fedele il disegno ideato dalla squadra di progettazione. I tipi di macchine possono essere sia di tipo additive manufacturing, come le stampanti 3D, o di esportazione del materiale, come le frese. In Fig. 22 è mostrato un esempio di applicazione della tecnica CAM con riferimento al settore nautico della startup palermitana Ocore. La squadra di Ocore si presenta nel mercato come una realtà che si propone di generare oggetti di grandi dimensioni mediante la tecnica di stampa 3D in FDM (Fused Deposition Modeling).



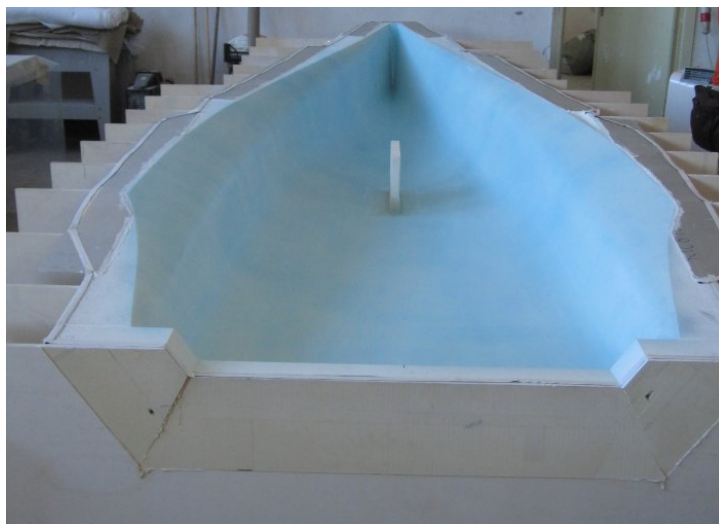
*Fig. 22 - Disegno CAD della barca di Ocore (a) e presentazione del prototipo realizzato mediante stampa 3D.*

In Fig. 23 è mostrato un esempio di realizzazione delle strutture interne di uno SKIFF, in particolare Zyz la prima barca realizzata dallo Zyz Sailing Team dell'Università degli Studi di Palermo, mediante asportazione di materiale utilizzando una fresa a controllo numerico.



*Fig. 23 - Taglio delle sezioni interne di uno SKIFF mediante una fresa a controllo numerico.*

Infine, in Fig. 24 è mostrato lo stampo, costruito sulla base di un modello CAD su cui è possibile effettuare processi tecnologici come la laminazione o l'infusione al fine di realizzare un prodotto finito di elevate caratteristiche meccaniche.



*Fig. 24 - Deposizione delle fibre di lino sullo stampo del timone di uno SKIFF.*

## **4. Nuovo Approccio al CAD per la Nautica**

Per quanto riguarda il disegno nautico, ancora oggi, il principale metodo individuato per trasformare un'idea in un prodotto finito consiste nel tracciare un certo numero di linee nel piano che costituiranno la base per la generazione del modello 3D dello scafo. Uno dei principali software di modellazione in ambito nautico, Maxsurf, permette tra le diverse funzioni a disposizione di ricalcare le immagini dei piani di costruzione o anche delle immagini al fine di realizzare il primo modello dello scafo che poi verrà corretto e modificato raggiungendo la forma di carena desiderata.

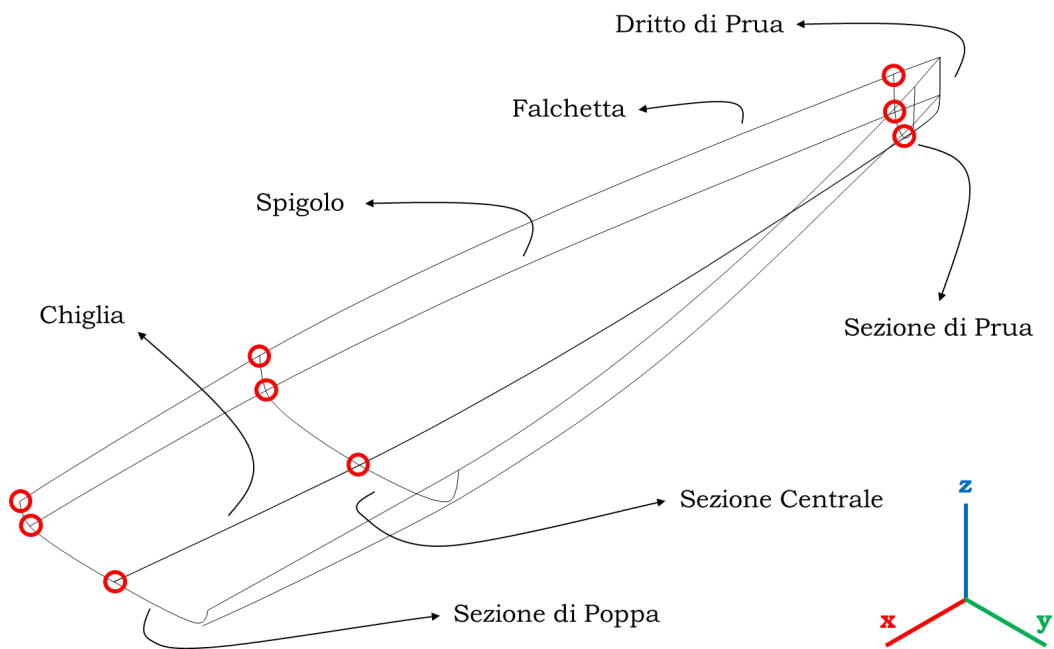
Al fine di verificare la bontà del disegno, in prima approssimazione, i progettisti si affidano a dei coefficienti che fanno parte della storia del disegno nautico e già da questi, i progettisti più esperti, possono avere una conferma riguardo la bontà delle linee e dello scafo tracciato. In accordo con gli studi bibliografici e con la comune pratica del disegno nautico le principali linee da tenere in considerazione per definire la geometria di un qualsiasi scafo, sia che esso presenti una carena con spigolo sia nel caso questo non sia presente come accade negli scafi tondeggianti, possono essere individuate in:

- Sezioni trasversali dello scafo, ottenute tagliando lo scafo con piani ortogonali all'asse longitudinale, prua-poppa, dello scafo.
- Linea di chiglia, una linea giacente nel piano che divide lo scafo in due parti simmetriche perpendicolare al pelo libero dell'acqua e contenete l'asse longitudinale dello scafo. Tale linea parte da prua e termina a poppa.

- Linea di spigolo, una linea che si muove nello spazio e che definisce lo spigolo della carena quando questo è presente. Tale linea parte da prua e termina a poppa.
- Linea di falchetta, una linea che si muove nello spazio e che definisce il contorno superiore dello scafo. Tale linea parte da prua e termina a poppa.

A seconda del numero di sezioni si definiscono per individuare la geometria dello scafo otteniamo un dato numero di blocchi in cui si suddivide la carena dell'imbarcazione. Questa tipologia di approccio è stata utilizzata in studi precedenti (Chrismianto et al., 2015) (Pérez-Arribas, 2014) (Khan et al., 2017 e Khan et al., 2019). Il vantaggio principale di definire lo scafo in tale maniera consiste nel poter agire in maniera indipendente tra i diversi blocchi. Ad esempio, se vogliamo mantenere inalterata la parte anteriore dello scafo in quanto, concordemente con l'esperienza del progettista, questa possiede già caratteristiche ottimali e vogliamo invece sperimentare nuove geometrie della parte posteriore dello scafo, ad esempio modificando la posizione finale dello spigolo, ciò è facilmente gestibile. Altro vantaggio di tale metodo di progettazione consiste nell'utilizzo di un numero non eccessivamente elevato di variabili di progetto ed inoltre queste vengono associate a geometrie dello scafo che il progettista, con la sua esperienza, può valutare in termini di coefficienti adimensionali; come ad esempio l'angolo in corrispondenza della prua dell'imbarcazione possa avere valori troppo elevati o troppo bassi al fine di non innescare fenomeni di turbolenza sin dalla parte iniziale dello scafo, risultando in elevati valori di resistenza o di formazione ondosa eccessiva. In questo studio, come consuetudine nel disegno nautico, il sistema di riferimento scelto è mostrato in Fig. 25 dove l'asse x coincide con l'asse longitudinale, prua-poppa, dello scafo. Lo scafo è suddiviso in due blocchi e vengono individuate tre sezioni: la sezione di prua,

la sezione centrale e la sezione di poppa. Oltre a tali curve, sono tracciate la linea di chiglia, la linea di spigolo e la linea di falchetta in maniera tale da avere completo controllo sulla geometria dello scafo. Come mostrato in Fig. 25, nella geometria dello scafo vi sono dei punti che ricoprono un ruolo principale e sono i punti dati dall'intersezione delle curve di sezione di prua, centrale e di poppa con le curve di chiglia, spigolo e falchetta. A partire dalla definizione della posizione delle coordinate di tali punti e dei rispettivi angoli iniziali e finali delle curve da essi passanti, sarà possibile tracciare le curve necessaria a definire l'intera geometria della carena.



*Fig. 25 - Suddivisione dello scafo mediante tre sezioni e individuazione dei punti chiave per la costruzione delle curve di Bézier.*

Ognuna di queste curve è basata sulla formulazione di Bézier ed è data dall'unione di due curve consecutive le cui condizioni al contorno rispettano i vincoli necessari per garantire la continuità sempre di ordine G0 e a seconda dei casi, scafo tondo o a spigolo, di ordine G1 e G2. Al fine di controllare i parametri caratteristici delle curve di Bézier in maniera tale da poter modificare

l'andamento delle singole curve, è stato sviluppato uno strumento utilizzando il linguaggio di programmazione presente in Excel. La scelta è ricaduta in questo software in quanto è molto raro che in studi ingegneristici questo strumento sia preferito ad altri software come ad esempio matlab o python. Questi ultimi sono software più potenti e permettono di effettuare analisi gestendo elevate moli di dati e variabili. Per il caso qui preso in esempio tale potenza di calcolo non è richiesta in quanto, per come è stato formulato, il modello dello scafo presenta un numero contenuto di variabili proprio per venire in contro alle esigenze dei progettisti i quali non si dovranno districare tra una moltitudine di parametri ma utilizzeranno solo quelli più comuni e più importanti della progettazione nautica. Oltre a tali motivazioni possiamo ritrovare anche gli aspetti economici in quanto il costo di una licenza per utilizzare Excel è molto inferiore rispetto al costo di una licenza di matlab e di conseguenza la diffusione di tale software è di almeno un ordine di grandezza inferiore rispetto al primo. Ciò apre le possibilità di utilizzo dello strumento di progettazione ad una platea molto più ampia. Ultimo motivo, ma non per importanza, risiede nelle conoscenze acquisite negli anni riguardo l'utilizzo del blocco Visual Basic for Application di Excel per quanto riguarda la sintassi, le routine e la struttura del programma. Il processo può essere riassunto nello schema presentato in Fig. 26.

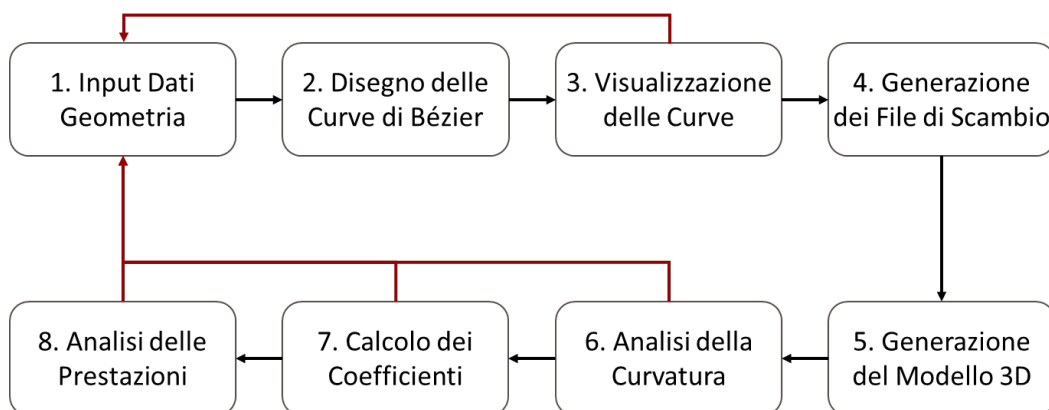


Fig. 26 - Schema di flusso del nuovo metodo di progettazione.

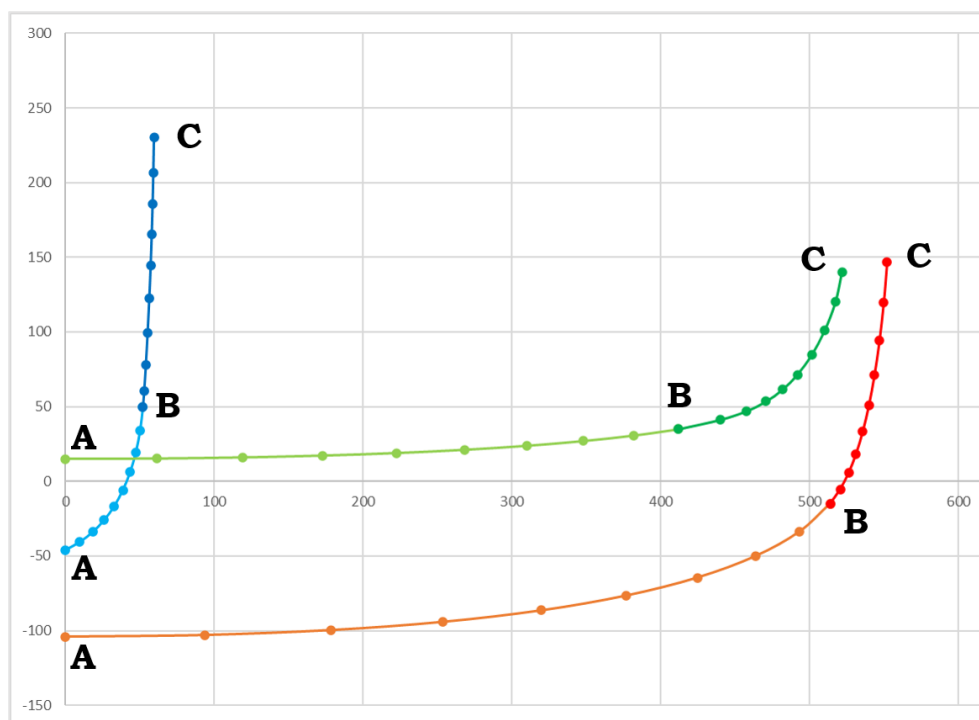
Tale strumento sviluppato in Excel accetta come input un certo numero di dati relativi alla geometria dello scafo, come ad esempio posizione dei punti di controllo delle curve e gli angoli con i quali è possibile identificare i principali aspetti dello scafo ma anche controllare la tipologia di imbarcazione, assegnando appropriati valori degli angoli si può semplicemente passare da uno scafo a spigolo a uno tondeggiante. Il progettista riceve immediatamente un riscontro riguardo la geometria da lui tracciata e, se interessato a replicare uno scafo esistente piuttosto che crearne uno nuovo, può fare affidamento sui piani di costruzione che possono essere utilizzati come guida in questa fase iniziale della progettazione, ma anche nelle successive, al fine di osservare come le modifiche apportate si discostino dal disegno originale e in tal modo trarre conclusioni a riguardo. Una volta raggiunto un disegno soddisfacente il progettista può proseguire con la generazione di un certo numero di file di scambio che verranno utilizzati come file di input per un qualsiasi software CAD commerciale cui viene affidata la generazione della superficie a partire dalle curve razionali di Bézier appena tracciate. In questa fase il progettista può avere un'idea più completa del disegno e valutare il modello CAD tridimensionale secondo diversi punti di vista. I principali controlli che vengono svolti riguardano l'avviamento delle curve e della superficie che possono essere valutati in termini di grafici di curvatura calcolati nelle singole curve o considerando l'intera superficie creata. Qualora siano necessarie modifiche, il progettista può tornare sui suoi passi utilizzando lo strumento di modifica delle curve di Bézier in Excel, eseguire la modifica richiesta al fine di migliorare il modello e rigenerare la superficie così da controllare gli effetti di tale operazione direttamente nel modello tridimensionale. Come in precedenza, una volta raggiunto un modello di superficie ben avviato, si può procedere con l'ultima fase del processo di controllo della geometria della carena. Non è

sufficiente che lo scafo sia ben avviato al fine di ottenere un disegno che possa aspirare ad avere buone performance, ciò che consente ad un esperto disegnatore nautico di affermare che tale modello abbia un comportamento ottimale per date condizioni al contorno, sono i coefficienti adimensionali che possono essere ottenuti conducendo specifiche operazioni sull'opera viva dello scafo. I coefficienti adimensionali sono anche impiegati da diverse formulazioni numeriche per il calcolo delle curve di resistenza degli scafi. Questi strumenti permettono di ottenere dei risultati approssimativi ma che in breve tempo forniscono un'idea generale sul comportamento dello scafo proposto (Keuning e Katgert, 2008). Condurre analisi in forma chiusa ha, come detto, il vantaggio di proporre risultati in tempo immediato e quindi si possono valutare un numero molto elevato di geometrie. Al fine di ottenere risultati più attendibili è necessario condurre analisi numeriche più approfondite ad esempio mediante simulazioni fluidodinamiche. Queste ultime necessitano di una capacità computazionale molto più elevata e anche di tempi di calcolo molto maggiori ma permettono di analizzare lo scafo in maniera più attenta e di ricavare, in fase di post-processing, molte informazioni difficilmente ottenibili con altri metodi. A seguito di ciò il metodo proposto consente ai progettisti di definire geometrie degli scafi mantenendo il controllo di tutti i più importanti parametri comunemente usati nella progettazione nautica, di ottenere risultati immediati che possono essere di aiuto al progettista nelle prime fasi della progettazione e proseguire in maniera più veloce nel definire le aree che si intende indagare con maggior precisione ed infine, utilizzando lo stesso modello CAD, di valutarne le prestazioni tramite software di grande precisione e ottenere un disegno finale il più possibile prossimo all'ottimo assoluto per date condizioni al contorno fissate a monte della progettazione.



### **Input Dati Geometria**

Come descritto in precedenza, lo scafo è suddiviso dalle tre curve di sezione e dalle curve di chiglia, spigolo e falchetta. Dall'intersezione di queste curve fondamentali troviamo nove punti chiave (vedi Fig. 25). Questi punti rappresentano l'inizio e/o la fine delle curve razionali di Bézier, più in particolare ognuna delle curve citate è composta da due curve razionali di Bézier al cui punto in comune sono imposte le condizioni necessarie a garantire la continuità richiesta G0, G1, G2 come è possibile osservare dalla Fig. 27 in cui sono mostrate le curve rappresentanti le sezioni di prua, centrale e di poppa in questo caso di uno scafo tondeggiante per il quale sarà richiesta una continuità di ordine G2 al fine di avere continuità della curvatura.



*Fig. 27 - Esempio di curve fondamentali, le tre sezioni con evidenziate le due curve di Bézier che le compongono.*

Entrando nel dettaglio della costruzione le curve razionali di Bézier, il primo passaggio consiste proprio nel definire le coordinate spaziali, in X, Y e Z dei punti A, B e C e ciò è possibile farlo grazie

all'interfaccia grafica sviluppata all'interno di Excel. In Fig. 28 è mostrato un esempio della maschera al cui interno sono contenuti i valori necessari a definire le due curve, in questo specifico caso per la sezione di prua.

Parametro	Valore	Modifica	Incremento
X	200	-	+
YA	0	-	+
ZA	-105	-	+
YB	24	-	+
ZB	-35	-	+
YC	63	-	+
ZC	144	-	+
a	10	-	+
b1	76	-	+
b2	76	-	+
g	0	-	+
wAB	1	-	+
wBC	0	-	+

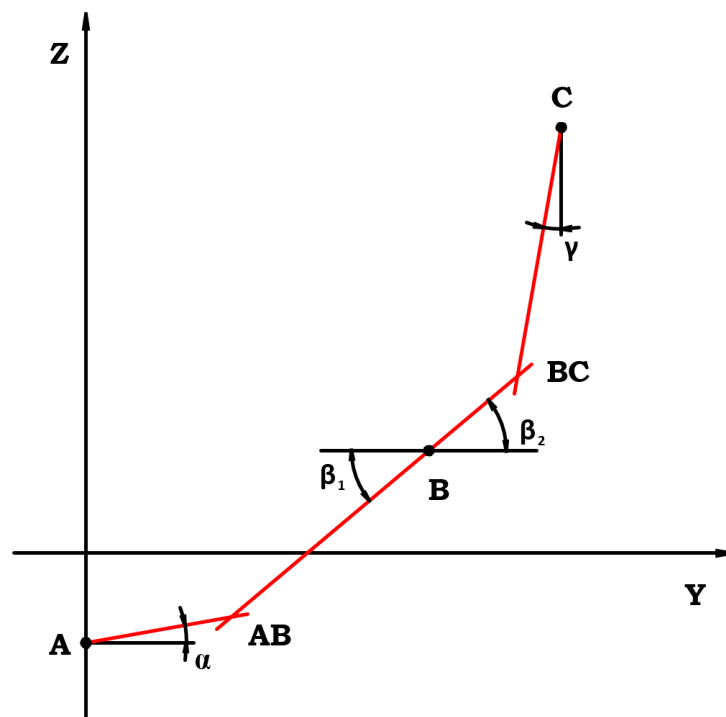
N° Punti 1: 10  
 N° Punti 2: 10

Sezione di Prua: Prua, Maestra, Poppa, Dritto, Chiglia, Spigolo, Falchetta

Fig. 28 - Esempio di interfaccia grafica per inserire i dati per curve che giacciono in un piano.

Le sezioni sono tutte curve che giacciono in un piano avente la normale parallela all'asse X del riferimento di coordinate scelto, si veda Fig. 25. Come mostrato in Fig. 28, troviamo un singolo valore che indica la componente lungo X dei tre punti che stiamo definendo, tale valore stabilisce proprio l'ascissa del piano su cui giace la sezione di prua. Per modificare il valore della specifica coordinata, il progettista di può avvalere dei comandi a disposizione “-“ e “+” per, rispettivamente diminuire o aumentare il valore della coordinata di un determinato valore oppure

direttamente inserire il valore desiderato nella casella. Immediatamente sotto il valore della X troviamo le coordinate in Y e in Z dei tre punti A, B e C che possono essere inserite e modificate con la medesima procedura indicata per la coordinata in X. I valori indicati da “a”, “b1”, “b2” e “g” indicano rispettivamente i valori degli angoli alfa ( $\alpha$ ), beta1 ( $\beta_1$ ), beta2 ( $\beta_2$ ) e gamma ( $\gamma$ ) i quali sono necessari per definire il poligono di controllo delle due curve razionali di Bézier, come è possibile osservare in Fig. 29.



*Fig. 29 - Schema del poligono di controllo delle due curve di Bézier che compongono le sezioni.*

In Fig. 29 sono presenti altri due punti di controllo, i punti AB e BC. Una volta assegnati i valori delle coordinate dei punti A, B e C e i quattro angoli alfa, beta1, beta2 e gamma, le coordinate dei punti AB e BC sono univocamente definite. Le coordinate di tali punti sono infatti ottenute risolvendo il problema di intersezione di rette una volta note, per ognuna di queste un punto di passaggio e il coefficiente angolare. Mettendo a sistema, a due a due, le rette

passanti dai punti A, B e C con i coefficienti angolari dati dagli angoli alfa, beta1, beta2 e gamma otteniamo le coordinate di AB, dalla prima intersezione, mostrata nell'Eq.(6):

$$\begin{cases} Z_{AB} - Z_A = m_{alfa}(Y_{AB} - Y_A) \\ Z_{AB} - Z_B = m_{beta1}(Y_{AB} - Y_B) \end{cases} \quad (6)$$

e BC, dalla seconda intersezione, mostrata nell'Eq.(7):

$$\begin{cases} Z_{BC} - Z_B = m_{beta2}(Y_{BC} - Y_B) \\ Z_{BC} - Z_C = m_{gamma}(Y_{BC} - Y_C) \end{cases} \quad (7)$$

A seguito di ciò abbiamo tutte le informazioni necessarie per costruire le curve razionali di Bézier per tutte le curve che giacciono in un piano come le tre sezioni e la linea di chiglia. La descrizione dettagliata delle formule e delle condizioni imposte per il corretto disegno delle curve razionali di Bézier sono presentate in Appendice A. Per quanto riguarda le curve che si muovono nello spazio, quali la linea di spigolo e di falchetta dobbiamo fare delle considerazioni aggiuntive proprio per tener conto della tridimensionalità di queste due curve. In Fig. 30 è mostrata l'interfaccia grafica utilizzata per inserire i dati relativi alle curve che si muovono nello spazio (in questo caso è mostrata la maschera della curva di falchetta).

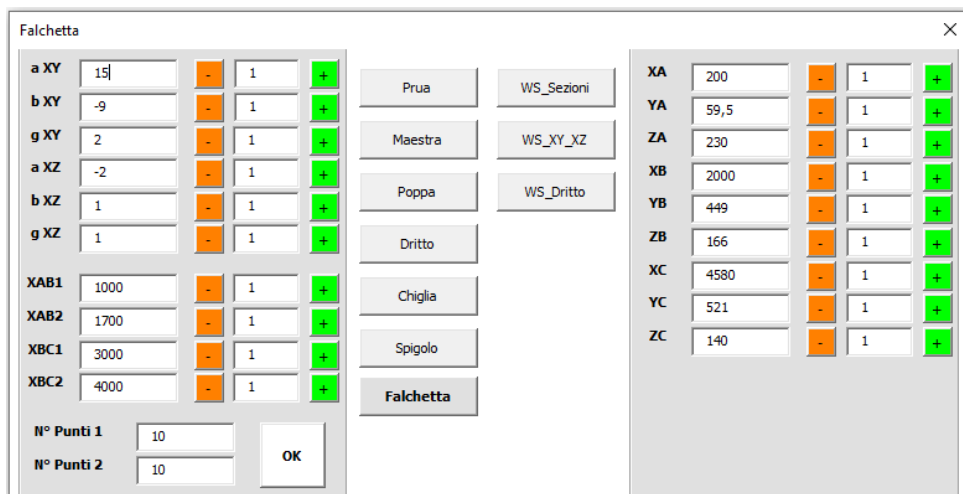


Fig. 30 - Esempio di interfaccia grafica per inserire i dati per curve tridimensionali

A differenza di quanto visto nel caso delle curve che giacciono interamente in un piano, qui possiamo notare che sono presenti un maggior numero di formazioni richieste per definire completamente le curve. Sulla parte destra della Fig. 30 sono presenti le coordinate di ogni punto di controllo A, B e C, già definiti nelle fasi precedenti in quanto coincidenti con i punti delle sezioni. In particolare, il punto A della falchetta coincide con il punto C della sezione di prua, il punto B della falchetta coincide con il punto C della sezione centrale e il punto C della falchetta coincide con il punto C della sezione di poppa. Dall'interfaccia della falchetta è comunque possibile modificare tali valori che, di conseguenza, verranno modificati anche per le altre curve a cui essi sono legati. Nella parte sinistra di Fig. 30 sono invece presenti, in alto, i valori degli angoli alfa, beta e gamma secondo i due piani di riferimento XY e XZ. A differenza di quanto visto per le sezioni, qui non sono indicati gli angoli  $\beta_1$  e  $\beta_2$  ma solamente l'angolo  $\beta$ . Questa impostazione deriva dal fatto che non vi è motivo di inserire una discontinuità tra le due curve che compongono la falchetta o lo spigolo, e lo stesso si può dire per la curva della chiglia, pertanto  $\beta_1$  è imposto uguale a  $\beta_2$ . Immediatamente al di sotto sono presenti quattro valori, che definiscono la posizione lungo l'asse X dei punti intermedi che ci servono per costruire le due curve razionali di Bézier per la falchetta e per lo spigolo mostrate in Fig. 31.

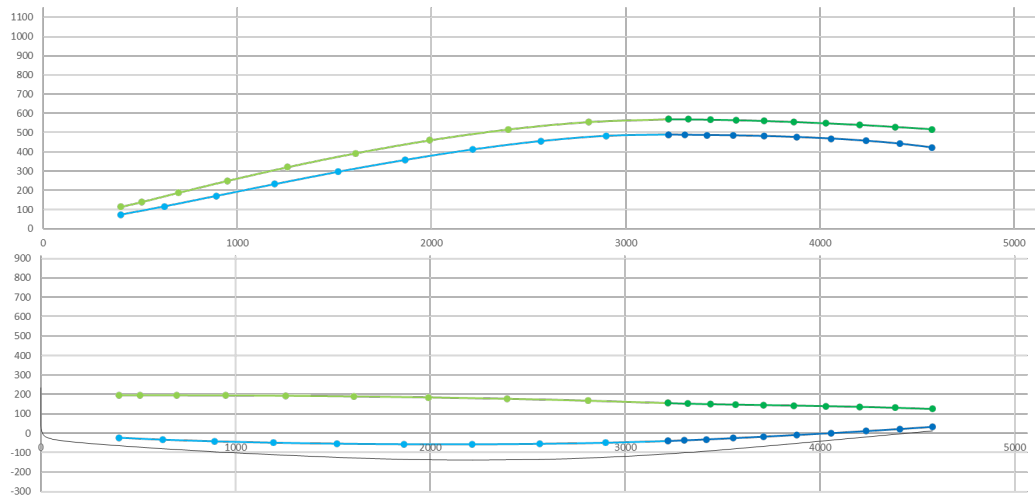


Fig. 31 - La curva di spigolo e la curva di falchetta con evidenziate le due curve di Bézier che le compongono, in alto il piano XY e in basso il piano XZ.

Dalla Fig. 32 è possibile comprendere come tali curve sono definite attraverso lo schema che mostra il poligono di controllo delle curve.

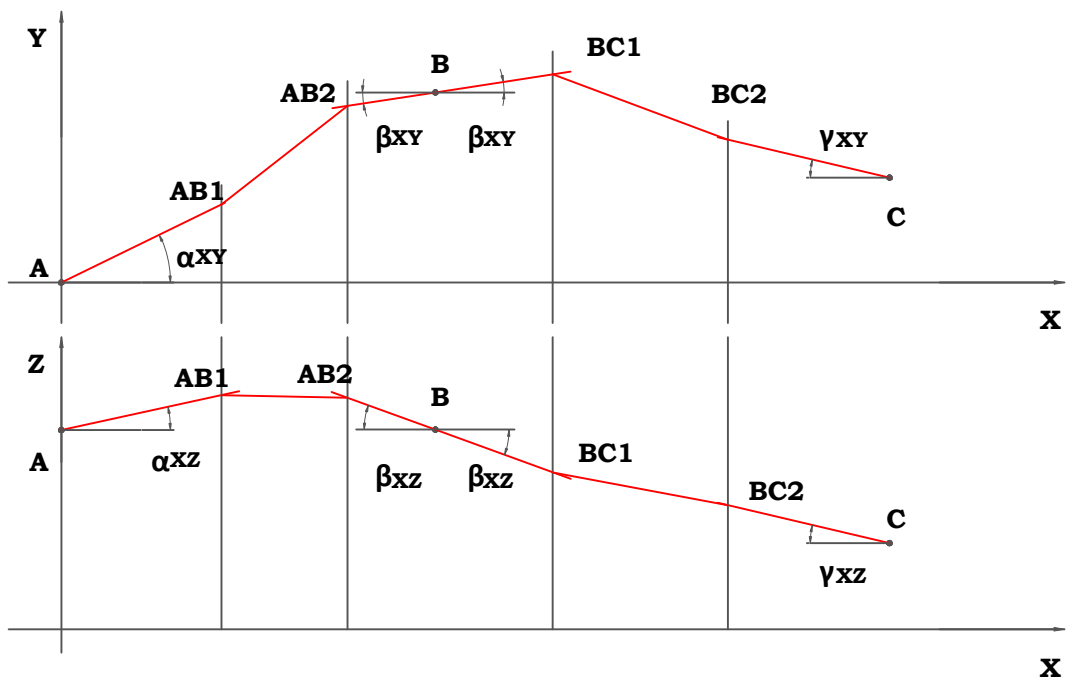


Fig. 32 - Schema del poligono di controllo delle due curve di Bézier che compongono la curva di spigolo e di falchetta.

I punti AB1, AB2, BC1 e BC2 risultano anche in questo caso dall'intersezione di due rette e quindi una volta definiti i valori delle coordinate dei punti A, B e C e degli angoli  $\alpha_{XY}$ ,  $\beta_{XY}$ ,  $\gamma_{XY}$ ,  $\alpha_{XZ}$ ,  $\beta_{XZ}$  e  $\gamma_{XZ}$  è possibile ricavare i valori delle coordinate dei punti di controllo intermedi. Dall'Eq.(8) è possibile ricavare il valore di YAB1 per una sezione a x 1000:

$$\begin{cases} Y_{AB1} - Y_A = m_{\alpha_{XY}}(X_{AB1} - X_A) \\ X_{AB1} = 1000 \end{cases} \quad (8)$$

Ripetendo la stessa procedura per tutte le intersezioni in XY e in XZ è possibile ottenere i valori necessari a definire unicamente il poligono di controllo delle due curve nei due piani di riferimento. La scelta di utilizzare questa formulazione, più complessa rispetto a quella delle curve presentate in precedenza, deriva dal fatto che i progettisti prediligono lavorare con i valori degli angoli e per poter concedere questa libertà, per questo tipo di curve tridimensionali, è stato necessario definire due punti intermedi per ogni tratto di curva, da A a B e da B a C. Mantenendo un solo punto intermedio come nel caso precedente, il progettista sarebbe stato libero di scegliere a suo piacere i valori degli angoli, ad esempio nel piano XY, ma nel piano XZ avrebbe potuto scegliere solo uno dei due angoli. Il caso è illustrato in Fig. 33. Qui è presentato lo schema risultante dalla definizione del poligono di controllo per una curva tridimensionale con un unico punto intermedio tra i punti di passaggio A e B.

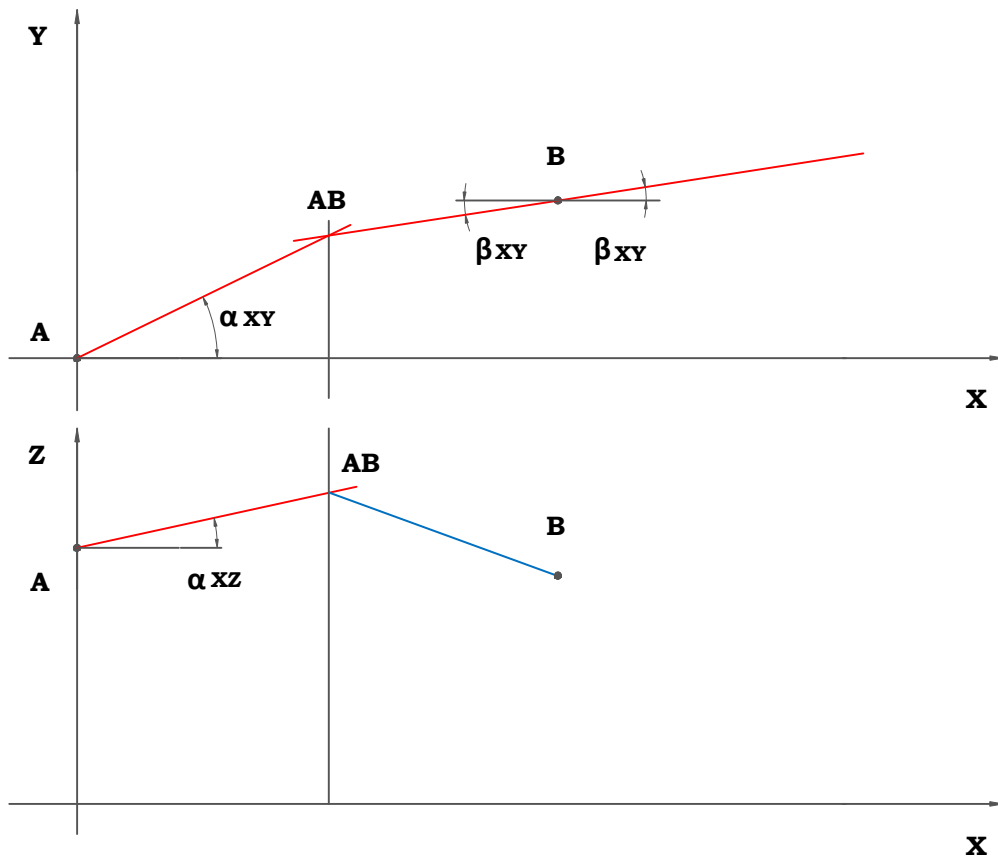


Fig. 33 - Esempio di determinazione di un unico punto di controllo per curve tridimensionali

Come primo passo definiamo le coordinate dei punti A e B per X, Y e Z. A questo punto ci poniamo nel piano XY e definiamo gli angoli  $\alpha_{XY}$  e  $\beta_{XY}$ . Come visto in precedenza, dall'intersezione delle due rette passanti rispettivamente per A e per B con i coefficienti angolari definiti da  $\alpha_{XY}$  e  $\beta_{XY}$  troviamo le coordinate  $X_{AB}$  e  $Y_{AB}$ . A questo punto possiamo spostarci nel piano XZ al fine di individuare il valore dell'ultima coordinata necessaria per fissare il punto nello spazio,  $Z_{AB}$ . Conosciamo il valore di  $X_{AB}$  e se fissiamo, ad esempio il valore di  $\alpha_{XZ}$ , possiamo scrivere la relazione di una retta passante da due punti, Eq.(9):

$$Z_{AB} - Z_A = m_{\alpha_{XZ}}(X_{AB} - X_A) \quad (9)$$



nella quale l'unica incognita risulta essere ZAB. In questo modo il punto di controllo AB è stato interamente definito nelle sue coordinate X, Y e Z. Pertanto, una volta definita la posizione del punto B, l'angolo  $\beta_{XZ}$  è fissato e non vi è la possibilità da parte del progettista di avere controllo su di esso. Analogamente tale ragionamento è valido fissando  $\beta_{XZ}$  al posto di  $\alpha_{XZ}$ , in questo caso perdiamo il controllo sul valore da dare al secondo angolo, o ancora se partiamo dalla definizione degli angoli del piano XZ piuttosto che dal piano XY come mostrato nei passaggi precedenti.

### **Disegno delle Curve di Bézier**

Le curve più impiegate nel campo del design sono le curve di Bézier, le B-Spline, le NURBS (Carl de Boor, 1978) (Shikin e Plis, 1995). Per quanto concerne lo studio svolto in questa tesi la scelta è ricaduta nelle curve razionali di Bézier. Come presentato in (Sedeber, 2012 e Persiani et al., 1997), questa tipologia di curve può essere controllata in maniera molto intuitiva manipolando la posizione dei punti di controllo. In tal senso è possibile avere pieno controllo sull'ordine di continuità G0, G1 e G2 impiegando semplici relazioni matematiche e geometriche. A fianco di queste motivazioni un ulteriore motivo che ha portato alla scelta delle curve razionali di Bézier rispetto agli altri tipi di curve è dovuta all'esperienza maturata durante il periodo di studio e ricerca all'estero presso la Chalmers University of Technology con sede a Gothenburg, in Svezia.

L'Università degli Studi di Palermo e l'Università svedese hanno collaborato con l'obiettivo di condurre una serie sistematica di esperimenti numerici al fine di definire l'ottimale forma da attribuire alle derive delle più importanti e diffuse imbarcazioni a vela di piccole dimensioni quali Optimist, 420 e 470 (Saporito et

al., 2020). Per definire e parametrizzare la geometria delle sezioni delle derive di tali barche a vela sono state impiegate proprio le curve razionali di Bézier tenendo conto degli interessanti legami tra la formulazione matematica di tali curve e le caratteristiche geometriche del profilo.

### **Visualizzazione delle Curve di Bézier**

Abbiamo visto le prime due fasi del processo presentato nella Fig. 26. Prima il progettista inserisce le informazioni necessarie al fine di definire le curve di Bézier tramite le userform costruite in Excel e poi il programma elabora tali informazioni in maniera tale da rispettare le condizioni necessarie per avere la continuità desiderata a seconda del progetto che si intende portare avanti, cioè uno scafo con spigolo o tondeggiante. A questo punto, nella fase tre, il progettista esegue il primo controllo riguardo la geometria generata a seguito dell'input dei dati. Questo è il primo controllo che esegue ed è di tipo puramente visivo. Come accade spesso nel disegno nautico, il punto di partenza per un qualsiasi nuovo progetto involve il disegno di un modello già esistente che si intende migliorare. Nella pratica si utilizzano come riferimento i piani di costruzione o, in mancanza di questi, fotografie secondo piani ortogonali dello scafo, che vengono poste in secondo piano rispetto al nuovo disegno e si cerca di replicare tali curve quanto più fedelmente possibile. A conferma di ciò uno dei software utilizzati per la progettazione di barche a vela quale Maxsurf permette ai progettisti di procedere in tal maniera. In primo luogo, il progettista provvede ad estrarre le curve che intende replicare da un CAD esistente o possiede i piani di costruzione dello scafo. In accordo con il sistema di riferimento definito in Fig. 25, il progettista inserisce le immagini relative allo scafo da replicare secondo i piani XY, XZ e YZ come mostrato in Fig. 34.

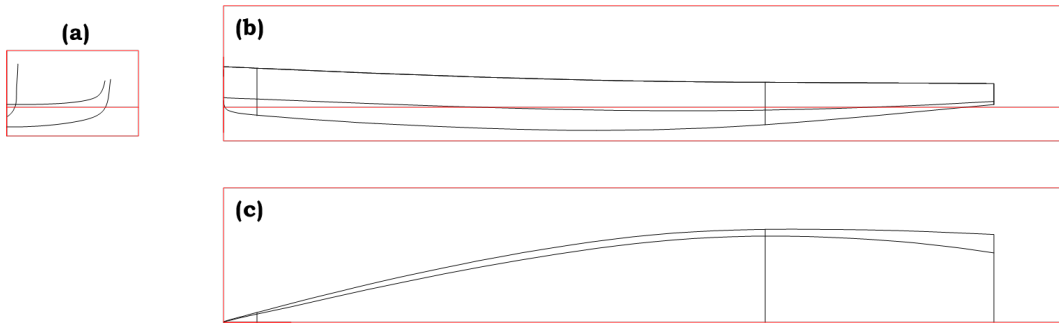


Fig. 34 - Viste dello scafo secondo i piani YZ (a), XZ (b) e XY (c)

Le immagini relative alle tre viste sono caricate all'interno di Excel e usate come riferimento, come mostrato nelle Fig. 35, Fig. 36, Fig. 37 e Fig. 38.

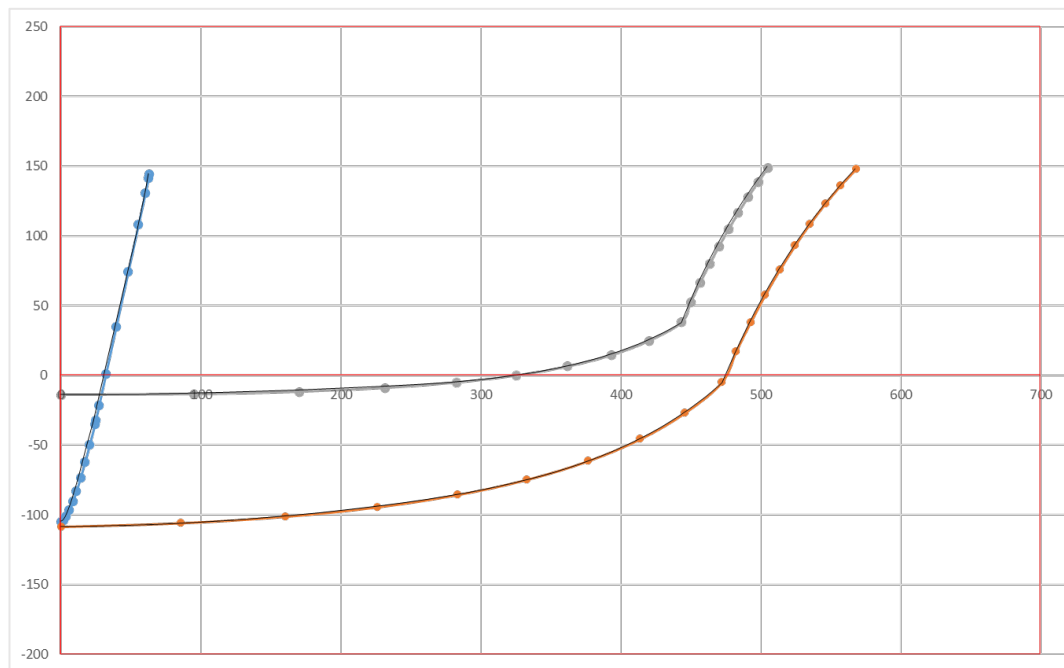


Fig. 35 - Rappresentazione delle curve di Bézier che replicano le tre sezioni di uno scafo con spigolo.

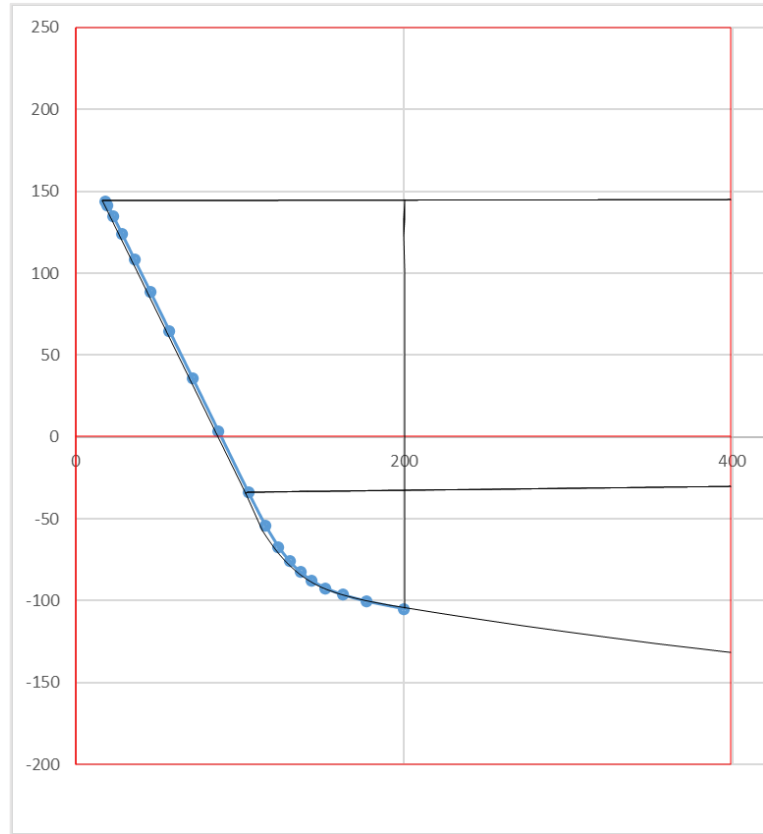


Fig. 36 - Rappresentazione delle curve di Bézier che replicano il dritto di prua di uno scafo con spigolo.

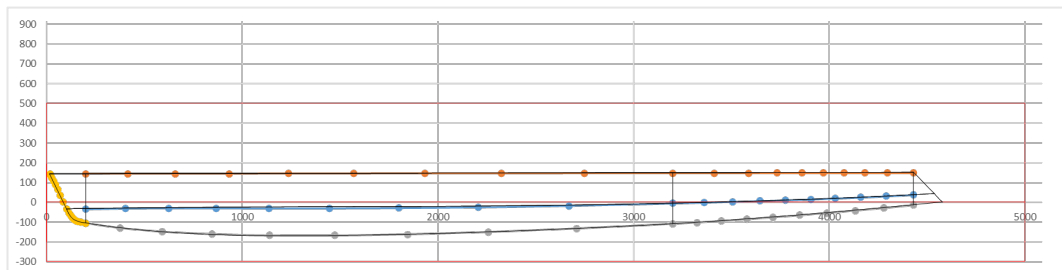


Fig. 37 - Rappresentazione delle curve di Bézier che replicano linee di falchetta, spigolo e chiglia di uno scafo con spigolo.

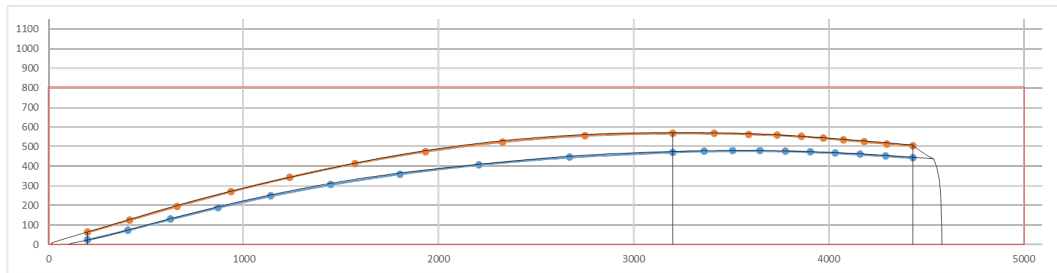


Fig. 38 - Rappresentazione delle curve di Bézier che replicano linee di falchetta e spigolo di uno scafo con spigolo.

Al fine di rendere questo processo intuitivo e rapido, nel programma scritto in Excel, il progettista può avere un immediato riscontro riguardo le modifiche che esegue nel momento in cui cambia la posizione dei punti di controllo di ciascuna curva, gli angoli di tangenza ed anche i valori dei pesi di ciascun punto di controllo. Un esempio dell'interfaccia grafica che mostra come il progettista può eseguire il controllo sulla forma data alle curve è presentata in Fig. 39.

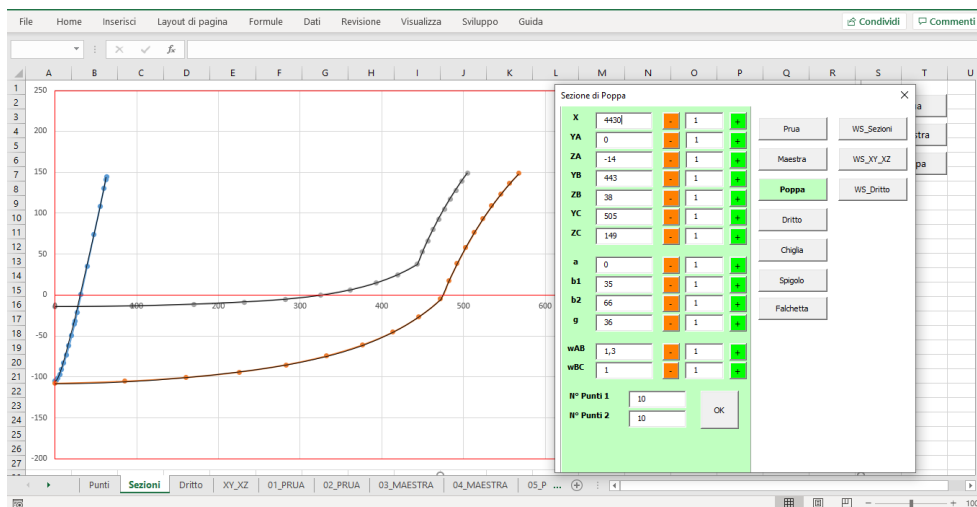


Fig. 39 - Interfaccia grafica in cui sono presenti le curve di Bézier e l'userform mediante la quale il progettista può effettuare le modifiche sulle curve.

In questa fase si conclude il processo di generazione delle curve all'interno dello strumento scritto in VBA per Excel e inizia il processo di integrazione tra i diversi software al fine di analizzare la geometria dello scafo.

## **5. Integrazione degli Strumenti di Progettazione**

Di seguito sono descritti i passaggi nei quali il progettista analizza lo scafo disegnato all'interno del programma scritto in VBA di Excel.

### **Generazione dei file di scambio**

Una volta ottenute le geometrie desiderate per le tre sezioni, la linea di chiglia, di spigolo e di falchetta, si può procedere con la conversione delle informazioni caricate nel programma scritto in Excel per un formato di scambio che può essere importato in un qualunque modellatore CAD.

Per lo studio effettuato, la scelta è ricaduta nel software CREO 4.0 Parametric. Al fine di completare il trasferimento delle informazioni, le curve sono campionate secondo un dato numero di punti che può essere scelto dal progettista, si veda ad esempio Fig. 39 in cui figurano le impostazioni “N° Punti 1” con la quale si definisce la densità dei punti per la curva che inizia nel punto A e termina nel punto B e “N° Punti 2” con la quale si definisce la densità dei punti per la curva che inizia nel punto B e termina nel punto C. A partire da tale definizione del numero di punti secondo il quale suddividere le curve razionali di Bézier, viene creato il file di scambio avente una struttura identificabile in tre colonne: nella prima colonna sono presenti i valori della coordinata lungo l'asse X, nella seconda colonna i valori della coordinata lungo l'asse Y e nella terza colonna quelli relativi alla coordinata lungo l'asse Z. Nel caso specifico, cioè impiegando come modellatore CAD Creo 4.0 Parametric, il tipo di file di scambio generato dal programma scritto in Excel ha come estensione “\*.pts”. In Fig. 40 è mostrato un esempio di file ASCII in cui la struttura dei dati è presentata.

```
03_MAEISTRA.pts - Blocco note di Windows
File Modifica Formato Visualizza ?
3220 0 -104
3220 45.4943267524742 -103.753462603878
3220 88.9395762634455 -103.013850415512
3220 130.335748532914 -101.781163434903
3220 169.682843560879 -100.05540166205
3220 206.980861347341 -97.8365650969529
3220 242.229801892301 -95.1246537396122
3220 275.429665195757 -91.9196675900277
3220 306.58045125771 -88.2216066481994
3220 335.682160078161 -84.0304709141274
3220 362.734791657108 -79.3462603878116
3220 387.738345994552 -74.1689750692521
3220 410.692823090494 -68.4986149584488
3220 431.598222944932 -62.3351800554017
3220 450.454545557868 -55.6786703601108
3220 467.2617909293 -48.5290858725762
3220 482.01995905923 -40.8864265927978
3220 494.729049947656 -32.7506925207756
3220 505.389063594579 -24.1218836565097
3220 514 -15
Linea 1, colonna 1 100% Windows (CRLF) UTF-8
```

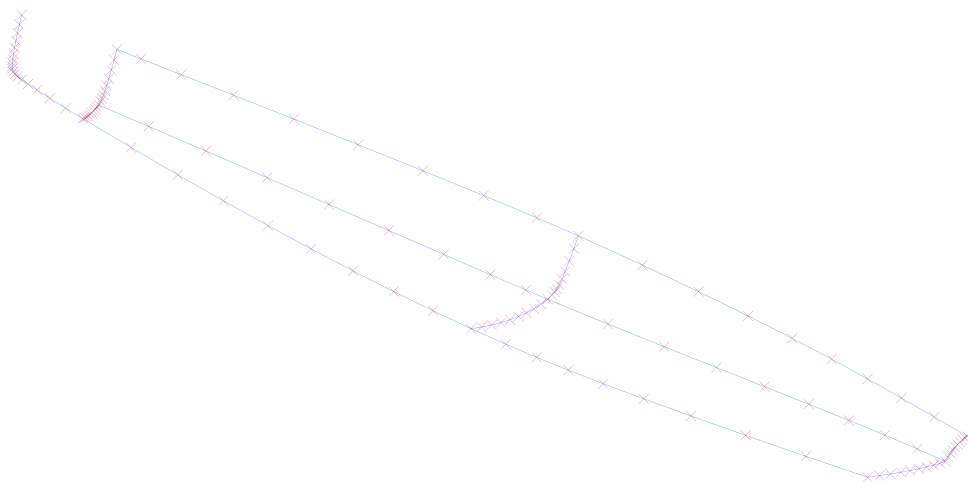
Fig. 40 - Esempio di file di scambio, la curva inferiore della sezione centrale

All'interno del programma scritto in VBA per Excel il progettista può generare file di scambio di tipo IGS (US Product Data Association, 1996) che possono essere importati in quasi tutti i modellatori CAD.

### **Generazione del Modello 3D**

Una volta generato il modello completo dello scafo, mediante il software Creo 4.0 Parametric è possibile impostare una macro, una sequenza di comandi registrati, che permette al progettista di reimportare le informazioni relative alle nuvole di punti aggiornando quindi la forma dello scafo in modo del tutto automatico, cioè senza che il progettista effettui alcuna modifica in

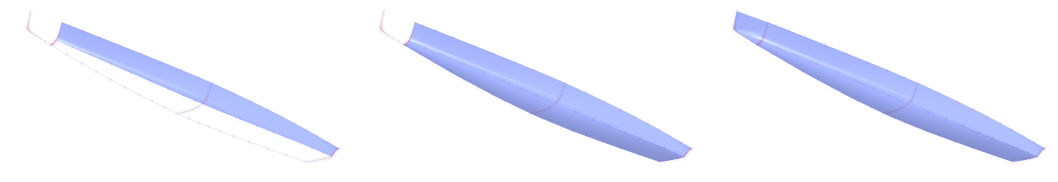
prima persona. Avere a disposizione una macro per effettuare queste operazioni rende il processo di ricostruzione dello scafo molto rapida. Una volta generata la rete di curve e realizzati i file di scambio dati, si hanno a disposizione tutti gli strumenti necessari a trasformare queste informazioni in un modello CAD tridimensionale ma soprattutto a generare la superficie che individua la forma dello scafo appena disegnato. All'interno del modellatore CAD verranno svolte alcune operazioni che sono necessarie per definire il modello tridimensionale dello scafo a partire dalle nuvole di punti presenti nei file "\*.pts". Come primo passo vengono importate le informazioni relative a una data nuvola di punti e attraverso tali punti si costruisce la prima curva, si ripete tale processo per tutte le nuvole di punti fino a quando tutte le linee dello scafo sono state disegnate. In Fig. 41 è mostrato il risultato finale a seguito di questo passaggio.



*Fig. 41 - Importazione delle nuvole di punti per tutte le curve generate e disegno delle curve ad essi interpolanti*

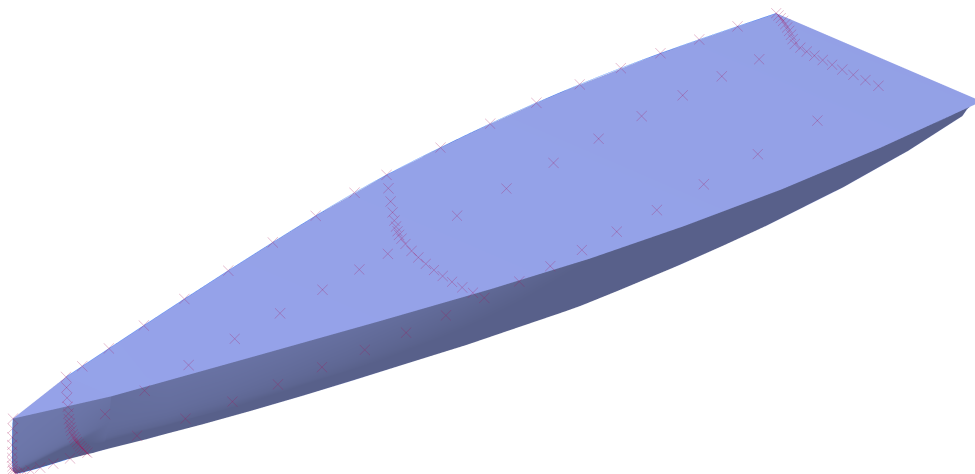
A partire dalla rete di curve che abbiamo tracciato, si creano tre blend di superficie, come si può osservare dalla Fig. 42.





*Fig. 42 - Creazione dei primi tre blend di superficie dello scafo a partire dalla rete di curve.*

Gli ultimi passaggi necessari per ultimare il modello CAD dello scafo consistono nello specchiare le superfici, chiudere la geometria definendo la superficie superiore, la coperta dello scafo, e lo specchio di poppa. Inoltre, utilizzare un potente modellatore CAD permette al progettista di eseguire operazioni di perfezionamento dello scafo come, ad esempio, raccordare le superfici in corrispondenza del dritto di prua o ancora dettagliare le superfici per mezzo di curve tangenti o che rispettino la continuità delle curve importate. Fatte queste operazioni si può procedere unendo tutte le superfici e di queste creare una geometria solida che in seguito verrà utilizzata per il calcolo dei coefficienti adimensionali e dei parametri caratteristici dello scafo mediante i quali il progettista può avere un'idea più chiara della bontà del disegno e che possono essere impiegati per il calcolo in forma chiusa della curva di resistenza dello scafo secondo, ad esempio, (Keuning e Katgert, 2008). In Fig. 43 è mostrato il modello CAD tridimensionale dello scafo.



*Fig. 43 - Modello CAD tridimensionale dello scafo su Creo 4.0 Parametric*

Questo metodo risulta molto efficace in quanto permette al progettista di effettuare le modifiche su Excel e con un solo comando di ottenere la nuova geometria. In ottica di un processo di ottimizzazione automatica, o di uno studio sistematico, ciò permette di eseguire diverse prove in breve tempo e senza coinvolgere processi di modifica manuale. Inoltre, impiegare un così potente modellatore CAD permette al progettista di effettuare una gran quantità di operazioni come raccordi, tagli e analisi qualitative.

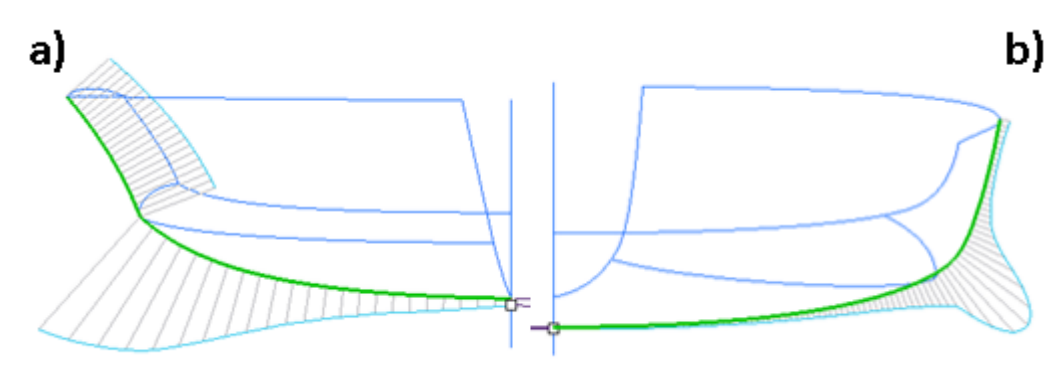
### **Analisi della Curvatura**

Generato il modello CAD, il progettista può procedere con il secondo controllo sulla geometria dopo aver effettuato il primo controllo che, come detto in precedenza, consiste nel verificare che le curve tracciate siano quanto più possibili prossime a quelle presenti nei piani di costruzione che si intende replicare o, nel caso di un nuovo disegno, che rispettino le caratteristiche desiderate.

Gli aspetti principali che si intende monitorare riguardano l'analisi della curvatura delle singole curve e la curvatura che presenta la superficie generata dalla rete di curve definite in Excel. Entrambi i

controlli possono essere integrati all'interno della routine in Excel ma non essendo l'obiettivo di tale lavoro quello di sviluppare un software stand-alone per la progettazione, si è preferito appoggiarsi a software commerciali che presentano tali funzioni e che permettono di visualizzare i dati in maniera intuitiva e diretta.

In Fig. 44 sono presentati due esempi di analisi della curvatura per due tipologie differenti di scafo, a sinistra vi è il plot della curvatura lungo la sezione trasversale di uno scafo con spigolo, mentre a destra è mostrato uno scafo tondeggiante.



*Fig. 44 - Analisi curvatura delle curve che definiscono uno scafo a spigolo (a) e uno scafo tondeggiante (b)*

Come si può osservare dalla Fig. 44, nel caso di uno scafo con spigolo solamente la continuità di ordine G0 è rispettata e di conseguenza il grafico della curvatura per questa tipologia di sezione presenta un salto. Nel caso di uno scafo tondeggiante il grafico di curvatura risulta continuo in quanto, nelle fasi precedenti della progettazione abbiamo imposto lo stesso valore di curvatura nel punto in comune delle due curve, come descritto in Appendice A. Con il metodo presentato, la modifica del numero di punti da impiegare per discretizzare le linee dello scafo avviene in maniera semplice e rapida ed anche la ricostruzione del nuovo modello CAD, pertanto tali modifiche possono essere realizzate in breve tempo.

Il secondo controllo che il progettista può effettuare, consiste nell'analisi della curvatura lungo la superficie creata attraverso la definizione delle curve fondamentali. In Fig. 45 è mostrato un esempio di analisi di curvatura gaussiana della superficie di uno scafo con spigolo.

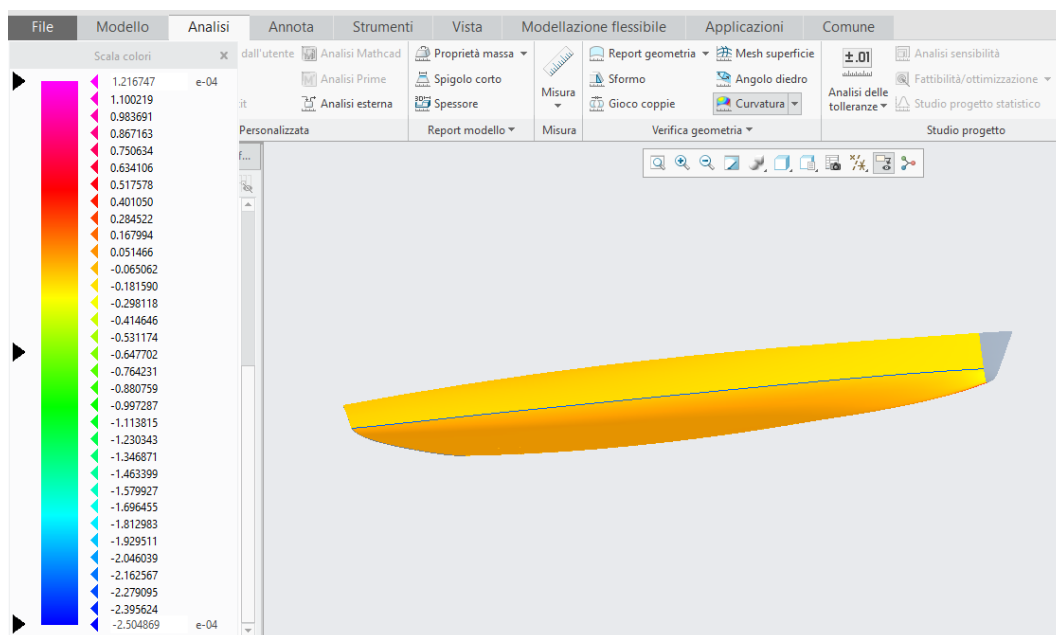


Fig. 45 - Analisi della curvatura gaussiana della superficie di uno scafo con spigolo.

### **Calcolo dei Coefficienti**

Terminata la fase di analisi della curvatura e ottenuta una geometria soddisfacente, il progettista può procedere e individuare i valori caratteristici dello scafo disegnato in termini di coefficienti adimensionali e parametri principali che comunemente vengono presi in considerazione per la valutazione delle caratteristiche di una imbarcazione a vela. Tali coefficienti e parametri sono i principali indicatori delle performance, in prima approssimazione, del modello proposto: il Volume ( $V_C$ ), il Longitudinal Center of Buoyancy (LCB), la Superficie Bagnata ( $S_C$ ), la Lunghezza al Galleggiamento ( $L_{WL}$ ), la Larghezza al Galleggiamento ( $B_{WL}$ ), il Piano di Galleggiamento ( $A_W$ ), il Longitudinal Center of Flotation (LCF), il

Pescaggio ( $T_C$ ), la Massima Area Trasversale ( $A_X$ ), il Coefficiente Prismatico ( $C_P$ ) e il Coefficiente della Sezione Centrale ( $C_M$ ). Tali valori possono essere calcolati all'interno di Creo 4.0 Parametric.

Il progettista può quindi osservare i valori dei coefficienti e dei principali parametri ed avere una visione più analitica della forma data allo scafo. Se i valori non risultano essere in linea con il target di scafo desiderato dal progettista, si può procedere con la modifica dei valori di input al fine di ottenere modifiche in tali coefficienti e parametri. Inoltre, con l'utilizzo di tale strumento risulta semplice effettuare analisi mirate alla ricerca di legami tra proprietà geometriche dello scafo e la loro influenza sui coefficienti comunemente presi come riferimento nel disegno nautico.

### **Studio delle Prestazioni**

#### VPP

Utilizzando i coefficienti, citati sopra, il progettista, applicando il metodo presentato in Appendice B, ricava una prima stima sulle performances dello scafo disegnato e può osservare come questo si comporta per valori di Froude number compresi tra 0.15 e 0.75. In Fig. 46 è mostrato un esempio di curve di resistenza generata impiegando il software Wolfson Unit MTIA dell'Università di Southampton con riferimento al Mini650 progettato dalla start-up Ocore di Fig. 22.

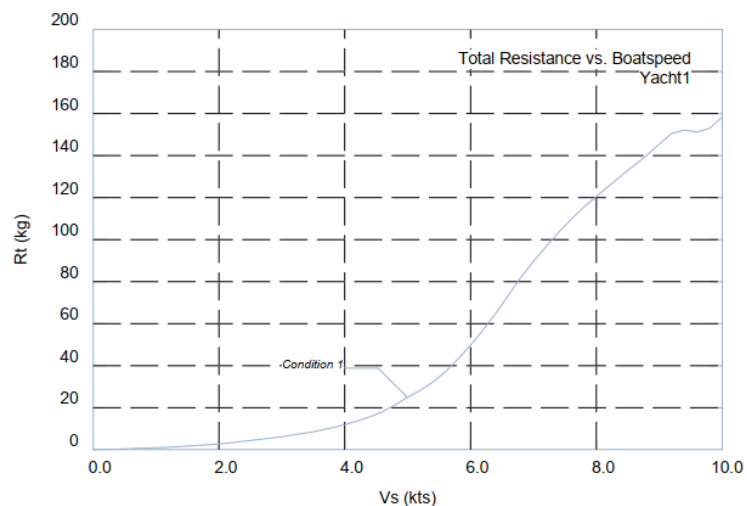


Fig. 46 - Esempio di curva di resistenza calcolata con riferimento a un Mini650.

Il progettista può ricavare anche i grafici delle polari che danno informazioni riguardo le massime velocità raggiungibili da una barca per dato angolo rispetto al vento e per data intensità di vento, in Fig. 47 è mostrato un esempio di plot delle curve di resistenza calcolato durante la progettazione del Mini650 della start-up Ocore.

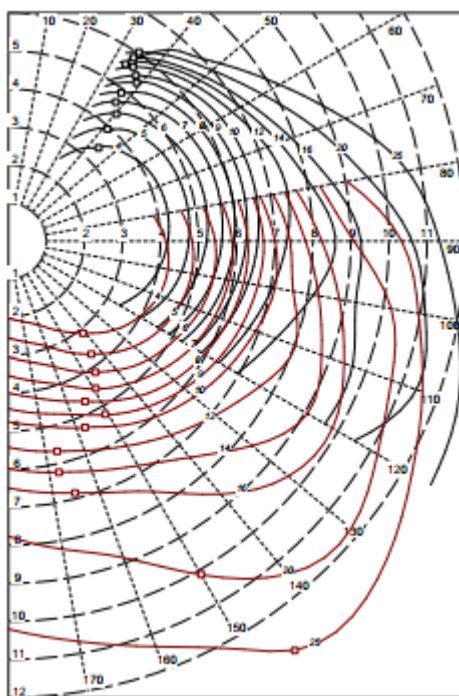
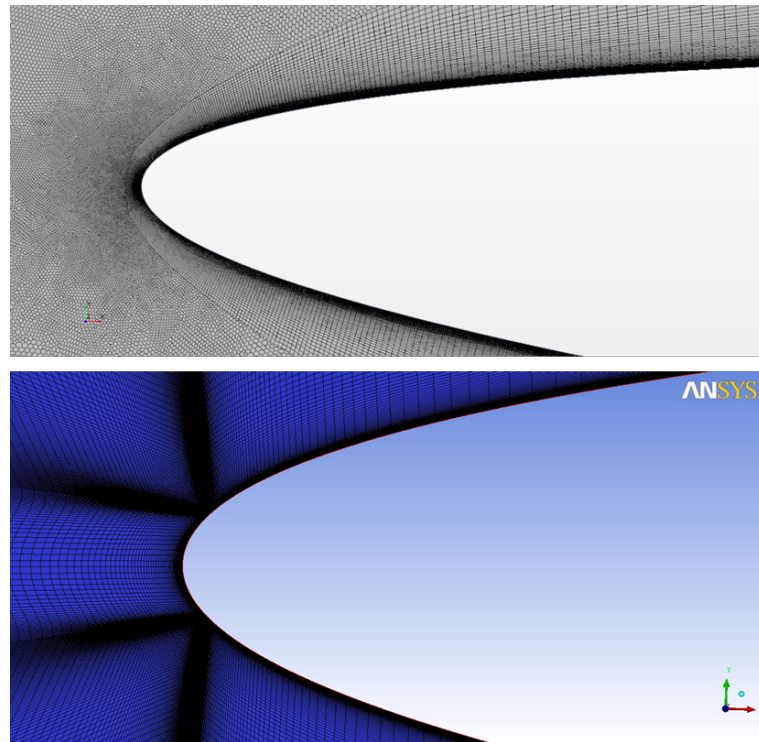


Fig. 47 - Esempio di curve polari calcolate con VPP con riferimento al Mini650 della start-up Ocore.

## CFD

Una volta che un primo disegno CAD dello scafo è stato generato, questo può essere analizzato più nel dettaglio mediante analisi numeriche fluidodinamiche. In ambito nautico sono generalmente utilizzati due principali software: STAR CCM+ ed Ansys. Ambedue sono basati sulla risoluzione delle equazioni RANS ma si differenziano per la tipologia di mesh che possono generare.

Il primo è basato sulla definizione di mesh non strutturate, vedi Fig. 48 (alto), mentre Ansys consente di generare mesh strutturate composte da volumi esaedrici mediante la definizione di opportune topologie, vedi Fig. 48 (basso).



*Fig. 48 - Confronto tra mesh non strutturata (alto) e mesh strutturata (basso).*

In questo lavoro è stato impiegato Ansys Workbench 18.1. In particolare, per la fase di preparazione e generazione della griglia strutturata è stato utilizzato ICEM-CFD, mentre come solutore delle equazioni RANS è stato adottato Fluent. La figura che segue mostra la metodologia adottata per la generazione della mesh e per

la successiva impostazione e soluzione del problema fluidodinamico.

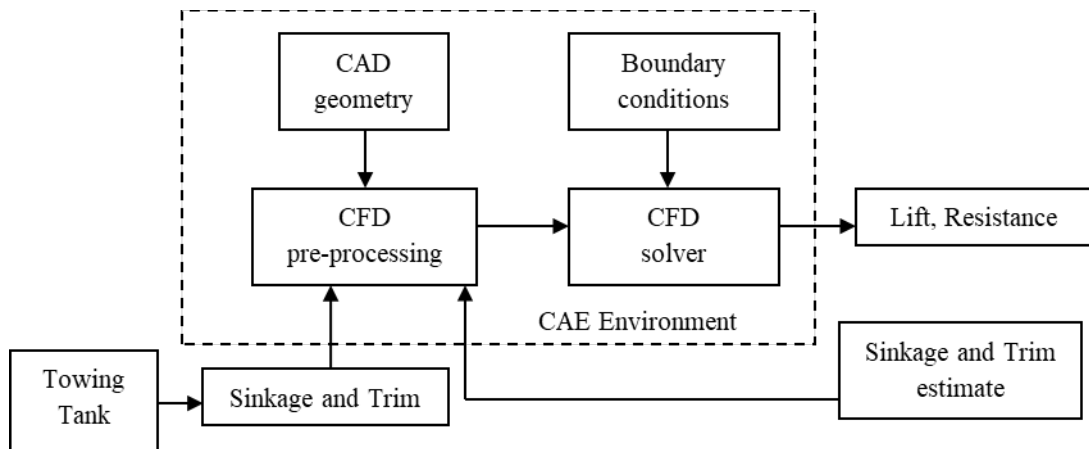


Fig. 49 - Schema di flusso dell'integrazione CAD e CFD.

Come consuetudine negli studi di progettazione nautica, il modello CAD generato è importato nel pre-processore e mediante la suddivisione del dominio in blocchi è possibile definire una struttura del tipo Vertex-Edge-Face associando alla topologia la corrispondente geometria (Point, Curve, Surface). Grazie alla definizione del Vertex-Edge-Face il progettista è in grado di analizzare scafi molto diversi tra loro sia in termini di geometria che di dimensioni in quanto l'associazione tra i vertici, le curve e le facce è puramente parametrica.

In Fig. 50 è mostrato lo schema a blocchi impiegato per la definizione della mesh strutturata. Tale topologia permette di generare la mesh di una qualsiasi geometria di scafo in maniera del tutto automatica grazie alla scrittura di un file di testo (*replay file*) che sfrutta il linguaggio di programmazione di Ansys.



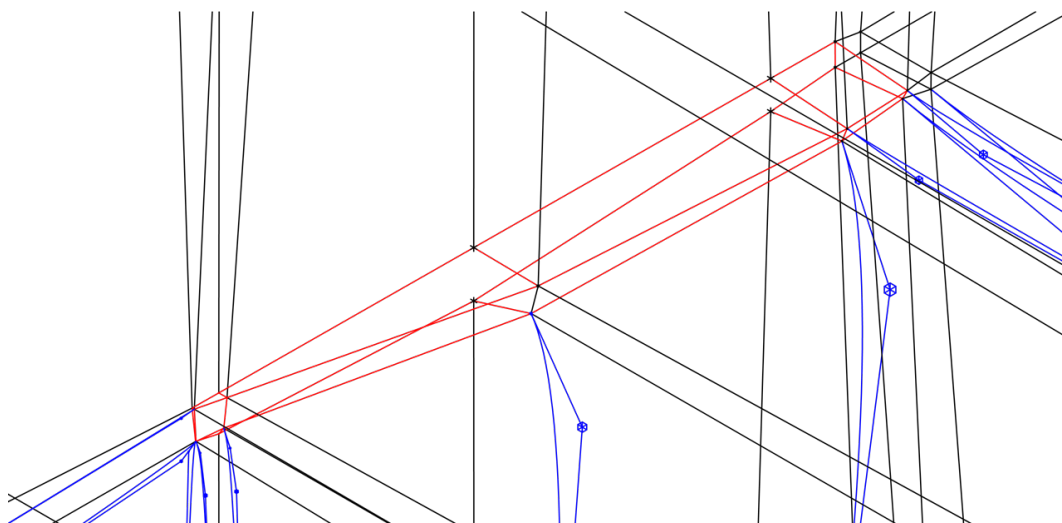


Fig. 50 - Topologia della mesh strutturata a blocchi per le analisi CFD.

In Fig. 51 sono mostrati dei dettagli di mesh generate con lo stesso file di *replay* ma applicato ad uno scafo a carena tonda (sinistra) e ad uno con spigolo (destra).

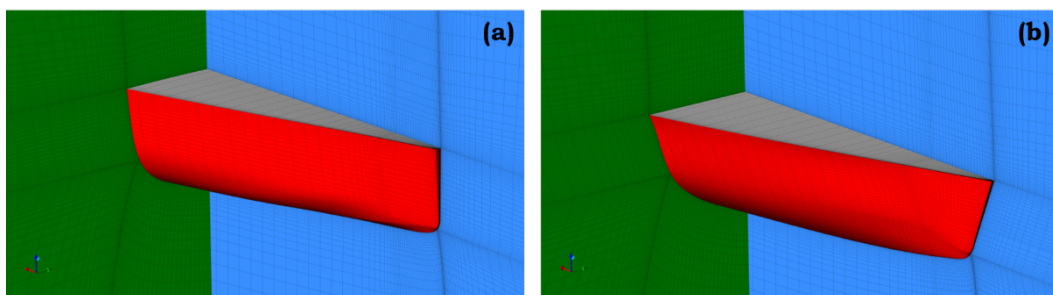
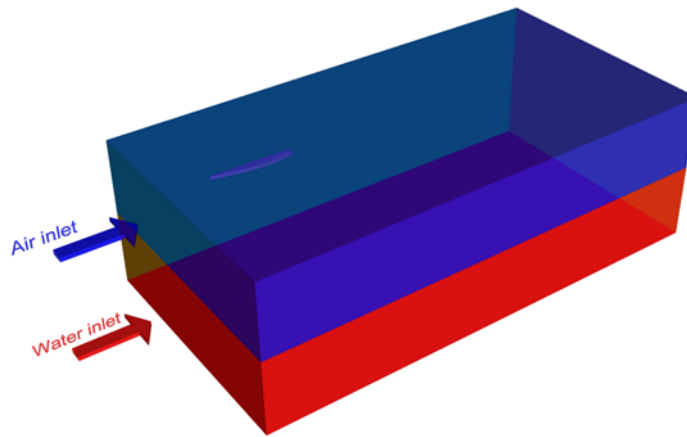


Fig. 51 - Rappresentazione della mesh della parte prossima alla prua di LED (a) e TryAgain (b).

La mesh così realizzata, rappresenta l'input per il solutore e sempre attraverso un file di replay (che Fluent chiama *journaling file*) si impostano le condizioni al contorno e il metodo di risoluzione delle equazioni del moto.

In Fig. 52 è riportato il dominio di calcolo con le relative condizioni al contorno imposte (solamente metà dello scafo è stato modellato in quanto il problema che si intende studiare è simmetrico).



*Fig. 52 - Modello del dominio per lo studio CFD dello scafo.*

### FEM

Una volta effettuate le analisi di tipo fluidodinamico, si procede effettuando analisi di tipo strutturale al fine di accertarsi che la geometria appena disegnata sia in grado di resistere alle sollecitazioni agenti su di essa o in alternativa si seguono le linee guida delle (ISO 12215-5n).

Riguardo la simulazione strutturale, è importante determinare in maniera affidabile il sistema di carichi agenti sulla imbarcazione (Mancuso et al., 2019). Durante la navigazione, l'imbarcazione è soggetta ad un precarico costante (che viene imposto prima di scendere in acqua) sul sistema sartie-albero-strallo, ad un sistema di forze provenienti dall'equilibrio aero-idrodinamico, alla pressione dell'acqua, al peso proprio di ogni componente della barca e di ogni membro di equipaggio. Il valore di precarico di compressione sull'albero viene equilibrato dalla trazione su sartie e strallo e non varia durante la navigazione; esso si trasferisce allo scafo tramite i punti di forza di attacco. In Fig. 53 è mostrato lo schema di tali forze.

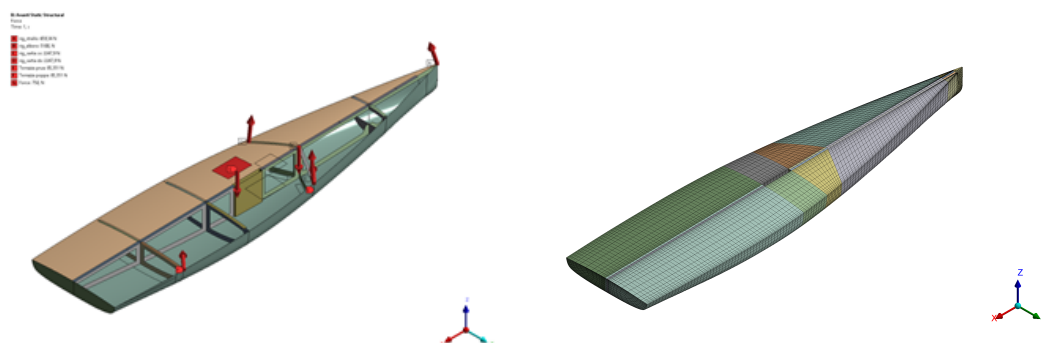


Fig. 53 - Schema delle forze applicate allo scafo e la mesh applicata allo scafo.

Oltre a questi carichi, sull'armo bisogna anche considerare le forze aerodinamiche che si scaricano dalle vele ai punti di attacco allo scafo. Per la determinazione di essi è stato usato un metodo semplificato che consente di stimare i carichi sulle vele dall'equilibrio alla roto-traslazione della barca, note che siano le posizioni dei membri dell'equipaggio. A tal fine è opportuno prendere in considerazione la condizione più svantaggiosa, ovvero quella in cui entrambi i membri dell'equipaggio sono al trapezio. Tramite il software VPP freeware Sailpowercalc, presentato in Appendice D, è possibile risalire, noto il momento raddrizzante e ipotizzata un'andatura di navigazione al traverso, alle componenti di forza esercitate dal vento sulle vele. Tali forze possono essere applicate ai baricentri delle vele e consentono di determinare i carichi sui punti di forza dell'armo che riproducono tali forze. Questo sistema di forze si somma vettorialmente a quello che rappresenta il precarico. Sulle superfici dell'opera viva si impone una distribuzione idrostatica di pressione e al modello completo si applica l'accelerazione di gravità.

Oltre alle forze agenti sullo scafo, è opportuno porre attenzione ai problemi legati alle vibrazioni ricercando i modi propri di vibrare e verificando che questi non interferiscano con le frequenze tipiche di sollecitazione durante la navigazione. Queste possono essere

ricondotte alle forzanti del moto ondoso oppure al *fluttering* delle vele con il vento e solitamente, equivalgono a pochi hertz.

Le singole soluzioni strutturali e modali possono essere considerate insieme in un'unica funzione con diversi pesi (ognuna da un minimo di 0 ad un massimo di 1 a step ad esempio di 0,25). In tal modo si possono determinare configurazioni ottimizzate che prediligono il comportamento strutturale ed altre che prediligono quello modale. Gli obiettivi delle ottimizzazioni, in ogni caso, sono sempre quelli di minimizzare la cedevolezza della imbarcazione per le sollecitazioni strutturali e massimizzare le frequenze di vibrazione per le sollecitazioni modali.

## 6. Caso Studio – Replica e Disegno di uno SKIFF

Il tema principale di questo capitolo sarà incentrato sul processo di validazione del nuovo approccio di progettazione presentato nel capitolo precedente. L'oggetto dello studio saranno due SKIFF che hanno partecipato alle regate organizzate da 1001VELAcup®. Cosa è uno SKIFF? Uno SKIFF (Sail Keep It Flat and Fast) è una barca a vela caratterizzata da pescaggio minimo e dalle linee d'acqua allungate che permettono di sviluppare grandi velocità. In Fig. 54 è mostrato un esempio di SKIFF, in particolare Kyma realizzata dallo Zyz Sailing Team. Kyma ha ottenuto buoni risultati durante le regate di La Spezia. Le linee di Kyma ricalcano alla perfezione le linee di LED in quanto è stato usato lo stesso stampo per la generazione delle carene.



*Fig. 54 - SKIFF durante le regate di 1001VELAcup® a La Spezia*

Il gruppo velico di UniPa, Zyz Sailing Team, partecipa alla manifestazione 1001VELAcup® da oltre 10 anni e ha maturato una

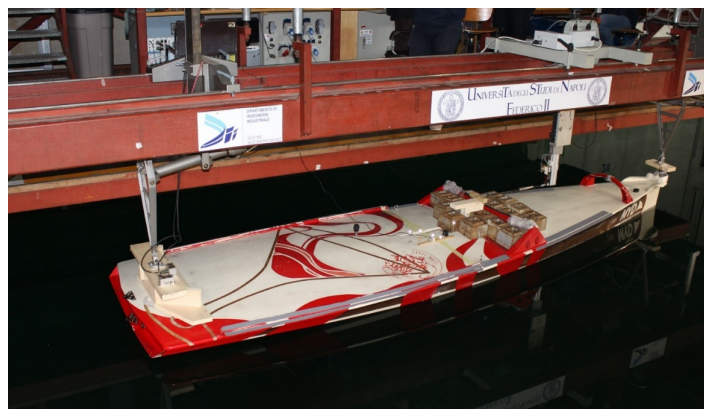
importante esperienza nel campo della progettazione e realizzazione di barche a vela grazie anche alle collaborazioni con diversi atenei tra i quali l'Università Kore di Enna, l'Università Federico II di Napoli e la Chalmers University of Technology.

### **Dati Sperimentali**

Grazie alle strutture messe a disposizione dal Marine HYdrodynamics Research Group dell'Università di Napoli è stato possibile condurre una campagna sperimentale molto interessante che ha prodotto risultati particolarmente rilevanti.

I test sperimentali sono stati effettuati, come accennato in precedenza, presso la vasca navale dell'Università Federico II di Napoli, le cui dimensioni sono 135 x 9 x 4.2 metri e la massima velocità a cui si può muovere il cursore trainante è di 8 m/s. Le barche sono libere di beccheggiare, rollare e sbandare.

Un laser Keyance IL-600 è stato utilizzato per valutare l'affondamento dello scafo. Celle di carico sono state utilizzate al fine di misurare le forze in gioco durante il traino in diverse condizioni. Il trim e l'heel sono stati misurati invece impiegando due inclinometri. In Fig. 55 è mostrato un esempio di come le barche erano equipaggiate per effettuare le prove di tiro in vasca.



*Fig. 55 - Una delle barche che ha partecipato alla manifestazione MIDWINTER prima di una prova di tiro.*

In Fig. 56 e in Tab. 1 sono riportati i risultati della manifestazione MIDWINTER INDOOR RACE in termini di curve di resistenza dell'intera flotta e di classifica comprensiva di tutte le prove effettuate. In particolare, sono state effettuate tre prove a 1.0 m/s, 2.0 m/s e 3.0 m/s del solo scafo, una prova a 3.0 m/s con scafo più timone e deriva e una prova a 3.0 m/s con scafo più timone e deriva con formazione ondosa.

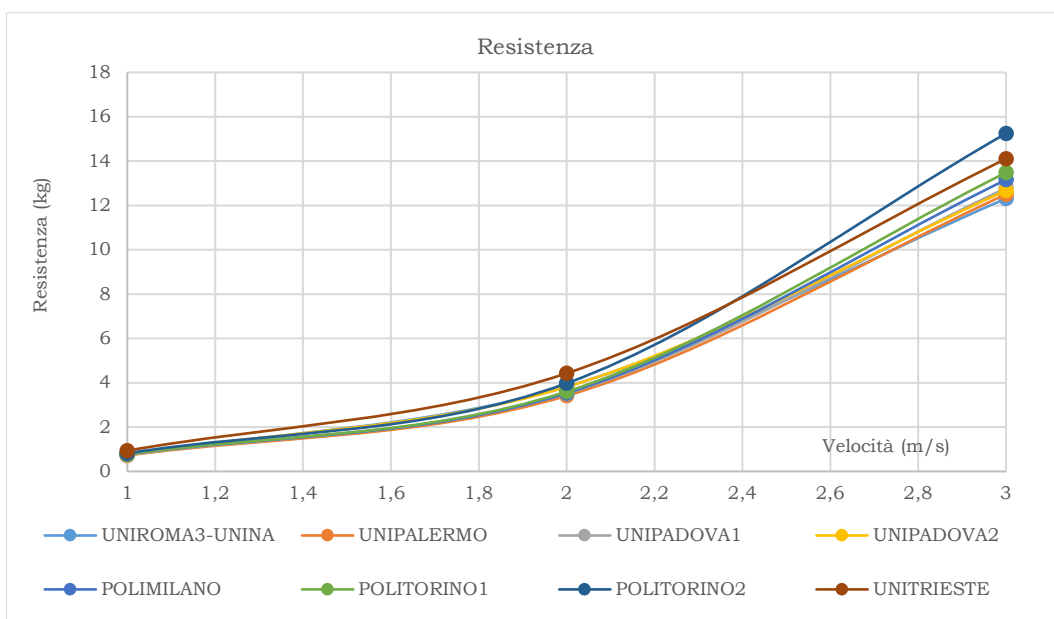


Fig. 56 – Curve di resistenza nelle prove della manifestazione MIDWINTER.

Tab. 1 - Classifica finale della manifestazione MIDWINTER.

POS	TEAM	Punti
1	UNI PALERMO	28
2	UNI ROMA3 – UNI NAPOLI	28
3	UNI PADOVA (1)	27
4	POLI MILANO	23
5	POLI TORINO (1)	19
6	UNI PADOVA (2)	19
7	UNI TRIESTE	18
8	POLI TORINO (2)	6

Come si può osservare da Tab. 1, al termine delle prove in vasca, l'imbarcazione LED, dello Zyz Sailing Team dell'Università di Palermo è risultata vincitrice, nonostante lo stesso punteggio totalizzato da TryAgain, Università Roma3 e Università di Napoli, in quanto per regolamento si è stabilito che la prova a 3 m/s con appendici era la discriminante in tali eventualità e LED si è classificata meglio di TryAgain in questa prova. In Fig. 57 sono mostrati i piani di costruzione e in Fig. 58 sono mostrate in assetto di navigazione le due imbarcazioni LED e TryAgain, da cui si possono osservare le considerevoli differenze nelle linee di disegno.

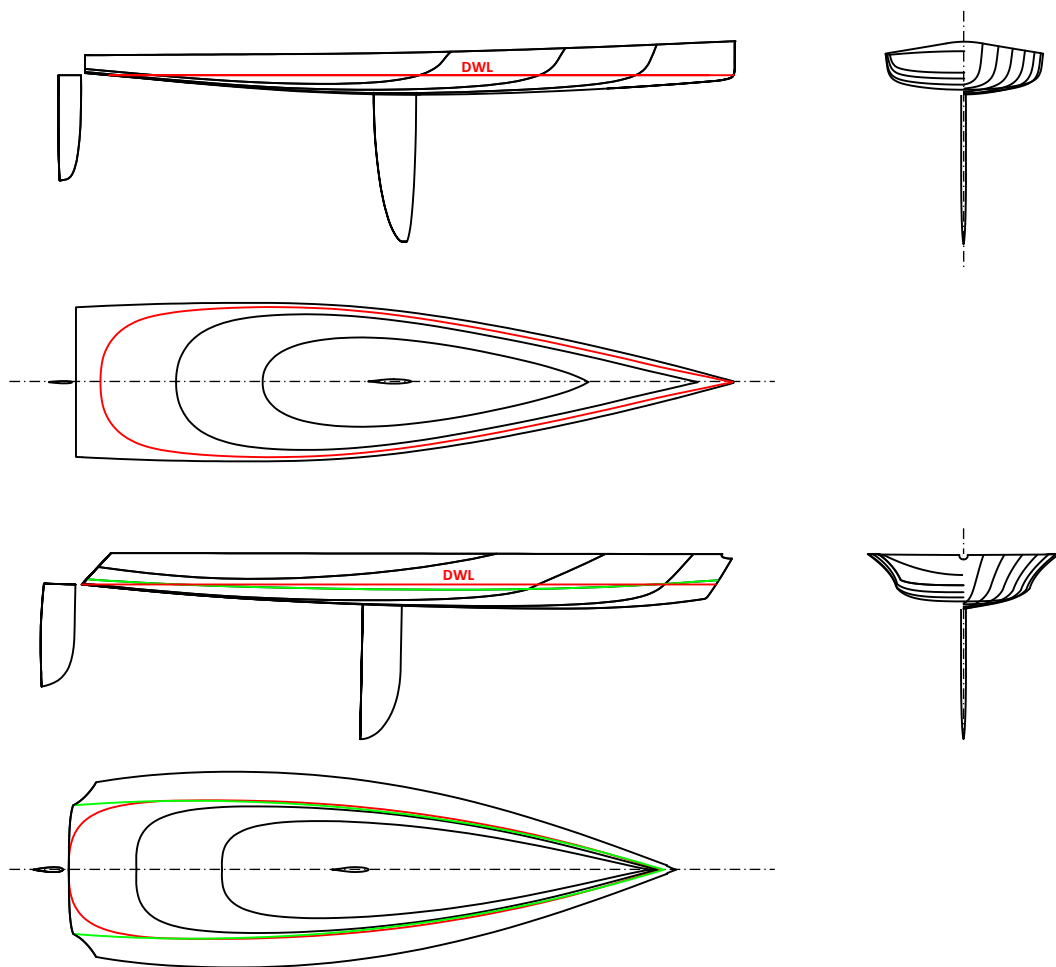


Fig. 57 - Piani di costruzione di uno scafo tondeggiante, LED, (a) e di uno scafo con spigolo, TryAgain, (b)





Fig. 58 - Imbarcazioni in navigazione a sinistra LED e a destra TryAgain.

I test e le successive analisi dell'incertezza sperimentale sono stati condotti seguendo le indicazioni fornite dalle (ITTC, 2014). In Tab. 2 sono esposti i dati relativi alla prova a velocità di traino pari a 2.0 m/s.

Tab. 2 - Risultati test sperimentali LED a 2.0 m/s.

<b>LED</b>	<b>Mean Value</b>	<b>Type A</b>	<b>Type B</b>	<b>Comb. Uncert.</b>	<b>Exp. Uncert.</b>	<b>U<sub>D</sub> %</b>
<b>Vel. m/s]</b>	2.0	0.0001	0.003	0.003	0.007	0.3
<b>Drag [N]</b>	33.47	0.4379	0.056	0.441	0.883	2.6
<b>Sink [mm]</b>	-13.1	0.0900	-0.022	0.093	0.185	-1.4
<b>Trim [deg]</b>	0.1	0.0039	0.000	0.004	0.008	7.9

### **Impostazioni CFD**

Per la risoluzione delle RANS è stato scelto il modello di turbolenza  $k-\varepsilon$  *realizable* e lo schema implicito HRIC (Ansys - Fluent User's Guide) del Volume Of Fluid (VOF) al fine di catturare gli effetti della superficie libera. In studi precedenti (Begovic et al., 2020) è stato peraltro dimostrato come l'utilizzo del modello di turbolenza  $k-\omega$  SST non produce sostanziali differenze che rimangono circoscritte a valori nell'intorno dell'1%.

Come spesso avviene in molti studi ingegneristici che richiedono analisi fluidodinamiche di problemi complessi, la scelta dell'altezza della prima cella (il cosiddetto *wall y+*) riveste un ruolo fondamentale. Valori tipici di  $y^+$  sono di circa 30. Valori troppo elevati potrebbero portare a risultati non attendibili mentre valori più bassi richiederebbero mesh di dimensioni difficilmente compatibili con le comuni potenze di calcolo. Inoltre, tali valori consentono di modellare lo strato limite (il *boundary layer*) impiegando modelli robusti ed affidabili come il *Enhanced wall treatment* di Fluent.

Anche se le simulazioni di scafi in acqua calma possono essere considerate un problema stazionario e dunque indipendente dal tempo, si è preferito utilizzare una formulazione non stazionaria. Le (ITTC, 2011), per questa tipologia di problemi, suggeriscono time step nel range di 0.005-0.01 L/U dove L è una grandezza caratteristica (tipicamente  $L_{WL}$ ) ed U la velocità della barca.

Dopo diversi test è stato scelto un time-step di 0.04 secondi e tutte le simulazioni sono state seguite per circa 160 secondi; tempo di simulazione sufficiente a garantire la convergenza dei risultati sia in termini di residui delle variabili (dell'ordine di  $10^{-5}$ ) sia in termini di deviazione standard della curva di resistenza (dell'ordine dello 0.03%). Con riferimento alla Fig. 52, il dominio computazionale ha dimensioni lungo x, y e z pari a  $5L_{OA}$ ,  $3L_{OA}$  e  $2L_{OA}$  rispettivamente; per quanto riguarda invece le condizioni al contorno, oltre alle superfici di inlet (separate in acqua ed aria così come richiesto dal solutore Fluent) è stato definito un pressure outlet (nella faccia posteriore) ed un symmetry al fine di analizzare solo mezzo scafo viste le condizioni di simmetria geometrica e fluidodinamica.

### **Verifica & Validazione (V&V)**

La procedura è descritta in dettaglio Appendice C. Al fine di risolvere l'Eq.(C24), quattro differenti griglie sono state generate per condurre un'analisi sistematica riguardante l'incertezza relativa alla griglia. Il fattore di scala tra una griglia e la successiva è stato posto pari a  $h = \sqrt[3]{2}$ , in Tab. 3 sono mostrate le caratteristiche delle griglie Fine (F), Medio-Fine (MF), Medio-Grossolana (MG) e Grossolana (G).

*Tab. 3 - Risultati ottenuti a seguito delle analisi numeriche per le quattro griglie.*

<b>Griglia</b>	<b>(F)</b>	<b>(MF)</b>	<b>(MG)</b>	<b>(G)</b>
<b>N° Celle</b>	2.40 10 <sup>6</sup>	1.18 10 <sup>6</sup>	5.46 10 <sup>5</sup>	3.01 10 <sup>5</sup>
<b>h</b>	1	1.27	1.59	1.98
<b>Resist. [N]</b>	32.19	33.05	33.18	34.06

Applicando il Least Square Root (LSR) method è stato possibile calcolare i valori relativi alle incertezze delle quattro griglie, vedi Tab. 4, e tracciare la curva di regressione, vedi Fig. 59.

*Tab. 4 - Risultati dello studio sull'incertezza numerica condotti utilizzando il Least Square Root method per le quattro griglie.*

<b>N° . Celle</b>	<b>h<sub>i</sub></b>	<b>S<sub>i</sub> [N]</b>	<b>U<sub>G</sub> [N]</b>	<b>U<sub>G</sub> (%)</b>
2.40 M	1	32.19	0.927	2.9
1.18 M	1.27	33.05	2.070	6.5
0.546 M	1.59	33.18	2.160	6.8
0.201 M	1.98	34.06	3.090	9.7

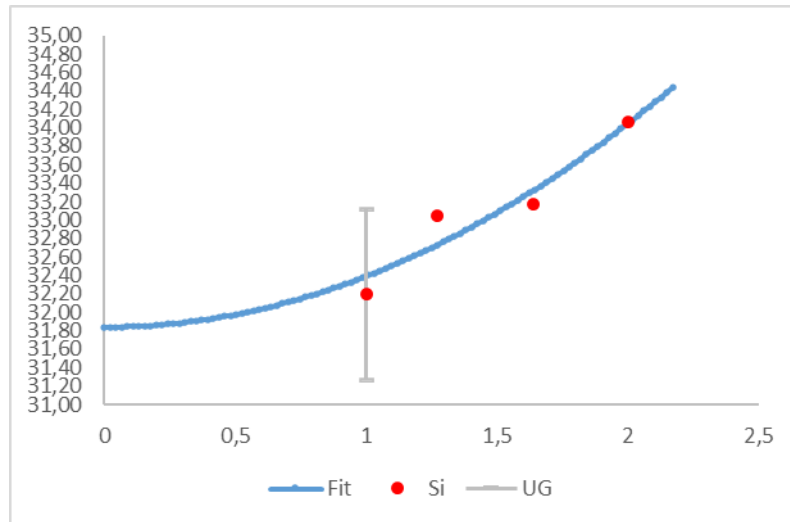


Fig. 59 - Curva di regressione calcolata utilizzando il Least Square Root method basato su quattro griglie.

Una volta effettuati tutti i calcoli relativi al processo di verifica, è possibile ottenere il valore dell'incertezza di validazione mediante l'Eq.(10):

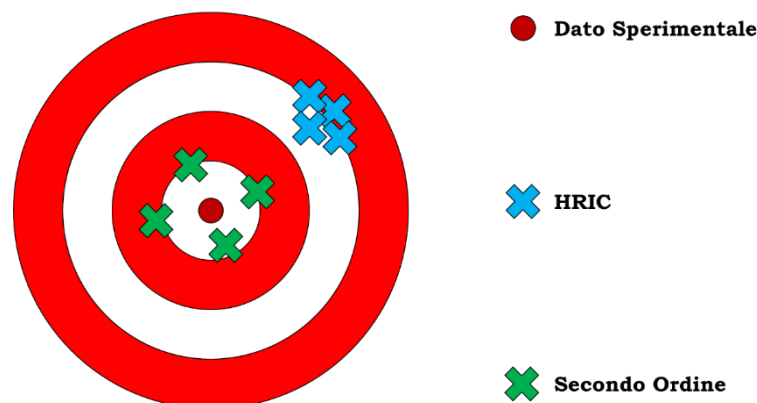
$$U_{VAL} = 3.9 \% \quad (10)$$

Ed anche il valore dell'errore con l'Eq.(11):

$$E = 3.8 \% \quad (11)$$

Come detto in Appendice C, se l'errore risulta essere minore dell'incertezza di validazione il modello è validato.

Al fine di indagare altre formulazioni del modello numerico è stato effettuato il processo di verifica e validazione anche mediante lo schema del secondo ordine relativo al modello implicito del VOF. A valle del processo si è potuto constatare come questa seconda metodologia permette di validare meglio il modello, la differenza tra l'incertezza di validazione ( $U_{VAL}$ ) e l'errore (E) è maggiore ma di contro l'incertezza numerica ( $U_{SN}$ ) cresce, in Fig. 60 è mostrato tale concetto in veste grafica.



*Fig. 60 - Confronto tra diversi modelli numerici aventi diversi valori di incertezza numerica, il modello del Secondo Ordine (verde) e il modello HRIC (blu).*

Lo scopo del metodo presentato è quello di poter confrontare le differenze tra diversi scafi e pertanto si è deciso di mantenere il modello HRIC, in tal maniera l'incertezza numerica rimane più bassa ed è possibile trarre conclusioni con risultati che si discostano tra loro anche di piccole quantità.

### **Ricostruzione di Scafi Esistenti**

Una volta verificato e validato il modello numerico sulla base dei dati sperimentali a disposizione, si può procedere alla replica degli scafi seguendo il metodo esposto nel paragrafo precedente.

Avendo validato il modello numerico sulla base di dati sperimentali, è possibile valutare condizioni di navigazione differenti da quelle investigate con le prove sperimentali.

Per il calcolo dell'affondamento (sink) e dell'assetto (trim), in alternativa a dati sperimentali si può applicare un metodo (Yang et al., 2000) mediante il quale è possibile determinare tali valori in maniera tale che l'equilibrio delle forze e dei momenti sia verificato, Eq. (3). In (Yang et al., 2000) sono presentate le Eq. (12) e Eq. (13) che possono essere impiegate per il calcolo del corretto assetto dell'imbarcazione.

$$\Delta Z = \frac{L}{\rho g A_0^w} \quad (12)$$

$$\Delta \alpha = \frac{M}{\rho g A_2^w} \quad (13)$$

Dove  $\Delta Z$  è la correzione dell'affondamento, traslazione lungo l'asse Z, mentre  $\Delta \alpha$  è la correzione dell'assetto, rotazione intorno ad un asse passante per l'LCF e parallelo all'asse Y.  $L$  e  $M$  sono la spinta lungo Z e il momento dovuto al trim.  $A_0^w$  è l'area al galleggiamento e  $A_2^w$  è il corrispondente momento di inerzia intorno all'asse y.

I valori da assegnare alla spinta e al momento sono calcolati mediante analisi CFD. L'area e il momento di inerzia invece sono calcolati mediante il software di CAD. Quando si utilizzano i valori sperimentali di sink e trim non si ottiene l'equilibrio delle forze e dei momenti in ambito numerico, come è noto in letteratura (Viola et al., 2014), risultando in un valore differente del lift e quindi di conseguenza della resistenza.

Volendo analizzare condizioni di navigazione che non sono presenti nelle prove sperimentali si è applicato il metodo di (Yang et al., 2000) al fine di assicurare per tutte le prove la veridicità dell'Eq. (3). In Tab. 5 e Tab. 6 sono mostrati i coefficienti dei modelli CAD originali e quelli ricostruiti con il nuovo metodo proposto.

Tab. 5 – Confronto tra i coefficienti dello scafo di LED Originale e Ricostruito

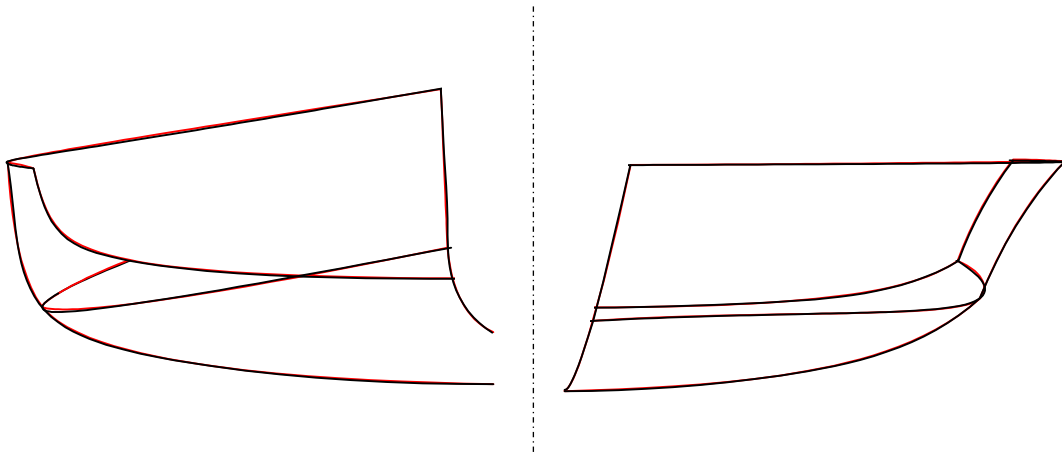
<b>Coeff.</b>	<b>Originale</b>	<b>Ricostruito</b>	<b>Diff. (%)</b>
V <sub>C</sub>	0.257	0.258	+ 0.39
LCB	2.48	2.47	- 0.40
S <sub>C</sub>	3.49	3.48	- 0.29
L <sub>WL</sub>	4.46	4.46	0.00
B <sub>WL</sub>	1.05	1.05	0.00
A <sub>W</sub>	3.21	3.20	- 0.31
LCF	2.69	2.70	+ 0.37
T <sub>C</sub>	0.14	0.14	0.00
A <sub>X</sub>	0.107	0.107	0.00
C <sub>P</sub>	0.539	0.540	+ 0.39
C <sub>M</sub>	0.728	0.728	0.00

Tab. 6 – Confronto tra i coefficienti dello scafo di TRYAGAIN Originale e Ricostruito

<b>Coeff.</b>	<b>Originale</b>	<b>Ricostruito</b>	<b>Diff. (%)</b>
V <sub>C</sub>	0.262	0.263	+ 0.38
LCB	2.25	2.26	+ 0.44
S <sub>C</sub>	3.46	3.50	+ 1.16
L <sub>WL</sub>	4.49	4.49	0.00
B <sub>WL</sub>	0.95	0.95	0.00
A <sub>W</sub>	3.10	3.14	+ 1.29
LCF	2.60	2.60	0.00
T <sub>C</sub>	0.17	0.17	0.00
A <sub>X</sub>	0.094	0.093	- 1.06
C <sub>P</sub>	0.621	0.629	+ 1.46
C <sub>M</sub>	0.582	0.576	- 1.06

Come è possibile notare le differenze percentuali tra i valori dei coefficienti sono molto bassi e ciò conferma la validità del nuovo metodo.

In Fig. 61 è possibile confrontare le curve degli scafi ricostruiti (in rosso) e della geometria originale (in nero). A sinistra sono mostrate le curve di LED, scafo tondeggiante, mentre a destra le curve di TryAgain, scafo con spigolo.



*Fig. 61 – Confronto tra le curve degli scafi ricostruiti (rosso) e originali (nero) di LED (sinistra) e TryAgain (destra).*

In Fig. 62 sono mostrate invece le curve longitudinali (verde), le linee d'acqua (blu) e diverse sezioni (rosso) dei due scafi ricostruiti, LED a sinistra e TryAgain a destra. Come è possibile notare le curve risultano essere bene avviate lungo tutto lo scafo.



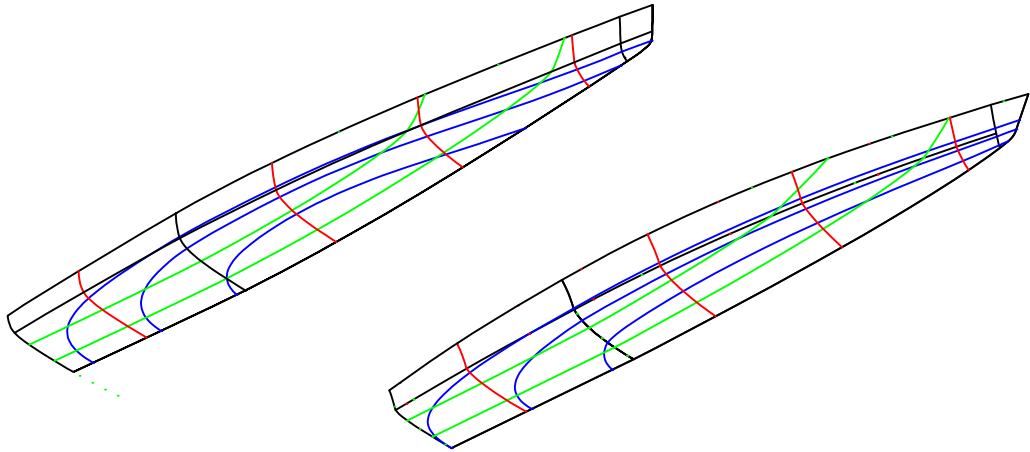


Fig. 62 – Linee longitudinali (verde), linee d’acqua (blu) e sezioni (rosso) di LED (sinistra) e TryAgain (destra).

Infine, in Fig. 63 sono mostrate le curve di resistenza calcolate con il metodo esposto in (Keuning e Katgert, 2008).

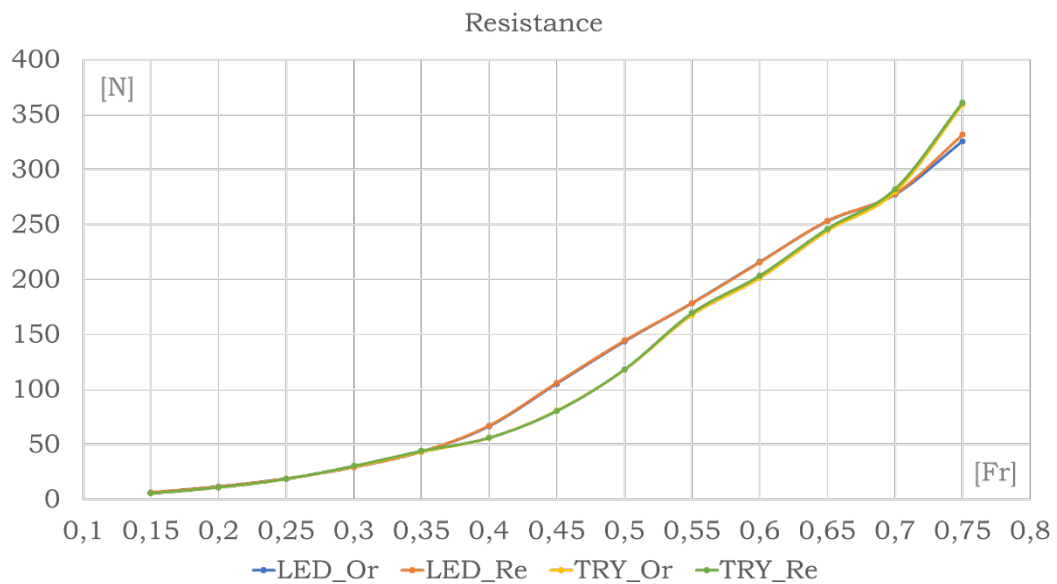


Fig. 63 – Curve di resistenza calcolate mediante (Keuning e Katgert, 2008) per gli scafi originali e ricostruiti di LED e TryAgain.

Come è possibile osservare anche dalla Fig. 63, la ricostruzione degli scafi mediante il nuovo metodo presentato risulta essere molto precisa sia dal punto di vista dei coefficienti, sia della geometria ed anche per il calcolo delle curve di resistenza.

Come già descritto nel capitolo precedente, una volta generato il modello CAD è possibile procedere con ulteriori analisi, per esempio di tipo fluidodinamico al fine di avere una conferma o comunque effettuare un'analisi più completa che permette di trarre numerose conclusioni che non si potrebbero ottenere mediante una risoluzione in forma chiusa.

Al termine delle analisi CFD, in Fig. 64 sono mostrate le curve di resistenza relative ai modelli CAD di LED originale (LED\_Or) e di LED ricostruita (LED\_Re).

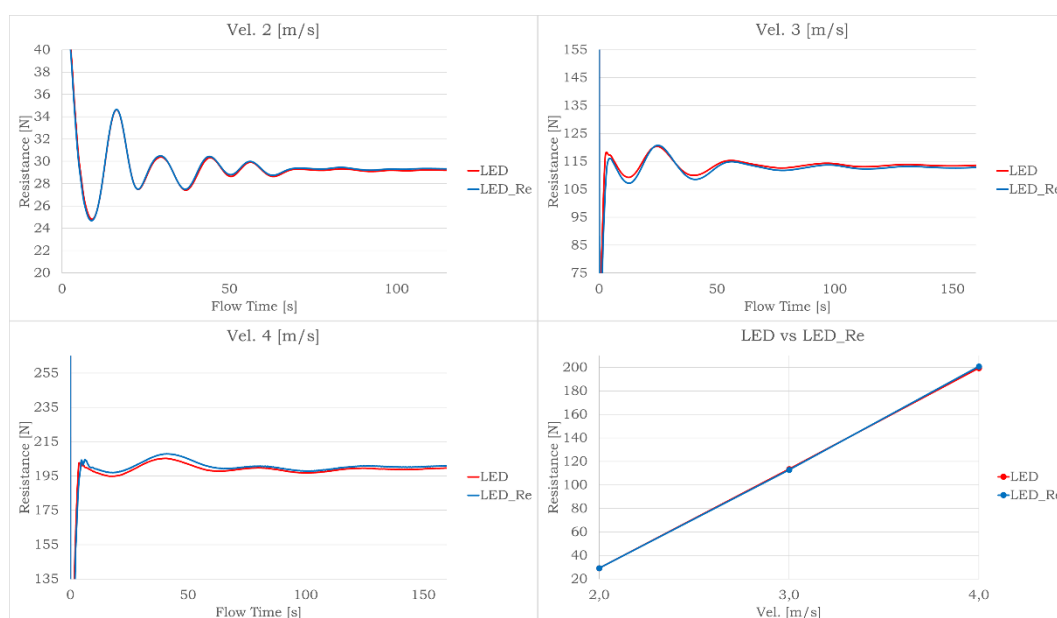
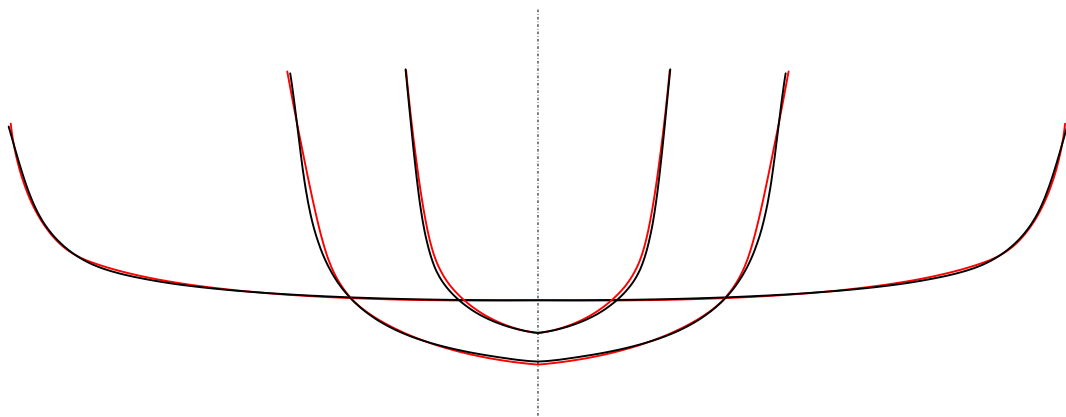


Fig. 64 – Plot dell'andamento della resistenza per diverse condizioni di navigazione 2, 3 e 4 m/s e il confronto tra LED originale e LED ricostruita.

Per tutte le simulazioni effettuate la deviazione standard calcolata considerando le ultime 400 iterazioni è molto bassa, intorno allo 0.05%. Come si può notare dalla Fig. 64 vi è una differenza tra i valori calcolati di LED originale e di LED ricostruita; tale differenza è comunque di valore molto ridotto discostandosi, rispettivamente, dello 0.03%, 0.57% e 0.68% per i casi a velocità 2, 3 e 4 m/s. Le differenze riscontrate possono essere individuate in piccole differenze nella geometria ricostruita e ciò è perfettamente

comprensibile in quanto per la definizione dei due scafi sono state utilizzate tecniche completamente differenti.

Come si osserva in Fig. 65, in cui sono mostrate tre sezioni (diverse da quelle utilizzate nel procedimento descritto nel paragrafo “Ricostruzione di Scafi Esistenti”) delle due versioni di LED a  $X=500$  mm,  $X=1000$  mm e  $X=4000$  mm, le piccole variazioni, risultano influenti ai fini del calcolo della resistenza, essendo sull'opera morta prevalentemente.



*Fig. 65 – Confronto delle sezioni a 500 mm, 1000 mm e 4000 mm di LED Originale (nero) e LED Ricostruita (rosso)*

Considerazioni simili si possono trarre per la replica di TryAgain.

### **Disegno di un Nuovo Scafo**

In Fig. 66 si può osservare il confronto tra i risultati di LED e TryAgain.

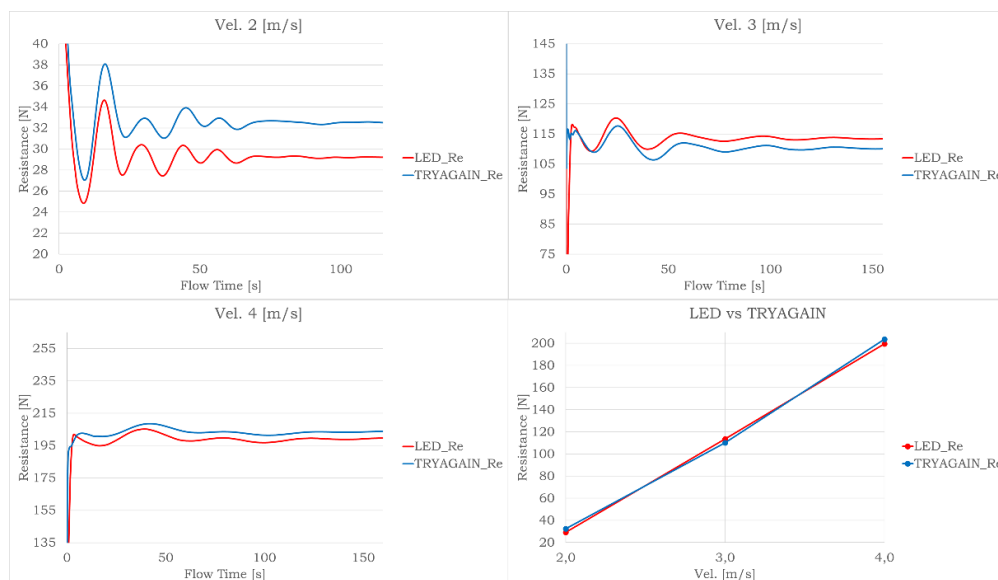


Fig. 66 – Plot dell'andamento della resistenza per diverse condizioni di navigazione 2, 3 e 4 m/s e il confronto tra LED e TryAgain.

A seconda delle condizioni di navigazione LED o TryAgain risulta essere migliore in maniera alternata.

Al fine di comprendere quali siano le motivazioni alla base di queste differenze, dopo aver testato il nuovo metodo con la ricostruzione di due scafi esistenti, si è condotto un attento studio mirato a riconoscere quali caratteristiche delle due imbarcazioni portavano risultati positivi per diverse condizioni di navigazione. In tal senso, in Tab. 7 sono mostrati i coefficienti di LED e TryAgain.

Tab. 7 – Coefficienti di LED e TryAgain

<b>Coeff.</b>	<b>LED</b>	<b>TryAgain</b>	<b>Diff. (%)</b>
V <sub>C</sub>	0.258	0.263	+ 1.90
LCB	2.47	2.26	- 9.29
S <sub>C</sub>	3.48	3.50	+ 0.57
L <sub>WL</sub>	4.46	4.49	+ 0.67
B <sub>WL</sub>	1.05	0.95	- 10.53
A <sub>W</sub>	3.20	3.14	- 1.91
LCF	2.70	2.60	- 3.85
T <sub>C</sub>	0.14	0.17	+ 17.65
A <sub>X</sub>	0.107	0.093	- 15.05
C <sub>P</sub>	0.540	0.629	+ 14.15
C <sub>M</sub>	0.728	0.576	- 26.39

Come si può osservare dai valori dei coefficienti, le due imbarcazioni presentano marcate differenze soprattutto in determinati valori come ad esempio LCB, B<sub>WL</sub>, T<sub>C</sub>, A<sub>X</sub>, C<sub>P</sub> e C<sub>M</sub>.

Non ha senso agire su C<sub>P</sub> e C<sub>M</sub> in quanto questi due parametri sono dipendenti dalle altre grandezze come mostrato in Eq.(4) ed in Eq.(5).

In Fig. 67 sono mostrate delle ipotetiche curve di resistenza calcolate modificando solamente uno dei coefficienti di LED sostituendone il valore con quello di TryAgain.

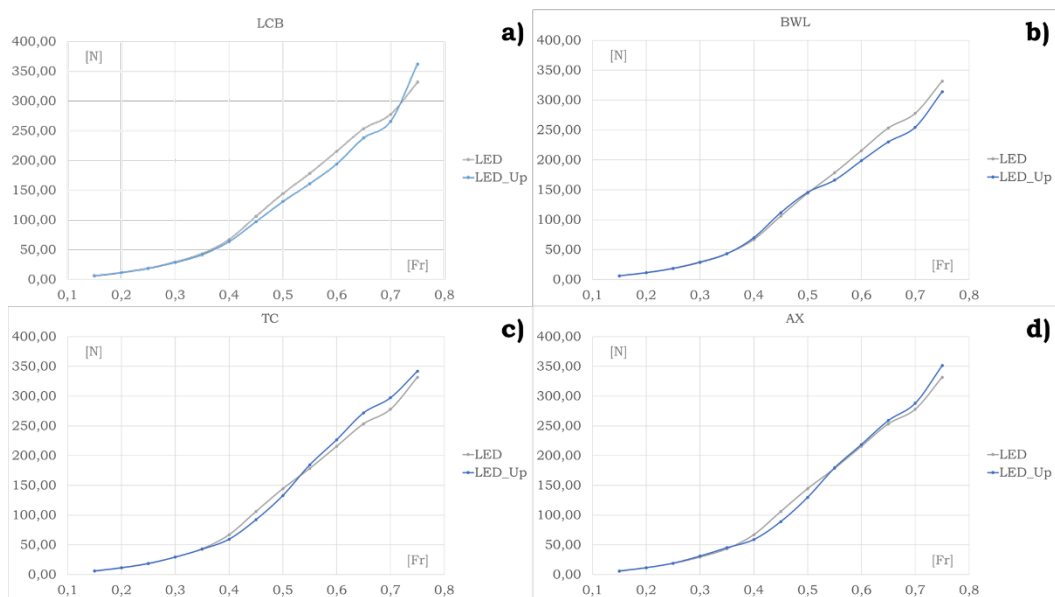


Fig. 67 – Ipotetiche curve di resistenza al variare di LCB (a), BWL (b), TC (c) e AX (d).

Come è possibile osservare dalla figura precedente, vi sono considerevoli differenze tra le curve rappresentate e ognuno dei coefficienti comporta vantaggi e svantaggi differenti per diverse condizioni di navigazione. Dalla Fig. 67 (a) si può osservare come l'LCB abbia maggiori effetti per valori di Froude da 0.45 in poi mentre non si notano considerevoli effetti per valori di Froude bassi. In Fig. 67 (b) sono visibili gli effetti di BWL a partire da valori di Froude di circa 0.55 mentre non si apprezzano variazioni per bassi valori di Froude. In Fig. 67 (c) è presentato il trend del  $T_C$  ed è interessante notare come per valori medio bassi di Froude si abbia un miglioramento, o un peggioramento, delle performance mentre per valori medio alti di Froude il suo effetto sia inverso. Infine, in Fig. 67 (d) sono mostrati gli effetti di  $A_X$  per il quale si osserva un andamento analogo a quello visto per  $T_C$ , anche se in questo caso i maggiori effetti si hanno principalmente per Froude medio bassi mentre risultano meno marcati per Froude medio alti. A partire da queste informazioni e dalle conclusioni tratte nello studio (Begovic et al., 2020) in cui sono state confrontate LED e TryAgain sia dal punto di vista sperimentale sia numerico, si è

cercato di trarre il meglio dai due scafi al fine di ottenere un nuovo scafo che fosse performante in condizioni di vento leggero, come LED, e che si avvicinasse quanto più possibile alle performance di TryAgain in condizioni di vento teso.

A seguito di diversi affinamenti e analisi, nei quali si sono investigate numerose soluzioni dalle quali si è potuto osservare in che misura le modifiche fatte in termini geometrici si riflettono sui valori dei coefficienti e questi sui valori della resistenza per date condizioni di navigazione. In particolare, si è constatato come sia molto difficile modificare la geometria dello scafo e, con tali operazioni, avere un effetto mirato su un solo coefficiente. Ciò costringe il progettista ad effettuare un elevato numero di esperimenti per definire una superficie ben avviata e che si proponga come un modello migliorato rispetto allo scafo di riferimento considerato. Al termine di tale ricerca, si è trovata una configurazione che riesce a beneficiare degli effetti positivi di entrambe le barche; tale nuovo disegno prende il nome di LED\_UP\_06. In Tab. 8 sono mostrati i coefficienti delle tre imbarcazioni.

Tab. 8 – Coefficienti di LED, TryAgain e LED\_UP\_06

<b>Coeff.</b>	<b>LED</b>	<b>TryAgain</b>	<b>LED_UP_06</b>
V <sub>C</sub>	0.258	0.263	0.259
LCB	2.47	2.26	2.48
S <sub>C</sub>	3.48	3.50	3.39
L <sub>WL</sub>	4.46	4.49	4.48
B <sub>WL</sub>	1.05	0.95	0.995
A <sub>W</sub>	3.20	3.14	3.08
LCF	2.70	2.60	2.71
T <sub>C</sub>	0.14	0.17	0.16
A <sub>X</sub>	0.107	0.093	0.107
C <sub>P</sub>	0.540	0.629	0.540
C <sub>M</sub>	0.728	0.576	0.689

Mentre in Fig. 68 è mostrato il piano di costruzione di LED\_UP\_06 e in Fig. 69 l'assonometria con evidenziate le sezioni, le linee longitudinali e le linee d'acqua.

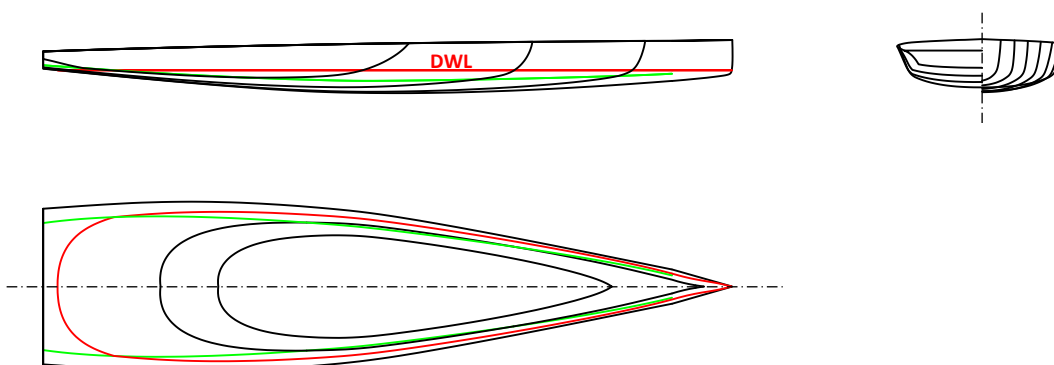


Fig. 68 – Piano di costruzione di LED\_UP\_06



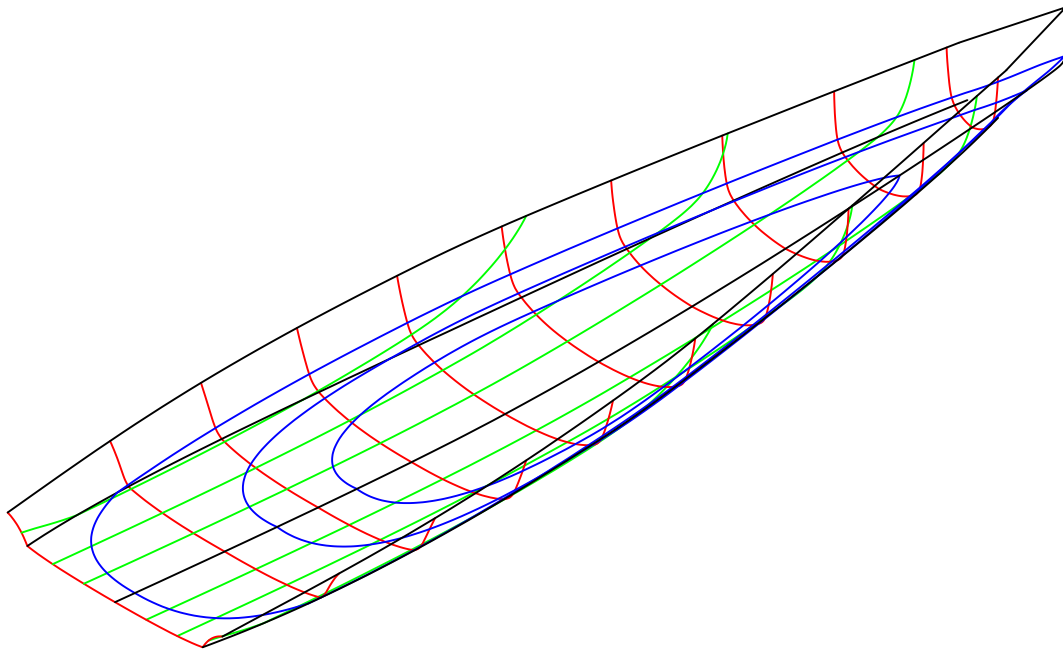


Fig. 69 - Assonometria di LED\_UP\_06, in cui sono mostrate le sezioni (rosso), le linee longitudinali (verde) e le linee d'acqua (blu).

Infine, in Fig. 70 è mostrato l'andamento della curva di resistenza di LED\_UP\_06 confrontata con le curve di resistenza di LED e TryAgain.

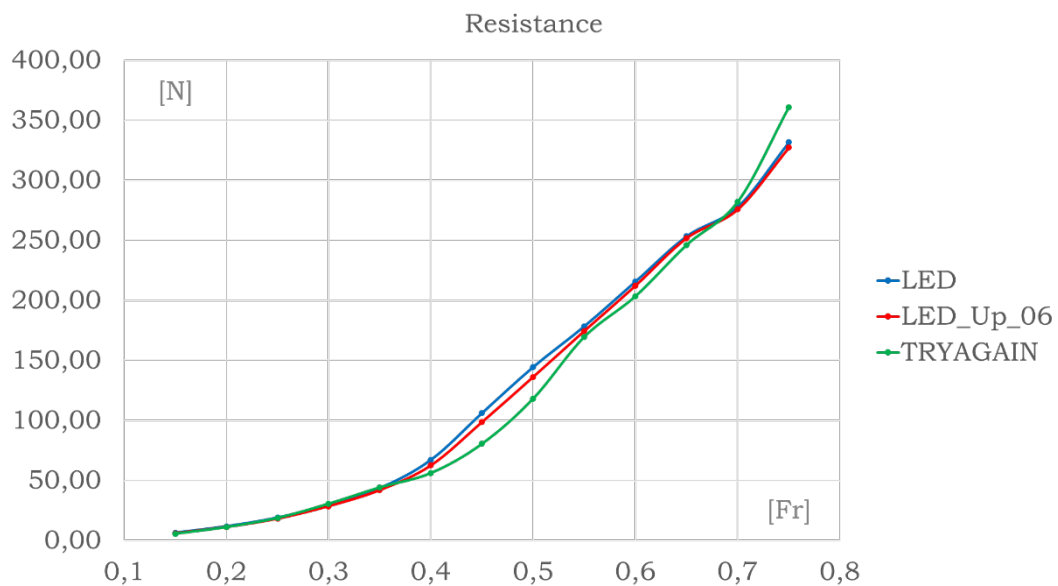


Fig. 70 - Confronto tra le curve di resistenza di LED (blu), LED\_UP\_06 (rosso) e TryAgain (verde)

Da tale grafico è possibile notare come LED\_UP\_06 mostri dei vantaggi rispetto a LED per valori di Froude elevati ma al contempo riesca a seguire lo stesso andamento di LED a Froude bassi.

Al fine di ottenere più informazioni riguardo tale nuova geometria è stato condotto uno studio di tipo CFD e i risultati sono mostrati in Fig. 71.

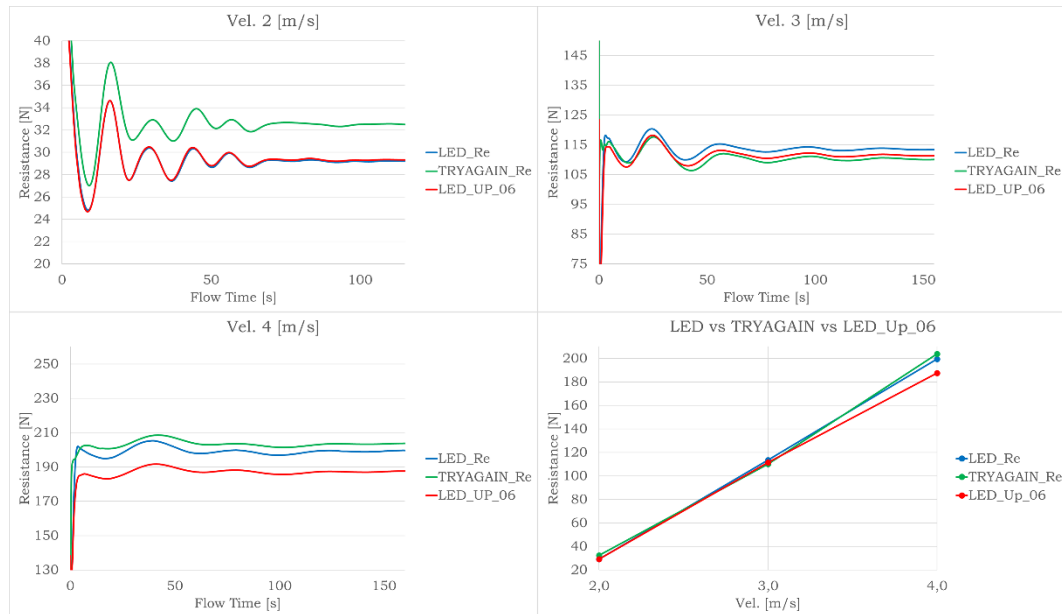


Fig. 71 – Plot dell'andamento della resistenza per diverse condizioni di navigazione 2, 3 e 4 m/s e il confronto tra LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_UP\_06 (rosso).

A supporto dei risultati riguardanti il semplice valore della resistenza dello scafo, mediante appositi software di post processing del CFD è possibile estrarre numerose informazioni aggiuntive che ci permettono di comprendere meglio tali risultati. In Tab. 9 sono mostrati i valori della resistenza delle tre imbarcazioni scomposte nelle due componenti di attrito e di pressione. La componente di attrito è una forza viscosa dovuta alla superficie bagnata dello scafo, la componente di pressione tiene in considerazione gli effetti della pressione sullo scafo e della formazione ondosa generata dallo scafo nel suo moto.

Tab. 9 - Risultati numerici della resistenza di attrito, pressione e totale di LED, TryAgain e LED\_UP\_06

<b>Vel.</b> <b>[m/s]</b>	<b>LED</b>			<b>TryAgain</b>			<b>LED_UP_06</b>		
	<b>Fri.</b>	<b>Pre.</b>	<b>Tot.</b>	<b>Fri.</b>	<b>Pre.</b>	<b>Tot.</b>	<b>Fri.</b>	<b>Pre.</b>	<b>Tot.</b>
1.0	5.70	1.50	7.20	5.50	2.06	7.56	5.70	1.50	7.20
2.0	22.06	7.13	29.19	21.40	11.10	32.50	21.30	7.90	29.20
3.0	51.30	62.30	113.60	48.60	61.50	110.10	49.20	62.30	111.50
4.0	68.40	131.10	199.50	83.30	120.50	203.80	62.90	124.70	187.60

Osservando la Tab. 9 si evince che a 4.0 m/s LED\_UP\_06 presenta interessanti caratteristiche. In particolare, facendo riferimento alla componente di pressione della resistenza, questo scafo si colloca esattamente a metà tra LED e TryAgain, mentre per quanto riguarda la componente di attrito presenta valori molto simili a LED ed in più di valore inferiore a quest'ultima.

Dalla somma delle due componenti, emerge che LED\_UP\_06 si propone come uno scafo ottimale per tali condizioni di navigazione, poiché riesce a mantenere buone caratteristiche anche per velocità più ridotte risultando migliore di LED e molto prossima a TryAgain.

In Fig. 72, Fig. 73 e in Fig. 74 sono mostrati i plot del coefficiente di attrito lungo gli scafi di LED, TryAgain e LED\_Up\_06 rispettivamente per le condizioni a 2 m/s, 3 m/s e 4 m/s. Questi permettono di comprendere in quali zone l'attrito abbia maggiore effetto e dal confronto delle mappature lungo lo scafo si nota come LED\_UP\_06 si avvicini molto a LED riuscendo comunque a cogliere i vantaggi di TryAgain in alcune zone della parte anteriore dello scafo. In Fig. 75, Fig. 76 e Fig. 77 è mostrato il confronto tra le altezze d'onda nell'intorno degli scafi di LED, TryAgain e LED\_UP\_06 per le condizioni di navigazione rispettivamente di 2 m/s, 3 m/s e 4 m/s. In Fig. 78 è mostrato l'andamento della pressione lungo la linea al galleggiamento per le condizioni di navigazione a 2 m/s, 3 m/s e 4 m/s per le tre imbarcazioni LED,

TryAgain e LED\_Up\_06. Le maggiori differenze si trovano a 3 m/s dove, con riferimento alla Fig. 78 alto si può notare un calo di pressione collocato in corrispondenza dello specchio di poppa di TryAgain rispetto alle altre due imbarcazioni risultando in un aumento della vorticosità.

In Fig. 79 e in Fig. 80 è mostrata la formazione ondosa di LED, TryAgain e LED\_Up\_06 con velocità rispettivamente di 3 m/s 3 4 m/s e per tre diverse distanze dall'asse longitudinale dello scafo.

In Fig. 81 è mostrato il confronto tra l'andamento della pressione a 3 m/s di LED, TryAgain e LED\_Up\_06.

Dall'insieme dei risultati presentati nelle precedenti figure riguardanti l'andamento della pressione lungo lo scafo è possibile notare la similitudine di LED\_UP\_06 con LED e le differenze che vi sono con TryAgain. In Fig. 81 si può osservare come per tutte e tre le imbarcazioni si abbia un andamento molto simile nella parte posteriore dello scafo. Nella parte anteriore invece si nota la discordanza degli andamenti delle curve che rappresentano l'andamento della pressione lungo la chiglia delle tre barche; LED e LED\_UP\_06 mantengono un andamento simile mentre TryAgain presenta valori più elevati della pressione e ciò è imputabile al maggiore affondamento nella parte anteriore di questo scafo rispetto agli altri due.

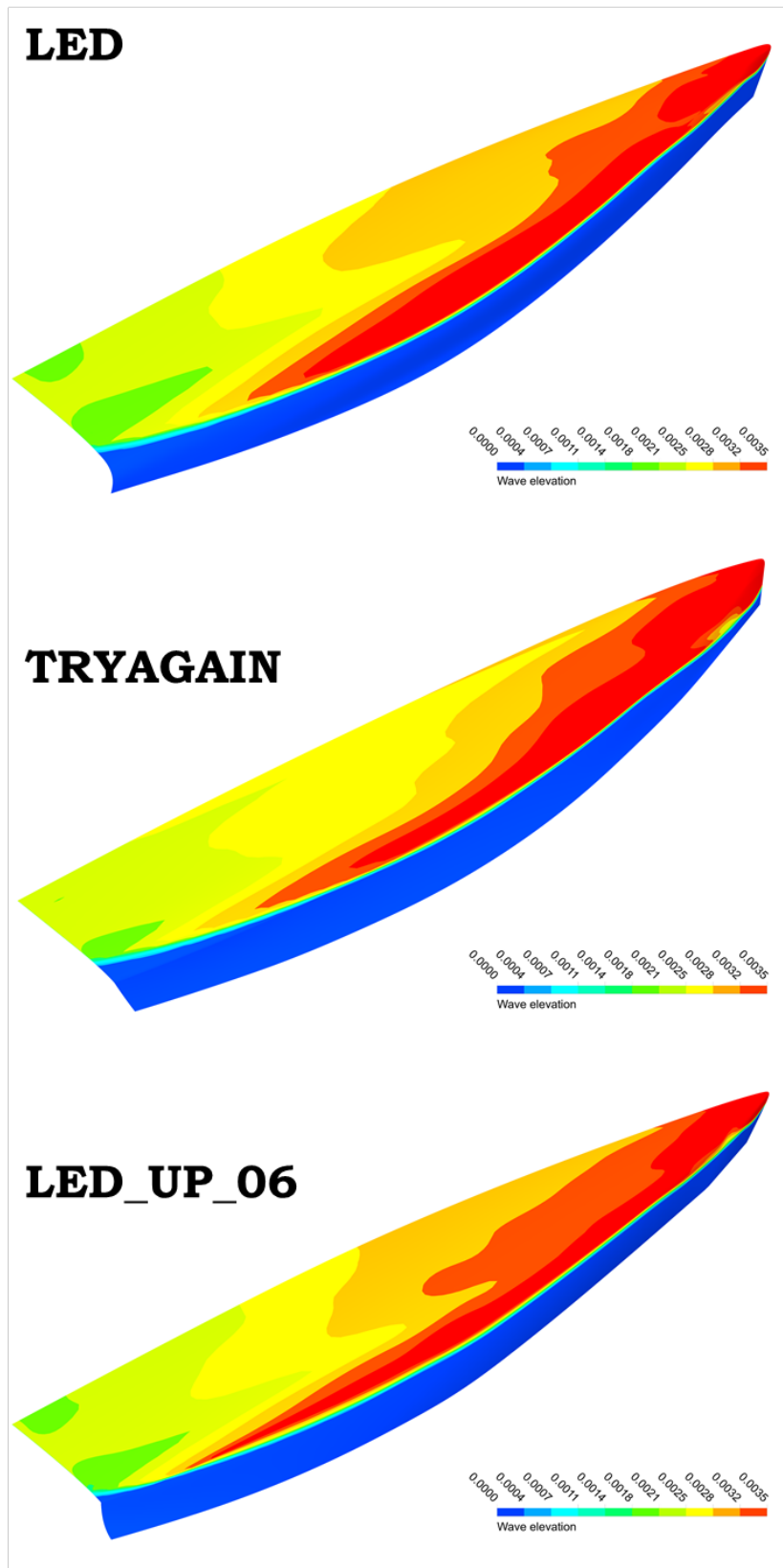


Fig. 72 - Confronto tra la distribuzione del coefficiente di attrito a 2 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_Up\_06 (basso)

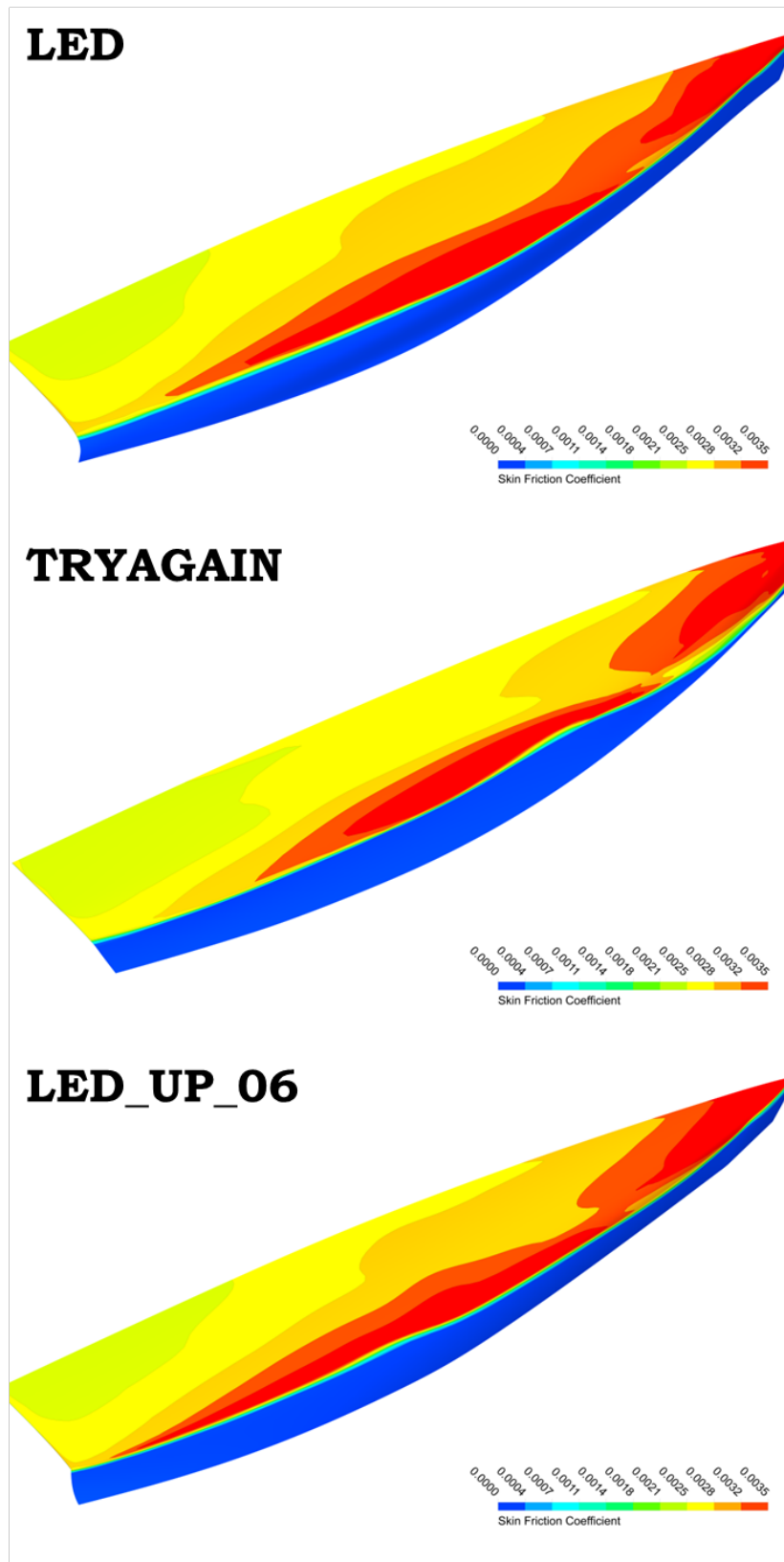


Fig. 73 - Confronto tra la distribuzione del coefficiente di attrito a 3 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_Up\_06 (basso)

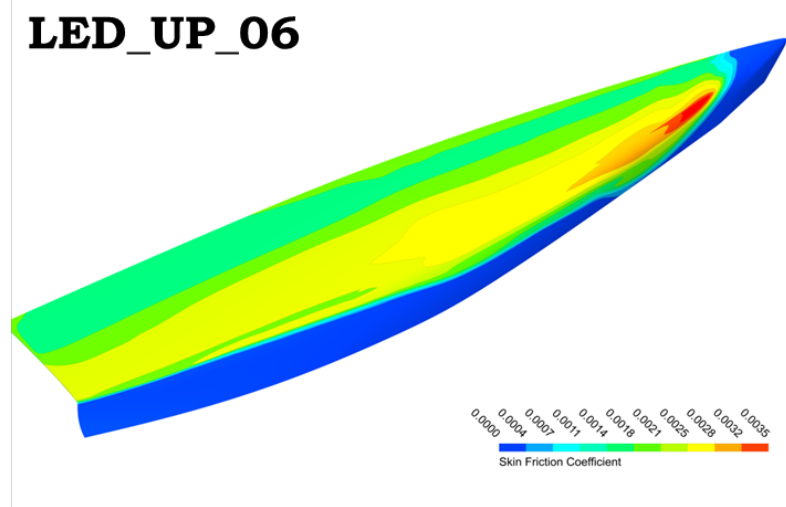
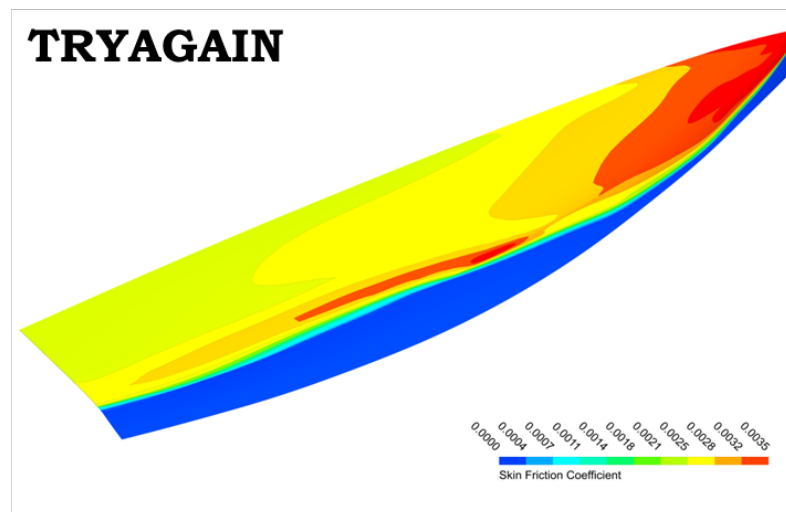
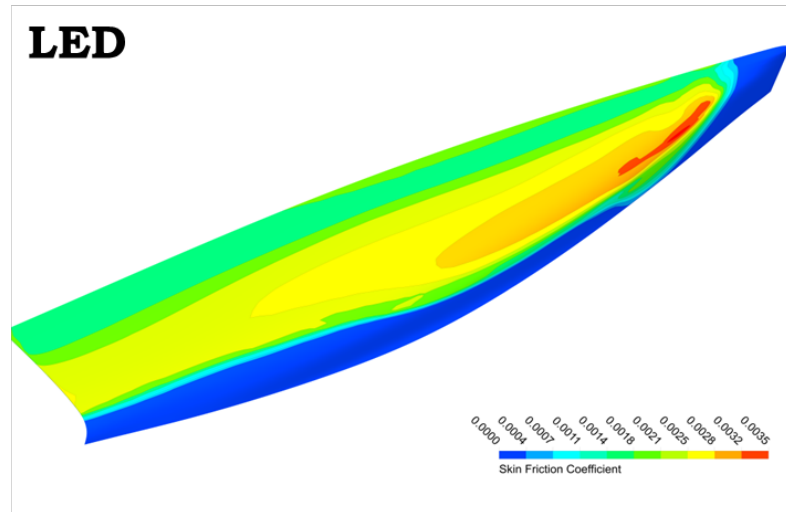


Fig. 74 - Confronto tra la distribuzione del coefficiente di attrito a 4 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_Up\_06 (basso)

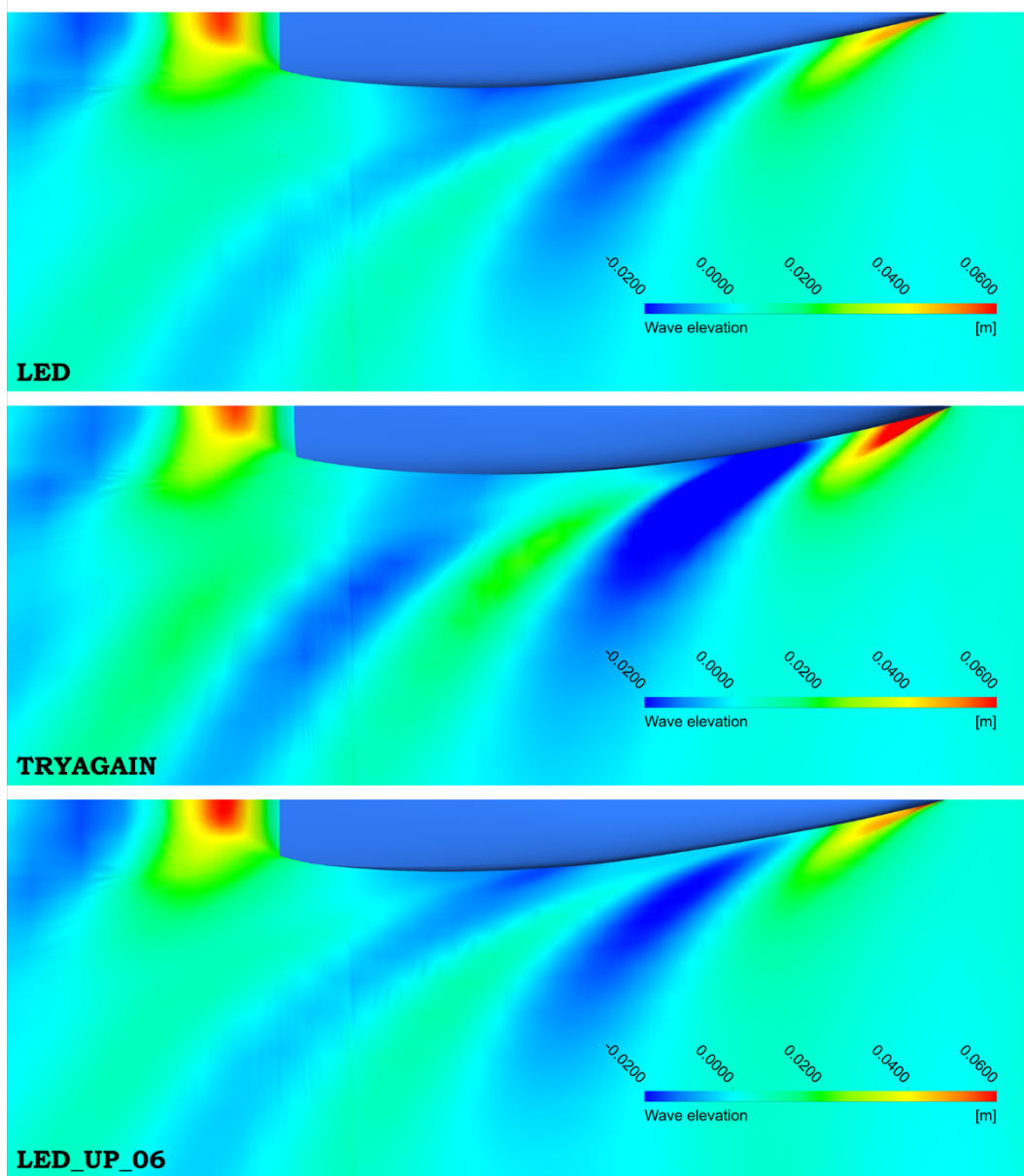


Fig. 75 - Confronto tra le altezze d'onda nell'intorno dello scafo a 2 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_UP\_06 (basso).



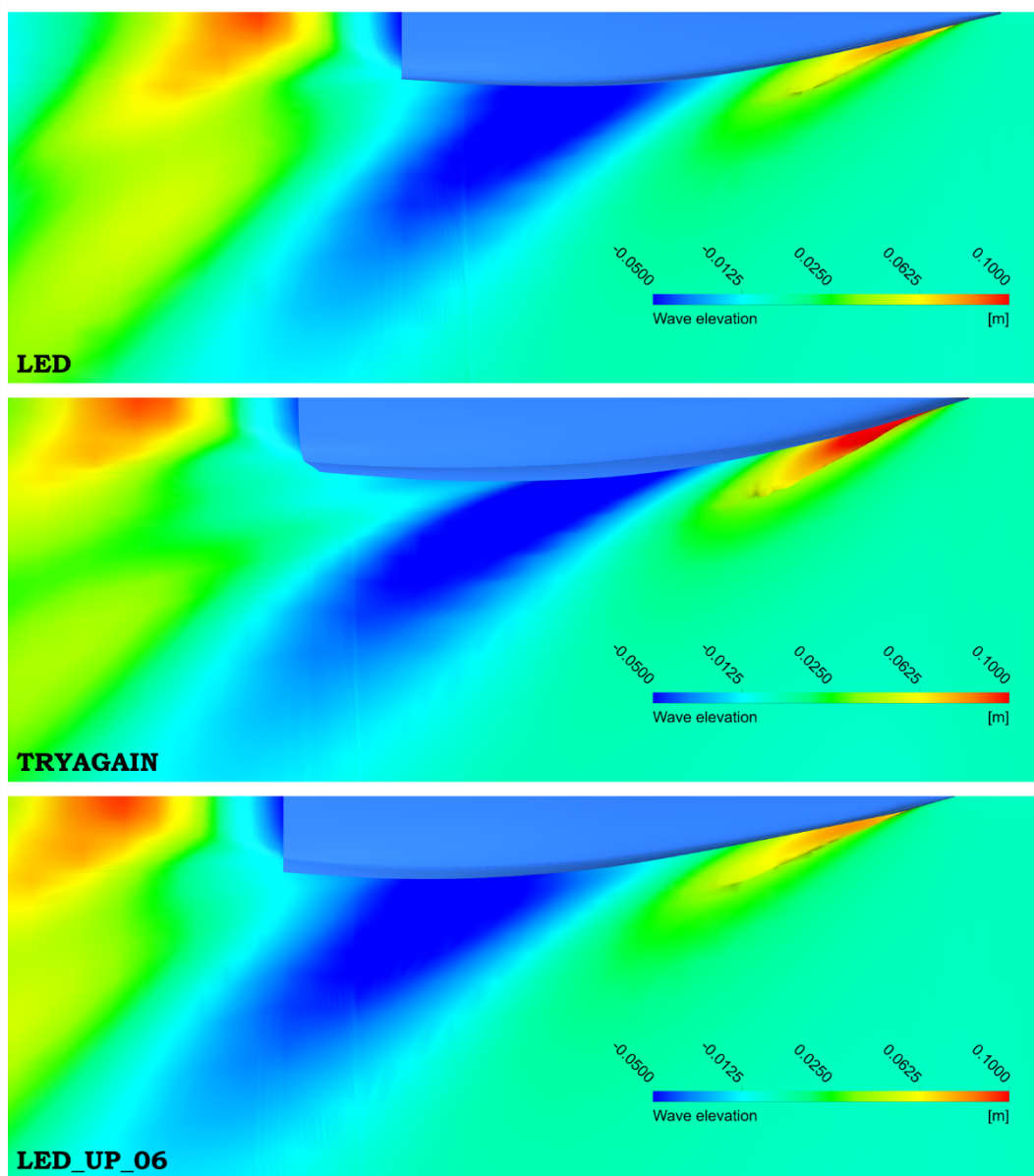


Fig. 76 - Confronto tra le altezze d'onda nell'intorno dello scafo a 3 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_UP\_06 (basso).

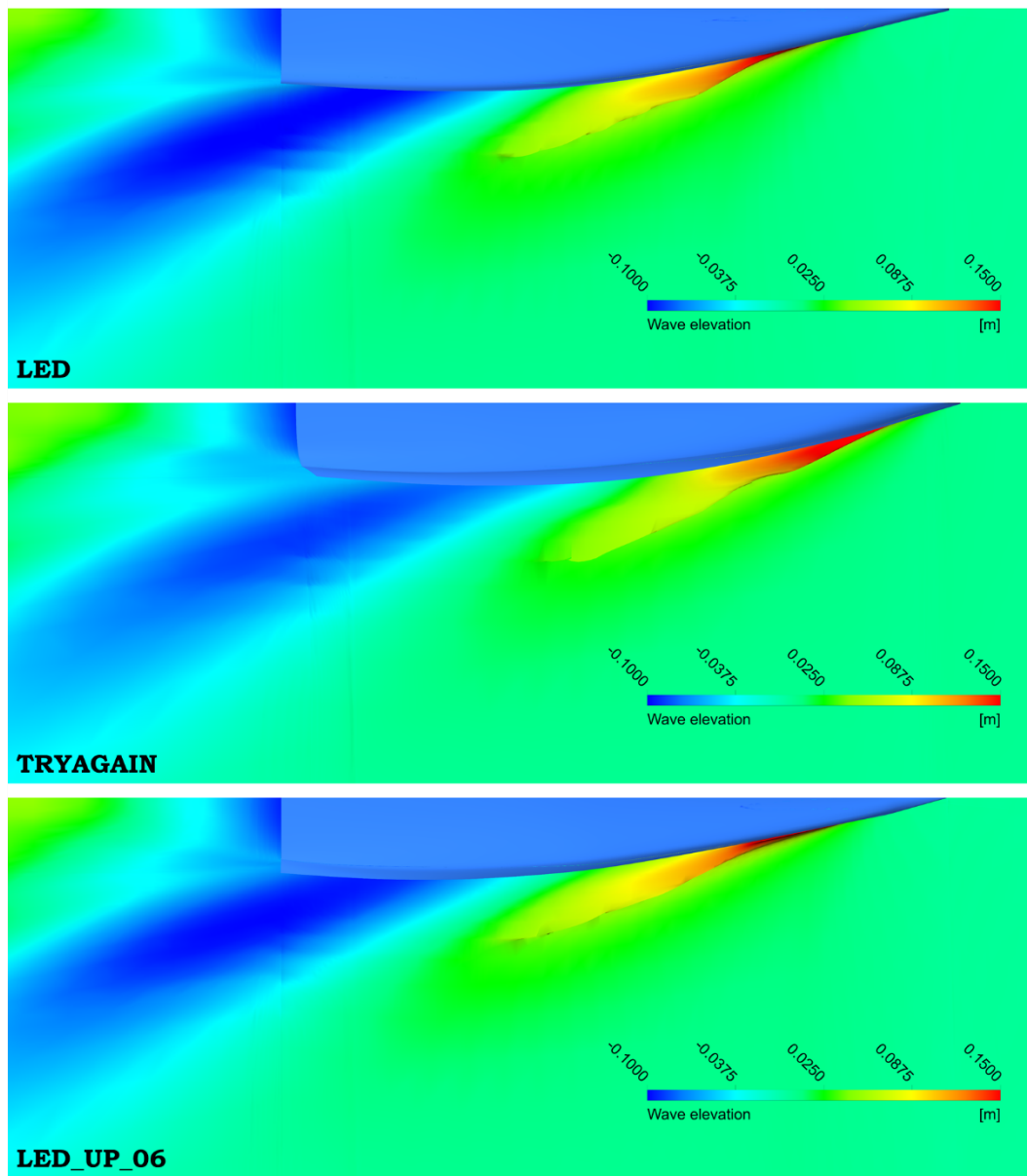


Fig. 77 - Confronto tra le altezze d'onda nell'intorno dello scafo a 4 m/s di LED (alto), TryAgain (centro) e LED\_UP\_06 (basso).

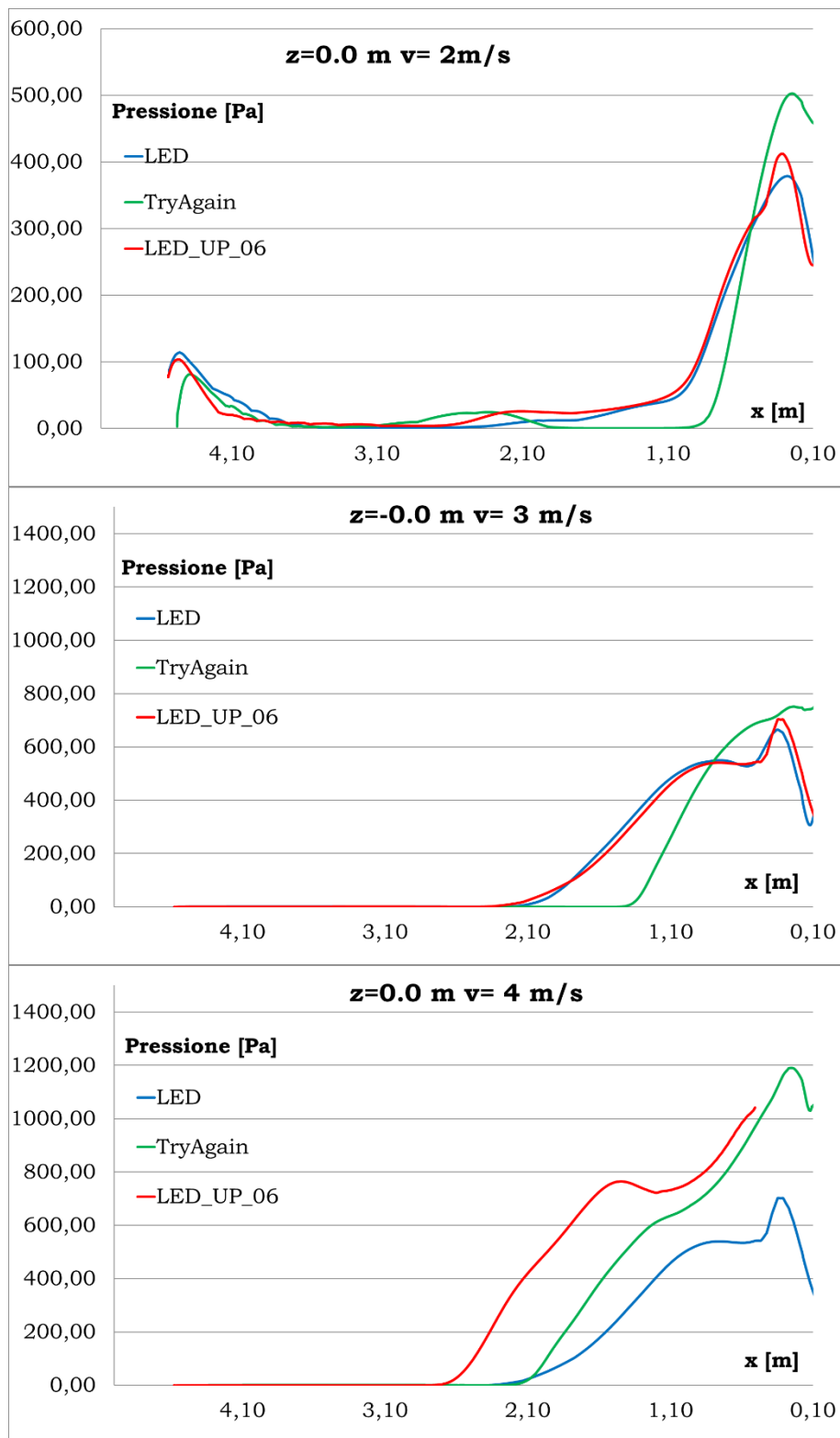


Fig. 78 - Confronto tra l'andamento della pressione lungo la linea al galleggiamento a 2 m/s (alto), 3 m/s (centro) e 4 m/s (basso) di LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_Up\_06 (rosso)

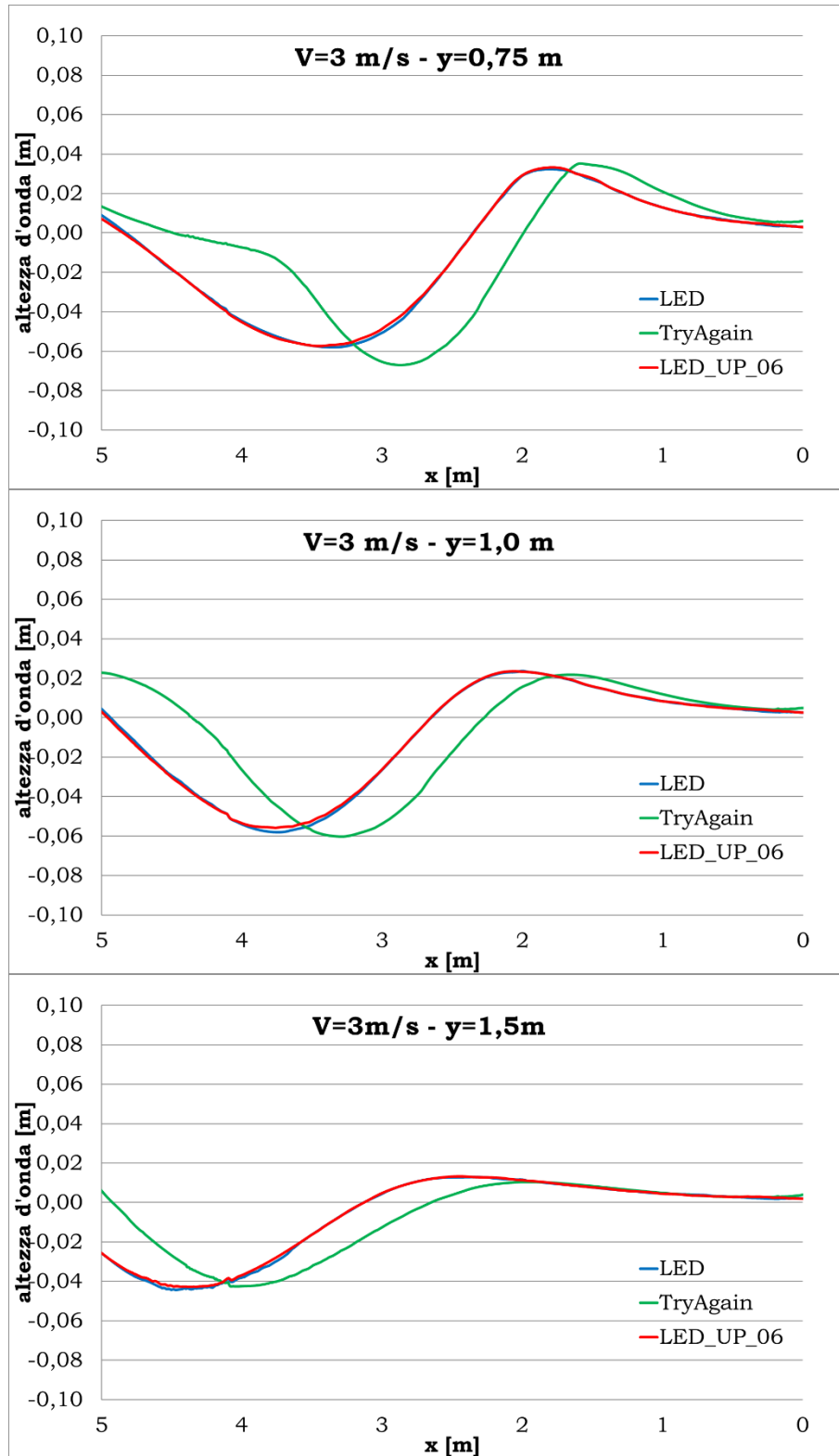


Fig. 79 - Confronto tra la formazione ondosa a 3 m/s di LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_Up\_06 (rosso)

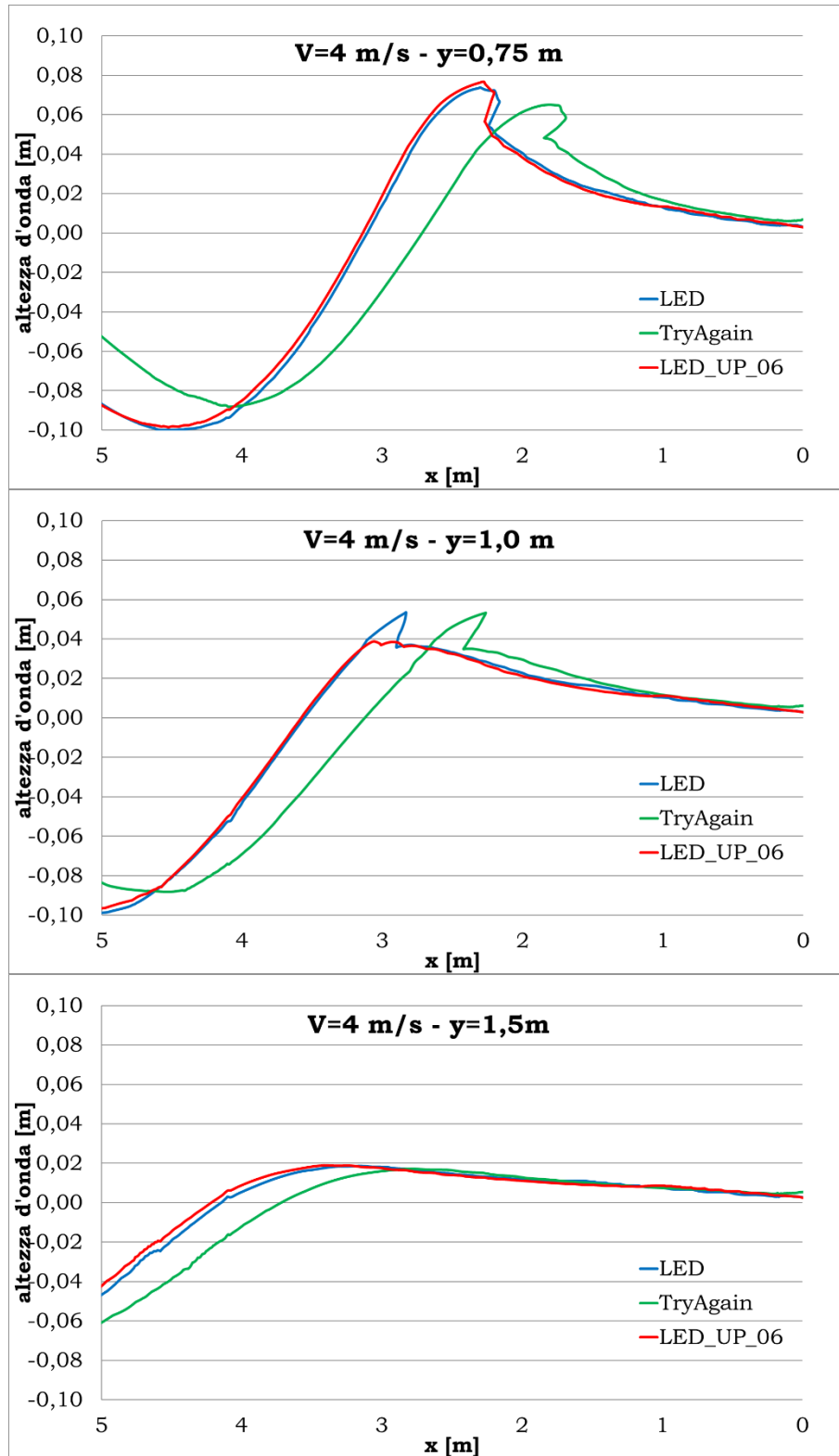


Fig. 80 - Confronto tra la formazione ondosa a 4 m/s di LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_Up\_06 (rosso)

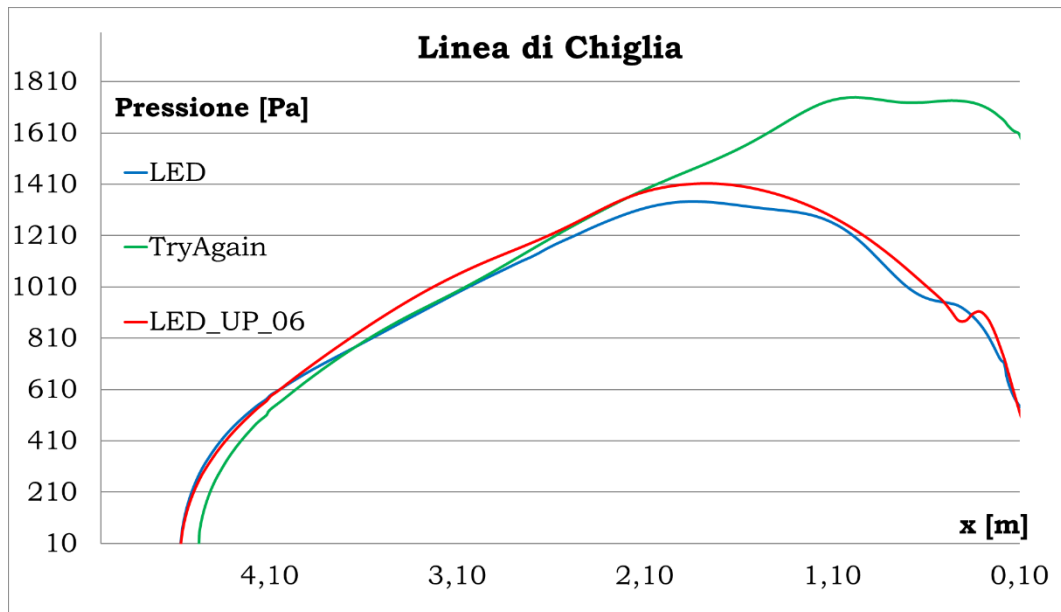


Fig. 81 - Confronto tra l'andamento della pressione lungo la linea di chiglia a 3 m/s di LED (blu), TryAgain (verde) e LED\_Up\_06 (rosso)

## **7. Caso Studio – Analisi Topologica**

In prima approssimazione si può ritenere che lo stato di deformazione cui è soggetta una barca a vela durante la navigazione, sia indipendente dalla sua forma. Ciò porta alla possibilità di separare i due processi (disegno dello scafo e dimensionamento strutturale). Tuttavia, l'entità delle deformazioni dovute alle forze aero/idro dinamiche può dare origine ad un decadimento delle prestazioni come risulta intuitivo se si pensa alle vele che essendo membrane sono soggette a grandi deformazioni che alterano sensibilmente le geometrie di progetto (Cirello et al., 2019).

Va osservato che molte imbarcazioni a vela (soprattutto quelle destinate a regate oceaniche) hanno diversi sistemi di regolazione dell'armo. Tra questi, le sartie volanti, le quali sono del tutto simili alle comuni sartie ma sono vincolate allo scafo nella parte poppiera e devono essere regolate durante la navigazione da parte dell'equipaggio. Le sartie volanti possono indurre rotazioni dello specchio di poppa di parecchi gradi causando visibili deformazioni asimmetriche che alterano le linee d'acqua.

Spesso, tali deformazioni sono volute e ricercate dai velisti. Effettuando analisi di tipo strutturale il progettista può considerare le deformazioni dello scafo sia quelle dovute al precarico generato dal sistema di albero, sartie e strallo, sia quelle dinamiche dovute al moto ondosso e della pressione sulle vele.

Uno dei metodi, che oggi sta prendendo sempre più piede e su cui molte start-up ma anche cantieri affermati a livello mondiale, si stanno interessando è quello delle analisi di tipo topologico, anche note come Ottimizzazioni Topologiche.

Come già accennato nei capitoli introduttivi della tesi, con tale metodo l'obiettivo ricade sulla definizione di geometrie ottenute per mezzo di algoritmi di ottimizzazione che stabiliscono in quali zone si debba disporre materiale e in quali rimuoverlo sulla base dei risultati di analisi strutturali. Come linea guida per effettuare questo tipo di analisi si imposta una funzione obiettivo dell'ottimizzazione come, ad esempio, la minimizzazione della massa. Imporre un obiettivo non è tuttavia sufficiente, si deve, allo stesso tempo, definire qualche vincolo legato alle caratteristiche meccaniche in termini di rigidità. Se non si considera questo vincolo, si possono anche trovare soluzioni che presentano minore peso ma in condizioni di carico non resisteranno alle sollecitazioni.

### **Impostazioni del Modello**

Le analisi di ottimizzazione topologica hanno l'obiettivo di trovare una struttura composta di pieni e vuoti all'interno del dominio di cui si è interessati condurre lo studio. Il progettista, infatti, può indicare in quali zone dello scafo eseguire l'ottimizzazione e quali escludere da essa.

Come può sembrare intuitivo la superficie esterna dello scafo, i punti di vincolo dell'albero e delle sartie, dello strallo ed anche le zone su cui insistono il timone e la deriva, non saranno modificate in quanto la definizione di queste geometrie è fissata da studi di altra natura, principalmente fluidodinamica.

Nel caso studio trattato in questo capitolo, lo scafo di LED Ricostruita, presentato approfonditamente nel precedente capitolo, è impiegato per condurre le analisi di ottimizzazione topologica. L'analisi è condotta mediante in software ANSYS e lo strumento scelto per condurre le analisi è il SIMP (Solid Isotropic Material



with Penalty) e la strategia di soluzione è data dal SCP (Sequential Convex Programming).

### **Valutazione delle Forze e delle Deformazioni**

LED Originale è stata realizzata mediante un sandwich di fibre di lino e un core di sughero per quanto riguarda lo scafo, mentre le strutture interne e la coperta sono state realizzate in compensato marino.

In questo caso studio per LED Ricostruita è stato assunto un unico materiale, il compensato marino con una densità pari a  $500 \text{ kg/m}^3$  e un modulo di Young pari a  $8 \text{ GPa}$ . Il peso dell'imbarcazione risultante è pari a  $87 \text{ kg}$ , esattamente pari al peso dell'imbarcazione realizzata dallo Zyz Sailing Team. In particolare lo scafo presenta un peso pari a  $72 \text{ kg}$ , il restante peso è da attribuire alle terrazze e alla attrezzatura di coperta. L'imbarcazione così definita è stata analizzata mediante una simulazione agli elementi finiti (FEM) con l'obiettivo di ottenere la geometria deformata dello scafo. Le forze in gioco sono state calcolate per mezzo del VPP Sailpowercalc, presentato in Appendice D, nelle condizioni di navigazione con intensità del vento apparente di  $6.4 \text{ m/s}$  ed angolo del vento apparente di  $45^\circ$ , tali condizioni sono le più gravose possibili in quanto coincidono con il massimo momento raddrizzante dell'equipaggio; oltre questo valore dell'intensità di vento è necessario ridurre la spinta delle vele e quindi di conseguenze anche il carico sullo scafo.

Il programma ha restituito i valori della forza propulsiva pari a  $349 \text{ N}$  e del momento sbandante di  $654 \text{ N}$ . Per quanto riguarda le forze in gioco nel sistema albero-sartie-strallo, è stato applicato un carico di compressione sull'albero e di converso un carico di trazione applicato allo strallo e alle sartie al fine di auto-equilibrare

il sistema di forze. Le ultime forze da considerare sono quelle riguardanti la pressione distribuita lungo lo scafo.

In Tab. 10 sono riassunte le forze agenti sull'imbarcazione mentre in Fig. 82 è mostrato lo schema delle forze applicate nello scafo.

Tab. 10 - Forze che insistono su LED Ricostruita.

Nome	X	Y	Z
Pre-carico Sartia Dx	-107.5	177.4	2238.3
Pre-carico Sartia Sx	-107.5	177.4	2238.3
Pre-carico Albero	0.0	0.0	-5100.0
Pre-carico Strallo	214.9	0.0	623.3
Carico Sartia Dx	-19.3	31.9	402.9
Carico Sartia Sx	39.7	65.6	-827.9
Carico Albero	-260.6	-410.6	-1630.6
Carico Strallo	191.9	0.0	555.5
Terrazze	-300.7	-340.9	0.0
Dislocamento	-	-	2364
Peso Target	-	-	-873.5

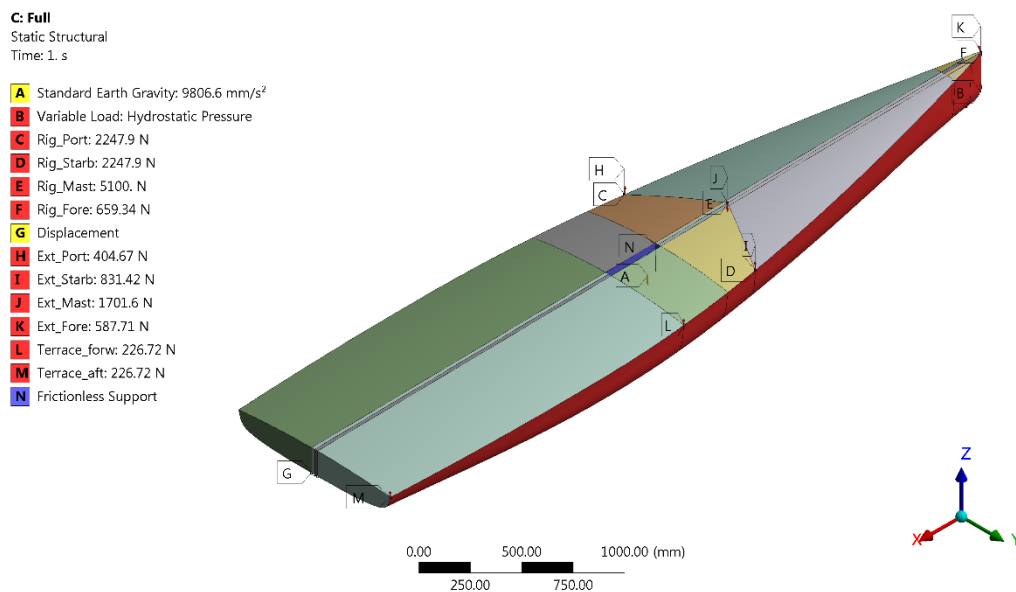


Fig. 82 - Rappresentazione delle forze applicate su Led Ricostruita.

A seguito dell'analisi FEM è possibile visualizzare la geometria deformata dello scafo ed anche le tensioni di von Mises, come mostrato in Fig. 83.

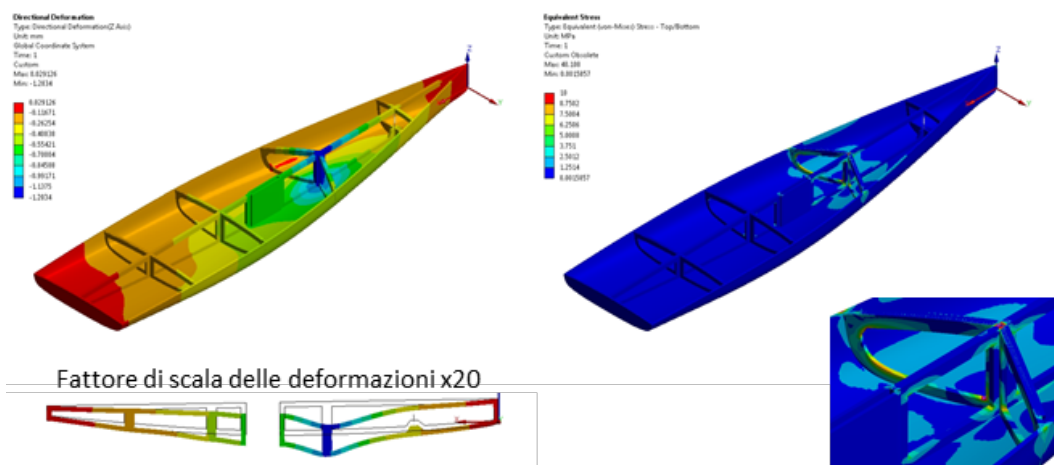


Fig. 83 - Risultati dell'analisi FEM, in termini di deformazione lungo l'asse z (sinistra) e di valori della tensione di Von Mises (destra).

Sempre in Fig. 83 si può notare come, in corrispondenza della posizione del piede dell'albero vi sia una deformazione più marcata della linea di chiglia. La rappresentazione della figura precedente è appositamente amplificata in maniera tale da apprezzare l'andamento della deformata. Il massimo valore di deformazione lungo la linea di chiglia è pari a -1.2 mm nella direzione dell'asse z.

### **Analisi Topologica**

Analizzare lo scafo di LED Ricostruita con le strutture interne "classiche", permette al progettista di avere un riferimento con cui confrontare i risultati ottenuti con le analisi topologiche e poter constatare se vi sono miglioramenti con questo approccio e di quanto la nuova struttura interna riduca, per esempio, le deformazioni lungo la linea di chiglia.

Sono state applicate le stesse condizioni definite nel paragrafo precedente in Tab. 10, con l'unica differenza riguardante il peso

dell'imbarcazione, adesso pari a 445.4 kg, in quanto il modello di partenza dell'analisi topologica è uno scafo interamente pieno.

Le analisi topologiche sono state effettuate considerando l'effetto combinato dei fenomeni puramente strutturali, dovuti alle forze agenti sullo scafo, ma anche ai fenomeni di natura vibratoria causati dal moto ondoso.

In particolare, sono stati analizzati cinque scenari in cui si è dato un diverso peso alle due componenti (strutturale e modale) all'interno della funzione obiettivo dell'ottimizzazione topologica. In Tab. 11 sono riassunti i pesi impiegati nelle cinque prove.

*Tab. 11 - Distribuzione del valore dei pesi nella funzione obiettivo dell'ottimizzazione topologica.*

<b>Caso</b>	<b>Peso Strutturale</b>	<b>Peso Modale</b>
O1	1.00	0.00
O2	0.75	0.25
O3	0.50	0.50
O4	0.25	0.75
O5	0.00	1.00

Al fine di ottenere minori deformazioni rispetto al caso analizzato nel paragrafo precedente, è stata imposta una massima deformazione lungo la linea di chiglia pari a -0.5 mm, la massima tensione si Von Mises accettabile pari a 10 Mpa e inoltre la massa finale dello scafo deve essere pari a 87 kg, quindi deve eguagliare il caso precedente. Avendo impostato il problema con queste caratteristiche, in Fig. 84 sono presentate le geometrie ottenute.

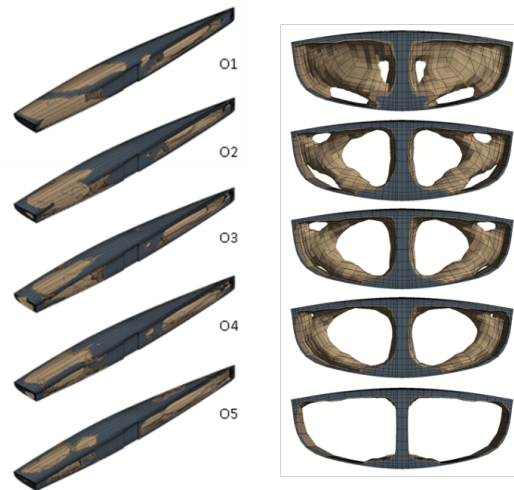


Fig. 84 - Risultati ottenuti con le analisi topologiche dei cinque casi, a sinistra il modello di metà scafo e a destra le sezioni centrali.

mentre in Fig. 85 è mostrato un grafico contenente le curve rappresentanti la linea di chiglia deformata di LED Originale e dei cinque casi ottenuti per mezzo delle analisi di ottimizzazione topologica.

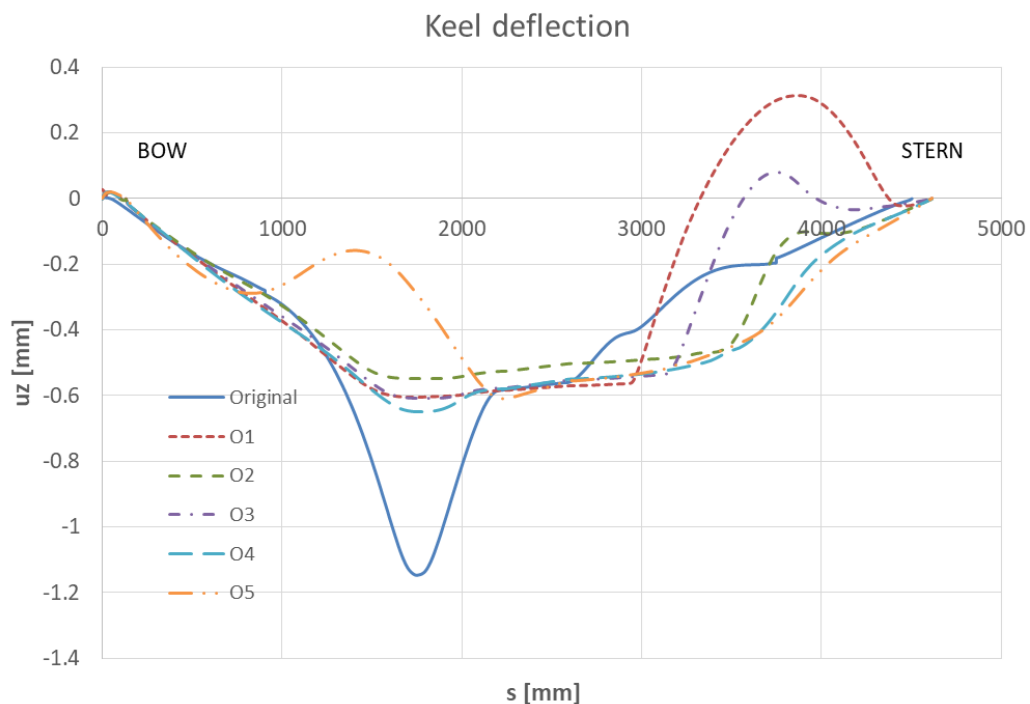


Fig. 85 - Confronto tra le linee di chiglia deformate di LED con rinforzi "classici" (Original) e i cinque casi O1-O5.

Lo scafo con i rinforzi interni “classici” mostra una deformata pronunciata in corrispondenza del piede dell’albero  $x = 1740$  mm mentre, a poppavia della scassa (da  $x = 2560$  mm in poi) la deformata è piuttosto ridotta, segno di una buona rigidezza flessionale globale dovuta alla linea di chiglia continua fino allo specchio di poppa.

Le soluzioni ottimizzate O1-O5 hanno comportamenti molto simili dalla prua fino alla scassa: la deformazione dovuta al precarico sull’albero è molto contenuta per tutte mentre la O1 mostra una deformazione verso l’alto molto evidente a partire da  $x = 3000$  mm fino alla poppa.

Simile comportamento, ma meno pronunciato evidenzia la O3, mentre le restanti, soprattutto O4 e O5, mostrano un andamento molto regolare fino alla poppa. Si può considerare questo comportamento legato soprattutto al fatto che l’ottimizzazione comandata dai carichi statici (quindi con pesi associati nella funzione obiettivo elevati), in particolare O1, predilige la creazione di rinforzi nella zona compresa tra l’albero e la scassa, trascurando la zona di poppa della barca. All’opposto si comportano le analisi di ottimizzazione comandate dai carichi modali, per esempio O4 e O5, per le quali l’ottimizzatore tende a ridurre la vibrazione della zona poppiera, spostando materiale posteriormente lungo la chiglia, a tutto vantaggio della riduzione della deformazione posteriore.

Riguardo le tecniche di analisi topologica presentate in questo capito, vi sono in corso ulteriori sviluppi al fine di rendere manifatturabile la struttura ottenuta con le analisi.

## **Conclusioni**

Partendo dalla definizione delle principali linee di costruzione impiegate nella progettazione nautica è stato creato un approccio orientato al progettista nel quale si modella uno scafo avendo pieno controllo delle caratteristiche geometriche più rilevanti.

Le curve razionali di Bézier sono state scelte per la costruzione di tali linee e le loro caratteristiche si sono rivelate molto utili in quanto permettono di avere controllo sulla matematica delle curve in modo intuitivo e non invasivo per il progettista. Il metodo sviluppato risulta essere versatile, pratico e veloce per quanto riguarda la generazione di un modello CAD e del suo successivo studio delle prestazioni ottenibile con l'integrazione di software di calcolo come i programmi di modellazione geometrica, programmi di calcolo delle prestazioni di tipo analitico, programmi per la risoluzione di problemi fluidodinamici, programmi agli elementi finiti. In questa tesi, il metodo è stato prima validato, replicando due imbarcazioni molto diverse tra loro su cui è stato eseguito un attento studio sperimentale e numerico delle prestazioni supportato da un rigoroso processo di Verifica e Validazione.

Gli scafi ricostruiti, con il nuovo metodo, sono risultati essere molto prossimi agli originali sia in termini di avviamento delle curve sia in termini dei valori di resistenza dello scafo generata durante all'avanzamento.

Successivamente, il metodo è stato utilizzato al fine di ottenere un nuovo scafo che avesse prestazioni superiori ai due precedentemente analizzati. Il nuovo scafo, che in tale lavoro prende il nome di LED\_UP\_06, nasce a seguito di numerosi test condotti per esplorare molteplici scenari.

Al termine del lavoro di ricerca della geometria del nuovo scafo si mostra come LED\_UP\_06 sia effettivamente una valevole soluzione in quanto riesce a mantenere buone prestazioni per bassi valori di velocità e risulta essere di gran lunga superiore ai due scafi presi come riferimento per valori elevati di velocità. I punti di forza del nuovo scafo rispetto a quelli di riferimento sono commentati e supportati da tabelle, grafici e plot ottenuti mediante software di calcolo di tipo fluidodinamico.



## **Ringraziamenti**

Conclusi i tre anni del corso di dottorato, sento di ringraziare chi dal punto di vista lavorativo, e non, ha contribuito direttamente, o indirettamente, alla stesura di questa tesi.

Il Professore **Antonio Mancuso**, in qualità di mio tutor e mentore universitario. Dal 2010, mio primo anno di carriera universitaria, abbiamo condiviso un bellissimo percorso ricco di svariate esperienze tutte con al centro di esse la vela, il mare e lo studio. La grande passione per il suo lavoro e il mondo della vela ha reso possibile molti progetti che si sono rivelati di successo. Questa tesi è il riassunto di ciò che ho imparato dalla nostra collaborazione nel campo della ricerca in campo nautico.

Il Professore **Lars Larsson**, in qualità di mio tutor durante il periodo di ricerca in Svezia presso la Chalmers University of Technology e SSPA. Capace di spiegare i concetti più complessi della fluidodinamica con semplici parole e disegni intuitivi, Lars mi ha guidato durante i sei mesi svedesi del mio periodo di ricerca. Le numerose riunioni e discussioni sul progetto di cui ci siamo occupati mi hanno arricchito sia professionalmente che personalmente.

Gli Ingegneri **Vito Ricotta** e **Francesco Scardulla** (scritti rigorosamente in ordine alfabetico), in qualità di compagni di stanza. Durante i tre anni di dottorato è stato un piacere condividere la stanza con loro, sempre disponibili per fare due passi, due chiacchiere o per due aiuti.

L'Ingegnere **Salvatore Golfo**, in qualità di compagno di corso di dottorato. Abbiamo condiviso il percorso avendo iniziato insieme il

Dottorato. Da ricordare le giornate in cantiere con la saldatrice, il flex e tutti membri dello Zyz Sailing Team. Abbiamo esplorato quasi tutto il campus durante le discussioni su come venire a capo dei classici problemi che due dottorandi devono affrontare.

L'Ingegnere **Pietro Terranova**, categoria non definibile. Dalle discussioni durante il corso di vela prima ancora di iniziare il Dottorato, alle regate e alle altre varie, e numerose, avventure. Il metodo presentato nella tesi è nato proprio quando volevamo replicare il Trident del Circolo della Vela Sicilia.

Tutto lo **Zyz Sailing Team** e i partecipanti di **1001VELAcup®**. Uno dei progetti più divertenti, interessanti e formativi che mi ha permesso di crescere dal punto di vista velistico, conoscendo a fondo come una barca a vela si progetta, costruisce e anche ripara!

## Appendice A – Curve Razionali di Bézier

Considerando la formulazione delle curve di Bézier è possibile ottenere le curve razionali di Bézier le quali si differenziano dalle prime per il fatto che viene assegnato un peso scalare ad ogni punto di controllo il quale ha l'effetto di attrarre o allontanare a sé la curva (Sedber, 2012). Possiamo definire una generica curva di questa famiglia utilizzando l'Eq.(A14):

$$C(t) = \frac{\sum_{i=0}^n w_i B_{i,n}(t) P_i}{\sum_{i=0}^n w_i B_{i,n}(t)} \quad , \quad t = 0, \dots, 1 \quad (A14)$$

dove  $n$  indica il grado che si intende utilizzare per costruire la curva,  $P_i$  rappresentano le coordinate nello spazio dei punti di controllo di tali curve individuati nel numero di  $n+1$  (cioè data una curva di grado 3 vi saranno 4 punti di controllo),  $w_i$  rappresentano i valori dei pesi che vengono assegnati a ciascun punto di controllo (nel caso di una curva di Bézier classica questi hanno tutti lo stesso valore unitario), e  $B_{(i,n)}(t)$  sono i polinomi di Bernstein definiti per ogni valore dell'ascissa parametrica  $t$ . La definizione dei polinomi di Bernstein è illustrata nell'Eq.(A15):

$$B_{i,n}(t) = \frac{n!}{i!(n-i)!} t^i (1-t)^{n-i} \quad , \quad i = 0, 1, \dots, n \quad (A15)$$

Entrando nel particolare uso delle curve razionali di Bézier impiegate in questo lavoro di tesi, sono state impiegate curve quadratiche ( $n=2$ ) e cubiche ( $n=3$ ). Fissando il grado della curva desiderata è possibile estrarre i valori dei coefficienti di Bernstein a partire dall'Eq.(A15). Di seguito i risultati ottenuti a valle del calcolo di questi per i casi di curve quadratiche e cubiche a titolo di esempio:

$B_{i,2}(t)$

$$B_{0,2}(t) = (1 - t)^2$$

$$B_{1,2}(t) = 2 t (1 - t)$$

$$B_{2,2}(t) = t^2$$

$B_{i,3}(t)$

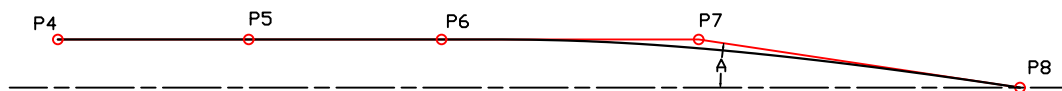
$$B_{0,3}(t) = (1 - t)^3$$

$$B_{1,3}(t) = 3 t (1 - t)^2$$

$$B_{2,3}(t) = 3 t^2 (1 - t)$$

$$B_{3,3}(t) = t^3$$

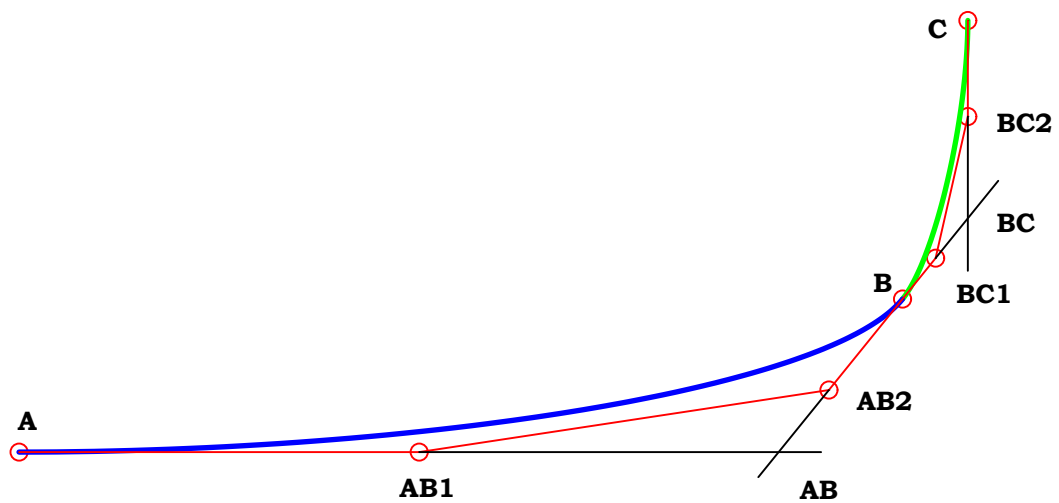
A seconda del tipo di carena che si intende disegnare vengono utilizzate curve di Bézier quadratiche e cubiche o unicamente cubiche. Gli scafi con spigolo non hanno bisogno di rispettare condizioni di continuità di ordine G1 e G2 ma solamente di ordine G0, per tali carene vengono impiegate curve quadratiche per definire le tre sezioni e curve cubiche per modellare le restanti linee necessarie a completare la forma dello scafo. Gli scafi tondeggianti invece necessitano di curve che ne possano garantire la continuità almeno fino all'ordine G2 e per tali geometrie di scafo vengono impiegate curve cubiche per determinare tutte le linee dello scafo. In (Sedebber, 2012) è presentata una proprietà delle curve di Bézier che riguarda il controllo sulla tangenza delle curve di Bézier. Queste curve risultano sempre tangenti al poligono di controllo nei punti finali pertanto è possibile controllare l'angolo di tangenza in questi punti, come mostrato in Fig. 86.



*Fig. 86 - Tangenza delle curve di Bézier con il poligono di controllo nei punti finali della curva.*

Di conseguenza è anche possibile imporre la continuità di ordine G1 per due curve consecutive, o interromperla, posizionando i punti di controllo in maniera tale che questi ricadano in una stessa retta. Al fine di assicurare la continuità di ordine G2, è possibile

sfruttare una seconda proprietà delle curve razionali di Bézier sempre presentata in (Sedeber, 2012). Entrando nel caso particolare delle sezioni di una carena tondeggiante, per le quali vi è la necessità di garantire la continuità di ordine G1 e G2, in Fig. 87 è mostrato un esempio di sezione realizzata utilizzando due curve di Bézier razionali.



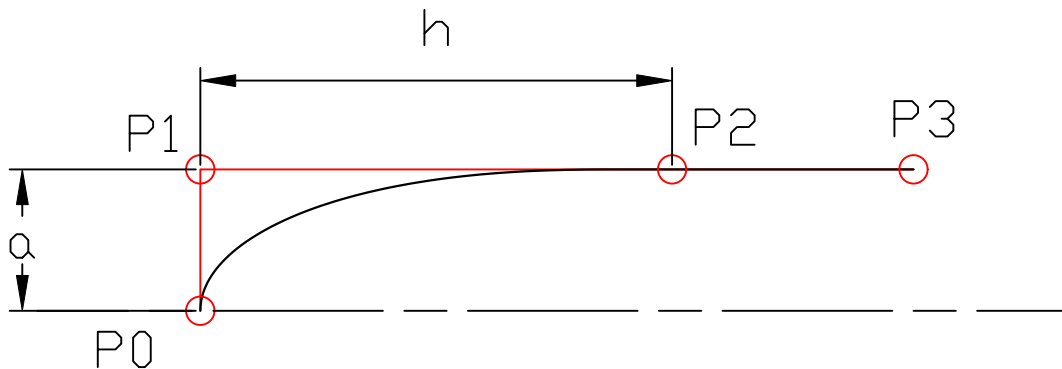
*Fig. 87 - Esempio di sezione tondeggiante realizzata mediante due curve di Bézier razionali.*

La curva inferiore è disegnata in blu mentre quella superiore in verde. La prima ha come punto iniziale il punto A e termina in B, i suoi punti di controllo intermedi sono AB1 e AB2. La seconda ha come punto iniziale il punto B e termina in C, i suoi punti di controllo intermedi sono BC1 e BC2. Osservando la Fig. 87 possiamo notare come la continuità di ordine G0 è assicurata dal fatto che le due curve, blu e verde, hanno in comune il punto B. La continuità di ordine G1 è assicurata sfruttando la proprietà delle curve di Bézier secondo la quale nei punti estremi la curva è tangente al poligono di controllo, i punti AB2, B e BC1 si trovano

infatti lungo una stessa retta e sono pertanto allineati, ciò garantisce la medesima tangenza finale per la curva in blu e iniziale per la curva in verde. Rimane da definire la continuità di ordine G2. Affinché questa sia rispettata la curvatura in B della curva in blu e della curva in verde devono avere lo stesso valore. La procedura che è stata messa a punto per assicurare tale ordine di continuità è la seguente. Definiti i punti di controllo AB e BC, si trasformano le curve quadratiche in curve cubiche e si impone la continuità della curvatura. Fondamentalmente esiste una relazione che lega le posizioni e i valori dei pesi con il valore della curvatura nei punti estremi della curva di Bézier presa in considerazione, tale relazione è mostrata nell'Eq.(A16):

$$k(t_0) = \frac{w_0 w_2}{w_1^2} \frac{n-1}{n} \frac{h}{a^2} \quad (\text{A16})$$

Dove  $k(t_0)$  è il valore della curvatura calcolato in corrispondenza del punto estremo della curva,  $w_i$  sono i valori dei pesi per ogni punto di controllo coinvolto,  $n$  è il grado della curva,  $h$  e  $a$  sono definiti in Fig. 88.



*Fig. 88 - Definizione dei parametri "a" e "h" per il calcolo del valore della curvatura alle estremità di una curva di Bézier.*

$a$  è la minima distanza tra  $P_0$  e  $P_1$  mentre  $h$  è la distanza lungo la retta perpendicolare a  $P_0P_1$  che separa  $P_1$  da  $P_2$ . Imponendo il medesimo valore della curvatura nel punto in comune tra due

curve consecutive è possibile essere certi che la continuità di ordine G2 sia rispettata in quanto entrambe le curve nel punto di fine per una curva e di inizio per la seconda hanno lo stesso valore di curvatura. Come mostrato in (Sedebber, 2012) è possibile elevare il grado di una curva di Bézier attraverso delle semplici relazioni matematiche, gli effetti di tale operazione nel poligono di controllo sono mostrati in Fig. 87. Tornando al caso specifico che stiamo prendendo in esame trattando le sezioni di una carena tondeggiante, partiamo da un poligono di controllo costituito da tre punti, ad esempio A, AB e B, e da questo applichiamo le relazioni presentate in (Sedebber, 2012) e possiamo trovare i quattro punti di controllo che sono caratteristici di una curva di Bézier cubica, applichiamo quindi le seguenti equazioni:

$$Y_A^* = Y_A$$

$$Z_A^* = Z_A$$

$$Y_{AB1}^* = \frac{Y_A}{3 + \frac{2}{3}Y_{AB}}$$

$$Z_{AB1}^* = \frac{Z_A}{3 + \frac{2}{3}Z_{AB}}$$

$$Y_{AB2}^* = \frac{2}{3}Y_{AB} + \frac{Y_B}{3}$$

$$Z_{AB2}^* = \frac{2}{3}Z_{AB} + \frac{Z_B}{3}$$

$$Y_B^* = Y_B$$

$$Z_B^* = Z_B$$

Dove le coordinate alla destra dell'uguaglianza rappresentano i punti di controllo del vecchio poligono di controllo (curva quadratica) mentre le coordinate alla sinistra dell'uguaglianza rappresentano i punti del nuovo poligono di controllo (curva

cubica). Analogamente si può applicare lo stesso ragionamento per il secondo tratto di curva, da B a C, ed elevare il grado anche della seconda curva di Bézier. A questo punto abbiamo due curve cubiche aventi ciascuna quattro punti di controllo. Procediamo calcolando il valore della curvatura nel punto che le due curve hanno in comune, il punto B, per la prima curva, che parte in A e termina in B, applicando l'Eq.(A16). Una volta noto il valore della curvatura per la prima curva possiamo ottenere la relazione inversa dell'Eq.(A16) e trovare l'unico valore da assegnare al peso del punto di controllo BC1 affinché il valore della curvatura iniziale della curva che parte da B e termina in C sia il medesimo di quello calcolato in precedenza. L'equazione per il calcolo del valore da attribuire al peso del punto BC1 è la seguente, Eq.(A17):

$$w_{BC1} = \sqrt{\frac{2 w_B w_{BC2}}{3} \frac{h}{k(B) a^2}} \quad (A17)$$

Noti tutti i valori delle coordinate dei punti di controllo dei due poligoni di controllo ed anche i valori da attribuire ai pesi in maniera tale da assicurare la continuità di ordine G2, è possibile applicare l'Eq.(A17) per disegnare le curve razionali di Bézier anche per il caso delle carene tondeggianti.



## Appendice B – Curve di Regressione

Sin dal 1975 gli studiosi in campo nautico hanno iniziato a sviluppare regressioni basate su espressioni polinomiali al fine di determinare le curve di resistenza delle barche a vela. La base di partenza per definire tali curve di regressione è solitamente basata sulle serie di DSYHS, Delft Systematic Yacht Hull Series. Tale serie consta di 70 differenti modelli testati in numerose condizioni presso il Delft Shiphidromechanics Laboratory of the Delft University of Technology. Durante gli anni le serie di DSYHS hanno subito numerose modifiche e trasformazioni per tenere in conto delle evoluzioni nel disegno nautico. La versione presa in considerazione in questa tesi è del 2008 e permette di ottenere risultati per valori di Froude che vanno da 0.15 fino a 0.75. In Eq.(B18) è mostrato come ottenere il valore della resistenza:

$$\frac{Rrh}{\nabla c \cdot \rho \cdot g} = a_0 + \left( \begin{array}{l} a_1 \cdot \frac{LCB_{fpp}}{Lwl} + a_2 \cdot Cp + \\ a_3 \cdot \frac{\nabla c^{\frac{2}{3}}}{Aw} + a_4 \cdot \frac{Bwl}{Lwl} + \\ a_5 \cdot \frac{LCB_{fpp}}{LCF_{fpp}} + a_6 \cdot \frac{Bwl}{Tc} + \\ a_7 \cdot Cm \end{array} \right) \cdot \frac{\nabla c^{\frac{1}{3}}}{Lwl} \quad (B18)$$

Dove:

$Rrh$	Resistenza dello scafo	$N$
$\nabla c$	Dislocamento	$m^3$
$\rho$	Densità dell'acqua	$kg/m^3$
$g$	Accelerazione gravitazionale	$m/s^2$
$Lwl$	Lunghezza della linea d'acqua	$m$
$Bwl$	Larghezza della linea d'acqua	$m$
$Tc$	Pescaggio	$m$
$LCB_{fpp}$	Centro di carena longitudinale.	$m$

$LCF_{fpp}$	Centro della figura al galleggiamento longitudinale.	$m$
$C_p$	Coefficiente prismatico	–
$A_w$	Area che si ottiene tagliando lo scafo con un piano coincidente con il pelo libero dell'acqua.	$m^2$
$C_m$	Midship section coefficient.	–

I valori dei coefficienti sono invece presentati in Tab. B12.

*Tab. B12 - Valori dei coefficienti per il calcolo della resistenza.*

<b>Fr</b>	<b><math>a_0</math></b>	<b><math>a_1</math></b>	<b><math>a_2</math></b>	<b><math>a_3</math></b>	<b><math>a_4</math></b>	<b><math>a_5</math></b>	<b><math>a_6</math></b>	<b><math>a_7</math></b>
0.15	-0.0005	0.0023	-0.0086	-0.0015	0.0061	0.0010	0.0001	0.0052
0.20	-0.0003	0.0059	-0.0064	0.0070	0.0014	0.0013	0.0005	-0.0020
0.25	-0.0002	-0.0156	0.0031	-0.0021	-0.0070	0.0148	0.0010	-0.0043
0.30	-0.0009	0.0016	0.0337	-0.0285	-0.0367	0.0218	0.0015	-0.0172
0.35	-0.0026	-0.0567	0.0446	-0.1091	-0.0707	0.0914	0.0021	-0.0078
0.40	-0.0064	-0.4034	-0.1250	0.0273	-0.1341	0.3578	0.0045	0.1115
0.45	-0.0218	-0.5261	-0.2945	0.2485	-0.2428	0.6293	0.0081	0.2086
0.50	-0.0388	-0.5986	-0.3038	0.6033	-0.0430	0.8332	0.0106	0.1336
0.55	-0.0347	-0.4764	-0.2361	0.8726	0.4219	0.8990	0.0096	-0.2272
0.60	-0.0361	0.0037	-0.2960	0.9661	0.6123	0.7534	0.0100	-0.3352
0.65	0.0008	0.3728	-0.3667	1.3957	1.0343	0.3230	0.0072	-0.4632
0.70	0.0108	-0.1238	-0.2026	1.1282	1.1836	0.4973	0.0038	-0.4477
0.75	0.1023	0.7726	0.5040	1.7867	2.1934	-1.5479	-0.0115	-0.0977

Oltre alla resistenza calcolata con l'Eq.(B18), è necessario calcolare la resistenza dovuta alla componente d'attrito. Esistono diversi metodi, quello più utilizzato è fornito dall'Eq.(B19):

$$c_f = \frac{0.075}{(\log(Re) - 2)^2} \quad (B19)$$

Il coefficiente d'attrito così calcolato può essere impiegato nell'Eq.(B20) al fine di calcolare la componente della resistenza d'attrito.

$$R_f = \frac{1}{2} \rho v^2 S_c c_f \quad (B20)$$

Dalla somma delle Eq.(B18) e Eq.(B20) è possibile ottenere la resistenza dello scafo, come mostrato in Eq.(B21):

$$R = R_{rh} + R_f \quad (B21)$$

Utilizzando tale formulazione in un foglio Excel è possibile plottare il grafico della curva di resistenza di una data imbarcazione come mostrato nell'esempio in Fig. 89.

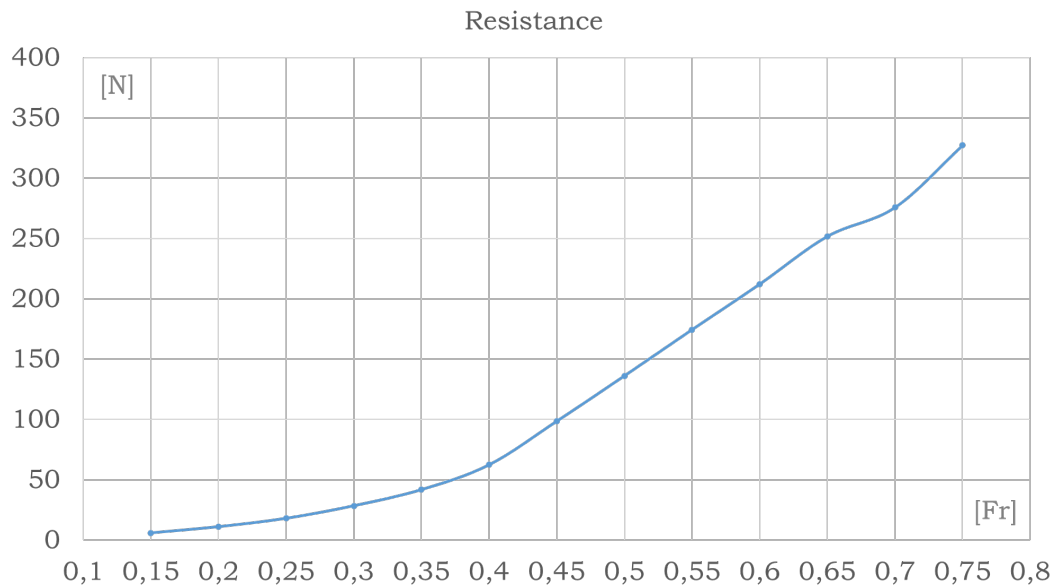
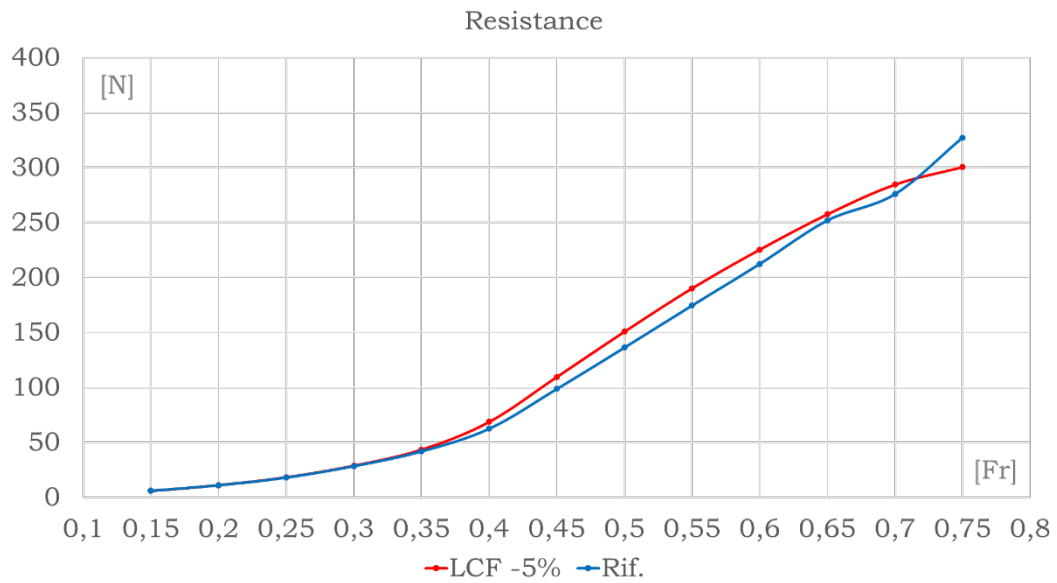


Fig. 89 - Esempio di curva di resistenza di una barca a vela.

Dalla Fig. 90 si può osservare come una piccola variazione dei coefficienti di riferimento, in questo caso una riduzione del valore di LCF pari al 5% porti a una considerevole variazione dell'andamento della curva di resistenza in un ampio intervallo di velocità.



*Fig. 90 - Confronto tra la curva di resistenza di riferimento (blu) e una curva calcolata variando il valore di LCF del 5%.*

I differenti andamenti delle due curve presentate nella precedente figura mostrano la sensibilità del metodo, infatti due scafi molto simili tra loro ma che hanno piccole differenze sono caratterizzate da sostanziali differenze nelle curve di resistenza per un ampio range di Froude.

## Appendice C – V & V

Come ben esposto in (Eca e Hoekstra, 2014):

*“Il processo di verifica è un esercizio puramente matematico il cui scopo è mostrare che stiamo risolvendo le equazioni in modo corretto. Il processo di validazione è un’attività scientifica/ingegneristica il cui scopo è mostrare che stiamo risolvendo le giuste equazioni.”*

Al fine di validare i modelli numerici, è stata sviluppata una procedura ben definita e presentata nelle (ITTC, 2007, ITTC, 2011, ITTC, 2017). Il processo di verifica e validazione del modello numerico si divide in diverse parti. Inizialmente l’obiettivo è rappresentato dalla definizione dell’incertezza relativa alle analisi numeriche ( $U_{SN}$ ). L’incertezza numerica ( $U_{SN}$ ) è composta da diversi fattori ma, nella maggior parte dei casi i principali contributi possono essere attribuiti alle sole incertezze delle iterazioni ( $U_I$ ) e della discretizzazione della griglia ( $U_G$ ). La definizione dell’incertezza numerica può essere quindi riassunta mediante l’Eq.(C22):

$$U_{SN} = \sqrt{U_I^2 + U_G^2} \quad (C22)$$

Quando la convergenza della soluzione è raggiunta in maniera ampia, lo studio dell’incertezza numerica può essere ricondotto alla sola ricerca dell’incertezza relativa alla discretizzazione della griglia e pertanto l’incertezza relativa alle iterazioni viene trascurata. Di conseguenza possiamo semplificare l’espressione precedente ed ottenere l’Eq.(C23).

$$U_{SN}^2 = U_G^2 \quad (C23)$$

Tale valore di incertezza si ottiene risolvendo l'Eq.(C24). Esistono diversi metodi volti ad ottenere la soluzione della Eq.(C24), uno dei più efficaci è il Least Square Root method di cui, in (Eca e Hoekstra, 2014), viene presentato in dettaglio il metodo di risoluzione tramite una serie di potenza in funzione della tipica dimensione della cella. Il dominio preso in esame è discretizzato in maniera sistematica secondo dimensioni della cella sempre più ridotte, i risultati ottenuti per ognuna delle configurazioni sono impiegati nella Eq.(C24) per costruire la curva di regressione definita secondo il Least Square Root method.

$$S_i = S_0 + \alpha h_i^p \quad (C24)$$

Dove  $S_i$  è la soluzione dell' $i$ -esima simulazione,  $S_0$  è la soluzione nel caso in cui il modello avesse una griglia infinitamente fine,  $h = \sqrt[3]{\frac{N_1}{N_i}}$ , e  $p$  è l'ordine di accuratezza. Per risolvere tale problema sono presenti numerosi software, tuttavia non sempre questi restituiscono risultati attendibili. Al fine di risolvere tale problema è stato sviluppato uno strumento su VBA di Excel che permette di definire il valore di incertezza per ogni griglia generata. In Fig. 91 è mostrata una schermata del programma.

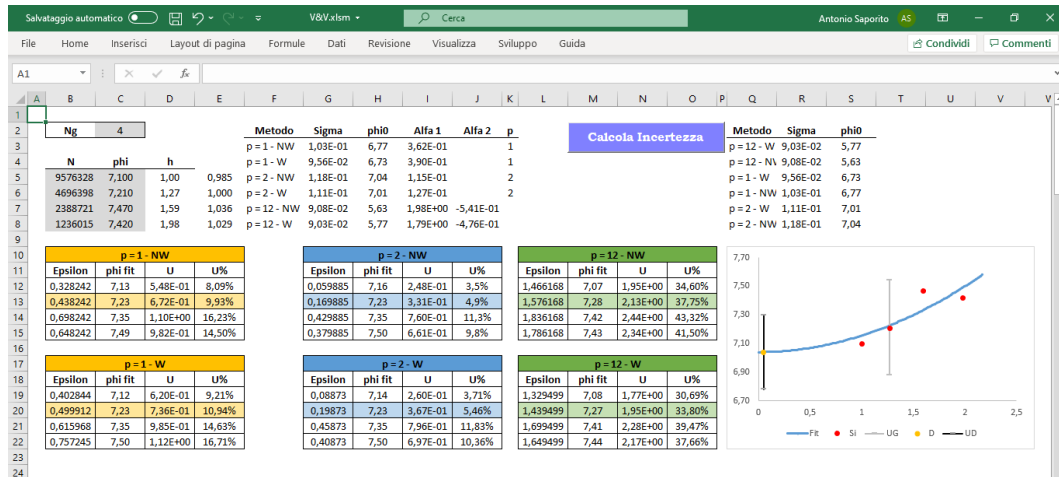


Fig. 91 - Schermata relativa al programma per il calcolo dell'incertezza della griglia scritto in VBA di Excel.

Al fine di validare il modello sono necessarie le informazioni relative sia ai dati calcolati numericamente sia relativi ai dati ottenuti per mezzo di prove sperimentali. Dal confronto degli errori sperimentali (D) e degli errori numerici (S) è possibile definire l'errore (E) per mezzo dell'Eq.(C25).

$$E = D - S = \delta_D - (\delta_{SN} + \delta_{SM}) \quad (C25)$$

Dove  $\delta_D$ ,  $\delta_{SN}$  e  $\delta_{SM}$  sono rispettivamente gli errori sperimentale, numerico e del modello. L'errore calcolato con l'Eq.(C25) è quindi confrontato con l'incertezza di validazione ( $U_{VAL}$ ) che viene calcolata effettuando la somma dell'incertezza sperimentale ( $U_D$ ) e dell'incertezza numerica ( $U_{SN}$ ) come mostrato nell'Eq.(C26).

$$U_{VAL}^2 = U_D^2 + U_{SN}^2 \quad (C26)$$

Come detto, l'errore calcolato mediante l'Eq.(C25) viene confrontato con l'incertezza di validazione e se l'errore risulta essere più piccolo dell'incertezza di validazione, il modello si dice validato con un certo livello di incertezza in accordo alla Eq.(C27).

$$E < U_{VAL} \quad (C27)$$

Per calcolare l'incertezza numerica vi sono diversi approcci possibili ma tutti si basano su una strategia per condurre un'analisi sistematica dell'infittimento della griglia come mostrato in (Zou and Larsson, 2014). Nelle (ITTC, 2017) sono raccomandate due metodologie: il fattore di sicurezza, ideato da (Xing e Stern, 2014) e il Least Square Root (LSR) method, ideato da (Eca e Hoekstra, 2014). Ultimamente si tende a preferire il secondo approccio in quanto consente di tenere in conto lo scarto numerico, ma questo a differenza del primo necessita di almeno quattro griglie al fine di poter essere implementato. In Fig. 92 è mostrato un esempio di curva di regressione calcolata a partire da quattro griglie.

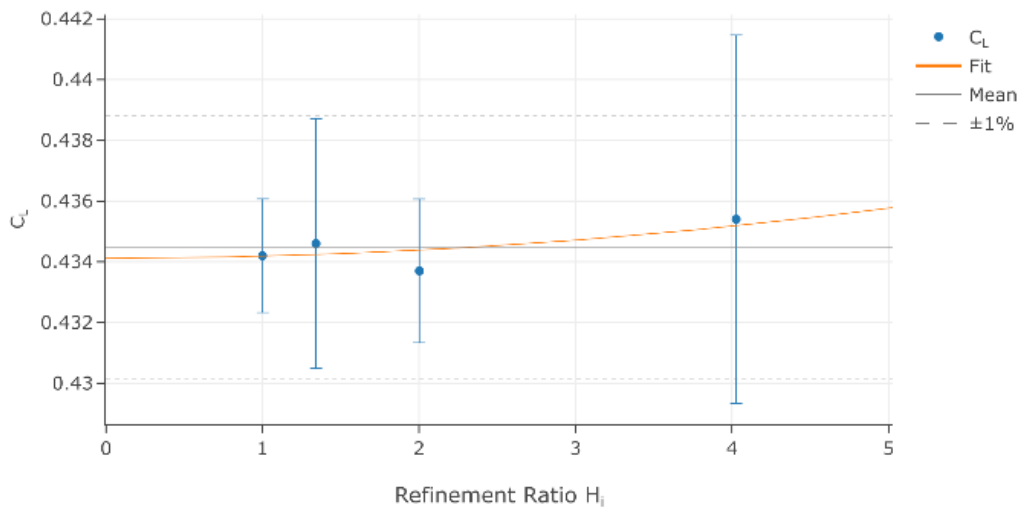


Fig. 92 - Esempio di curva di regressione calcolata mediante il Least Square Root method.



## Appendice D – VPP

Al fine di valutare tutte le forze agenti nello scafo i progettisti si possono affidare a software di tipo VPP con i quali determinare le entità di tali forze. Il VPP usato nel metodo presentato in questa tesi è il Sailpowercalc:

<https://cdn2.hubspot.net/hub/209338/news/SailPowerCalc/SailPowerCalc.htm>

**SAILPOWERCALC** v1.1 ©WB-Sails 1996-2006 Revised 2/2006

This little JavaScript application calculates the sail areas, forces and moments, when given the rig measurements and wind conditions. It represents in a simplified manner the aerodynamic module of a VPP (Velocity Prediction Program), used to predict the sailboat's performance.

WIND & HEEL	RESULTS	INFO & THEORY	WB-NEWS
<b>RIG MEASUREMENTS</b> given in meters. You can change these ...			
P main luff	8 m	E main foot	2.50 m
I jib hoist	7 m	J jib base	1.7 m
Not in use	0	spinArea spinnaker area	0.0 m <sup>2</sup>
LP percent J	120% ▲ 110% 100% 90% ▼	BAS boom height	0.80 m
		RMC righting moment	225 kgm/i
P in feet	26.2 ft	E in feet	8.2 ft
I in feet	23 ft	J in feet	5.6 ft
Not used		spinArea in feet <sup>2</sup>	0 ft <sup>2</sup>
BAS in feet	2.6 ft	RMC lb.ft/i	1626 lb.ft/i

SailPowerCalc automatically recalculates when you change a value - TAB or click out of a field, to see the effects of the changes on the sail forces. All input is metric - the measurements in feet/knots are merely converted, and do not affect calculation.

WIND & BOAT ... and these ...			
AWS apparent wind speed	3 m/s	AWA apparent wind angle	30 deg
HEEL angle (given)	0 deg	AWS app. wind speed in knots	6 kn

SAIL AREAS, FORCES & MOMENTS ... to see the results down here.			
Mainsl area	11.8 m <sup>2</sup>	Jib area	6 m <sup>2</sup>
	127 sq ft		65 sq ft
Heel angle (estimated)	0 deg	<input type="radio"/> Auto depower <input checked="" type="radio"/> Keep full power	
Sail Drive	6 kgf	Sail Heel	16 kgf
	14 lb		35 lb
		Heeling Moment	67 kgm
			362 lb ft

**Additional data**

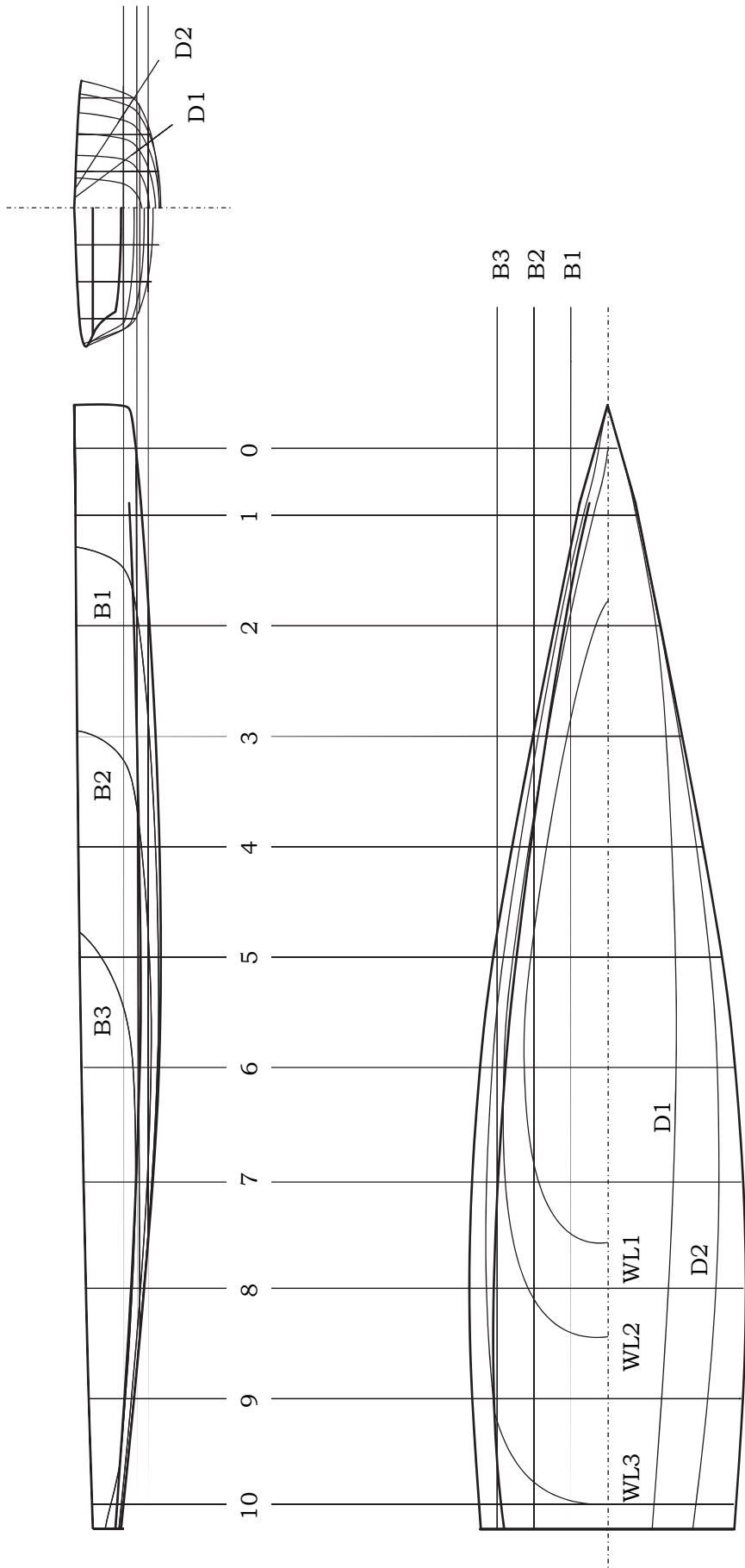
Leeway	3.8 deg	Center of effort height % of rig height	36 %	Rig aspect ratio	4.4
Drive to HM ratio	0.093	Depowering factor	1	Lift coefficient	1.589
Driving force coefficient	0.51	Heeling force coefficient	1.541	Drag coefficient	0.329

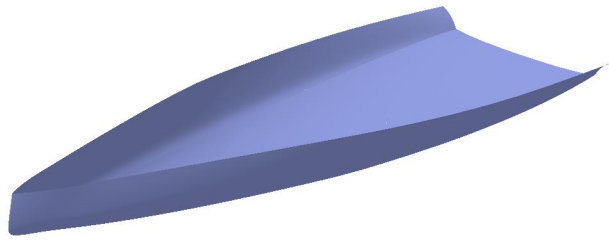
Fig. 93 – Interfaccia grafica di Sailpowercalc.

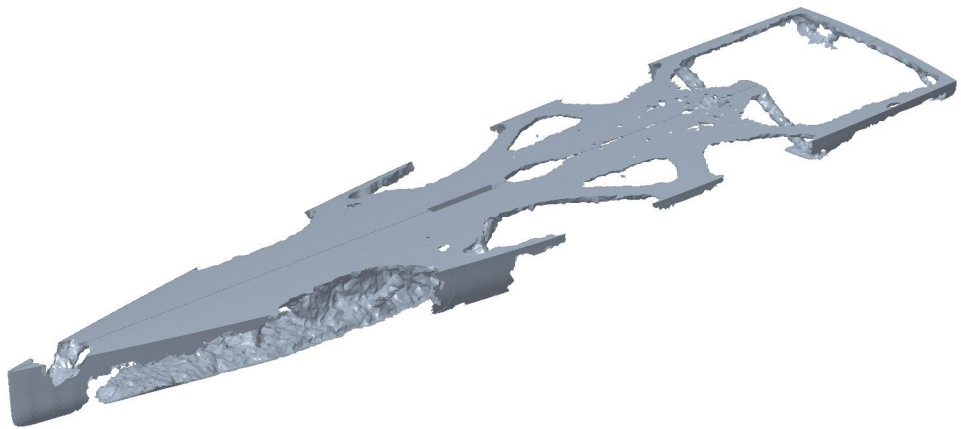
Tale software scritto in JavaScript calcola le aree delle vele, le forze e i momenti, una volta date le misure relative all'armo della barca e delle condizioni meteo-marine. Rappresenta un modello semplificato di programma di calcolo aerodinamico scritto su misura per una barca a vela. Al fine di ottenere i dati output in termini di forze e momenti il software risolve le equazioni di equilibrio molto simili a quelle definite dall'Eq. (3).

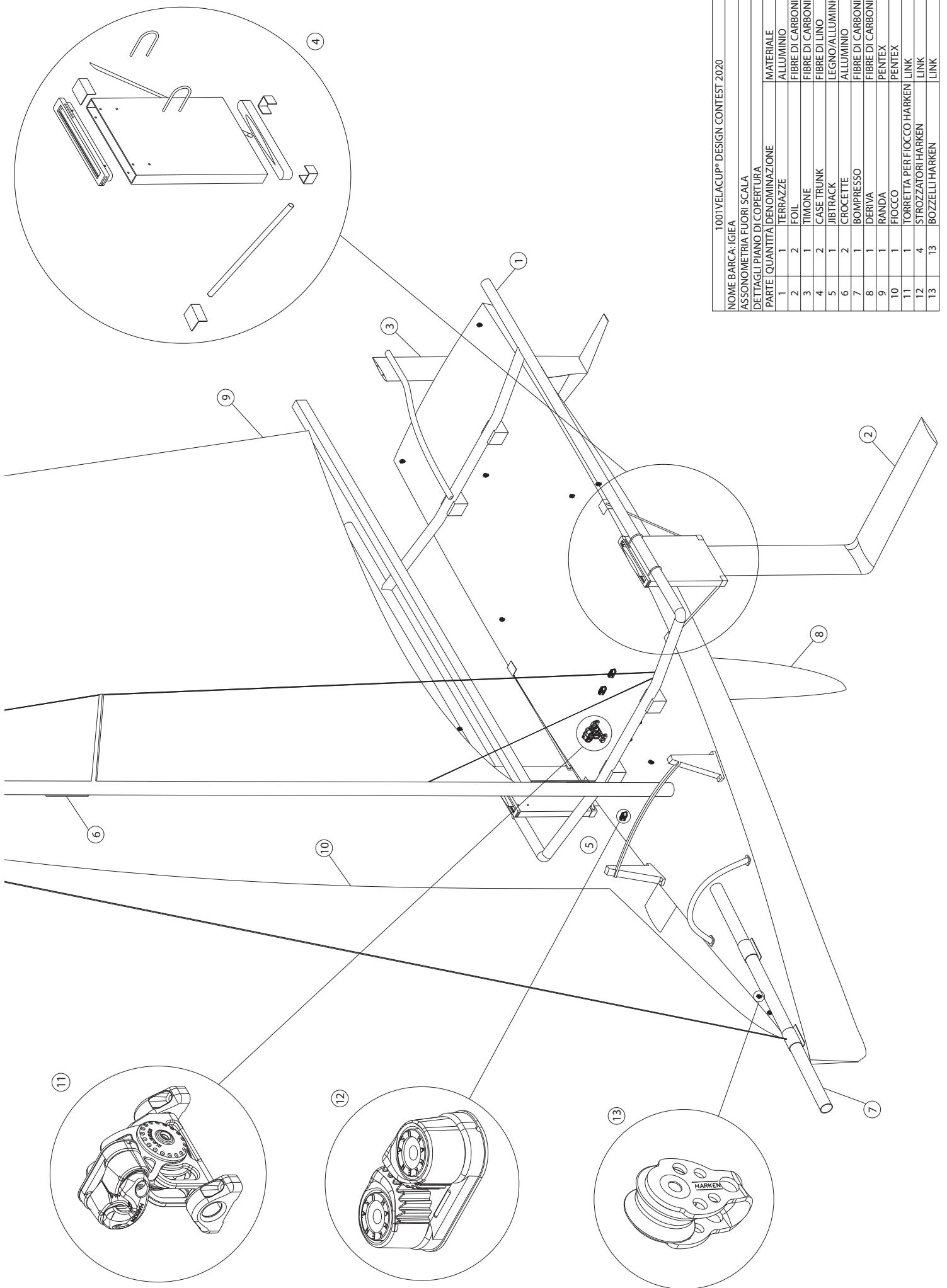
## **Appendice E – Tavole**

Nella seguente appendice sono presentati il piano di costruzione di LED\_UP\_06, l'assonometria dello scafo, l'assonometria della struttura interna, che prima di essere realizzata dovrà subire opportune modifiche al fine di renderla manifatturabile, l'assonometria dell'imbarcazione completa di tutti i suoi componenti per la navigazione, ed infine il render dell'imbarcazione che verrà varata con il nome di Igiea. Un particolare ringraziamento all'intera squadra dello Zyz Sailing Team allo studio relativo alla nuova imbarcazione che verrà varata nel 2021.









1001VELACUP® DESIGN CONTEST 2020

NOME BARCA: IGIEA  
 ASSONOMETRIA FUORI SCALA  
 DETTAGLI PIANO DI COPERTURA

PARTE	QUANTITÀ	DENOMINAZIONE	MATERIALE
1	1	TERRAZZE	ALLUMINIO
2	2	FOIL	FIBRE DI CARBONIO
3	1	TIMONE	FIBRE DI CARBONIO
4	2	CASE TRUNK	FIBRE DI LINO
5	1	JIBTRACK	LEGNO/ALLUMINIO
6	2	CROCETTE	ALLUMINIO
7	1	BOMPRESSO	FIBRE DI CARBONIO
8	1	DERIVA	FIBRE DI CARBONIO
9	1	RANDA	PENTEX
10	1	FIOCCO	PENTEX
11	1	TORRETTA PER FIOCCO HARKEN	LINK
12	4	STROZZATORI HARKEN	LINK
13	13	BOZZELLI HARKEN	LINK





## **Bibliografia**

Ahna, D., Kimb, H., Lee, S., 2007. Fabrication direction optimization to minimize post-machining in layer manufacturing. *The International Journal*.

Ahsan, AMM. N., Habib, Md Ahasan, Khoda, B., 2015. Resource based process planning for additive manufacturing. *Computer-Aided Design* 69, 112-125. DOI: 10.1016/j.cad.2015.03.006.

Ansys. Fluent User's Guide. <https://ansyshelp.ansys.com/>

Begovic, E, Bertorello, C, Mancuso, A, Saporito, A, 2020. Sailing dinghy hydrodynamic resistance by experimental and numerical assessment. *Ocean Engineering*, Vol. 214. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.107458

Calkins, D E, Schachter, R D, Oliveira, L T, 2001. An automated computational method for planning hull form definition in concept design. *Ocean Engineering*. 28 (3), 297-327.

Cappello, F., Mancuso, A., 2003. A genetic algorithm for combined topology and shape optimisations. *Computer-Aided Design*.

Chrismianto, D, Zakki, A F, Arswendo, B, Kim, D J, 2015. Development of Cubic Bezier Curve and Curve-Plane Intersection Method for Parametric Submarine Hull Form Design to Optimize Hull Resistance Using CFD. *Journal of Marine Science Applications* 14: 399-405. DOI: 10.1007/s11804-015-1324-8.

Cirello, A, Cucinotta, F, Ingrassia, T, Nigrelli, V, Sfavara, F, 2019. Fluid-structure interaction of downwind sails: a new computational method. *Journal of Marine Science and Technology* 24:86-97.

Claughton, A R, Wellicome, J F, Sheno, R A, 1998. *Sailing Yacht Design – Practice*. Harlow: Addison Wesley Longman.

Da, D. C, Cui, X. Y., Long, K., Li, G.Y., 2017. Concurrent topological design of composite structures and the underlying multi-phase materials. *Computers and Structures*.

Day, A.H., 2017. Performance prediction for sailing dinghies. *Ocean Engineering* Volume 136, 2017, Pages 67-79. DOI:10.1016/j.oceaneng.2017.02.025.

De Boor, C, 1978. A practical guide to splines. Springer, Applied Mathematical Sciences.

Di Angelo, L., Di Stefano, P., Marzola, A., 2017. Surface quality prediction in FDM additive manufacturing. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 93(9-12), 3655-3662. DOI: 10.1007/s00170-017-0763-6.

Eca, L., Hoekstra, M., 2014. A procedure for the estimation of the numerical uncertainty of CFD calculations based on grid refinement studies. *Journal of Computational Physics* 262.

Fossati, F, 2009. *Aero-Hydrodynamics and the Performance of Sailing Yachts*, London: Adlard Coles Nautical, and Camden, Maine: International Marine/McGraw-Hill (US only).

Garrett, R, 1990. *La Fisica della Vela*. Zanichelli.

Gupta, K K, Meek, J L, 1996. A Brief History of the Beginning of the Finite Element Method. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol. 39, 3761-3774.

Ingrassia, T., Mancuso, A., Nigrelli, V., Tumino, D., 2017. A multi-technique simultaneous approach for the design of a sailing yacht. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing* 11:19-30. DOI 10.1007/s12008-015-0267-2.

ISO 12215-5n Small craft — Hull construction and scantlings — Part 5.

ITTC, 2011. Practical Guidelines for Ship CFD Applications. International Towing Tank Conference.

ITTC, 2014. Quality System Manual Recommended Procedures and Guidelines. Example for Uncertainty Analysis of Resistance Tests in Towing Tanks, 7.5-02-02-02.1.

ITTC, 2017. Uncertainty Analysis in CFD Verification and Validation Methodology and Procedures. International Towing Tank Conference.

Keuning J A, Katgert, M, 2008. A bare hull resistance prediction method derived from the results of the Delft systematic yacht hull series extended to higher speeds. International Conference on Innovation in High Performance Sailing Yachts, Lorient.

Khalil, E E, 2012. CFD History and Applications. CFD Letters vol. 4 (2).

Khan S, Gunpinar E, Dogan K M, 2017. A novel design framework for generation and parametric modification of yacht hull surfaces. Ocean Engineering.

Khan S, Gunpinar E, Sener B, 2019. GenYacht: An interactive generative design system for computer-aided yacht hull design. Ocean Engineering.

Larsson, L., Eliasson, R. E., Orych, M., 2014. Principles of Yacht Design. Mc Graw Hill.

Mancuso A, Saporito A, Tumino D., 2020. Topology optimization design of internal reinforcements in a sailing dinghy. International Joint Conference on Mechanics, Design Engineering and Advanced Manufacturing (JCM 2020), Aix-en-Provence 2-4 Giugno 2020.

Mancuso A., Pitarresi G. and Tumino D., 2018. Using FEM simulation to predict structural performances of a sailing dinghy. *Int J Interact Des Manuf*, 12, 811-822.

Mancuso, A, 2006. Parametric design of sailing hull shapes. *Ocean Engineering*. 33 (2), 234-246.

Mancuso, A., Nigrelli, V., Saporito, A., Tumino, D., 2019. Yacht performance monitoring in real sailing conditions. *Ocean Engineering*. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2019.106249>

Masuyama Y, Tahara, Y, Fukasawa, T, Maeda, N, 2009. Database of sail shapes versus sail performance and validation of numerical calculations for the upwind condition. *Journal of Marine Science Technology* 14:137-160.

Mirzendehtdel, A.M., Rankouhi, B., Suresh, K., 2018. Strength-based topology optimization for anisotropic parts. *Additive Manufacturing* 19, 104-113. DOI: 10.1016/j.addma.2017.11.007.

Myung S., Han S., 2001. Knowledge-based parametric design of mechanical products based on configuration design method. *Expert Systems with Applications* Volume 21, Issue 2, August 2001, Pages 99-107. DOI:10.1016/S0957-4174(01)00030-6

Pennanen M., Levin R. L., Larsson L., Finnsgard C., 2016. Numerical prediction of the best heel and trim of a Laser dinghy. *Procedia Engineering* Volume 147, 2016, Pages 336-341. 11th conference of the International Sports Engineering Association, ISEA 2016; Delft University of Technology Delft; Netherlands; 11 July 2016 through 14 July 2016; Code 131128. DOI:10.1016/j.proeng.2016.06.304.

Pérez, F L, Clemente, J A, Suárez, J A, González, J M, 2008. Parametric generation, modelling and fairing of simple hull lines

with the use of non uniform rational b-spline surfaces. *Journal of Ship Research*.

Pérez-Arribas, F, 2014. Parametric generation of planing hulls. *Ocean Engineering*. 81, 89-104.

Persiani, F, Arienna, G, Caligiana, G, 1997. *Disegno Tecnico Industriale*. Editore: Pitagora.

Prendes Gero, M. B., Bello Garcia, A., Jose del Coz Diaz, J., 2006. Design optimization of 3D steel structures - Genetic algorithms vs classical techniques. *Journal of Constructional Steel Research*.

Raymond J., Cudby K., 2012. Using Parametric Modelling, CFD, and Historical Data, to Estimate Planing Hull Performance on a Laptop. 4th High Performance Yacht Design Conference Auckland, 12-14 March.

Rezaie, R., Badrossamay, M., Ghaie, A., Moosavi, H., 2013. Topology Optimization for fused deposition modeling process. In: B. Lauwers, J.-P. Kruth (eds) *The Seventeenth CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining (ISEM)*, *Procedia CIRP* 6, 521-526. DOI: 10.1016/j.procir.2013.03.098.

Saporito, A, Persson, A, Larsson, L, Mancuso, A, 2020. A new systematic series of foil sections with parallel sides. *Journal of Marine Science and Engineering*.

Sederberg, T. W., 2012. *Computer Aided Geometric Design*. *Computer Aided Geometric Design Course Notes*. BYU Scholars Archive.

Shikin, E V, Plis, A I, 1995. *Handbook on Splines for the User*. CRC Press, Inc.

Tagliaferri, F., Viola, I. M., 2017. A real-time strategy-decision program for sailing yacht races. *Ocean Engineering*.

US Product Data Association, 1996. Initial Graphics Exchange Specification IGES 5.3. American National Standard.

Viola I. M., Enlander J., Adamson H., 2014. Trim effect on the resistance of sailing planing hulls. *Ocean Engineering* Volume 88, 15 September 2014, Pages 187-193. DOI:10.1016/j.oceaneng.2014.06.025.

Viola I. M., Flay R. & Ponzini R., 2012. CFD Analysis of the Hydrodynamic Performance of Two Candidate America's Cup AC33 Hulls. *The International Journal of Small Craft Technology*. 154. 1-12. 10.3940/rina.ijst.2012.b1.113.

Viola, I M, Flay, G J, 2011. Sail pressure from full-scale, wind-tunnel and numerical investigations. *Ocean Engineering* 38 1733-1743.

Whiteley, J, 2017. *Finite Element Methods*. Springer. *Mathematical Engineering*.

Xing, T., Stern, F., 2011. Factors of Safety for Richardson Extrapolation. *ASME J. Fluids Eng.*, 133.

Yang, C., Löhner, R., Noblesse, F., Huang, T.T., 2000. Calculation of ship sinkage and trim using unstructured grids. In: *European Congress on Computational Methods in Applied Sciences and Engineering*, Barcelona ECCOMAS 2000; Barcelona; Spain.

Yildiz, A. R., Ozturk, N., Kaya, N, Ozturk, F., 2007. Hybrid multi-objective shape design optimization using Taguchi's method and genetic algorithm. *Structural and Multidisciplinary Optimization*.

Zhong-Wei, Z. Han, Z., Hong-Bo, L., Zhihua, C. 2015. Thermal and integral lifting analysis of a lattice shell lighting roof based on genetic algorithm and probabilistic design. *Journal of Constructional Steel Research*.

Zou L., Larsson L., 2014. A Verification and Validation Study Based on Resistance Submissions. In: Larsson L., Stern F., Visonneau M. (eds) Numerical Ship Hydrodynamics. Springer, Dordrecht

Zwier, M.P., Wits, W.W., 2016. Design for Additive Manufacturing: Automated Build Orientation Selection and Optimization. In: Kosmas Alexopoulos (ed) 5th CIRP Global Web Conference Research and Innovation for Future Production, Procedia CIRP 55, 128-133. DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.040.