

Politecnico di Torino

Politecnico di Torino

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

A.a. 2025/2026

Sessione di laurea Settembre 2026

Analisi fluidodinamica degli hydrofoil per il windsurf

Tutore:

Stefania Scarsoglio

Candidato:

Cecilia Viotto

Indice

1 Introduzione 1

2 Fisica dell'hydrofoil e richiami 3
2.1 Configurazione nel windsurf . . . 3
2.2 Richiami teorici . . . 6

3 Progettazione, analisi strutturale e propulsione 12
3.1 Produzione e ottimizzazione . . . 13
3.1.1 Reverse engineering e design . . . 13
3.1.2 Metodi di ottimizzazione multi-fedeltà . . . 15
3.1.3 Impatto delle imperfezioni . . . 18
3.2 Risposta idroelastica e materiali . . . 20
3.2.1 Interazione fluido-struttura . . . 20
3.2.2 Accoppiamento flessione-torsione . . . 21
3.3 Propulsione . . . 24

4 Aspetti fluidodinamici e criticità operative 29
4.1 Influenza di gravità e superficie libera . . . 29
4.1.1 Numero di Froude, profondità di immersione e allungamento alare . . . 30
4.1.2 L'effetto delle onde . . . 32
4.2 Aspetti critici principali . . . 33
4.2.1 Cavitazione . . . 34
4.2.2 Ventilazione . . . 36

5 Conclusioni e sviluppi futuri 42

Bibliografia 43

Capitolo 1

Introduzione

L'uso degli hydrofoil è ormai diffuso nell'ambito sportivo. Si tratta di appendici, comprensive di ali, poste anche sotto tavole da windsurf. Ciò che ha conquistato atleti e produttori, è la notevole velocità che permettono di raggiungere, poiché riescono, nel caso del windsurf, a elevare la tavola al di sopra della superficie libera, eliminando una buona parte della resistenza. Basti pensare che, nel 2024 ai Giochi Olimpici di Parigi, sono state introdotte gare di windfoiling, con l'uso dell'iQFoil, un modello realizzato dalla Starboard, che verrà presentato in seguito.

Essendo un'introduzione relativamente recente, alcuni meccanismi non sono ancora del tutto chiari. Lo studio della fluidodinamica nello sport è talmente importante per le prestazioni in gara [1], che le stesse case produttrici tendono a non condividere i risultati delle ricerche e nemmeno i modelli CAD. Quindi, l'obiettivo principale è riunire in un unico lavoro gli studi fluidodinamici su hydrofoil applicabili al mondo del windsurf, con tutti i vantaggi e i limiti dei metodi proposti. Eventualmente da essi potranno scaturire nuovi spunti di ricerca. Per perseguire lo scopo sopra esplicitato, è stata effettuata una ricerca di articoli presenti nella letteratura, per trovare quelli più interessanti riguardanti l'argomento. Dopo la raccolta di materiale, la stesura eseguita con approccio critico è stata utile per capire qual è lo stato dell'arte dell'hydrofoil nel windsurf.

Nel presente lavoro, vengono trattati diversi aspetti dal punto di vista fluidodinamico, al fine di analizzare problemi e punti di forza di progettazione, simulazioni, meccanismi di propulsione ed effetti dovuti al fluido. Dopo una prima presentazione del tema e dei fondamenti su cui si basa al Capitolo 2, si inizia con l'analisi dello sviluppo del prodotto nel Capitolo 3. Coloro che si occupano di effettuare test e simulazioni, devono ricorrere a reverse engineering e poi a ricostruzione delle superfici. Ottenuto un modello adeguato, si passa all'analisi computazionale. Si usano software BEM (Boundary Element Method) e RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), che differiscono per le teorie fluidodinamiche su cui si basano. Anche per il processo di ottimizzazione saranno presentati metodi diversi. L'analisi CFD

(Computational Fluid Dynamics) può essere accoppiata a solutori strutturali, che sono in grado di catturare la deformazione delle ali. Durante le fasi di simulazione, come verrà approfondito nel Capitolo 4, è necessario considerare anche gli effetti della superficie libera e le criticità operative di cavitazione e ventilazione, perché incidono su prestazioni, stabilità e comfort dell'atleta. Anche perché, una migliore comprensione del funzionamento dell'hydrofoil consente di pensare a strategie e manovre, per migliorare i tempi di gara. Una delle manovre analizzate alla fine del Capitolo 3 è il pumping della vela: moto oscillatorio effettuato in precisi momenti della navigazione, per generare spinta. Il pumping verticale della tavola, invece, rappresenta il punto di partenza per la dimostrazione di un modello generale di spinta propulsiva di una tavola dotata di hydrofoil senza motore.

L'analisi di questi temi fornisce una panoramica complessiva del problema e inoltre, aiuta a capire se gli aspetti sopra descritti si influenzino a vicenda e come questo avvenga.

Capitolo 2

Fisica dell'hydrofoil e richiami

L'oggetto di questo lavoro è l'hydrofoil, che sta riscuotendo un interesse sempre crescente nel mondo dello sport soprattutto ad alti livelli. Infatti, trova applicazione in numerosi mezzi come yacht, catamarani, imbarcazioni a vela, tavole da surf, kitesurf e windsurf. Il suo funzionamento è assimilabile a quello delle ali dell'aereo che, investite da un fluido, producono portanza. Nel caso dell'hydrofoil l'obiettivo è quello di elevare il mezzo per ridurre la resistenza esercitata dall'acqua. La configurazione usata nel windsurf prevede un'ala principale e una secondaria, che funge da stabilizzatore esattamente come nei velivoli. La differenza sostanziale sta nel fluido in cui sono immerse le ali: per l'aereo si tratta di aria, per l'hydrofoil invece si passa all'acqua, la quale ha una densità maggiore di ben tre ordini di grandezza. Le conseguenze sono molteplici e verranno approfondite nei capitoli dedicati ai risultati. Inoltre, vengono introdotte alcune grandezze caratteristiche, principi ed equazioni che stanno alla base del funzionamento dell'hydrofoil, focalizzando l'attenzione sulle forze e momenti in gioco e i relativi coefficienti, sulle equazioni e i teoremi fondamentali.

2.1 Configurazione nel windsurf

Tradizionalmente, le tavole da windsurf sono equipaggiate con una pinna in composito sul ventre, che in alcune trattazioni viene studiata come un'aletta disposta in direzione verticale. Il suo ruolo, similmente a una deriva, è quello di generare una forza che contrasti quella della vela; la forma dei due elementi è la medesima, con un'evidente disparità nelle dimensioni, per via della differente densità dei due fluidi in cui sono immersi, cioè acqua e aria. Recentemente, l'interesse verso gli hydrofoil ha fatto sì che si diffondesse una nuova configurazione della tavola, che

complessivamente prende il nome di windfoil. Il suo utilizzo a livelli professionali, come nel caso dell'iQFoil nella Figura 2.1a, fa intendere quanto sia vantaggioso in termini di prestazioni. Il foil, infatti, è in grado di innalzare la tavola al di sopra della superficie libera grazie alla generazione di portanza da parte delle ali, riducendo le resistenze viscosa e d'onda esercitate dall'acqua, molto più densa dell'aria. Di conseguenza, il range di velocità raggiungibili aumenta anche in presenza di vento molto debole, il che consente la pratica di tale sport anche in luoghi che normalmente non sarebbero adatti, poiché poco ventosi. La struttura è composta da quattro elementi osservabili in Figura 2.1b che hanno funzioni diverse:

- Un'ala principale (MAIN WING) che genera la maggior parte della portanza, necessaria a elevare la tavola.
- Un'ala secondaria (REAR WING), che garantisce la stabilità longitudinale, esattamente come quello dei velivoli.
- Un piantone (MAST) che funziona come la deriva degli aerei e contrasta lo scarroccio del windsurf generando una forza opposta.
- Una fusoliera (FUSELAGE) che agisce da collegamento meccanico tra le due ali e il piantone.



(a) **(b)**

Figura 2.1: A sinistra (a) si osserva un atleta sull'iQFoil, il modello usato alle olimpiadi di Parigi 2024. A destra (b) sono evidenziati gli elementi costitutivi dell'hydrofoil. Entrambe le immagini sono tratte da Martínez-Barberá et al. [15].

In alcuni casi però si effettuano prove sperimentali sull'ala singola, per semplicità. Le sezioni delle ali sono solitamente profili NACA con un certo inarcamento e angolo di portanza nulla diverso da zero. Gli hydrofoil vengono fatti lavorare a un determinato angolo d'attacco e al variare di esso cambia la portanza generata, fino ad arrivare allo stallo aerodinamico, pericoloso perché riduce improvvisamente la forza portante. Ciò rappresenta un problema per il windsurfer, che difficilmente riesce a mantenere il controllo del mezzo.

Introduciamo poi il sistema di assi a cui si fa riferimento per identificare la direzione delle forze e del flusso. In Figura 2.2 sono rappresentati gli assi corpo x_b positivo se uscente dalla "prua" del foil, z_b perpendicolare a x_b e positivo verso l'alto, y_b perpendicolare a entrambi con verso determinato dalla regola della mano destra. L'origine del sistema O_b si trova indicativamente all'intersezione tra asse del piantone e la fusoliera e coincide con O_w, cioè l'origine del sistema di riferimento del flusso (x_w, y_w, z_w). Gli angoli tra il flusso e la tavola sono α angolo d'attacco, l'unico raffigurato in Figura 2.2 perché è il più utilizzato, β angolo di deriva, γ angolo di sbandamento. Gli ultimi due sono rispettivamente l'angolo tra la direzione in cui punta la prua e la rotta che sta percorrendo la tavola nell'acqua e l'angolo d'inclinazione laterale del mezzo rispetto alla superficie libera.

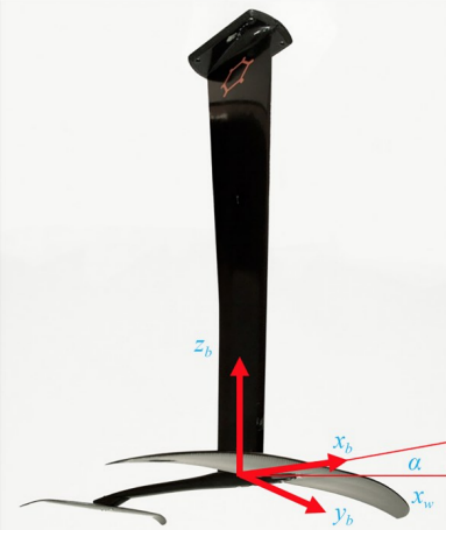


Figura 2.2: Rappresentazione degli assi corpo (x_b, y_b, z_b, dell'asse x_w e dell'angolo d'attacco). Tratta da Martínez-Barberá et al. [15].

Valgono anche per l'hydrofoil alcune definizioni usate per le ali dei velivoli, si parla di rastremazione se la corda si riduce progressivamente dalla radice all'estremità, di freccia positiva quando l'estremità alare è più arretrata rispetto alla radice e viceversa quella negativa. Può esserci anche un angolo di diedro positivo, per cui

l'estremità è inclinata verso l'alto rispetto alla fusoliera. Mentre il diedro negativo, anche chiamato anedro, prevede un'inclinazione verso il basso.

2.2 Richiami teorici

Come detto precedentemente, l'hydrofoil è composto da un'ala principale portante e una secondaria stabilizzante. Il comportamento del foil viene studiato al variare di alcune grandezze caratteristiche come corda media c, apertura alare b, superficie dell'ala in pianta S, allungamento alare λ:

$$\lambda = \frac{b^2}{S} \tag{2.1}$$

e coefficiente di Oswald e. Quest'ultimo indica quanto la distribuzione di portanza si avvicina a quella ellittica, che è la distribuzione ottimale per generare forza portante.

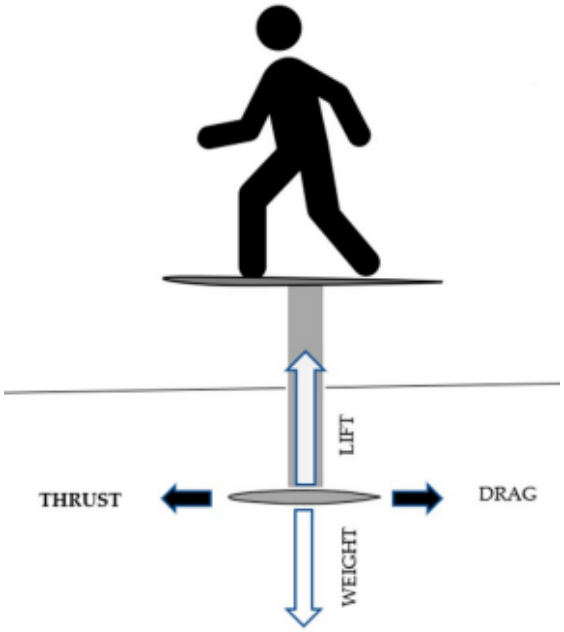


Figura 2.3: Direzione delle forze che agiscono sull'hydrofoil, in questo caso rappresentato con una sola ala. Adattata da Rozhdestvensky [19].

Ci sono quattro forze principali rappresentate in Figura 2.3 che agiscono sull'hydrofoil, ossia portanza (LIFT), resistenza (DRAG), spinta (THRUST) e peso (WEIGHT). La resistenza è antiparallela rispetto a x_w, raffigurato nella Figura 2.2, la portanza è perpendicolare a essa nella direzione z_w. La spinta invece è parallela

a x_b. Per lo studio delle suddette grandezze è più comodo lavorare con coefficienti adimensionali, che rendono lo studio delle prestazioni indipendente dalle dimensioni e dalla velocità, rendendo più immediato il confronto tra condizioni operative e foil diversi. Sono ottenuti dividendo la forza stessa per la pressione dinamica e la superficie di riferimento. Lo stesso vale per i momenti che sono ulteriormente rapportati alla corda.

In modo intuitivo, si può pensare alla portanza come una reazione del fluido alla forza di deflessione verso il basso che il profilo alare esercita sull'acqua. La forza portante è una conseguenza del campo di pressione che si crea quando il fluido, che nel nostro caso è l'acqua, investe l'ala. Il valore della pressione in un determinato punto del profilo si esprime con l'equazione del coefficiente di pressione (2.3), ottenuto attraverso l'equazione di Bernoulli (2.2) per flusso stazionario:

$$p + \frac{\rho}{2}V^2 = p_\infty + \frac{\rho_\infty}{2}V_\infty^2 = \text{costante} = p_0, \tag{2.2}$$

$$\mathrm{c}_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2}, \tag{2.3}$$

dove ρ, V, p sono rispettivamente la densità, la velocità e la pressione in un punto, p_0 è la pressione totale, ρ_∞, V_∞, p_∞ sono rispettivamente la densità, la velocità e la pressione del flusso indisturbato a monte. Più nello specifico è presente una differenza di pressione tra la zona inferiore e quella superiore, rispettivamente sul ventre si genera una sovrapressione e sul dorso una sottopressione. Si osserva, a livello fisico, uno spostamento verso l'alto nel momento in cui la portanza supera la forza peso diretta verso il basso; si tratta dello stesso meccanismo che permette agli aerei di alzarsi in volo. Per entrare nel vivo del meccanismo di generazione della portanza, si presenta innanzitutto il modello non viscoso, usato in alcune simulazioni numeriche a basso costo computazionale. Viene esplicitato il teorema di Kutta-Joukowsky:

$$\mathrm{L} = \rho_\infty V_\infty \Gamma. \tag{2.4}$$

Come si evince dal teorema, la portanza L dipende dalla circuitazione Γ di valore non nullo, attorno al profilo alare. Quindi, affinché la circuitazione totale sia nulla come vuole il teorema di Kelvin, è necessario avere una circuitazione opposta a quella del profilo: quella della scia, che si sviluppa al bordo di fuga e dove la differenza di pressione è nulla. Per la condizione di Kutta, poi, il fluido deve lasciare il bordo di fuga in modo regolare; c'è una sola soluzione, quindi la circuitazione è univocamente determinata. In molti studi l'andamento del coefficiente di portanza:

$$\mathrm{C}_L = \frac{L}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2 S} \tag{2.5}$$

si considera lineare al variare dell'angolo d'attacco, quando si rimane all'interno dell'intervallo in cui non si verifica lo stallo. Non è un'affermazione universale,

poiché in alcuni casi, ad esempio quando si verifica ventilazione, la linearità viene meno. Nel caso 2D o ad allungamento infinito il C_L è maggiore di quello del caso 3D o ad allungamento finito. La pendenza della retta è data dal valore del $C_L\alpha$, cioè il coefficiente angolare di portanza anche esprimibile come derivata prima del C_L rispetto ad α.

Nella stessa direzione del flusso, perpendicolari alla portanza, si sviluppano le forze di resistenza che comprendono vari contributi. Innanzitutto, quello della resistenza parassita, che include le forze viscose e di forma. La prima è causata dall'attrito del fluido sulla superficie bagnata del foil, la seconda è strettamente legata all'aerodinamicità intrinseca dell'ala. Si aggiunge poi la resistenza d'onda, diretta conseguenza della formazione di onde sulla superficie libera. L'ultimo contributo è dato dalla resistenza indotta, che è presente poiché l'allungamento delle ali non è sufficiente per considerarle ad allungamento infinito. All'estremità alare, infatti, si formano strutture vorticose per via della differenza di pressione tra dorso e ventre. L'effetto dei vortici è una deflessione verso il basso denominata downwash, rilevante in quanto riduce l'angolo d'attacco effettivo, diminuendo la portanza. Il coefficiente di resistenza si calcola come nell'equazione seguente:

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2 S}, \tag{2.6}$$

con D resistenza, e varia in modo approssimativamente quadratico, tuttavia se si utilizzano software di previsione delle prestazioni molto precisi è necessario usare polinomi di grado superiore.

Per imbarcazioni dotate di vela, si possono scomporre le forze di portanza e resistenza nelle due direzioni della spinta e dello scarroccio, cioè lo spostamento laterale perpendicolare alla spinta. La spinta si sviluppa nello stesso verso di x_w e per spiegare la sua generazione, verrà fornito un modello matematico che si basa sulla variazione di portanza nel tempo, causata da moti oscillatori. Le basi per il modello affondano le radici nella teoria di Theodorsen per le ali oscillanti instazionarie.

L'hydrofoil ha sei gradi di libertà: tre di traslazione, tre di rotazione attorno a x_b, y_b, z_b. I momenti generati sono chiamati rispettivamente di rollio, beccheggio e imbardata; tuttavia, nel presente lavoro si analizzano principalmente i movimenti di beccheggio, che avvengono al variare dell'angolo d'attacco. Come detto in precedenza, l'elemento che consente di controllare il beccheggio è l'ala secondaria. Nell'ambito del windsurf però anche lo spostamento di peso dell'atleta gioca un ruolo fondamentale nella stabilità. Il coefficiente di momento di beccheggio è calcolato come segue:

$$C_M = \frac{M_y}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2 S c}, \tag{2.7}$$

dove M_y è il momento attorno all'asse y cioè quello di beccheggio; è dipendente linearmente dall'angolo d'attacco, a meno di elevati angoli d'attacco o in prossimità di stallo. Quest'affermazione regge a meno di condizioni particolari, come la ventilazione o i movimenti oscillatori.

Nelle prove sperimentali, spesso, per analizzare le prestazioni, vengono misurati i coefficienti aerodinamici al variare di parametri adimensionali, anche per rendere gli esperimenti riproducibili a prescindere dal tipo di hydrofoil utilizzato. Se ne introducono tre che saranno usati nella trattazione:

- Numero di Reynolds:
$$\mathrm{Re} = \frac{V_\infty L}{\nu}, \tag{2.8}$$
con ν viscosità cinematica e L la lunghezza caratteristica. L'equazione 2.8 mette in relazione le forze d'inerzia e quelle viscose, dando un riscontro immediato su quali siano preponderanti.

- Numero di Froude:
$$\mathrm{Fr}_c = \frac{V_\infty}{\sqrt{gc}}; \qquad \mathrm{Fr}_h = \frac{V_\infty}{\sqrt{gh}}, \tag{2.9}$$
che rapporta le forze d'inerzia con quelle di gravità ed è basato su una grandezza caratteristica, che può essere la corda come nell'Equazione 2.9 a sinistra o la profondità di immersione a destra. Si usa come parametro principale per lo studio di effetti fluidodinamici al Capitolo 4.

- Numero di Strouhal:
$$\mathrm{St} = \frac{fL}{V_\infty}, \tag{2.10}$$
dove f è la frequenza delle oscillazioni; usato per le dinamiche oscillatorie, che rivestono un ruolo centrale nel tema della propulsione nella sezione 3.3.

Per le Equazioni 2.1, 2.2, 2.3, 2.4, 2.5, 2.6, 2.7, 2.8, 2.9, si fa riferimento a [2] con alcuni adattamenti.

Nei capitoli successivi, si riportano risultati ottenuti sia con prove sperimentali, sia con l'uso di software, che effettuano analisi fluidodinamiche a partire da teorie diverse. Questi ultimi, sono utilizzati per la progettazione ottimizzata dei foil, per testare più condizioni operative e per trovare spiegazione fisica di alcune dinamiche che caratterizzano gli hydrofoil. I solutori a costo computazionale e fedeltà bassi, come PUFFIn si basano sul BEM(Boundary Element Method), cioè il metodo degli elementi al contorno e sulla teoria del flusso potenziale, che prevede le ipotesi di incompressibilità e irrotazionalità. Per questa teoria, gli effetti viscosi non sono tenuti in considerazione, quindi per la modellazione del profilo e della scia si fa riferimento al teorema di Kutta Joukowsky (2.4). Il campo di velocità $\mathbf{v}(\mathbf{x}, t)$ è

espresso come la sovrapposizione di flusso indisturbato, il cui vettore velocità è $\mathbf{V}_\infty$ e gradiente del potenziale della perturbazione $\nabla\phi(\mathbf{x},t)$:

$$\mathbf{v}(\mathbf{x},t) = \mathbf{V}_\infty + \nabla\phi(\mathbf{x},t), \tag{2.11}$$

per flusso incomprimibile, irrotazionale e inviscido la conservazione della massa si riscrive come:

$$\nabla^2\phi(\mathbf{x},t) = 0 \tag{2.12}$$

con $\nabla\phi(\mathbf{x},t)$ velocità associata al potenziale $\phi(\mathbf{x},t)$. Tramite la seconda identità di Green applicata all'equazione di Laplace si ottiene il potenziale di velocità come:

$$\phi(\mathbf{x},t) = -\frac{1}{2\pi}\int_A \left[\sigma\frac{1}{r} - \mu\frac{\partial}{\partial n}\left(\frac{1}{r}\right)\right] dA \tag{2.13}$$

dove r è la distanza fra x e un punto sulla superficie, A è la superficie totale, σ indica l'intensità delle sorgenti, μ l'intensità delle doppiette, $\frac{\partial}{\partial n} = \mathbf{n}\cdot\nabla$, in cui $\mathbf{n}$ è il vettore normale uscente dalla superficie. Per chiudere il problema vengono imposte la condizione di Kutta, per la quale si eguagliano la pressione del ventre e del dorso al bordo di fuga e la condizione di non penetrazione, per cui il flusso attraverso la superficie del foil è zero.

Se si analizza l'influenza della superficie libera, fattore determinante cui è dedicata la Sezione 4.1, al posto di imporre una condizione non linearizzata che richiederebbe tempi computazionali molto lunghi, si preferisce una condizione linearizzata, detta di Neumann-Kelvin(NK) sotto riportata:

$$\left(\frac{\partial}{\partial t} + \mathbf{V}_\infty\cdot\nabla\right)^2\phi + g\frac{\partial\phi}{\partial z} = 0. \tag{2.14}$$

Quest'ultima equazione e quelle usate per arrivare alla formulazione di NK sono state adattate da [18]. Invece, per quanto riguarda la discretizzazione, le superfici vengono suddivise in elementi quadrilateri chiamati pannelli. All'interno di ognuno di essi, l'intensità di doppiette e sorgenti viene assunta costante. Il problema integrale si trasforma così in un sistema di equazioni lineari che, una volta risolto, fornisce i valori del potenziale, le pressioni e le forze globali. Ci sono poi i solutori a fedeltà e costo computazionale più elevati, basati sulle RANS, cioè le equazioni di Navier-Stokes mediate alla Reynolds; a seguire vengono riportate le RANS, per il caso tridimensionale, adattate da [21]:

$$\nabla\cdot\overline{v} = 0 \tag{2.15}$$

$$(\overline{v}\cdot\nabla)\overline{v} = -\frac{1}{\rho}\nabla\overline{p} + \nabla\cdot\left[(\nu+\nu_t)(\nabla\overline{v} + \nabla\overline{v}^T)\right] - \frac{2}{3}\nabla k \tag{2.16}$$

dove la prima è l'equazione di continuità e la seconda di quantità di moto. Poi $\overline{v}$ è il vettore di velocità mediato, $\overline{p}$ la pressione mediata, ρ la densità del fluido, ν la viscosità cinematica, v_t la viscosità turbolenta e k l'energia cinetica turbolenta. Tali equazioni valgono per flussi stazionari e incompressibili e vengono spesso combinate con modelli di turbolenza di chiusura come SST $k-\omega$, che introduce due equazioni di trasporto aggiuntive per l'energia cinetica turbolenta e la velocità specifica di dissipazione. Si parla invece di URANS per indicare le equazioni per il caso instazionario.

I software di simulazione fluidodinamica possono essere accoppiati con quelli di analisi strutturale come ABAQUS, al fine di eseguire un'analisi che tenga conto dell'influenza reciproca tra fluido e struttura. Questo problema è definito con la sigla FSI (Fluid-Structure Interaction) e risulta fondamentale nella progettazione degli hydrofoil poiché, se soggetti a deformazioni elevate, non possono essere considerati corpi rigidi; verrà trattato nella Sezione 3.2.1.

Si introducono infine due aspetti critici, che saranno approfonditi nella Sezione 4.2, ossia cavitazione e ventilazione. La prima si verifica quando la pressione locale del liquido scende al di sotto della pressione di vapore; infatti, è più facile che si verifichi nella zona in depressione. Avviene, quindi, un passaggio di stato con formazione di bolle e il loro successivo collasso quando vengono trasportate in zone di pressione più alta. Nella sezione dedicata, si distingueranno i diversi regimi in base alla lunghezza della cavità rispetto alla corda dell'ala. Un parametro fondamentale per lo studio del fenomeno è il rapporto d'immersione rispetto alla corda h/c, dove h è la profondità di immersione ed è positiva in verso opposto all'asse z_w definito. Si definisce poi il numero di cavitazione, adattato da [8]:

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2}, \tag{2.17}$$

dove la differenza tra la pressione di vapore della cavità p_v e quella del flusso indisturbato p_∞, è rapportata alla pressione dinamica ($\frac{1}{2}\rho_\infty V_\infty^2$).

Non è raro, in alcune condizioni operative, che ci sia un'evoluzione della semplice cavitazione; per vicinanza con la superficie libera è possibile che aria atmosferica penetri nelle bolle di vapore. Si parla, quindi, di ventilazione, la quale può essere indotta da cavitazione, ma anche da stallo e perturbazioni. Entrambi i fenomeni portano a una serie di problemi e disagi, a partire dalla riduzione delle prestazioni e instabilità operativa, che può portare a una pericolosa perdita di controllo della tavola. Nei casi di cavitazione, poi, si aggiunge il problema dell'erosione, causata dal collasso delle bolle di vapore, che crea dei danni permanenti alla struttura dell'hydrofoil. Dunque è fondamentale, al momento della progettazione, tenere conto anche di queste condizioni operative, affinché il design sia ottimizzato.

Capitolo 3

Progettazione, analisi strutturale e propulsione

Una prima parte dei risultati prende in esame alcuni aspetti riguardanti l'hydrofoil, a partire dalla primissima fase di design del componente. Per una progettazione completa, sono necessari in alcuni casi i test sperimentali, in altri sono più adatte le simulazioni oppure una combinazione delle due. Tendenzialmente, in stadi preliminari dello sviluppo, si preferisce usare software, poiché consentono di testare più casi in tempi minori. Prima però, è necessario effettuare la scansione degli esemplari di foil, per avere i dati di partenza. Grazie all'analisi CFD, si riesce a ottimizzare la geometria dell'hydrofoil, anche se dopo la produzione non si ottiene mai esattamente l'ottimo delle simulazioni. Il materiale con cui sono realizzate le ali del foil, la loro geometria e i carichi cui sono sottoposte determinano le deformazioni, che in alcune condizioni operative possono essere anche molto pronunciate. Ciò significa, che bisogna tenerne conto in fase di design; lo si fa combinando analisi fluidodinamica e strutturale, per catturare al meglio il comportamento reale delle ali e non incorrere in errori eccessivi. Con una particolare disposizione degli strati di composito, si può osservare una deformazione flesso-torsionale. La sua comprensione approfondita è utile per lo sviluppo di meccanismi di autoregolazione. Inoltre, viene trattato il tema della propulsione, introducendo un modello matematico semplificato, che riesce a spiegare ciò che a lungo è rimasto incompreso: come fa una tavola con hydrofoil, senza motore, a generare spinta. Per molto tempo, infatti, non si riusciva a dimostrare quello che era evidente nei test sperimentali. Nella Sezione 3.3, il discorso si focalizza sull'utilità della manovra del pumping della vela, poi introduce alcune equazioni e formule per spiegare in termini matematici il funzionamento di un modello più generale di pumped hydrofoil.

3.1 Produzione e ottimizzazione

La Starboard, marchio che produce l'iQFoil, adotta una politica one-design, per cui detiene in esclusiva i diritti di produzione. Infatti, i dati geometrici dei componenti del foil non sono accessibili, poiché i CAD non sono pubblici. Nasce così la necessità di arrivare alla geometria, a partire dal prodotto finito e questo è l'obiettivo del reverse engineering, il quale si articola in una fase di scansione e una di ricostruzione della superficie, per renderla adatta a simulazioni fluidodinamiche. L'analisi CFD è di fondamentale importanza per far sì che il design sia ottimizzato. Dati i costi e i tempi della modellazione ad alta fedeltà tramite RANS, vengono impiegati anche software a bassa fedeltà in framework combinati multi-fidelity. Nella sezione a essi dedicata, si riportano un metodo basato su modello surrogato e uno adjoint, con vantaggi e svantaggi, per mostrare che si può arrivare all'ottimo con percorsi diversi. Bisogna tenere presente, poi, che i foil prodotti non sono mai perfettamente coincidenti con quello ottimizzato e anzi presentano delle imperfezioni, legate a processi o struttura interna. Anche "piccole" variazioni tra un esemplare e l'altro possono essere impattanti a livello prestazionale e sono gli atleti stessi, che percepiscono le differenze tra hydrofoil diversi. Tale problema ha delle evidenti conseguenze sulla disparità, fra i team che hanno più risorse economiche e quelli che invece ne hanno di meno.

3.1.1 Reverse engineering e design

Un primo step per ottenere superfici sottoponibili a simulazioni CFD è effettuare una scansione 3D dei foil con strumenti ad alta precisione come gli scanner laser, che restituiscono una mesh formata da nuvole di punti molto dense, comprensive di milioni di punti. Il risultato è dettagliato, ma per via del rumore, cioè irregolarità indesiderate e difetti, non si può usare nelle simulazioni CFD allo stato grezzo. Il passo successivo è affinare la mesh, affidandosi ad algoritmi avanzati. Tuttavia, quelli già esistenti sono generici e vengono usati per diverse applicazioni, quindi tendono a eliminare qualsiasi irregolarità. C'è bisogno, quindi, di un tool più specifico, che mantenga la geometria tipica del foil. Si tenga conto che, nonostante il produttore sia lo stesso, possono esserci difformità non trascurabili tra i vari pezzi e la loro influenza su prestazioni e stabilità può essere determinante. Cirello et al. [6] hanno proposto un nuovo approccio semi-automatico che velocizza le tempistiche, senza rinunciare all'efficacia della ricostruzione. Prima si esegue una ricostruzione manuale dell'oggetto; gli stessi passaggi saranno le linee guida per lo sviluppo dell'algoritmo generativo. Come ambiente per l'implementazione si sceglie Grasshopper, usato come plug-in di Rhinoceros, un software di modellazione 3D. Il primo passo prevede l'orientazione della mesh, preceduta dal calcolo delle proprietà di massa e degli assi principali d'inerzia. In seguito, avviene la selezione del punto

di taglio e la scelta del numero di sezioni da ricavare, le quali sono distribuite lungo la mesh, tralasciando la parte terminale per evitare eccessivi errori. La successiva ricostruzione delle curve con un determinato numero di punti di controllo viene eseguita mediante spline. L'ultima operazione effettuata dall'algoritmo è il lofting, che unisce le varie curve ottenute (escludendo quelle aperte), per formare una superficie chiusa detta NURBS, che significa Non-Uniform Rational B-Spline. Il risultato del processo si osserva nella Figura 3.1.

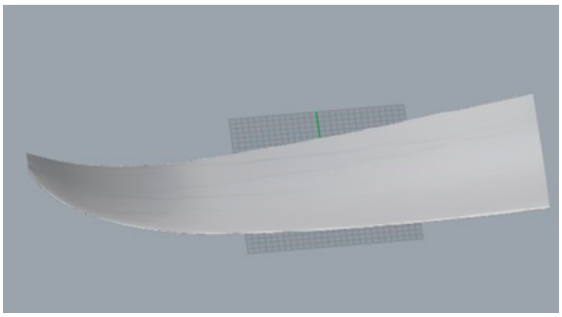


Figura 3.1: Superficie chiusa ottenuta come risultato dell'algoritmo generativo usato per un hydrofoil appartenente a un iQFoil. Tratta da Cirello et al. [6].

Il confronto con la mesh originale, in termini di RMSE (errore quadratico medio) e scostamento, ha stabilito che l'algoritmo non solo è valido per la sua elevata precisione, ma è anche molto più rapido rispetto ai metodi manuali. L'elevata precisione ottenuta dipende anche dal fatto che l'hydrofoil ha una superficie estremamente liscia; l'utilizzo del metodo con altri oggetti che presentano più discontinuità superficiali non è altrettanto soddisfacente. La seconda analisi comparativa valuta le differenze tra la superficie NURBS e quella ottenuta manualmente. Anche in questo caso, il metodo si dimostra solido e preciso, mantenendo RMSE e scostamento sotto la soglia del millimetro come nel primo confronto. Infine, viene eseguita una valutazione dell'errore al variare del numero di sezioni e punti di controllo. Si scopre che ci sono dei valori-soglia sotto i quali si rischia di incorrere in errori troppo elevati.

Il metodo proposto sembra complessivamente funzionale, ma andando più a fondo si notano alcune limitazioni. Come si osserva nella Figura 3.2 ci sono delle differenze nei risultati: in (a) si può notare il rumore della mesh grezza ottenuta dalla nuvola di punti, (c) raffigura la ricostruzione ottenuta manualmente, in (b) il bordo di fuga risulta arrotondato e viene meno la forma affilata, che è presente invece nella geometria fisica. Tuttavia, l'errore associato al bordo di fuga smussato, è paragonabile a quello commesso da un software CFD nella conversione da superficie dell'ala a mesh volumica e risulta quindi trascurabile.

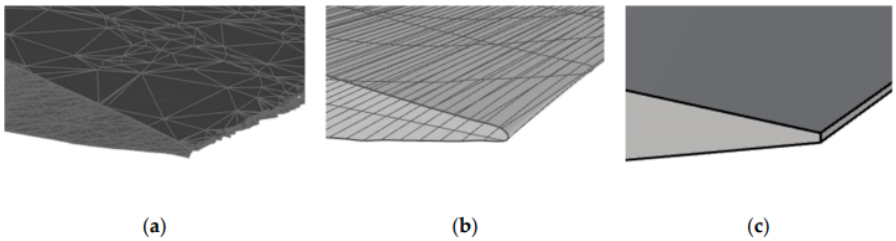


Figura 3.2: Bordo di fuga dell'iQFoil ottenuto tramite: (a) mesh a nuvola di punti (b) l'algoritmo generativo sviluppato in Grasshopper (c) ricostruzione manuale da parte di un esperto. Immagini tratte da Cirello et al. [6].

3.1.2 Metodi di ottimizzazione multi-fedeltà

Come già introdotto nel Capitolo 2, per l'ottimizzazione del design, si effettuano simulazioni CFD ad alta fedeltà, si parla infatti di SDBO (Simulation Based Design Optimization). Dato che sono notoriamente costose a livello computazionale, sono stati proposti e validati alcuni metodi multi-fedeltà all'interno di framework di ottimizzazione, che uniscono solutori BEM e RANS. I primi sono più veloci, i secondi richiedono tempi di attesa più lunghi. La differenza di tempo impiegato per le simulazioni è consistente: si va da qualche minuto (BEM) a ore o giorni (RANS). Ciò dipende dal fatto che i fondamenti teorici su cui si basano sono profondamente diversi, di conseguenza anche i risultati ottenuti presentano delle discrepanze. Il solutore a bassa fedeltà non è un sostituto di quello ad alta fedeltà, ma uno strumento per esplorare lo spazio di progetto. Per il buon funzionamento dell'ottimizzazione multi-fidelity è necessario costruire un modello surrogato, che registri l'errore tra i due livelli di fedeltà e lo corregga. La risposta del surrogato al problema si può esprimere come nell'Equazione 3.1 tratta da Solak et al. [22], per cui la previsione multi-fedeltà è la somma di surrogati per il livello più basso ($\tilde{f}_N(\mathbf{x})$) e degli errori tra livelli:

$$\hat{f}(\mathbf{x}) = \tilde{f}_N(\mathbf{x}) + \sum_{k=1}^{N-1} \tilde{\varepsilon}_k(\mathbf{x}), \tag{3.1}$$

dove N è il numero di livelli di fedeltà, $\sum_{k=1}^{N-1} \tilde{\varepsilon}_k(\mathbf{x})$ rappresenta l'errore fra livelli diversi e $\mathbf{x}$ è il vettore delle variabili di design.

I solutori del primo tipo come PUFFIn sfruttano la teoria del flusso potenziale, che prevede le ipotesi di incompressibilità, irrotazionalità e non viscosità. Il compito di codici come PUFFIn non è tanto quello di arrivare a risultati esatti, ma più che altro di catturare le tendenze. I codici basati sulle RANS, invece, non trascurano la viscosità e modellano anche la turbolenza. L'accuratezza del risultato dipende dalla griglia e dal modello adottati, dalle condizioni al contorno considerate e dalla validazione.

Un concetto fondamentale nell'ambito dei framework multi-fedeltà viene presentato da Solak et al. [22]: si tratta dell'adattività, grazie a cui si arriva a ottimizzare le risorse computazionali. Per istruire il modello surrogato, infatti, si ricorre a selezione adattiva delle simulazioni per avere i dati di partenza, al fine di ottenere previsioni precise. Il campionamento, se in stadio di progettazione preliminare, sceglie i dati del solutore a bassa fedeltà, man mano che ci si avvicina all'ottimo dà la precedenza a quelli high-fidelity. Inoltre, per la modellazione numerica tramite RANS, il solutore di flusso effettua un raffinamento adattivo della griglia. Sempre nello stesso lavoro, viene presentato un interessante confronto tra due modelli multi-fedeltà riportati nel diagramma in Figura 3.3. Si distinguono a sinistra un framework con quattro livelli di fedeltà, con uso di ISIS-CFD, a destra un altro con cinque livelli di fedeltà di cui uno con solutore PUFFIn.

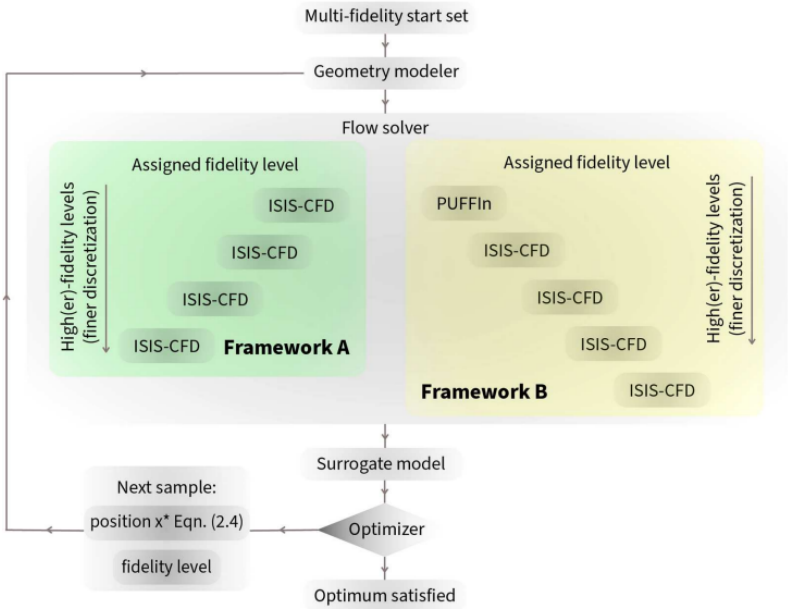


Figura 3.3: Diagramma che spiega quali sono i passaggi per arrivare all'ottimizzazione con modello surrogato, riportando due framework di lavoro. Il primo a sinistra presenta quattro modelli di fedeltà, quello a destra cinque. Tratta da Solak et al. [22].

Si ottengono due diverse configurazioni di ottimo:

- La prima presenta un'apertura alare ampia, un elevato allungamento, una forma in pianta quasi ellittica e un diedro negativo;
- La seconda è caratterizzata da un diedro più elevato, un'apertura maggiore e una corda ridotta rispetto alla base, ma la sua forma in pianta non è ellittica.

Nel primo caso si ottiene un maggior riduzione di resistenza (17%) rispetto al secondo (8%), questo perché nel limite temporale delle due settimane i due framework non hanno raggiunto lo stesso livello di convergenza. Sembra controintuitivo, ma in realtà la grande quantità di campioni esaminati (campionamento adattivo), rende complessivamente il processo più lungo. L'errore di questo metodo è maggiore, poiché negli step ad alta fedeltà non si riesce a correggere del tutto l'errore di partenza intrinseco del metodo a flusso potenziale (che non considera la resistenza viscosa).

Per soluzioni più avanzate e moderne per la combinazione di dati provenienti dai vari livelli, si può pensare alle reti neurali. Così hanno fatto Scholcz et al. [20], introducendo l'uso di reti neurali ricorrenti (Bi-LSTM), per ottenere portanza e resistenza instazionarie dovute a moti di beccheggio e sussulto. Il modello di machine learning deve essere in grado di restituire le forze non stazionarie, a partire da qualsiasi geometria parametrizzata. Per ridurre i costi computazionali, viene usata una combinazione di simulazioni a bassa fedeltà basate sul metodo vortex lattice e simulazioni ad alta fedeltà RANS, che restituiscono le grandezze instazionarie. Per una previsione affidabile è necessario integrare dati statici e dinamici. Il processo complessivo si divide in tre fasi:

- Le caratteristiche statiche sono ripetute lungo l'asse temporale e il risultato è unito alle caratteristiche dinamiche, a formare un singolo blocco.

- I blocchi sono ripetuti, in modo che l'output di un'intera sequenza alimenta lo strato successivo per estrarre i percorsi temporali.

- La sequenza finale permette di arrivare alla risposta temporale definitiva.

In alternativa ai processi basati su modelli surrogati, viene proposto da Sikirica et al. [21] un metodo di ottimizzazione adjoint. L'indipendenza del costo computazionale dal numero di variabili di design, lo rende ideale per problemi con molte variabili di ottimizzazione. L'altro vantaggio è la flessibilità intrinseca dell'approccio, poiché è in grado di trattare i bordi come una variabile di design. Le modifiche non vengono eseguite sui parametri in input, ma su tutto il dominio, attraverso deformazioni della forma basate sul gradiente. La diretta conseguenza è la possibilità di esplorare molte più configurazioni geometriche, anche quelle non convenzionali. Nonostante una serie di lati positivi del metodo, non mancano i limiti. Possono insorgere problemi, se le deformazioni durante il processo di ottimizzazione sono molto evidenti, ma anche se le funzioni obiettivo e i vincoli non sono ben definiti. In quest'ultimo caso, le simulazioni possono restituire geometrie irrealizzabili o prive di senso. Il metodo adjoint proposto in [21] aumenta i costi di simulazione, anche di cinque volte, ma ciò è compensato dall'assenza della parte di addestramento necessaria al modello surrogato.

3.1.3 Impatto delle imperfezioni

Considerare gli hydrofoil in composito come dei prodotti finiti perfetti è un'ipotesi poco realistica. Anche senza effettuare analisi approfondite, gli atleti che li utilizzano si sono resi conto e hanno segnalato che fra le singole unità c'è una discrepanza notevole nelle prestazioni. Quindi, è nata la necessità di comprare più esemplari, per poterli testare e capire quale sia il migliore. La diretta conseguenza è un aumento dei costi per i team concorrenti e l'evidente disparità, che si crea tra chi possiede più risorse economiche e chi ha un budget più limitato.

In [14] si approfondisce il problema, eseguendo prove sperimentali e simulazioni su ben diciotto esemplari di hydrofoil realizzati dallo stesso costruttore. Innanzitutto, si effettuano test sotto carico sui vari hydrofoil e con carichi diversi ottenendo curve di deformazione verticale, che differiscono più che altro al tip, dove alcuni foil si deformano maggiormente per la presenza di imperfezioni, come mostrato in Figura 3.4.

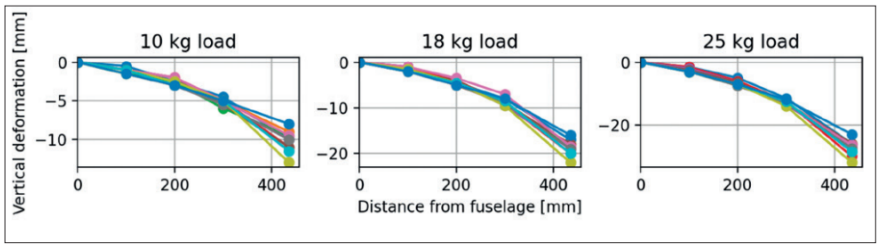


Figura 3.4: Grafici rappresentanti le deformazioni verticali su hydrofoil dello stesso costruttore ma con differenti imperfezioni, sottoposti a prove statiche con diversi carichi. Tratta da Macikowski et al. [14].

Tali differenze possono essere dovute a variazioni nella forma dell'hydrofoil, a discrepanze nella disposizione interna degli strati del materiale composito o a differenze nelle proprietà intrinseche. Sono state eseguite scansioni 3D, da cui è emerso che sono presenti variazioni nella forma degli esemplari analizzati. Poiché le ali sono realizzate in materiale composito, alcune delle differenze potrebbero derivare dai processi di finitura. La seconda possibile causa è che il processo o l'ambiente di produzione possano indurre discrepanze tra le forme delle varie unità, il che rende necessario un controllo delle prestazioni post-produzione. Si svolgono successivamente le analisi computazionali per estrarre le prestazioni, al variare localmente (uno per volta) dell'angolo d'attacco, di anedro e di freccia lungo l'apertura alare. I valori ottenuti vengono confrontati con il caso di riferimento, per cui i parametri sopra elencati sono pari a zero. Modificando il primo parametro, si scopre che ci sono differenze nei risultati della resistenza ridotte, osservabili in Figura 3.5 a destra. La variazione rispetto al caso di riferimento, con angolo

d'attacco pari a zero sia alla radice che all'estremità, nel range in analisi è del 7% per il massimo valore di C_D ottenuto e dello 0.8% per quello minimo. A sinistra, sempre nella Figura 3.5, nel grafico del C_L si nota che le variazioni sono decisamente più accentuate. Il caso di riferimento riporta un valore di $C_L = 0.141$. Il caso di C_L maggiore nell'intervallo analizzato, è più grande del 53% rispetto al caso di riferimento, mentre quello minore è più piccolo del 12%. Dunque, le differenze nel C_L sono più marcate che nel C_D, di conseguenza il rapporto tra portanza e resistenza, nell'intervallo misurato, cresce all'aumentare degli angoli d'attacco.

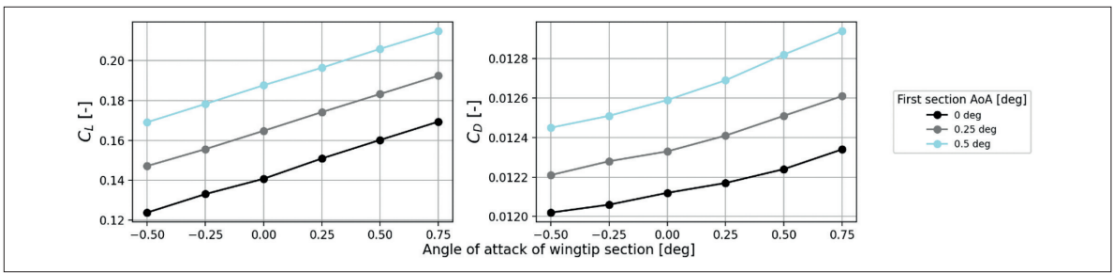


Figura 3.5: Variazione dei coefficienti di portanza (a sinistra) e resistenza (a destra), con modifiche dell'angolo d'attacco alla radice (in legenda) e all'estremità (asse delle ascisse), ottenuti con simulazioni CFD di hydrofoil parametrizzato post scansione 3D. Tratta da Macikowski et al. [14].

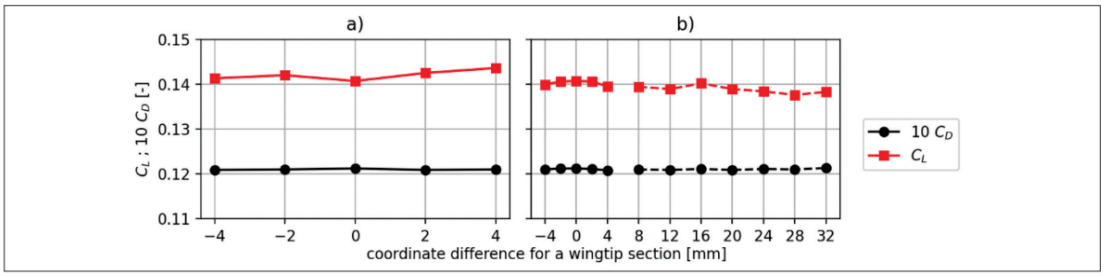


Figura 3.6: Coefficienti di portanza e resistenza al variare di: angolo di freccia a sinistra e angolo anedrale a destra, espressi come differenza di posizione tra la sezione all'estremità e alla radice. Sono stati ottenuti con software CFD, sempre a partire da foil reali scansionati. Tratta da Macikowski et al. [14].

Passando invece all'angolo anedrale e di freccia, i risultati sono riportati in Figura 3.6; il C_D viene moltiplicato per 10 per comodità. In entrambi i grafici, si osserva che le variazioni delle prestazioni non sono così evidenti, anche se nel caso della portanza si nota una differenza leggermente maggiore. Nel grafico a destra, la linea continua indica una prima serie di simulazioni basate su differenze geometriche, quella tratteggiata una seconda serie basata sui valori ottenuti dalle

prove statiche. Le ascisse indicano la variazione della coordinata della sezione al tip rispetto alla radice. I limiti di questo studio riguardano intanto il fatto che, per l'analisi CFD, gli hydrofoil sono considerati corpi rigidi e non si tiene conto di deformazioni e flessibilità, che potrebbero giocare un ruolo cruciale in condizioni reali, concetto che sarà chiarito nella Sezione 3.2.1. Poi, non si tiene conto di rugosità e piccoli difetti locali, che potrebbero modificare ulteriormente i risultati. Inoltre, il metodo in esame risulta piuttosto costoso e la sua applicabilità dipende da budget, tempo e risorse disponibili.

3.2 Risposta idroelastica e materiali

Le ali prodotte da Starboard poste sotto la tavola sono realizzate in pre-preg Toray carbon, un composito avanzato [11]. Questi tipi di materiali permettono di orientare le fibre in determinate direzioni, in base alle condizioni di carico ed è anche da ciò che dipende la deformabilità delle ali. Infatti, in determinate condizioni operative, non è possibile considerarle corpi rigidi, poiché si cadrebbe in errori non trascurabili. Si parla, dunque, di interazione fluido-struttura, che consiste nella combinazione di software CFD per il fluido e FEA per la struttura. L'obiettivo è quello di catturare l'influenza reciproca tra flusso e foil. Con una certa struttura interna del composito, si osserva un comportamento peculiare dell'hydrofoil: l'accoppiamento flessione-torsione (BTC). La sua rilevanza è dovuta all'influenza che ha sull'angolo d'attacco e quindi sulle prestazioni. Lo studio del meccanismo è utile per implementare strategie di autoregolazione dell'angolo d'attacco e agire quindi su portanza e resistenza.

3.2.1 Interazione fluido-struttura

L'hydrofoil non può essere considerato un corpo rigido, per via delle deformazioni che subisce. Per tenere conto della reciproca influenza di fluido e struttura (FSI), la modellazione numerica viene eseguita con un approccio combinato di un software CFD e un solutore FEA. Una categorizzazione delle simulazioni si basa sul modo in cui lo strumento fluidodinamico e quello strutturale comunicano fra loro. Un accoppiamento bidirezionale (two-way coupling) prevede il calcolo dei carichi fluidodinamici scambiati all'interfaccia con la struttura. Essa si deforma e gli spostamenti sono rimandati, sempre attraverso l'interfaccia di accoppiamento, al software CFD, che calcola i carichi aggiornati. Lo scambio si ripete in modo iterativo fino al raggiungimento della convergenza. Se invece i carichi del fluido sono trasferiti al solutore strutturale, ma la deformazione ottenuta non aggiorna il dominio fluidodinamico, l'accoppiamento è unidirezionale (one-way coupling). Per un elemento come l'hydrofoil, che subisce deformazioni elevate ad alte velocità, il primo approccio è quello più preciso, ma anche più costoso a livello computazionale.

Per la validazione del metodo sono previste prove sperimentali in vasca. In Giovannetti et al. [12] si dimostra l'efficacia del metodo tramite alcune prove sperimentali al variare di angoli di rake (o beccheggio) e leeway (o deriva). Per calcolare le deformazioni in tempo reale, viene usata la tecnica 3D DIC (Digital Image Correlation), per cui due telecamere digitali catturano le immagini del foil deformato, riuscendo, con un software, a calcolare le deformazioni e deflessioni in tre dimensioni. Le simulazioni sono eseguite con ipotesi di isotropia, per mancanza di dati come la posizione e la disposizione del rinforzante interno nel composito, che non vengono catturate dal processo di reverse engineering e anche perché non viene rilevata la rigidezza torsionale. Confrontando simulazioni e dati sperimentali, si osserva che la portanza è sottostimata e la resistenza sovrastimata rispetto agli esperimenti; l'errore sulla resistenza è comunque maggiore perché è di un ordine di grandezza più piccola. L'isotropia ipotizzata, dunque, non è una semplificazione adeguata per la descrizione del problema. In primo luogo, sovrastima la rigidezza, di conseguenza le deformazioni risultanti sono minori e non si tiene conto dell'accoppiamento flessione-torsione, concetto che verrà approfondito nella prossima sezione. Per i motivi appena descritti, i coefficienti di forza calcolati variano rispetto ai test. Inoltre, un solo valore di rigidezza non è sufficiente per descrivere il comportamento dell'hydrofoil, proprio per la presenza del rinforzante interno, che nella modellazione non viene considerato.

3.2.2 Accoppiamento flessione-torsione

Come già accennato nella sezione precedente, l'hydrofoil può arrivare ad altissime velocità e il flusso d'acqua che lo investe può provocare deformazioni non trascurabili.

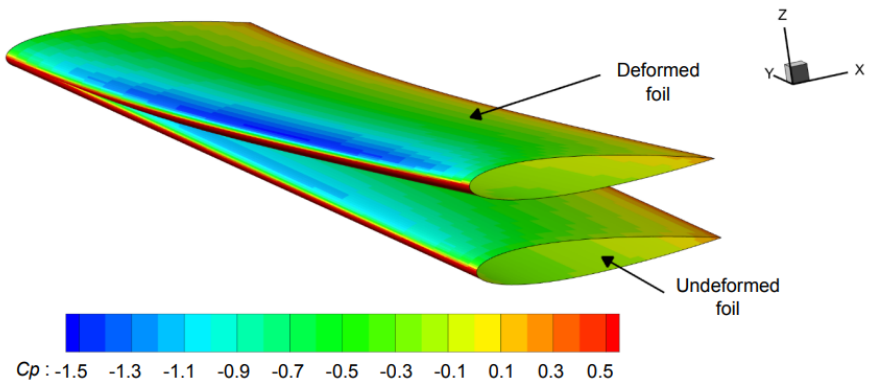


Figura 3.7: Accoppiamento flessione-torsione di un hydrofoil in composito, ottenuto con modellazione 1D nelle seguenti condizioni: $\alpha = 4°$, $h/c = 2.76$, $V_\infty = 0.8m/s$. Sono raffigurati il foil non deformato e con deformazione. Si osserva anche il campo di pressione con relativa legenda. Tratta da Faye et al. [9].

Più precisamente, si può verificare un accoppiamento flessione-torsione o BTC (Bend-Twist Coupling), secondo cui un carico flessionale induce torsione e viceversa. Viene riportato nella Figura 3.7 l'esempio dell'hydrofoil esaminato da Faye et al. [9], che mostra la variazione dell'angolo d'attacco determinata dalla deformazione e anche il coefficiente di pressione sulla superficie del foil. L'importanza dello studio di tale fenomeno, deriva dal fatto che ha una notevole influenza sull'alterazione dell'angolo d'attacco lungo l'apertura alare. L'impatto è quindi evidente in termini di prestazioni e stabilità; si può verificare un incremento dell'angolo d'attacco causato da una torsione negativa o una diminuzione dovuta a rotazione positiva. Probabilmente, due fattori determinanti per la spiegazione di questo comportamento sono l'angolo di freccia e la disposizione del rinforzante interno nel materiale composito.

Per evidenziare l'importanza della struttura interna del materiale si presenta la ricerca di Temtching Temou et al. [23], nella quale si analizzano quattro configurazioni di hydrofoil identici per geometria, ma differenti per materiali utilizzati e disposizione degli strati, elencate nella Tabella 3.1, allo scopo di studiare come cambiano le prestazioni e la risposta idroelastica al variare della disposizione degli strati e del materiale utilizzato, cioè fibra di vetro (P_1, P_2, P_3) o carbonio (P_4). Vengono innanzitutto effettuate prove statiche in aria per tutti gli esemplari, al fine

Tabella 3.1: Presentazione di quattro foil con sezione NACA0015, che differiscono per materiali e disposizione degli strati. Sono sottoposti a grandi deformazioni all'estremità dell'ala e attraversano la superficie libera. Tratta da Temtching Temou et al. [23].

Foils	Material	Layup
P_1	Epoxy-Glass2	$[(\pm 45)_2/0/(\pm 45)_2]$
P_2	Epoxy-Glass1	$[90/-45/0/-45/90]$
P_3	Epoxy-Glass1	$[90/45/0/45/90]$
P_4	Epoxy-Carbon	$[90/(0)_2/90]$

di stabilire le proprietà intrinseche di ogni foil, in particolare rigidità torsionale e flessionale. Poi si eseguono le prove idrodinamiche e la modellazione numerica, per la quale si usano due codici: uno a bassa e uno ad alta fedeltà, entrambi tengono conto dell'interazione fluido-struttura, modellando sia la parte fluidodinamica che quella strutturale dell'hydrofoil. Il primo, a costo computazionale minore, unisce flusso potenziale e teoria delle travi, il secondo prevede di usare il metodo del volume di fluido con un software di modellazione di strutture più avanzato. In condizioni di grande deformazione all'estremità alare e perforazione della superficie libera, si osserva che i foil con strati orientati a 45° presentano accoppiamento torsione flessione. L'orientazione a -45° porta a torsione negativa, caricando l'estremità e

aumentando la deformazione, l'angolo d'attacco e la portanza. Il fenomeno opposto si osserva in P_3 dove l'angolo di $+45°$ tende a scaricare il tip. Facendo riferimento alla Tabella 3.1, nel caso di P_1 la deformazione è piuttosto evidente, mentre in P_4 è abbastanza ridotta, in entrambi i casi però non c'è accoppiamento flessione-torsione. Si conferma, quindi, quello che negli studi precedenti è stato chiamato PAC (Passive Adaptive Composites), ossia la possibilità di agire sulle prestazioni dell'hydrofoil modificando la struttura del materiale composito. Il confronto tra i risultati dimostra una buona corrispondenza tra le prove sperimentali e numeriche, anche usando il metodo a bassa fedeltà. Quest'ultimo, però, potrebbe presentare alcuni problemi in altri casi più complessi e realistici, dato che quello in esame (alto allungamento alare e struttura a sandwich costante lungo l'apertura) si presta bene a un'approssimazione con teoria del flusso potenziale e teoria della trave.

Qualche anno dopo, anche Faye et al. [9] hanno sperimentato la modellazione strutturale basata sulla teoria della trave, con il software ABAQUS, accoppiato a PUFFIn per il fluido. Confrontando il BTR (Bend Twist Ratio) con il metodo 3D e gli esperimenti, gli elementi finiti 1D si sono dimostrati validi per descrivere il BTC del foil, dunque possono essere usati per modellare gli hydrofoil; velocizzando i tempi di simulazione, permette di provare diverse configurazioni, senza dover effettuare prove sperimentali. Uno studio di Cardoso de Brito et al. [5], effettuato sulla pinna

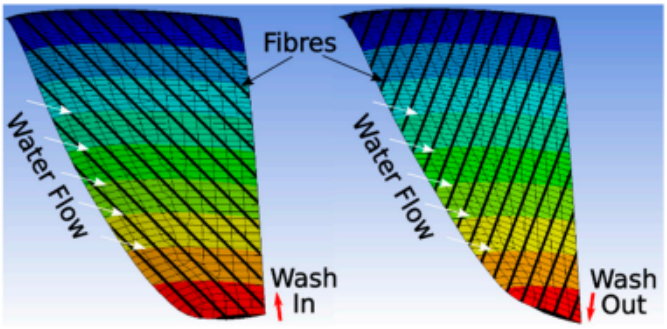


Figura 3.8: Disposizione degli strati in una pinna da windsurf, per avere wash-in (a sinistra) e wash-out (a destra); la superficie rappresentata è quella sottovento o in pressione, cioè il lato opposto a quello in cui soffia il vento. Tratta da Cardoso de Brito et al. [5].

in composito di un windsurf tradizionale, mostra alcune scoperte rilevanti. La pinna viene trattata come l'ala di un hydrofoil per somiglianza nella forma e nei materiali. Gli strati, per garantire controllo con carichi elevati e regolazione dello svergolamento al tip ad alte velocità, sono ruotati in modo da ottenere wash-in o wash-out, rispettivamente un aumento o diminuzione dell'angolo d'attacco dalla radice al tip, come viene mostrato in Figura 3.8. L'ottimizzazione del wash-in/out è complicata da progettare, perché dipende da molte variabili, tra cui le condizioni

del mare e il windsurfer; perciò, deve essere studiata con appositi test. A seguito delle simulazioni (anche unidirezionali), risulta che gli effetti di wash-in appaiono sempre dominanti e il carico idrodinamico deforma la pinna in modo tale da ridurre la torsione alle estremità; invece, ad alte velocità il fenomeno si inverte e può addirittura generare wash-out, migliorando così il controllo. Quest'ultimo rappresenta il risultato più inatteso e controintuitivo.

3.3 Propulsione

La tavola da windsurf non prevede un motore, che generi la spinta necessaria per andare avanti. Comprendere i vantaggi della propulsione instazionaria generata con la manovra del pumping, con due diverse accezioni, può condurre a nuove strategie, al fine di migliorare i tempi di gara e l'efficienza delle manovre.

All'inizio di una gara, in assenza di vento sufficiente o dopo manovre come la virata (rotazione della prua verso la direzione del vento e navigazione in bolina, cioè controvento) i windsurfer utilizzano la tecnica del pumping, per dare inizio al moto e mantenerlo. Consiste in un movimento oscillatorio rappresentato dalla sequenza in Figura 3.9, ottenuto muovendo su e giù il centro di massa, mentre viene continuamente adattato l'angolo relativo tra vento e vela. Quest'ultima oscilla e genera propulsione intermittente, tenendo la tavola sopra l'acqua. Si sottolinea il fatto che nel windsurf spinta e portanza (stazionaria) siano generate anche in assenza del moto di pumping, grazie alla vela.



Figura 3.9: Sequenza che raffigura le fasi del pumping, eseguita da un atleta francese. Si osserva il moto del centro di massa del windsurfer. Tratta da Bertrand et al. [3]

Già Floryan et al. [10] avevano proposto leggi di scala verificate sperimentalmente relative alla spinta, ai coefficienti di potenza e all'efficienza per un foil soggetto a sollevamento (heaving) e beccheggio (pitching). Tuttavia, l'angolo di incidenza medio considerato, pari a zero, impedisce l'utilizzo della legge di scala della spinta nel caso del windsurf. In Bertrand et al. [3], si analizzano le prestazioni, al variare di un'ampia gamma angoli di incidenza medi e del $St_A = \frac{fA}{V_\infty}$, con f e A frequenza e ampiezza del moto di pumping, di un foil con sezione NACA0018 in moto di beccheggio oscillante, che simula il pumping della vela. Viene poi adottato un approccio sport-mimetico: le forze aerodinamiche generate dalla vela sono riportate

nel sistema di riferimento della tavola, scomponendole in scarroccio (drift), relativo C_{drift} e spinta (drive); il relativo C_{drive}, esplicitato nell'Equazione 3.2 è un coefficiente fondamentale per determinare la velocità e quindi la performance della vela di un windsurf.

$$C_{\text{drive}} = C_L(\alpha_m)\sin(\text{AWA}) - C_D(\alpha_m)\cos(\text{AWA}), \tag{3.2}$$

$$C_{\text{drift}} = C_L(\alpha_m)\cos(\text{AWA}) + C_D(\alpha_m)\sin(\text{AWA}), \tag{3.3}$$

dove α_m è l'angolo d'incidenza medio e AWA (Apparent Wind Angle), cioè l'angolo tra la direzione di velocità del vento apparente e la direzione della velocità della prua. All'aumentare del numero di Strouhal, si osserva una transizione da resistenza a spinta e anche un ampliamento del range di α_m in cui viene generata propulsione. Anche il C_{drift} nell'Equazione 3.3 aumenta, rendendo difficoltoso il controllo della tavola; bisogna, dunque, trovare un angolo medio, che sia un compromesso tra la generazione di propulsione e lo scarroccio del windsurf.

Il termine pumping viene usato anche per indicare il moto oscillatorio verticale della sola tavola senza l'ausilio di una vela, in un modello più generale di pumped-hydrofoil(PH). Tali oscillazioni consentono di generare propulsione in assenza di motore. Un modello matematico semplificato, che include portanza e spinta, di un hydrofoil soggetto a pumping viene fornito da Rozhdestvensky [19], a fronte delle carenze nella letteratura precedente. Delle basi matematiche solide per questo argomento sono fondamentali per progettisti, produttori e utenti. Per affrontare il problema, si introducono una serie di semplificazioni per poter considerare il sistema un oscillatore forzato:

- L'allungamento alare del foil è alto ($\lambda > 5$),
- Gli angoli di attacco, la curvatura dei profili e le ampiezze delle oscillazioni sono considerati piccoli per permettere la linearizzazione dei flussi,
- La profondità operativa h è dell'ordine della lunghezza della corda,
- I Fr_c (2.9) sono abbastanza grandi da trascurare gli effetti d'onda,
- Il moto dell'hydrofoil è ridotto al solo moto di sollevamento forzato.

Date queste ipotesi, si parte dall'equazione di moto del foil oscillante (PH):

$$(M + m')\frac{d^2y}{dt^2} = R_{yw}(t) + m_0\frac{d^2y_0}{dt^2}, \tag{3.4}$$

dove M è la massa totale della tavola, m' è la massa aggiuntiva, dovuta al trasferimento di energia cinetica in acqua, $y(t)$ lo spostamento verticale dell'hydrofoil, m_0 la massa dell'atleta e $y_0(t)$ il suo spostamento verticale, $R_{yw}(t)$ è la forza instazionaria verticale sul PH proveniente dall'hydrofoil.

In crociera, il peso totale deve essere bilanciato verticalmente dalla portanza generata come si esplicita nella seguente equazione:

$$Mg = R_{y0}, \tag{3.5}$$

con R_{y0} la forza portante quasi statica, che sostenta la tavola alla profondità di crociera.

Poi, si effettua l'adimensionalizzazione delle due equazioni rispetto alla corda dell'ala c, alla velocità caratteristica V_∞ e al tempo caratteristico c/V_∞. In seguito, si espande il coefficiente di portanza instazionaria $C_y(\tau)$ rispetto a posizione verticale $\eta = y/c$, velocità $\dot{\eta}$ e accelerazione $\ddot{\eta}$. Dopo questi passaggi, si arriva ad approssimare il movimento del foil con l'equazione dell'oscillatore forzato sotto riportata:

$$\ddot{\eta} + 2\beta\dot{\eta} + \kappa^2\eta = \delta\ddot{\eta}_0 \tag{3.6}$$

con β che rappresenta lo smorzamento e κ proporzionale alla frequenza propria del sistema e dipendente anche da C_y^η, derivata del coefficiente di portanza rispetto alla profondità.

Utilizzando la teoria di Theodorsen, si ottengono le derivate del coefficiente di portanza instazionaria e poi il coefficiente di spinta medio nell'equazione di seguito:

$$\langle C_t \rangle = \frac{\pi k^2 A_0^2}{4}\left[F(k/2)^2 + G(k/2)^2\right], \tag{3.7}$$

dove A_0 è l'ampiezza adimensionale dell'oscillatore a regime, $k = \frac{\omega c}{V_\infty}$ è la frequenza ridotta con $\omega = 2\pi f$ frequenza angolare; la frequenza ridotta differisce dal numero di Strouhal basato sulla corda che è calcolato come $St_c = \frac{fc}{V_\infty}$, infine F e G sono rispettivamente la parte reale e complessa della funzione di Theodorsen. Si trovano, poi, la velocità di crociera e la resistenza. Eguagliando $\langle C_t \rangle$ e la resistenza per imporre la condizione di crociera, si ottiene il numero di Strouhal necessario per il funzionamento auto-propulso del foil. Si deduce da alcune equazioni la possibilità di risonanza di alcune frequenze, che potrebbe aumentare notevolmente la spinta del foil. Per fornire dati più pratici, si riportano nelle Figure 3.10 e 3.11 i risultati di coefficienti di spinta e delle oscillazioni ottenuti per $m_0 = 80$kg, $\overline{m_0} = 2.37$, ossia la densità relativa del rider, $k* = 0.38$, cioè k per la condizione di crociera. Nel grafico in Figura 3.10, è rappresentata la dipendenza del $\langle C_t \rangle$ e del coefficiente di resistenza, chiamato in questo caso C_x, da k. Invece, nel secondo grafico della Figura 3.11, vengono raffigurate le oscillazioni del PH, in termini di spostamento verticale adimensionalizzato η in funzione del tempo adimensionale τ. Calcolando il coefficiente di spinta anche per altre masse, si considera il coefficiente di resistenza indipendente dalla massa del rider, per il contributo trascurabile della resistenza d'onda.

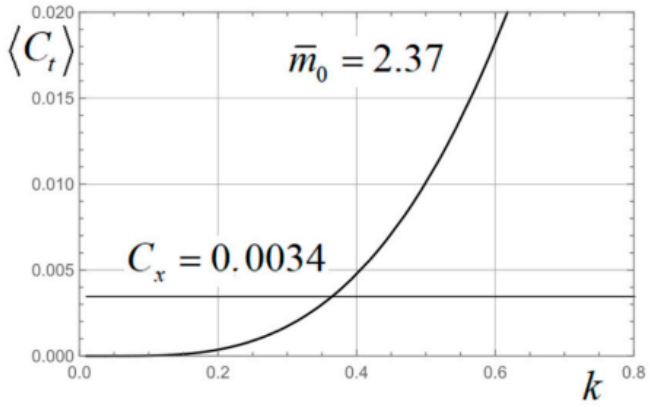


Figura 3.10: Coefficienti di spinta media $\langle C_t \rangle$ e resistenza indicata qui con C_x in funzione di k, per $m_0 = 80$kg, $\overline{m_0} = 2.37$, $k* = 0.38$. L'intersezione della curva con la retta del coefficiente di resistenza determina la condizione di crociera. Tratta da Rozhdestvensky [19].

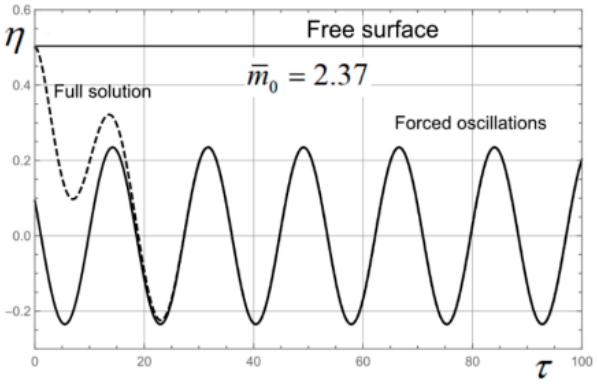


Figura 3.11: Oscillazioni verticali del foil espressi con lo spostamento adimensionale, in funzione del tempo reso adimensionale, con indicazione della superficie libera, per $m_0 = 80$kg, $\overline{m_0} = 2.37$, $k* = 0.38$. Tratta da Rozhdestvensky [19].

Per sintetizzare, dopo la fase di reverse engineering, la ricostruzione della superficie con il metodo indicato, permette di ottenere un risultato dall'errore trascurabile, rispetto alla ricostruzione manuale che richiede più tempo. La successiva ottimizzazione del design può essere eseguita con diversi metodi, in base alle esigenze dei progettisti, sia il processo adjoint, che quello con modello surrogato sono validi e hanno lati positivi e limitazioni, di cui bisogna tenere conto nella scelta. Lo stesso vale per i solutori BEM e RANS, il cui utilizzo dipende dalla fase di progetto, dal tempo a disposizione, dai vincoli. L'hydrofoil come prodotto finito, poi, non è perfettamente conforme al modello ottimale e ciò impatta sulle prestazioni, portando

alla necessità di un controllo post-produzione. In fase di design, si stabiliscono i carichi cui viene sottoposto il foil, si scelgono materiali e disposizione degli strati di laminazione. Il controllo di questi aspetti determina il verificarsi di accoppiamento flessione-torsione e il livello di deformazione delle ali nelle diverse condizioni operative. Per catturare l'interazione tra i carichi del fluido e gli spostamenti dell'hydrofoil (FSI) nelle simulazioni, è possibile utilizzare un accoppiamento bidirezionale dei software CFD e FEA, tenendo presente anche le proprietà del materiale, per non cadere in errori. Invece, per quanto riguarda il tema della propulsione, si apprende che la manovra del pumping della vela è fondamentale nell'uso dell'iQFoil, per generare propulsione instazionaria in alcune fasi della navigazione. Il pumping, però, spiega anche la generazione di portanza di un modello di tavola isolata, senza uso di un motore che generi spinta.

Capitolo 4

Aspetti fluidodinamici e criticità operative

A differenza delle ali di un aereo che operano in un fluido illimitato, l'hydrofoil è immerso in acqua. Ci sono delle conseguenze tipiche di tale ambiente operativo, che non si presentano nei voli in aria. Un primo problema è determinato dalla vicinanza alla superficie libera. L'attento studio delle conseguenze di questo fatto è fondamentale specialmente nella fase di design, al fine di alimentare i VPP (Velocity Prediction Program). Per la descrizione del flusso vengono utilizzati parametri come il numero di Froude, il rapporto di profondità basato sulla corda, l'angolo d'attacco e i parametri geometrici della superficie portante. Se da una parte la presenza di onde genera un'ulteriore resistenza, dall'altra in alcuni casi, si scopre che può migliorare le prestazioni ritardando lo stallo. Per le elevate velocità a cui arrivano i windsurf dotati di hydrofoil, non si possono trascurare alcune criticità impattanti. I principali problemi per il windsurfer, causati da cavitazione e ventilazione, sono il calo delle prestazioni e la perdita di stabilità. Poi per la cavitazione vaporosa si aggiungono anche vibrazioni, rumore ed erosione. La loro comprensione consente di attenuarle o mitigare gli effetti, al fine di eliminare i disagi per gli atleti. Già in fase di simulazione, bisogna tenere conto di queste condizioni operative avverse.

4.1 Influenza di gravità e superficie libera

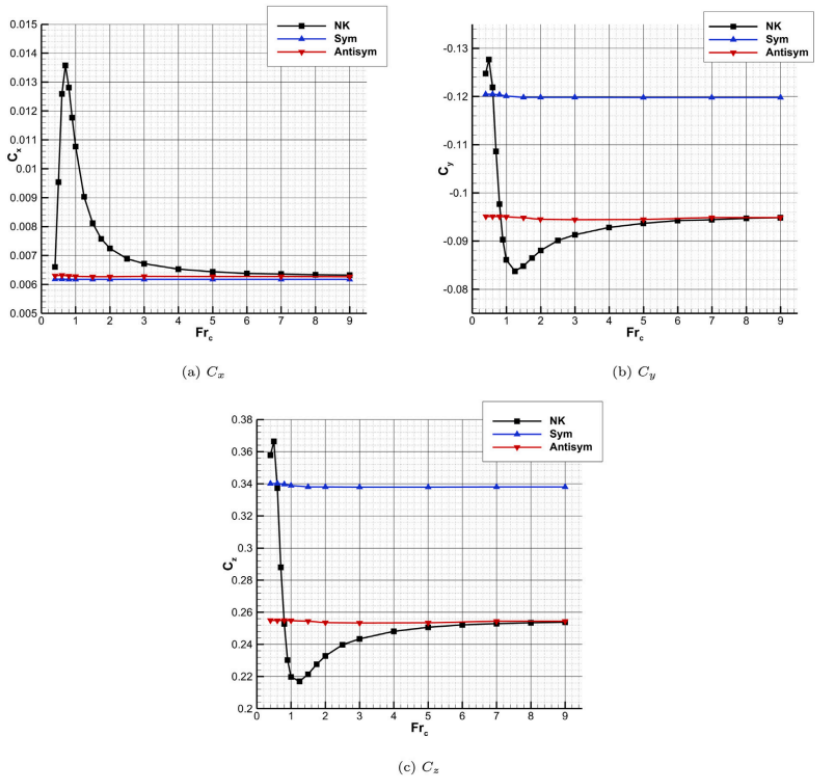
La presenza della superficie libera e la sua distanza dall'hydrofoil incidono notevolmente sui coefficienti di forza. Di seguito, si elencano i principali effetti che si manifestano su un foil in prossimità dell'interfaccia acqua-aria, riportati da Bot et al. [4]:

- Il flusso attorno al foil è limitato superiormente dalla presenza della superficie libera e modifica così il campo di pressione sul dorso; di conseguenza si verifica una perdita di portanza con l'avvicinarsi alla superficie libera.
- Si genera una resistenza d'onda, dipendente da immersione, angolo d'attacco dell'ala, angolo di sbandamento e numero di Froude. Il motivo è la deformazione della superficie libera causata dalla variazione del campo di pressione.
- Se l'hydrofoil si avvicina così tanto alla superficie libera da oltrepassarla, si forma una resistenza aggiuntiva.
- Si amplifica il rischio di ventilazione, fenomeno approfondito nella Sezione 4.2.2.

4.1.1 Numero di Froude, profondità di immersione e allungamento alare

In questa sezione, si approfondisce come influiscono il numero di Froude, il rapporto h/c e l'allungamento alare, citando alcune ricerche che hanno fornito risultati rilevanti. Nelle simulazioni di Perali et al. [18], eseguite su un hydrofoil con metodo BEM, si modella la superficie libera con tre diverse condizioni: la condizione di simmetria, per cui la superficie si comporta come una parete rigida, la condizione di anti-simmetria e la condizione di Neumann–Kelvin (NK) nell'Equazione 2.14. Nel primo caso la pressione minima è localizzata nella parte sinistra (port side), mentre nel secondo si trova nella parte destra (starboard side). Tramite la modellazione numerica di una configurazione con la sola ala principale, si scopre che, per $Fr_c < 0.6$, i risultati ottenuti con NK si avvicinano più a quelli con condizione di simmetria, che a quelli con condizione di anti-simmetria, come evidenziato in Figura 4.1. Però, i regimi tipici dell'hydrofoil in ambito sportivo si aggirano intorno a $Fr_c > 3.0$; i risultati ricavati con Neumann-Kelvin corrispondono con la condizione antisimmetrica per $Fr_c > 5.0$, sempre nella Figura 4.1, dove C_x corrisponde al coefficiente di resistenza e $\sqrt{C_y^2 + C_z^2} = C_L$, che rappresenta il coefficiente di portanza, perché è presente un angolo di sbandamento (γ). Da sottolineare che, anche l'asse y qui utilizzato è in verso opposto a y_w. Ciò significa che, scegliendo il range in cui lavora l'hydrofoil, non è necessario ricorrere alla condizione di NK. Si preferisce usare le altre, se possibile, perché non necessitano della fase di meshing della superficie libera, riducendo così il tempo computazionale e potenziali errori. L'indagine sull'influenza reciproca dell'ala principale e dello stabilizzatore mostra che quest'ultimo non ha grande impatto sui coefficienti di forza dell'ala anteriore. Viceversa, la presenza dell'ala principale (rispetto al solo stabilizzatore) genera il downwash, che riduce la resistenza fino a farla diventare negativa e renderla quindi

una forza propulsiva. Il verso positivo della forza resistente è opposto a quello dell'asse x_w, definito nel Capitolo 2, perciò diventando negativa assume lo stesso verso della spinta. In più, aumenta la portanza assoluta dell'ala secondaria. Per questa configurazione invece la condizione che fornisce una previsione più accurata è quella di Neumann-Kelvin.



(a) C_x (b) C_y

(c) C_z

Figura 4.1: Grafici dei coefficienti di forza rispettivamente nelle direzioni (a) x, (b) y, (c) z, che corrispondono a x_w, y_w, z_w precedentemente definiti, in funzione di Fr_c. In legenda, sono distinte le condizioni di superficie libera di simmetria, asimmetria e Neumann-Kelvin. Rimane costante la profondità d'immersione con $h/c = 0.83$, dove c è la corda a metà apertura dell'ala principale. Tratta da Perali et al. [18].

L'influenza della superficie libera dipende anche dalla distanza che ha l'hydrofoil da essa e quindi da un parametro denominato profondità di immersione h/c. Gli effetti del pelo libero dell'acqua iniziano a essere trascurabili con l'aumento della profondità; nell'articolo di Bot et al. [4] il valore soglia è $h/c = 3$, per la specifica geometria di iQFoil analizzata. Al diminuire della profondità invece, gli effetti sono molto evidenti e impattanti sulle prestazioni. Da alcuni test eseguiti in vasca, si arriva ai seguenti risultati. Innanzitutto, all'avvicinarsi del foil alla superficie libera

resistenza e portanza diminuiscono e anche la pendenza della curva, rappresentata da $C_{L\alpha}$; si riduce anche la resistenza indotta, che domina su quelle viscosa e d'onda. Le misure del fattore di efficienza di Oswald (e) indicano che l'iQFoil sia ottimizzato più per la resistenza viscosa che per quella indotta. Infine, quando l'ala emerge in misura maggiore e ad alti angoli d'attacco, può verificarsi il fenomeno della ventilazione approfondito nella Sezione 4.2.2. I risultati ottenuti sono adatti a essere utilizzati in programmi di simulazione numerica e di previsione delle prestazioni, fondamentale per l'iQFoil, modello usato per gareggiare.

Si riportano di seguito dei risultati interessanti a cui sono arrivati Nicolas et al. [17], in merito al ruolo dell'allungamento alare λ:

- La profondità di immersione di soglia, al di sopra della quale gli effetti di superficie libera cessano, aumenta sia con la velocità del flusso, sia con il numero di Froude, sia con l'allungamento alare.

- L'incremento dell'allungamento alare può migliorare o penalizzare i coefficienti di portanza e resistenza, a seconda del numero di Froude e del rapporto h/c. Quando la prossimità alla superficie libera incrementa o penalizza un coefficiente di forza rispetto al suo valore in fluido infinito ($C_{D\infty}$ e $C_{L\infty}$), l'aumento dell'allungamento alare amplifica tale effetto.

- Per tutti gli allungamenti alari, gli effetti della velocità del flusso sui coefficienti di portanza e resistenza diminuiscono e infine scompaiono allontanandosi dalla superficie libera.

4.1.2 L'effetto delle onde

Per via della variazione del campo di pressione, la superficie libera dell'acqua subisce una deformazione, che si traduce nella generazione di onde, le quali accrescono la forza d'opposizione esercitata dall'acqua. Il campo d'onde trasversali, secondo i dati ottenuti in Bot et al. [4], è in opposizione di fase per portanza positiva e negativa, ossia le onde generate sono esattamente speculari: dove nel primo caso c'è una cresta, nell'altro si genera una valle. In generale però la forma del campo ondoso è strettamente collegata alle condizioni operative. In alcune condizioni operative, si presenta una complessiva diminuzione della resistenza con l'avvicinamento alla superficie, il che sembra un paradosso. In realtà, parallelamente alla generazione di onde, si verifica una diminuzione di portanza, per cui anche la componente indotta della resistenza si riduce. Quest'ultimo contributo prevale e determina una resistenza totale minore all'aumento degli effetti di superficie. L'effetto sopra descritto vale per alti numeri di Froude e h/c ridotte.

Non è sempre vero che la presenza di onde superficiali peggiora le prestazioni degli hydrofoil, infatti Ni et al. [16] arrivano a risultati interessanti per angoli d'attacco

elevati e confermano le scoperte precedenti per carichi più ridotti, effettuando confronti tra un foil soggetto a effetti del pelo libero e uno che invece non ne risente. Il foil soggetto agli effetti di superficie libera, rispetto al caso che invece non ne risente (baseline), mostra un innalzamento del picco di portanza ad alti angoli d'attacco e un abbassamento della resistenza, di conseguenza si ha un complessivo aumento dell'efficienza. Il fenomeno può essere dovuto alle onde sulla superficie libera indotte dal moto; queste, nel caso di alto AoA (Angle of Attack), producono un flusso ad alta velocità, che aumenta la quantità di moto dello strato limite sul dorso, evitando la separazione del flusso e ritardando lo stallo. Nei grafici in Figura 4.2, si osserva l'effetto spiegato sopra con una mitigazione della separazione evidente per $\alpha = 30°$, la zona a velocità tendente a zero infatti è visibilmente ridotta. La presenza di una superficie libera, può non essere solo un disturbo e anzi nel caso in esame, con alti angoli d'attacco, migliora notevolmente le prestazioni; il ritardo dello stallo, infatti, permette di estendere il range operativo del foil in questione.

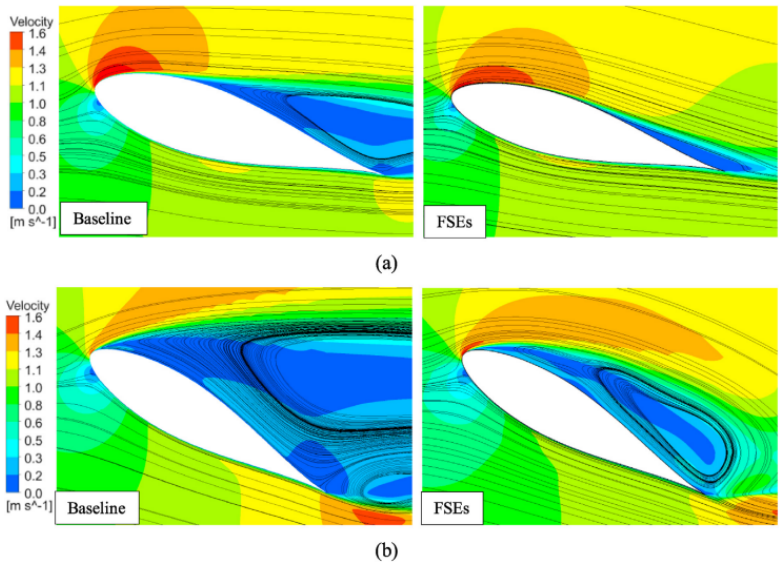


Figura 4.2: Hydrofoil ad angoli d'attacco di 15° (a) e 30° (b) con confronto tra caso di base e quello FSEs(Free Surface Effects). Sono rappresentate anche le linee di flusso e il campo di velocità con la relativa legenda sulla sinistra. Immagine tratta da Ni et al. [16].

4.2 Aspetti critici principali

Con aspetti critici, si intendono quei meccanismi che influenzano negativamente intanto le prestazioni, poi hanno anche altre conseguenze. Il primo è la cavitazione,

che ha una serie di altri effetti tra cui vibrazioni, rumore ed erosione. La classificazione dei vari tipi e l'interazione fra cavità e superficie libera sono argomento di analisi. La seconda condizione critica è quella di flusso ventilato, fortemente connesso alla vicinanza con la superficie libera. Si descrivono la formazione, che comprende i diversi modi d'innesco e la stabilizzazione e l'eliminazione della ventilazione, composta da washout e rewetting. Le varie fasi determinano il cambiamento del regime di flusso, che può essere completamente bagnato, parzialmente ventilato e completamente ventilato.

4.2.1 Cavitazione

Come anticipato nel Capitolo 2 la cavitazione è alla base di una serie di problemi, tra cui riduzione della portanza, vibrazioni, rumore ed erosione. L'innesco della cavitazione avviene specialmente nelle zone a bassa pressione, dove è più facile che il liquido raggiunga la pressione di vapore saturo e formi delle vere e proprie cavità. Alla loro formazione, la prima criticità che emerge è la modifica di portanza e resistenza. Poi, le cavità vengono portate in zone ad alta pressione e condensano istantaneamente, collassando. I getti che generano, ad altissima velocità, sono la causa dei problemi di rumore, vibrazioni ed erosione. Si distinguono: regime completamente bagnato ($L_c = 0$) cavitazione parziale ($0 < L_c < c$) e supercavitazione ($L_c > c$), dove L_c è la lunghezza della cavità e c la corda.

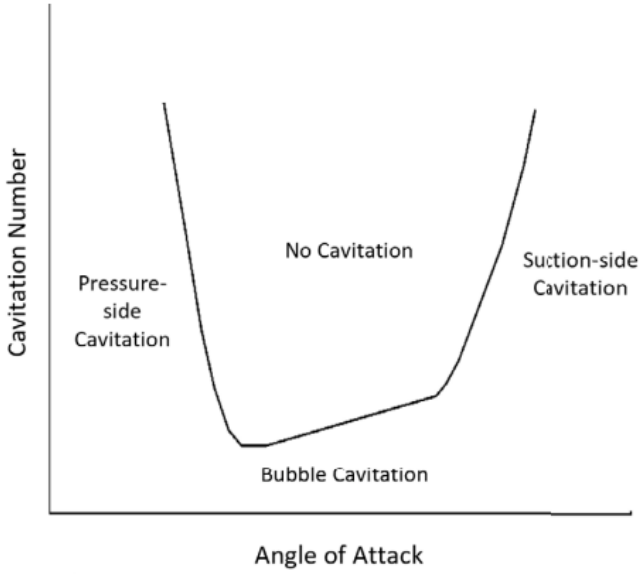


Figura 4.3: Secchiello di cavitazione generalizzato con le zone critiche specificate, ottenuto con il solutore PROCAL. Il grafico descrive le caratteristiche di un foil cavitante per angoli d'attacco tra -15° e +15°. Tratta da Scholcz et al. [20].

L'impatto del fenomeno sulle prestazioni indica quanto è importante una sua comprensione approfondita, anche per l'ottimizzazione del design. Scholcz et al. [20] si occupano di questo problema ed effettuando simulazioni con metodo potenziale riescono a ottenere un "secchiello di cavitazione" in Figura 4.3, cioè l'andamento del numero di cavitazione σ nell'Equazione 2.17 in funzione dell'angolo d'attacco. In esso vengono evidenziate le regioni di non cavitazione, di cavitazione a bolla e a foglio nella zona di alta o bassa pressione. A ogni regione è associato un certo RF(Risk Factor), crescente in base alla severità della condizione:

- Per cavitazione sul lato di aspirazione RF = 1,
- Per cavitazione sul lato di pressione RF = 2,
- Per cavitazione a bolla RF = 3.

Si sottolinea, il fatto che i numeri assegnati sono da considerare in senso relativo. Lo scopo è quello di minimizzare il rischio di cavitazione e per farlo si usa la funzione obiettivo esplicitata nell'Equazione 4.1, il suo minimo corrisponde al massimo rischio di cavitazione.

$$\sigma_{risk} = \frac{\sum(RF \cdot \Delta)}{\sum RF}, \tag{4.1}$$

dove Δ è dato da

$$\Delta = \max(\sigma_{\text{pressure}}, \sigma_{\text{suction}}) - \sigma_{\text{neutral}}, \tag{4.2}$$

con σ_{neutral} numero di cavitazione del foil a un angolo di attacco neutro e $\max(\sigma_{\text{pressure}}, \sigma_{\text{suction}})$ delle zone di alta e bassa pressione. Massimizzando σ_{risk}, si riduce il rischio di cavitazione, arrivando a una versione ottimizzata dell'hydrofoil per questa condizione critica, di cui bisogna tenere conto nella progettazione, poiché compromette la stabilità dell'atleta sul windsurf.

Faltinsen e Semenov [8] si occupano di interazione fra la cavità e la superficie libera, arrivando a un valido modello con una soluzione che descrive sia la cavitazione parziale, sia la supercavitazione e che include il regime privo di cavitazione come caso particolare. Per affrontare il problema, gli autori costruiscono una formulazione matematica basata sulla teoria dei fluidi ideali e utilizzano strumenti di analisi complessa per descrivere il campo di moto tramite il potenziale e la velocità complessi (usando una trasformazione conforme). Un elemento importante del lavoro è il modello di chiusura della cavità proposto, che include caratteristiche importanti come il gradiente di pressione pari a zero nella scia a valle della cavità. Gli autori analizzano il comportamento di un foil, al variare del Fr_c e della profondità di immersione. In questo modo, riescono a studiare come cambiano la forma della cavità, la deformazione della superficie libera e i coefficienti di portanza e resistenza. Con la diminuzione della profondità di immersione, la cavità si accorcia e l'elevazione della superficie libera aumenta, accrescendo l'angolo d'attacco locale.

La gravità, come la profondità di immersione, agisce sulle dimensioni della cavità riducendole. L'introduzione della gravità nel modello permette di trattare il caso limite con $\sigma = 0$. In un fluido dove non agisce la forza di gravità ($Fr_c = \infty$), la cavità si estende all'infinito quando $\sigma = 0$, mentre nel caso $Fr_c < \infty$ la lunghezza massima della cavità è finita. Infine, si apprende che gli effetti non lineari sulla superficie libera influenzano solo in minima parte i coefficienti di portanza e di resistenza, almeno per i regimi in cui l'ampiezza delle onde è contenuta. Dal punto di vista pratico, questi risultati si applicano nei casi di supercavitazione, la quale rende necessario un controllo automatico della profondità di immersione, per rimanere a quella di progetto. Lo stesso vale per i foil subcavitanti, resi instabili da un forte moto ondoso.

4.2.2 Ventilazione

Una criticità severa per foil che penetrano la superficie è la ventilazione, fenomeno che comprende tre diversi regimi di flusso, definiti da Harwood et al. [13], che usa il simbolo h per indicare la lunghezza del tratto immerso dell'ala:

- Totalmente bagnato o fully wetted (FW), per cui non si osserva un trascinamento di aria pronunciato, come si può notare in Figura 4.4. In simboli $D = 0$

- Parzialmente ventilato o partially ventilated (PV), se la cavità si innesca vicino alla superficie libera, ma non ricopre tutta la superficie immersa oppure se la cavità si estende fino all'estremità, ma la linea di chiusura è troppo ripida, cioè $0 < D < h$ o $Phi > 45°$

- Completamente ventilato o fully ventilated (FV), nella Figura 4.5, dove la cavità d'aria stabile avvolge interamente la parte immersa del foil. Le condizioni affinché si possa parlare di regime FV sono due. Intanto, la cavità deve estendersi lungo l'intera apertura immersa del foil, fino all'estremità libera ($D = h$). Poi, l'angolo formato dalla linea di chiusura della cavità Φ deve essere inferiore a 45°, rispetto al piano orizzontale ($Phi < 45°$). Se Φ supera i 45°, il cosiddetto getto di rientro viene diretto verso l'alto e a monte, trasformando il flusso in PV a causa della sua intrinseca instabilità. Il getto rientrante è dovuto al punto di ristagno, che si forma quando il flusso sopra la cavità incontra la parete solida; l'incremento locale della pressione fa sì che si generi uno spostamento del liquido in direzione opposta alla corrente. Per riassumere $D = h$ e $Phi < 45°$

Il cambiamento di regime determina le fasi della ventilazione: la formazione, che comprende innesco (FW $\rightarrow$ PV) e stabilizzazione (PV $\rightarrow$ FV), poi l'eliminazione composta da washout (FV $\rightarrow$ PV) e rewetting (PV $\rightarrow$ FW). Un parametro usato

da [13] è l'allungamento della porzione d'ala immersa in acqua $\lambda_h = h/c$. Tale definizione vale solo per quello che concerne questo studio.

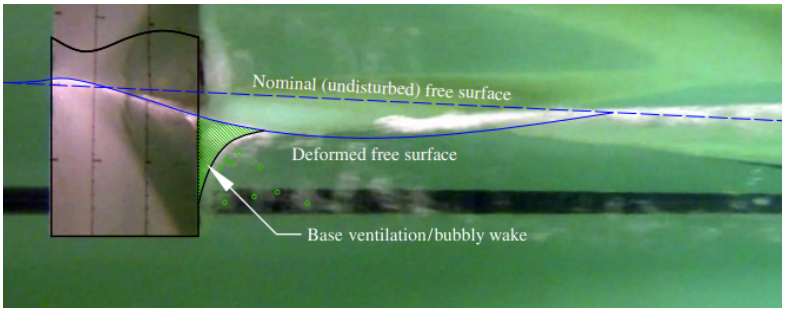


Figura 4.4: Regime FW con $\alpha = 10°$, $Fr_h = 2$, $\lambda_h = 1.0$; si nota che D=0, per cui non viene trascinata aria nella superficie di aspirazione. Tratta da Harwood et al. [13].

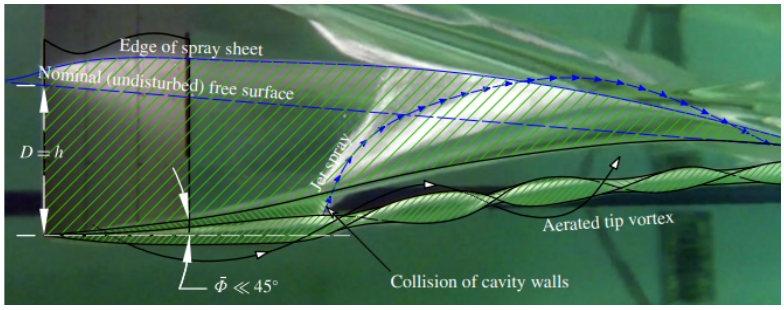


Figura 4.5: Regime FV con $D = h$, $\Phi < 45°$; la cavità si espande su tutta la superficie di aspirazione. Tratta da Harwood et al. [13].

Un altro aspetto importante che viene evidenziato è la bistabilità del regime di flusso, il quale non è necessariamente univoco per un dato insieme di condizioni operative. Esso può dipendere dalla storia del moto (condizione di isteresi), oltre che da perturbazioni esterne. Nel grafico in Figura 4.6, si nota la coesistenza dei regimi FV e FW nel range compreso tra l'angolo di biforcazione e quello di stallo. Le conseguenze maggiori della ventilazione riguardano la variazione dei coefficienti di forza. Nel caso in esame, la resistenza non è particolarmente influenzata dalla ventilazione, mentre il coefficiente di portanza è rappresentato da una retta meno inclinata nel caso FV; il decremento arriva anche al 70%. Ciò avviene, perché il liquido a bassa pressione, sulla superficie di aspirazione, viene sostituito con gas a pressione atmosferica, più alta. Anche il momento di imbardata subisce un importante decremento passando da FW a FV.

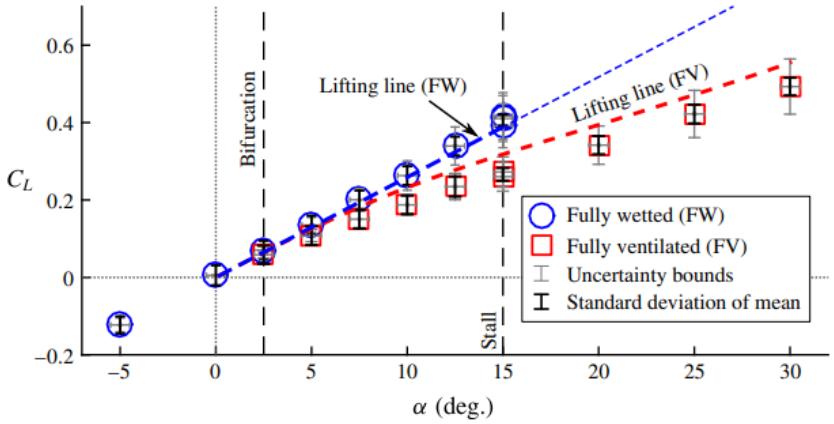


Figura 4.6: Rappresentazione del C_L in funzione dell'angolo α, con $Fr_h = 2.5$ e $\lambda_h = 1.0$. Si distinguono la linea di biforcazione e quella di stallo e la precisazione del regime FW e FV. Sono rappresentate l'incertezza e la deviazione standard della media. Tratta da Harwood et al. [13].

Esistono diversi meccanismi di innesco della ventilazione spontanei o non spontanei. Si parla, innanzitutto, di ventilazione indotta da cavitazione spiegata da Wang et al. [24], quando nelle cavità penetra aria dello strato appena sopra la superficie libera. Il meccanismo avviene spontaneamente ad alte velocità, quindi bassi numeri di cavitazione. Il primo passo per il suo innesco è la generazione di piccole perturbazioni sulla superficie dell'acqua, che vengono amplificate (instabilità di Taylor) e formano nuclei vorticosi che penetrano nelle cavità.

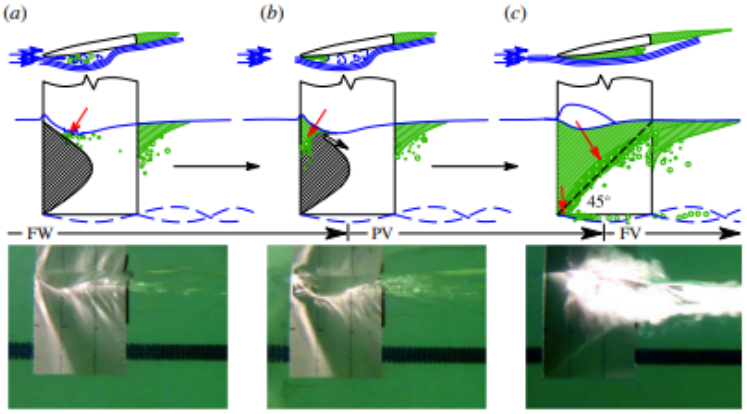


Figura 4.7: Ventilazione indotta spontaneamente da stallo con $\alpha = 15° \approx \alpha_s$, $\lambda_h = 1$. Da sinistra a destra il Fr_h aumenta. Con il blu sono rappresentate le linee di corrente, con il verde l'aria intrappolata, con il nero la zona di separazione, con il rosso la direzione di ingresso dell'aria. Tratta da Harwood et al. [13].

Esistono poi altri meccanismi di innesco classificati da Harwood et al. [13], come la ventilazione dovuta a stallo raffigurata nella Figura 4.7, la quale avviene se $\alpha \geq \alpha_s$, dove α_s rappresenta l'angolo di stallo. Si forma un vortice al bordo d'attacco, che crea una regione di separazione; la superficie libera si deforma, dunque l'aria è più vicina al flusso separato. Contemporaneamente, nella zona di depressione della superficie, si sviluppano delle perturbazioni che consentono l'ingresso d'aria. Un processo di formazione di questo tipo è quasi stazionario: il flusso si adatta continuamente alle variazioni di velocità e pressione.

Ad ampi angoli d'attacco e basse profondità d'immersione, invece, è possibile la ventilazione indotta da vortici d'estremità, riportata nella Figura 4.8. L'aria, in questo caso, entra nel vortice in una posizione a valle e viene trasportata a monte, favorita dal gradiente di pressione. Una volta raggiunta la zona di separazione, si espande verso l'alto e verso il bordo di fuga.

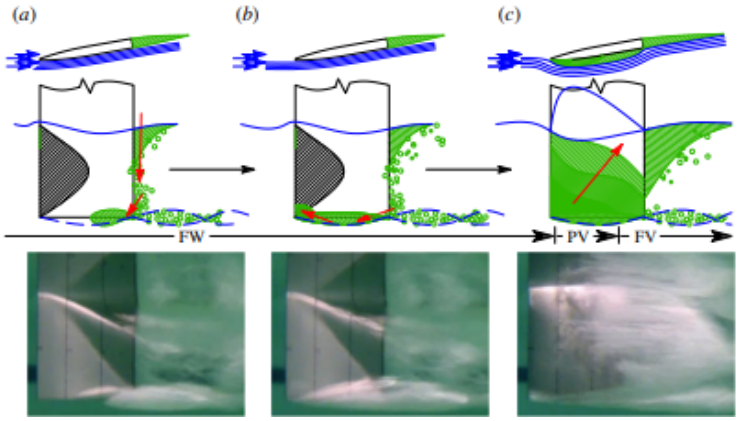


Figura 4.8: La ventilazione indotta da vortici di estremità a $\alpha = 15° \approx \alpha_s$, $\lambda_h = 1$. Andando verso destra scorre il tempo, ma il numero di Froude rimane costante $Fr_h = 3.5$. Tratta da Harwood et al. [13].

I processi descritti precedentemente sono tutti spontanei, tuttavia si verifica nelle zone bistabili un ulteriore tipo di meccanismo: si tratta della ventilazione indotta da perturbazioni, di cui si osserva una rappresentazione in Figura 4.9. Inizialmente, la zona di separazione al bordo d'attacco è piccola, in seguito, l'iniezione di un getto d'aria ad alta pressione tra il bordo d'attacco e la superficie libera introduce bolle e vorticità, rompendo il sigillo superficiale. L'aria entra quindi nella bolla e la espande, andando verso valle. La transizione da FW a FV è quasi istantanea.

Uno dei metodi proposti per migliorare la stabilità delle cavità ventilate è l'aggiunta di una fence, che fa da barriera fisica per il flusso sul dorso del foil. Tuttavia, Du et al. [7] ottengono i seguenti effetti: modifica del gradiente di pressione, che porta più rapidamente a flusso completamente ventilato, induzione

della separazione del flusso, diminuzione di portanza e resistenza. Si scopre, quindi, che la fence deve avere una determinata configurazione per ottenere i vantaggi in termini di stabilità. In particolare, esiste un'altezza verticale critica oltre la quale si innesca la ventilazione, nell'esperimento coincide con $l = 0.35c$. L'inclinazione della barriera, invece, agisce sull'ampiezza della zona di separazione, amplificata quando si supera l critica. La progettazione deve essere ottimizzata in base alle specifiche condizioni di flusso.

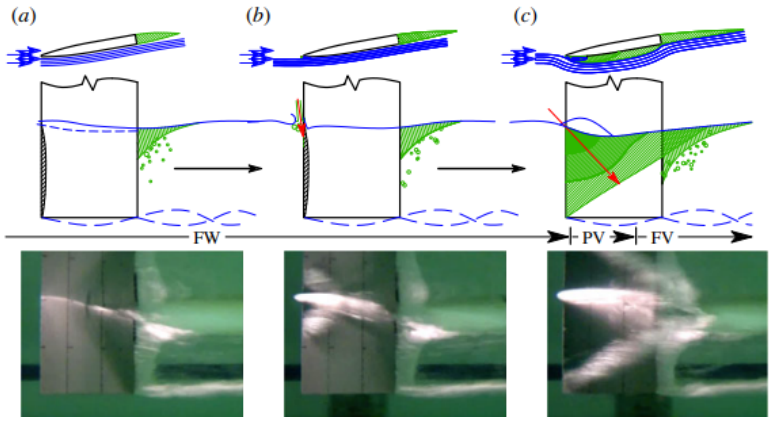


Figura 4.9: Ventilazione indotta da perturbazioni, che si verifica a un angolo d'attacco inferiore a quello di stallo $\alpha = 10° < \alpha_s$, $\lambda_h = 1$ e $Fr_h = 2.75$. Tratta da Harwood et al. [13].

Il processo di eliminazione si articola in una fase di washout e una di rewetting. Avviene tipicamente quando il foil subisce una decelerazione e il primo passo (washout), che determina la transizione da regime stabile a PV si innesca per via del getto rientrante. Al diminuire della velocità, infatti, la cavità rimane attaccata ma riduce la sua lunghezza, portando a un aumento di Φ, che supera la soglia dei 45°. Conseguentemente, l'angolo del getto oltrepassa i 90° e acquisisce una componente diretta a monte, la quale provoca un distacco della cavità. Se l'effetto si estende a una buona parte dell'apertura alare, il regime perde stabilità diventando PV. A seguire, si verifica il rewetting, che determina il ri-attaccamento dello strato limite alla superficie dell'hydrofoil e la cessazione del passaggio d'aria dall'esterno all'interno della cavità. Ciò che si ottiene è un ritorno al regime FW.

Le innumerevoli conseguenze della ventilazione spingono i costruttori a trovare soluzioni al problema, o comunque a tentare di attenuarlo. Un accorgimento geometrico efficace è l'angolo anedrale, presente nell'iQFoil che, secondo Bot et al. [4], può essere il motivo del buon comportamento del foil rispetto al fenomeno della ventilazione. Infatti, la curvatura iniziale unita alla deformazione della superficie provocata dall'alta velocità, permette al flusso di mantenersi in regime

completamente bagnato. Questo accade se l'estremità penetra appena la superficie libera, nel momento in cui emerge in misura maggiore, può verificarsi ventilazione. I risultati sono comunque soddisfacenti poiché si ottiene un $C_L = 0.4$ a $h/c = 0.875$, coefficiente di portanza doppio rispetto al caso ventilato a $h/c = 0.75$. Un altro aspetto da considerare è l'influenza dell'angolo di sbandamento, cioè quello tra l'apertura alare e la superficie. Quando è troppo elevato, l'aria non è in grado di propagarsi verso il basso lungo il ripido lato di aspirazione dell'ala. Di conseguenza, la ventilazione non si innesca e la riduzione di portanza e resistenza è graduale e direttamente legata alla riduzione della superficie portante immersa.

Complessivamente nel capitolo, si conferma l'impatto della superficie libera sugli hydrofoil. Il suo effetto è attenuato man mano che si scende in profondità e il valore soglia di h/c varia con il numero di Froude; anche l'allungamento alare ha un ruolo in questo senso e influenza i coefficienti di portanza e resistenza. La presenza di onde sulla superficie libera, in determinate condizioni operative, può ritardare lo stallo e quindi permettere un'estensione del range operativo del foil. Viene presentata la cavitazione, come problema tipico della fluidodinamica e le sue conseguenze. Si spiega, inoltre, come si modificano la forma della cavità, le onde sulla superficie libera, le prestazioni, in funzione del numero di Froude e della profondità d'immersione. Per quanto concerne la ventilazione, si classificano i regimi tramite l'estensione della cavità e l'angolo che essa forma con l'estremità del foil, per identificare le fasi di passaggio tra un regime e l'altro. Emerge, poi, l'importanza di considerare i fenomeni di cavitazione e ventilazione, già in sede di progettazione, dato che hanno conseguenze impattanti sull'hydrofoil, quindi su tutto l'iQFoil e sull'atleta. Infatti, viene proposta una funzione obiettivo, che, se massimizzata, riduce il rischio di cavitazione. Per la ventilazione, si presentano i risultati su un foil con barriera; la variazione dei parametri di altezza e inclinazione in fase di progetto, agisce su separazione e innesco della ventilazione.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

L'hydrofoil è un componente complesso, soprattutto se inserito in ambito sportivo. L'assenza di informazioni su questo argomento, dovuta al monopolio della Starboard, rende necessarie nuove ricerche. Uno studio settoriale del problema non descrive pienamente il funzionamento del foil, infatti i temi trattati nei capitoli si sono rivelati interconnessi. L'analisi, dal punto di vista fluidodinamico, ha evidenziato che nella fase progettuale è necessario considerare carichi, deformazioni, superficie, libera, criticità durante la vita operativa, per effettuare uno studio completo. Tuttavia, ci sono software e metodi che non tengono conto di tutti questi aspetti o li semplificano. Ciò non significa che sono inadeguati, ma che la scelta del solutore o del processo deve essere ponderata. I fattori che influiscono sulla decisione sono molteplici: fase dello sviluppo, budget temporale, vincoli, risorse, limiti del metodo o del software. Per avere una visione complessiva del problema, occorre tenere conto anche della figura dell'atleta, che con i suoi movimenti influenza la dinamica del windsurf dotato di hydrofoil. Per questo, i team che gareggiano ad alti livelli sono sempre alla ricerca di nuove strategie da usare nelle competizioni. Inoltre, l'atleta ricopre un ruolo centrale e deve avere controllo del mezzo e stabilità, per poter portare a termine la gara con successo, anche in condizioni critiche. A questo proposito, uno studio sull'adattamento della tavola al peso e alle capacità fisiche dell'atleta potrebbe essere un approfondimento interessante.

Più in generale, i risultati soddisfacenti con uso di modelli surrogati spingono a credere che, con un perfezionamento, il machine learning, in futuro, possa essere usato stabilmente in fase di sviluppo di hydrofoil per il windsurf. Eventualmente, tale strumento potrebbe permettere la modellazione di condizioni critiche, come cavitazione e ventilazione, per esplorare più range operativi e trovare nuovi accorgimenti, a partire dagli spunti del presente lavoro. Infine, un modello di spinta dell'intero sistema, composto da vela e tavola, sarebbe fondamentale per implementare nuove strategie da usare in gara.

Bibliografia

[1] F. Alam, H. Chowdhury e H. Moria. «A review on aerodynamics and hydrodynamics in sports». In: *Energy Procedia* 160 (2019), pp. 798–805. DOI: 10.1016/j.egypro.2019.02.158.

[2] R. Arina. *Fondamenti di aerodinamica*. Torino: Levrotto & Bella, 2015.

[3] G. Bertrand, T. Aurégan, B. Thiria, R. Godoy-Diana e M. Fermigier. «Propulsive performance of a windsurf-inspired pitching foil». In: *Physical Review Fluids* 10.7 (2025), p. 074401. DOI: 10.1103/PhysRevFluids.10.074401.

[4] P. Bot, F. Hauville, P. Ploé e J. Longuet. «Tank Testing of a Windfoil Hydrofoil with Free Surface Effects». In: *Journal of Sailing Technology* 10.1 (2025), pp. 191–205. DOI: 10.5957/jst/2025.10.1.191.

[5] M. Cardoso de Brito, L. S. Sutherland, J. M. C. Pereira e M. R. Arruda. «Fluid-Structure Interaction Analyses for Hydro-Elastic Tailoring of a Windsurfer Fin». In: *J. Mar. Sci. Eng.* 10.10 (2022), p. 1371. DOI: 10.3390/jmse10101371.

[6] A. Cirello, T. Ingrassia, A. Mancuso e V. Ricotta. «CAD Model Reconstruction by Generative Design of an iQFoil Olympic Class Foiling Windsurfing Wing». In: *Journal of Marine Science and Engineering* 13.9 (2025), p. 1698. DOI: 10.3390/jmse13091698.

[7] T. Du, Y. Lu, Y. Wang, Z. Xiao, Y. Zhi e Y. Wang. «Numerical investigation on the ventilation formation of a surface-piercing hydrofoil with a fence». In: *Ocean Engineering* 354 (2026), p. 124842. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2026.124842.

[8] O. M. Faltinsen e Y. A. Semenov. «The effect of gravity and cavitation on a hydrofoil near the free surface». In: *Journal of Fluid Mechanics* 597 (2008), pp. 371–394. DOI: 10.1017/S0022112007009822.

[9] A. Faye, P. Perali, B. Augier, M. Sacher, J-B. Leroux, A. Nême e J-A. Astolfi. «Fluid-Structure Interactions Response of a Composite Hydrofoil Modelled With 1D Beam Finite Elements». In: *Journal of Sailing Technology* 9.1 (2024), pp. 19–41. DOI: 10.5957/jst/2024.9.1.19.

[10] D. Floryan, T. Van Buren, C. W. Rowley e A. J. Smits. «Scaling the propulsive performance of heaving and pitching foils». In: *Journal of Fluid Mechanics* 822 (2017), pp. 386–397. DOI: 10.1017/jfm.2017.302.

[11] Starboard Foils. *Technology – Mast, Wing and Fuselage Technology*. Starboard Foils. URL: https://starboardfoils.com/pages/technology.

[12] L.M. Giovannetti, A. Farousi, F. Ebbesson, A. Thollot, A. Shiri e A. Eslamdoost. «Fluid-Structure Interaction of a Foiling Craft». In: *Journal of Marine Science and Engineering* 10.3 (2022), p. 372. DOI: 10.3390/jmse10030372.

[13] C. M. Harwood, Y. L. Young e S. L. Ceccio. «Ventilated cavities on a surface-piercing hydrofoil at moderate Froude numbers: cavity formation, elimination and stability». In: *Journal of Fluid Mechanics* 800 (2016), pp. 5–56. DOI: 10.1017/jfm.2016.373.

[14] Z. Macikowski, A. Karczewski e P. Krata. «Impact of Hydrofoil Shaped Imperfections on Lift and Drag Characteristics». In: *Polish Maritime Research* 32.2 (2025), pp. 29–37. DOI: 10.2478/pomr-2025-0018.

[15] H. Martínez-Barberá, J. Calderon-Sanchez, L. Moulian e A. Souto-Iglesias. «Fluid Forces on a Hydrofoil for Kitefoil and Windfoil Boards: Experimental Investigation on Their Dependence on the Froude Number Based on Submergence». In: *Journal of Marine Science and Application* 25 (2026), pp. 1–14. DOI: 10.1007/s11804-025-00708-2.

[16] Z. Ni, M. Dhanak e T.-C. Su. «Performance of a hydrofoil operating close to a free surface over a range of angles of attack». In: *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering* 13 (2021), pp. 1–11. DOI: 10.1016/j.ijnaoe.2020.11.002.

[17] H. Nicolas, P. Perali, M. Sacher e P. Bot. «Boundary Element Method Analysis of 3D Effects and Free-Surface Proximity on Hydrofoil Lift and Drag Coefficients in Varied Operating Conditions». In: *Journal of Sailing Technology* 8.1 (2023), pp. 183–199. DOI: 10.5957/jst/2023.8.10.183.

[18] P. Perali, M. Sacher, J. B. Leroux, J. Wackers, B. Augier, F. Hauville e P. Bot. «Performance prediction of a hydrofoil near the free surface using low (BEM) and high (RANS) fidelity methods». In: *Applied Ocean Research* 151 (2024), p. 104157. DOI: 10.1016/j.apor.2024.104157.

[19] K. Rozhdestvensky. «A Simplified Mathematical Model of Pumping Hydrofoils». In: *Journal of Marine Science and Engineering* 11.5 (2023), p. 913. DOI: 10.3390/jmse11050913.

[20] T.P. Scholcz, K. Odendaal, G. Marelli, L. Minerva, O.V. Schnitzeler e F. van Walree. «Development of an early stage hydrofoil design tool including unsteady hydrodynamics». In: *Applied Ocean Research* 169 (2026), p. 105011. DOI: 10.1016/j.apor.2026.105011.

[21] A. Sikirica, I. Lučina, M. Alvira e T. Matulja. «Improving hydrofoil efficiency through simulation-driven design optimization». In: *Ocean Engineering* 347 (2026), p. 123943. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2025.123943.

[22] H. P. Solak et al. «Optimising hydrofoils using automated multi-fidelity surrogate models». In: *Ships and Offshore Structures* (2024), pp. 1–12. DOI: 10.1080/17445302.2024.2422518.

[23] V. Temtching Temou, B. Augier e B. Paillard. «Hydro-elastic response of composite hydrofoil with FSI». In: *Ocean Engineering* 221 (2021), p. 108230. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2020.108230.

[24] Y. Wang, R. Huang, R. Qiu, Y. Wang e T. Du. «Experimental study on the mechanism of cavitation-induced ventilation». In: *International Journal of Multiphase Flow* 170 (2024), p. 104633. DOI: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2023.104633.