

Università degli Studi di Padova

Dipartimento di Ingegneria Industriale

Dipartimento di Tecnica e Gestione dei Sistemi Industriali

Corso di Laurea in Ingegneria Aerospaziale

**ANALISI NUMERICA DELL'AERODINAMICA DI
DIFFERENTI PIANI VELICI PER
UN'IMBARCAZIONE DA REGATA**

**A NUMERICAL ANALYSIS OF THE AERODYNAMICS OF DIFFERENT
SAIL-PLANS FOR A RACING SAILBOAT**

Relatore:

Ing. Massimo MASI

Laureando:

Andrea CARRADORI

Correlatori:

Ing. Marco ANTONELLO

Ing. Stefano CASTEGNARO

4 marzo 2016

Abstract

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è realizzare un confronto sistematico di tre piani velici per imbarcazioni di $4,6m$ da regata. Il confronto è stato effettuato in termini di prestazioni globali, ottenendo, per due andature, le curve polari di tre diversi piani velici calcolando il coefficiente di avanzamento e il coefficiente di scarroccio di varie configurazioni randa-fiocco. Al fine di comprendere meglio il funzionamento di ciascun piano velico, sono stati inoltre analizzati anche i campi di moto locali.

Lo strumento utilizzato per l'analisi è un modello CFD implementato attraverso il software Star CCM+. Il modello è stato validato sulla base di dati numerici e sperimentali ottenuti dagli autori J. Yoo e H. T. Kim in uno studio largamente impiegato nella letteratura di settore.

I piani velici analizzati sono stati scelti fra quelli progettati per il team Mètis Vela Unipd dalle velerie Olympic Sails e OneSails. I piani scelti per questa analisi sono quelli che, pensati per il medesimo albero ($7m$), differiscono maggiormente per altre caratteristiche geometriche delle vele. Le andature analizzate sono una bolina stretta (25° di angolo al vento apparente) e un traverso (80° di angolo al vento apparente). Il vento incidente sulle vele è modellato come un flusso variabile in intensità e direzione in funzione della quota al fine di considerare l'effettivo gradiente del vento reale.

I risultati ottenuti hanno permesso di valutare quale dei piani velici assicuri le migliori prestazioni aerodinamiche in termini sia di coefficienti di avanzamento e scarroccio che di efficienza. È stato altresì possibile stabilire alcune linee guida per la scelta dei piani velici a disposizione del team e verso quale tipologia di vela sarebbe opportuno indirizzare la futura progettazione. In particolare è risultata evidente l'incidenza sulle prestazioni delle scelte in termini di grasso della vela e di svergolamento.

Indice

1	Introduzione	1
2	Vele	5
2.1	Principi della navigazione a vela	5
2.2	Le vele analizzate	15
3	Modello CFD	29
3.1	Il modello Yoo-Kim di riferimento	30
3.2	Il modello validato	34
3.3	Scalatura e innovazioni apportate al modello	46
3.4	Precisione numerica dei dati presentati	50
4	Risultati e discussioni	53
4.1	Curve polari e curve di efficienza	53
4.2	Distribuzione dei parametri locali	59
	Conclusioni	81
A	Altri risultati	iii
B	Tabelle integrative	v
C	Integrazioni ai risultati	ix

Elenco delle figure

2.1	Panoramica delle forze applicate all'imbarcazione in navigazione.	7
2.2	Tipologie di barche a vela.	9
2.3	Nomenclatura minima delle vele.	11
2.4	Triangolo di velocità nel caso di andatura in bolina.	12
2.5	Grafico delle andature riferite al vento reale per una barca a vela.	13
2.6	Proiezioni ortogonali dei tre piani velici e quote di particolare rilevanza.	16
2.7	Confronto fra i profili dei piani velici a differenti quote.	17
2.8	Parametri di forma della superficie di una vela.	19
2.9	Parametri di forma delle sezioni orizzontali di una vela.	21
2.10	Sistema di riferimento adottato.	23
2.11	Esempio di angolo di apertura positivo (randa) e negativo (fiocco).	24
3.1	Vista schematica del piano velico.	31
3.2	Disposizione dei parametri sulle vele.	32
3.3	Particolari della mesh utilizzata nel modello Star.	36
3.4	Dominio del campo fluido e condizioni al contorno.	37
3.5	Valori dei coefficienti di portanza e resistenza al variare dell'angolo di apertura del fiocco	39
3.6	Andamento delle linee di corrente al 25% della randa ottenute da Yoo-Kim.	42
3.7	Andamento delle linee di corrente al 25% della randa ottenute in questo studio.	43
3.8	Distribuzione del coefficiente di pressione sulle vele ottenuta da Yoo-Kim	44
3.9	Distribuzione del coefficiente di pressione sulle vele ottenuta in questo studio	45
3.10	Dominio utilizzato nelle analisi finali.	47
3.11	Triangolo di velocità nel calcolo del gradiente di vento	47
3.12	Componenti del gradiente di vento apparente	50

4.1	Curve polari e curve di efficienza dei tre piani velici analizzati, nelle due andature.	54
4.2	Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie sopravento dei piani velici in bolina.	60
4.3	Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie sottovento dei piani velici in bolina.	61
4.4	Flusso e distribuzione della pressione attorno ad una combinazione randa-fiocco.	63
4.5	Distribuzione del coefficiente di pressione attorno al piano velico 1 in bolina.	65
4.6	Distribuzione del coefficiente di pressione attorno al piano velico 2 in bolina.	66
4.7	Distribuzione del coefficiente di pressione attorno al piano velico 3 in bolina.	67
4.8	Flusso intorno ad una combinazione albero-vela.	68
4.9	Distribuzione delle linee di corrente intorno ai piani velici in bolina.	69
4.10	Distribuzione delle scie intorno ai piani velici in bolina.	72
4.11	Forza motrice in bolina generata dai piani velici	74
4.12	Forza sbandante in bolina generata dai piani velici	75
4.13	Stima della velocità della barca al variare della forza di trazione dello scafo.	78
4.14	Distribuzione del coefficiente di forza risultante lungo il piano velico in bolina	79
A.1	Curva polare del fiocco di Aretè al traverso	iii
A.2	Curva di efficienza del fiocco di Aretè al traverso	iv
C.1	Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie sopravento dei piani velici al traverso.	x
C.2	Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie sottovento dei piani velici al traverso.	xi
C.3	Distribuzione del coefficiente di pressione attorno al piano velico 1 al traverso	xii
C.4	Distribuzione del coefficiente di pressione attorno al piano velico 2 al traverso.	xiii
C.5	Distribuzione del coefficiente di pressione attorno al piano velico 3 al traverso.	xiv
C.6	Distribuzione delle linee di corrente intorno ai piani velici al traverso.	xv
C.7	Distribuzione delle scie intorno ai piani velici al traverso.	xvi
C.8	Forza motrice al traverso generata dai piani velici	xvii
C.9	Forza sbandante al traverso generata dai piani velici	xviii
C.10	Distribuzione del coefficiente di forza risultante lungo il piano velico al traverso.	xix

Elenco delle tabelle

2.1	Superficie totale ed altezza dei piani.	18
2.2	Valori numerici dei parametri di forma della superficie delle vele	19
2.3	Valori numerici dei parametri di forma delle sezioni delle vele.	21
2.4	Configurazioni randa-fiocco per l'andatura in bolina	27
2.5	Configurazioni randa-fiocco per l'andatura al traverso . . .	28
3.1	Valori numerici dei parametri delle sezioni	32
3.2	Coefficienti di portanza e resistenza ottenuti da Yoo e Kim e in questo studio	40
3.3	Condizioni di vento rilevate sul campo durante la percorrenza di bordi in bolina stretta.	49
4.1	Forze parziali e totali sviluppate dai piani nella condizione di massima efficienza	76
4.2	Efficienze parziali e totali dei piani nella condizione di massima efficienza	77
B.1	Parametri di forma delle sezioni delle vele. Integrazione alla tabella 2.3.	v
B.2	Coefficienti di avanzamento e scarroccio rilevati in bolina .	vi
B.3	Coefficienti di avanzamento e scarroccio rilevati al traverso	vii

Capitolo 1

Introduzione

Nell'ambito della navigazione a vela la possibilità di prevedere le prestazioni aerodinamiche dell'imbarcazione è di grande importanza sia per il progettista, che può usare queste informazioni per ottimizzare il suo progetto, sia per l'equipaggio, che ha la possibilità di regolare la forma della vela modificandone la risposta al vento.

La stima delle prestazioni di una vela diventa essenziale soprattutto nel contesto di una competizione sportiva dove, è chiaro, pochi secondi possono fare la differenza fra una vittoria e una sconfitta. È in questo contesto che è nata l'idea di sviluppare questa tesi.

Il team *Mètis Vela UniPd* è il team velico dell'Università di Padova. Nato nel 2008 partecipa annualmente al trofeo *1001Vela CUP* che vede diversi team velici, provenienti da Atenei italiani, affrontarsi in una serie di regate. Le barche partecipanti devono essere disegnate e realizzate nell'ambito delle università e devono rispettare il regolamento di Classe R3 che ne limita le dimensioni massime e promuove l'uso di materiali bio per gli scafi ed alluminio per l'armo. Inoltre è previsto che l'equipaggio possa essere esclusivamente composto da studentesse e studenti iscritti nei rispettivi atenei nell'anno in corso.

Nel 2015 la *fluidodinamica computazionale* è diventata un nuovo strumento a disposizione del team *Mètis Vela* grazie ad un accordo di partnership con CD-Adapco che fornisce la licenza per il software *STAR-CCM+*.

L'obiettivo primario di questa tesi è confrontare le prestazioni aerodinamiche di tre piani velici scelti fra quelli a disposizione del team al fine di stabilire quale sia il migliore. L'obiettivo secondario è quello di fornire al team un modello CFD (Computational Fluid Dynamics) validato, applicabile alle vele sia per la previsione delle prestazioni che come supporto alla progettazione e che dia risultati in tempi brevi anche con limitate risorse di macchina.

Stato dell'arte nello studio delle vele

Le modalità per valutare le prestazioni aerodinamiche di un piano velico sono sostanzialmente tre: si possono eseguire prove in mare su un modello in scala reale della barca, si possono eseguire prove in galleria del vento su un modello in scala ridotta, ci si può affidare ad analisi numeriche prodotte con il supporto del calcolatore.

La prima modalità di rilevazione in mare su scala reale consiste sostanzialmente in una rilevazione dei valori di pressione in alcuni punti della vela, valori di pressione dai quali si cerca di desumere i valori delle forze agenti sul piano velico.

Secondo Marchaj [1], i primi tentativi di stimare le prestazioni di una vela con questo approccio sono datati 1923, ad opera dei progettisti Warner e Ober [2], che riuscirono ad ottenere la distribuzione delle pressioni su una sola faccia della vela utilizzando una serie di manometri collegati con tubicini di gomma a piccoli fori sulla vela.

Più recentemente, Puddu et al. [3] è riuscito ad ottenere una mappatura completa della pressione sulla randa di un catamarano Tornado, Viola in [4] ha ottenuto il campo di pressioni sulla vela di prua di uno yacht Sparkman & Stephens e in [5] su uno spinnaker.

Di particolare rilevanza è il sistema VSPARS sviluppato da Le Pelley e Modral [6] che, tramite telecamere posizionate in coperta, permette la rilevazione in tempo reale della forma delle vele. La possibilità di associare distribuzione di pressione e deformazione della vela rilevata con VSPARS permette di dare una stima esatta della forza agente sulle vele (Richards, Le Pelley e Morris [7]).

La seconda modalità di rilevazione in mare su scala reale permette di ottenere una misura diretta delle forze agenti sul piano velico dotando, ad esempio, la barca da analizzare di estensimetri collegati alle sartie e ad una massa flottante dentro lo scafo (Herman [8]) o di una bilancia dinamometrica (Hochkirch [9]) in grado di misurare le forze prodotte da appendici e vele. Come è facile immaginare l'uso di questo tipo di sistemi rimane limitato dal momento che risultano estremamente onerosi dal punto di vista economico.

A causa della variabilità delle condizioni di navigazione reale, è molto difficile assicurare la ripetibilità delle misurazioni. Tale aspetto risulta particolarmente necessario quando lo scopo delle misure è una comparazione di soluzioni progettuali differenti (come, ad esempio, differenti piani velici).

Al fine di realizzare prove in condizioni note e controllate, si effettuano quindi prove in galleria del vento.

Per quanto riguarda la rilevazione delle pressioni le modalità sono del tutto simili a quelle utilizzate per le rilevazioni in mare: i sistemi più

avanzati prevedono l'uso di sensori di pressione alloggiati in adesivi di 10mm di spessore posti in corrispondenza di piccoli fori sulla vela e in grado di rilevare il valore della pressione direttamente senza la necessità di utilizzare tubicini (Morris [10]).

Naturalmente anche in galleria del vento è possibile rilevare la deformazione delle vele utilizzando un sistema a videocamere.

Un'importante innovazione relativa ai test in galleria risale al 1994, quando presso la *Yacht Research Unit* dell'Università di Auckland fu introdotta la prima galleria del vento che permetteva di produrre un flusso d'aria con gradiente verticale di intensità e direzione (Flay [11]).

Ad oggi anche il Politecnico di Milano vanta una galleria del vento in grado di produrre un gradiente verticale del flusso in ingresso (Zasso, Fossati e Viola [12]).

L'analisi fluidodinamica computazionale è ormai diventata, insieme all'analisi in galleria del vento laddove possibile, uno strumento di uso comune per la valutazione delle prestazioni di una barca a vela.

Negli anni '70 e '80 si iniziarono ad applicare le analisi numeriche al mondo della vela basandosi sulla soluzione di flussi a potenziale (Gentry [13]). Negli anni '90 furono introdotte nello studio dell'aerodinamica delle vele modelli basati sulle equazioni *Raynolds-Averaged Navier-Stokes* che permisero per la prima volta di osservare fenomeni di distacco del flusso (Hedges, Richards e Mallison [14], Miyata e Lee [15]).

Nel nuovo millennio la soluzione delle equazioni RANS è stata associata a codici di calcolo ai volumi finiti. In questa tesi ci si è riferiti principalmente a quanto fatto da Yoo e Kim [16], che hanno ottenuto i coefficienti di portanza e resistenza su un piano velico utilizzando una mesh strutturata, Ciortan e Soares [17], che hanno analizzato la geometria Yoo e Kim utilizzando una mesh tetraedrica e Viola, Bot e Riotte [18] che hanno utilizzato ancora una mesh strutturata e, per validare il modello confrontandolo con dai rilevati in galleria del vento, hanno predisposto un'analisi preliminare per modellare l'effetto *blockage* della galleria del vento e quindi una seconda analisi per ottenere forze e pressioni attorno alle vele.

È stato introdotto il gradiente verticale del flusso incidente sulle vele, è stato utilizzato un dominio che riducesse al minimo le pareti solide ed è stata utilizzata una mesh poliedrica per ridurre al minimo il numero di elementi e ottenere quindi un modello dal basso peso computazionale.

Organizzazione del lavoro

Nel capitolo 2 vengono riportate le nozioni di base sulla navigazione a vela e vengono presentate le vele e le andature analizzate in questa tesi.

Nel capitolo 3 viene presentato il modello Yoo e Kim [16] di riferimento e il modello sviluppato in questo studio; il nuovo modello viene quindi validato, scalato e viene introdotto il gradiente di vento apparente. Nel capitolo 4 vengono presentati e discussi i risultati ottenuti applicando il modello validato ai tre piani velici presentati. Infine vengono presentate le conclusioni tratte dal lavoro svolto.

Capitolo 2

Vele

In questo capitolo vengono brevemente presentati i principi della navigazione a vela senza la pretesa di dare una visione completa in ogni dettaglio di un tema che è complesso ed ampio ma soffermandosi piuttosto su quegli aspetti che hanno immediate conseguenze sulle analisi fatte in questa tesi.

Vengono quindi presentati i piani velici oggetto dello studio, sottolineando le loro somiglianze e le loro differenze.

Viene poi definito il sistema di riferimento scelto per le analisi e per la presentazione dei risultati e vengono definite le convenzioni che saranno utilizzate.

Infine sono state presentate le configurazioni analizzate nella campagna di simulazione.

2.1 Principi della navigazione a vela

Una barca a vela è un'imbarcazione la cui propulsione è prodotta dall'azione del vento su una vela o su un sistema di vele.

La navigazione a vela è soggetta all'azione di due sistemi di forze che si generano l'uno nella parte emersa dell'imbarcazione (*opera morta*) e l'altro nella porzione immersa in acqua (*opera viva*).

Sulla porzione emersa della barca si generano forze di tipo aerodinamico che scaturiscono principalmente dall'interazione fra la velatura e il flusso d'aria circostante. Chiaramente non solo la velatura partecipa alla generazione della forza ma anche albero, sartieme, armo e opera morta. La forza generata da tutto ciò che non è *vela* va generalmente ridotta al minimo in quanto presenta grosse componenti di resistenza.

Sulla porzione immersa in acqua della barca si generano forze di tipo idrodinamico dovute all'interazione fra il flusso d'acqua e la parte immersa dello scafo, corredata di appendici. Le appendici sono generalmente deriva e timone. La deriva è, su barche di piccole dimensioni, una *pinna*

di forma simile ad un'ala che sporge dalla parte inferiore dello scafo e che ha principalmente la funzione di contrastare la traslazione laterale di una barca le cui vele siano investite dal vento. Il timone invece è presente anche sulle imbarcazioni a motore, viene manovrato dall'equipaggio e ha la funzione di dirigere la barca lungo la rotta corretta.

La forza aerodinamica generata può essere pensata applicata ad un punto che chiameremo centro velico CE e, nel piano orizzontale, può essere scomposta su due sistemi di riferimento preferenziali. Generalmente, il primo sarà riferito alla direzione del vento apparente, e le due componenti della forza totale saranno una parallela alla direzione del vento incidente sulle vele, l'altra perpendicolare a questa. La componente parallela al vento è la forza di resistenza, mentre la componente perpendicolare è la forza di portanza. Tuttavia essendo il vento apparente variabile in direzione e intensità lungo la verticale non conviene valutare le prestazioni globali del piano velico riferendosi a portanza e resistenza. Il secondo sistema di riferimento per la scomposizione della forza aerodinamica è legato alla velocità della barca, e quindi alla direzione di movimento che chiameremo *rotta*. Come si può vedere in figura 2.1a (Fosatti [19]), la componente parallela all'asse longitudinale della barca è la forza di avanzamento (o forza motrice) F_M , mentre la componente perpendicolare all'asse longitudinale è la forza di scarroccio (o forza sbandante) F_H .

La forza idrodinamica generata dalle appendici e dalla carena non è di particolare interesse nell'ambito di questa tesi. Tuttavia è bene osservare che tale forza può essere pensata applicata al centro di resistenza laterale, CLR , e che viene sempre scomposta lungo la direzione della velocità della barca e la direzione ad essa ortogonale. La componente parallela alla velocità della barca sarà la forza idrodinamica di resistenza, mentre la componente perpendicolare alla velocità della barca sarà la forza idrodinamica di portanza.

Risulta evidente che, a barca ferma, per avere propulsione è necessario che la forza aerodinamica di avanzamento superi la forza idrodinamica di resistenza producendo un'accelerazione. La forza idrodinamica di portanza dovrà invece bilanciare la forza aerodinamica di sbandamento per impedire lo scarroccio (movimento laterale) dell'imbarcazione.

In figura 2.1a è visibile l'angolo α (talvolta indicato anche con *awa*, *apparent wind angle*) che è l'angolo di incidenza del vento apparente preso ad una quota di riferimento (di solito in testa d'albero) rispetto alla rotta della barca.

Nella stessa figura appare anche l'angolo λ , detto *angolo di scarroccio*, che è l'angolo compreso fra la direzione di rotta individuata dal vettore velocità

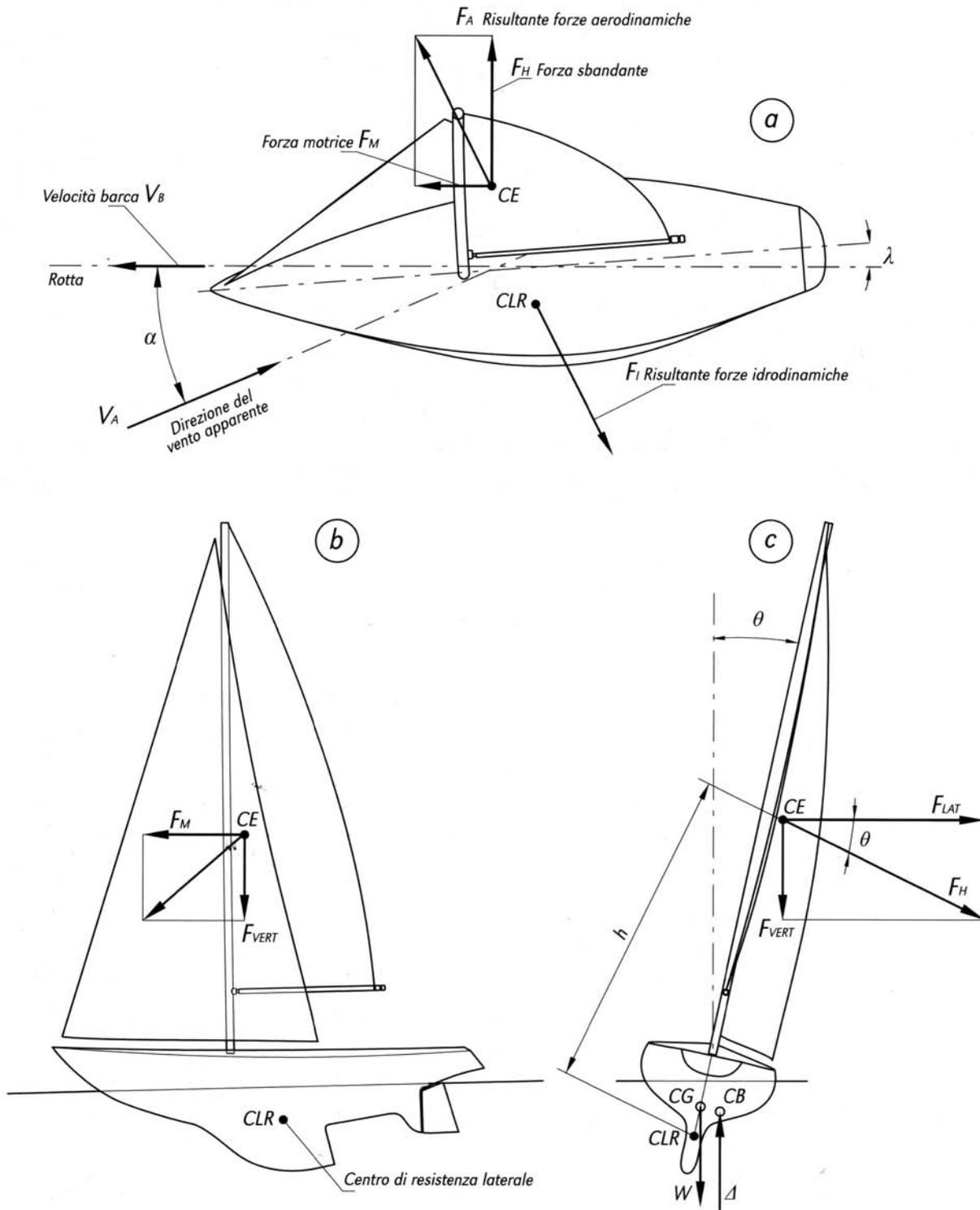


Figura 2.1: Panoramica delle forze applicate all'mbarcazione in navigazione. Figura tratta da Fossati [19].

della barca e l'asse dello scafo. L'angolo di scarroccio varia al variare della velocità della barca e la sua rilevazione è particolarmente complessa anche a causa dei valori piuttosto ridotti (Garrett [20]). In mancanza di una legge che descriva univocamente come varia λ con la velocità della barca, in questo lavoro si è assunto un angolo di scarroccio nullo. E' lecito ritenere che tale assunzione non si discosti troppo dalla realtà, dato il ridursi di tale angolo all'aumentare della velocità dell'imbarcazione. L'asse dello scafo (*della barca*, più in generale) è dunque coincidente con la direzione della velocità della barca. Di conseguenza le componenti motrice e sbandante della forza aerodinamica risultante sono rispettivamente parallele e perpendicolari all'asse della barca.

Nella figura 2.1b e c si vede anche la componente verticale della forza e l'angolo di rollio θ associato alla forza sbandante. Nelle simulazioni l'angolo di rollio è stato considerato nullo in quanto la condizione di progetto per le barche analizzate prevede una navigazione in assenza di sbandamento (barca perfettamente piatta). Di conseguenza anche la componente verticale della forza risulta nulla.

Tipologie di vele

Nel corso della storia della navigazione a vela sono state sviluppate le più varie tipologie di piani velici in funzione sia della tecnologia a disposizione, che della stazza dell'imbarcazione, che del tipo di navigazione.

La figura 2.2 presenta le principali tipologie di barche a vela con rispettivi piani velici. Pur non rappresentando l'intero insieme delle barche a vela esistenti, la figura 2.2 comprende sia alcune delle configurazioni adottate dai più moderni yacht che esempi di velieri storici da rievocazione.

É bene fare subito una distinzione fra vele che lavorano a portanza, cercando di limitare al minimo la resistenza, ovvero *in modo simile ad un'ala*, come quelle in figura 2.2-Fig.1 e vele che lavorano principalmente a resistenza, come le vele quadre in figura 2.2-Fig.5. In questo studio vengono analizzate solo vele appartenenti alla prima tipologia.

Le barche oggetto di questo studio sono *derive*, barche di piccole dimensioni con deriva mobile, e presentano un *armo a sloop* con vele *bermudiane*, ovvero un piano velico basato su un unico albero e composto da due vele triangolari (o di forma vicina al triangolo) come quello presentato in figura 2.2-Fig.1 al centro.

Le due vele sono denominate *randa* e *fiocco*. Nella figura 2.3 viene presentata la nomenclatura minima relativa a queste due vele.

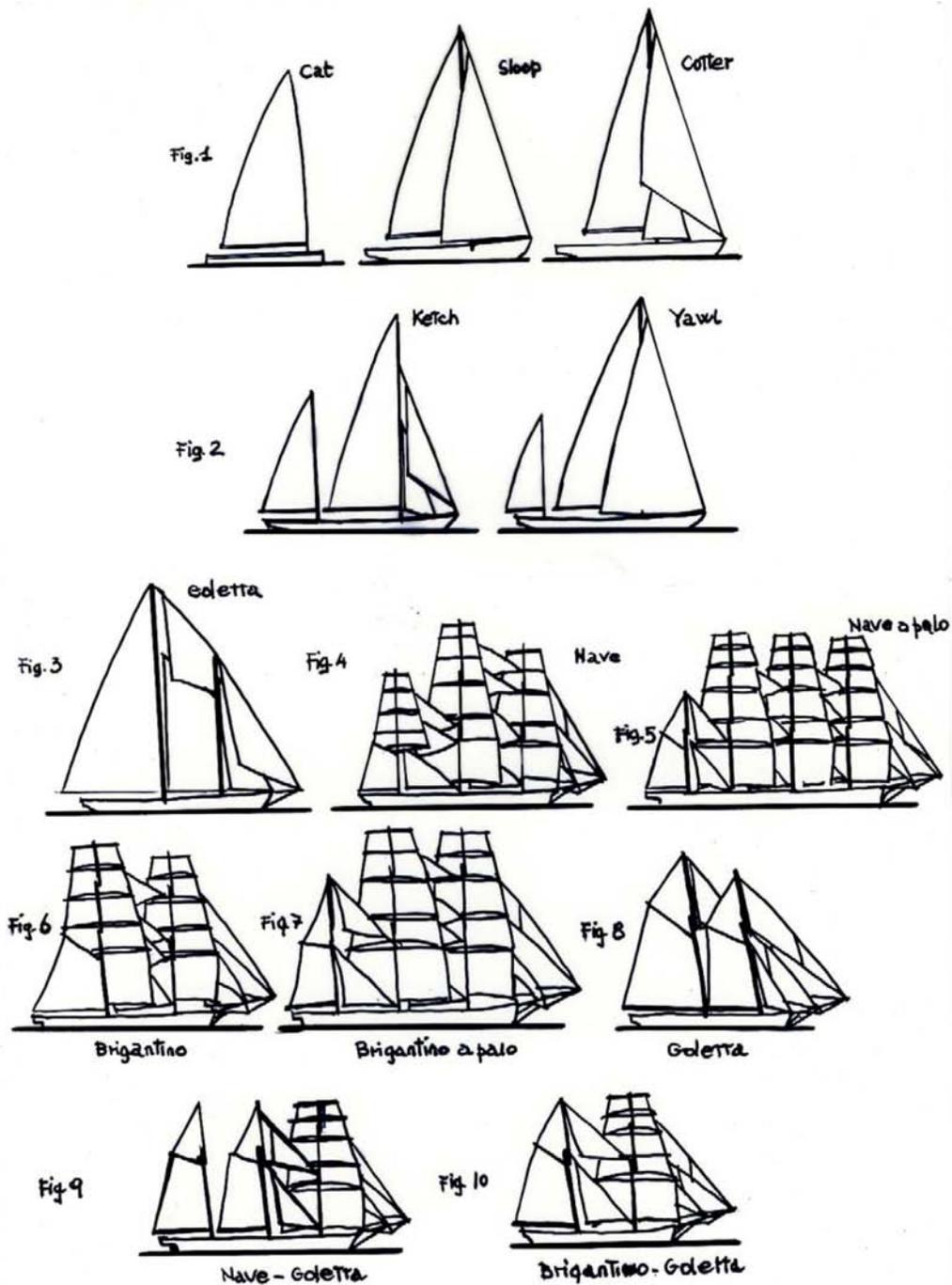


Figura 2.2: Tipologie di barche a vela. Da *Dispensa integrativa del programma di vela* - Lega Navale Italiana, Genova.

La randa è inferita sull'albero. Il lato inferiore della randa è vincolato al boma in modo che l'assetto del boma corrisponda a quello della corda inferiore della vela. Tramite le regolazioni impartite al boma è possibile modificare forma e assetto della vela. A prua si trova il fiocco, che è inferito sullo strallo, un cavo d'acciaio che sostiene l'albero collegandolo alla prua. Il fiocco si regola automaticamente tramite un carrello autovirante che attraversa trasversalmente la coperta della barca e che permette lo spostamento del punto di scotta in due posizioni: fine-corsa a dritta o fine-corsa a sinistra. Per particolari condizioni di navigazione l'equipaggio può permettere spostamenti del fiocco superiori a quelli concessi dal carrello autovirante.

In determinate situazioni viene issata una terza vela, il *gennaker*, che però non viene studiata nell'ambito di questa tesi essendo una vela da andature portanti che lavora in condizioni ibride di portanza e resistenza.

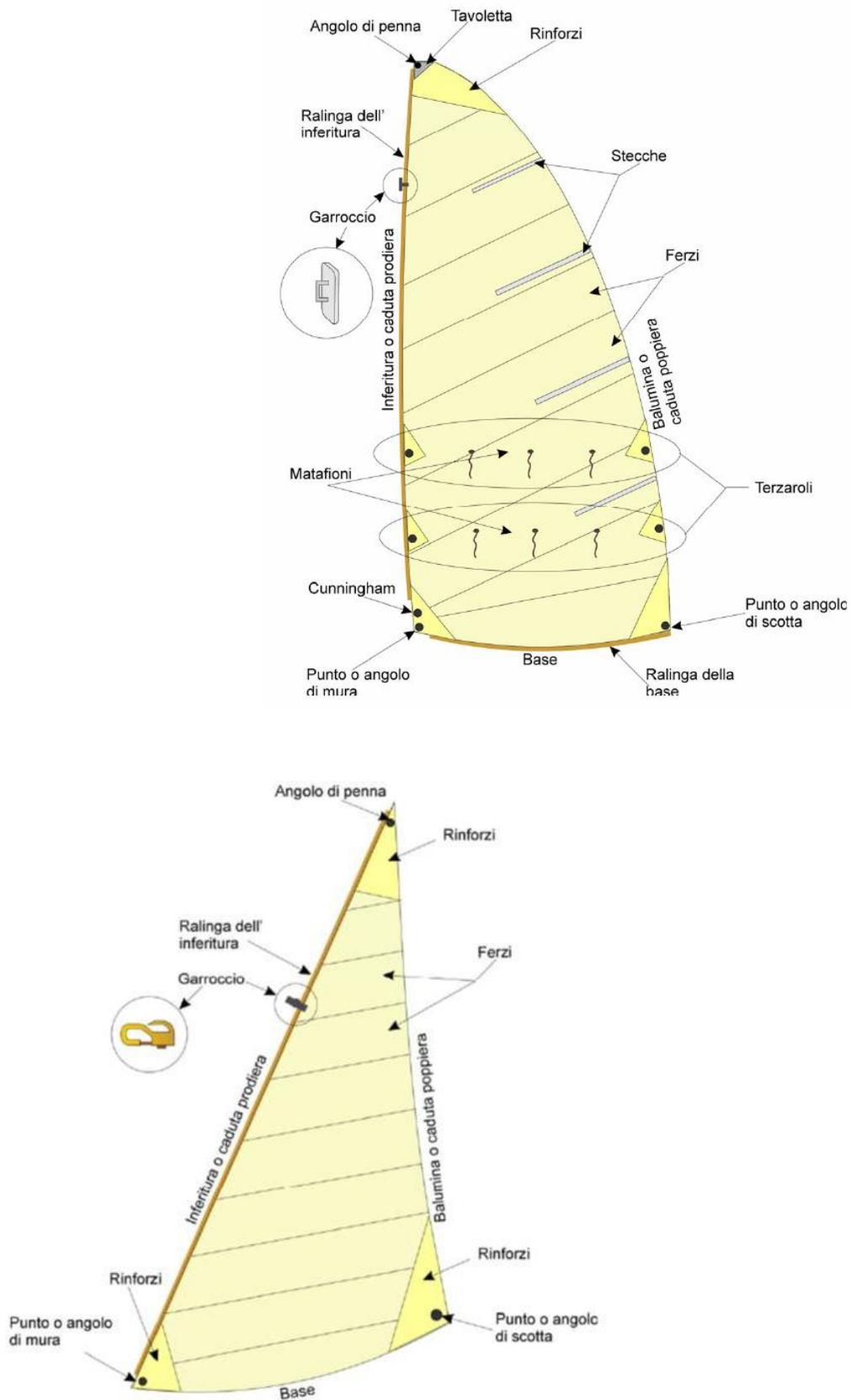


Figura 2.3: Nomenclatura minima delle vele.

Triangolo di velocità e andature

Prima di introdurre il triangolo di velocità è opportuno chiarire i concetti di *vento reale* e *vento apparente*.

Il *vento reale* è il vento misurato in intensità e direzione da un osservatore solidale alla terraferma. Per ragioni storiche l'intensità è di norma riportata in *nodi* e la direzione in *gradi sessagesimali* riferiti ai punti cardinali (0° per il punto Nord, 90° gradi per il punto Est, ecc.). A causa dell'attrito con la superficie dell'acqua il vento reale varia con legge logaritmica lungo la verticale, partendo da un valore nullo sulla superficie.

Il *vento apparente* è il vento misurato in intensità e direzione da un osservatore solidale alla barca. Il modo più immediato per indicarne la direzione è quello di riferirsi all'angolo rispetto all'asse della barca. L'angolo di vento apparente è l'angolo α (o *awa*) indicato in figura 2.1.

Di seguito l'intensità dei venti verrà sempre riportata in *m/s* e la direzione del vento reale, come il vento apparente, sarà riferita all'asse della barca (che, ricordiamo, nelle nostre ipotesi coincide con la direzione della velocità della barca).

I vettori \bar{v}_R (velocità vento reale) e \bar{v}_A (velocità vento apparente) sono in relazione fra loro tramite il vettore \bar{v}_B (velocità barca). La relazione che lega i tre vettori è

$$\bar{v}_R - \bar{v}_B = \bar{v}_A$$

Di conseguenza il vento apparente presenterà un profilo di intensità e direzione lungo la verticale, partendo da un'intensità e una direzione sulla superficie del mare pari a $-\bar{v}_B$. Dalla relazione fra i tre vettori è possibile costruire il *triangolo di velocità* di figura 2.4, che appunto rappresenta la relazione che intercorre tra i vettori di vento reale, apparente e velocità.

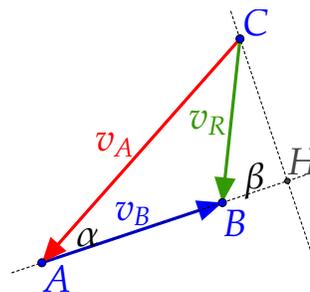


Figura 2.4: Triangolo di velocità nel caso di andatura in bolina.

Si ipotizzi che i dati rilevati sul campo di regata siano:

- intensità del vento reale, v_R ;
- intensità del vento apparente, v_A ;
- direzione del vento reale rispetto all'asse della barca, β .

L'angolo α si può determinare con:

$$v_A \cdot \sin(\alpha) = v_R \cdot \sin(\beta) \Rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{v_R \cdot \sin(\beta)}{v_A}\right) \quad (2.1)$$

e quindi, per il modulo di v_B :

$$v_B = v_A \cdot \cos(\alpha) - v_R \cdot \cos(\beta) \quad (2.2)$$

e si determina quindi la velocità della barca.

In funzione dell'angolo con cui la barca affronta il vento reale vengono definite diverse *andature*, riepilogate nella figura 2.5. Per angoli al vento reale, β , compresi fra 35° e 70° si parla di andatura in *bolina*. Per angoli al vento reale compresi fra 70° e 110° si parla di andatura al *traverso*. Per angoli al vento reale compresi fra 110° e 170° si parla di andatura al *lasco*. Per angoli al vento reale compresi fra 170° e 180° si parla di andatura di *poppa*.

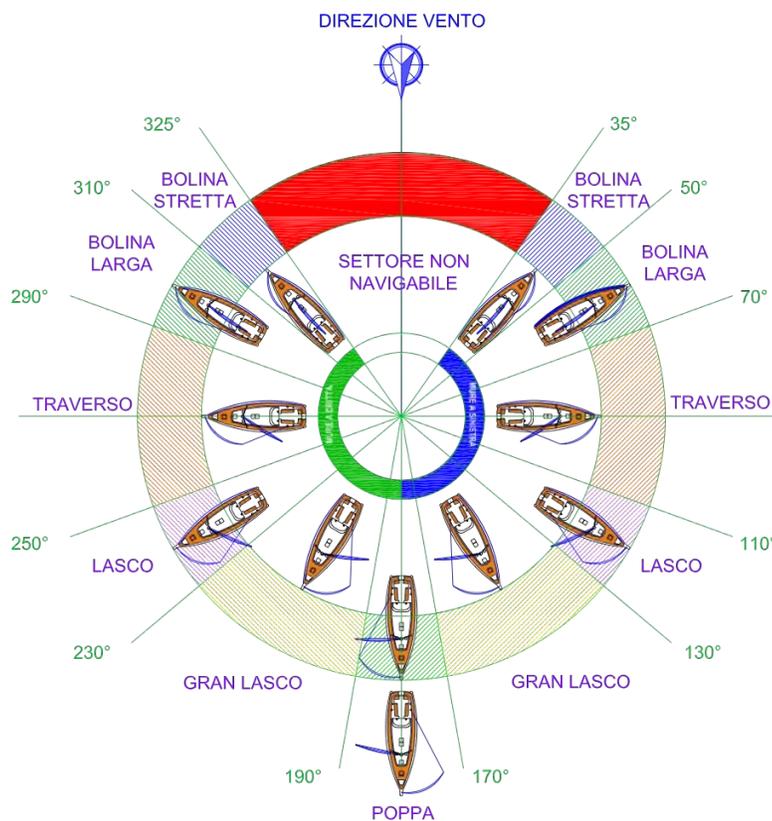


Figura 2.5: Grafico delle andature riferite al vento reale per una barca a vela.

Le analisi effettuate in questo lavoro si riferiscono a due condizioni di navigazione: una bolina stretta e un traverso. Si parlerà dunque di

bolina stretta (o semplicemente *bolina*, per brevità) per l'angolo $awa = 25^\circ$, mentre si parlerà di *traverso* per l'angolo $awa = 80^\circ$. È opportuno osservare che riferendo l'andatura al vento apparente l'ampiezza del settore non navigabile (*angolo morto*) risulta ridotta. Tale riduzione non è facile da quantificare dal momento che dipende fortemente dal piano velico e dalla particolare imbarcazione.

2.2 Le vele analizzate

Di seguito verranno presentati i tre piani velici analizzati. I piani velici 1 e 3 sono stati progettati dalla veleria *Olympic Sails* di Muggia (Ts), il piano velico 2 è stato progettato da una seconda veleria e fanno parte dei piani in dotazione al team di vela *Mètis Vela UniPd*. Verranno denominati:

- *piano velico 1* o *Argo* (dal nome dello scafo a cui è associato il piano);
- *piano velico 2* o *Aretè*;
- *piano velico 3* o *Aura*.

La figura 2.6 mostra le proiezioni ortogonali dei tre piani velici riportando le quote di particolare rilevanza.

La figura 2.7 mostra i profili ottenuti da sezioni orizzontali dei piani velici a quote differenti. Le quote sono indicate in percentuale perché riferite all'altezza totale della randa (lunghezza del bordo di inferitura).

É importante fin d'ora sottolineare che lo spessore delle vele è trascurabile e quindi sezionando una di queste vele si ottiene un profilo a spessore nullo, identificato unicamente dalla forma della linea media. Nelle simulazioni numeriche le vele verranno considerate membrane indeformabili.

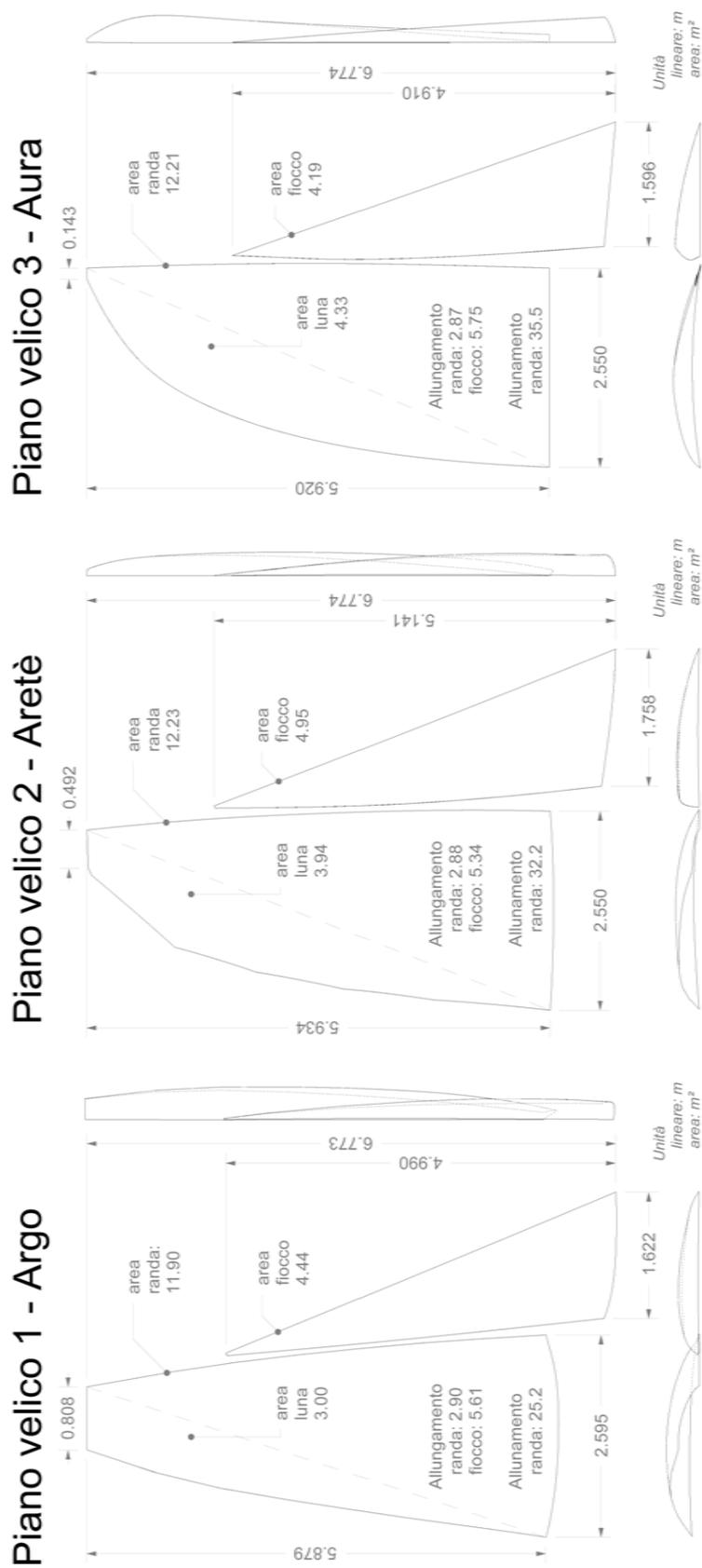


Figura 2.6: Proiezioni ortogonali dei tre piani velici e quote di particolare rilevanza. Quote lineari in m, aree in m².

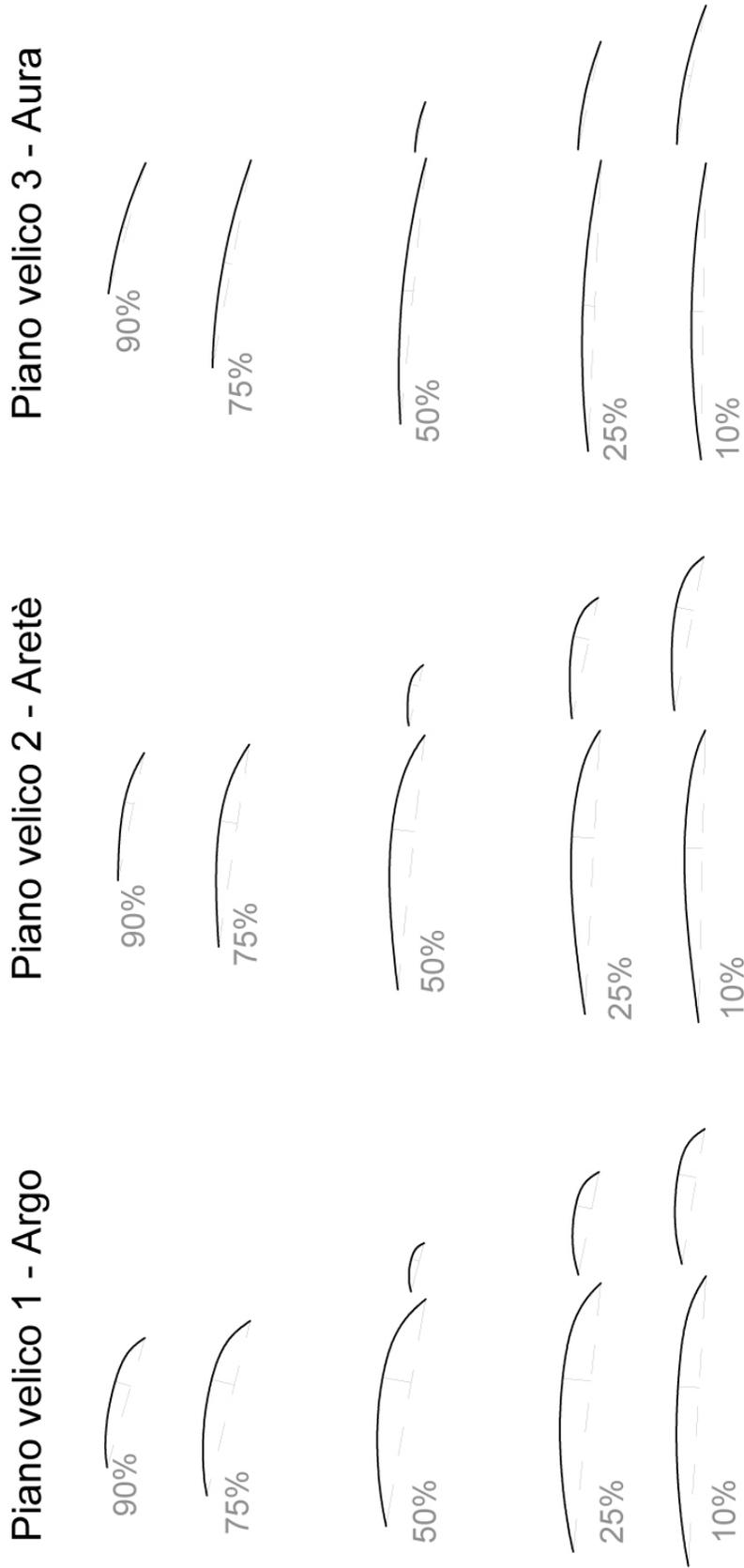


Figura 2.7: Confronto fra i profili dei piani velici a differenti quote (indicate in percentuale e riferite all'altezza della randa).

Criterio di scelta dei piani velici da analizzare

I piani velici sono stati scelti, fra quelli a disposizione, cercando di selezionare quei piani che presentano caratteristiche geometriche il più possibile differenti ma che sono comunque pensati per alberi della stessa altezza.

Nello specifico, le prime due caratteristiche geometriche che vanno messe in evidenza sono:

- superficie totale;
- altezza totale del piano velico.

Per altezza totale del piano velico si intende la componente verticale della distanza fra il vertice dell'angolo di mura del fiocco e il vertice dell'angolo di penna della randa. Piani velici che abbiano in comune questa caratteristica sono stati progettati per alberi della stessa altezza.

La tabella 2.1 raccoglie i valori di questi parametri per i tre piani velici.

Tabella 2.1: Superficie totale ed altezza dei piani.

Piano velico 1 - Argo	
Superficie totale [m^2]	16,34
Altezza [m]	6,773
Piano velico 2 - Aretè	
Superficie totale [m^2]	17,18
Altezza [m]	6,774
Piano velico 3 - Aura	
Superficie totale [m^2]	16,40
Altezza [m]	6,774

Oltre alle caratteristiche appena presentate i piani velici differiscono in modo sostanziale per altre caratteristiche geometriche. Ad esempio dalla figura 2.6 è evidente che presentino rande di forma in pianta diversa. Per quantificare le differenze geometriche fra i piani sono stati utilizzati alcuni parametri suggeriti da Liguori in [21].

Liguori distingue fra *parametri di forma della superficie* e *parametri di forma delle sezioni orizzontali* delle vele.

I parametri di forma della superficie di una vela, rappresentati in figura 2.8 e raccolti nella tabella 2.2, sono definiti nel modo seguente

- allungamento, *ALL*:

$$ALL = \frac{\text{altezza}^2}{\text{superficie}}$$

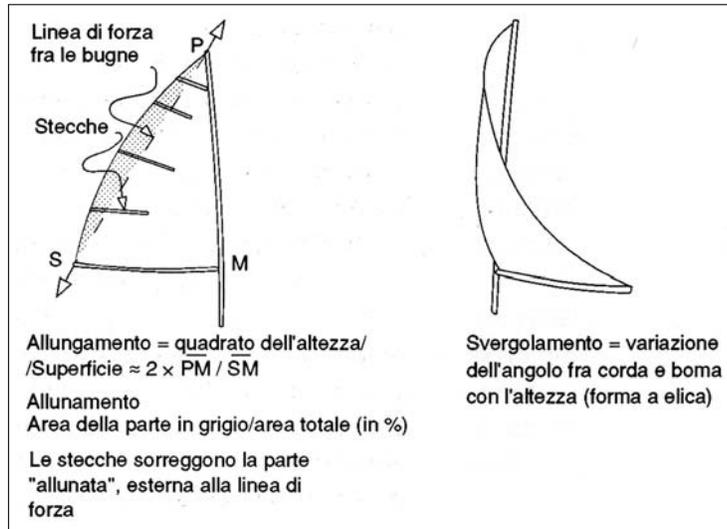


Figura 2.8: Parametri di forma della superficie di una vela. Da Liguori [21]

Tabella 2.2: Valori numerici dei parametri di forma della superficie delle vele

Parametro	Piano velico 1 Argo		Piano velico 2 Aretè		Piano velico 3 Aura	
	Randa	Fiocco	Randa	Fiocco	Randa	Fiocco
ALL	2,90	5,61	2,88	5,34	2,87	5,75
ALL totale	... 2,81 2,67 2,78 ...	
LUN	25,2%		32,2%		35,5%	
SVG 90%	14,3°		11,6°		15,9°	
SVG 50%	7,9°	8,2°	6,0°	5,0°	5,5°	0,4°
SVG 10%	1,5°	2,5°	1,4°	2,6°	1,0°	0,4°

L'allungamento è di fatto il rapporto d'aspetto della vela: un alto valore dell'allungamento identifica una vela che si sviluppa in verticale mentre vele *tozze* avranno allungamento minore. L'allungamento di una vela ha una marcata influenza sull'efficienza in navigazione: scrive Lodigiani in [22] che vele ad alto allungamento offrono massima efficienza in andature in bolina o al traverso, mentre vele a basso allungamento offrono efficienze più alte in andature al lasco o in poppa. Inoltre sottolinea come in vele a basso allungamento l'influenza del drag indotto dai vortici di estremità sia più forte e influenzi una porzione maggiore della vela.

- allunamento percentuale, *LUN*:

$$LUN = 100 \cdot \frac{A_{luna}}{A_{totale}}$$

Dove l'area di luna è l'area della porzione della vela colorata in grigio in figura 2.8 e l'area totale è l'area dell'intera vela considerata. L'allunamento della randa è l'aggiunta di una porzione di superficie nella parte alta dell'ipotenusa di una vela triangolare. Questa porzione di vela, che viene a trovarsi fuori dalla linea di tensione fra angolo di penna e angolo di scotta, dev'essere sostenuta dalle *stecche* (si faccia riferimento alla nomenclatura in figura 2.3). L'allunamento è una caratteristica introdotta sulle vele sia per sfruttare maggiormente il flusso di vento alle quote alte della superficie velica, sia per avere vele con superficie maggiorata senza allungare l'albero. È quindi opportuno notare che per randa come quelle presentate in questo studio, che hanno all'incirca la medesima altezza, aumentando l'allunamento si abbassa l'allungamento.

- svergolamento, *SVG*: variazione dell'angolo fra corda ad una certa quota e corda alla base della vela.
Lo svergolamento della vela viene introdotto principalmente per poter affrontare il vento incidente (che è per natura caratterizzato da un gradiente di intensità e direzione) con l'angolo d'attacco ottimale alle diverse quote.

I parametri di forma delle sezioni orizzontali di una vela alle varie quote, rappresentati in figura 2.9 e raccolti nella tabella 2.3¹, sono gli stessi che si definiscono per un profilo alare che abbia spessore nullo e sono i seguenti

- lunghezza della corda del profilo, *L*;
- alzata massima o freccia, *f*;
- distanza lungo la corda del punto di alzata massima, *x*.

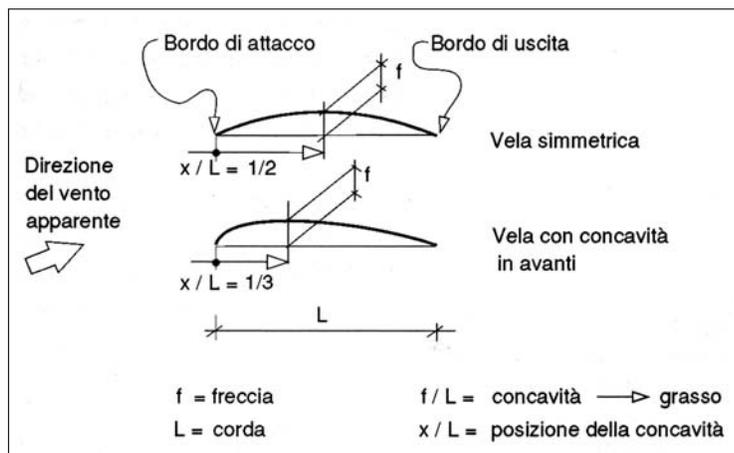


Figura 2.9: Parametri di forma delle sezioni orizzontali di una vela. Da Liguori [21]

Tabella 2.3: Valori numerici dei parametri di forma delle sezioni delle vele.

Piano velico 1 -Argo				
quota	f/L		x/L	
	Randa	Fiocco	Randa	Fiocco
90%	0,120		0,372	
50%	0,126	0,164	0,367	0,367
10%	0,073	0,137	0,385	0,358
media	0,111	0,152	0,371	0,361
Piano velico 2 - Aretè				
quota	f/L		x/L	
	Randa	Fiocco	Randa	Fiocco
90%	0,073		0,401	
50%	0,089	0,133	0,378	0,347
10%	0,062	0,115	0,403	0,349
media	0,078	0,125	0,390	0,347
Piano velico 3 - Aura				
quota	f/L		x/L	
	Randa	Fiocco	Randa	Fiocco
90%	0,038		0,500	
50%	0,040	0,039	0,500	0,512
10%	0,040	0,043	0,500	0,510
media	0,040	0,041	0,500	0,510

Sulla base di questi si definisco due parametri derivati:

- concavità o *grasso del profilo*, f/L , che influisce sulla capacità del profilo di produrre portanza. Un profilo concavo, confrontato con un profilo piatto che abbia la stessa corda, a parità di velocità indisturbata e angolo incidente produce maggiore portanza (Anderson [23]);
- posizione dell'alzata massima, x/L , che influisce principalmente sul coefficiente di momento che non è di particolare importanza nel contesto di questa tesi dal momento che non si faranno considerazioni sull'equilibrio dell'imbarcazione.

È opportuno osservare che fra i parametri presentati ve ne sono alcuni profondamente diversi mentre altri sono simili.

Dal punto di vista dei parametri di forma della superficie si vede (tabella 2.2) che gli *allungamenti* di rande e fiocchi non presentano grosse variazioni da un piano velico all'altro. Decisamente più importante è la differenza di *allunamento* che caratterizza le rande (si osservi in particolare lo scarso allunamento di Argo). Per quanto riguarda lo svergolamento sono piuttosto evidenti le grosse differenze di svergolamento fra i tre fiocchi, con il fiocco 1 che presenta svergolamenti superiori agli 8° , il fiocco 2 che si assesta intorno ai 5° e il fiocco 3 che praticamente non presenta svergolamento.

Dal punto di vista dei parametri di forma delle sezioni le differenze sono considerevoli per quanto riguarda il grasso delle vele (tabella 2.3). Il piano velico 1 presenta i profili più incurvati con grasso della coppia randa-fiocco mediamente pari a 11%-15%. Per il piano velico 2 risultano valori di 8%-13%. Il piano 3 presenta un grasso lievissimo di 4%-4%. Fra i piani velici 1 e 2 è invece piuttosto simile il valore della posizione dell'alzata massima, che si trova di poco sopra a $1/3$ della corda, valore molto diverso da quello presentato dal piano 3 che ha alzata massima a $1/2$ della corda.

Al capitolo 4 si metteranno in relazione queste caratteristiche geometriche con i risultati ottenuti.

Sistema di riferimento e convenzioni adottate

Si ricorda anzitutto quanto detto alla sezione 2.1:

- l'angolo di scarroccio λ è considerato nullo;

¹Per brevità la tabella presenta i dati relativi a tre sezioni, mentre la media è stata calcolata su cinque sezioni. La tabella completa (tab. B.1) è presentata in appendice B

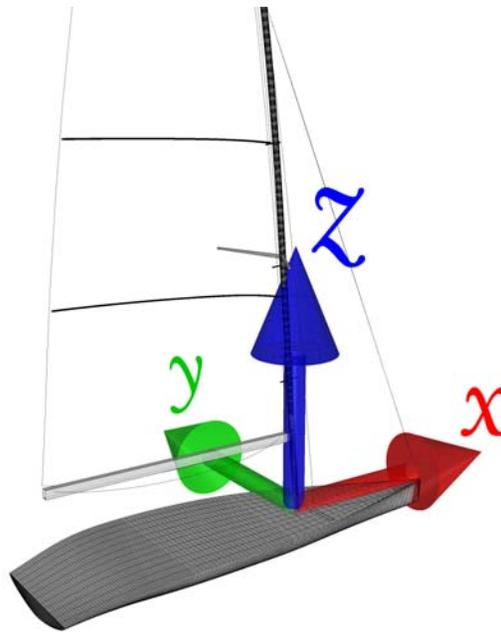


Figura 2.10: Sistema di riferimento adottato.

- l'angolo di rollio θ è considerato nullo.

Tali ipotesi semplificano notevolmente la definizione del sistema di riferimento, che è unico.

Il sistema di riferimento adottato (rappresentato in figura 2.10) ha origine al piede d'albero, asse x parallelo all'asse dello scafo e diretto verso prua, asse y diretto da destra verso sinistra per un osservatore che si trovi a bordo dalla barca e guardi verso prua, asse z a completare la terna levogira (quindi parallelo alla verticale locale e diretto verso l'alto).

La posizione di ciascuna vela viene definita tramite l'*angolo di apertura* rispetto l'asse della barca. L'*angolo di apertura* è l'angolo misurato sul piano x - y fra la proiezione (sul medesimo piano) della corda alla base della vela e l'asse dello scafo: l'angolo è negativo se identifica una rotazione oraria, positivo se identifica una rotazione antioraria (si veda la figura 2.11).

Si parla di *faccia sopravvento*, o lato in pressione, per indicare la faccia della vela rivolta verso la zona da cui spira il vento e si parla di *faccia sottovento*, o lato in depressione, per indicare l'altra faccia della vela.

Nelle nostre analisi la componente di vento apparente trasversale alla barca proviene sempre da dritta verso sinistra, quindi nella direzione concorde con quella dell'asse y .

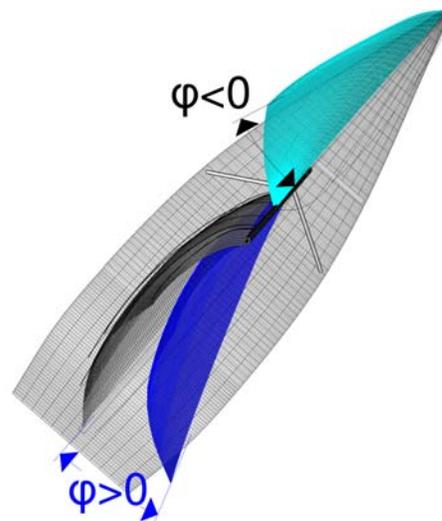


Figura 2.11: Esempio di angolo di apertura positivo (randa) e negativo (fiocco).

Coefficienti adimensionali nello studio delle vele

Nello studio dell'aerodinamica di un profilo alare, o di un'ala nel suo complesso, è importante raccogliere informazioni relative alla forza generata (F) dall'interazione profilo-flusso al variare dell'angolo di attacco della corrente incidente. Di norma in aeronautica in condizioni di volo stazionario: (a) il flusso incidente ha, all'infinito, caratteristiche uniformi in termini di modulo della velocità e direzione; (b) la direzione della corrente è perpendicolare alla direzione della forza di gravità, che è la forza che interessa contrastare; (c) si presuppone che il profilo non subisca grosse variazioni geometriche. Sulla base di queste considerazioni si sceglie di scomporre la forza generata dal profilo nelle sue componenti di *portanza*, P , perpendicolare alla direzione della corrente all'infinito e *resistenza*, R , parallela alla direzione della corrente all'infinito. I coefficienti di portanza e resistenza derivano da queste forze. Un coefficiente di forza è, in generale, un coefficiente adimensionale che mette in relazione una forza generata da una struttura immersa in un fluido con alcune grandezze di riferimento sia geometriche che fluidodinamiche.

I coefficienti relativi al profilo sono definiti come:

$$c_P = \frac{f_P}{\frac{1}{2}\rho v_{inf}^2 L}$$

$$c_R = \frac{f_R}{\frac{1}{2}\rho v_{inf}^2 L}$$

dove c_P , c_R , f_P e f_R sono minuscoli perché riferiti al solo profilo e non all'intera ala. Le grandezze di riferimento sono:

- la lunghezza della corda del profilo, L ;
- il modulo, all'infinito, della velocità della corrente incidente, v_{inf} ;
- la densità dell'aria ρ alla quota di volo.

Nel caso di una vela investita da un flusso d'aria caratterizzato da un gradiente lungo la direzione verticale le considerazioni (a) e (b) non sono più valide. Il modulo della v_{inf} non è più costante, come non è costante la direzione della corrente. Inoltre riferire i coefficienti adimensionali alle forze di portanza e resistenza non ha più un significato pratico in termini di prestazione del mezzo quanto nel caso aeronautico. La considerazione (c) decade in quanto è nostro interesse studiare l'andamento dei coefficienti al variare dell'angolo di apertura della randa.

Si preferisce quindi scomporre la forza generata dal piano velico lungo due direzioni che permettano di valutare in modo più immediato le componenti che danno o non danno un contributo utile all'avanzamento della barca.

Si è quindi deciso di utilizzare il coefficiente di avanzamento, C_M , riferito alla componente motrice F_M della forza risultante generata e il coefficiente di scarroccio, C_H , riferito alla componente di sbandamento F_H . In questo caso i coefficienti e le forze sono indicati con lettera maiuscola dal momento che si riferiscono non al profilo ma all'intero piano velico. I coefficienti C_M e C_H si ricavano dalle formule:

$$C_M = \frac{F_M}{\frac{1}{2}\rho v_{inf}^2 S}$$

$$C_H = \frac{F_H}{\frac{1}{2}\rho v_{inf}^2 S}$$

Nel caso in esame le grandezze di riferimento sono:

- la superficie totale del piano velico, S ;
- il modulo della velocità v_{inf} del vento apparente alla quota di riferimento² di 2,5 m;
- la densità dell'aria ρ , 1.18415 kg/m³, densità standard a 25°C;

Le componenti della forza sono calcolate lungo le direzioni di avanzamento e scarroccio, quindi:

²quota di rilevazione durante le prove in mare

- il coefficiente C_M è calcolato nella direzione di versore $\langle 1,0,0 \rangle$ nel sistema di riferimento assoluto (asse della barca);
- il coefficiente C_H è calcolato nella direzione di versore $\langle 0,1,0 \rangle$ nel sistema di riferimento assoluto.

Il rapporto

$$E^* \Big|_i = \frac{C_M \Big|_i}{C_H \Big|_i} \quad \text{con } i \text{ angolo di apertura della randa,} \quad (2.3)$$

si può considerare l'*efficienza propulsiva* della configurazione randa-fiocco caratterizzata da i gradi di angolo di apertura della randa. In modo analogo in aeronautica si definisce l'efficienza di un'ala con il parametro $E = C_L/C_D$.

E^* è indice di quanto la singola configurazione riesca a produrre una spinta effettivamente utile all'avanzamento della barca. Mettendo insieme in una curva le varie configurazioni è possibile confrontare i diversi piani velici e capire quale sia il più efficiente. Inoltre per ogni singolo piano velico è possibile individuare l'angolo di apertura della randa a cui corrisponde l'efficienza massima. Questa informazione, unitamente all'angolo di apertura che produce il massimo coefficiente di avanzamento, può essere preziosa per l'equipaggio. In caso di regata con forte vento infatti si preferisce impostare le vele nella configurazione di massima efficienza riducendo lo sbandamento anche a scapito del coefficiente di avanzamento. In caso di vento debole lo sbandamento può essere più facilmente controllato e si preferisce quindi tenere una configurazione che assicuri la massima forza di avanzamento.

Andature e configurazioni randa-fiocco studiate

Le andature studiate sono due,

- una **bolina stretta** caratterizzata da:
 - 25° di angolo al vento apparente a 2,5 m di quota;
 - 3,5 m/s di intensità del vento apparente a 2,5 m di quota;
- un **traverso**, caratterizzato da:
 - 80° di angolo al vento apparente a 2,5 m di quota;
 - 3,5 m/s di intensità del vento apparente a 2,5 m di quota.

Queste condizioni di navigazione sono state scelte perché rappresentano gli estremi del campo di navigazione in bolina e perché erano a disposizione rilevazioni di velocità e vento ottenute durante la navigazione. Oltre il

traverso infatti viene issato il *gennaker* e il comportamento del piano velico cambia radicalmente presentando componenti di resistenza sempre più elevate e componenti di portanza decrescenti man mano che ci si avvicina ad andature di poppa.

Configurazioni randa-fiocco per le analisi in bolina

Per definire le diverse configurazioni randa-fiocco (ricordiamo che per *configurazioni randa-fiocco* intendiamo la posizione che le due vele assumono l'una rispetto all'altra) che abbiamo analizzato ci rifaremo alle convenzioni presentate nella sezione 2.2.

Come già detto la posizione di randa e fiocco è definita tramite l'*angolo di apertura* rispetto all'asse dello scafo.

Su imbarcazioni di questo tipo, per un'andatura in bolina stretta, l'angolo di apertura del fiocco è costante perché in queste barche il fiocco si cazza fino a che l'angolo di scotta non rientra fino alla trinchetta. L'angolo di apertura della randa può invece variare passando da alcuni gradi di rotazione sottovento ad alcuni gradi di rotazione sopravvento.

Nella tabella 2.4 elenchiamo le configurazioni di bolina analizzate: sono undici per ciascuno dei tre piani velici.

Tabella 2.4: Configurazioni randa-fiocco per l'andatura in bolina

#	setup vele		condizioni di vento		
	apertura randa [deg]	apertura fiocco [deg]	α [deg]	β [deg]	v_a [m/s]
1	-21,0	-13,0	25,0	80,4	3,5
2	-14,0	-13,0	25,0	80,4	3,5
3	-10,5	-13,0	25,0	80,4	3,5
4	-7,0	-13,0	25,0	80,4	3,5
5	-3,5	-13,0	25,0	80,4	3,5
6	0,0	-13,0	25,0	80,4	3,5
7	3,5	-13,0	25,0	80,4	3,5
8	7,0	-13,0	25,0	80,4	3,5
9	10,5	-13,0	25,0	80,4	3,5
10	14,0	-13,0	25,0	80,4	3,5
11	17,5	-13,0	25,0	80,4	3,5

Configurazioni randa-fiocco per le analisi al traverso

Nel caso di andatura al traverso, l'angolo di apertura del fiocco può essere aumentato rilasciando la scotta. Il fiocco assume una nuova posizione caratterizzata da un angolo di apertura maggiore di quello normalmente concesso dal sistema autovirante.

Quale sia l'angolo che è opportuno tenere non è di facile determinazione e, all'atto pratico, spetta al velista che si basa soprattutto sul comportamento dei matafioni per regolare la vela. Nelle analisi al traverso, non più vincolati a mantenere il fiocco nella posizione standard, è stato deciso di impostare l'angolo di apertura basandoci su simulazioni preliminari che hanno riguardato il solo fiocco. Abbiamo dunque costruito la curva polare e la curva di efficienza del fiocco utilizzando rispettivamente i coefficienti di avanzamento e resistenza ed il loro rapporto (i risultati sono presentati all'appendice A). Abbiamo dunque deciso di impartire al fiocco un'apertura intermedia fra quella di massima efficienza e quella di massimo avanzamento. L'angolo di apertura della randa anche in questo caso può variare rimanendo però sempre in una posizione sottovento. Nella tabella 2.5 elenchiamo le configurazioni al traverso analizzate: sono sei per ciascuno dei tre piani velici.

Tabella 2.5: Configurazioni randa-fiocco per l'andatura al traverso

#	setup vele		condizioni di vento			
	apertura randa [deg]	apertura fiocco [deg]	α [deg]	β [deg]	v_a [m/s]	
1	-76,0	-60,0	80,0	90,0	3,5	
2	-70,0	-60,0	80,0	90,0	3,5	
3	-60,0	-60,0	80,0	90,0	3,5	
4	-55,0	-60,0	80,0	90,0	3,5	
5	-50,0	-60,0	80,0	90,0	3,5	
6	-37,5	-60,0	80,0	90,0	3,5	

Capitolo 3

Modello CFD

All'inizio del lavoro è stato necessario: a) individuare un modello CFD con cui effettuare le analisi; b) validare tale modello. La validazione di un modello CFD consiste generalmente nel confronto dei risultati ottenuti numericamente con quelli raccolti sperimentalmente in galleria del vento. Il modello CFD utilizzato nelle analisi riportate in questa tesi è stato implementato con il software *STAR-CCM+* di *CD-Adapco*, che in partnership con il team *Mètis Vela UniPd* ha fornito una licenza accademica power-on-demand.

Le risorse a disposizione non hanno permesso una sensorizzazione completa delle barche né tantomeno lo sviluppo di una galleria del vento in cui testare modelli in scala. È stato quindi necessario riferirsi a dati velici presenti in letteratura. A tale scopo, si è utilizzato il lavoro di Yoo e Kim [16] che presenta risultati ottenuti con un modello numerico e validati per confronto con i dati sperimentali raccolti su un modello sensorizzato testato in galleria del vento. Si è scelto questo studio perché presenta notevoli analogie con l'approccio che si intende tenere in questa tesi e inoltre è largamente utilizzato nella letteratura tecnica (si veda Ciortan e Soares [17], Viola e Fossati [24] e Izaguirre-Alza, Zamora-Rodríguez e Pérez-Rojas [25]).

Di seguito vengono presentate le caratteristiche peculiari del modello Yoo-Kim sia per quanto riguarda la geometria dell'imbarcazione studiata, sia ciò che concerne le caratteristiche del modello fisico e le caratteristiche della mesh utilizzata.

Viene quindi presentato il modello CFD preparato nell'ambito di questa tesi, evidenziando gli aspetti innovativi rispetto al modello di Yoo e Kim. Il nuovo modello viene applicato alla geometria Yoo e Kim al fine di validarlo per confronto con i risultati ottenuti da i due autori.

Questo modello è stato poi utilizzato per analizzare i tre piani velici oggetto di questo modello.

3.1 Il modello Yoo-Kim di riferimento

Da Yoo e Kim è stata analizzata una barca a vela con armo a sloop e piano velico composto da randa e fiocco. Il piano velico è stato analizzato in tre diverse configurazioni: la randa è stata mantenuta in posizione fissa con angolo di apertura nullo e all'apertura del fiocco sono stati impartiti tre diversi angoli.

In un secondo momento è stato testato in galleria del vento un modello in scala dello stesso piano velico.

I risultati sperimentali e numerici ottenuti sono quindi stati confrontati per validare il modello CFD.

Di seguito vengono presentate le caratteristiche salienti del modello numerico Yoo-Kim.

Definizione della geometria del piano velico

Il piano velico è rappresentato in figura 3.1 e le quote principali sono elencate di seguito.

Per la randa: $P=11.9m$, $E=4.0m$ con albero di $150mm$ di diametro. Per il fiocco: $J=3.9m$, $I=11m$. Le aree derivanti sono di $23.8m^2$ per la randa e sono di $21.5m^2$ per il fiocco. L'articolo di riferimento non riporta l'altezza a cui viene posizionata la randa né la posizione del fiocco. Questi parametri sono stati ricavati dalla tavola presente nell'articolo dopo aver verificato che tale tavola conservasse le proporzioni (questa operazione è in accordo con quanto fatto da Ciortan e Soares [17]). La distanza della base della randa dalla base d'albero è dunque di $1,75m$ e di $1,08m$ per il fiocco. Il vertice dell'angolo di mura del fiocco è, riferendosi alla coordinata x in figura 3.1, a $-3.74m$ (si osservi che in questo specifico caso ci si riferisce al riferimento utilizzato da Yoo-Kim. Altrove, salvo diversamente indicato, ci si riferirà sempre al sistema di riferimento di figura 2.10).

Per quanto riguarda la forma delle singole vele per ciascuna di esse sono state definite 5 sezioni a 5 diverse quote (H) utilizzando i parametri seguenti:

- lunghezza della corda del profilo, C ;
- angolo di inclinazione della corda, Φ ;
- alzata massima, come rapporto percentuale sulla corda, f/C .

Questi parametri definiscono le dimensioni di massima che servono a calcolare l'esatta forma di ciascun profilo. I profili hanno spessore nullo e linea media appartenente alla serie NACA $a=0.8$ (Abbott e von Doenhoff, Theory of Wing Sections, [26]), progettati teoricamente per un coefficiente di pressione costante fino al 80% della corda e decremento lineare per la

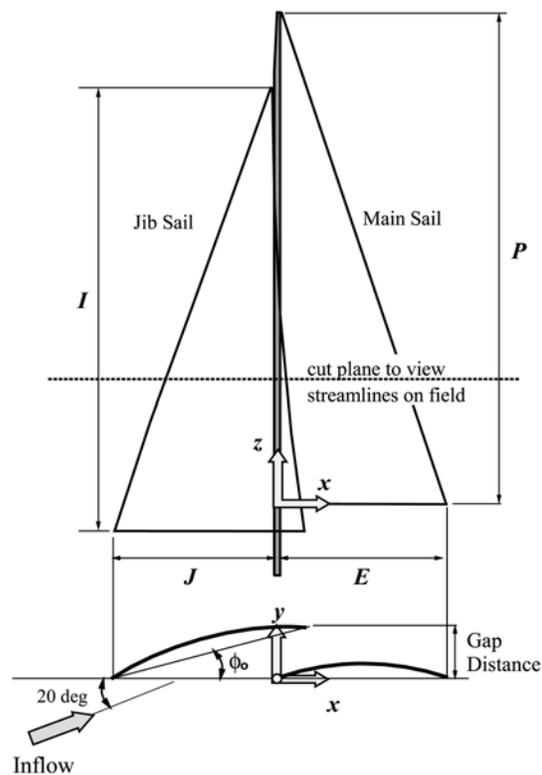


Figura 3.1: Vista schematica del piano velico. Da Yoo-Kim [16].

restante parte.

Le figura 3.2 mostra come questi parametri appena definiti vengano misurati sulle vele. I valori numerici dei parametri sono stati raccolti nella tabella 3.1.

Le configurazioni studiate sono tre e vengono ottenute variando l'angolo di apertura del fiocco, ovvero l'angolo Φ_0 , che assume angoli di $\Phi_0=5^\circ$, $\Phi_0=10^\circ$, $\Phi_0=15^\circ$.

Modello fisico e calcolo CFD

Per la soluzione del moto turbolento attorno alle vele, Yoo-Kim risolvono le equazioni RANS¹ tramite l'uso del codice WAVIS.

Il codice WAVIS è stato implementato e validato dal *Korea Ocean Research & Development Institute*. Le caratteristiche principali del codice sono le seguenti:

sulle equazioni che governano il fenomeno turbolento

¹Sono le equazioni in tre dimensioni *Reynolds-averaged Navier-Stokes*

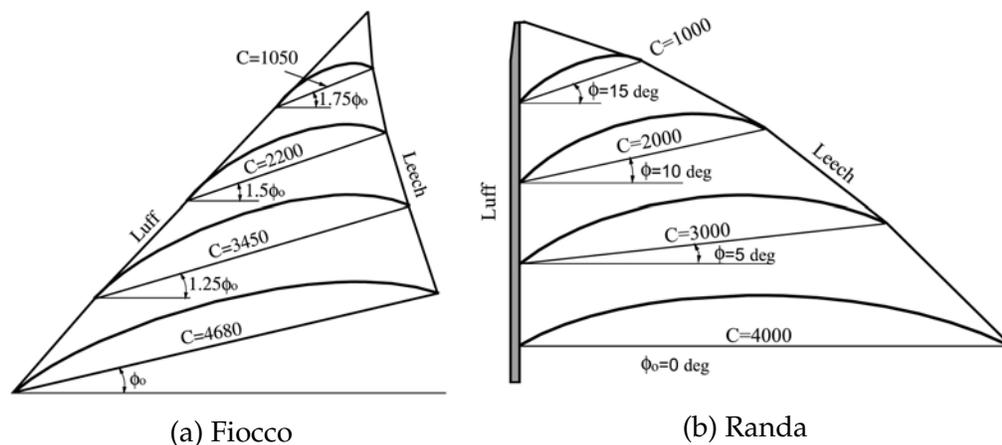


Figura 3.2: Disposizione dei parametri sulle vele. Da Yoo-Kim [16].

Tabella 3.1: Valori numerici dei parametri delle sezioni

Parametri randa					
	Base	25%	50%	75%	100%
H [m]	0	3	6	9	11,9
C [m]	4	3	2	1	0,01
Φ [deg]	0	5	10	15	20
f/C [%]	8	10	12	14	16
Parametri fiocco					
	Base	25%	50%	75%	100%
H [m]	0	2,75	5,5	8,25	11
C [m]	4,68	3,45	2,2	1,05	0,01
Φ [deg]	Φ_0	$1,25\Phi_0$	$1,5\Phi_0$	$1,75\Phi_0$	$2,0\Phi_0$
f/C [%]	8	10	12	14	16

- si valutano l'equazione di continuità per la conservazione della massa e le equazioni di Navier-Stokes per il trasporto del momento;
- per risolvere il problema della chiusura della turbolenza viene usato il modello $k-\epsilon$ realizable, che introduce delle migliorie al normale modello $k-\epsilon$;
- si utilizza la funzione di parete *Launder-Spalding (1974)* per superare il problema della soluzione della regione turbolenta in prossimità delle pareti, questo permette di ridurre notevolmente il numero di celle;

sulla discretizzazione numerica delle equazioni

- viene utilizzato il metodo ai volumi finiti *cell-centered*, ovvero le equazioni vengono integrate sulla superficie di ciascuna cella e il valore della grandezza viene assegnato al centro della cella stessa anziché sui nodi della mesh.

La mesh

- è stata generata con *GridGen package* di *Pointwise Inc.*,
- è *strutturata* e presenta una topologia ibrida C-H (per ulteriori dettagli sulle mesh strutturate e sulle topologie disponibili si rimanda a testi specialistici, in particolare Farrashkhalvat e Miles [27]).
- è composta da 1 796 770 nodi,
- presenta un primo layer di celle a contatto con la superficie caratterizzate da $y^+ = 50 \div 230$.

Il parametro y^+ definisce la *distanza adimensionalizzata dalla parete* ed è definito come

$$y^+ \equiv \frac{u^* y}{\nu} \quad (3.1)$$

dove y è la distanza dalla parete più vicina, ν è il valore della *viscosità cinematica* locale del fluido e u^* è la *velocità di frizione* definita come

$$u^* \equiv \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}}$$

con τ_w sforzo di taglio a parete e ρ densità del fluido.

Le assunzioni che caratterizzano la soluzione sono:

- l'albero è indeformabile;
- l'albero e il piano velico sono perfettamente verticali, non presentano rollio;

- la superficie delle vele è modellata come una membrana rigida indeformabile;
- l'angolo con cui il vento apparente incide sulle vele è di 20° e il modulo è 10 m/s .

I risultati ottenuti da Yoo-Kim verranno presentati nella successiva sezione, nel paragrafo sulla validazione del modello CFD.

3.2 Il modello validato

Come già accennato il modello preparato nell'ambito di questa tesi è stato implementato con il software *STAR-CCM+*, acronimo di *Simulation of Turbulent flow in Arbitrary Regions - Computational Continuum Mechanics*. Nel proseguo della trattazione ci si riferirà al modello sviluppato nell'ambito di questa tesi con la denominazione *modello Star*.

Il modello Star presentato e validato è il risultato finale di numerose analisi preliminari volte a stimare l'influenza che alcune caratteristiche del modello CFD (ad esempio tipologia della mesh, qualità delle celle, distribuzione delle condizioni al contorno) hanno sulla qualità e sui tempi della simulazione.

Geometria del piano velico

La geometria è naturalmente la stessa definita da Yoo-Kim e rispetta sia le dimensioni geometriche generali sia la forma del profilo utilizzato, NACA $a=0.8$.

Modello fisico e calcolo CFD

Anche in questo caso le equazioni che governano il moto turbolento vengono risolte con un approccio RANS, si studia dunque il fluido in condizioni *stazionarie*, e in particolare

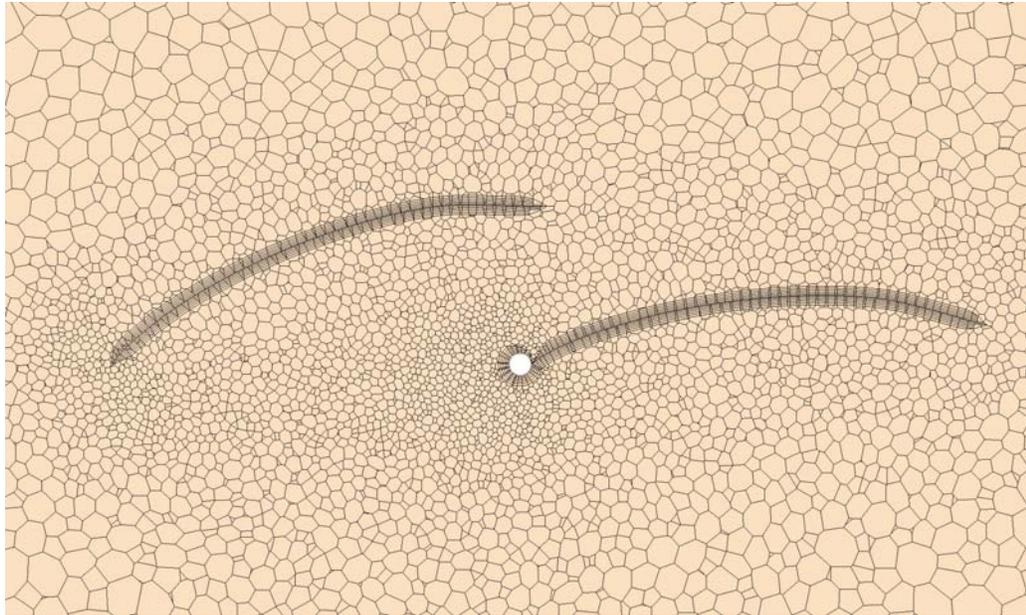
- si studia il fluido considerando l'aria un gas a densità costante, ipotesi che non risulta particolarmente restrittiva date le piccole variazioni di pressione in gioco,
- si è utilizzato l'algoritmo *segregated flow* che consente un minor impiego di memoria da parte del calcolatore rispetto al più robusto e oneroso *coupled flow*.;
- il problema della chiusura della turbolenza viene risolto con il modello *k- ϵ realizable*;

- per la soluzione della regione turbolenta a parete si utilizza l'approccio *All y^+ Wall Treatment* che è un approccio ibrido fra i due modelli standard *Low y^+* e *High y^+* .

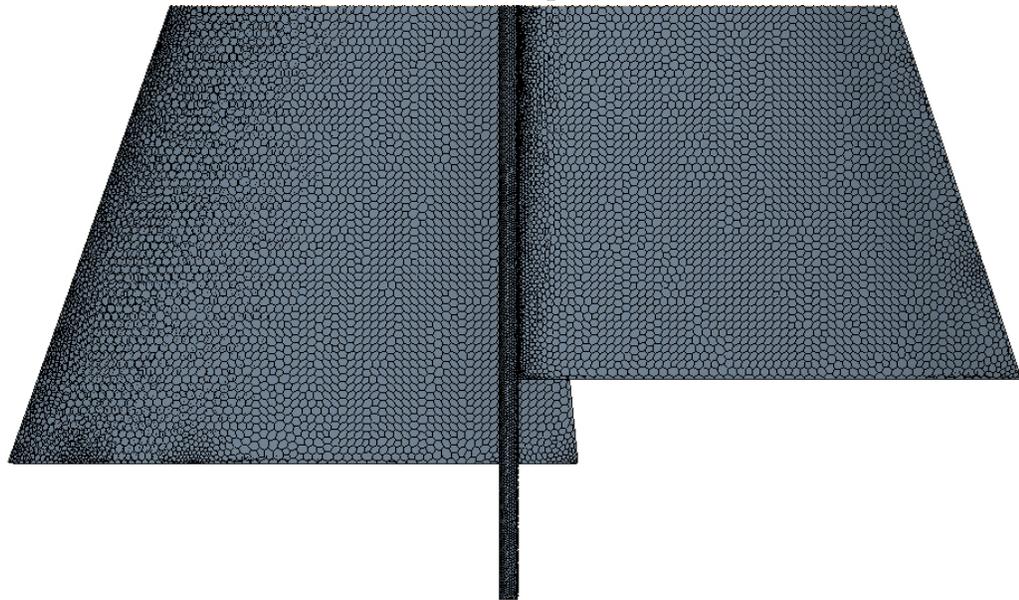
Come già accennato alla sezione 3.1 una mesh può essere ad elevata risoluzione in prossimità della parete o, per ridurre il numero di elementi e quindi il peso computazionale, a bassa risoluzione. Queste condizioni richiedono due diversi approcci in termini di *trattamento di parete*. L'approccio *Low y^+* è pensato per mesh ad alta risoluzione che risolvano in modo sufficientemente accurato la zona dello strato limite di parete ma perché questo approccio sia affidabile è bene avere celle di parete con $y^+ < 1$. Al contrario l'approccio *High y^+* bypassa il problema della soluzione numerica dello strato limite lavorando su celle di parete con $y^+ > 30$ e utilizzando funzioni di parete. Questo secondo approccio è quello utilizzato da Yoo e Kim e quello che, principalmente per questioni di risorse a disposizione, si è ritenuto opportuno utilizzare anche in questa tesi. Tuttavia l'impossibilità di assicurare un valore di $y^+ > 30$ (o meglio: potendo assicurare tale valore solo per, indicativamente, il 90% delle celle di parete) si è preferito affidarsi al modello ibrido *All y^+* che è il modello predefinito utilizzato da STAR-CCM+ e che è in grado di risolvere valori di y^+ compresi fra 1 e 30 tramite una funzione di ponderazione (STAR-CCM+® *Documentation. Version 10.02* [28]).

Le caratteristiche del dominio e della mesh sono elencate di seguito.

- Il dominio è un parallelepipedo sulla cui base inferiore poggia il piede d'albero. Il piano velico è collocato all'interno del dominio in modo che il piano a cui appartengono albero e strallo coincida con il piano di simmetria verticale parallelo alla direzione di massima estensione del parallelepipedo. Il dominio si estende per 8.5 volte l'altezza della vela nella direzione delle x positive (si veda il sistema di riferimento definito in figura 2.10), per 10 volte l'altezza della vela nella direzione delle x negative, per 5 volte alla destra e alla sinistra del piano velico e per 3.5 volta al di sopra dell'albero. Tale dimensione per il dominio è stata ricalcata da quanto presentato da Ciortan e Soares [17].
- La mesh è *non strutturata* e presenta fra le 700 000 e le 900 000 celle poliedriche ottenute da una mesh superficiale che presenta 35000 ÷ 40000 celle sulla due facce della superficie di ciascuna vela e 15000 ÷ 20000 celle sulla superficie dell'albero (si veda la figura 3.3b).
- La mesh presenta 5 layer di celle prismatiche sulle pareti delle vele e dell'albero, layer ottenuti dall'estrusione dei poligoni che costituiscono la mesh di superficie di quelle pareti (si veda la figura 3.3a).



(a) Mesh intorno alle vele alla quota del 25% della randa.



(b) Mesh sulla superficie delle vele, particolare della zona inferiore del piano velico.

Figura 3.3: Particolari della mesh utilizzata nel modello Star.

Le condizioni al contorno sono le seguenti.

- Le pareti del parallelepipedo nella direzione delle x e y positive sono superfici di ingresso del fluido a cui è imposto il vettore velocità in ingresso di componenti $[-9.3969 \text{ m/s}, -3.4202 \text{ m/s}, 0 \text{ m/s}]$ corrispondente ad un flusso di intensità 10 m/s e angolo di 20° rispetto all'asse della barca (si veda la figura 3.4).

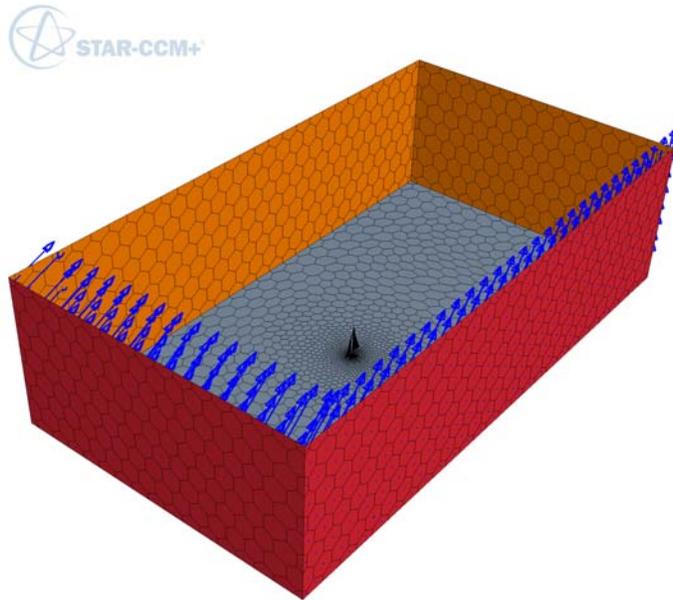


Figura 3.4: Dominio del campo fluido e condizioni al contorno. Le pareti in rosso sono zone di ingresso del flusso, le pareti arancioni sono zone di uscita del flusso. In blu sono visualizzati i vettori che definiscono il vento apparente in ingresso.

- Le pareti del parallelepipedo nella direzione delle x e y negative sono superfici di uscita del fluido a cui è imposta la pressione atmosferica.
- La parete superiore del dominio è definita come parete solida (il flusso non può attraversarla) con coefficiente di attrito nullo.
- La parete inferiore del dominio, che simula la superficie dell'acqua, è definita come parete solida con attrito, quindi è nullo il campo di velocità in corrispondenza di questa parete.

Questa particolare configurazione del dominio è stata scelta per limitare il più possibile la presenza di pareti non attraversabili dal flusso che rappresenterebbero una condizione non esistente nella natura del fenomeno. L'approccio Ciortan e Soares [17] con le pareti laterali solide, oltre che la parete superiore, simula di fatto le condizioni che vengono a crearsi

in una galleria del vento, e quindi generalmente si usa per simulare un flusso d'ingresso ordinato e rettilineo. Nell'ambito di questa tesi si è scelto di introdurre un dominio a doppia superficie d'ingresso anche in previsione di utilizzare nell'analisi un gradiente di vento apparente imposto alle superfici di ingresso. Tale condizione verrà spiegata nel dettaglio nella sezione 3.3.

Risultati della validazione

I risultati che sono stati prodotti dal modello Star e che si possono confrontare con i risultati sperimentali presentati da Yoo e Kim sono quelli relativi ai coefficienti di portanza e resistenza.

I coefficienti di portanza e resistenza (definiti in 2.2)

$$C_P = \frac{F_P}{\frac{1}{2}\rho v_{inf}^2 S}$$

$$C_R = \frac{F_R}{\frac{1}{2}\rho v_{inf}^2 S}$$

sono stati calcolati prendendo in considerazione l'intera superficie del piano velico, 45.3 m^2 , la densità dell'aria pari a 1.18415 kg/m^3 e una v_{inf} pari a 10 m/s . I valori numerici ottenuti sono riportati nella tabella 3.2 e nei grafici in figura 3.5. I risultati ottenuti in questo studio risultano piuttosto vicini ai risultati numerici ottenuti da Yoo e Kim con cui hanno validato il loro modello. Va poi considerato che i risultati di Yoo e Kim ottenuti da analisi numerica sono sempre inferiori a quelli ottenuti con l'analisi sperimentale (si veda [16]) ed è quindi positivo che in 5 casi su 6 i valori ottenuti in questa tesi si avvicinino ai dati sperimentali più di quanto non facciano i risultati del paper di riferimento.

Yoo e Kim sostengono che la differenza fra i risultati numerici e sperimentali vada attribuita a tre fattori: a) nell'analisi sperimentale oltre a vele e albero erano presenti anche alcuni elementi del sartiame, una lastra di sostegno per l'albero e un boma; b) è presente un *effetto di scala* dovuto al fatto che il numero di Reynolds dell'analisi sperimentale è minore di quello dell'analisi CFD, e questo può aumentare il valore dei coefficienti del modello sperimentale.

Alla luce di queste considerazioni e dei risultati sperimentali e numerici presentati in tabella 3.2, il modello Star sviluppato nell'ambito di questa tesi si considera validato e quindi si presuppone produca risultati affidabili se applicato ad analisi simili a quella svolta.

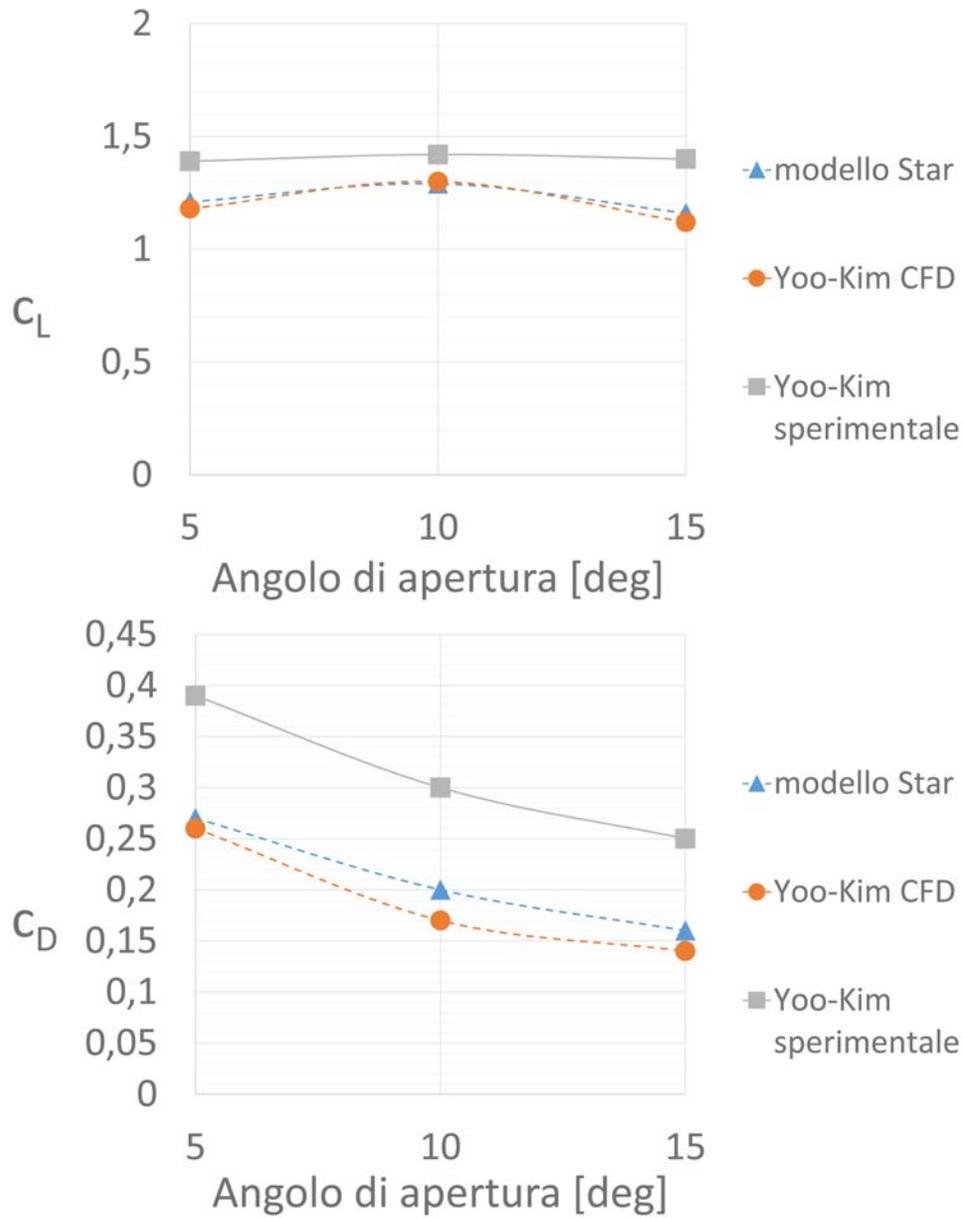


Figura 3.5: Valori dei coefficienti di portanza e resistenza al variare dell'angolo di apertura del fiocco

Tabella 3.2: Coefficienti di portanza e resistenza ottenuti da Yoo e Kim e in questo studio

C_P			
	5°	10°	15°
Yoo-Kim sperimentale	1,39	1,42	1,40
Yoo-Kim CFD	1,18	1,30	1,12
modello Star	1,21	1,29	1,16
C_R			
	5°	10°	15°
Yoo-Kim sperimentale	0,39	0,30	0,25
Yoo-Kim CFD	0,26	0,17	0,14
modello Star	0,27	0,20	0,16

Un altro confronto, per confermare il buon funzionamento del modello Star, si può fare fra i risultati numerici ottenuti:

- Pattern delle linee di corrente al 25% della randa.
Le figure 3.6 e 3.7 mostrano le linee di corrente del flusso intorno alle vele alla quota del 25% della randa (studio Yoo e Kim nella pagina di sinistra, questo studio nella pagina di destra). Il pattern delle linee di corrente nei casi ad apertura di 15° e 10° risulta piuttosto simile a quello ottenuto da Yoo e Kim mentre la differenza è evidente ad apertura 5°. Nell'immagine ottenuta in questo studio, si vede chiaramente che non si verifica il distacco del flusso al bordo d'ingresso del fiocco, tuttavia si osserva un filetto fluido uscente dal fiocco seguire una traiettoria particolarmente disordinata che suggerisce che probabilmente ad una quota leggermente diversa da quella presentata da Yoo-Kim sta iniziando a crearsi una zona di turbolenza. Si può intuire anche come si crei una bolla di ricircolo all'intradosso della randa appena a valle dell'albero, di modesta intensità per la configurazione a 10° e di intensità decisamente più importante a 5° di apertura del fiocco. Questo fenomeno si osserva molto chiaramente nelle immagini ottenute da Yoo-Kim ma è presente anche nelle immagini ottenute nell'ambito di questo studio laddove vi sono ampie zone in prossimità dell'albero non interessate da linee di corrente aderenti alla randa.
- Distribuzione del coefficiente di pressione.

Nelle figure 3.8 e 3.9, a fronte di quanto è appena stato detto per le linee di corrente, viene presentato il confronto fra le distribuzioni del coefficiente di pressione nelle due situazioni in cui i piani velici

presentano un comportamento simile: 15° e 10° di apertura del fiocco.

In figura 3.8 si vede la distribuzione del coefficiente di pressione ottenuta da Yoo-Kim mentre in figura 3.9 si vede la distribuzione ottenuta in questo studio. Si può osservare come le distribuzioni siano molto simili sia dal punto di vista della forma delle linee di livello che dal punto di vista dei valori rilevati.

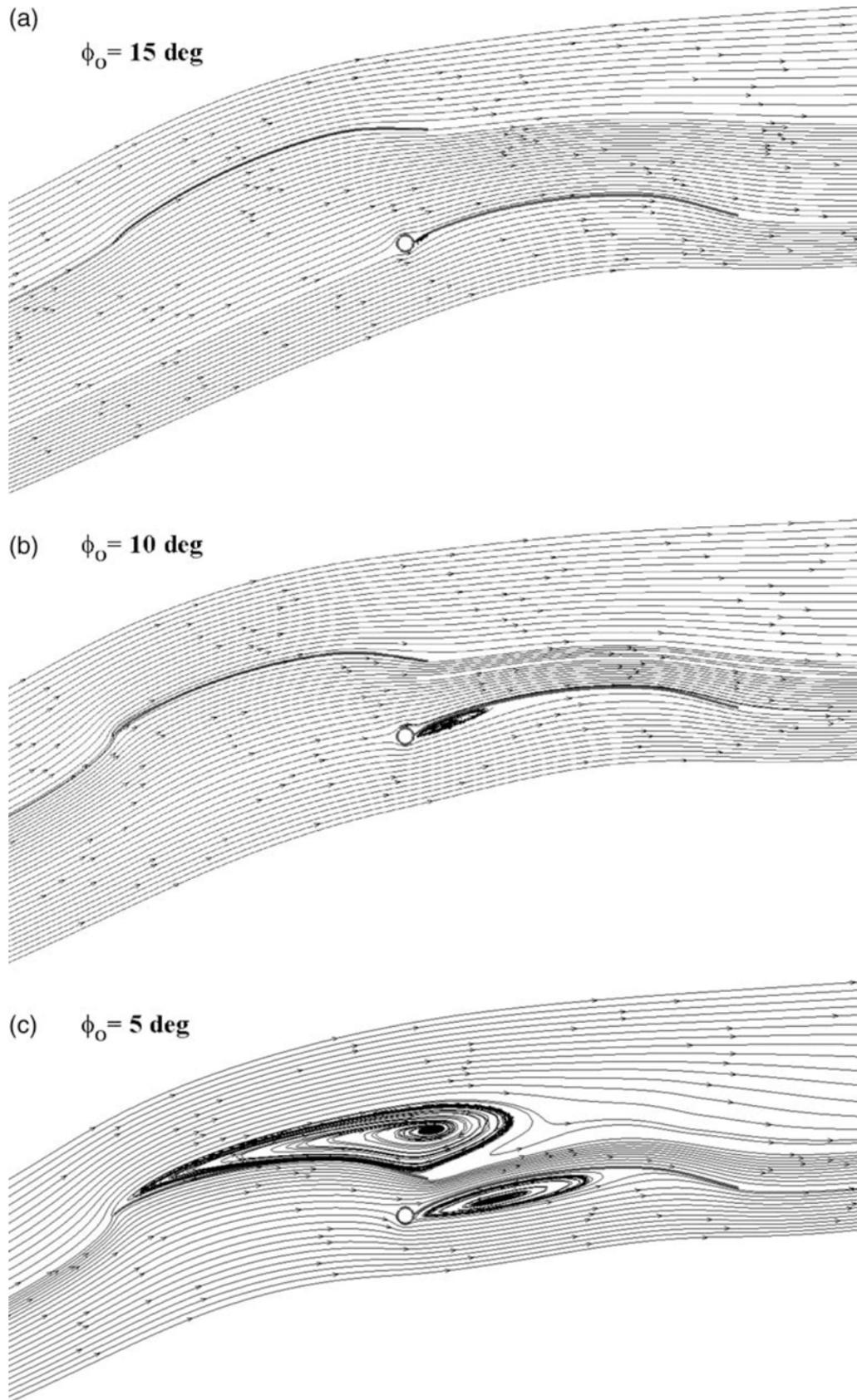


Figura 3.6: Andamento delle linee di corrente al 25% della randa ottenute da Yoo-Kim.

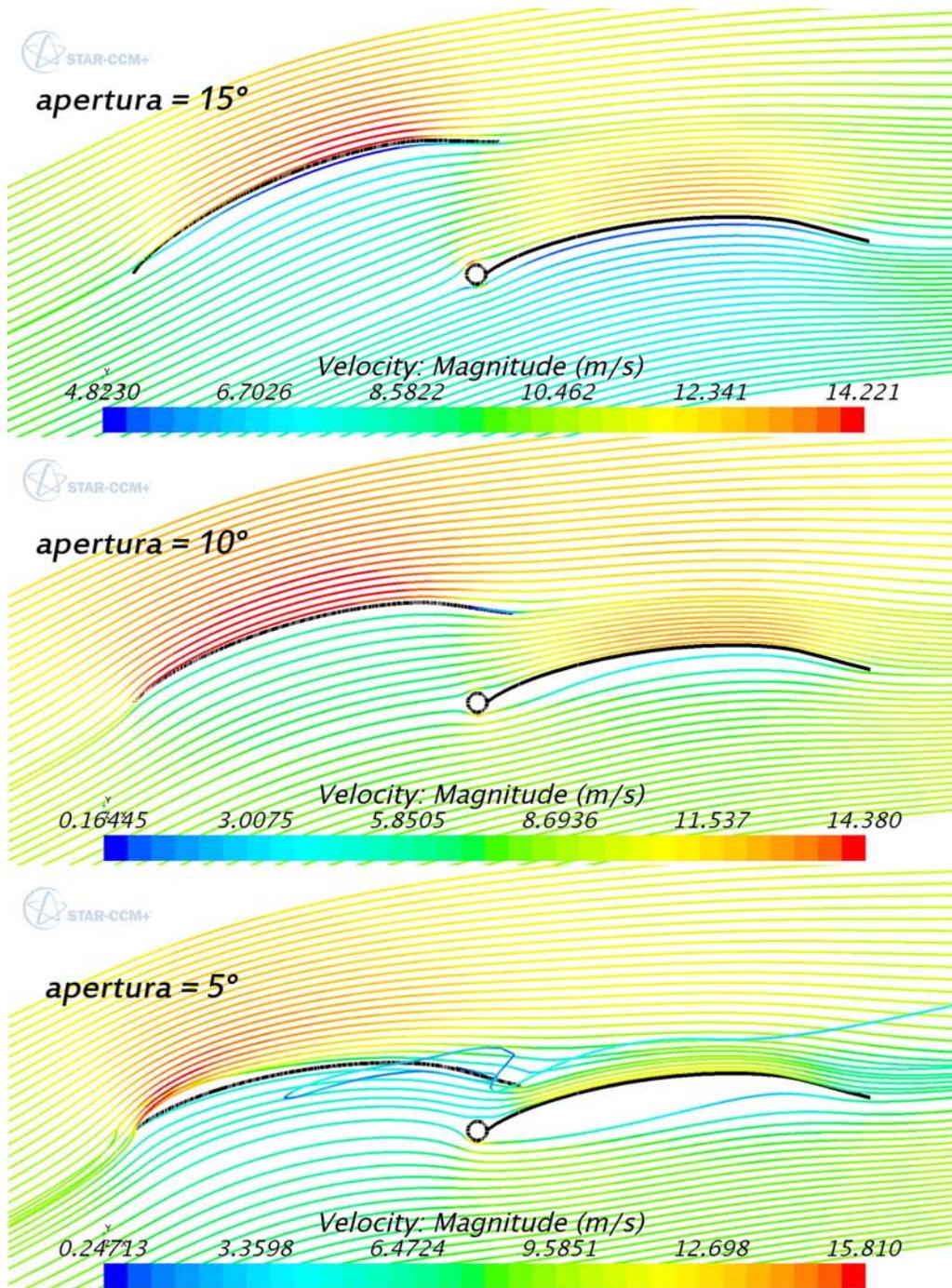


Figura 3.7: Andamento delle linee di corrente al 25% della randa ottenute in questo studio.

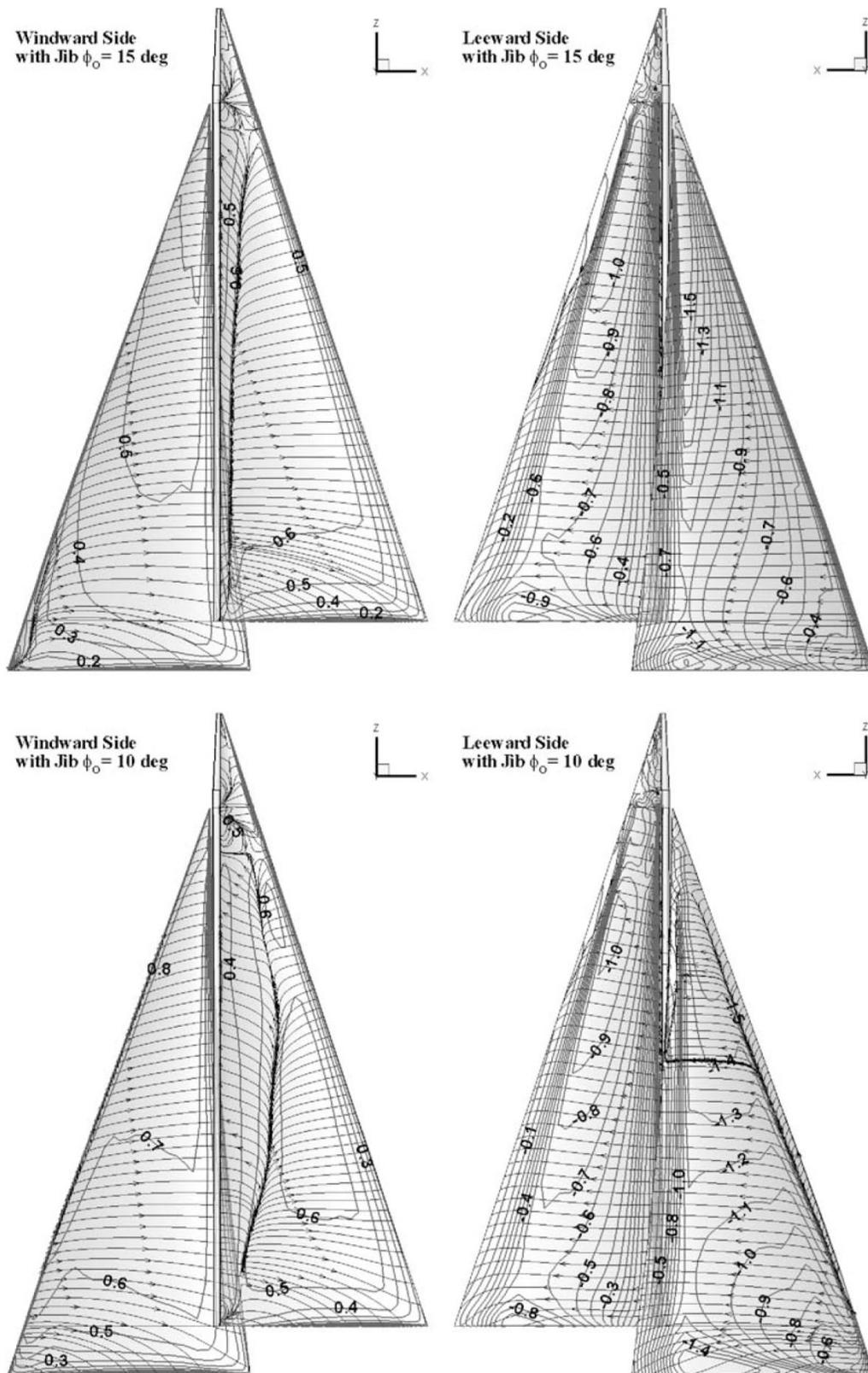


Figura 3.8: Distribuzione del coefficiente di pressione sulle vele ottenuta da Yoo-Kim

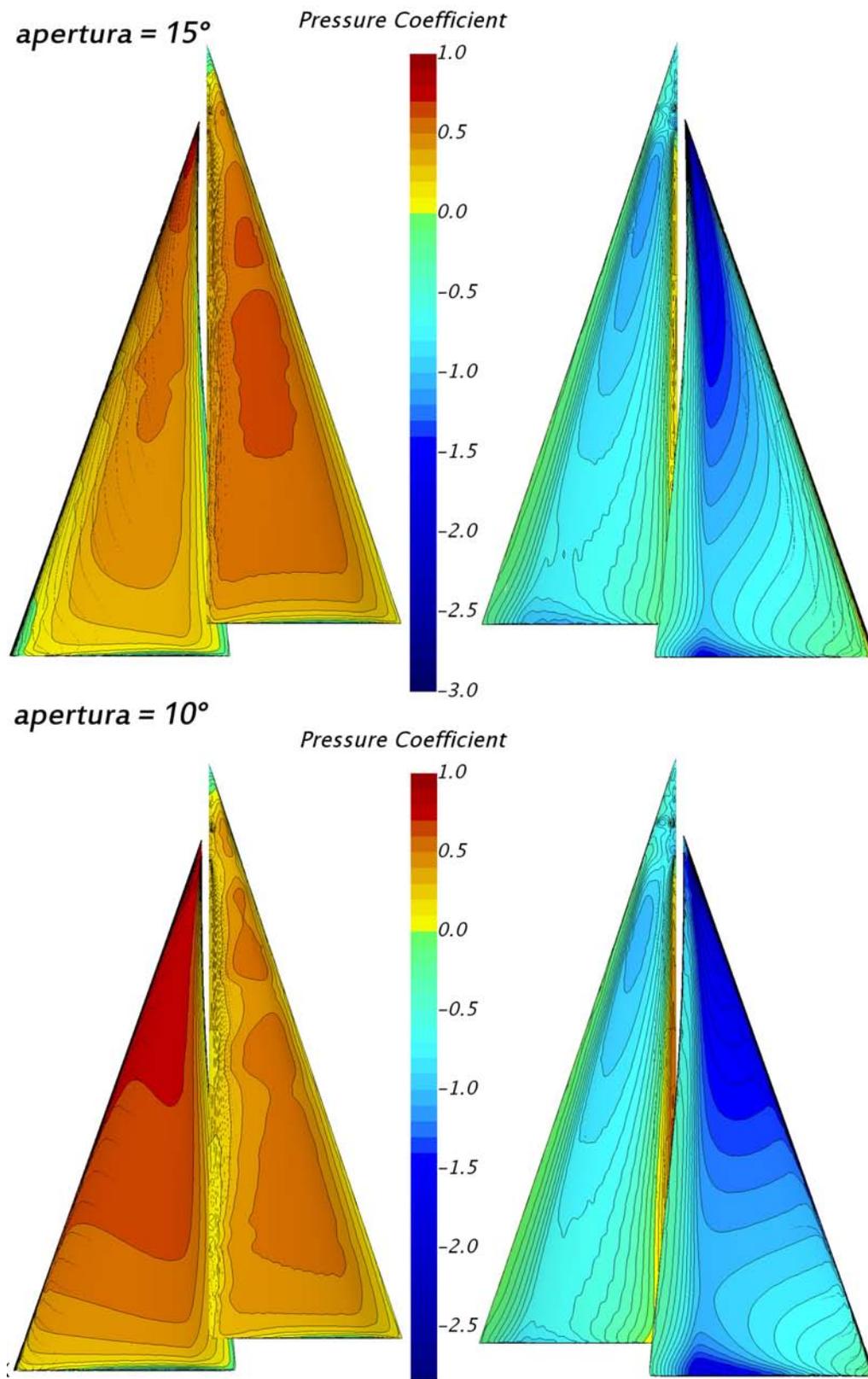


Figura 3.9: Distribuzione del coefficiente di pressione sulle vele ottenuta in questo studio

3.3 Scalatura e innovazioni apportate al modello

Il modello Star validato con la geometria Yoo-Kim è stato scalato al fine di essere applicato a barche con albero di 7 metri. Anche nello studio dei piani velici presentati in questa tesi, come fatto da Yoo e Kim [16] e per il modello Star, le vele verranno considerate membrane indeformabili.

Per la scalatura è stato considerato quanto segue:

- il dominio è stato scalato mantenendo costante la distanza relativa delle vele dalle pareti del dominio, rimane valido quindi che il dominio si estende per 8.5 volte l'altezza della vela nella direzione delle x positive, per 10 volte nella direzione delle x negative, per 5 volte alla destra e alla sinistra del piano velico e per 3.5 volta al di sopra dell'albero;
- lavorando con i parametri per la creazione della mesh di superficie è stata mantenuta la stessa discretizzazione superficiale della mesh, quindi $35000 \div 40000$ celle sulla due facce della superficie di ciascuna vela e $15000 \div 20000$ celle sulla superficie dell'albero;
- a fronte della relativa riduzione del volume del dominio dovuta alla scalatura lineare è stato necessario lavorare sui parametri di densità della mesh di volume al fine di ottenere il medesimo numero di celle del modello validato ($700\ 000 \div 900\ 000$).

Nuove condizioni sulla velocità in ingresso

Per essere applicato alle vele di questo studio, che hanno il grasso rivolto dalla parte opposta rispetto alle vele di Yoo e Kim, il dominio del modello Star è stato specchiato rispetto al piano individuato dall'asse della barca e dalla direzione verticale (piano x - z). Il nuovo campo di velocità in ingresso sarà $[-|v_{A\parallel}(z)|, |v_{A\perp}(z)|, 0]$ dove le funzioni di velocità $v_{A\parallel}(z)$ e $v_{A\perp}(z)$ definiscono un gradiente di vento in intensità e verso, come viene spiegato nel paragrafo che segue (si veda la figura 3.10).

Gradiente di vento apparente

L'introduzione nelle analisi di un gradiente logaritmico (Kervin [29]) per il vento avvicina la condizione di velocità all'ingresso alla situazione reale che si sviluppa in mare, dove a causa dell'attrito con la superficie il vento reale è caratterizzato da un gradiente crescente di intensità nella direzione verticale.

Nelle simulazioni effettuate per fornire un gradiente di vento verosimile ci si è basati su una rilevazione eseguita dal team in allenamento. Dalle

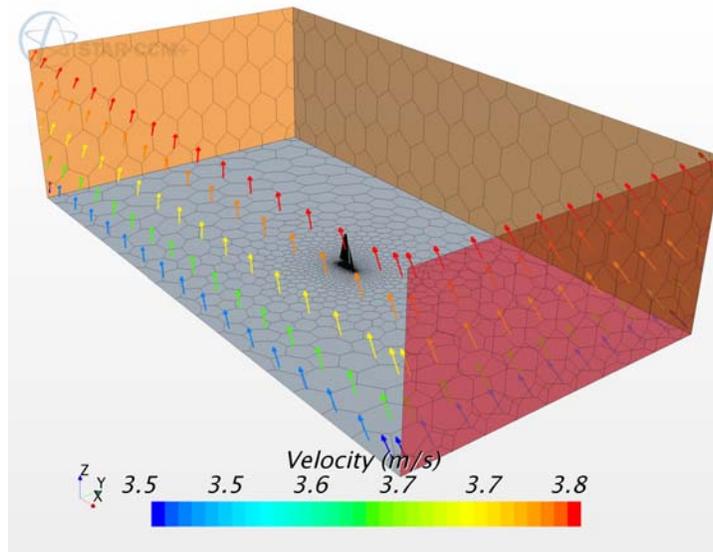


Figura 3.10: Dominio utilizzato nelle analisi finali. É visibile il gradiente di vento apparente imposto alle superfici di ingresso del flusso.

rilevazioni, prese ad una quota di 2,5 m, è possibile costruire il triangolo delle velocità in figura 3.11 e stimare quindi la velocità della barca. Nota la velocità della barca, componendo tale vettore con i vettori che rappresentano il profilo di vento reale si otterrà il profilo di vento apparente che investe la barca.

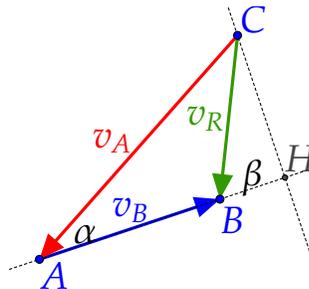


Figura 3.11: Triangolo di velocità nel caso di andatura in bolina.

I dati rilevati a quota 2,5 m sono:

- intensità del vento reale, v_R ;
- intensità del vento apparente, v_A ;
- inclinazione del flusso apparente rispetto all'asse della barca, α .

L'angolo β è l'angolo del vento reale rispetto all'asse della barca. β a 2,5 m si può determinare con:

$$v_A \cdot \sin(\alpha) = v_R \cdot \sin(\beta) \Rightarrow \beta = \arcsin\left(\frac{v_A \cdot \sin(\alpha)}{v_R}\right) \quad (3.2)$$

e quindi, per il modulo di v_B :

$$v_B = v_A \cdot \cos(\alpha) - v_R \cdot \cos(\beta) \quad (3.3)$$

Il profilo di vento reale è (Kervin [29]):

$$v_R(z) = 0,1086 \cdot c_{10m} \cdot \ln(1000 \cdot z) \quad (3.4)$$

con c_{10m} vento reale di riferimento a quota 10 m. Nel nostro caso la rilevazione di vento reale è stata effettuata ad una quota di 2,5 m ma con la relazione che lega c_{10m} e $v_R(2,5)$

$$v_R(2,5) = 0,1086 \cdot c_{10m} \cdot \ln(1000 \cdot 2,5) \quad (3.5)$$

e definendo $c_{2,5m} := v_R(2,5)$

$$c_{10m} = \frac{c_{2,5m}}{0,1086 \cdot \ln(1000 \cdot 2,5)} \quad (3.6)$$

possiamo ricavare la formula di Kervin nel caso di un valore di riferimento rilevato a 2,5 m:

$$v_R(z) = 0,1278 \cdot c_{2,5m} \cdot \ln(1000 \cdot z) \quad (3.7)$$

Per il calcolo del profilo di vento apparente la procedura è simile a quella appena descritta ma in questo caso si tratta di risolvere triangoli di velocità a quota variabile.

In questo caso i parametri noti sono:

- velocità della barca v_B , costante;
- inclinazione della corrente reale rispetto all'asse della barca, β , costante;
- intensità della corrente reale $v_R(z)$, variabile lungo z .

Si possono quindi calcolare le componenti, parallela e perpendicolare al vettore velocità della barca, del vettore di vento apparente e di conseguenza l'angolo α .

La componente parallela a v_B risulta:

$$v_{A\parallel}(z) = AH(z) = v_B + v_R(z) \cdot \cos(\beta) \quad (3.8)$$

mentre la componente perpendicolare a v_B è:

$$v_{A\perp}(z) = CH(z) = v_R(z) \cdot \sin(\beta) \quad (3.9)$$

sostituendo le singole funzioni:

$$v_{A\parallel}(z) = v_A|_{2,5m} \cdot \cos \alpha|_{2,5m} + c_{2,5m}(0,1278 \cdot \ln(1000 \cdot z) - 1) \cdot \cos \beta \quad (3.10)$$

$$v_{A\perp}(z) = 0,1278 \cdot c_{2,5m} \cdot \ln(1000 \cdot z) \cdot \sin \beta \quad (3.11)$$

Si può calcolare l'angolo α come:

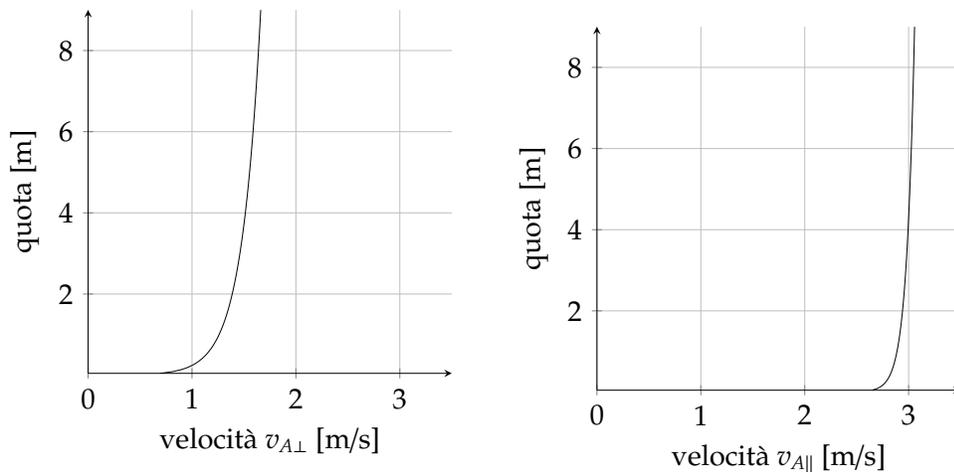
$$\tan \alpha(z) = \frac{v_{A\perp}(z)}{v_{A\parallel}(z)} \Rightarrow \alpha(z) = \arctan \frac{v_{A\perp}(z)}{v_{A\parallel}(z)} \quad (3.12)$$

I dati utilizzati per stimare il profilo di vento apparente che investe la barca in bolina sono stati ottenuti da rilevazioni effettuate in una sessione di allenamento tenutasi nella località di *Chioggia (VE)* il giorno 3 maggio 2015 fra le ore 15:00 e le ore 17:00 (si veda il rapporto interno al team Mètis Vela redatto da Feruglio). Ai fini del nostro lavoro non interessano le condizioni istantanee di navigazione ma delle condizioni "medie" esemplificative di una *bolina stretta*. Per questo motivo sono stati utilizzati solo i dati raccolti in istanti caratterizzati da questo tipo di andatura e sulla base di tali dati è stata fatta una media. Nella tabella 3.3 sono raccolte le rilevazioni effettuate e i valori scelti. In figura 3.12 sono rappresentate le componenti di velocità parallela e perpendicolare all'asse della barca del vettore di vento apparente.

Con la stessa procedura, e ipotizzando valori verosimili che non sono stati effettivamente rilevati sul campo di regata, è stato calcolato il profilo di vento apparente al traverso.

Tabella 3.3: Condizioni di vento rilevate sul campo durante la percorrenza di bordi in bolina stretta.

Rilevazioni	$v_R _{2,5m}$ [m/s]	z [m]	$v_A _{2,5m}$ [m/s]	α [deg]
rilevazione 1 a	1,543	2,500	2,984	27,0
rilevazione 1 b	1,543	2,500	3,395	27,0
rilevazione 1 c	1,543	2,500	3,395	27,0
rilevazione 2 a	1,286	2,500	2,058	25,0
rilevazione 2 b	1,286	2,500	2,418	25,0
rilevazione 2 c	1,286	2,500	3,550	25,0
rilevazione 3 a	1,955	2,500	3,961	25,0
rilevazione 3 b	1,955	2,500	4,527	25,0
valori scelti	1,500	2,500	3,500	25,0



(a) Componente perpendicolare alla barca della velocità apparente.

(b) Componente parallela alla barca della velocità apparente.

Figura 3.12: Componenti del gradiente di vento apparente

3.4 Precisione numerica dei dati presentati

In coda a questo capitolo si ritiene opportuno spendere alcune parole circa la precisione dei risultati mostrati.

La maggior parte delle simulazioni condotte converge portandosi a valori dei residui sempre inferiori a $1E-4$. I residui che abbiamo valutato si riferiscono a:

- l'equazione di continuità;
- l'energia cinetica turbolenta;
- il turbulent dissipation rate;
- le equazioni di momento attorno ai tre assi.

Per valori dei residui di questo ordine di grandezza il software fornisce un risultato estremamente accurato sulle grandezze fisiche rilevate. Nello specifico i coefficienti C_M e C_H (definiti in 2.2) sono stati calcolati con una precisione sufficiente ad assicurare la correttezza della quarta cifra decimale dopo la virgola, una precisione che va ben oltre quello che sarebbe possibile rilevare sperimentalmente con qualunque strumento.

Per alcune simulazioni ad angoli di attacco più elevati, tipicamente per le simulazioni delle configurazioni che presentano rande con apertura oltre i +7 gradi in bolina e aperture a -50 gradi o -37,5 gradi al traverso, non è stato possibile raggiungere questi livelli di accuratezza. I valori presentati nelle tabelle sono stati quindi calcolati come media delle ultime 500 iterazioni una volta che fosse stata raggiunta la stabilità. Nelle ultime 500

iterazioni e' stata dunque rilevata l'ampiezza dell'oscillazione del valore calcolato e si è trovato che anche nei casi peggiori questa ampiezza non supera il 4% del valore medio calcolato.

Capitolo 4

Risultati e discussioni

Il modello descritto nel capitolo 3 è stato applicato ai tre piani velici oggetto dello studio. Ha permesso di ricavare i coefficienti di avanzamento e di scarroccio in varie configurazioni randa-fiocco. Con i coefficienti ricavati sono state costruite le curve polari dei tre piani velici in due diverse condizioni di navigazione. Sono quindi state costruite le curve di efficienza dei tre piani velici nelle due condizioni di navigazione. Sulla base di questi dati è stato possibile confrontare i piani velici e indicare quale offre le prestazioni migliori.

Successivamente, nella configurazione di massima efficienza, è stata presentata la distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie dei piani velici e nell'intorno di questi.

Per meglio comprendere l'andamento del flusso d'aria intorno ai piani velici e l'interazione randa-fiocco sono state evidenziate le linee di corrente nel piano orizzontale, le zone di ricircolo e le linee intorno alle quali si sviluppano le principali zone di turbolenza.

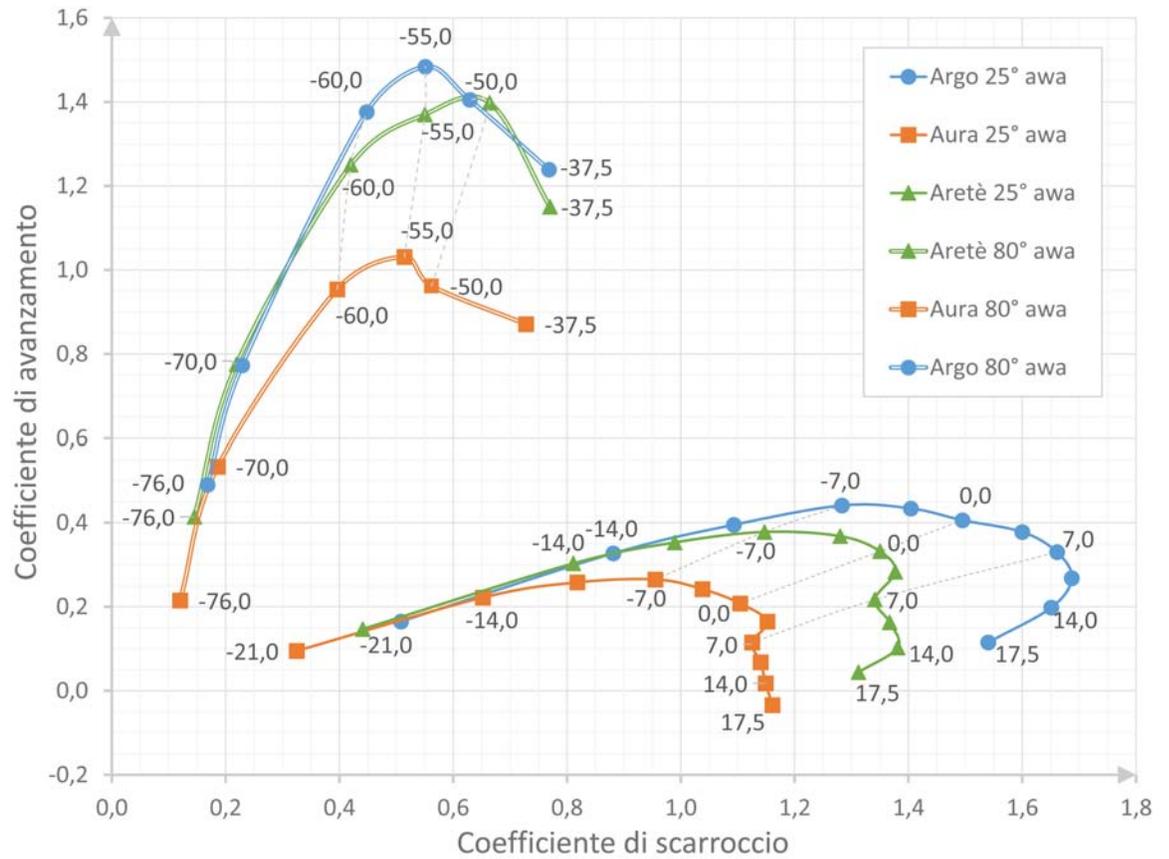
Infine abbiamo calcolato la forza generata da ciascun piano velico al variare della quota, la forza totale generata dai piani velici e dalle singole vele e valutato la distribuzione del coefficiente di forza lungo la direzione z .

4.1 Curve polari e curve di efficienza

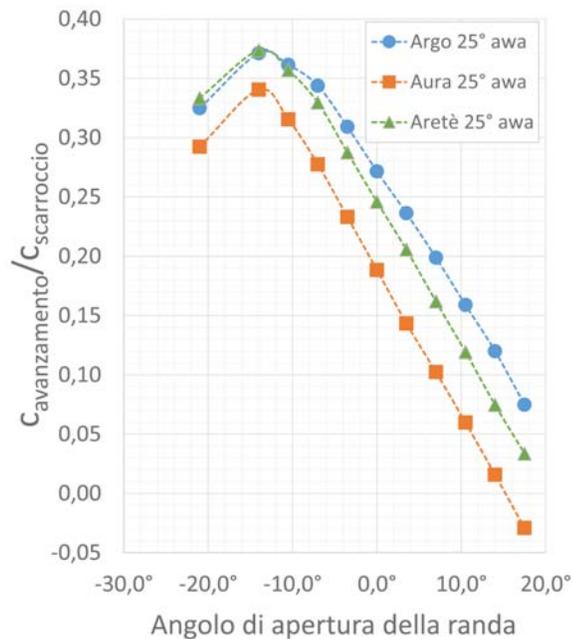
Le curve polari dei piani velici, rappresentate nella figura 4.1a, sono state costruite congiungendo i punti individuati sul grafico dal valore di C_M in ordinata e dal valore di C_H in ascissa (coefficienti definiti in 2.2) per ciascun angolo di apertura della randa studiato. Questa modalità di rappresentazione è stata ricalcata da Fossati che in [19] ottiene grafici che presentano andamenti molto simili a quelli ottenuti in questo studio.

Le tabelle B.2 e B.3 in appendice riportano, per bolina e traverso rispettivamente, i valori ottenuti con il modello CFD dei coefficienti di scarroccio

(a) Curve polari dei piani velici



(b) Curve di efficienza in bolina



(c) Curve di efficienza al traverso

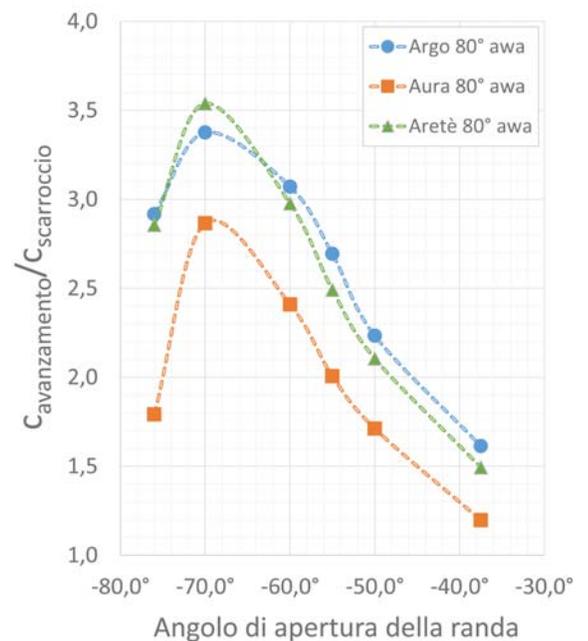


Figura 4.1: Curve polari e curve di efficienza dei tre piani velici analizzati, nelle due andature.

e avanzamento per ciascuna delle configurazioni studiate.

Con i rapporti C_M/C_H , raccolti nell'ultima colonna delle tabelle B.2 e B.3, è stato possibile costruire i grafici delle figure 4.1b e 4.1c.

Queste curve possono essere considerate *curve di efficienza del piano velico*.

Le informazioni più immediate che è possibile ricavare dalle curve polari e dalle curve di efficienza sono elencate di seguito. Le motivazioni accennate in questa sezione vengono poi approfondite con l'ausilio delle distribuzioni di pressione, delle linee di corrente e delle forze sul piano velico.

A. Il piano velico 1 (Argo) si presenta, nel complesso, migliore dei piani velici 2 (Areté) e 3 (Aura). Il piano velico 1, in blu nei grafici, presenta infatti il più alto coefficiente di avanzamento, a -7° di apertura della randa. Di per se quest'unica informazione non è sufficiente a stabilire quale fra i piani velici sia il migliore: il piano 1 presenta infatti anche il più alto coefficiente di scarroccio, che si colloca intorno ai $+10,5^\circ$ di apertura della randa.

Il confronto può essere completato con l'ausilio dei grafici di efficienza. Vediamo che per angoli di apertura della randa da $-3,5^\circ$ a $+17,5^\circ$, ovvero nella zona della curva polare dove il coefficiente di scarroccio è il più alto registrato, il piano velico 1 mantiene comunque valori di efficienza superiore rispetto agli altri piani.

Le migliori prestazioni del piano 1 sono da attribuire principalmente a tre fattori.

- Il primo fattore è la forma dei profili che costituiscono le vele. In particolare nella tabella 2.3 si è evidenziato come il piano velico 1 presenti un grasso (parametro f/C) sensibilmente superiore a quello degli altri piani. Grazie al profilo più incurvato questo piano velico produce una maggiore forza di portanza ed è quindi caratterizzato da coefficienti di avanzamento e scarroccio maggiori rispetto ai piani 2 e 3.
- Il secondo fattore che influisce positivamente sulle prestazioni del piano 1 è lo svergolamento delle vele (riportato in tabella 2.2). Sia la randa 1 che il fiocco 1 risultano più svergolati delle altre vele o comunque risultano avere uno svergolamento *più adatto* ad affrontare il gradiente di vento che si genera in questa condizione.
- Il terzo fattore riguarda l'allungamento totale dei piani velici. Il piano velico 1 ha, seppur di poco, l'allungamento maggiore

e questo contribuisce in parte al miglioramento dell'efficienza. Piani velici più allungati risentono meno del calo delle prestazioni dovuto all'influenza dei vortici di estremità.

- B. Il piano velico 3 presenta prestazioni notevolmente inferiori agli altri due piani.

Le scarse prestazioni del piano velico 3 sono da attribuirsi al cattivo funzionamento del fiocco.

Il fiocco 3 infatti ha una forma del profilo quasi per nulla incurvata.

Il fiocco 3 si comporta di fatto come una lastra piana che investita da un flusso con angolo di attacco eccessivo va in stallo al bordo d'attacco (come verrà evidenziato in seguito).

- C. In generale dalle curve polari e dalle curve di efficienza possiamo ricavare l'informazione relativa agli angoli di apertura della randa che producono il massimo valore del coefficiente di avanzamento e la massima efficienza.

Per tutti i piani velici il massimo avanzamento in bolina stretta si ottiene a -7° di apertura della randa e al traverso si ottiene a -55° di apertura della randa per i piani 1 e 3 e a -50° di apertura della randa per il piano 2.

L'angolo di apertura della randa che assicura massima efficienza in bolina stretta è di -14° per tutti i piani velici e di -70° in andatura al traverso.

- D. Un'altra importante osservazione riguarda il confronto diretto fra i piani velici 1 e 2. Man mano che la randa viene aperta, da angoli positivi ad angoli via via più negativi, si osserva che la curva di efficienza del piano velico 2 tende ad avvicinare (fino addirittura a superare, nel punto di massima efficienza) la curva di efficienza del piano velico 1, questo sia in bolina che al traverso. In sostanza quando i piani velici 1 e 2 lavorano in bolina ad aperture prossime ai -10° ÷ -15° diventano praticamente equivalenti in termini di efficienza e di coefficienti di avanzamento e scarroccio. Questa condizione è caratterizzata da un flusso estremamente ordinato intorno al fiocco e da una piccola zona di ricircolo stabile e limitata alla parte sopravento della randa appena a valle dell'albero (come verrà evidenziato nel prossimo paragrafo).

Al traverso è ancora più evidente un largo miglioramento delle prestazioni del piano velico 2, che supera il piano velico 1 in un range di angoli di apertura piuttosto ampio e significativo che va da -63° a -75° .

Per giustificare questo *recupero di efficienza* del piano velico 2 sarebbero opportune ulteriori analisi, tuttavia è bene osservare che l'andamento dei grafici in questa zona si basa sulle rilevazioni eseguite con aperture di -70° e -76° . Tali rilevazioni, si vede bene nel grafico 4.1a, presentano valori del coefficiente di avanzamento e del coefficiente di scarroccio estremamente vicini e di modulo molto piccolo. In questo caso una piccola variazione dei coefficienti può tradursi in un'importante variazione del rapporto di efficienza E^* . Nel resto della curva le prestazioni del piano velico 1 tornano ad essere nettamente superiori dal momento che per angoli di -55° e $-37,5^\circ$ sviluppa un coefficiente di avanzamento superiore a quello del piano 2 a fronte del medesimo coefficiente di scarroccio e per angolo pari a -50° sviluppa a parità di coefficiente di avanzamento un coefficiente di scarroccio inferiore a quello del piano 2.

- E. Sempre concentrando il confronto fra i piani 1 e 2 possiamo vedere che la curva del piano velico 2 nella zona di aperture comprese fra $0^\circ \div 17,5^\circ$ presenta un andamento molto diverso rispetto alla curva del piano 1.

Dall'analisi delle simulazioni effettuate è stato possibile vedere che a partire da 0° di apertura, muovendosi sulla curva verso destra quindi verso angoli via via più positivi, le vele del piano 1 iniziano a presentare un distacco dello strato limite (con conseguente turbolenza) in prossimità del bordo di uscita della randa sulla superficie sottovento. Inizialmente ($0^\circ \div 7^\circ$) la turbolenza riguarda solo la zona superiore della superficie della randa (compresa fra il 50% e il 100% dell'altezza della randa), poi si estende all'intera superficie sottovento. Il fiocco lavora sempre senza distacco dello strato limite.

Il piano 2 si comporta in modo analogo ma intorno a $7^\circ \div 10,5^\circ$ il distacco dello strato limite e la turbolenza interessano anche la parte superiore della superficie sottovento del fiocco (indicativamente la zona compresa fra il 60% e il 100% dell'altezza del fiocco). Questo *malfunzionamento* del fiocco si traduce, con ogni probabilità, in una riduzione della forza totale generata dal fiocco che sembra manifestarsi principalmente in una riduzione della componente di scarroccio.

Tuttavia questo particolare fenomeno ha effetti positivi sull'efficienza del piano velico 2 (che ricordiamo essere $E^* = C_M/C_H$) dal momento che mantiene pressoché costante il coefficiente di scarroccio in una porzione della curva dove altrimenti sarebbe crescente.

- F. Infine è opportuno osservare che il piano velico 3 (Aura) presenta un coefficiente di avanzamento negativo per angolo di apertura della randa pari a $+17,5^\circ$. In questa condizione il piano velico anziché

sviluppare una forza propulsiva si oppone all'avanzamento della barca con una forza frenante.

Un funzionamento di questo tipo è dovuto ad un aumento considerevole della forza di resistenza del piano velico, ancora una volta causato dallo scarso grasso del piano 3, la cui randa si comporta come una piastra sottile investita da un flusso ad alto angolo di attacco producendo una forte turbolenza.

4.2 Distribuzione dei parametri locali

Per l'analisi dei risultati relativi ai parametri locali la configurazione rappresentata, per i tre piani velici, è sempre quella di massima efficienza: -14 gradi di apertura della randa in bolina e -70 gradi di apertura della randa al traverso. Ci si soffermerà principalmente sui risultati relativi alle analisi in bolina stretta, accennando solo brevemente laddove necessario al caso al traverso, perché è in bolina che è massima l'interazione fra le due vele e quindi si esprimono le problematiche tipiche di un piano velico composto da randa e fiocco.

Le figure ottenute dalle analisi al traverso sono consultabili all'appendice C.

Distribuzione globale del coefficiente di pressione

Nelle figure 4.2 e 4.3 sono rappresentate le distribuzioni dei coefficienti di pressione sui piani velici analizzati in bolina (per il traverso si vedano le figure C.1 e C.2 in appendice C). Le figure delle pagine di sinistra riportano i tre piani velici rappresentando le superfici sopravento, interessate da coefficienti di pressione positivi. Le figure delle pagine di destra riportano i tre piani velici rappresentando le superfici in depressione.

Il coefficiente di pressione è definito come:

$$C_p = \frac{p - p_a}{\frac{1}{2}\rho_a v_a^2}$$

Il coefficiente di pressione visualizzato è normalizzato all'unità, ovvero sono unitari i valori di riferimento di velocità ($v_a = 1m/s$) e densità ($\rho = 1kg/m^3$). Il valore p è la pressione statica locale e il valore p_a è la pressione atmosferica standard al livello del mare.

La rappresentazione della distribuzione del coefficiente di pressione sulle superfici sottovento e sopravento permettono di valutare quanto segue.

- A. Riferendosi alle distribuzioni del coefficiente di pressione ottenute in bolina (figure 4.2 e 4.3) si presti particolare attenzione alla corrispondenza fra superficie sopravento e superficie sottovento di ciascun piano velico. È possibile osservare come lavorino i fiocchi 1 (Argo) e 2 (Aretè), che riescono a sviluppare un gradiente di pressione considerevolmente superiore a quello sviluppato dal fiocco 3 (Aura). Anche in questo caso la causa è da ricercare nel fatto che il fiocco 3 lavora in condizioni di stallo mentre i fiocchi 1 e 2 si comportano

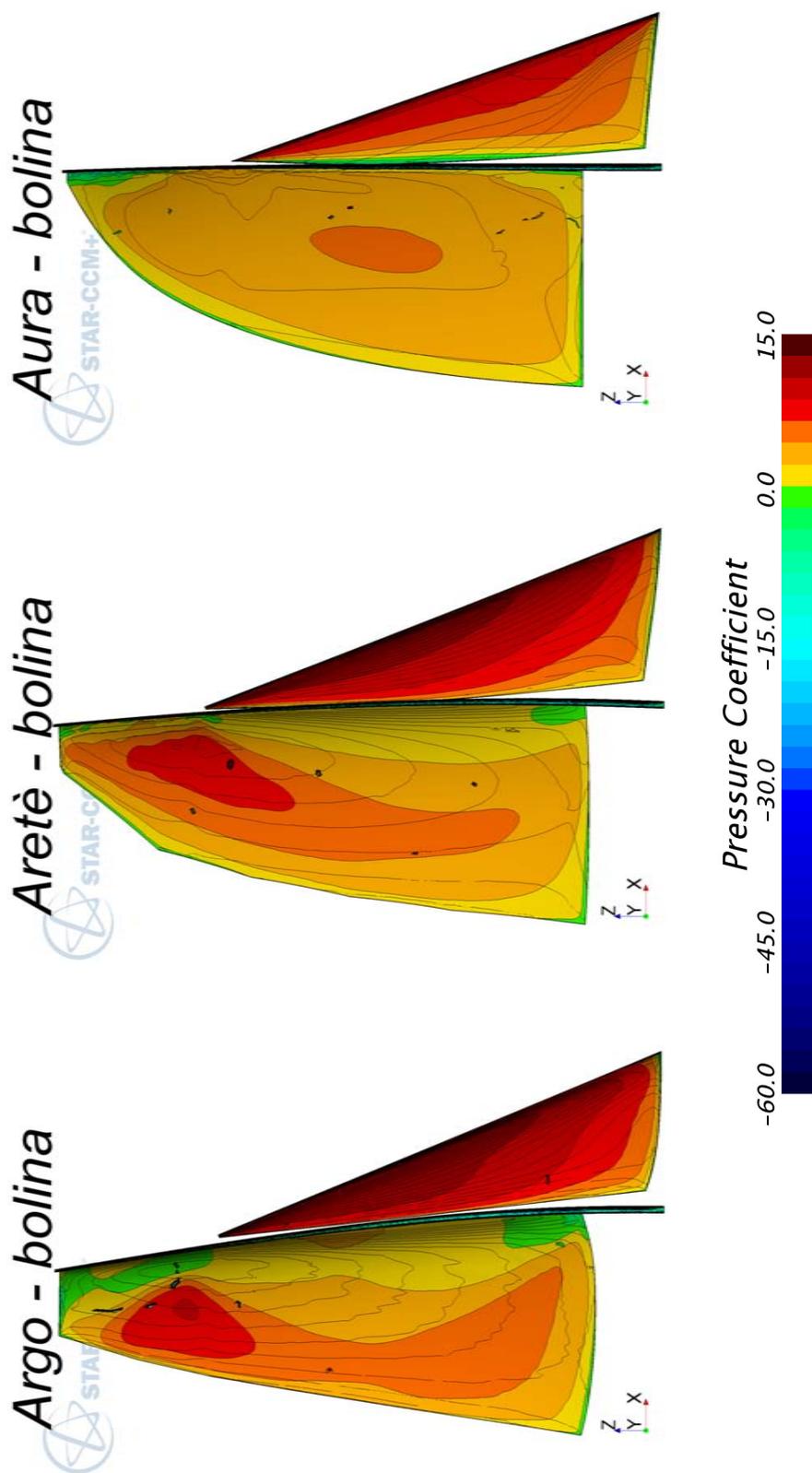


Figura 4.2: Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie sopravento dei piani velici Argo, Aretè, Aura. Angolo apertura randa: -14 gradi.

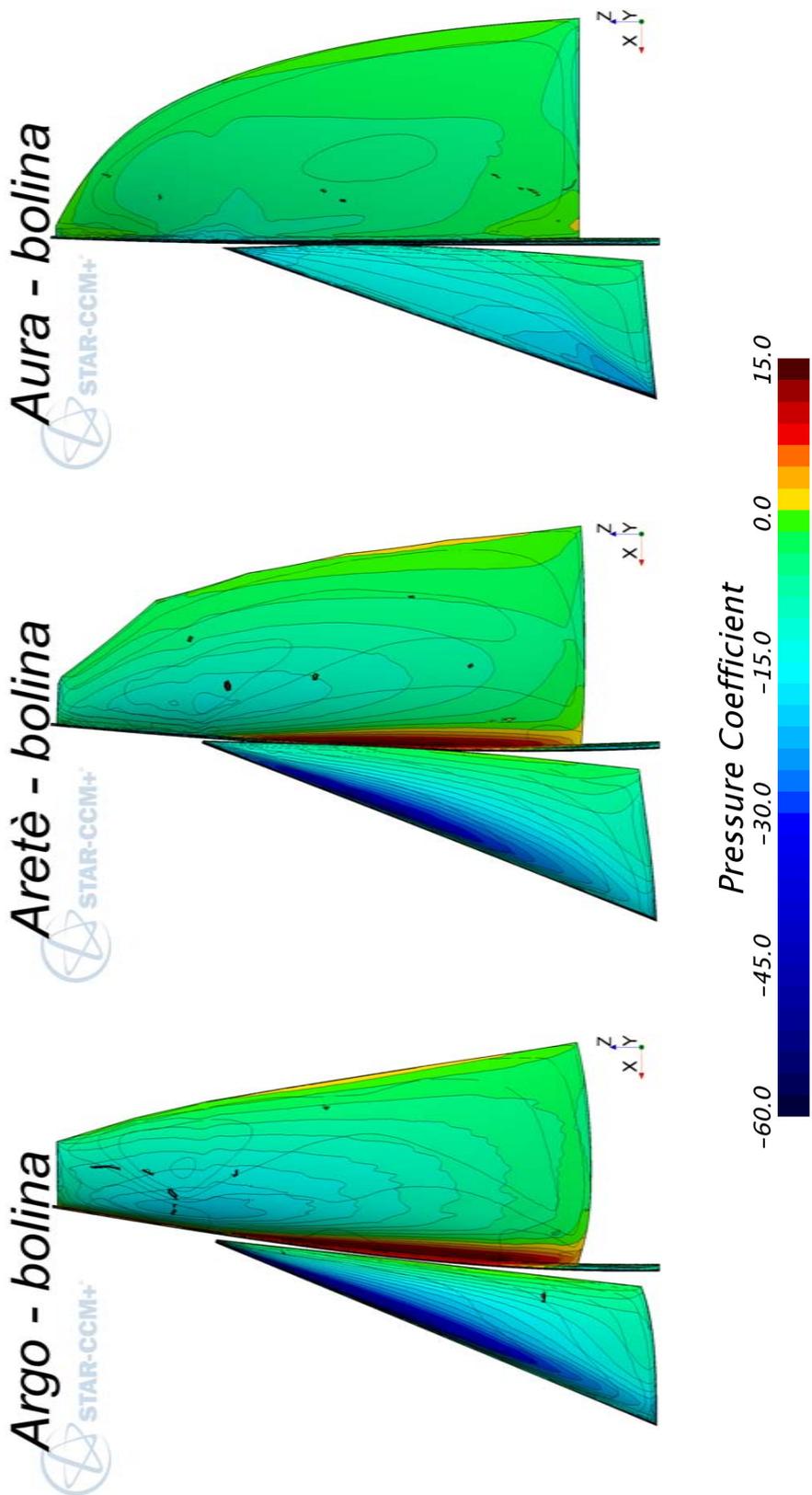


Figura 4.3: Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie sottovento dei piani velici Argo, Aretè, Aura. Angolo apertura randa: -14 gradi.

come un classico profilo sottile e incurvato che lavora in regime prevalentemente laminare.

La conseguenza più immediata per i piani 1 e 2 è, come era lecito aspettarsi, quella di sviluppare un maggior coefficiente di lift, che si traduce in più alti coefficienti di avanzamento e di scarroccio come mostrato dalle curve polari nella figura 4.1.

- B. Si osservi anche come sul fiocco del piano 3 la depressione che si crea all'estradosso non presenti particolari picchi e diminuisca lentamente spostandosi verso il trailing edge. Nei fiocchi 1 e 2 invece la depressione al fiocco presenta un picco importante nella zona vicina al bordo di ingresso.

All'intradosso la sovrappressione sul fiocco 3 cala, spostandosi dall'ingresso verso l'uscita della vela, in modo molto più rapido di quanto non faccia nei fiocchi 1 e 2.

Questo comportamento dei fiocchi 1 e 2 è mostrato anche da Larsson e Eliasson [30] ed è un effetto del funzionamento accoppiato randa-fiocco in condizioni ottimali. La figura 4.4 mostra il profilo di pressione su randa e fiocco, sia considerando il comportamento di ciascuna vela presa singolarmente, sia considerando l'accoppiamento.

La motivazione di una produzione di depressione di questo tipo risiede nella particolare forma del profilo ma anche nell'azione della randa, come si vedrà in seguito.

- C. Anche la distribuzione di pressioni sulle rande 1 e 2 si può mettere in relazione con quanto mostrato nella figura 4.4. In figura si vede che all'estradosso della randa la presenza del fiocco produce un'importante riduzione della depressione appena a valle dell'albero (infatti nel caso di armo con sola randa, pur in presenza di un albero, in questa zona la depressione è ben maggiore), poi la depressione aumenta nelle zone centrali per calare nuovamente al bordo d'uscita. Le rande 1 e 2 seguono piuttosto bene questo andamento, mentre la randa 3 presenta una depressione pressochè costante.
- D. Sulla parte superiore della randa, dove questa non è più preceduta dal fiocco, il comportamento del piano velico si avvicina a quello di una vela singola (che si vede ancora in figura 4.4), con la depressione massima sulla parte superiore della randa che si sposta verso l'albero.

Oltre alle motivazioni che riguardano la forma dei profili, le osservazioni fatte a proposito dei piani 1 e 2 trovano spiegazione nell'effetto di upwash della corrente che si genera in presenza di un piano velico composto da randa e fiocco. Il flusso passante fra strallo e albero risulta

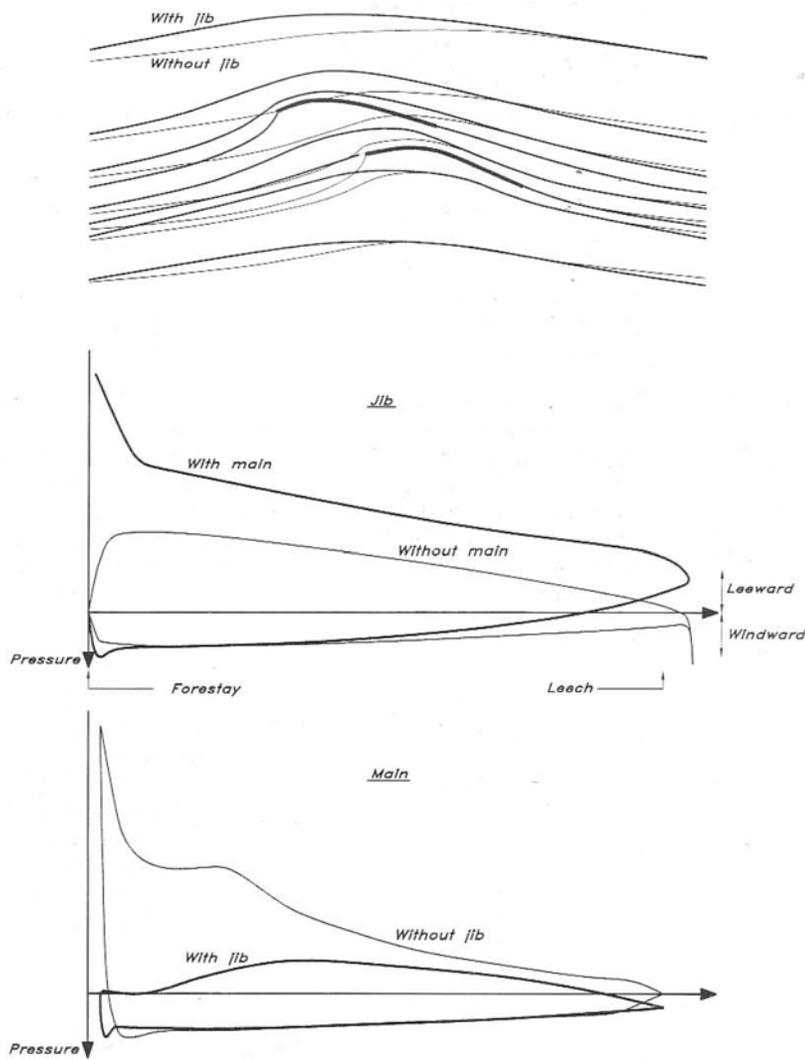


Figura 4.4: Flusso e distribuzione della pressione attorno ad una combinazione randa-fiocco. Da Larsson e Eliasson [30].

ridotto e viene deviato nella zona sottovento al fiocco. Di conseguenza diminuisce la pressione all'estradosso del fiocco, aumenta la velocità del flusso, aumenta l'efficienza e si riduce la possibilità di stallo del fiocco (Fossati [19, pp. 206-207]). Ulteriore analisi dell'effetto di upwash verrà fatta nel prosieguo osservando le linee di corrente.

Distribuzione locale del coefficiente di pressione

Nelle figure 4.5, 4.6, 4.7 sono rappresentate le distribuzioni del coefficiente di pressione per varie sezioni delle vele a differenti quote. Ciascuna figura è composta da cinque sezioni orizzontali del piano velico che, dal basso verso l'alto, presentano la distribuzione del coefficiente di pressione alla quota corrispondente al 10%, al 25%, al 50%, al 75% e al 90% della randa. Le figure C.3, C.4, C.5 sono state ottenute per andatura al traverso e sono in appendice C.

In queste figure si può osservare ancora meglio quanto detto alla sezione precedente e si possono fare nuove osservazioni.

- A. Osservando queste figure è evidente che vi sia una grossa differenza di camber (grasso della vela) fra i profili del piano velico 3 (Aura) e quelli del piano 1 (Argo) e 2 (Aretè), differenza già messa in luce nel capitolo 2.2.

Assunto che le vele del piano 3 siano quasi assimilabili a lastre piane, una differenza di curvatura del profilo è osservabile anche fra le vele dei piani 1 e 2. In generale le vele del piano 1 presentano un camber maggiore rispetto a quelle del piano 2 e questa differenza si può osservare soprattutto nei profili alle quote più alte della randa. Questa differenza di curvatura è ciò che permette al piano 1 di sviluppare forze maggiori, una portanza maggiore, quindi maggiori forze di avanzamento e scarroccio.

Di contro un profilo più incurvato risente maggiormente della formazione di una bolla di bassa pressione all'intradosso della randa immediatamente a valle dell'albero. Per il piano 1 infatti si può osservare un abbassamento della sovrappressione sulle superfici sopravento della randa in prossimità dell'albero. La stessa cosa si verifica anche sul piano 2 ma in misura minore.

Questo fenomeno è descritto anche da Larsson e Eliasson [30]. Larsson e Eliasson mostrano, in figura 4.8, le possibili zone di separazione del flusso in presenza di una combinazione vela/albero.

La zona di bassa pressione all'intradosso delle rande è conseguenza della separazione del flusso che avviene sulla superficie dell'albero, separazione che a sua volta è conseguenza della forma dell'albero, assimilabile ad un cilindro.

Un cilindro investito da una corrente caratterizzata da bassi numeri

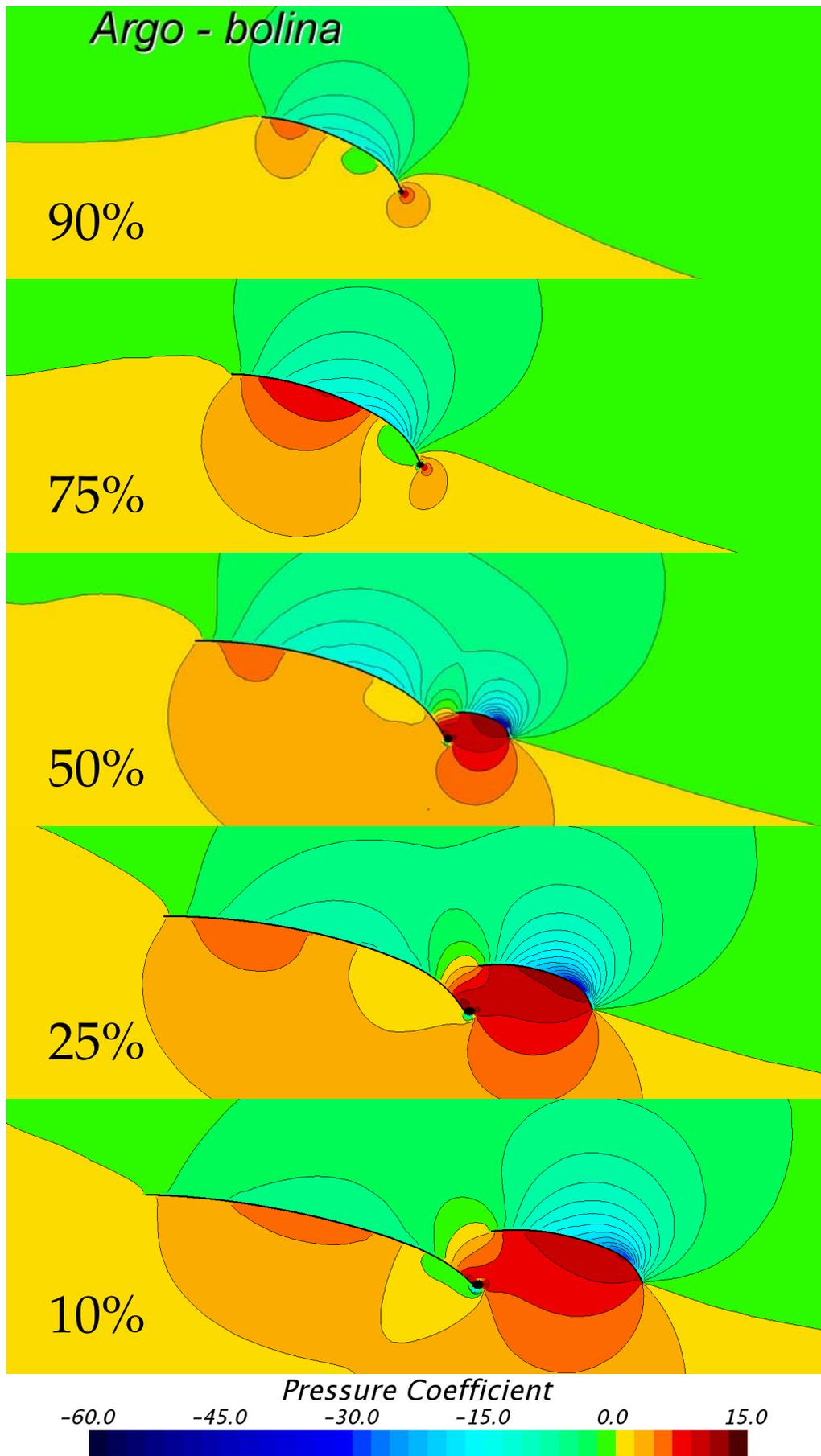


Fig. 4.5: Distribuzione del coefficiente di pressione attorno al piano velico 1 (Argo) al 10%, 25%, 50%, 75%, 90% dell'altezza della randa. Angolo apertura randa: -14 gradi.

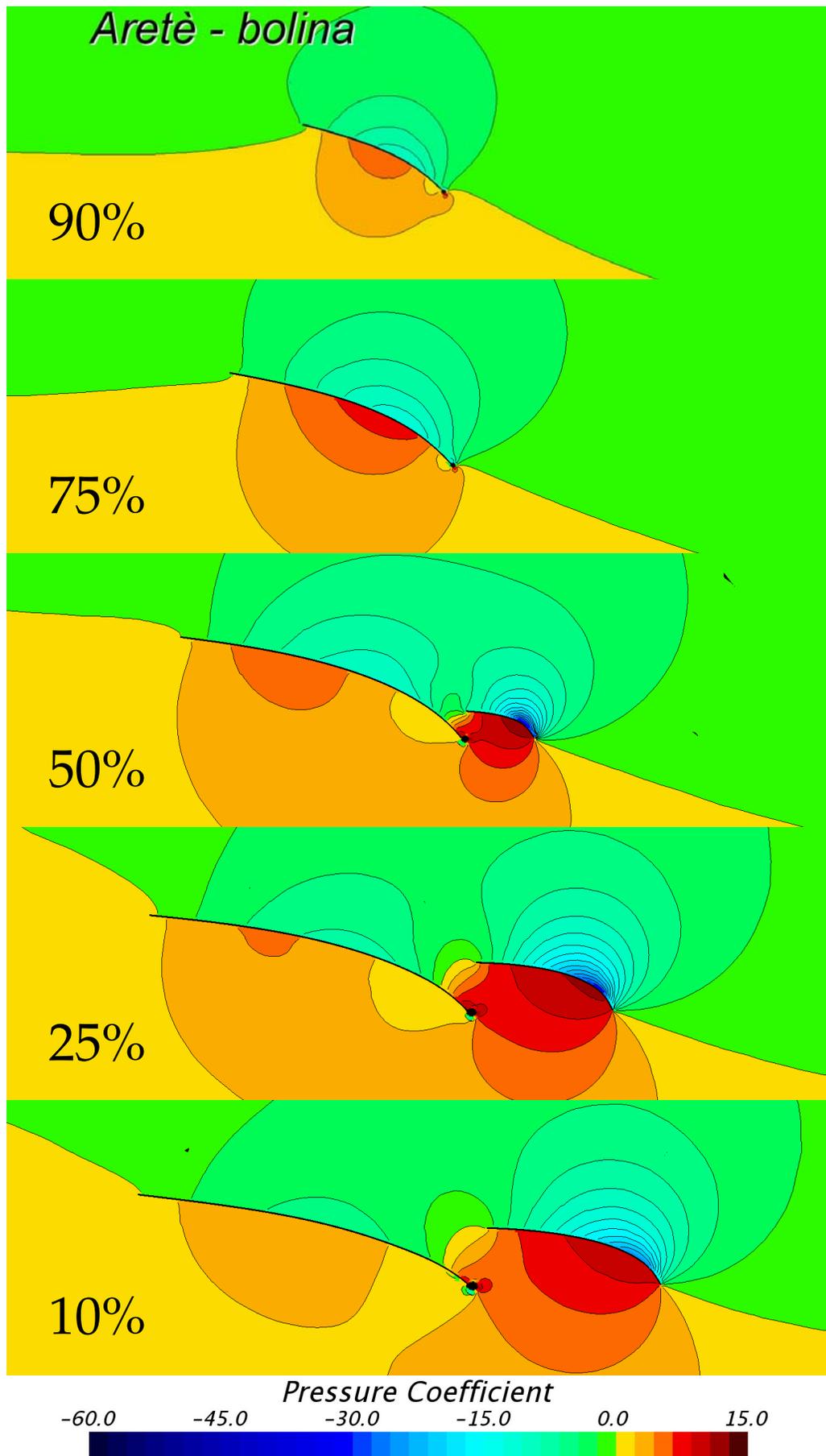


Fig. 4.6:
Distribuzione
del coefficiente
di pressione
attorno al
piano velico 2
(Aretè) al 10%,
25%, 50%, 75%,
90% dell'altezza
della randa.
Angolo apertura
randa: -14
gradi.

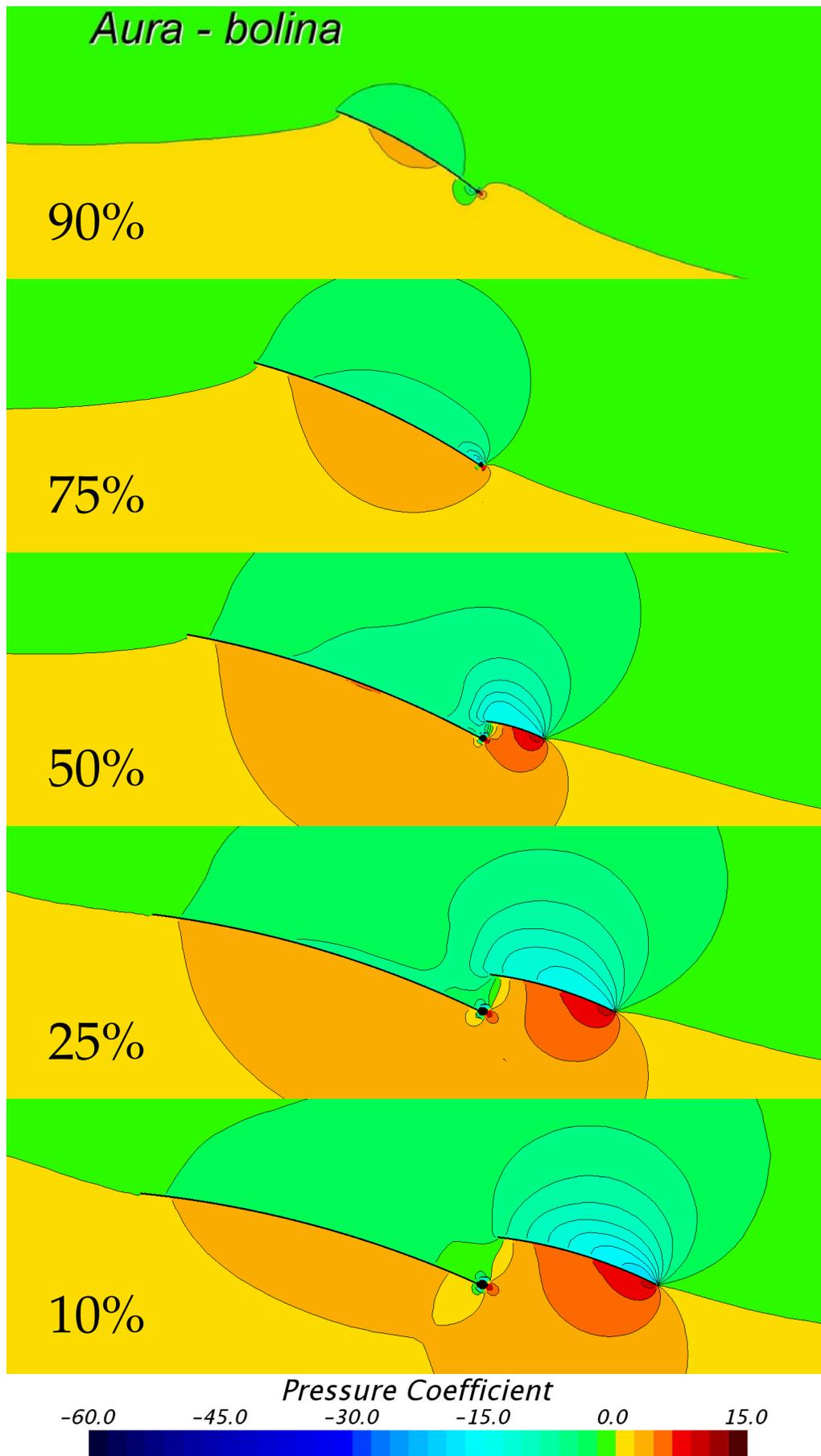


Fig. 4.7: Distribuzione del coefficiente di pressione attorno al piano velico 3 (Aura) al 10%, 25%, 50%, 75%, 90% dell'altezza della randa. Angolo apertura randa: -14 gradi.

di Reynolds vede il flusso separarsi prima ancora di diventare turbolento e prima di raggiungere il diametro massimo (Anderson [23, pp. 249-261]). Larsson e Eliasson indicano come possibile soluzione quella di aumentare la rugosità superficiale dell'albero forzando la formazione di uno strato turbolento e ritardando quindi la separazione del flusso, una soluzione simile a quella adottata sulla superficie delle palline da golf.

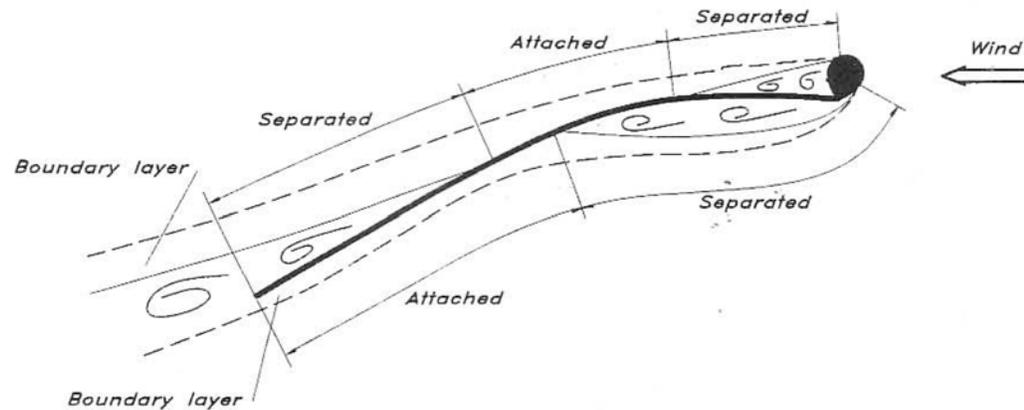
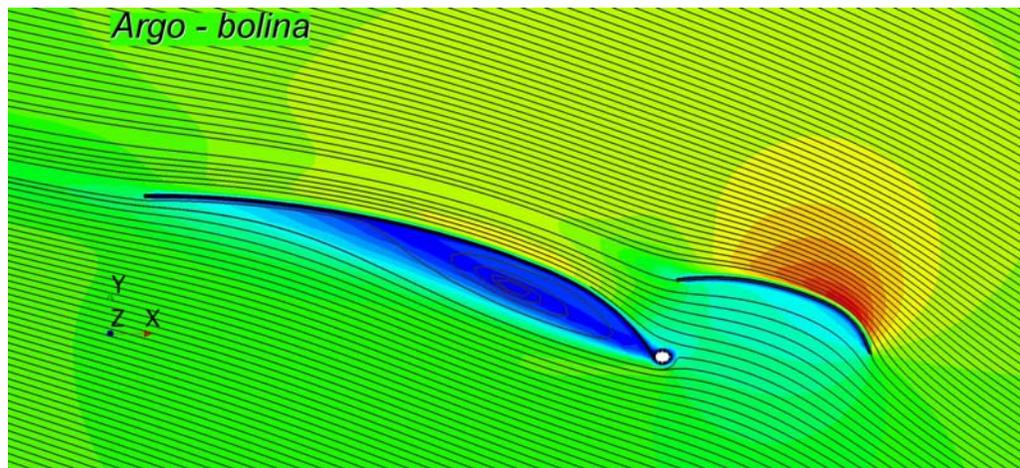


Figura 4.8: Flusso intorno ad una combinazione albero-vela. Da Larsson e Eliasson [30, p. 143].

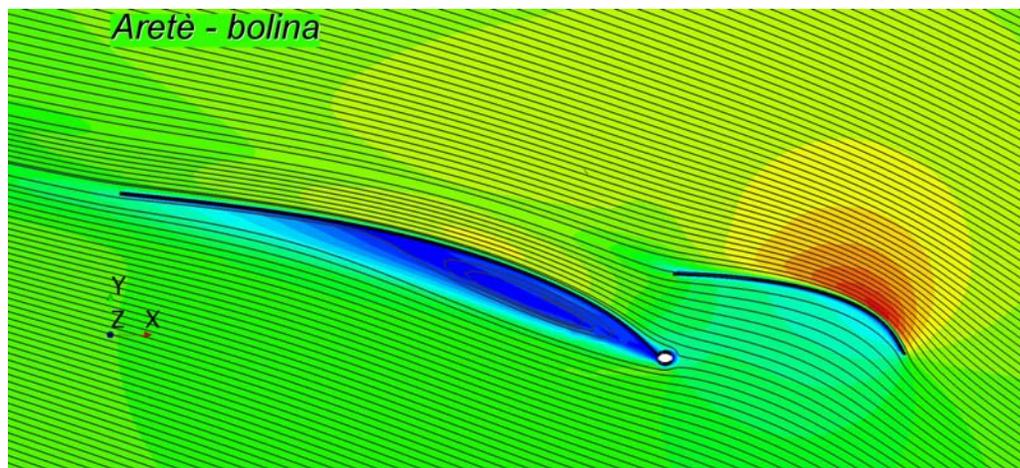
- B. Dalle figure 4.5, 4.6 e 4.7 si comprende la forte interazione che si crea fra fiocco e randa in una configurazione di bolina in cui l'intero piano velico si comporta di fatto come un'unica vela dalla geometria variabile che ben poco ha in comune con le due vele prese singolarmente. Il canale compreso fra fiocco e randa ad esempio è caratterizzato, almeno per i piani 1 e 2, da una tale sovrappressione da costringere il flusso incidente a preferire percorsi alternativi. Si tratta dell'origine dell'effetto upwash a cui si è già accennato, dove il flusso, costretto a deviare verso la zona sottovento è messo a disposizione del fiocco che, come si vedrà anche dall'osservazione dei grafici di forza, è una vela che lavora ad efficienze molto più alte rispetto alla randa (parte dello studio Yoo e Kim [16], parte dello studio Ciortan e Soares [17], e lo studio Viola e Flay [4] indagano nello specifico gli effetti reciproci che producono randa e fiocco).

Linee di corrente e campo di velocità

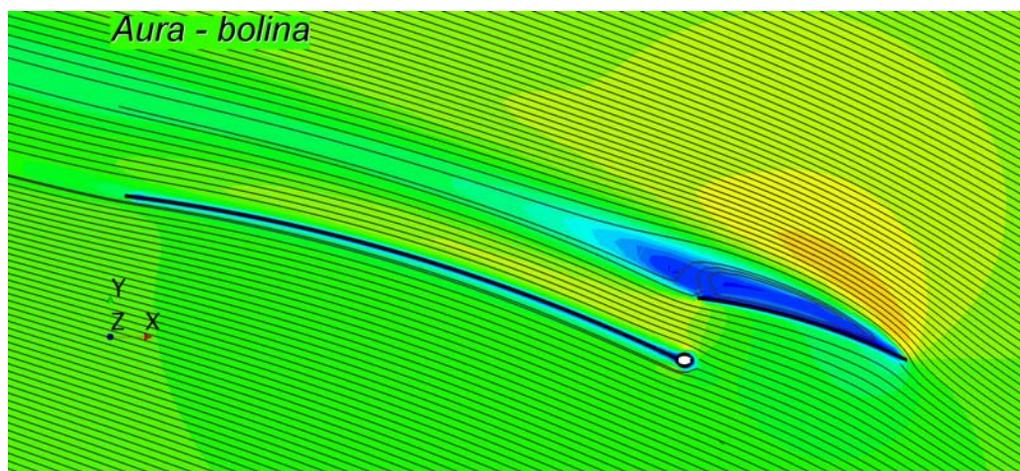
Nelle figure 4.9a, 4.9b, 4.9c (andatura in bolina) e C.6a, C.6b, C.6c (andatura al traverso in appendice) sono rappresentate le linee di corrente nell'intorno dei piani velici.



(a) Linee di corrente intorno al piano 1



(b) Linee di corrente intorno al piano 2



(c) Linee di corrente intorno al piano 3

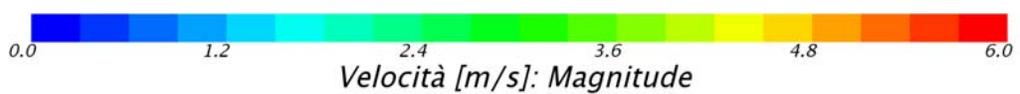


Figura 4.9: Distribuzione delle linee di corrente intorno ai piani velici in bolina al 25% della randa. Angolo apertura randa: -14 gradi.

Le linee di corrente sono rappresentate insieme al campo di velocità, il cui colore dipende dal modulo della velocità. Ciascuna figura riporta l'andamento del flusso ad una quota pari al 25% della randa.

- A. Dalle figure 4.9a, 4.9b e 4.9c è immediato osservare come il comportamento del flusso attorno al piano 3 (Aura) sia completamente diverso dagli altri due casi. Mentre per 1 (Argo) e 2 (Aretè) si forma una bolla di ricircolo sulla superficie sopravento della randa immediatamente a valle dell'albero, per Aura si forma una zona di ricircolo sottovento al fiocco.

Appare subito evidente che la principale causa dello stallo del fiocco di Aura sia dovuto ad una curvatura quasi assente del profilo che fa sì che, in prossimità del bordo di attacco, il fiocco 3 si trovi ad avere un assetto non adatto ad affrontare il flusso. Rispetto agli altri due fiocchi, a parità di angolo di apertura, il fiocco 3 viene investito da una corrente con angolo di attacco troppo elevato e stalla al bordo d'attacco.

- B. La condizione di eccessivo angolo di attacco che causa lo stallo del fiocco 3 non può che peggiorare salendo con la quota.

Questo perché il fiocco 3, oltre ad avere scarsissimo grasso, non presenta svergolamento. All'aumentare della quota l'angolo di incidenza del vento apparente sulle vele aumenta, ma non aumenta lo svergolamento del fiocco 3 che quindi viene a trovarsi a lavorare ad angoli di attacco sempre maggiori.

- C. Sempre in relazione all'effetto upwash prodotto si osservi che nelle figure 4.9a, 4.9b e 4.9c le linee di ristagno a monte delle rande 1 e 2 risultano effettivamente spostate verso il fiocco. Per il piano 3 questo effetto è completamente assente.

Fermo restando quanto detto sulla geometria del fiocco, è evidente che anche lo scarso grasso della randa 3 ha responsabilità nel pregiudicare le prestazioni del piano velico e lo si vede bene in questo caso, dove la randa 3 risulta praticamente inerte nel produrre l'upwash che si è ormai capito essere necessario ad un buon funzionamento del fiocco.

In condizioni ottimali invece le rande vengono investite da un flusso di vento con angolo di attacco inferiore a quello che vedrebbero nel caso fossero l'unica vela presente (si veda la figura 4.4, in alto) e il contrario accade per il fiocco.

In effetti i fiocchi 1 e 2 incontrano un flusso che a causa dell'upwash ha angolo d'attacco ancora maggiore di quello incidente sul fiocco 3 ma la loro particolare forma, caratterizzata da un maggiore grasso e una posizione dell'alzata massima più vicina al bordo d'ingresso,

gli fornisce sulla zona anteriore un'inclinazione adatta ad incontrare le linee di corrente senza andare in stallo.

Grazie a questo comportamento accoppiato randa-fiocco che devia le linee di corrente, i piani velici 1 e 2 risultano, rispetto al piano 3, in grado di *stringere maggiormente al vento*, ovvero di affrontare il vento con angoli di incidenza minori.

Le figure 4.10a, 4.10b e 4.10c per le analisi in bolina e le figure C.7a, C.7b e C.7c per le analisi al traverso in appendice rappresentano le scie di maggiore turbolenza generate dai piani velici. Sono state ottenute estraendo i *vortex core*, ovvero le linee che identificano gli assi attorno a cui ruota la corrente, ed evidenziandoli tramite alcune linee di corrente generate dallo stesso vortex core.

Con queste immagini si mettono bene in evidenza le zone di ricircolo, i vortici di estremità e i vortici al bordo di uscita delle vele. Seguono alcune osservazioni.

- A. Si vede come il piano velico 1 (Argo) sviluppi un importante vortice di estremità sul bordo superiore della randa e un vortice di intensità minore sul bordo inferiore. Il piano velico 2 (Aretè) invece sviluppa piccoli vortici di intensità inferiore a quelli del piano 1 ma ripartiti su gran parte della superficie della randa.

I vortici di estremità si formano in prossimità dei bordi superiore o inferiore della vela dove il flusso tende a spostarsi con alte accelerazioni dalla superficie in sovrappressione verso quella in depressione. In generale si ritiene (Lodigiani [22, fig. 9.23] e Larsson e Eliasson [30, p. 134]) che una vela a maggiore allungamento abbia, in andature in bolina, una migliore efficienza di una vela a basso allungamento in quanto la prima risente in misura minore della perdita di prestazioni dovuta alla presenza di vortici di estremità.

Tale aspetto può leggermente favorire il piano 1 rispetto al 2, sebbene si possa ritenere un effetto di secondaria importanza dal momento che l'allungamento del piano 1 è sì maggiore dell'allungamento del piano 2, ma in misura davvero ridotta: la randa 1 presenta allungamento pari a 2,90 contro 2,88 per la randa 2 e il fiocco della randa 1 presenta allungamento pari a 5,61 contro 5,34 per il fiocco 2.

- B. Nella parte centrale delle rande 1 e 2 sono visibili, sulla superficie sopravento, due importanti vortici.

Questi vortici si generano nelle zone di ricircolo già messe in luce nelle figure 4.9a e 4.9b dovute alla forte curvatura dei profili in combinazione con la presenza dell'albero che, sopravento, impedisce al flusso di mantenersi aderente alla randa.

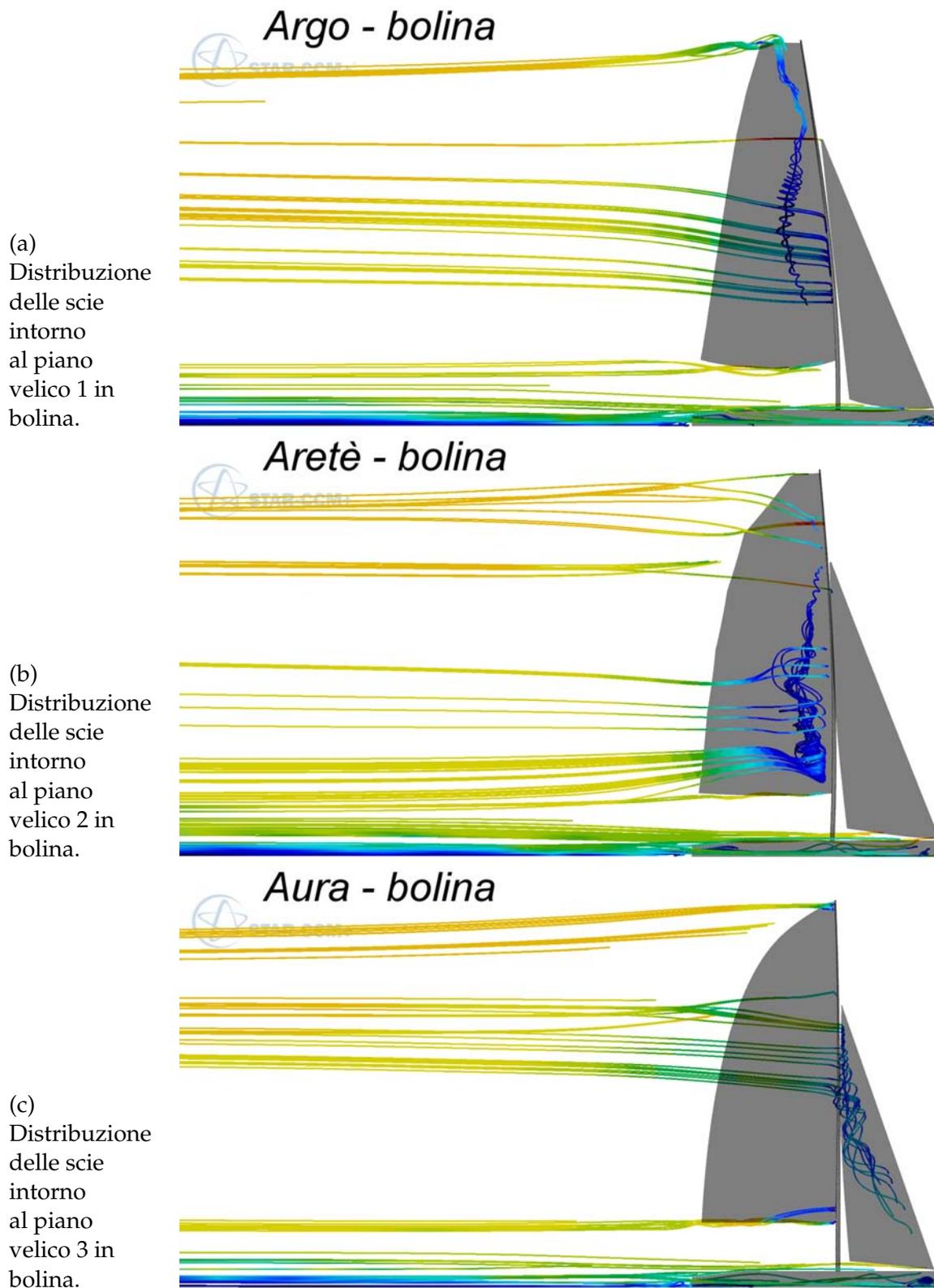


Figura 4.10: Distribuzione delle scie intorno ai piani velici in bolina. Angolo apertura randa: -14 gradi. Si noti che il vortice sul piano velico 3 è sul lato sottovento del fiocco.

- C. Infine, per le analisi in bolina, si può notare che il piano 3 (Aura), in conseguenza dei bassi differenziali di pressione che genera, non produce sulla randa vortici di particolare intensità ma è perfettamente evidente la turbolenza sulla superficie in depressione del fiocco prodotta dalla condizione di stallo.

Distribuzione delle componenti di forza

I grafici delle figure 4.11 e 4.12 per le analisi in bolina (e i grafici C.8 e C.9 per le analisi al traverso in appendice) rappresentano le forze di avanzamento e scarroccio che il piano velico produce a diverse quote.

Per ottenere questi valori è stato elaborato un *metodo delle strisce* che prevede di suddividere il piano velico in strisce di altezza pari a 10cm poste a diverse quote. Le quote scelte sono indicate come percentuali dell'altezza dell'inferitura della randa. La quota pari a -10% rappresenta la quota di una sezione che interseca solamente il fiocco che si estende per circa 60cm al di sotto del bordo inferiore della randa. Per ciascuna di queste strisce (di superficie approssimativa pari a $10cm \times L_{corda}$) è stata calcolata la forza di avanzamento e la forza di scarroccio. I valori così ottenuti sono stati riportati lungo l'asse delle ascisse, mentre in ordinata è riportata la quota corrispondente. Ogni figura presenta a sinistra il grafico della forza cumulativa associata a ciascuno dei piani velici, mentre a destra sono rappresentate le forze scomposte nelle quote associate a randa e fiocco.

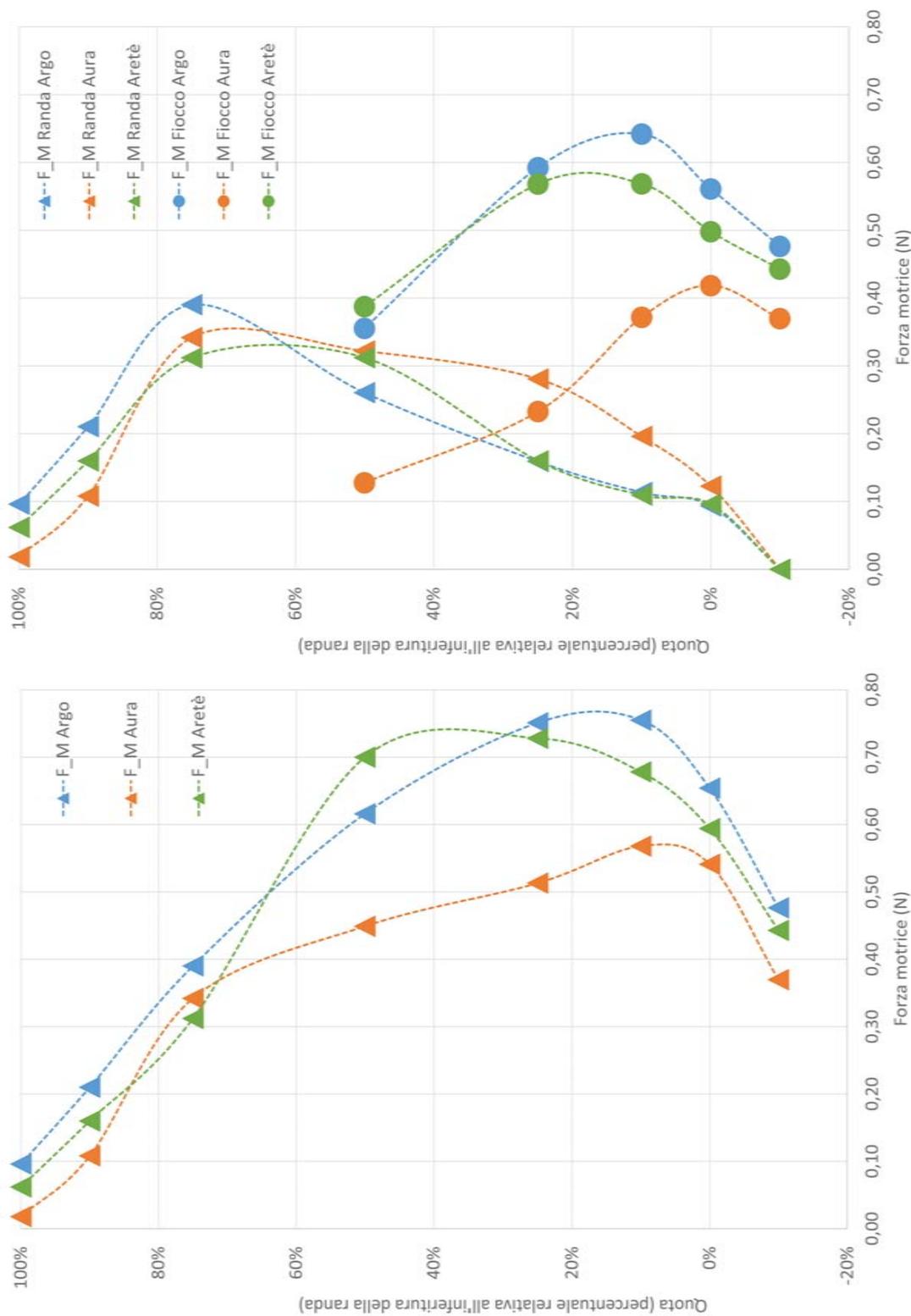


Figura 4.11: Forza motrice in bolina generata dai piani velici

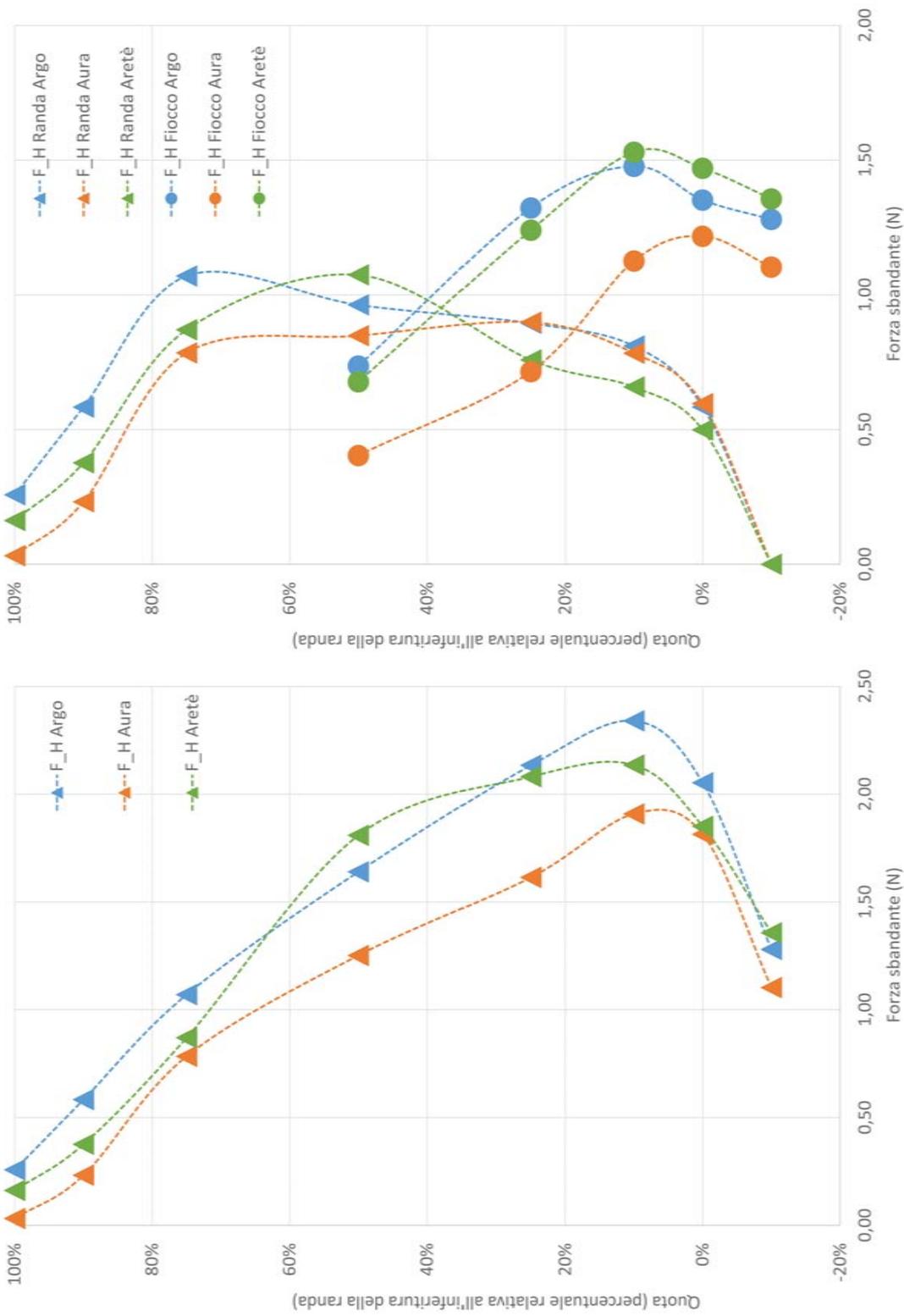


Figura 4.12: Forza sbandante in bolina generata dai piani velici

A. Una prima osservazione, avallata dai dati della tabella 4.1 e dai grafici in bolina, riguarda il contributo fornito dal fiocco alla generazione delle forze totali. Per i piani velici 1 (Argo) e 2 (Aretè) si vede chiaramente come il fiocco contribuisca alla generazione della forza motrice in modo molto più determinante di quanto non faccia per 3 (Aura). Questo a fronte di prestazioni delle tre rande piuttosto simili.

La motivazione è sempre la stessa: lo stallo del fiocco 3 ne pregiudica le prestazioni e la randa 3 lavora in modo simile a come lavorerebbe se fosse l'unica vela presente. Nel caso 1 e 2 le rande, se fatte lavorare senza fiocco, potrebbero produrre forze maggiori di quelle della randa 3 dal momento che hanno maggiore curvatura. Presentano invece prestazioni simili perché sono penalizzate dalla presenza dei fiocchi 1 e 2, ai quali (grazie all'upwash prodotto) stanno permettendo di lavorare ad alta efficienza per perseguire un miglioramento delle prestazioni totali del piano velico nel suo complesso.

Tabella 4.1: Forze parziali e totali sviluppate dai piani nella condizione di massima efficienza

piano	andatura	componente	forza [N] fiocco	forza [N] randa	forza [N] totale
argo	bolina	M	22,4	16,0	38,4
argo	bolina	H	48,9	54,7	103,6
aretè	bolina	M	22,2	15,2	37,4
aretè	bolina	H	50,9	49,1	100,0
aura	bolina	M	11,9	14,3	26,2
aura	bolina	H	35,9	41,1	77,0
argo	traverso	M	55,1	40,2	95,3
argo	traverso	H	12,4	15,9	28,3
aretè	traverso	M	53,6	41,9	95,5
aretè	traverso	H	12,8	14,2	27,0
aura	traverso	M	28,3	37,4	65,7
aura	traverso	H	11,9	11,1	23,0

B. Si osservi che i fiocchi 1 e 2, malgrado una superficie molto inferiore rispetto a quella delle rande, generano una forza motrice più alta di quella generata dalle rande 1 e 2. Questa situazione non si verifica per il piano velico 3.

Questo è dovuto al fatto che le rande 1 e 2 sono già dal punto di vista geometrico penalizzate rispetto ai fiocchi nella produzione di portanza (perché hanno grasso minore), e minor portanza significa minor componente di forza di avanzamento. Inoltre il ricircolo di cui soffrono all'intradosso aumenta la loro resistenza rispetto ai fiocchi

che stanno lavorando in condizioni ottimali, e maggior resistenza significa ancora riduzione della componente di avanzamento della forza.

- C. Per quanto riguarda la forza sbandante si osserva che mentre il fiocco 1 produce meno forza rispetto alla randa 1, la situazione si inverte per il piano velico 2.

In questo caso va considerato che il fiocco 1 presenta un'efficienza migliore rispetto al fiocco 2 (tabella 4.2) e questo è dovuto alle caratteristiche geometriche del fiocco 1 che risultano vincenti permettendo di sviluppare un maggior coefficiente di lift e una minore resistenza: al 50% della randa abbiamo svergolamento del fiocco 1 pari a $8,2^\circ$ e svergolamento del fiocco 2 pari a 5° , il grasso del fiocco 1 è mediamente pari a 0,152 mentre il grasso del fiocco 2 in media si assesta a 0,125.

La tabella 4.2 mostra chiaramente come massimizzare l'efficienza del fiocco, anche penalizzando l'efficienza della randa, produca un'efficienza generale molto più alta del caso contrario. Si dovrebbe comprendere, alla luce di questi risultati, ciò che sostengono Fossati [19] e Larsson e Eliasson [30]: la presenza del fiocco non migliora le prestazioni della randa ma è piuttosto la randa che migliora le prestazioni del fiocco creando un effetto di *upwash* e deviando il flusso verso il fiocco che vede ridotta la possibilità di stallo per distacco del flusso (dal momento che al suo estradosso aumenta la velocità e diminuisce la pressione).

Tabella 4.2: Efficienze parziali e totali dei piani nella condizione di massima efficienza

piano	andatura	efficienza fiocco	efficienza randa	efficienza piano
argo	bolina	0,46	0,29	0,37
aretè	bolina	0,44	0,31	0,37
aura	bolina	0,33	0,35	0,34
argo	traverso	4,44	2,53	3,37
aretè	traverso	4,19	2,95	3,54
aura	traverso	2,38	3,37	2,86

Con i valori raccolti nella tabella 4.1 e il grafico in figura 4.13 è possibile stimare la velocità della barca. Questo grafico viene costruito in modo sperimentale o attraverso appositi software (ad esempio MAXSURF) raccogliendo i valori di velocità caratteristici della scafo quando a questo viene applicata una determinata forza di trazione. La forza motrice generata dal piano velico deve essere individuata sull'asse delle y e sarà

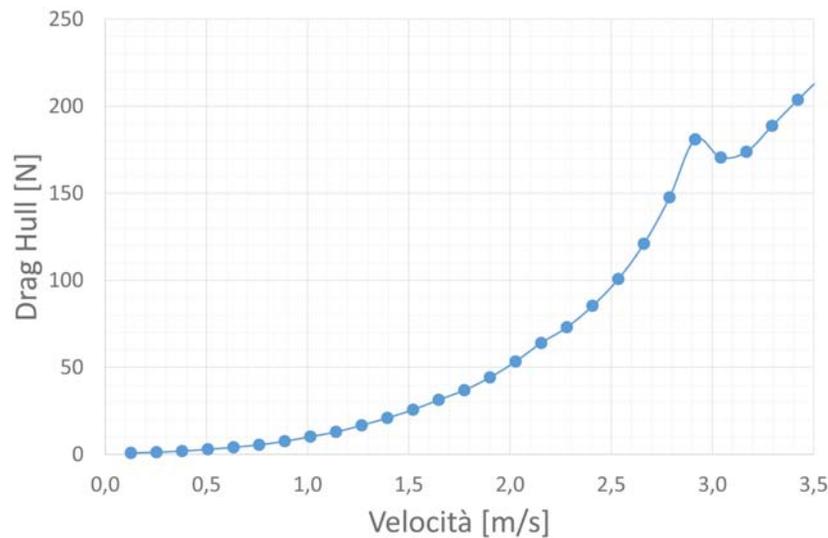


Figura 4.13: Stima della velocità della barca al variare della forza di trazione dello scafo.

quindi possibile leggere la velocità stimata della barca alla coordinata x corrispondente.

Distribuzione del coefficiente di forza risultante

Nei grafici in figura 4.14 (e in figura C.10 in appendice) è rappresentato il coefficiente di forza risultante, c_{FR} alle diverse quote del piano velico.

Il coefficiente di forza risultante, definito come

$$c_{FR} = \frac{F_{Ri}}{\frac{1}{2}\rho \cdot v(z_i)_{mf}^2 \cdot S_i}$$

è stato calcolato sulla base della forza ottenuta con il *metodo delle strisce* per la striscia i -esima, F_{Ri} , e normalizzato rispetto ai valori di velocità all'ingresso alla quota della striscia $v(z_i)$ e superficie di riferimento della striscia considerata S_i .

Questo grafico dà un'indicazione del criterio utilizzato per la progettazione del piano velico.

La forma sei profili che costituiscono il piano velico influisce sulla distribuzione del coefficiente di forza risultante lungo la quota. Dall'osservazione del grafico relativo alla bolina si può dedurre che il piano velico Aura è stato progettato in modo da mantenere un c_{FR} pressoché costante. Il piano Aretè invece presenta una distribuzione che è massima nella zona centrale e decresce verso il bordo inferiore e superiore. Il piano Argo

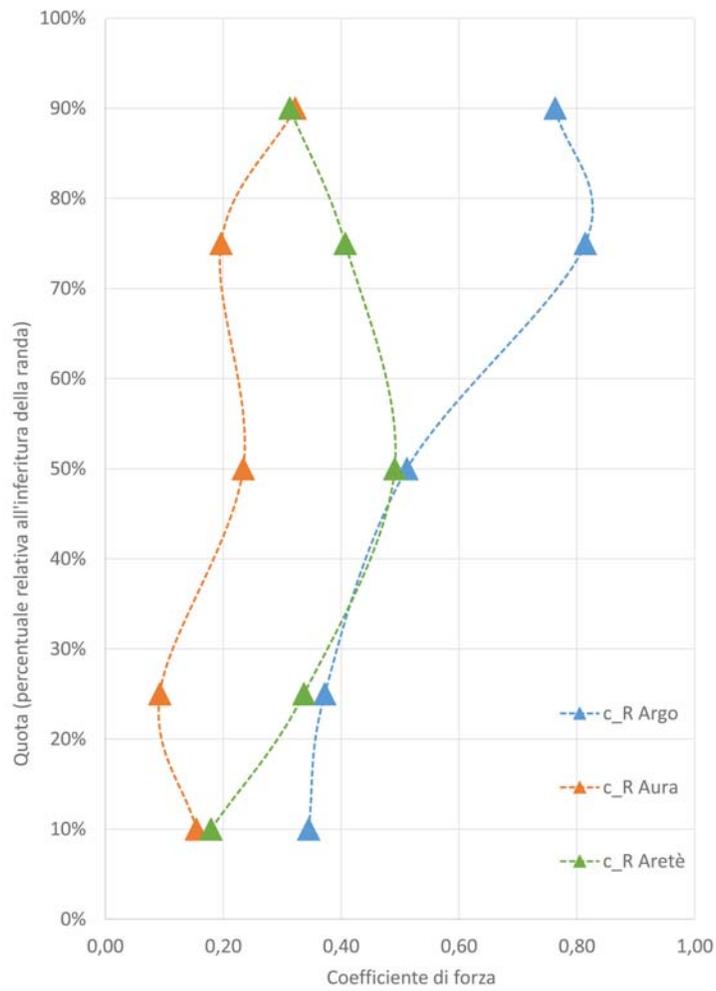


Figura 4.14: Distribuzione del coefficiente di forza risultante lungo il piano velico in bolina

infine presenta un c_{FR} che ha valore massimo al 75% della quota, questo per sfruttare meglio la parte superiore della randa nella produzione della forza.

Conclusioni

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è realizzare un confronto sistematico di tre piani velici per imbarcazioni di 4,6 m da regata con albero di 7 m.

L'obiettivo è stato raggiunto con l'ausilio di un modello CFD preparato ad hoc, validato sulla base di dati sperimentali raccolti in galleria del vento (Yoo e Kim [16]), ed applicato ai piani velici scelti, studiati in due andature: bolina stretta e traverso. I principali risultati ottenuti sono elencati di seguito.

- Il piano velico 1 (Argo) presenta le migliori prestazioni globali: produce sempre il coefficiente di avanzamento maggiore e anche la migliore efficienza nella quasi totalità delle configurazioni studiate. Tali prestazioni sono da attribuire ad una buona progettazione dei profili che costituiscono le vele e in particolare ad uno svergolamento di randa e fiocco particolarmente adatto ad affrontare il vento apparente che alle diverse quote cambia direzione. Trova riscontro nei dati raccolti e in letteratura anche l'ipotesi che il maggiore allungamento del piano 1 produca i vantaggi osservati in termini di efficienza globale. Tale ipotesi tuttavia dev'essere avvalorata da ulteriori analisi.
- Il piano velico 2 (Aretè) è l'unico ad avere prestazioni concorrenziali a quelle del piano 1, arrivando addirittura in due configurazioni a superarne l'efficienza.
- Il piano velico 3 (Aura) ha in ogni configurazione le prestazioni peggiori, in termini di forza motrice e in termini di efficienza. Tali prestazioni sono da attribuire sia alla forma dei profili che costituiscono le vele, le quali presentano una curvatura quasi assente, sia allo svergolamento del fiocco che è praticamente nullo.

In generale si può dire che analizzando queste vele si è riusciti a mettere in relazione le prestazioni dei tre piani con le caratteristiche geometriche dei profili. Sarebbe opportuno eseguire ulteriori analisi utilizzando piani che presentino i medesimi profili e differenze in allungamento e allunamento per valutare anche l'influenza di questi parametri.

Bibliografia

- [1] C. A. Marchaj. *Sailing theory and practise*. London: Adlar Coles Limited, 1964.
- [2] E. P. Warner e S. Ober. «The aerodynamics of Yacht Sails». In: *Proceedings of The 3rd General Meeting of the Society of Naval Architects and Marine Engineers*. New York, USA, 1925.
- [3] P. Puddu et al. «Full scale investigation of one-design class catamaran sails». In: Auckland, 2006, pp. 14–16.
- [4] I. M. Viola e R. G. J. Flay. «Full-scale pressure measurements on a Sparkman and Stephens 24-foot». In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (2010), pp. 800–807.
- [5] I. M. Viola e R. G. J. Flay. «Force and Pressure Investigation of Modern Asymmetric Spinnakers». In: *International Journal of Small Craft Technology* (2009), pp. 31–40.
- [6] D. Le Pelley e O. Modral. «V-SPARS: A Combined Sail and Rig Shape Recognition System Using Imaging Techniques». In: *Proceedings of the Third High Performance Yacht Design Conference*. Auckland: University of Auckland, 2008, pp. 57–66.
- [7] P. J. Richards, D. J. Le Pelley e D. Morris. «Full-scale Measurement of Pressure and Forces on Sails». In: *Proceedings of the 6th European and African Conference on Wind Engineering*. Cambridge, 2013.
- [8] J. S. Herman. *A Sail Force Dynamometer: Design, Implementation and Data Handling*. Massachusetts Institute of Technology, 1988.
- [9] K. Hochkirch. *Entwicklung einer Meßyacht zur Analyse der Segelleistung im Orginalmaßstab (Design and Construction of a Full-Scale Measurement System for the Analysis of Sailing Performance)*. Berlin: Technische Universität Berlin, 2000.
- [10] D. Morris. «Derivation of Forces on a Sail using Pressure and Shape Measurements at Full-Scale». Master of Science Thesis. Göteborg, Sweden: Chalmers University of Technology, 2011.
- [11] R. G. J. Flay. «A Twisted Flow Wind Tunnel for Testing Yacht Sails». In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 63 (1996), pp. 171–182.

- [12] A. Zasso, F. Fossati e I. M. Viola. «Twisted Flow Wind Tunnel Design for Testing Yacht Sails». In: *Proceedings of The 4th European and African Conference on Wind Engineering*. Praga, Ceca Republic, 2005.
- [13] A. E. Gentry. «The Aerodynamics of Sail Interaction». In: *Proceedings of the Third AIAA Symposium on the Aero/Hydronautics of Sailing*. Redondo Beach, California, USA, 1971.
- [14] K.L. Hedges, P.J. Richards e G.D. Mallison. «Computer Modelling of Downwind Sails». In: *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* 63 (1996), pp. 95–110.
- [15] H. Miyata e Y.W. Lee. «Application of CFD Simulation to the Design of Sails». In: *Journal of Marine Science and Technology* 4 (1999), pp. 163–172.
- [16] J. Yoo e H. T. Kim. «Computational and Experimental Study on Performance of Sail of a Sailing Yacht». In: *Ocean Engineering* 33 (2006), pp. 1322–1342.
- [17] C. Ciortan e C. G. Soares. «Computational Study of Sail Performance in Upwind Condition». In: *Ocean Engineering* 34 (2007), pp. 2198–2206.
- [18] I. M. Viola, P. Bot e M. Riotte. «Upwind sail aerodynamics: A RANS numerical investigation validated with wind tunnel pressure measurements». In: *International Journal of Heat and Fluid Flow* 39 (2013), 90–101.
- [19] F. Fossati. *Teoria dello yacht a vela*. Milano: Polipress, 2007.
- [20] R. Garrett. *The Symmetry of Sailing: The Physics of Sailing for Yachtsman*. Sheridan House, 1996.
- [21] P. E. Liguori. *Le Vele. Principi, regolazioni, prestazioni*. Milano: Hoepli, 2002.
- [22] P. Lodigiani. *Capire e progettare le barche*. Milano: Hoepli, 2015.
- [23] J. D. Anderson Jr. *Fundamentals of Aerodynamics*. 4th edition. McGraw-Hill International Edition, 2007.
- [24] I. M. Viola e F. Fossati. «Downwind Sails Aerodynamic Analysis». In: *BBAA VI International Colloquium on Bluff Bodies Aerodynamics and Applications*. Milan, Italy, 2008.
- [25] P. Izaguirre-Alza, R. Zamora-Rodríguez e L. Pérez-Rojas. «Computational Study of Sail Performance of a Racing Yacht». In: (2008).
- [26] P. E. Abbott e A. E. von Doenhoff. *Theory of Wing Sections, Including a Summary of Airfoil Data*. New York: Dover Publications, 1959.
- [27] M. Farrashkhalvat e J. Miles. *Basic Structured Grid Generation: with an introduction to unstructured grid generation*. Butterworth-Heinemann, 2003.

- [28] STAR-CCM+® *Documentation. Version 10.02.* 2015.
- [29] J. E. Kervin. «A Velocity Prediction Program for Ocean Racing Yachts». In: (1987).
- [30] L. Larsson e R. E. Eliasson. *Principles of Yacht Design.* 2th edition. London: Adlard Coles Nautical, 2000.

Appendice A

Altri risultati

Analisi del fiocco al traverso

Come detto alla sezione 2.2, per stabilire quale fosse il corretto angolo di apertura a cui impostare il fiocco per le analisi al traverso è stata fatta una simulazione al traverso del solo fiocco 2 (Aretè). È stato scelto questo fiocco come rappresentativo di tutti e tre i fiocchi per due motivi: a) appartiene al piano velico che nelle analisi in bolina ha presentato prestazioni intermedie; b) è il fiocco issato sull'albero con flessione intermedia fra quelli studiati.

Dall'analisi della curva polare in figura A.1 e della curva di efficienza in figura A.2 è stato stimato in 60 gradi l'angolo di apertura più plausibile.

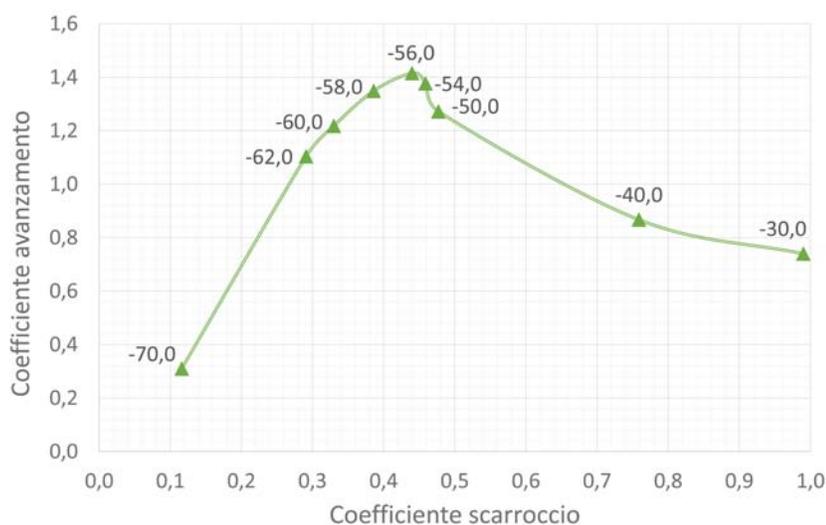


Figura A.1: Curva polare del fiocco di Aretè al traverso

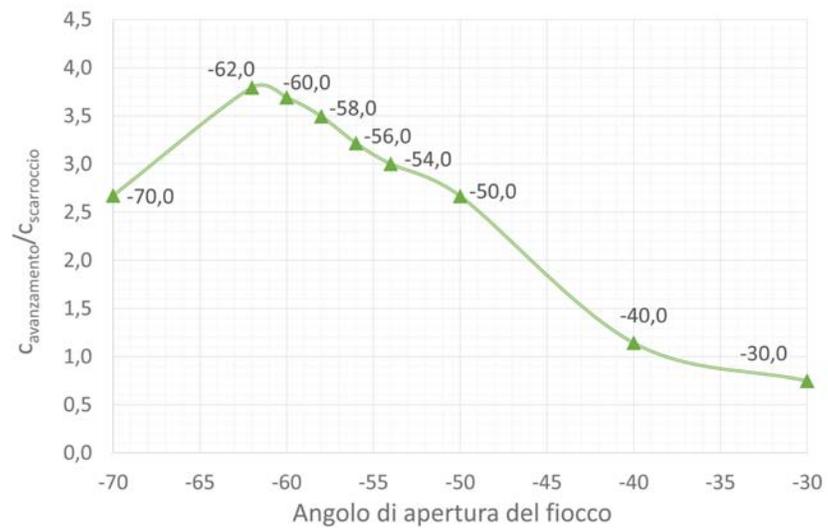


Figura A.2: Curva di efficienza del fiocco di Aretè al traverso

Appendice B

Tabelle integrative

Tabella B.1: Parametri di forma delle sezioni delle vele. Integrazione alla tabella 2.3.

Piano velico 1 - Argo										
quota	L [m]		f [m]		x [m]		f/L		x/L	
	Randa	Fiocco								
90%	1,155		0,139		0,430		0,120		0,372	
75%	1,541		0,200		0,566		0,130		0,367	
50%	1,973	0,428	0,248	0,070	0,725	0,157	0,126	0,164	0,367	0,367
25%	2,312	0,898	0,242	0,139	0,843	0,322	0,105	0,155	0,365	0,359
10%	2,485	1,172	0,181	0,161	0,956	0,419	0,073	0,137	0,385	0,358
					media		0,111	0,152	0,371	0,361

Piano velico 2 - Aretè										
quota	L [m]		f [m]		x [m]		f/L		x/L	
	Randa	Fiocco								
90%	1,112		0,081		0,446		0,073		0,401	
75%	1,753		0,149		0,684		0,085		0,390	
50%	2,187	0,533	0,194	0,071	0,827	0,185	0,089	0,133	0,378	0,347
25%	2,430	1,057	0,193	0,136	0,921	0,366	0,079	0,129	0,379	0,346
10%	2,498	1,336	0,154	0,153	1,007	0,466	0,062	0,115	0,403	0,349
					media		0,078	0,125	0,390	0,347

Piano velico 3 - Aura										
quota	L [m]		f [m]		x [m]		f/L		x/L	
	Randa	Fiocco								
90%	1,160		0,044		0,580		0,038		0,500	
75%	1,805		0,072		0,903		0,040		0,500	
50%	2,283	0,434	0,091	0,017	1,141	0,222	0,040	0,039	0,500	0,512
25%	2,488	0,943	0,100	0,038	1,245	0,480	0,040	0,040	0,500	0,509
10%	2,536	1,211	0,102	0,052	1,269	0,618	0,040	0,043	0,500	0,510
					media		0,040	0,041	0,500	0,510

Tabella B.2: Coefficienti di avanzamento e scarroccio rilevati in bolina

Piano velico	α [deg]	Apertura randa [deg]	c_M	c_H	c_M/c_H
Argo 2015	25,0	-21,0	0,165	0,508	0,325
Argo 2015	25,0	-14,0	0,327	0,881	0,371
Argo 2015	25,0	-10,5	0,395	1,093	0,361
Argo 2015	25,0	-7,0	0,441	1,283	0,344
Argo 2015	25,0	-3,5	0,434	1,404	0,309
Argo 2015	25,0	0,0	0,406	1,495	0,272
Argo 2015	25,0	3,5	0,378	1,600	0,236
Argo 2015	25,0	7,0	0,330	1,661	0,199
Argo 2015	25,0	10,5	0,268	1,687	0,159
Argo 2015	25,0	14,0	0,198	1,651	0,120
Argo 2015	25,0	17,5	0,115	1,540	0,075
Piano velico	α [deg]	Apertura randa [deg]	c_M	c_H	c_M/c_H
Aura 2015	25,0	-21,0	0,095	0,325	0,292
Aura 2015	25,0	-14,0	0,222	0,652	0,340
Aura 2015	25,0	-10,5	0,258	0,818	0,315
Aura 2015	25,0	-7,0	0,265	0,955	0,277
Aura 2015	25,0	-3,5	0,242	1,038	0,233
Aura 2015	25,0	0,0	0,208	1,104	0,188
Aura 2015	25,0	3,5	0,165	1,152	0,143
Aura 2015	25,0	7,0	0,115	1,125	0,102
Aura 2015	25,0	10,5	0,068	1,140	0,060
Aura 2015	25,0	14,0	0,018	1,149	0,016
Aura 2015	25,0	17,5	-0,034	1,161	-0,029
Piano velico	α [deg]	Apertura randa [deg]	c_M	c_H	c_M/c_H
Aretè 2012	25,0	-21,0	0,147	0,441	0,333
Aretè 2012	25,0	-14,0	0,303	0,811	0,374
Aretè 2012	25,0	-10,5	0,353	0,989	0,357
Aretè 2012	25,0	-7,0	0,378	1,147	0,330
Aretè 2012	25,0	-3,5	0,368	1,280	0,288
Aretè 2012	25,0	0,0	0,332	1,350	0,246
Aretè 2012	25,0	3,5	0,283	1,377	0,206
Aretè 2012	25,0	7,0	0,217	1,341	0,162
Aretè 2012	25,0	10,5	0,163	1,367	0,119
Aretè 2012	25,0	14,0	0,103	1,381	0,075
Aretè 2012	25,0	17,5	0,044	1,312	0,034

Tabella B.3: Coefficienti di avanzamento e scarroccio rilevati al traverso

Piano velico	α [deg]	Apertura randa [deg]	c_M	c_H	c_M/c_H
Argo 2015	80,0	-76,0	0,490	0,168	2,917
Argo 2015	80,0	-70,0	0,773	0,229	3,376
Argo 2015	80,0	-60,0	1,376	0,448	3,071
Argo 2015	80,0	-55,0	1,484	0,551	2,693
Argo 2015	80,0	-50,0	1,405	0,629	2,234
Argo 2015	80,0	-37,5	1,239	0,768	1,613
Piano velico	α [deg]	Apertura randa [deg]	c_M	c_H	c_M/c_H
Aura 2015	80,0	-76,0	0,215	0,120	1,792
Aura 2015	80,0	-70,0	0,533	0,186	2,866
Aura 2015	80,0	-60,0	0,954	0,396	2,409
Aura 2015	80,0	-55,0	1,031	0,514	2,006
Aura 2015	80,0	-50,0	0,962	0,562	1,712
Aura 2015	80,0	-37,5	0,871	0,728	1,196
Piano velico	α [deg]	Apertura randa [deg]	c_M	c_H	c_M/c_H
Aretè 2012	80,0	-76,0	0,414	0,145	2,855
Aretè 2012	80,0	-70,0	0,775	0,219	3,539
Aretè 2012	80,0	-60,0	1,250	0,420	2,976
Aretè 2012	80,0	-55,0	1,370	0,550	2,491
Aretè 2012	80,0	-50,0	1,398	0,664	2,105
Aretè 2012	80,0	-37,5	1,150	0,770	1,494

Appendice C

Integrazioni ai risultati

Nelle pagine seguenti vengono riportate le figure relative alle analisi al traverso.

x

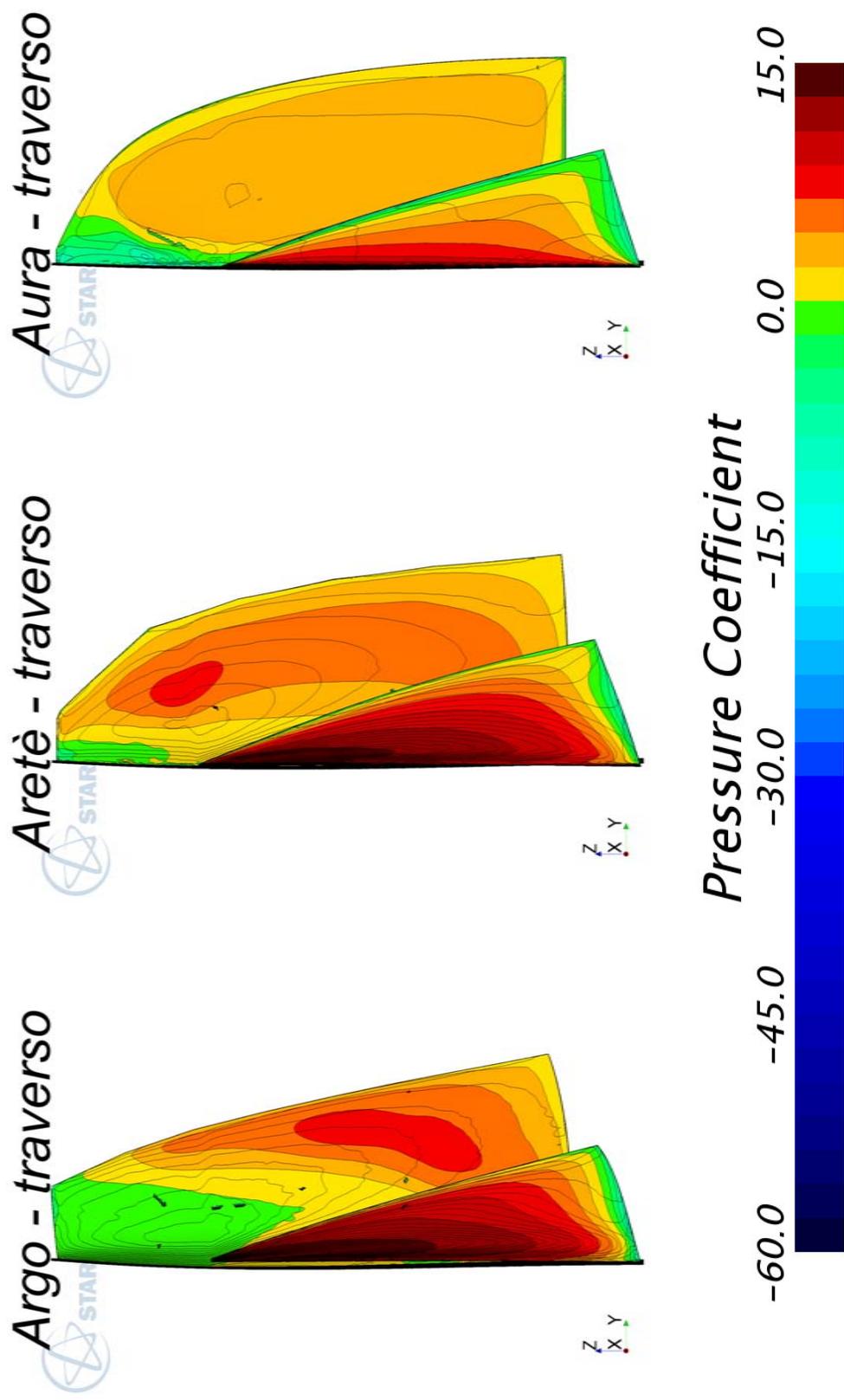


Figura C.1: Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie sopravento dei piani velici Argo, Aretè, Aura. Angolo apertura randa: -70 gradi.

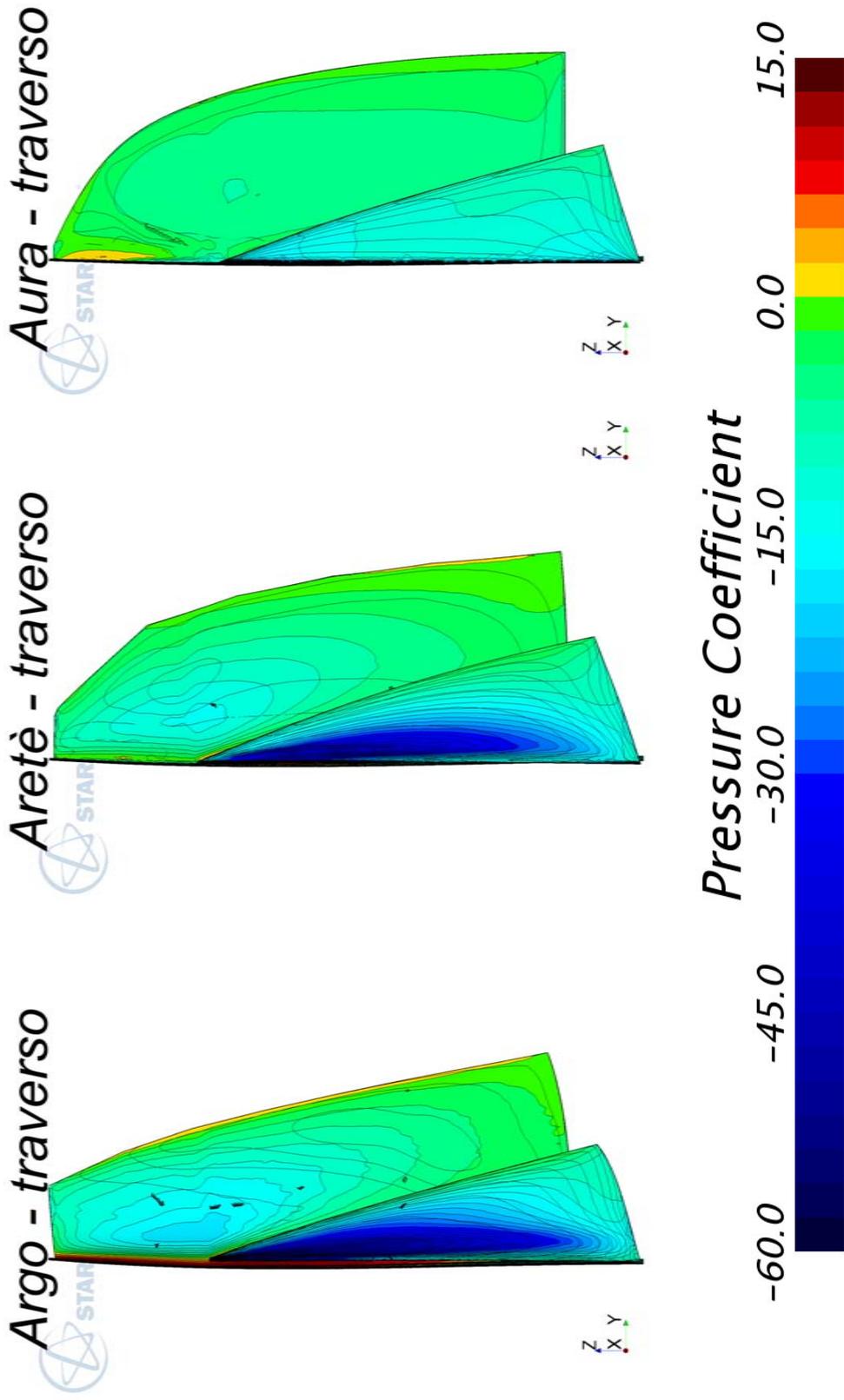


Figura C.2: Distribuzione del coefficiente di pressione sulla superficie sottovento dei piani velici Argo, Aretè, Aura. Angolo apertura randa: -70 gradi.

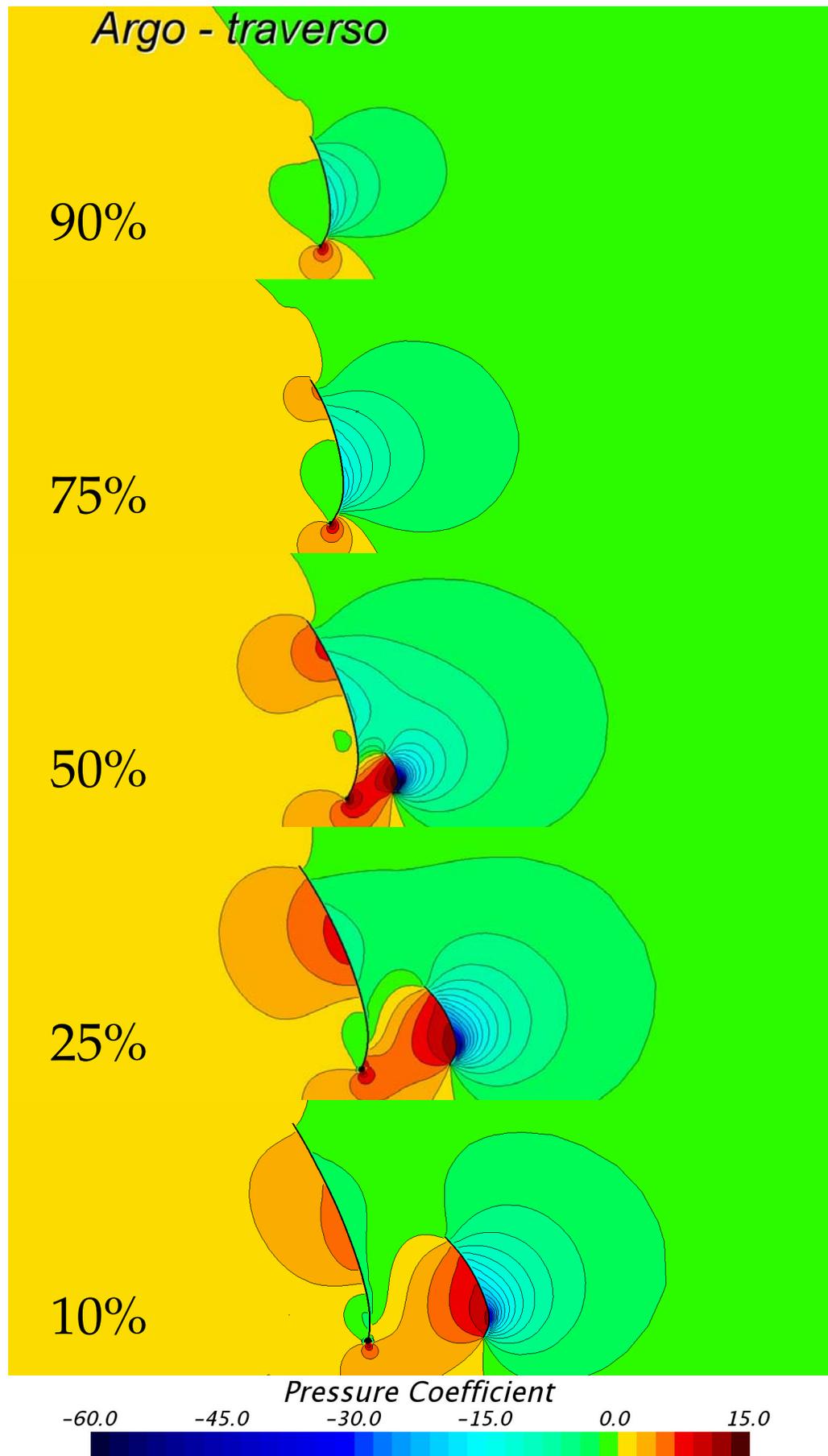


Fig. C.3:
Distribuzione
del coefficiente
di pressione
attorno al
piano velico 1
(Argo) al 10%,
25%, 50%, 75%,
90% dell'altezza
della randa.
Angolo apertura
randa: -70
gradi.

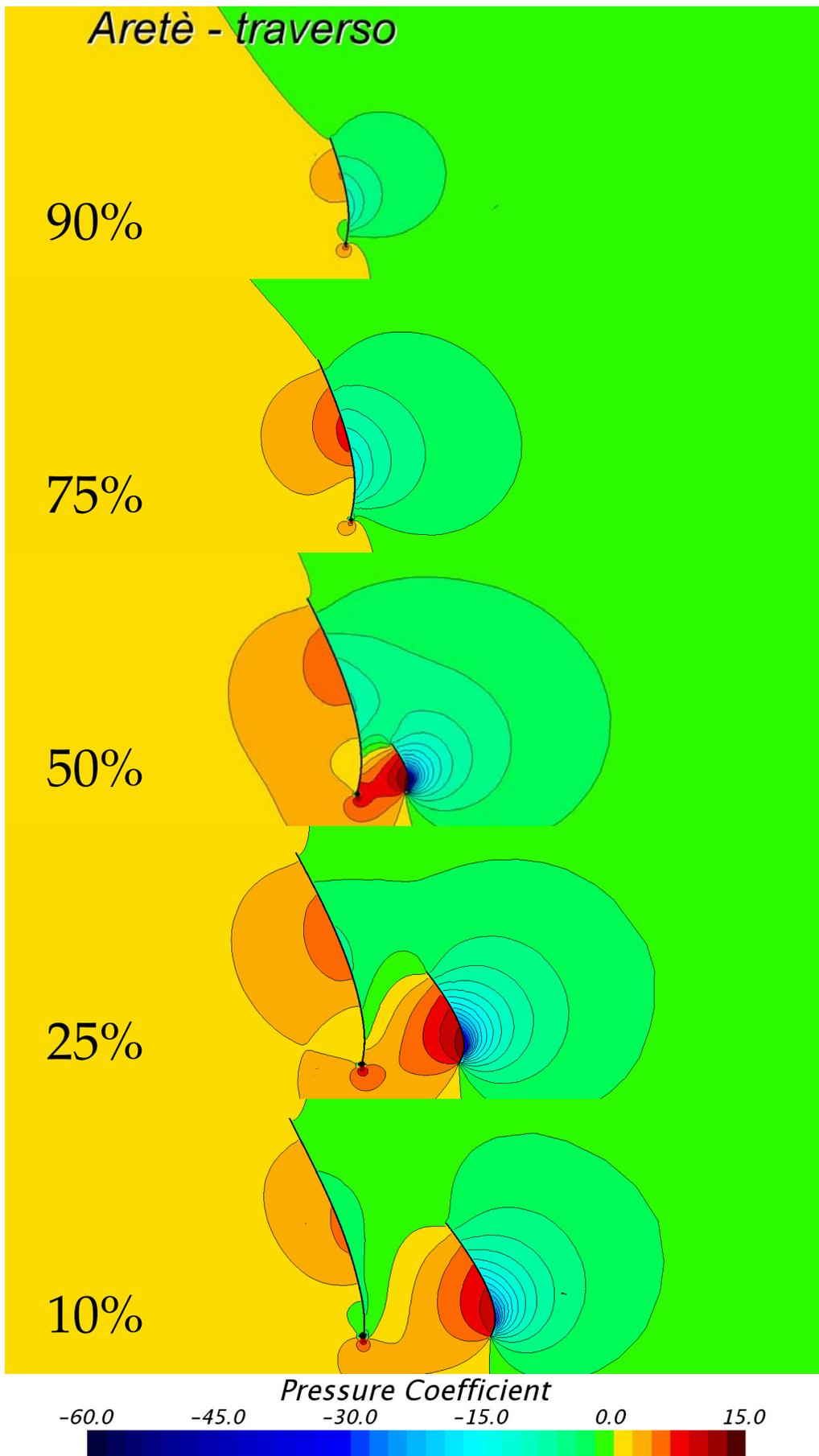


Fig. C.4:
Distribuzione
del coefficiente
di pressione
attorno al
piano velico 2
(Aretè) al 10%,
25%, 50%, 75%,
90% dell'altezza
della randa.
Angolo apertura
randa: -70
gradi.

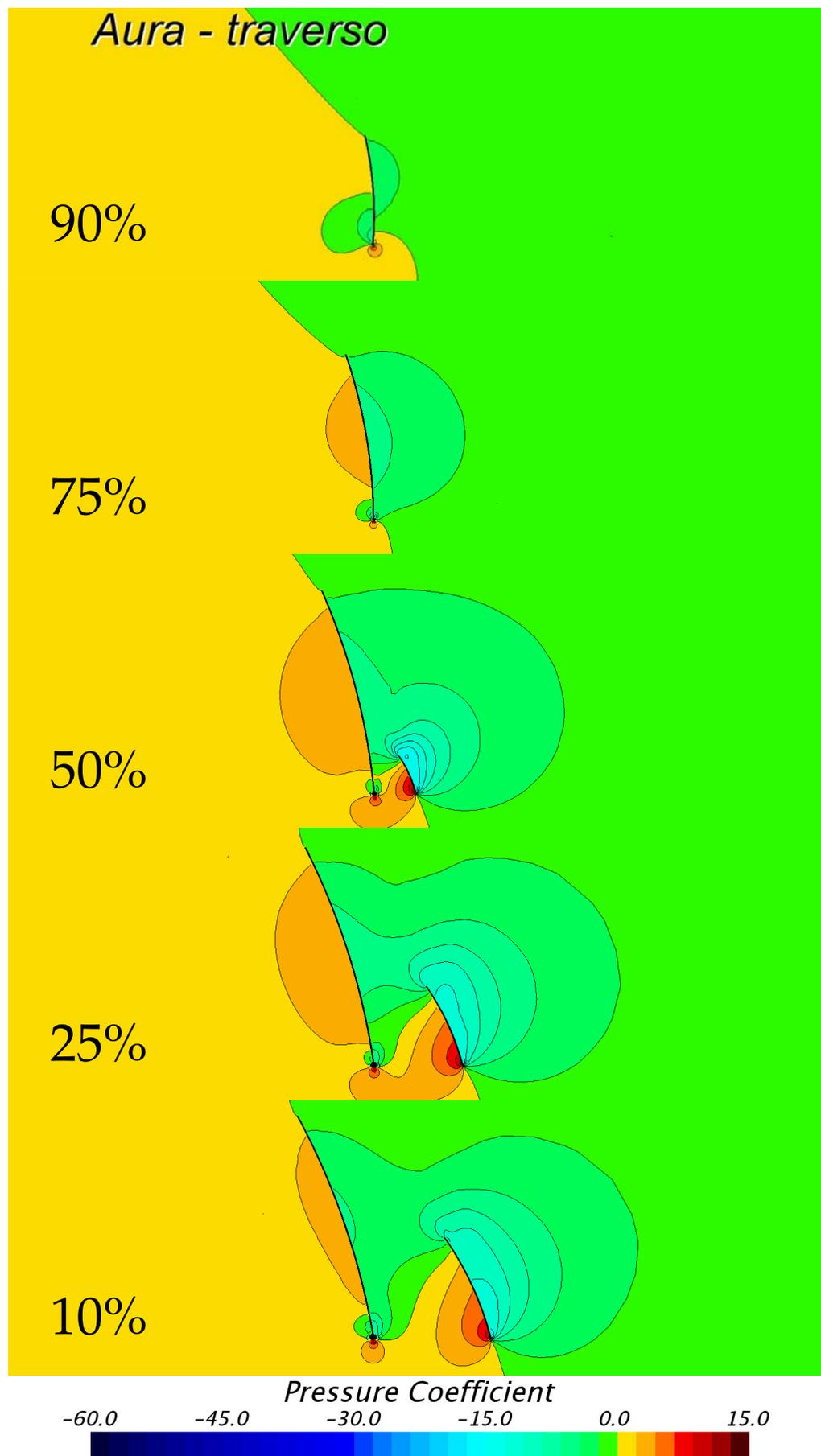
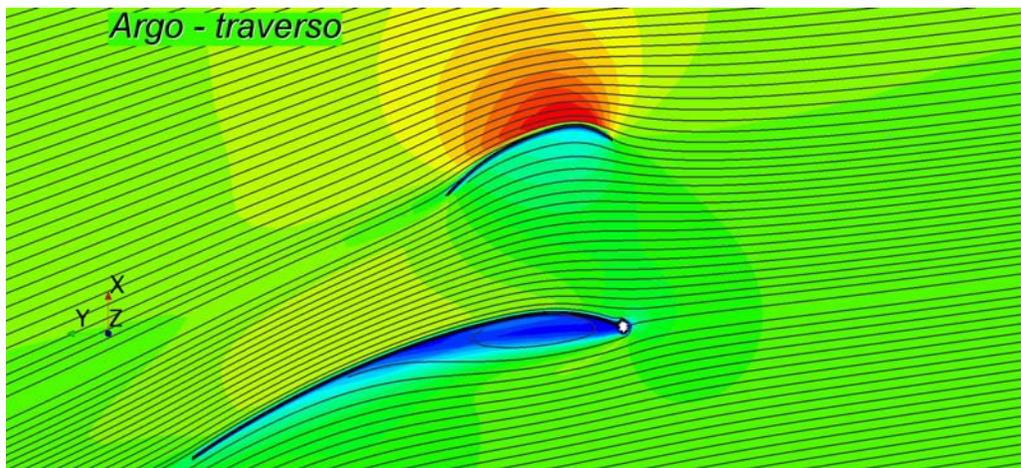
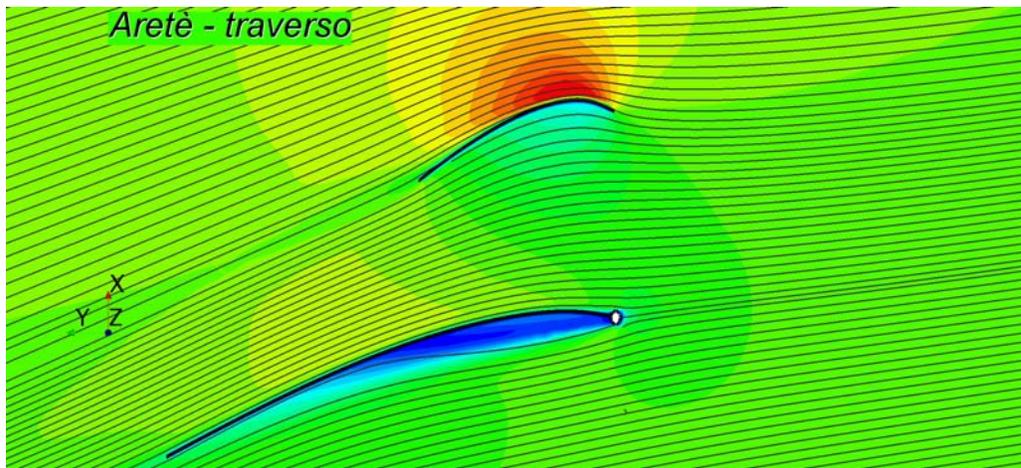


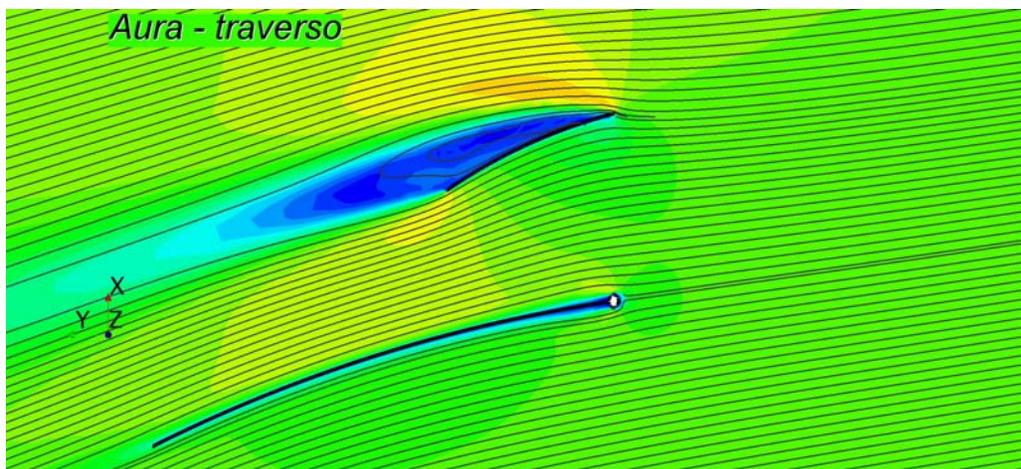
Fig. C.5:
Distribuzione
del coefficiente
di pressione at-
torno al piano
velico 3 (Au-
ra) allo 10%,
25%, 50%, 75%,
90% dell'altez-
za della randa.
Angolo aper-
tura randa: -70
gradi.



(a) Linee di corrente intorno al piano 1



(b) Linee di corrente intorno al piano 2



(c) Linee di corrente intorno al piano 3

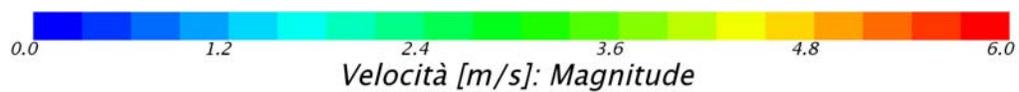


Figura C.6: Distribuzione delle linee di corrente intorno ai piani velici al traverso al 25% della randa. Angolo apertura randa: -70 gradi.

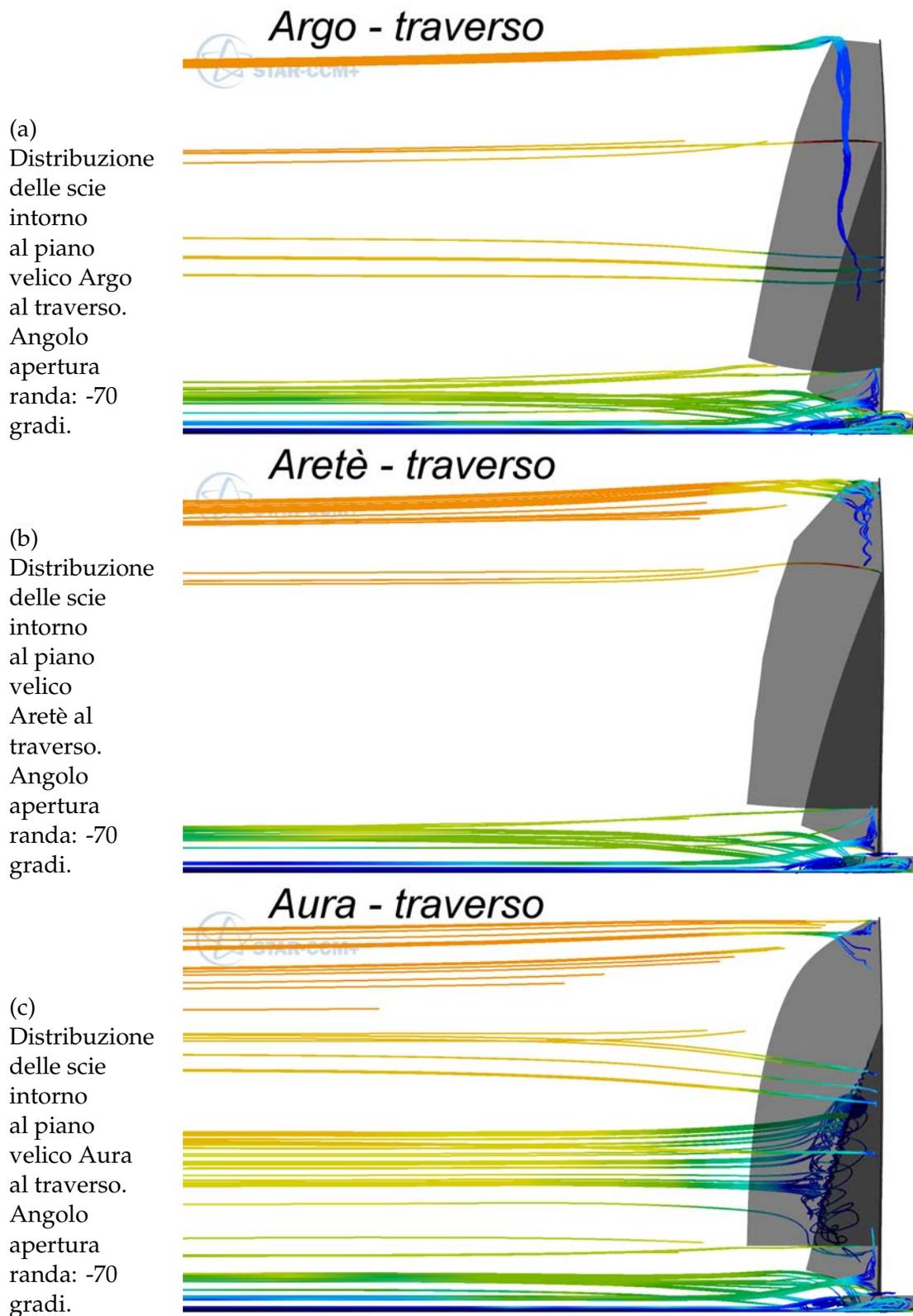


Figura C.7: Distribuzione delle scie intorno ai piani velici al traverso. Angolo apertura randa: -70 gradi.

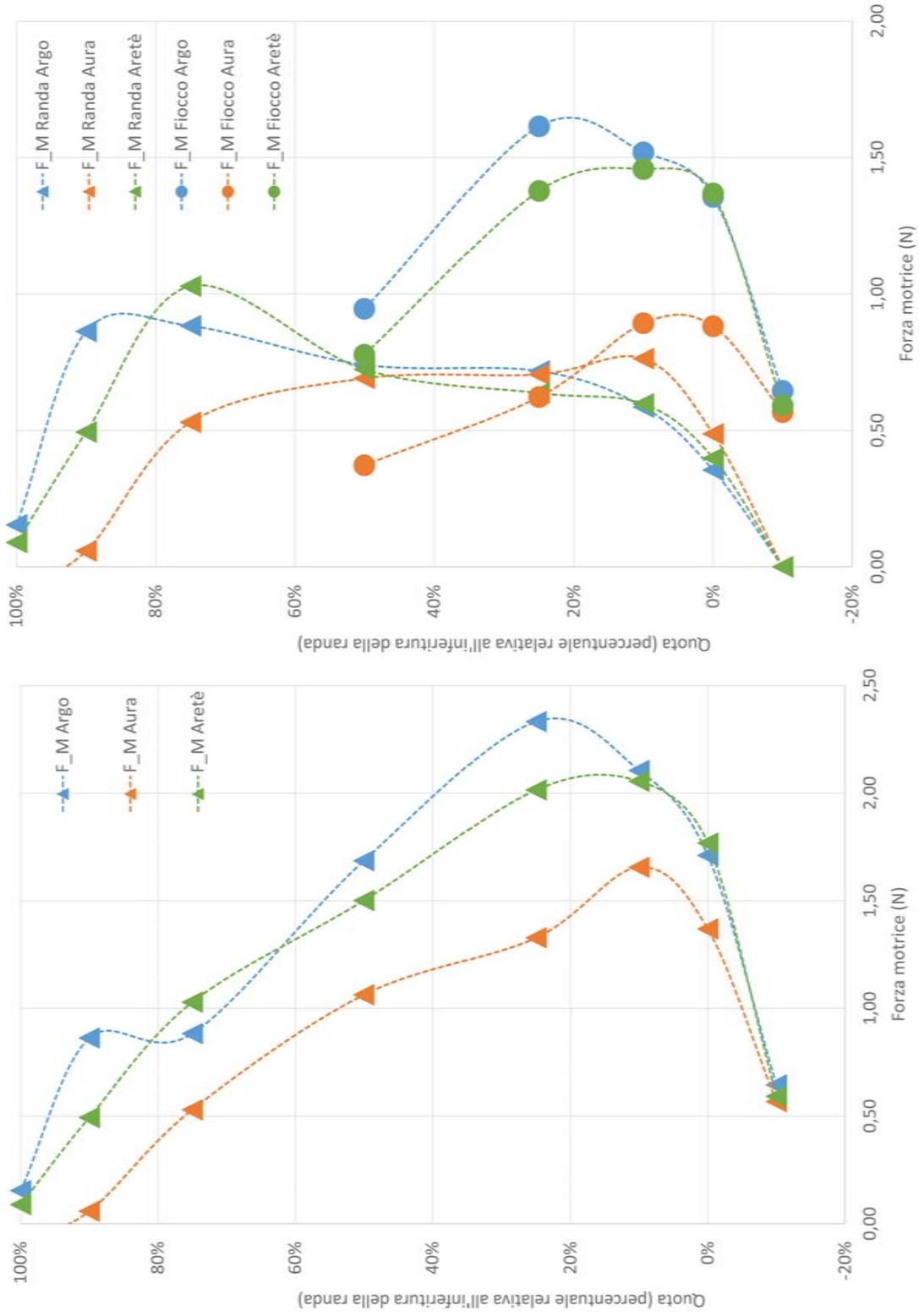


Figura C.8: Forza motrice al traverso generata dai piani velici

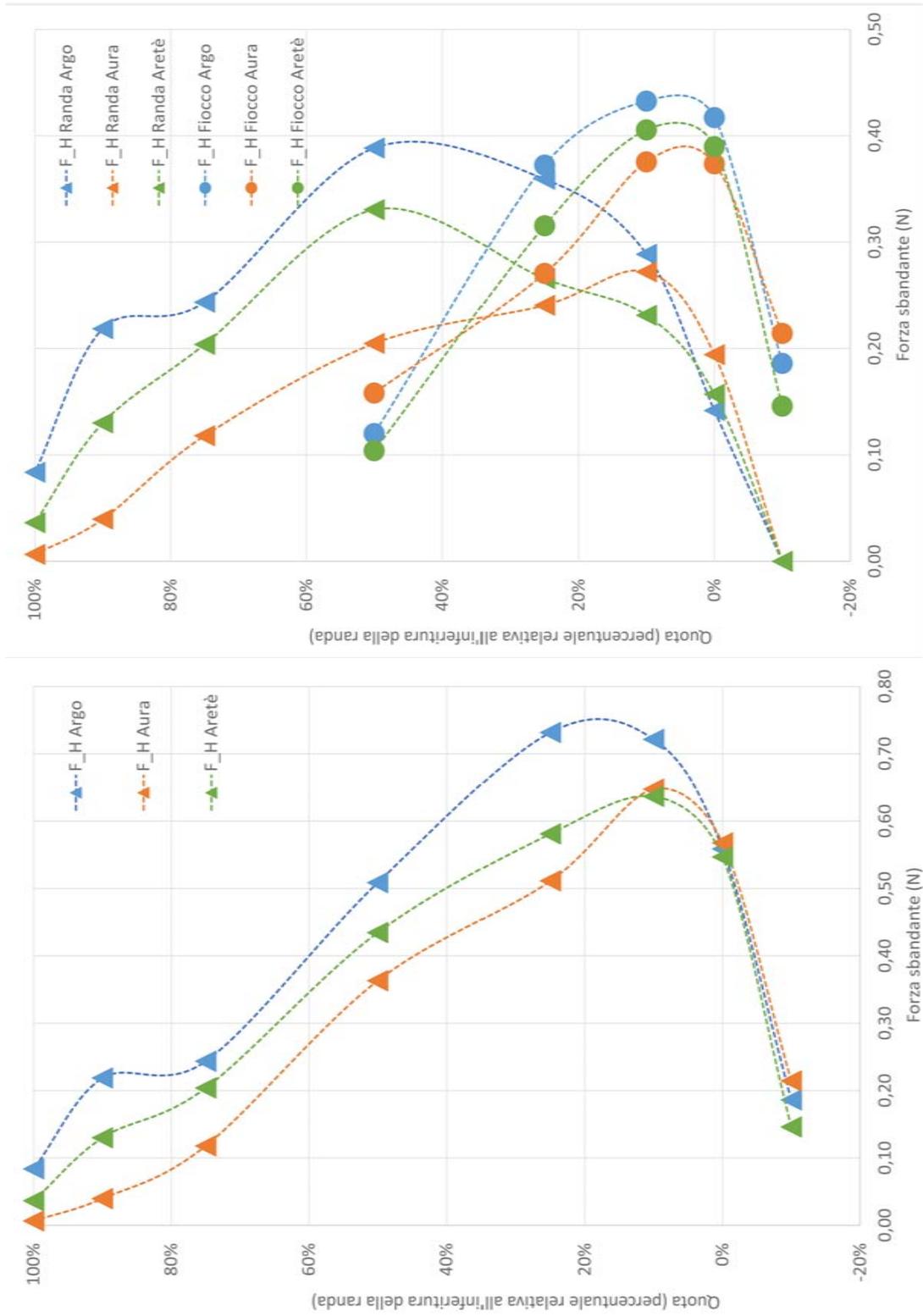


Figura C.9: Forza sbordante al traverso generata dai piani velici

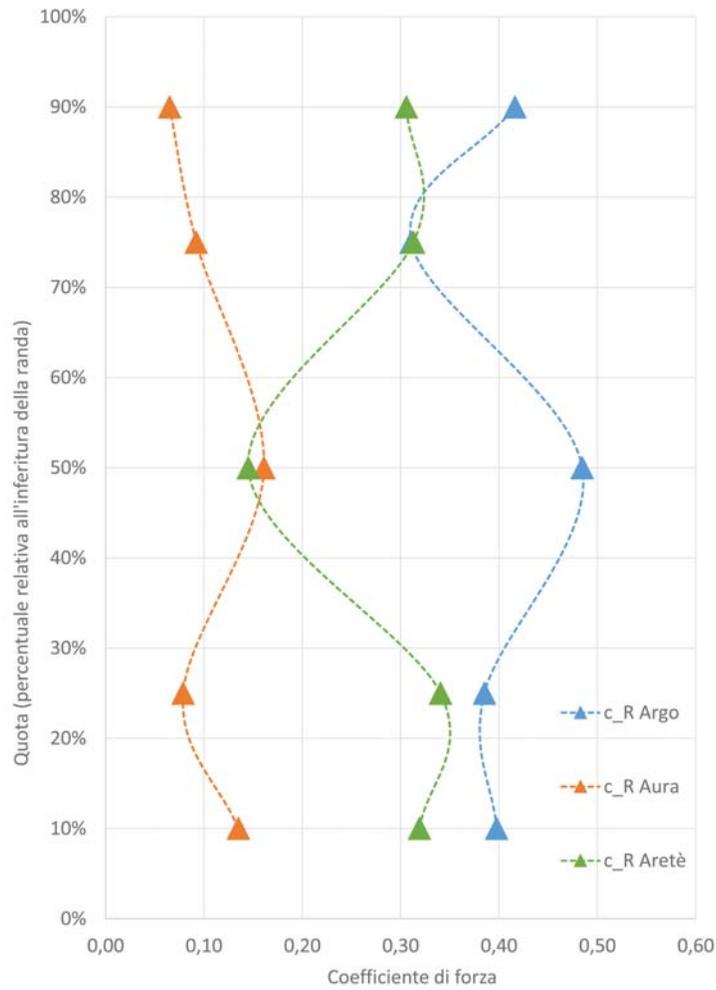


Figura C.10: Distribuzione del coefficiente di forza risultante lungo il piano velico al traverso. A differenza di quanto visto in figura 4.14, le tendenze dei piani 1 e 2 non vengono mantenute. Questo è normale dal momento che in andatura al traverso la configurazione randa-fiocco non è più quella di progetto. Tuttavia il grafico mostra ancora la tendenza che vede il piano 1 prevalere sul piano 2, e il piano 2 prevalere sul 3, nella capacità di produrre forza.