



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA
Dipartimento di Ingegneria Industriale DII

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Meccanica

Aerodinamica delle vele nelle andature portanti

Relatore: Prof. Andrea Lazzaretto

Fabrizio Cadeddu matricola 260430

Anno Accademico 2020/2021

Indice

1.INTRODUZIONE	7
2.FISICA DELL'IMBARCAZIONE A VELA	11
2.1 Premessa	11
2.2 Nozioni di fisica dell'imbarcazione a vela	11
2.3 Conclusioni	15
3. ELEMENTI DI FLUIDODINAMICA	17
3.1 Premessa	17
3.2 Interazione tra fluidi ed oggetti solidi in moto relativo	17
3.3 Conclusioni	22
4. ASPETTI GENERALI DELL'AERODINAMICA DELLE VELE	23
4.1 Premessa	23
4.2 Interazione tra vento e vele	24
4.2 Aerodinamica della vela: aspetti generali	30
4.3 Caratterizzazione dal punto di vista aerodinamico di una vela	34
4.4 La resistenza	42
4.5 Elementi geometrici caratteristici delle vele	45
4.6 Conclusioni	48
5. LO STUDIO DELLE PRESTAZIONI DELLE VELE	51
5.1 Premessa	51
5.2 Strumenti per l'analisi delle prestazioni	51
5.3 Conclusioni	56
6.AERODINAMICA DELLE VELE NELLE ANDATURE PORTANTI	57
6.1 Premessa	57
6.2 Andature portanti vs andature al vento: diversi obiettivi aerodinamici.....	59
6.3 Le vele nelle andature portanti	66
6.4 Elementi generali del comportamento di uno <i>spinnaker</i>	71
6.5 Parametri geometrici caratteristici degli <i>spinnaker</i> e loro influenza sulla aerodinamica	77
6.6 Interazione <i>spinnaker</i> - randa.....	86
6.7 Conclusioni	88
7.CONCLUSIONI	89

Sommario

È stata condotta una ricerca sullo stato dell'arte della aerodinamica delle vele nelle andature portanti. Partendo dall'analisi del funzionamento di una vela e dal fatto che per la capacità di sviluppare portanza una vela sia assimilabile ad un'ala, e quindi alla stregua di questa può essere caratterizzata, si è arrivati a vedere che nelle andature portanti una vela si comporta in modo più simile ad un corpo tozzo piuttosto che ad una forma aerodinamica (airfoil). Si è cercato quindi di inquadrare dal punto di vista aerodinamico quella tipologia di vele dedicate normalmente all'impiego nelle andature portanti, denominate spinnaker. È stata fornita la motivazione per cui gli spinnaker presentano forme assai concave, generate da profili grassi e molti diversi tra loro (per i diversi profili rispetto dell'angolo ideale di attacco e contestualmente perseguimento dell'obiettivo aerodinamico specifico). Sono stati presentati studi che confermano, il fatto che tali vele siano avvolte da flussi non approssimabili con flussi bidimensionali, come avviene invece per le ali, e caratterizzati da ampie zone con presenza di distacco dello strato limite quindi di vortici che portano a elevati valori di resistenza sviluppata. Si è visto inoltre, riportando esperimenti effettuati su scala reale, la caratteristica di tali vele per cui la loro forma operativa evolve, modificando i campi di moto e di pressione attorno ad esse, e contemporaneamente risentendo a loro volta di tali variazioni. Riportando invece prove sperimentali effettuate in galleria del vento su modelli rigidi si è potuto trovare conferma della validità di precise geometrie e delle manovre che la pratica vuole vengano attuate per regolarne la forma e quindi le prestazioni. Infine, grazie ad esperimenti condotti sempre in galleria del vento, si è potuto riscontrare che anche nelle andature in cui si ricorre ad una combinazione spinnaker – randa in generale il primo non trae un danno dalla presenza del secondo, purché ovviamente regolati opportunamente.

1.INTRODUZIONE

Lo studio della aerodinamica delle vele, e del loro funzionamento, ha alle spalle una vasta letteratura. Il supporto fornito a livello teorico dalla teoria delle ali è stato importante. Nell'ultimo secolo tale studio è stato condotto con maggiore intensità grazie ad una tecnologia sempre più evoluta che ha consentito di fornire strumenti di analisi via via meno approssimativi.

Le vele utilizzate nelle andature portanti, pur mantenendo la caratteristica di corpi portanti, presentano delle specificità che la teoria storicamente utilizzata nello studio della aerodinamica delle vele, mutuata come detto dalla teoria delle ali, risolve solo parzialmente, vista la complessità dei fenomeni che le circondano. Grazie al recente sviluppo tecnologico e al notevole impulso fornito dagli eventi di Coppa America l'interesse per tali vele è cresciuto con continuità. Fino alla fine dello scorso secolo ben poco è stato pubblicato, innanzitutto appunto per limiti posti dalla tecnologia disponibile fino a quel momento; si aggiunge che gran parte della letteratura prodotta fino ai primi anni del 2000 non era disponibile per la natura privata degli studi condotti.

La tesi ha come oggetto le vele utilizzate nelle andature portanti in imbarcazioni ad armo bermudiano o Marconi. Esse vengono genericamente definite *spinnaker*, assumendo poi ulteriori classificazioni in funzione dell'intervallo di angoli al vento a cui sono dedicate.

È fondamentale premettere che per una vela, intesa come aggregato di profili aerodinamici, per l'ampiezza dell'intervallo di valori che l'angolo al vento apparente di un'imbarcazione in navigazione può assumere, gli obiettivi aerodinamici sono molteplici e variano con il variare dell'andatura. Questo, assieme al fatto che il suo bordo di ingresso (come evidenziato nel capitolo 4) deve accogliere il vento apparente consentendo una limitata tolleranza di angoli rispetto alla tangente di ingresso (per poter garantire la produzione di portanza), porta come conseguenza il fatto che una forma ben definita sul piano teorico non garantisca efficacia in tutto l'intervallo di valori dell'angolo di attacco che i profili dovrebbero affrontare. Ciò impone la necessità di garantire la disponibilità di una varietà di forme che consentano quindi di operare in ogni andatura con la

massima efficacia; i due grandi ambiti sono definiti dalle andature al vento e dalle andature portanti.

La tesi parte dalla descrizione del compito che le vele, combinate in un piano velico, sono chiamate ad assolvere nelle imbarcazioni con armo bermudiano o Marconi. Passa poi attraverso una descrizione dei meccanismi alla base del funzionamento di una vela intesa come sistema fisico, per riscontrare la assimilabilità ad un corpo portante e quindi la possibilità di caratterizzarne il funzionamento e le geometrie mediante la teoria delle ali, pur tenendo conto delle specificità che il campo operativo di una vela possiede rispetto quelli di altre tipologie di profili. Per arrivare infine ad affrontare la questione delle vele nelle andature portanti, caratterizzate da un comportamento più vicino ad una forma tozza piuttosto che ad una forma aerodinamica (*airfoil*), ovvero le motivazioni aerodinamiche che giustificano le loro forme di progetto, le forme operative che assumono in conseguenza delle caratteristiche del flusso d'aria e del tipo di distribuzione della pressione attorno ad esse ed il supporto a riscontro delle scelte normalmente attuate nella regolazione di tali vele.

In questo ambito i contributi principali arrivano dai lavori di Razembach R.C. e Mairs C. pubblicati nel 1999 e dedicati allo studio mediante galleria del vento del funzionamento delle vele nelle andature portanti, da quelli condotti da Lasher W. C. pubblicati nel 2005 e nel 2008 , da quelli condotti da Viola I. M., assieme a Flay R. pubblicati dal 2009 al 2012 e con cui ha indagato attraverso metodologie sperimentali diverse caratteristiche aerodinamiche degli spinnaker, ed assieme a Fossati F. prima e Bartesaghi S., Van Renterghem T. e Ponzioni R. poi, pubblicati nel 2012 e nel 2014 e con cui ha affrontato lo studio di tali vele mediante simulazione con tecniche numeriche, per finire con quelli condotti da Deparday, sfociati nel 2016 in una tesi di dottorato e con i quali ha affrontato lo studio di *spinnaker*, sia mediante metodologie sperimentali sia mediante tecniche numeriche, arrivando anche a tener conto degli effetti prodotti dalla elasticità del tessuto con cui questo tipo di vela normalmente viene realizzato e che influisce fortemente sulla sua forma operativa.

Il principale obiettivo di questa tesi è quello di fornire una cornice teorica di riferimento a supporto di questa particolare tipologia di vele denominate *spinnaker*, dedicate in modo specifico alle andature portanti e che suscitano un enorme fascino nei velisti e mettono a dura prova le competenze dei velai. Chi scrive ritiene infatti che in letteratura manchi la cornice descritta, ovvero una sintesi teorica che anticipi questioni come la regolazione di tali tipi di vele per rispondere piuttosto a domande quali “ci sono motivazioni aerodinamiche che portano gli *spinnaker* a possedere forme fortemente tridimensionali e quali?”, “quali caratteristiche possiede il flusso attorno ad uno *spinnaker*, quali configurazioni il campo di pressione?” ovvero “vi sono riscontri per cui certe regolazioni sono più efficienti di altre?”.

2.FISICA DELL'IMBARCAZIONE A VELA

2.1 Premessa

L'obiettivo di questo capitolo è inquadrare il ruolo delle vele, combinate nel piano velico di un'imbarcazione a vela, definendo lo scopo primario che sono chiamate a perseguire. Il tutto utilizzando una descrizione semplificata del modello fisico dell'imbarcazione a vela.

Vengono quindi riportate le nozioni fondamentali della meccanica di un'imbarcazione a vela, con armo bermudiano o Marconi, con riferimento all'interazione con i due fluidi da cui è circondata, concentrando l'attenzione sulla parte relativa alla interazione con l'aria.

2.2 Nozioni di fisica dell'imbarcazione a vela

L'imbarcazione a vela è un sistema fisico complesso che interagisce simultaneamente con due fluidi, ed è proprio grazie alla simultaneità dell'interazione che scaturisce la possibilità di realizzare un equilibrio dinamico. Dall'interazione dell'imbarcazione con l'aria in moto relativo la prima estrae la forza che ne consente la propulsione, oltre ad altre componenti che invece svolgono un'azione non utile.

L'azione del vento apparente sulle parti dell'imbarcazione esposte ad esso, ed in particolare sulle vele, produce in sintesi una forza aerodinamica risultante F_A , alla quale queste concorrono nettamente (e viene trasmessa alla imbarcazione attraverso l'armo). Dal punto di vista teorico tale forza si può pensare applicata direttamente ad un singolo punto del piano velico, chiamato Centro Velico o Centro Aerodinamico degli Sforzi. È possibile assumere che tale punto corrisponda al centro geometrico del piano velico, anche se in realtà la reale posizione è mutevole e di difficile collocazione essendo legata a più variabili.

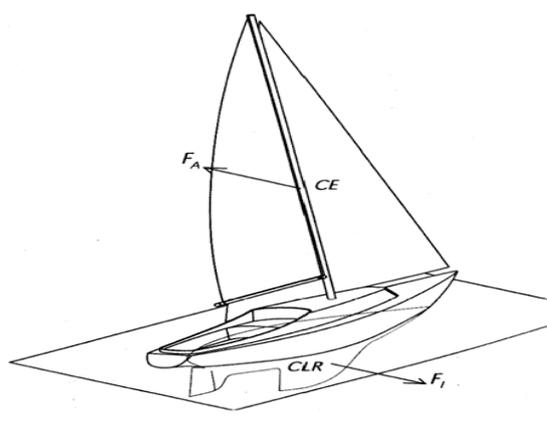


Fig. 2.1: equilibrio dinamico tra le risultanti delle forze agenti sull'imbarcazione grazie alla simultanea interazione con acqua e aria - da [Fossati, 2009]

Nella figura successiva viene descritto il sistema delle forze agenti su di una imbarcazione a vela con armo Marconi o Bermudiano in navigazione, rispettivamente vista dall'alto (a), nel piano prua-poppa (di profilo) (b) e nel piano ortogonale a quest'ultimo (di prospetto) (c), sulla quale è imperniato un sistema di riferimento x-y-z.

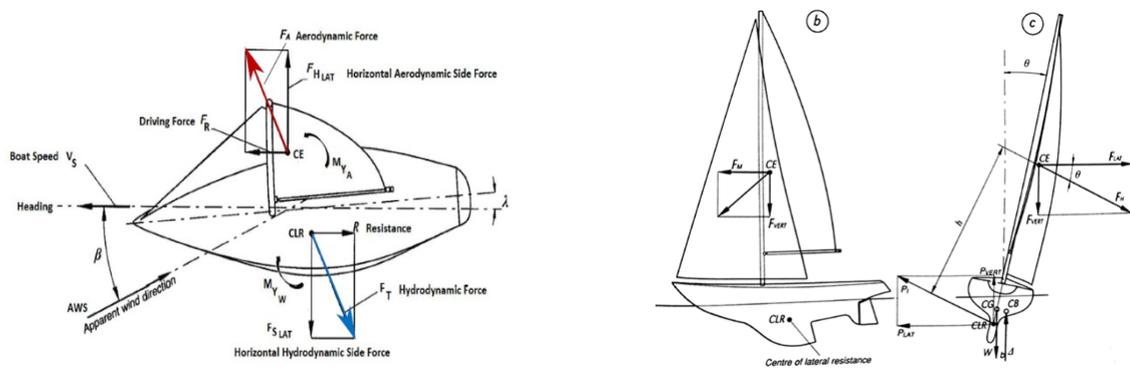


Fig. 2.2: panoramica delle forze scaturite dalla interazione con il vento che agiscono su di una imbarcazione a vela in navigazione - da [Fossati, 2009]

Osservando la fig. 2.2 a) si nota che la forza aerodinamica F_A consente alla imbarcazione in navigazione di disporre, sul piano parallelo al piano di

galleggiamento, di una spinta rappresentata dal vettore F_R (*driving force*), detta spinta all'avanzamento. Questa è la componente utile nel moto della imbarcazione. Oltre all'intervento di forze di natura statica (es. peso e spinta al galleggiamento), le altre componenti vengono equilibrate prevalentemente dalle componenti della forza idrodinamica generata dall'interazione dell'acqua con l'opera viva (prevalentemente chiglia ed appendici immerse), tra le quali vi è anche quella che si oppone al moto, R . Particolare attenzione va posta alla componente della forza aerodinamica denominata F_{LAT} ed evidenziata nella Fig. c): essa risulta particolarmente intensa nelle andature al vento ed è la causa del fenomeno dello scarroccio, per cui in tali andature la rotta vera non corrisponde alla direzione individuata dall'asse longitudinale della imbarcazione, rispetto alla quale forma un angolo (angolo di scarroccio λ). Poiché un'imbarcazione a vela deve sviluppare le medesime prestazioni su entrambe le mura, gli elementi dell'opera viva, ai quali viene attribuito il compito di sviluppare la forza idrodinamica menzionata, devono essere simmetrici; quindi, per poterla generare devono lavorare in tali circostanze con un angolo di attacco diverso da zero, garantito dallo scarroccio dell'imbarcazione (generalmente inferiori al valore di 5°).

Da tutto ciò è possibile comprendere come funziona quindi un'imbarcazione a vela: in navigazione forze di natura idrodinamica bilanciano forze di natura aerodinamica e il suo moto è governato dal raggiungimento di una condizione di equilibrio dinamico tra loro.

Le forze di natura aerodinamica, grazie alla particolare forma che le vele che costituiscono il piano velico assumono durante la navigazione, pur variabile in relazione alla andatura tenuta dalla imbarcazione stessa, sono riconducibili ad una forza aerodinamica risultante che, grazie alle vele, risulta dotata di una retta di azione nettamente diversa da quella di provenienza del vento apparente; è proprio questa la peculiarità aerodinamica che contraddistingue le vele rispetto alle altre componenti della porzione emersa della imbarcazione, che generano prevalentemente resistenza.

Le vele, quindi, sono corpi progettati per assumere, in condizioni operative, una forma tale da consentire lo sviluppo di una forza aerodinamica utile per il sistema “imbarcazione”, da consentire quindi all’imbarcazione di disporre di un sistema da cui estrarre potenza per la propulsione in tutte le andature che essa può assumere.

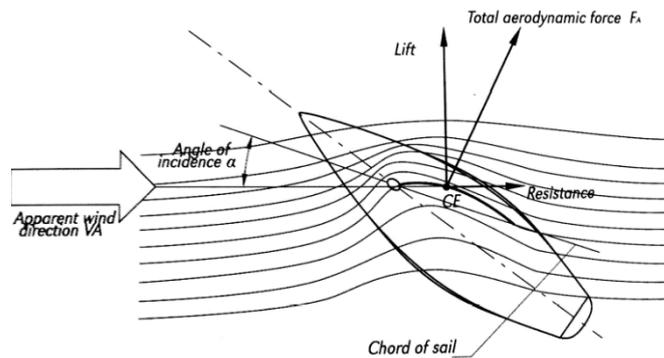


Fig. 2.3: interazione del vento con la sola randa a riva in una imbarcazione, con l’evidenziazione delle due componenti caratteristiche della forza aerodinamica sviluppata- da [Fossati, 2009]

Nella figura riportata di seguito vengono rappresentate le andature che le imbarcazioni a vela possono assumere (*points of sailing*), precisando che l’andatura è definita dall’angolo che la rotta forma con il vento reale.

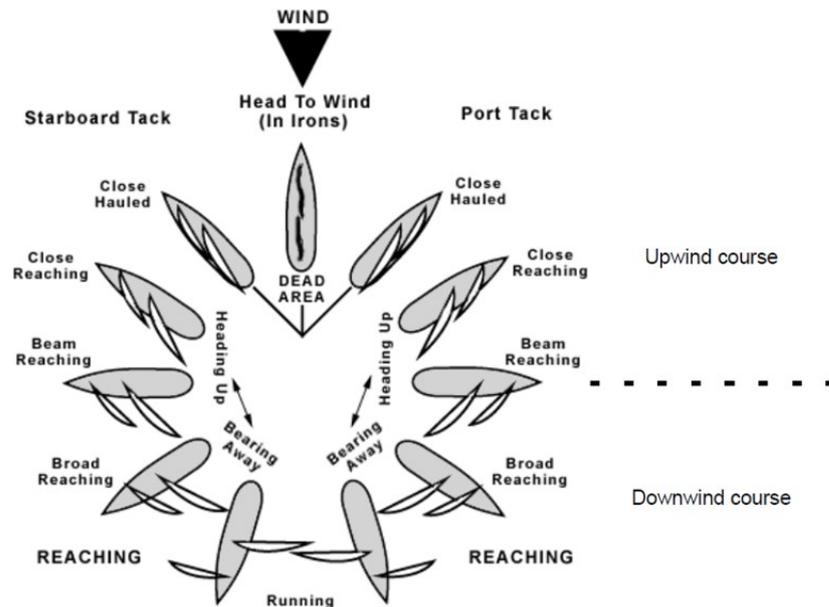


Fig. 2.4: descrizione delle andature di un'imbarcazione a vela – da sites.google.com/site/princetonsailing.

Le andature portanti sono quelle contrassegnate da un angolo rispetto al vento reale superiore ai 90° (traverso).

2.3 Conclusioni

Da questo capitolo emerge che alle vele, combinate nei piani velici che caratterizzano le imbarcazioni, è lasciato il compito specifico di generare una forza utile per l'imbarcazione, ovvero in grado di mettere a disposizione lungo la direzione del moto del sistema fisico "imbarcazione" una componente, denominata spinta all'avanzamento, che garantisca la propulsione. Fornire spinta all'avanzamento rappresenta quindi il compito delle vele e dei piani velici, e la massimizzazione del valore di tale spinta costituisce l'obiettivo primario che sono chiamate a realizzare.

Tale compito è consentito dal fatto che esse posseggono forme tali da garantire lo sviluppo di una forza aerodinamica, ovvero generata dal vento apparente che le investe, con retta di azione diversa da quella di provenienza del vento apparente e con una componente sensibile lungo la direzione ortogonale a quella citata.

3. ELEMENTI DI FLUIDODINAMICA

3.1 Premessa

In questo capitolo vengono riepilogati alcuni concetti base della fluidodinamica, con particolare riguardo all'interazione fra un fluido ed un corpo, tra i quali vi sia un moto relativo, per descrivere i fenomeni coinvolti e gli effetti che ciascuno elemento produce sull'altro, e per arrivare a sottolineare l'importanza della forma del corpo al fine di ottenere sullo stesso un effetto desiderato.

Lo scopo è quello descrivere i fenomeni che consentono ad un corpo immerso in un fluido in moto di veder svilupparsi su di esso una forza non esclusivamente diretta lungo la direzione del moto del fluido, ovvero che possa generare un effetto voluto. Questo consente di disporre degli elementi necessari per descrivere, nel capitolo successivo, il meccanismo di funzionamento di una vela, cioè il meccanismo attraverso il quale è in grado di generare quella forza aerodinamica utile di cui si è parlato nel capitolo precedente.

3.2 Interazione tra fluidi ed oggetti solidi in moto relativo

Un fluido può essere considerato come un insieme di particelle; una volta in movimento la singola particella tratterà una scia (traccia) detta linea di flusso.

Se il moto del fluido è stazionario, non turbolento, le linee di flusso non variano nel tempo e nello spazio; in codeste condizioni il moto del fluido può essere rappresentato dalle menzionate linee di flusso, contraddistinte dal fatto che in ogni loro punto la tangente ad esse rappresenta la direzione del vettore velocità del fluido in movimento in quel punto.

Si dice che il flusso sia laminare quando la velocità di tutte le particelle è la stessa: in questo caso le linee di flusso sono parallele.

Se in un flusso laminare viene posto un oggetto, la sua presenza modifica il campo di moto deviando le linee di flusso lungo ciascun lato dell'oggetto cosicché il flusso, non potendo penetrarlo, finisce per circondarlo.

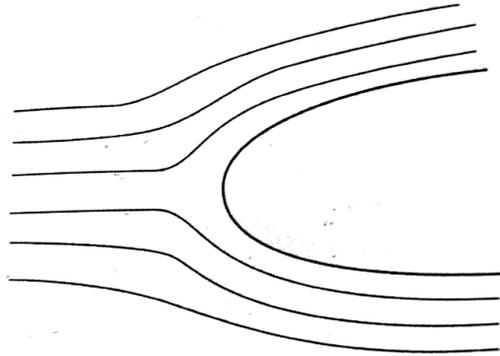


Figura 3.1 linee di flusso – da [Fossati, 2009]

Su ciascun punto della superficie dell'oggetto agisce perpendicolarmente ad essa una pressione normale. Questa viene chiamata *Normal Pressure Drag* o Pressione Dinamica, per differenziare tale condizione da quella in cui la superficie del corpo risulta sottoposta alla sola pressione esercitata dall'azione della gravità (condizione di assenza di flusso).

La Pressione Dinamica corrisponde alla differenza di pressione statica, rilevabile in ogni punto della superficie del corpo, rispetto alla condizione di assenza di flusso, differenza dovuta appunto alla variazione della velocità del flusso e spiegabile attraverso la legge di conservazione dell'energia (Principio di Bernoulli).

Ad eccezione del punto di ristagno, su tutti gli altri punti della superficie del corpo il modulo della Pressione Dinamica può essere espresso attraverso la seguente formula

$$p = \frac{1}{2}C_{RP}(s)\rho V_{\infty}^2$$

dove V_{∞} è la velocità del flusso indisturbato (cioè delle particelle che si approssimano al corpo) nella zona in cui il campo di moto non risente ancora della presenza del corpo, s è l'ascissa che indica la posizione prescelta sulla superficie del corpo rispetto al punto di incidenza nella direzione del moto e $C_{RP}(s)$ è il coefficiente chiamato Coefficiente di Pressione Dinamica (*Normal*

Pressure Drag Coefficient), il cui valore muta lungo la superficie del corpo: normalmente $C_{RP}(s) < 1$, e può assumere valori negativi testimoniando la presenza di una distribuzione di valori di pressione sulla superficie del corpo minori di quella del flusso indisturbato (*suction*), mentre come già visto assume il valore 1 nel punto di stagnazione. Se ipotizziamo che il corpo in questione sia una vela in condizioni operative ed immaginiamo di integrare la Pressione Dinamica sulla totalità della sua superficie otteniamo la risultante delle forze aerodinamiche fonte della spinta all'avanzamento cui è sottoposta la imbarcazione sui cui si trova a riva.

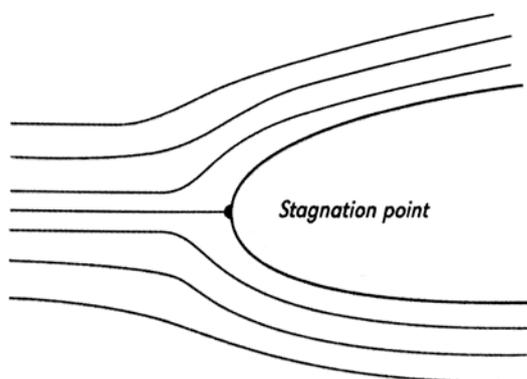


Figura 3.2 punto di ristagno – da [Fossati, 2009]

Nella interazione tra un oggetto solido ed un fluido in movimento è necessario considerare un altro effetto, generato dalla viscosità del fluido (proprietà di tutti i fluidi reali).

In ogni punto della superficie dell'oggetto agisce tangenzialmente uno sforzo di taglio chiamato *Skin Friction Drag* (resistenza d'attrito) il cui modulo è definito come segue

$$\tau = \frac{1}{2}C_{RA}(s)\rho V_{\infty}^2$$

dove s rappresenta sempre l'ascissa che indica il punto prescelto, V_{∞} è sempre la velocità del flusso indisturbato e $C_{RA}(s)$ è un coefficiente chiamato *Skin Friction Drag Coefficient*.

Lo sforzo di taglio distribuito sulla superficie del corpo è conseguenza della resistenza di attrito che si sviluppa nello strato limite attraverso le forze tangenziali che agiscono tra la superficie del corpo ed il limite del flusso indisturbato.

In figura 2.3 viene descritta l'evoluzione dello strato limite di un flusso laminare bidimensionale che scorre su di una lamina piatta. In essa emerge che lo strato limite evolve con caratteristiche laminari a partire dal bordo di ingresso della lamina, a partire dal quale comincia ad emergere, e cresce in dimensioni fino a trasformarsi, da un certo punto in poi lungo lo sviluppo della lamina (Punto di Transizione), dipendente dal Numero di Reynolds, in turbolento, con lo sviluppo al proprio interno di vortici che sostituiscono le precedenti linee di flusso parallele.

Ovviamente lo *Skin Friction Drag* sulla porzione di superficie contraddistinta da uno strato limite laminare sarà inferiore rispetto a quello che contraddistingue la parte restante.

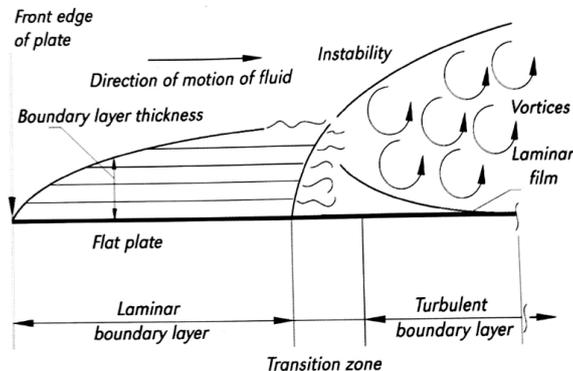


Figura 3.3 strato limite su di una lamina piatta– da [Fossati, 2009]

La somma delle due componenti dinamiche descritte dà la totale azione dinamica nel punto della superficie (fig. 3.4).

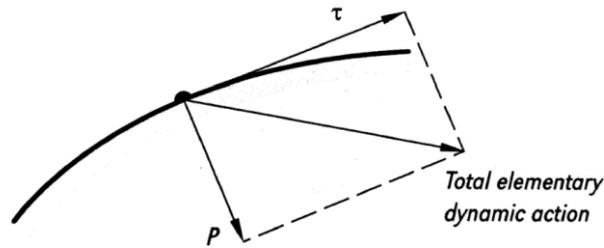


Figura 3.4 azioni dinamiche elementari - da [Fossati, 2009]

A partire dal punto di ristagno all'interno del fluido in corrispondenza alla superficie del corpo per tutto il suo sviluppo cresce ed evolve lo strato limite; esso inizialmente risulta laminare per poi trasformarsi, crescendo, in turbolento. Se nel proprio moto relativo il fluido scorrendo lungo la superficie del corpo incontra una brutale chiusura di questa vi è la possibilità che lo strato limite si stacchi dalle superfici generando vortici e turbolenza da quel punto. Il fenomeno si chiama *Vortex Shedding* ed il punto della superficie da cui inizia si chiama Punto di Separazione.

In generale, la separazione dello strato limite che si genera sulle superfici di un corpo immerso in un flusso avviene quasi sempre. Ciò che fa la differenza è l'entità della superficie, nella direzione del flusso, coinvolta dal fenomeno. Se i profili che costituiscono il corpo e che questi "offre" al fluido in moto relativo mantengono per la grande parte della propria lunghezza uno strato limite attaccato siamo in presenza di forme aerodinamiche bidimensionali dette *airfoil*; in alternativa di forme tozze.

Calcolando la risultante di tutte le azioni dinamiche che si sviluppano sulla superficie di un corpo solido immerso in un fluido in moto relativo (azioni ortogonali e di taglio) otteniamo una forza risultante F denominata Forza Dinamica Totale.

$$F = \frac{1}{2} \rho C_F A V^2$$

Tale forza normalmente ha una direzione di applicazione diversa da quella del moto indisturbato, e in funzione del punto di applicazione su cui il sistema di azioni dinamiche elementari è stato ridotto, questa può anche generare un momento

$$M = \frac{1}{2} \rho C_M A L V^2$$

È importante sottolineare quanto la forma del corpo risulti fondamentale in quanto contribuisce pesantemente a condizionare il sistema di forze che si sviluppano sulla sua superficie e quindi intensità e direzione della forza e del momento risultanti agenti sul corpo stesso. In generale la forza risultante ha una direzione diversa da quella che caratterizza il flusso indisturbato.

3.3 Conclusioni

Sono stati descritti in forma semplificata alcuni dei fenomeni che intervengono nella interazione tra un fluido ed un corpo in movimento tra di loro. Il campo di moto viene modificato dalla presenza del corpo mentre quest'ultimo vede distribuite sulla propria superficie azioni dinamiche dovute alla combinazione di un campo di pressione, diversa in generale da quella del fluido indisturbato, e di un campo di sforzi di taglio. Tali azioni dinamiche possono essere ricondotte ad una forza risultante, applicata ad un punto, e ad un momento, in funzione del punto menzionato. Tali grandezze dipendono principalmente dalla forma del corpo che interagisce e in generale la forza risultante ha una direzione diversa da quella del moto relativo, ovvero non si riduce alla sola resistenza.

4. ASPETTI GENERALI DELL’AERODINAMICA DELLE VELE

4.1 Premessa

Si è fin qui visto che le vele, combinate in un piano velico, costituiscono gli organi propulsivi delle imbarcazioni a vela; cioè è ad esse che viene lasciato il compito, come obiettivo superiore, di sviluppare e di fornire alla imbarcazione la spinta necessaria per poter avanzare percorrendo la rotta prevista. Inoltre, si è visto che un corpo che interagisce con un fluido con il quale si trova in moto relativo subisce e sviluppa su di esso, grazie alla interazione tra i due, un sistema di forze riducibili ad una risultante la cui intensità e direzione dipendono anche dalla forma del corpo, con la direzione menzionata che può anche essere diversa da quella del flusso indisturbato.

In questo capitolo viene spiegato come la spinta all’avanzamento fornita dalle vele tragga origine dalla interazione che le prime hanno, nel loro moto relativo rispetto all’aria, con il vento apparente, e dalla loro capacità di “estrarre” la potenza necessaria per fornire, attraverso l’armo, la propulsione dell’imbarcazione lungo la rotta prescelta. Tale capacità deriva dagli effetti prodotti dalla interazione vento apparente - vele e dalla forma che esse assumono nella operatività così da ottenere lo sviluppo di una forza aerodinamica risultante utile, in grado di esprimere quanto richiesto.

Lo scopo di questo capitolo è di descrivere, utilizzando le nozioni di fluidodinamica riportate nel capitolo precedente, i meccanismi che regolano il funzionamento di una vela e come sia possibile ottenere una forza utile, rappresentare le grandezze caratteristiche utilizzate per descriverne il comportamento, evidenziare le caratteristiche del flusso attorno ad essa nell’operatività, ed infine elencare i parametri geometrici impiegati per definirne la forma.

Questi aspetti risultano fondamentali per poter entrare successivamente nell’ambito del comportamento di una vela nelle andature portanti.

4.2 Interazione tra vento e vele

Per descrivere il meccanismo di funzionamento delle vele possiamo ricorrere, almeno in prima approssimazione, ai meccanismi che contraddistinguono il funzionamento di un'ala.

Nello specifico, possiamo dire che quando una vela, nella sua forma operativa, incontra un flusso d'aria lo deflette e, grazie al legame tra pressione e velocità nel flusso (legge di Bernoulli), sviluppa sull'intera superficie innanzitutto una distribuzione puntuale di pressione, corrispondente alla pressione dinamica, avente la particolarità che al vento si ha un'area di debole alta pressione (rispetto al valore che la pressione dell'aria assume in condizioni di flusso indisturbato, ovvero in assenza di flusso), mentre sulla superficie sottovento un'area di depressione.

Per chiarire quanto detto, in [Fossati, 2009] viene proposto il ricorso ad una rappresentazione visiva dei fenomeni descritti riferendosi al generico profilo ottenuto sezionando con un piano parallelo al piano di galleggiamento una vela di prua a riva ed isolata in una imbarcazione in navigazione di bolina; la rappresentazione menzionata è stata ottenuta mediante simulazione numerica, partendo dall'insieme delle linee di flusso visualizzate, per arrivare, utilizzando una mappatura in scala cromatica, ai valori assunti dalla grandezza

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho V_\infty^2} = 1 - \left(\frac{V}{V_\infty} \right)^2$$

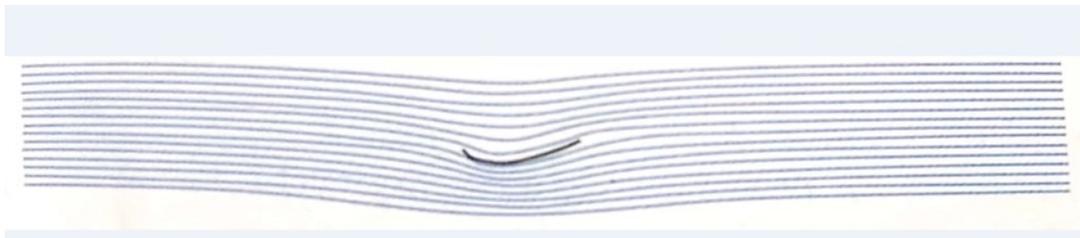


Figura 4.1 - da [Fossati, 2009]



Figura 4.2 mappatura di $C_p = \frac{p-p_\infty}{\frac{1}{2}\rho V_\infty^2}$ - da [Fossati, 2009]

Nella formula rappresentata V e p sono rispettivamente la velocità e la pressione del flusso d'aria (vento) nel generico punto della superficie del profilo, V_∞ e p_∞ sono rispettivamente la velocità e la pressione del flusso d'aria indisturbato, il termine $\frac{1}{2} \rho V_\infty^2$ è la pressione dinamica nel punto di ristagno.

Quindi le azioni aerodinamiche che si sviluppano su di una vela a causa dell'interazione con il vento sono legate innanzitutto al differenziale di pressione che si viene a creare tra aree sopravvento e aree sottovento, chiamato in breve risucchio (*suction*) in quanto causa un'aspirazione verso il lato sottovento della vela stessa.

Gli effetti prodotti su di una vela dalla pressione dinamica distribuita su di essa possono essere valutati con l'impiego dell'integrale della pressione stessa sull'intera superficie investita dal flusso. Richiamando il profilo ottenuto dalla generica sezione visto in precedenza, in ogni punto del quale agisce ortogonalmente ad esso una pressione, positiva sopravvento e negativa sottovento, si può dire che complessivamente si ha sul profilo in questione un effetto rappresentabile da una singola forza aerodinamica risultante diretta verso la regione sottovento e applicata in un punto del profilo la cui posizione varia in

funzione della velocità e dell'angolo di attacco del flusso. Questa è la particolarità che caratterizza i profili delle vele rispetto ad altri corpi, con altre forme.

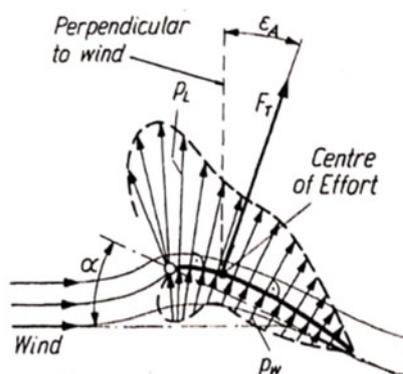


Figura 4.3 distribuzione della pressione lungo il profilo ottenuto dalla sezione generica di una vela immersa in un flusso bidimensionale nel quale viene riprodotta l'andatura di bolina - da [Marchaj, 1996]

La posizione esatta di tale punto è di difficile definizione e per convenzione, nel caso tridimensionale, viene fatta coincidere con il centro geometrico della vela o del piano velico, e chiamato *centro velico* o *centro dello sforzo*.

All'azione normale esercitata sulla superficie della vela dalla pressione è poi necessario aggiungere gli effetti prodotti dalla viscosità dell'aria.

Rispetto ad altri profili che sviluppano sistemi di forze simili (per esempio i profili alari), i profili ottenuti dalle sezioni di una vela presentano importanti differenze.

Innanzitutto, i profili che costituiscono una vela in condizioni reali si trovano potenzialmente a dover operare con valori dell'angolo di attacco contenuti in un intervallo più ampio di quello che contraddistingue i valori dell'angolo di attacco dei profili delle ali o di altri corpi portanti, per i quali normalmente tale angolo può subire nella operatività variazioni minori. Ciò è strettamente collegato al fatto che non sia possibile disporre in navigazione di un'infinità di forme e conseguentemente procedere alla sostituzione della vela ad ogni minima variazione dell'angolo al vento apparente.

Inoltre, rispetto alle ali le vele posseggono queste ulteriori differenze

- dovendo lavorare con il vento che può “attaccare” entrambe le facce consentendo, quindi, all’imbarcazione di navigare su entrambe le mure, le vele vengono realizzate con materiali flessibili. Il tessuto con cui vengono costruite si deforma sotto carico, in quanto non resiste a compressione; quindi, la loro forma non è univocamente determinata ma varia sia con il variare dell’intensità del vento sia con l’intervento di chi è addetto alla loro regolazione (la deformazione della vela modifica l’interazione aerodinamica e quindi le distribuzioni del carico di pressione su di essa; il differente carico aerodinamico produrrà a sua volta nuove e diverse deformazioni, e così via). Il problema descritto si chiama *interazione fluido-struttura*.
- le vele operano all’interno dello strato limite che il vento presenta a causa della viscosità dell’aria. Quindi il vento apparente che incontra la vela nel proprio sviluppo verticale (altezza o apertura) non è costante ma varia sia nell’angolo di attacco che nella intensità.
- Il tessuto con cui le vele vengono realizzate può anche essere poroso e può avere una superficie irregolare.

Per questi motivi innanzitutto la caratterizzazione delle vele non è semplice, e non è possibile, per loro, ricorrere a risultati sistematici di validità generale che consentano di avere strumenti utili per la loro progettazione, come invece avviene con le ali e con le forme aerodinamiche che ne sono alla base e che ne consentono lo sviluppo.

Inoltre, poiché le vele vengono realizzate con materiali flessibili esse posseggono spessori piccoli, ed i profili ottenuti sezionandole posseggono spessori trascurabili rispetto alle altre dimensioni: quindi non è possibile ricorrere alle tradizionali forme aerodinamiche per corpi portanti (es. NACA).

Le forme aerodinamiche a cui fare riferimento sono quelle a spessore sottile, interpretabili come linee medie di quelle tradizionali destinate a profili aerodinamici a spessore trascurabile.

Nella figura 4.4 è rappresentata una forma per profili sottili in un contesto di flusso bidimensionale con i parametri geometrici caratteristici; essa nello specifico

rappresenta la forma associata al profilo ottenuto sezionando una vela isolata ad una altezza generica.

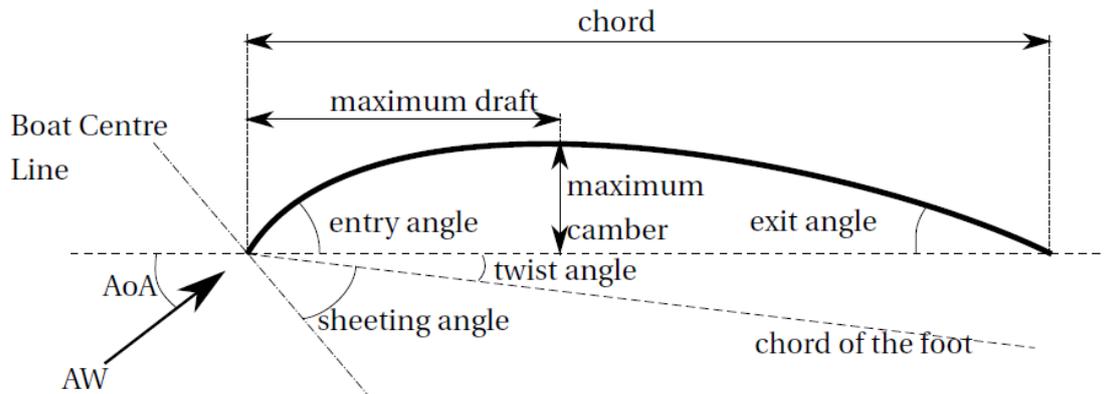


Figura 4.4 grandezze geometriche caratteristiche di un profilo sottile - da [Depardaj, 2016]

Di seguito i parametri geometrici caratteristici di una tipica forma aerodinamica per profili sottili

- la corda (*chord*): è il segmento di retta che unisce la traccia del bordo di ingresso e quella del bordo di uscita
- la linea mediana (*mean line*) o linea di curvatura (*camber line*): corrisponde alla forma del profilo, che si riduce ad essere una linea curva.
- Il grasso (*camber ratio*): il valore, espresso in rapporto alla corda ed in termini percentuali, della massima distanza tra il profilo e la corda
- la posizione del grasso (*maximum draft*): il valore, espresso in rapporto alla corda ed in termini percentuali, della posizione del grasso rispetto alla traccia del bordo di ingresso
- l'angolo di attacco (*AoA*): angolo con cui il flusso (bidimensionale) incontra la corda
- angoli di ingresso e uscita: angoli tra la corda e le tangenti al profilo rispettivamente in corrispondenza al bordo di ingresso e al bordo di uscita.

Nel progettare una vela il velaio utilizza e valorizza i parametri descritti per le diverse sezioni lungo l'apertura alare della vela.

I primi studi sulle lamine sottili curve dal punto di vista aerodinamico furono condotti da Eiffel mediante esperimenti effettuati in galleria del vento. Studi effettuati nel tentativo di caratterizzare e classificare forme aerodinamiche per profili sottili.

Nella figura 4.5 è riportato il diagramma polare, ottenuto da Eiffel, dei coefficienti di portanza e di resistenza al variare dell'angolo di attacco di lamine rettangolari 9x15 cm e con diversi valori del grasso ($1/7$, $1/13,5$, $1/20$).

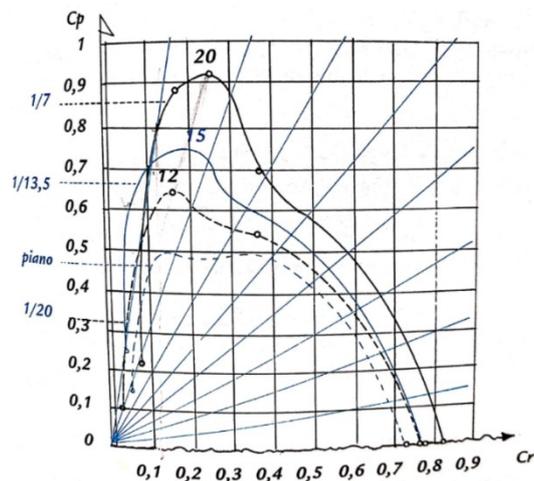


Figura 4.5 diagrammi polari di lamine 90 x 15 cm con curvature diverse, ottenute da Eiffel - da [Cheret, 2003]

Nella figura 4.6 invece sono rappresentate le curve delle grandezze menzionate in funzione dell'angolo di attacco a lamine rettangolari 9x15 cm con grasso pari a $1/13,5$ con diverse ripartizioni della curvatura.

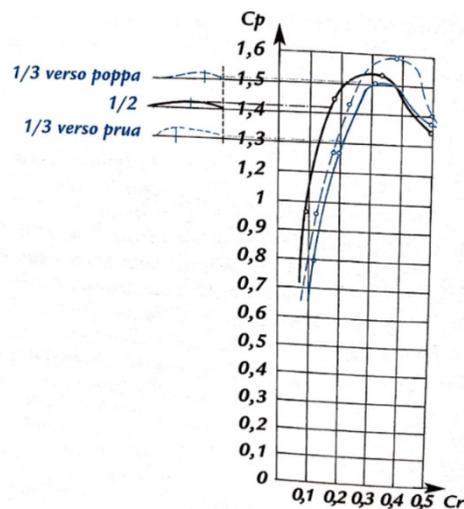


Figura 4.6 diagrammi polari di lamine 90 x 15 cm. con valori diversi della posizione del grasso - da [Cheret, 2003]

Una delle caratteristiche principali che le sagome per profili sottili presentano è quella per cui sono in grado di sviluppare portanza anche per angoli di attacco nulli.

4.2 Aerodinamica della vela: aspetti generali

Partendo dal presupposto che una vela investita da un flusso d'aria sia costituita da una sovrapposizione di sezioni parallele al piano di galleggiamento, e quindi di profili con spessore trascurabile che, grazie al campo di moto che si instaura attorno di essi, vedono su di essi lo sviluppo di azioni dinamiche lungo la direzione del flusso, in parte disposte ortogonalmente e dirette da sopravvento a sottovento ed in parte tangenzialmente, possiamo pensare che una vela in condizioni operative nel suo complesso possa considerarsi un **corpo portante**, ovvero un oggetto dotato di una forma in grado di generare attorno a se campi di moto e di pressione che determinano azioni dinamiche sulla sua superficie (rappresentati dalla pressione dinamica e dagli sforzi di taglio legati alla viscosità del fluido) che complessivamente fanno mantenere la caratteristica sua forma

concava e che sono risolvibili in una componente R diretta lungo la direzione del vento (resistenza o *drag*) ma anche in una componente P di intensità significativa e diretta ortogonalmente alla direzione del vento (portanza o *lift*).

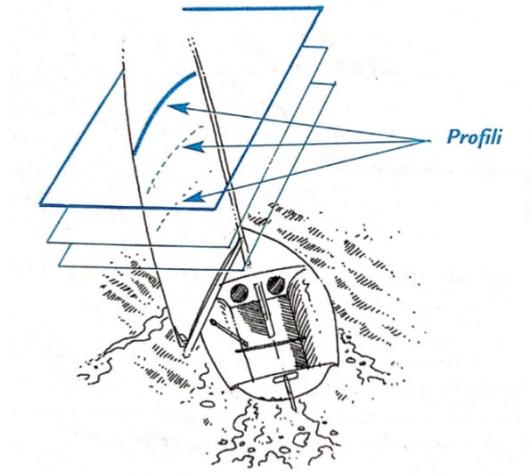


Figura 4.7 vela come sovrapposizione di più profili - da [Cheret, 2003]

Tali forze possono essere espresse nel modo seguente:

$$R = \frac{1}{2} \rho C_R S_v V^2$$

$$P = \frac{1}{2} \rho C_P S_v V^2$$

dove ρ rappresenta la densità dell'aria, S_v l'area della superficie della vela e V la velocità del vento apparente; C_R e C_P sono rispettivamente il coefficiente di resistenza ed il coefficiente di portanza della vela (o del piano velico), e dipendono dalla forma aerodinamica che caratterizza la vela (o il piano velico) e dall'angolo di attacco con cui i profili vengono investiti. Per una determinata vela o piano velico essi dipendono solo dall'angolo di attacco.

Un aspetto interessante che riguarda le vele dal punto di vista aerodinamico è che essendo realizzate in materiale flessibile propongono profili che non

posseggono una forma univocamente definita in quanto non posseggono appunto rigidità, e quindi forma ed angolo di attacco subiscono gli effetti delle regolazioni e delle condizioni d'uso. Addirittura, possiamo dire che esistono solo in condizioni operative.

Altro aspetto importante già evidenziato è che le vele, per la varietà di andature che un'imbarcazione può tenere, possono lavorare, con i profili che le definiscono, ad angoli di attacco piccoli, con i relativi profili che si comportano come forme aerodinamiche contraddistinte prevalentemente da flussi laminari, ovvero ad angoli di attacco grandi, con ampie zone di distacco del flusso, dove i profili assumono il comportamento di forme tozze.

Le figure 4.8 e 4.9 aiutano a capire quanto descritto; sintetizzano in forma grafica i risultati riportati in [Fossati, 2009] e ottenuti da test in galleria del vento studiando le caratteristiche aerodinamiche di due diversi piani velici di una imbarcazione con armo Marconi, simulandone rispettivamente la navigazione di bolina (angolo al vento apparente pari a 22°), condotta con genoa e randa, e in andatura portante (angolo al vento apparente pari a 105°), affrontata con spinnaker asimmetrico e randa. Ciascuna di esse riporta, per le specifiche condizioni, le rispettive forze sviluppate in termini di portanza P , resistenza R , componente lungo l'asse longitudinale della imbarcazione F_x e componente ortogonale a quest'ultima F_y .

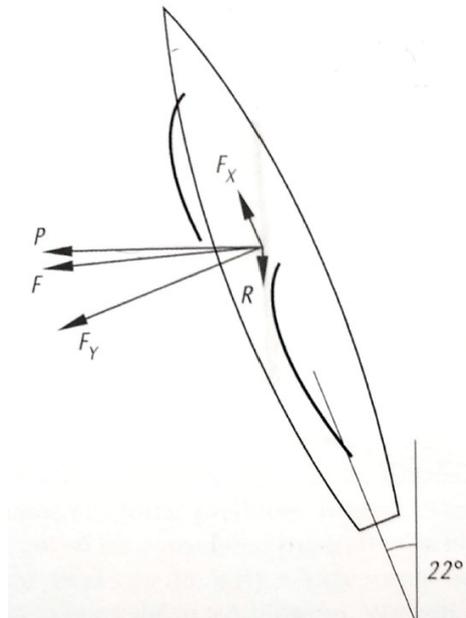


Fig. 4.8 - da [Fossati, 2009]

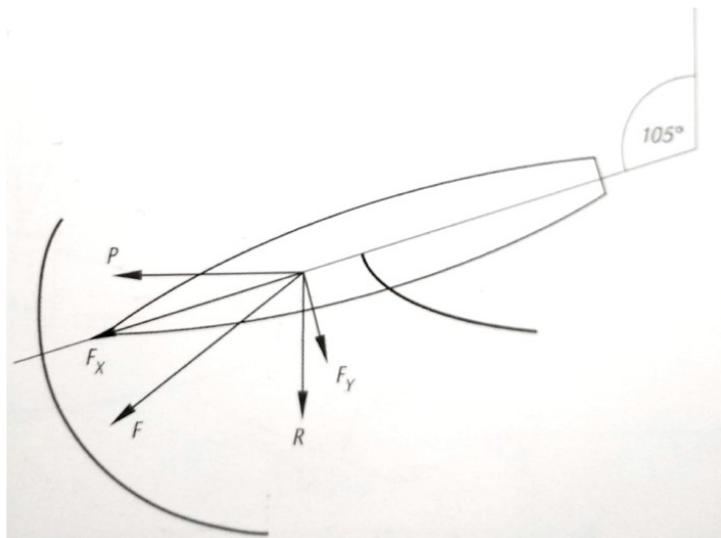


Fig. 4.9 - da [Fossati, 2009]

È possibile notare che

- nell'andatura di lasco la componente R è in modulo confrontabile con la componente P , a riprova del fatto che un'ampia area di separazione del flusso attorno alle vele è presente, concorrendo con un contributo quasi uguale alla forza aerodinamica totale; nella bolina invece la R è molto più piccola in modulo, e la forza aerodinamica totale è dovuta essenzialmente alla componente P
- allontanandosi dal letto del vento avviene la rotazione verso la direzione del moto da parte della forza aerodinamica totale, con un aumento progressivo della componente F_x a scapito della componente F_y (scarroccio).

4.3 Caratterizzazione dal punto di vista aerodinamico di una vela

Rifacendosi alle equazioni del paragrafo precedente, si può affermare che la caratterizzazione dal punto di vista aerodinamico di vele o di piani velici avvenga attraverso la rappresentazione mediante diagrammi polari dell'andamento dei coefficienti C_R e C_P in funzione dell'angolo di attacco dei profili; vengono normalmente ottenute attraverso prove in galleria del vento, con prove in acqua ovvero con tecniche numeriche.

È importante ricordare che per una data vela, o un dato piano velico, i due coefficienti dipendono solo dall'angolo di attacco; quindi, la polare è univocamente determinata.

Di seguito un esempio tipico di diagramma polare di una vela.

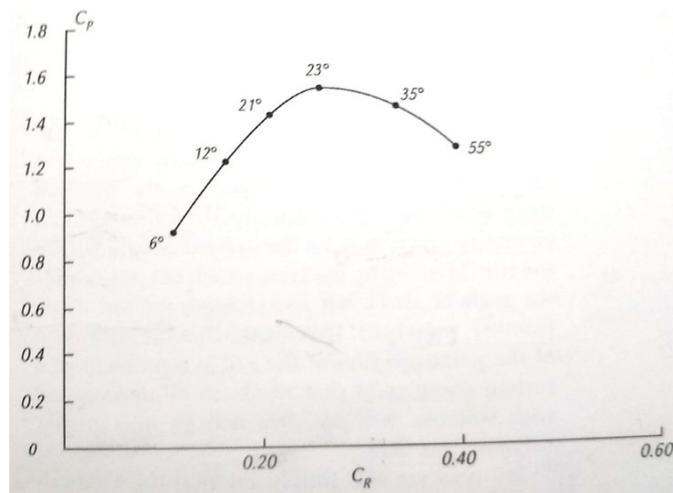


Fig. 4.10 - da [Fossati, 2009]

Ciascun punto del grafico rappresenta il valore del coefficiente della forza aerodinamica totale in corrispondenza ai diversi valori dell'angolo di attacco con cui i profili affrontano il vento. Lungo i due assi cartesiani vengono riportati i valori dei coefficienti C_R (asse delle ascisse) e C_P (asse delle ordinate) in corrispondenza ai medesimi angoli.

Normalmente i diagrammi polari vengono costruiti considerando angoli di attacco che variano da 0° , condizione in cui la singola vela è sul punto di "pungere" (*flapping*), a 90° (vento apparente perpendicolare alla corda dei profili), prendendo così in considerazione tutte le condizioni che si possono incontrare nell'intervallo delle andature possibili per la imbarcazione.

Analizzando il diagramma riportato in figura, riferito ad una vela ben precisa, si può dire che

- per piccoli angoli di attacco prevalgono gli effetti della resistenza su quelli della portanza e la forza aerodinamica totale risulta inclinata all'indietro rispetto alla perpendicolare alla corda del profilo di riferimento
- all'aumentare dell'angolo di attacco si nota un sensibile aumento della portanza con contemporanea rotazione della forza aerodinamica totale

verso la direzione del moto portandosi quindi davanti alla perpendicolare alla corda del profilo di riferimento

- per angoli di attacco al di sopra di un certo valore la portanza crolla mentre la resistenza e il modulo della forza aerodinamica totale aumentano: la vela si trova in condizioni di stallo.

È importante sottolineare che a parità di geometria, vele realizzate con materiali diversi possono avere curve polari diverse, così come anche nel caso di vele regolate diversamente.

Quanto detto permette di sottolineare un concetto fondamentale, cioè come in **condizioni reali** sia cruciale avere le vele sempre a segno, ovvero regolate correttamente, in modo da poter garantire al vento apparente, in relazione all'andatura tenuta, il "corretto" angolo di attacco, in modo da assicurarsi che la vela, o il piano velico, operi in condizioni tali da poter esprimere valori di forza aerodinamica auspicati e ricercati, utili per l'obiettivo perseguito.

Le caratteristiche del flusso attorno alla vela, la distribuzione della pressione e la sua efficienza in termini di spinta prodotta nella direzione del moto sono legate tra di loro e dipendono dall'angolo di attacco con cui i profili vengono investiti. Una particolare attenzione quindi per l'angolo di attacco con cui il flusso investe i profili è fondamentale durante la navigazione.

Gli ultimi due aspetti non sono visibili da chi è deputato alla regolazione delle vele, ma il controllo delle caratteristiche del flusso attorno a queste può avvenire visivamente riscontrando in navigazione il comportamento dei *telltale*, di cui le vele normalmente sono dotate. Questo è ciò che viene fatto da chi nell'equipaggio si occupa delle regolazioni per capire se l'angolo di attacco impostato sia quello "corretto" (mettere a segno la vela).

In [Marchaj, 1996] si trovano i risultati di studi fatti in galleria del vento su di una vela rigida curva (priva in corrispondenza al bordo di ingresso di forme aerodinamiche o tozze qualsivoglia).

Osservando i *telltale* applicati alla vela Marchaj si accorse visivamente che il flusso rimaneva attaccato per l'intera superficie sottovento nella direzione del

flusso solo per un determinato angolo di attacco: l'angolo di attacco ideale. Definita la forma del profilo tale angolo è a sua volta univocamente definito, in quanto dipende dalla forma del profilo in corrispondenza alla zona del bordo di ingresso. In corrispondenza a tale valore dell'angolo di attacco il vento apparente, che approssima il singolo profilo, investe il bordo di ingresso parallelamente alla tangente al profilo stesso, ed il punto di ristagno del profilo si trova in corrispondenza alla traccia del bordo di ingresso. Quando la vela è regolata affinché i profili siano disposti ad accogliere il flusso con il suddetto angolo i *telltale* si mantengono orizzontali e stesi nella direzione del flusso; si dice che la vela è regolata sul punto di "cadere" nel *luffing*. Qualsiasi ulteriore diminuzione dell'angolo di attacco porta la vela prima al *luffing* e successivamente a pungere in corrispondenza al bordo di ingresso (*flapping*).

Il *luffing* si pratica quando, nelle andature di bolina, l'imbarcazione è in esubero di potenza a causa dell'intensità del vento e quindi per contenere lo sbandamento si evita di sfruttare a pieno le potenzialità del piano velico; visivamente il *telltale* sopravvento si alza ed è prossimo a sbattere.

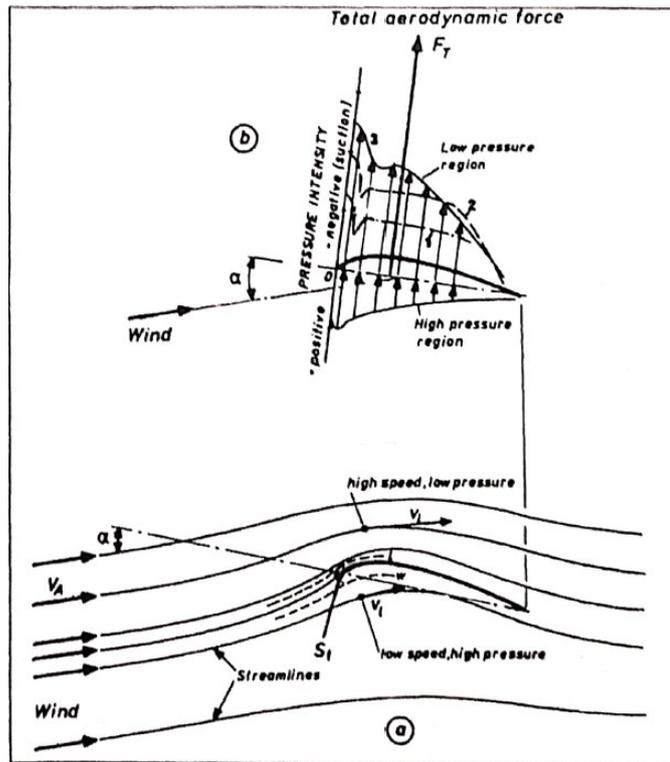


Figura 4.11 a) schema del flusso attorno ad un profilo sottile in condizioni di angolo di attacco ideale, b) distribuzione di pressione lungo il medesimo profilo, sottovento e sopravvento, al variare dell'angolo di attacco - da [Marchaj, 1996]

Facendo riferimento alla figura 4.11, rispetto alla vela rigida e curva testata da Marchaj la condizione prossima al *luffing* è rappresentata dalla curva 1 (angolo di attacco ideale).

Aumentando l'angolo di attacco, riferendosi al generico profilo, ci si porta nella condizione descritta prima dalla curva 2 e successivamente dalla curva 3. Si può notare che con tale aumento cresce l'intensità del picco di depressione posto sottovento in corrispondenza al bordo di ingresso ed estende la sua influenza su di un tratto più ampio della superficie sottovento.

Come evidenziato dal diagramma polare di fig. 4.10, l'aumento dell'angolo di attacco non produce benefici indefinitamente. Ad un certo punto il generico profilo della vela stalla.

Una vela, quindi, può operare tra due limiti di regolazione; quello inferiore rappresentato dalla condizione di *luffing* e quello superiore rappresentato da quella di stallo dei profili che la compongono.

Quanto fin qui descritto, relativamente allo schema di flusso, può essere rappresentato con la figura di seguito.

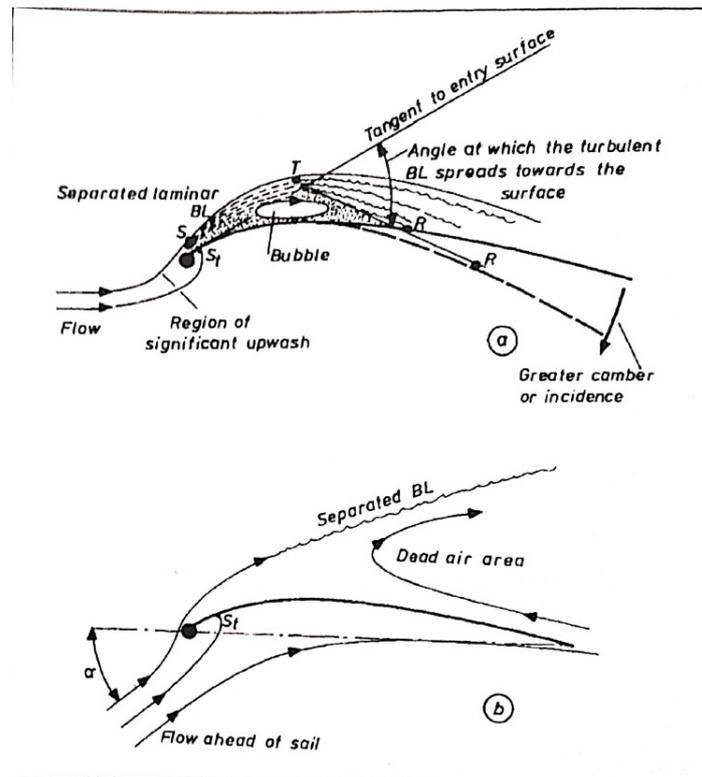


Fig. 4.12 due tipi di separazione del flusso dal bordo di ingresso: a) flusso separato con il riattacco dello strato limite diventato turbolento; b) flusso separato senza il riattacco dello strato limite laminare - da [Marchaj, 1996]

Con l'aumentare dell'angolo di attacco partendo dal limite inferiore citato il flusso d'aria, con il proprio strato limite laminare, si separa dalla parte sottovento del profilo a partire dal bordo di ingresso (Fig. 4.12 a). Tale fenomeno è accompagnato dallo spostamento sopravvento del punto di ristagno. Ciò è causato dal fatto che alle particelle d'aria che aggrediscono il profilo vengono imposte traiettorie con una curvatura sempre più accentuata per aggirare il bordo

di ingresso e seguire la parte sottovento del profilo: quelle contenute nello strato limite ad un certo punto non riescono più a gestire la brusca variazione di direzione imposta e si staccano tangenzialmente dal profilo e dalla vela. Lo strato limite, diventato nel frattempo turbolento, per angoli di attacco inferiori ad un certo valore, viene poi "rischiacciato" sul profilo dal flusso indisturbato che è più veloce e gli fornisce energia. Spesso tale fenomeno è accompagnato da un flusso vorticoso inverso all'interno di una bolla. È stato inoltre notato che la posizione rispetto al bordo di ingresso del punto di riattacco, che è preceduto da una fase di avvicinamento alla superficie da parte del flusso secondo una direzione definita, dipende dal grasso del profilo e dalla sua posizione.

Con il crescere dell'angolo di attacco tale bolla cresce in dimensioni, sia in larghezza sia lungo il profilo. Una volta arrivata ad occupare l'intera porzione sottovento del profilo della vela si ha la condizione di stallo, ed il flusso sottovento risulta completamente staccato a partire dal bordo di ingresso (fig. 4.12 b). Quando avviene la separazione dello strato limite senza il riattacco a valle il picco di depressione in corrispondenza del bordo di ingresso scende. Per angoli di attacco molto alti, maggiori dell'angolo in corrispondenza al quale avviene la separazione, la pressione diviene praticamente costante sull'intera superficie sottovento.

La bolla che si forma con il distacco dello strato limite laminare che scorre sulla superficie di un profilo, in questo caso in corrispondenza al bordo di ingresso (*Leading Edge Bubble*), può essere interpretata come un'alterazione della forma aerodinamica del profilo generata dal campo di moto a favore del flusso, così da ritardarne il distacco totale, mentre nel frattempo lo strato limite si è trasformato in turbolento.

La figura riportata di seguito evidenzia in maniera chiara quanto detto con riferimento al caso appunto della formazione della bolla in concomitanza al bordo di ingresso.

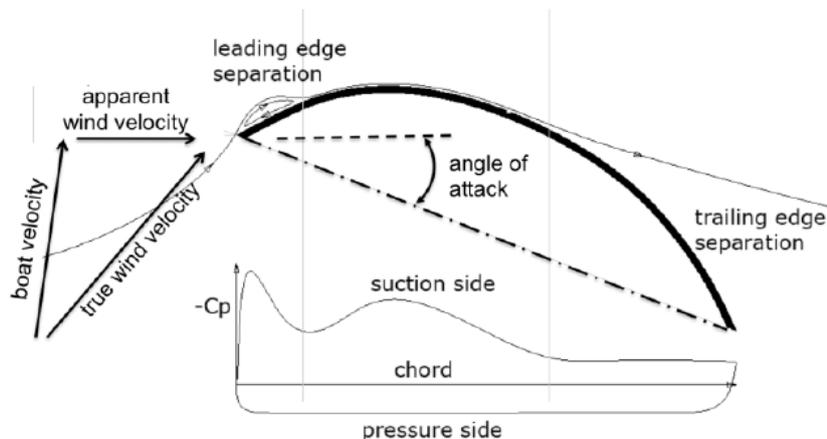


Fig. 4.13 rappresentazione schematica del campo di flusso e della corrispondente distribuzione di pressione attorno al profilo ottenuto con la sezione di una vela. Da [Viola – Flay, 2012]

Si noti come la pressione in corrispondenza al bordo di ingresso e sottovento subisce una drastica riduzione, per poi aumentare nuovamente con il superamento della bolla fino al raggiungimento del punto di riattacco. A valle, la pressione diminuisce di nuovo a causa del profilo, e poi nuovamente aumenta dopo aver superato il punto di massima curvatura. Quest'ultimo aumento può condurre al fenomeno della separazione dirigendosi al bordo di uscita del profilo; se si verifica, il recupero della pressione lungo la forma del profilo si interrompe e questa rimane pressoché costante.

Affinché un flusso d'aria che investe una forma aerodinamica sottile, assimilabile al profilo della sezione di una vela, affronti la porzione in prossimità del bordo di ingresso senza distacco e continui a seguire la superficie sottovento verso il bordo di uscita dipende non solo dall'angolo di attacco, ma anche dalla forma della parte anteriore, ovvero in prossimità del bordo di ingresso, e dalla velocità relativa del flusso.

Sempre in [Marchaj, 1996] viene riportato l'esito di test che hanno consentito di verificare che al di sotto di un certo valore critico della velocità del flusso non si ha formazione della bolla e lo strato limite laminare, una volta staccatosi non

riesce più a trovare il modo di riattaccarsi alla superficie del profilo. Ovviamente, tale distacco definitivo è la causa di una scarsissima efficienza della forma aerodinamica associata alla elevata resistenza prodotta.

Da tutto ciò si è inoltre dedotto che un altro ruolo della bolla è quello di facilitare la transizione dello stato dello strato limite da laminare a turbolento.

Quanto detto può avvenire non solo in corrispondenza al bordo di ingresso, ma, come già evidenziato in precedenza, anche in corrispondenza ad altri punti della superficie dei profili, ove vi siano condizioni tali per cui lo strato limite debba affrontare drastiche variazioni di pressione sfavorevoli: ciò avviene tipicamente nei profili a forte curvatura in corrispondenza al punto in cui vi è il grasso, ove il flusso sottovento raggiunge la massima velocità per andare poi incontro ad un forte rallentamento che, se non vi sono le condizioni per la formazione della bolla, genera il distacco della vena fluida.

Tali circostanze sono tipiche, come vedremo dei profili delle sezioni delle vele per andature portanti, caratterizzate da forti curvature.

4.4 La resistenza

La resistenza generata da una vela o da un piano velico può essere sostanzialmente attribuita a due componenti, e cioè

- alla componente legata all'attrito che il flusso incontra interagendo non solo con le vele ma anche con l'armo (*rig*),
- alla componente cosiddetta indotta.

La prima dipende ovviamente dalla viscosità dell'aria e dallo stato delle superfici che incontra e su cui scorre.

La figura che segue schematizza ciò che avviene sulla superficie di una vela.

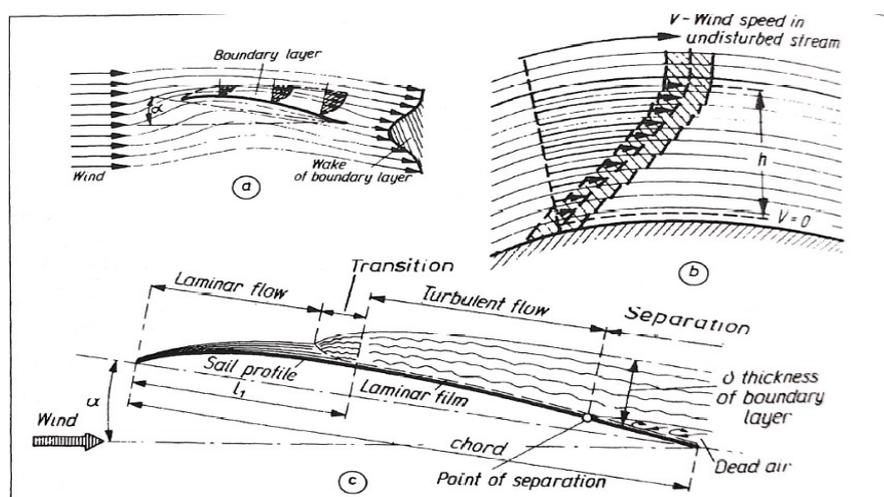


Figura 4.14 strato limite ingrandito sulla superficie della vela in depressione - da [Marchaj, 1996]

Nell'ipotesi che l'approccio avvenga con l'angolo di attacco ideale, lo strato limite inizialmente laminare si trasforma in turbolento ad una certa distanza a partire dal bordo di ingresso, distanza che dipende dallo stato della superficie che incontra. Il passaggio dallo stato laminare a quello turbolento genera ovviamente un aumento della resistenza prodotta dalla vela.

È raro avere uno strato limite laminare, se non limitatamente alla zona del bordo di ingresso. Ciò dipende anche dall'oggetto che la singola vela offre con il bordo di ingresso (normalmente per il supporto): strallo di prua o albero, ad esempio.

Un distacco dello strato limite può intervenire successivamente nella direzione del flusso se la curvatura è troppo accentuata (*camber ratio*) ed il flusso sottovento non è in grado di gestire la forte decelerazione: ciò è associato ad un ulteriore aumento della resistenza.

La seconda componente, chiamata resistenza indotta, è legata al fatto che le vele, ed i piani velici, presentano una "apertura alare" finita. In corrispondenza alle estremità (cioè alla base ed in penna) si creano dei vortici in quanto il flusso tende ad abbandonare, lungo il suo percorso a contatto con il relativo profilo, la

zona sopravvento per portarsi sottovento, generando così dei vortici che si staccano, chiamati vortici di estremità.

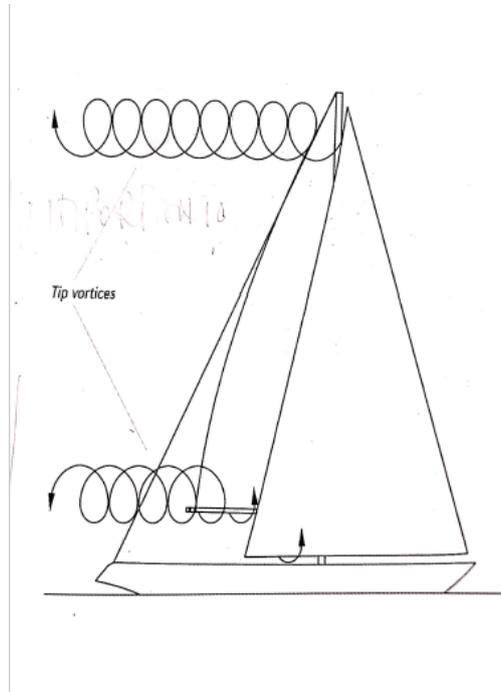


Figura 4.15 vortici di estremità - da [Fossati, 2009]

In generale si può dire che vele o piani velici con elevati valori di *aspect ratio* o allungamento sono più efficienti in quanto la resistenza indotta risulta inversamente proporzionale ad esso, a parità di portanza generata.



Figura 4.16 vortici di estremità - da [Fossati, 2009]

4.5 Elementi geometrici caratteristici delle vele

Le vele sono corpi tridimensionali. Dovendo poi garantire il fatto che l'imbarcazione possa operare volgendo al vento entrambe le mure esse posseggono la peculiarità di essere realizzate con materiale flessibile e di conseguenza di avere una rigidità limitata (possibile solo con l'innesto di stecche, per esempio); per potersi sostenere (la parte superiore deve sostenere il materiale sottostante) normalmente posseggono una forma triangolare con l'estremità più alta (penna) che normalmente si riduce ad un punto.

Ciò significa che le grandezze geometriche caratteristiche dei profili possono variare in valore spostandosi in altezza.

Innanzitutto, la corda, la cui variazione lungo l'altezza della vela genera il parametro definito *Taper*. Tale parametro è rappresentato dal rapporto tra la lunghezza della corda della sezione alla estremità superiore e la lunghezza della corda della sezione alla base. Normalmente per le vele aventi forma piana

triangolare tale parametro è ovviamente uguale a zero. Quando il *taper* è diverso da 1 le sezioni contraddistinte da corde più corte risentono della vicinanza delle altre, subendo un *upwash* più intenso rispetto alle sezioni con corda maggiore che mitiga la minor capacità di produrre componente portante disponendo di profili più piccoli.

Dalla corda dipende anche lo *sweep*, generalmente definito come l'angolo tra una linea ortogonale al flusso e la linea che congiunge tutti i punti delle corde dei profili delle diverse sezioni posti ad una distanza dalla traccia del bordo di ingresso pari al 25% della corda. Tale valore deriva dal fatto che è ipotizzabile che la forza aerodinamica sviluppata da un profilo con spessore trascurabile agisca sempre in un punto posto ad una distanza pari al 25% della corda.

Come verrà messo in evidenza più avanti negli spinnaker simmetrici lo *sweep* ha una diversa definizione.

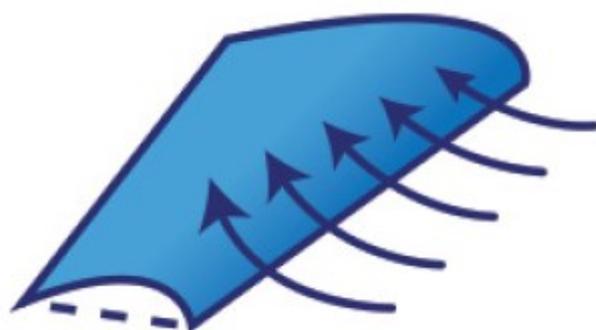


Fig. 4.17 Esempio di corpo portante con taper diverso da 1. Le frecce descrivono il fenomeno del upwash - da [Howell, 2020]

Altre due grandezze tipiche delle forme aerodinamiche sottili che possono variare lungo l'altezza della vela sono il grasso e la sua posizione, e che con la loro variazione contribuiscono a definire la forma della vela. Aumentando il raggio di curvatura a profili sottili si contribuisce a contrastare il verificarsi del fenomeno del distacco sul profilo.

Per quanto riguarda la posizione del grasso, esso normalmente viene posizionato in modo da non superare mai la metà della corda della sezione. Le condizioni del vento e la regolazione possono modificarla nelle varie sezioni. Nelle vele di prua per le andature al vento, nelle imbarcazioni con armo Marconi, risulta più avanzato rispetto a quello della randa.

Per quanto riguarda invece il grasso normalmente viene contenuto nelle sezioni alla base, viene agevolato nelle sezioni intermedie rispetto all'altezza e viene valutato per le sezioni più alte in modo da determinare una vela sotto carico con quest'ultimo distribuito verticalmente secondo un'ellisse: è provato che per un'ala isolata in un flusso uniforme (ovvero privo di *twist*) la resistenza indotta maggiormente contenuta si ottiene con una distribuzione ellittica della componente portante della forza aerodinamica.

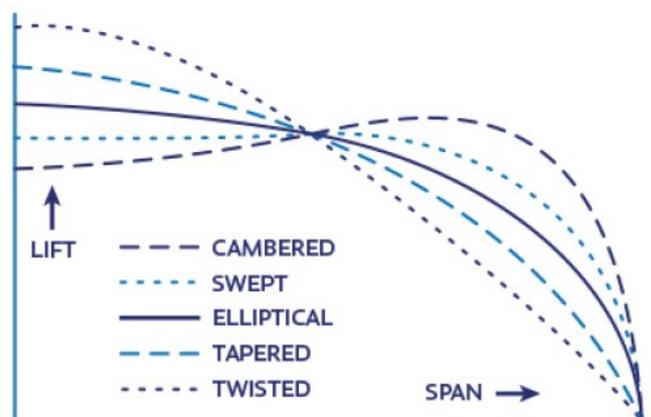


Fig. 4.18 Andamenti del carico sviluppato nelle diverse sezioni di un'ala lungo la sua apertura, con evidenziato quello ellittico - da [Howell, 2020]

Altra grandezza caratteristica di una forma aerodinamica sottile rappresentativa del profilo di una vela e che può variare con la sua apertura (altezza) è l'angolo di attacco, generando quello che normalmente viene definito nella vela il *twist*. Tale variazione è normalmente prevista per assecondare la diversa direzione di provenienza del vento apparente che i vari profili della vela incontrano

spostandosi in altezza. Ciò è determinato dalla presenza nel flusso d'aria di uno strato limite rispetto alla superficie terrestre.

L'ultimo parametro geometrico che caratterizza una vela è il suo *aspect ratio* (o allungamento). Esso normalmente è definito pari al rapporto tra il quadrato dell'apertura alare e l'area della vela (a volte viene stimato dividendo l'apertura alare per il valore medio della corda).

È opportuno precisare che il grasso, la sua posizione ed il twist sono grandezze in generale modificabili attraverso opportune regolazioni, che appunto consentono di modificare attivamente la forma della vela e del piano velico.

4.6 Conclusioni

Si è visto che una vela è assimilabile dal punto di vista fluidodinamico ad un corpo portante, cioè che per la forma assunta in condizioni operative possiede la capacità, grazie all'azione dell'aria che la investe, di veder agire su di essa una forza aerodinamica risultante riducibile ad una componente parallela alla direzione del vento apparente ma anche ad una ortogonale alla direzione del vento stesso. Utilizzando i concetti posti dalla Aerodinamica tali componenti vengono denominate rispettivamente *Resistenza* e *Portanza*, mutuando il termine impiegato nelle ali nelle quali tale componente "porta" cioè solleva. Si è visto quindi che tali grandezze, in forma adimensionale, vengono utilizzate, come per le ali, per caratterizzare il funzionamento di una vela. Si è analizzata la ricaduta sulla vela, in termini di quanto avviene nell'aria in corrispondenza alla sua superficie, al variare dell'angolo di attacco dei profili che la compongono.

Sempre ricorrendo ai concetti della scienza aerodinamica ed alla teoria delle ali è stata effettuata un'analisi semplificata delle componenti che concorrono a determinare la resistenza sviluppata da una vela; inoltre, sono state descritte le grandezze geometriche principali che caratterizzano la forma di una vela nonché gli effetti principali prodotti da alcune di loro sulle sue caratteristiche.

Malgrado si sia di fronte a corpi portanti, a differenza di quanto avviene per un'ala, a cui viene posto come unico obiettivo aerodinamico quello di sviluppare elevati rapporti portanza-resistenza, ad una vela, intesa come sistema fisico, vengono imposti *obiettivi aerodinamici* diversi al variare dell'angolo al vento apparente

indotto dalla variazione di andatura; tali obiettivi sono sempre riconducibili a quell'obiettivo primario che è rappresentato dalla necessità di fornire alla imbarcazione la spinta all'avanzamento. Ne consegue che andature diverse richiedono forme aerodinamiche diverse (cioè un'unica forma non consente di dare risposta in modo efficace all'obiettivo primario in ogni condizione), ciascuna adatta ad operare in corrispondenza ad un set di angoli di attacco ben definito, dovendo produrre portanza e, eventualmente, resistenza. Il valore dell'angolo al vento apparente in corrispondenza al quale due curve rappresentative delle caratteristiche di due vele con forme diverse si intersecano è detto di *crossover*: sancisce il valore dell'angolo di attacco dei profili in corrispondenza al quale si passa dal campo di efficacia di una vela a quello dell'altra. Questo concetto viene ripreso e precisato ulteriormente nel Capitolo 6 in cui vengono affrontate le condizioni poste dalle andature portanti.

5. LO STUDIO DELLE PRESTAZIONI DELLE VELE

5.1 Premessa

Prima di affrontare l'argomento centrale di questa tesi con questo capitolo si è voluto fornire una panoramica delle metodologie che attualmente consentono di studiare le prestazioni delle vele e dei piani velici. Si è ritenuto necessario inserire anche questo argomento per dare una descrizione semplificata ma, si ritiene, esaustiva, della complessità che lo studio di questi particolari corpi portanti possiede e del motivo per cui proprio nell'ambito delle vele nelle andature portanti i margini di sviluppo siano ancora ampi.

5.2 Strumenti per l'analisi delle prestazioni

Nello studio dal punto di vista aerodinamico delle vele, ovvero nella risoluzione di problemi di aerodinamica applicata (come può essere quello di individuare la forma che una vela dovrebbe assumere per garantire in determinate condizioni le migliori prestazioni, come quella ad esempio di saper generare la massima spinta all'avanzamento) vengono attualmente utilizzate tre metodologie, di cui due sperimentali ed una computazionale.

Sono rappresentate rispettivamente da

- Test su elementi in scala mediante l'impiego della galleria del vento
- Test su elementi in scala reale (o test in acqua)
- Simulazione mediante tecniche di fluidodinamica numerica (CFD *Computational Fluid Dynamics*), recente specializzazione delle Scienze Computazionali.

Questi tre approcci permettono di indagare aspetti diversi dell'aerodinamica delle vele. Ciascuno di essi presenta precisi limiti e quindi nessuno di loro è in grado di soppiantare gli altri due.

Di seguito si propone una panoramica dei tre strumenti citati.

Test in acqua

Le condizioni incontrate nei test in acqua, ovvero in scala reale, contemplano la complessità della realtà, che le altre due metodologie semplificano.

Quando uno yacht è in navigazione i suoi movimenti e quelli delle vele sono significativi; inoltre, lo yacht naviga all'interno di uno strato limite turbolento, quello atmosferico, e quindi si trova in un flusso variabile nel tempo.

La variabilità delle condizioni in cui si muove lo yacht è schematizzabile con difficoltà (e quindi con poca accuratezza) nelle tecniche computazionali, mentre non lo è assolutamente, salvo in alcuni casi, con i test in galleria del vento.

A causa della variabilità descritta i test in scala reale sono molto difficili da realizzare e pagano una scarsa ripetibilità, portando nei propri risultati un certo grado di incertezza. Innanzitutto, perché il flusso d'aria totalmente tridimensionale e dipendente dal tempo, al quale è sottoposto lo yacht, non può essere misurato.

Sia le forze in gioco sia le pressioni che agiscono sulle superfici delle vele possono essere misurate con questa metodologia. Nello studio della aerodinamica delle vele è però preferibile analizzare la distribuzione della pressione, dando questa misurazione un quadro più completo del fenomeno e quindi informazioni più adatte, ad esempio, alla validazione dei risultati ottenuti con le tecniche numeriche: diverse distribuzioni della pressione possono essere associate a valori uguali delle forze aerodinamiche totali.

Nelle prove in acqua è più difficile operare misurazioni di pressione in condizioni di navigazione con andature portanti piuttosto che nelle andature al vento, in quanto nel primo caso il vento apparente e le differenze di pressione tra le facce delle vele sono minori.

La pressione differenziale attraverso le vele è normalmente dell'ordine di grandezza della pressione dinamica, ad esempio 5,5 Pascal per un vento apparente di 3 m/s. Per misurare la distribuzione della pressione in corrispondenza ad un profilo ottenuto dalla sezione della vela devono essere rilevate le variazioni di pressione più piccole di 1 Pascal, valore corrispondente ad una variazione della velocità del vento apparente pari a circa 0,3 m/s. Inoltre, la turbolenza dell'aria può generare una variabilità di diversi Pascal al minuto. In corrispondenza ai valori più bassi di velocità del vento le variazioni di pressione

dovute alla turbolenza dell'aria si sovrappongono quindi a piccoli valori medi producendo effetti di instabilità.

Quindi le misurazioni di pressione effettuate con i test in acqua tengono inevitabilmente conto degli effetti dinamici legati alla variabilità del flusso d'aria, che invece non possono essere considerati o facilmente schematizzabili dagli altri due strumenti elencati. D'altra parte, però la complessità dell'ambiente in cui si muove una imbarcazione a vela rende la misurazione complicata e di difficile interpretazione in quanto non sono note le condizioni al contorno.

Negli ultimi vent'anni sono anche stati fatti diversi tentativi di misurare sperimentalmente i coefficienti aerodinamici su scala reale mediante la creazione di particolari dinamometri, con l'obiettivo di rilevare le grandezze citate in condizioni reali. Questa metodologia, oltre ad essere estremamente costosa, fornisce risultati che mostrano un'elevata dispersione.

Per quanto riguarda la sperimentazione in scala reale ricordiamo il primo test effettuato, quello fatto con lo yacht Papoose nel 1923 da Werner e Ober come descritto in [Marchaj, 1996], con il quale si sono ottenuti gli andamenti della pressione lungo la corda di più sezioni disposte lungo l'altezza di genoa e randa.

Test in galleria del vento

I test in galleria del vento consentono al progettista di avere una visione aerea in tempo reale delle vele in condizioni operative. È possibile visualizzare le linee di flusso attraverso diverse tecniche, tra le quali la visualizzazione mediante un generatore di fumo. Normalmente vengono utilizzate vele in materiale flessibile, regolabili da remoto, cosicché gli effetti prodotti dalla regolazione delle vele sulle forze in gioco e sul campo di moto possono essere apprezzati immediatamente.

In molte gallerie del vento dedicate allo studio delle vele sono presenti dispositivi in grado di rilevare la forma delle vele in condizioni operative. Questo permette di apprezzare contemporaneamente le forze in gioco e la forma assunta dalla vela sottoposta a test, così da rendere maggiormente ripetibili le prove. Inoltre, tale informazione consente di modellizzare in forma numerica la forma operativa di una vela e validare il calcolo delle forze in gioco ottenuto mediante le tecniche

numeriche, anche se, come detto in precedenza, la validazione di test ottenuti con lo strumento CFD è più attendibile utilizzando misurazioni della distribuzione della pressione.

L'impiego di vele flessibili consente di analizzare gli effetti della regolazione sulla forma operativa.

I test in galleria del vento normalmente vengono realizzati con velocità del flusso comprese tra 2 m/s e 5 m/s. Nelle gallerie dotate di ampia sezione la scala utilizzata per il modello è pari a circa 1/10 rispetto al reale. Di conseguenza, per rispettare gli effetti della scala sul Numero di Reynolds la velocità del vento riprodotta in galleria dovrebbe essere 10 volte quella reale, mentre normalmente nelle gallerie è impossibile riprodurre valori così alti potendo al massimo generare la stessa velocità del vento che si riscontra nella realtà.

Quindi la galleria del vento consente di effettuare analisi in condizioni controllate, ma che possono essere anche diverse da quelle reali, riproducibili con difficoltà, e possono, per l'impiego di un modello in scala, portare a risultati non perfettamente rappresentativi di ciò che avviene in scala reale.

Tecniche di fluidodinamica numerica

La CFD si basa sulla capacità di simulare al calcolatore il funzionamento di una vela o di un piano velico in determinate condizioni; essa ha per oggetto la soluzione del sistema di equazioni differenziali alle derivate parziali non lineari che descrive la meccanica dei fluidi (Navier – Stokes) mediante l'impiego di metodi dell'analisi numerica.

Note da secoli, l'impiego di tali equazioni è stato limitato dalla loro complessità e quindi venne sdoganato nei primi anni Ottanta del secolo scorso con la disponibilità di calcolatori con sufficiente potenza di calcolo.

Rispetto alla sperimentazione in galleria del vento o in acqua la CFD permette di ridurre i costi ed i tempi della progettazione e dello sviluppo delle vele, sottoponendo a test con tempi contenuti diverse scelte progettuali; la prima viene normalmente riservata alla fase di verifica finale delle prestazioni.

La simulazione al computer permette, a differenza della galleria del vento, di condurre l'analisi fluidodinamica utilizzando le corrette dimensioni geometriche e le corrette condizioni ambientali. Inoltre, la simulazione al computer è in grado di fornire tutte le informazioni del campo termo-fluidodinamico in ogni punto.

La visualizzazione dei risultati del calcolo permette un esame approfondito di tutti i dettagli del campo di moto, sia in due sia in tre dimensioni, evidenziando vortici ed eventuali distacchi della vena fluida e corrispondenti fenomeni di ricircolazione del flusso.

Esempi di visualizzazione sono tratti da [Delussu et al., 2005].

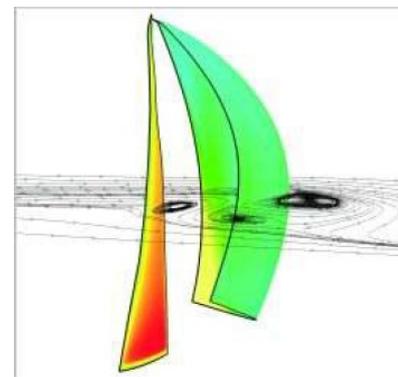


Fig. 5.1 da [Delussu et al., 2005]

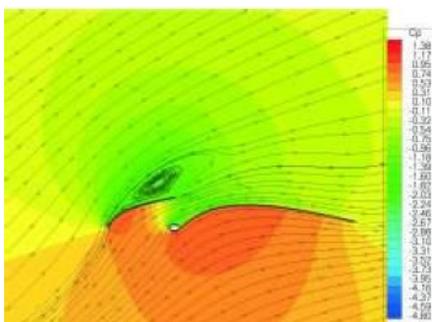


Fig. 5.2 da [Delussu et al., 2005]

Negli ultimi trent'anni le tecniche numeriche sono diventate gli strumenti di ricerca più utilizzati nell'ambito delle vele. Negli anni Sessanta del secolo scorso i metodi numerici a campo potenziale venivano usati per studiare forme di profili bidimensionali assimilabili a sezioni di vele. Negli anni successivi ci fu un rapido sviluppo dei calcolatori che consentì un utilizzo sempre più diffuso dei codici che risolvevano le equazioni di Navier-Stokes.

Come verrà dettagliato in seguito le vele si comportano in modo diverso a seconda del fatto che si trovino ad operare in condizioni di andatura al vento o lontano dal vento. I risolutori a campo potenziale vengono largamente utilizzati nello studio in condizioni di andature al vento, i codici che impiegano le equazioni di Navier-Stokes vengono impiegati nello studio delle andature portanti. In quest'ultimo caso le vele presentano sezioni con profili concavi e soggetti lungo il loro sviluppo ad elevati gradienti di pressione tali da spingere lo strato limite a separarsi prima del bordo di uscita o per una discreta parte dello sviluppo del profilo. I risolutori delle formule di Navier Stokes tengono conto degli effetti della viscosità dell'aria e quindi consentono di considerare il distacco della vena fluida dal profilo.

A causa degli elevati valori del Numero di Reynolds che contraddistinguono le condizioni in cui le vele si trovano ad operare l'utilizzo diretto delle equazioni di Navier-Stokes non può essere attuato. Vengono quindi impiegate normalmente tecniche che si basano su equazioni euristiche che però necessitano della validazione dei risultati ottenuti mediante misurazioni sperimentali. I test effettuati in galleria del vento risultano essere i più adatti.

5.3 Conclusioni

Si è visto che sono tre gli strumenti attualmente disponibili per lo studio delle vele: ciascuno di essi possiede punti di forza e limiti allo stesso tempo. Lo sviluppo tecnologico, la economicità e la praticità hanno reso interessanti le tecniche di fluidodinamica numerica. Queste però hanno ancora dei limiti che, soprattutto nell'ambito delle andature portanti, le rendono ancora non totalmente in grado di soppiantare le prime due, che restano di supporto alle tecniche CFD.

6.AERODINAMICA DELLE VELE NELLE ANDATURE PORTANTI

6.1 Premessa

Le barche a vela si trovano a dover affrontare navigazioni con angoli al vento reale molto diversi tra loro, il valore dei quali si trova distribuito su di uno spettro molto ampio (è possibile pensarlo distribuito tra i 40° e i 180°). L'angolo al vento reale è l'angolo tra la direzione del moto e quella di provenienza del vento reale.

L'angolo con cui navigano è legato all'andatura assunta.

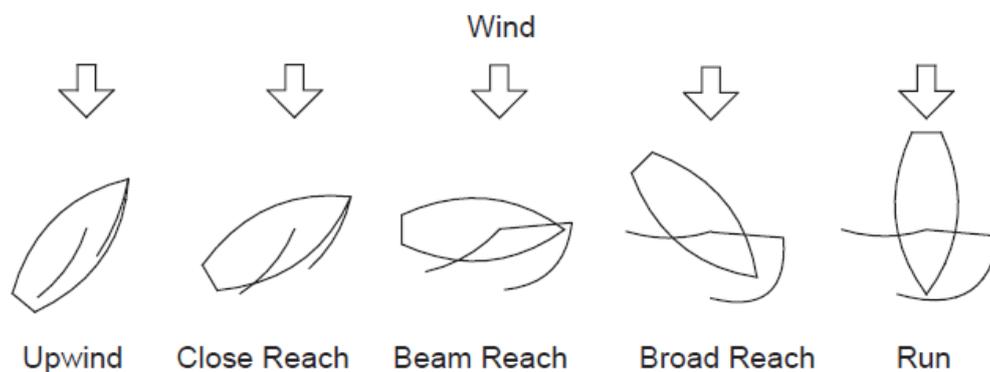


Figura n. 6.1 Andature (*Point of Sailing*) - da [Lasher et al, 2005]

Le andature portanti sono quelle che impongono un angolo al vento reale (cioè tra il vento reale e la rotta vera) superiore ai 90° . Di conseguenza si avrà un angolo al vento apparente indicativamente compreso tra valori minori di 90° a 180° per ciascuna mura.

Nel capitolo in corso viene innanzitutto affrontata la questione degli obiettivi aerodinamici che tali andature normalmente impongono ad una vela; l'obiettivo aerodinamico si concretizza attraverso la particolare relazione tra portanza e resistenza che le particolari condizioni operative chiedono al sistema fisico "vela" di sviluppare, ovviamente affinché vi sia spinta all'avanzamento. Dalla individuazione dei particolari obiettivi aerodinamici che le andature portanti impongono deriva innanzitutto la consapevolezza della necessità che andature diverse prevedano vele con forme nettamente diverse; quindi, la comprensione

delle caratteristiche geometriche principali che la forma di una vela dovrebbe possedere per poter essere efficiente in queste andature rispetto ad altre.

Le vele dedicate in modo specifico alle andature considerate in questo capitolo vengono chiamate *spinnaker*, a sancire una loro autonomia e un loro ruolo ben definito.

Gli spinnaker possono essere simmetrici (S) o asimmetrici (A): queste sono le denominazioni tecniche dei due gruppi di vele per andature portanti.

Le vele citate posseggono per i velisti un grande fascino, sia per la potenza che sviluppano nelle andature in questione, che consentono di affrontare in modo efficace, sia per le forme che arrivano ad assumere.

Nella letteratura lo spazio dedicato a questo tipo di vele è normalmente inferiore rispetto a quello riservato ad altre forme e manca, a parere di chi scrive, uno spazio specifico ad esse dedicato che anticipi e supporti le motivazioni di determinate tecniche di regolazione, considerando l'aspetto aerodinamico di tali tipologie di vele.

Questa mancanza è principalmente dovuta al fatto che, come evidenziato in precedenza, fino a circa vent'anni fa la teoria alla base del funzionamento di una vela e la tecnologia a disposizione per lo studio favoriva l'analisi nelle andature al vento.

Dopo una breve panoramica dedicata a queste vele ed alla loro storia, viene affrontato lo studio aerodinamico del loro funzionamento, della forma operativa assunta, dei campi di moto e di pressione che le circondano, nonché degli effetti prodotti dalla variazione dei parametri geometrici principali che definiscono la forma di progetto, confermando inoltre a livello sperimentale la correttezza di regolazioni che normalmente vengono attuate. Inoltre, alla fine viene affrontata la questione della interazione spinnaker – randa, trovandosi quest'ultima ad operare in tutte le andature.

6.2 Andature portanti vs andature al vento: diversi obiettivi aerodinamici

Di seguito vengono innanzitutto analizzati i principali aspetti che segnano in modo netto i due ambiti richiamati, ovvero le andature al vento e quelle portanti, in modo da definire ciò che viene richiesto ad una vela nelle due condizioni.

Il primo riguarda le diverse performance che le vele sono chiamate ad esprimere nei due tipi di andatura, che si concretizzano in diversi obiettivi aerodinamici richiesti ai profili che le compongono.

Per comprendere ciò si parte dalla considerazione che, dal punto di vista della navigazione, la riduzione in portanza e resistenza della forza aerodinamica totale sviluppata da una vela o da un piano velico non risulta sempre la più appropriata.

È spesso più utile ridurla secondo la direzione ed il verso di avanzamento della imbarcazione (che non corrisponde sempre all'asse longitudinale a causa dello scarroccio), dando origine alla spinta all'avanzamento, componente da massimizzare, e secondo la direzione ortogonale all'avanzamento, dando origine alla forza di sbandamento (o forza laterale), componente da minimizzare.

Tale suddivisione, infatti, risulta molto utile per comprendere uno degli aspetti che rendono diverse le vele per andature al vento da quelle per andature portanti.

Nelle andature al vento l'obiettivo da perseguire è quello di massimizzare il rapporto portanza/resistenza. Ciò, infatti, consente di avere a disposizione la massima spinta all'avanzamento possibile.

Invece nelle andature portanti gli obiettivi aerodinamici per i profili della stessa vela sono diversi, variando con l'andatura stessa. Il perseguimento di obiettivi di natura aerodinamica diversi viaggia parallelamente con la realizzazione di diverse configurazioni del campo di moto attorno alla vela.

Si considerino ad esempio le tre andature descritte nella figura seguente.

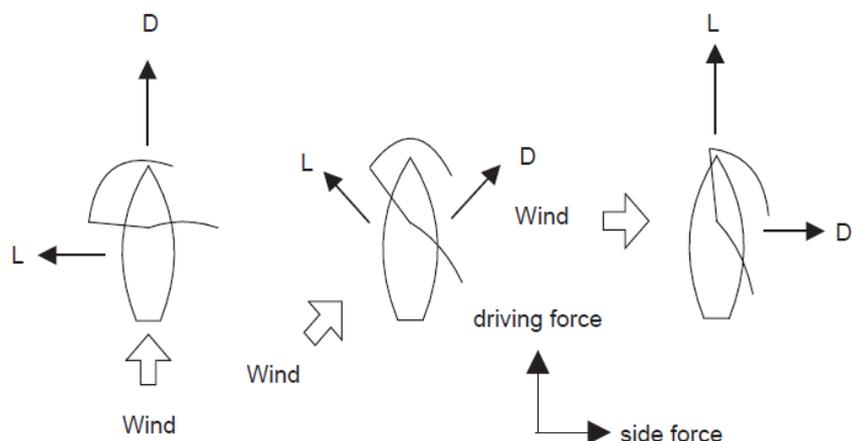


Fig. 6.5 Andature (*Point of Sailing*) - da [W.C. Lasher – J.R. Sonnenmeier - D.R. Forsman - J. Tomcho, 2005]

Innanzitutto, l'obiettivo in tutti e tre i casi è sempre quello di massimizzare la spinta all'avanzamento e minimizzare la spinta laterale.

Nella prima posizione (andatura di poppa) ciò viene raggiunto massimizzando la componente rappresentata dalla resistenza (D). Nelle andature di lasco (immagine 2) massimizzando la forza aerodinamica totale prodotta dal piano velico, a cui concorrono contemporaneamente la portanza (L) che la resistenza (D), con le componenti laterali di ciascuna di esse che si elidono tra loro. Nella terza condizione (andature attorno al traverso) l'obiettivo viene raggiunto massimizzando la portanza (L) per una data resistenza (D) ovvero minimizzare la resistenza (D) per una data portanza (L).

La principale differenza tra le andature di bolina e quelle portanti riguarda quindi la diversa importanza che il concetto di rapporto tra portanza e resistenza ha nelle due situazioni. È fondamentale notare che anche nell'ambito delle stesse andature portanti l'obiettivo aerodinamico muta con l'andatura.

In [Garret, 1987] vengono espressi gli stessi concetti utilizzando una rappresentazione delle forze aerodinamiche in gioco mediante diagramma polare nel caso di un profilo che simula una vela.

Nella navigazione di bolina dell'esempio in fig. 6.6 la migliore *spinta all'avanzamento* si ottiene con un angolo di attacco al profilo (α) pari, nel caso specifico, a 27° . Ad esso corrisponde una forza totale il cui vettore è rappresentato dalla tangente alla curva polare passante per l'origine: tale tangente corrisponde a quella nel punto di miglior rapporto portanza/resistenza. La componente di sbandamento risulta essere circa tre volte più grande della spinta all'avanzamento.

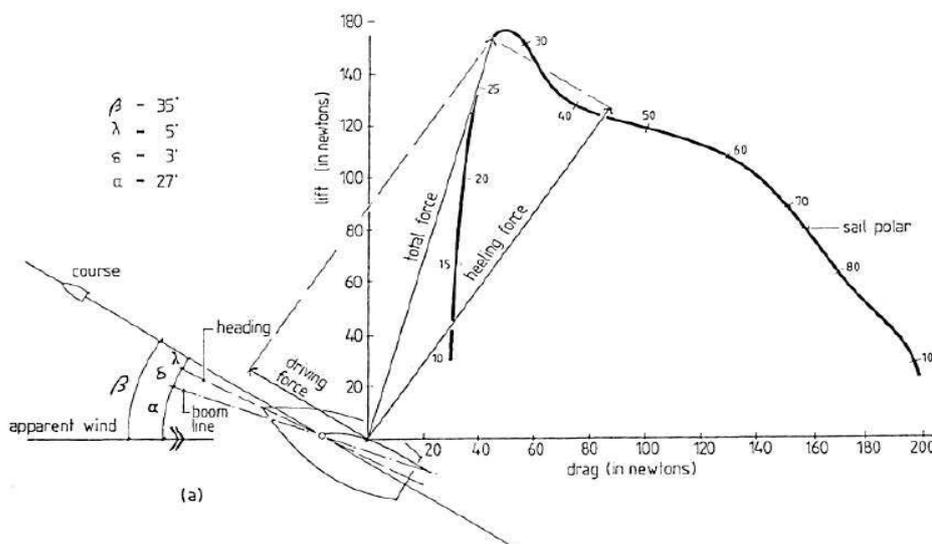


Fig. 6.6 Diagramma polare, espresso in termini di portanza e resistenza, della forza aerodinamica totale sviluppata da una vela impiegata da una imbarcazione di bolina al variare dell'angolo di attacco, con la contemporanea riduzione in termini di spinta all'avanzamento e forza di sbandamento- da [Garrett, 1987]

Nella navigazione in andatura portante non è il migliore rapporto portanza/resistenza da perseguire per ottenere la migliore prestazione dell'imbarcazione. La condizione migliore (maggior spinta all'avanzamento) corrisponde nel caso della fig. 6.7 all'angolo di attacco pari a 67° . La forza di sbandamento è quasi trascurabile; e la quasi totalità della forza aerodinamica prodotta dalla vela va nella spinta della imbarcazione. Portanza e resistenza sono confrontabili e concorrono entrambe alla spinta di avanzamento.

Dovendo quindi coprire un ampio range di valori degli angoli di attacco i profili delle vele nel caso di andature portanti incontrano diversi tipi di flusso attorno ad esse, con la contemporanea variazione della loro forma operativa (*flying shape*).

Il secondo aspetto riguarda la forma di progetto delle vele, che deve fortemente distinguersi tra i due gruppi di andature. Questo aspetto è fortemente connesso con il primo.

Nelle andature al vento con buona approssimazione le vele possono essere pensate come superfici ottenute per estrusione di forme aerodinamiche bidimensionali a spessore sottile, con una progressiva riduzione della corda del profilo andando verso l'alto.

Nelle andature portanti le vele devono possedere una forma tridimensionale complessa, che varia durante la navigazione (sia a causa della regolazione sia per i tessuti particolarmente sottili con cui vengono realizzati che si deformano sotto carico); la caduta prodiera può essere più lunga di quella poppiera ed i profili ottenuti attraverso sezioni orizzontali hanno una curvatura marcata.

Per quanto riguarda la forma di progetto la differenziazione emerge dai parametri di seguito elencati:

Aspect Ratio o Allungamento – Nelle vele destinate ad andature portanti tale parametro, definito come rapporto tra la corda media e l'apertura, deve risultare minore che nelle vele pensate per la bolina. Osservando la fig. 6.8 e partendo dal presupposto che all'aumentare dell'angolo di attacco perde di importanza il concetto di rapporto portanza/resistenza a vantaggio della massimizzazione della più generica forza aerodinamica totale, si può notare che gli stessi risultati ottenuti sulle lamine curve danno come risposta il fatto che nelle andature portanti il perseguimento dell'obiettivo aerodinamico caratteristico si ottiene privilegiando minori valori di *Aspect Ratio*, mentre vale il viceversa nelle andature al vento.

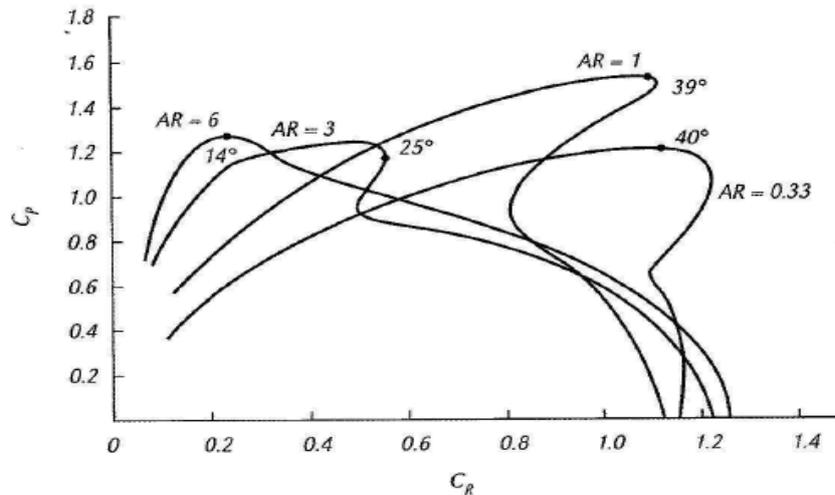


Fig. 6.8 diagrammi polari ottenuti sperimentalmente di lamine curve con aspect ratio diverso - da [Fossati, 2009]

Camber – facendo riferimento alla fig. 4.5 si può notare che lamine con curvatura più accentuata consentono valori maggiori di forza aerodinamica totale, mentre quelle con curvatura minore consentono di perseguire un miglior rapporto portanza/resistenza.

Twist – Nelle andature portanti le vele devono possedere uno svergolamento (*twist*) più accentuato. Nelle andature portanti l'angolo al vento apparente (angolo tra il vento apparente e la direzione di moto) è più sensibile al gradiente del vento reale nello strato limite e quindi nelle vele ad esse dedicate gli angoli tra la corda dei diversi profili rispetto all'asse dell'imbarcazione devono possedere un tasso di variazione maggiore.

L'ultimo aspetto riguarda la struttura del flusso che avvolge la vela.

Oltre alla forma, anche il flusso attorno ad uno *spinnaker* è di tipo tridimensionale e può essere abbondantemente distaccato con la generazione di vortici.

In [Viola et al., 2014] viene proposto lo studio, ottenuto attraverso simulazione numerica e test in galleria del vento, della distribuzione della pressione attorno

ad un modello di *spinnaker* asimmetrico di forma fissa (cioè senza considerare le variazioni di forma indotte). L'immagine a sinistra della figura descrive la distribuzione di pressione attesa lungo il profilo della sezione posta a metà altezza dello *spinnaker*, con il distacco della vena fluida parecchio a monte del bordo di uscita ovvero a circa il 60% della lunghezza della corda; quella a destra un esempio di flusso attorno alla superficie sottovento dello *spinnaker*, ottenuto durante lo studio.

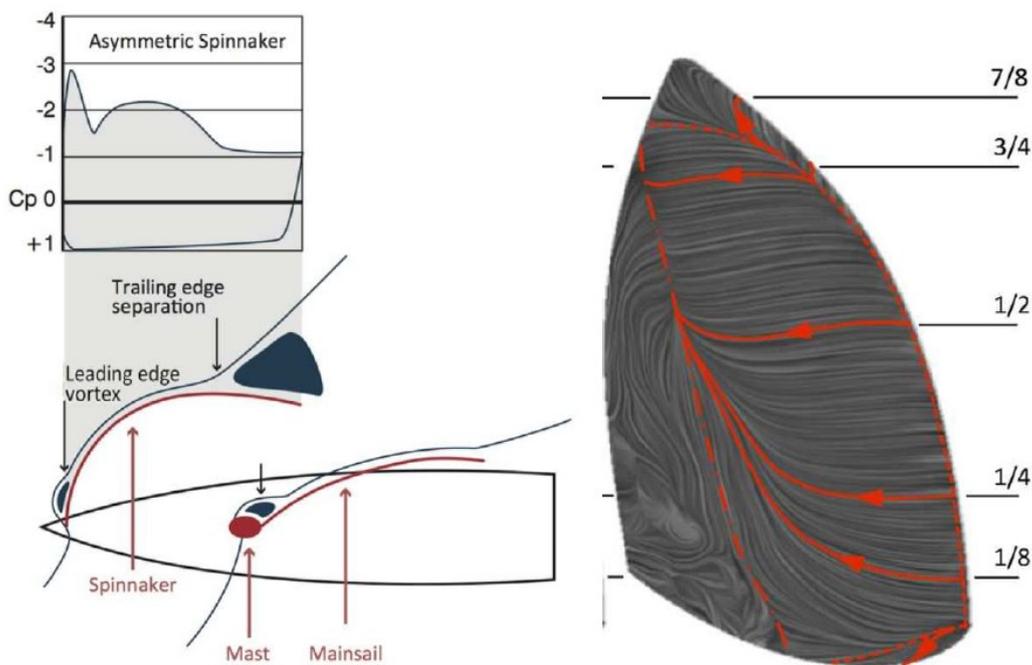


Fig. 6.9 da [Viola et al., 2014]

Si può notare che il flusso, in corrispondenza al lato sottoposto a depressione, si stacca immediatamente lungo l'intero bordo di ingresso (linea rossa tratteggiata), a causa del fatto che la vela è stata fatta lavorare con un angolo di attacco leggermente superiore a quello ottimale, per poi riattaccare a valle. Quindi il flusso subisce una deviazione verso l'alto rimanendo attaccato (linee rosse continue) fino alla separazione in corrispondenza al bordo di uscita, nella

seconda parte della corda; quest'ultima forma di separazione si verifica già a partire dai profili verso la base dello *spinnaker*.

Sempre in [Viola et al., 2014] emerge che la separazione e il riattacco in corrispondenza del bordo di ingresso sono associati ad un vortice stabile (*Leading Edge Vortex - LEV*), il cui diametro cresce spostandosi dalla base alla testa dello *spinnaker*, per trasformarsi nel vortice di estremità (causa della resistenza indotta) e staccarsi dirigendosi a valle verso il flusso indisturbato.

In [Viola et al., 2014] quindi si è mostrato che il flusso attorno ad uno *spinnaker* è nettamente **tridimensionale** e **complesso**, con lo sviluppo ed il rilascio di vortici per distacco della vena fluida, che interessa parti discrete della superficie sottovento.

Solo in prima approssimazione le vele possono essere pensate come corpi portanti originati da forme aerodinamiche sottili investite da un flusso bidimensionale complesso (separazione al bordo di ingresso, riattacco, separazione al bordo di uscita). Ciò vale in particolare per gli *spinnaker*, il flusso attorno ai quali risulta essere tridimensionale e complesso. Gli *spinnaker* inoltre propongono al flusso una forma tridimensionale che in condizioni operative (*flyng shape*) assume geometrie dinamiche, diverse da quella di progetto e condizionate dalle reali condizioni incontrate.

Tale forte dipendenza dalle condizioni al contorno è il motivo per cui anche la regolazione di queste vele è dinamica, cioè avviene con una continua regolazione della scotta per cercare il punto di *luffing* senza far collassare la vela. Si ricorda che a differenza dei genoa e dei fiocchi gli *spinnaker* non hanno la caduta prodiera inferita o irrigidita da un gratile: esse sono vincolate solo in tre punti, con il rischio di subire una certa instabilità.

6.3 Le vele nelle andature portanti

Quando l'andatura appartiene al settore impegnato dalla bolina (*upwind* e *close reach*) le vele vengono cazzate e presentano una forma piatta. Il loro funzionamento assomiglia a quello delle ali di un aereo. In tali condizioni il flusso

attorno alle vele è con buona approssimazione bidimensionale e prevalentemente attaccato, e queste possono essere considerate come lo sviluppo di forme aerodinamiche a spessore trascurabile. La regolazione risulta finalizzata alla ricerca della condizione, per il piano velico, del maggiore rapporto portanza/resistenza (*lift to drag*), in modo da avere il vettore rappresentativo della forza aerodinamica totale il più possibile ruotato verso la direzione rappresentata dalla rotta e consentire la maggior spinta all'avanzamento possibile. Il loro studio trova, per tali condizioni, uno strumento utile nella tradizionale teoria aerodinamica dei fluidi privi di viscosità.

Quando si ha a che fare con andature lontane dal letto del vento reale, oltre il traverso, le vele impiegate nelle andature considerate precedentemente risultano sempre più inefficienti. Per gli armi esistenti, gli angoli di attacco risultano maggiori e le forme aerodinamiche dei profili delle vele per le andature al vento ed il modo con cui vengono armate non sono in grado di garantire con efficacia il perseguimento degli obiettivi aerodinamici richiesti. Così le vele di prua vengono sostituite con gli *spinnaker*.



Figura n. 6.2 Esempi di spinnaker simmetrici (a sinistra) e asimmetrici (a destra) - da [Davis, 2020]

La loro peculiarità è rappresentata dal fatto che sono superfici non sviluppabili, di forma tridimensionale ed avvolte da un flusso anch'esso tridimensionale che, per la forte curvatura dei profili che li costituiscono, operano per una buona parte della superficie sottovento in condizioni di flusso distaccato. Forte curvatura

dovuta agli alti valori che l'angolo di attacco del flusso d'aria rispetto ai profili mediamente assume in tali andature.

All'interno della famiglia degli *spinnaker* asimmetrici ricade anche quello che comunemente viene chiamato *gennaker*.

Malgrado i primi *spinnaker* fossero di fatto asimmetrici, questi furono velocemente rimpiazzati da quelli simmetrici.

Differiscono per:

- gli *spinnaker* simmetrici presentano una linea di simmetria dalla testa al punto di mezzo della base, rispetto alla quale vengono a generarsi due parti perfettamente simmetriche nella geometria e nella forma; il grasso è disposto simmetricamente rispetto all'asse e la maggior profondità è posta al 50 % della larghezza.
- gli asimmetrici sembrano una via di mezzo tra uno *spinnaker* regolare ed un grande genoa; la caduta prodiera è più lunga della balumina ed il corpo della vela vede il grosso della sua forma posizionato tra il 35 ed il 40 per cento del profilo a poppa della caduta prodiera e con la parte posteriore piatta.

Poiché gli *spinnaker* asimmetrici presentano una maggiore facilità nel "volare" essi forniscono buone prestazioni in quasi tutte le condizioni ad eccezione delle andature di poppa (fil di ruota) e presentano una maggior semplicità nella gestione.

Gli *spinnaker* asimmetrici sono più efficienti ad angoli minori mentre i simmetrici sono caratterizzati da un range di applicazione più ampio.

Di seguito si riporta un grafico, ricavato da [Fossati F., Muggiasca S., Vallicelli A., Viola IM., 2006]. Esso propone l'andamento, ottenuto in galleria del vento, del coefficiente C_x (Coefficiente di Spinta all'Avanzamento) al variare di AWA (Angolo al Vento Apparente) per uno *spinnaker* asimmetrico ed uno simmetrico a confronto; ogni punto indicato corrisponde alla regolazione per massimo C_x . Si può notare che per angoli più stretti di 105° lo *spinnaker* asimmetrico provato risulta spingere di più del simmetrico, e viceversa per angoli maggiori.

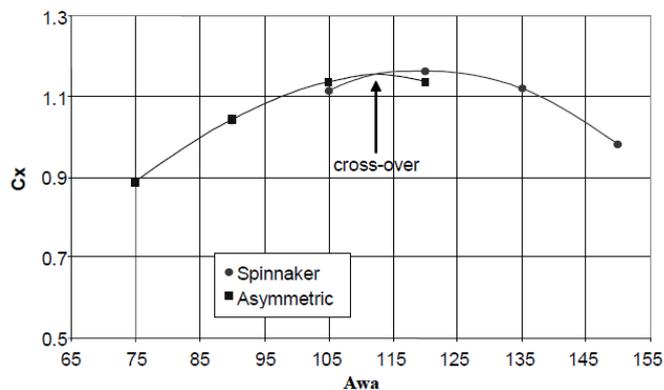


Fig. 6.3 Coefficiente di spinta all'avanzamento (C_x) in funzione dell'angolo al vento per due piani velici differenti in andature portanti, rispettivamente con spinnaker simmetrico e asimmetrico - [F. Fossati - S. Muggiasca - A. Vallicelli - I.M. Viola, 2006]

In [Viola and Flay, 2009] viene citato uno studio presentato nel 1999 in [Razembach and Mairs, 1999] su di una muta di vele per andature portanti di una imbarcazione W60 (classe Whitbread 60) ed effettuato in galleria del vento; la muta era costituita da *spinnaker* asimmetrici per le andature al lasco, *spinnaker* asimmetrici per le andature di poppa (questi ultimi con un'area significativamente più grande dei primi) e *spinnaker* simmetrici. Lo studio, incentrato principalmente sulla misurazione delle forze prodotte dalle vele, ha messo in luce i punti di *cross-over* tra questi tre gruppi: gli asimmetrici per il lasco esprimevano le migliori performance nell'intervallo tra i 55° e i 100°, quelli per le andature di poppa tra i 100° e i 140°, mentre per gli spinnaker simmetrici tra i 140° ed i 180°.

Gli *spinnaker* simmetrici si trovano a dover operare quasi esclusivamente (per gli angoli a cui sono sottoposti) in condizioni di flusso distaccato per cui la teoria basata sui fluidi privi di viscosità non è applicabile. Nello studio quindi di queste vele il ricorso a metodi sperimentali è fondamentale, anche se affiancati sempre di più dallo strumento CFD.

Di seguito si riporta, come esempio, la classificazione proposta da North Sails delle vele per andature portanti prodotte ricorrendo ad un diagramma polare per presentarne il campo di impiego.

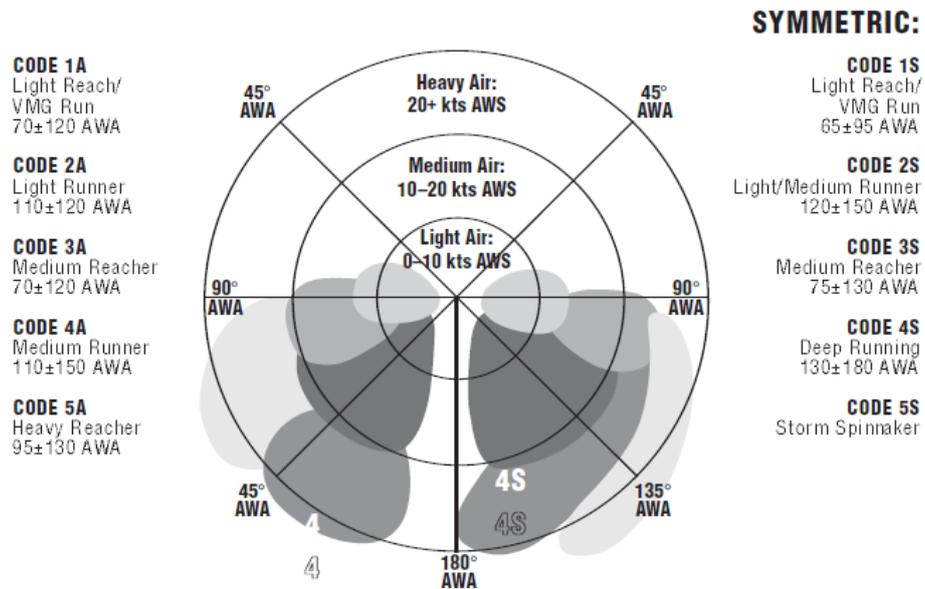


Fig. 6.4 classificazione utilizzata da North Sails per le vele per andature portanti prodotte - da [Hancock, 2003]

Lo *spinnaker* ha una storia lunga. La sua nascita è figlia della ricerca di realizzare vele che in andature portanti fornissero al vento la possibilità, con la accentuata curvatura e con il modo di essere impiegato, di interagire meglio ed in modo più efficiente.

Sembra che lo *spinnaker* sia stato utilizzato per la prima volta durante una regata di club negli anni 1860, armato sullo yacht Niobe, anche se vi sono tracce di vele simili impiegate dalla metà dell'Ottocento nel Solent. I primi *spinnaker*, come anche quello armato su Niobe, assomigliavano più a grandi fiocchi arrotondati tagliati asimmetricamente.

Fu nel 1930 che i velai Ratsey e Laptorn ebbero l'idea di creare una vela simmetrica, con i ferzi disposti parallelamente alla balumina: la vela prese il nome di "Herbulot". Poi venne ulteriormente sviluppata.

Assieme allo sviluppo dello *spinnaker* simmetrico tornò alla ribalta quello simmetrico, preannunciato da una previsione di Marchaj che fin dal 1964 sostenne: "Forse dallo *spinnaker* e dal genoa nascerà, un domani, una nuova vela".

La denominazione avrebbe origini controverse. Chi la associa al nome della imbarcazione "Spinks" che negli stessi anni del Niobe si impose in diverse regate. Altri sostengono che derivi da una frase pronunciata da W. Gordon, armatore del Niobe e progettista dello *spinnaker* armato; al termine di una regata vinta con la vela in questione disse: "*That's the sail to make her spin!*" ("Questa è la vela che la fa correre!", riferita alla imbarcazione). Una vela quindi per aumentare le prestazioni alle andature portanti, da qui "*spin-maker*" trasformato nel tempo in *spinnaker*.

6.4 Elementi generali del comportamento di uno *spinnaker*

Deparday J. ha riportato in [Deparday, 2016], attraverso uno studio molto complesso, l'analisi della distribuzione della pressione, dei carichi e delle forme operative di uno *spinnaker* in funzione dell'angolo al vento apparente *AWA*. Lo studio è stato condotto in scala reale, ovvero con test in acqua, utilizzando una imbarcazione J/80 ed uno *spinnaker* asimmetrico.

L'aspetto principale messo in luce è che il comportamento complessivo dello *spinnaker* varia con il variare dell'angolo al vento apparente *AWA*, e quindi che gli *spinnaker* nel loro campo di utilizzo sono caratterizzati da una sensibile dinamicità.

Tali analisi sono state effettuate mantenendo sempre l'angolo di attacco ideale, cioè sul limite di pungere (*on the verge of luffing*).

Di seguito, in sintesi, quanto riscontrato in [Deparday, 2016].

Per angoli piccoli (circa 60°-90°) sembra che lo spinnaker sia imbrigliato con la metà alta della vela. Per quanto riguarda i parametri geometrici della forma operativa le tendenze lungo l'apertura della vela risultano differenti rispetto ai casi incontrati con angoli maggiori. Il coefficiente di pressione differenziale medio

$$\Delta C_p = \frac{P_{leeward} - P_{windward}}{\frac{1}{2} \rho AWS^2}$$

è maggiore di quello rilevato per angoli maggiori con un picco elevato di depressione nella metà alta della vela in corrispondenza al bordo di ingresso. Poiché con questi angoli anche la velocità del vento apparente AWS è elevata i carichi in corrispondenza agli angoli della vela sono i maggiori, con i carichi in corrispondenza alla penna ed alle mura quasi il doppio del carico sulla bugna della scotta (circa 1000 N e 600 N). La vela è totalmente sottovento: questo è il motivo per cui proiettando il carico aerodinamico secondo le direttrici della imbarcazione la componente propulsiva è di valore pari a quella laterale.

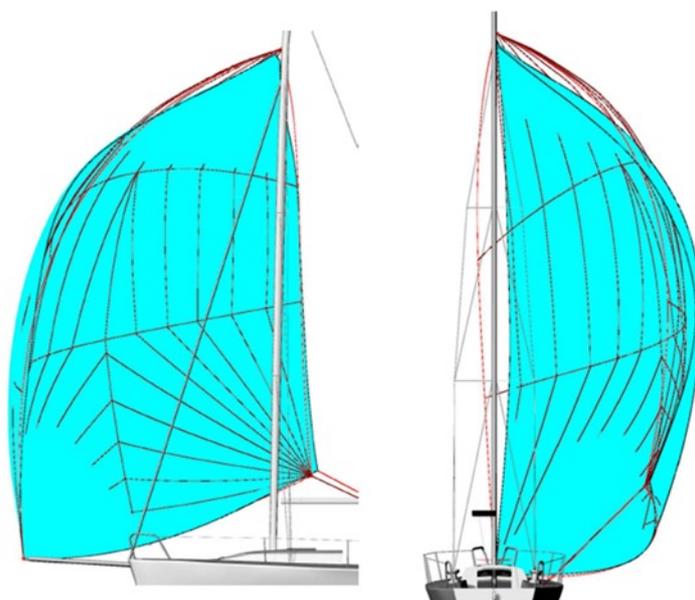


Fig. 6.10 – Confronto tra la forma di progetto (linee nere con bordi rossi) e la forma operativa (in verde) in corrispondenza ad un angolo di attacco di 64° - da [Depardaj, 2016]

Per angoli maggiori (circa $90^\circ - 120^\circ$) la vela tende ad avere una forma stabile: da tali valori in su la forma operativa della vela cambia meno di quanto lo faccia passando ad angoli minori. L'azione di lascare le scotte fa ruotare lo *spinnaker*, che si muove in avanti e sopravvento. Nella metà alta la vela risulta maggiormente svergolata (*twist*); la parte alta risulta quindi più adatta al flusso. La bolla nella parte sottovento in corrispondenza al bordo di ingresso (*LEV*) risulta collocata più in basso, all'incirca alla metà dell'altezza della vela, dove risulta essere posizionata la corda con la maggiore lunghezza. L'andamento della distribuzione della pressione è simile a quello riscontrabile per angoli minori, complessivamente con il medesimo valore medio del coefficiente differenziale di pressione, ma con un valore minore del picco di depressione sviluppato in corrispondenza al bordo di ingresso dei profili; comunque con l'aumento dell'angolo al vento apparente la velocità del vento apparente (*AWS*) diminuisce, generando quindi rispetto al caso di andature più "strette" un carico minore e minori valori assoluti della pressione differenziale. Ovviamente, la vela risulta rispetto al caso precedente lasciata e ruotata maggiormente verso prua.

È proprio in questo intervallo di valori di *AWA* che per lo *spinnaker* preso in considerazione si ha il valore massimo della spinta propulsiva generata, con una spinta laterale pari a circa la metà della prima.

Per angoli ampi (circa $120^\circ - 150^\circ$) la forma operativa si è mantenuta simile a quella assunta per angoli intermedi, con lo *spinnaker* ruotato verso prua e sopravvento ulteriormente. Il coefficiente differenziale di pressione risulta minore con la bolla in corrispondenza alla depressione del bordo di ingresso meno evidente; i carichi sulla vela sono minori.

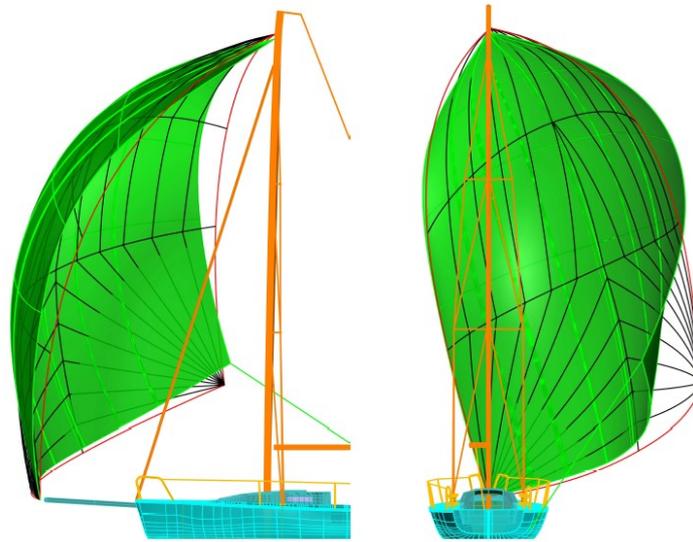


Fig. 6.11 – Confronto tra la forma di progetto (linee nere con bordi rossi) e la forma operativa (in verde) in corrispondenza ad un angolo di attacco di 124° - da [Depardaj, 2016]

Dallo studio emerge che al variare dell'angolo al vento apparente le variazioni più evidenti dei carichi e della pressione coinvolgono la zona in prossimità del bordo di ingresso come emerge dalla fig. 6.12.

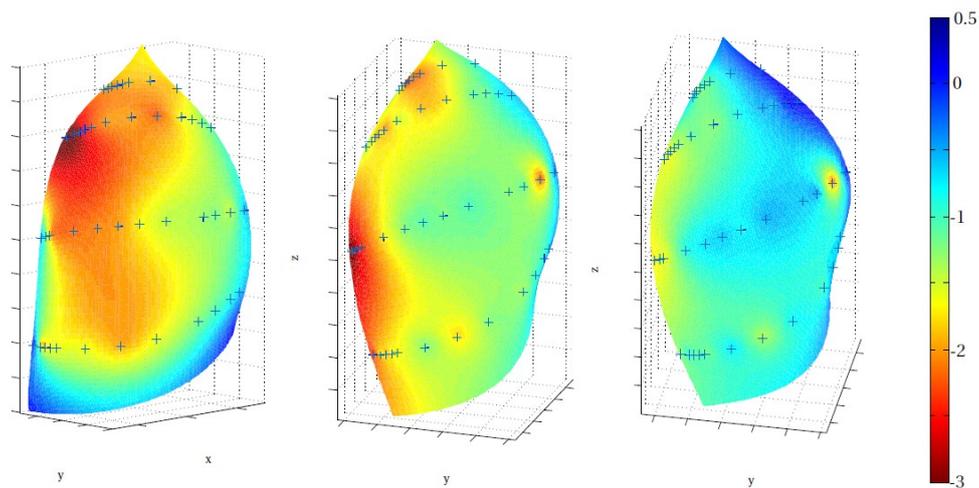


Fig. 6.12 distribuzione della pressione in funzione dell'angolo al vento apparente (66° , 118° , 140°), espressa nei termini del coefficiente differenziale, mediata nel tempo ed ottenuta per interpolazione dei valori rilevati (le croci rappresentano le posizioni dei sensori) - da [Deparday, 2016]

In fig. 6.13 vengono riportate da Deparday le misurazioni del coefficiente differenziale di pressione effettuate in uno dei due esperimenti in scala reale effettuati, quello con la randa issata.

Emerge innanzitutto che la condizione di *luffing* si ottiene, per angoli stretti (da 75° a 100°), in corrispondenza della sezione di metà (si può vedere infatti che il coefficiente è praticamente nullo), mentre per angoli maggiori si realizza nella sezione di $\frac{3}{4}$. Ciò è conseguenza del mutare della forma operativa della vela, dove, con l'azione di lascare, come conseguenza dell'aumento dell'angolo al vento apparente la forma della parte alta dello spinnaker evolve maggiormente rispetto alla parte bassa, con una caduta poppiera più aperta (svergolamento). In corrispondenza della sezione a $\frac{7}{8}$ l'elevata depressione che non evolve lungo il profilo sta a significare il distacco della vena fluida.

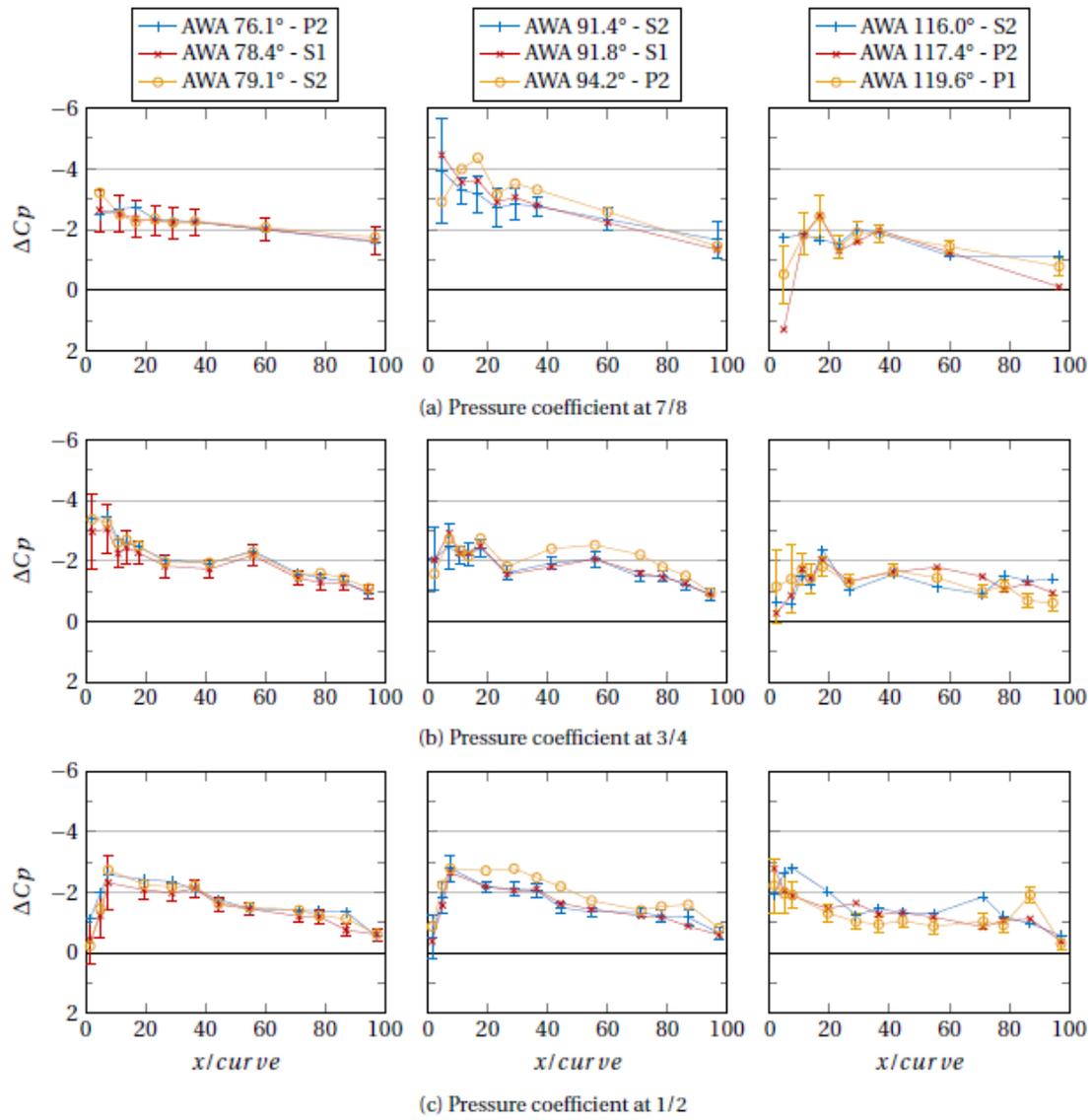


Fig. 6.13 andamento del coefficiente differenziale di pressione lungo il rispettivo profilo rilevato ad altezze diverse della vela al variare dell'angolo al vento apparente. P: mure a sx, S: mure a dritta; 1: esito della rilevazione effettuata la mattina; 2: esito della rilevazione effettuata il pomeriggio - da [Deparday, 2016]

6.5 Parametri geometrici caratteristici degli *spinnaker* e loro influenza sulla aerodinamica

Nel paragrafo precedente si è visto che gli *spinnaker* posseggono una forma operativa mutevole, legata all'andatura assunta dall'imbarcazione, e quindi alle regolazioni subite, ed alle particolari distribuzioni di pressione che conseguentemente vedono svilupparsi sulla loro superficie. La forma operativa assunta si inquadra nella dotazione di forme che i progettisti, con le scelte fatte sulla imbarcazione e sulla vela, determinano.

In [Lasher et al., 2005], con l'obiettivo di migliorare la comprensione dei problemi aerodinamici di base che riguardano gli *spinnaker* simmetrici, viene presentato uno studio effettuato in galleria del vento di 12 modelli parametrizzati di *spinnaker* rigidi (cioè indeformabili), ottenuti variando una serie di parametri geometrici, ritenuti di base.

L'obiettivo di tale studio è stato quello di verificare innanzitutto gli effetti sulle performance degli *spinnaker* delle singole variazioni dei parametri geometrici ritenuti caratteristici, per poi successivamente effettuare una serie di considerazioni, in rapporto allo specifico obiettivo aerodinamico da perseguire, utili a perseguire la corretta regolazione. Affinché gli effetti di ciascuna singola variazione non rischiassero di risultare alterati da "disturbi" lo studio è stato effettuato in galleria del vento appunto e senza la presenza concomitante di altre vele (una randa ad esempio): condizioni quindi distanti dalla realtà ma controllate, e utili per lo scopo perseguito.

I parametri sottoposti a singole variazioni sono:

- Il grasso (*camber ratio*) nella sezione di riferimento (ovvero quello del profilo della base della vela)
- L'*aspect ratio* ovvero il rapporto tra la lunghezza della linea frontale (fig. 6.16), che unisce il punto di drizza con il punto centrale della base, e la lunghezza del profilo della base

- Lo *sweep*, ovvero l'angolo tra la verticale passante per il punto di drizza e la linea retta che unisce la penna con il punto centrale del profilo alla base (fig. 6.15)
- La variazione del raggio di curvatura dei profili dalla base alla spalla dello *spinnaker* (posta all'incirca al 45% della lunghezza della linea frontale), ovvero la distribuzione verticale del grasso
- La larghezza delle spalle (in rapporto alla base), ovvero la distribuzione verticale della larghezza della vela

Model #	Camber ratio at foot	Aspect ratio	Sweep angle (deg.)	Radius ratio	Shoulder/foot ratio
1	0.25	1.4	33.69	2	1.0
2	0.45	1.4	33.69	2	1.0
3	0.25	2.0	33.69	2	1.0
4	0.45	2.0	33.69	2	1.0
5	0.25	1.4	21.80	2	1.0
6	0.45	1.4	21.80	2	1.0
7	0.25	2.0	21.80	2	1.0
8	0.45	2.0	21.80	2	1.0
9	0.15	2.0	21.80	2	1.0
10	0.25	2.0	11.30	2	1.0
11	0.25	2.0	21.80	1	1.0
12	0.25	2.0	21.80	2	0.8

Fig. 6.14 – da [Lasher et al., 2005]

Nella tabella in fig. 6.14 vengono descritti i 12 modelli di *spinnaker* rigidi attraverso i valori assunti dalle grandezze citate.

Nella figura che segue viene rappresentata la vista laterale del singolo modello di *spinnaker*, con evidenza dell'angolo che la tangente alla linea frontale forma in penna. Tale linea è uno degli elementi progettuali principali degli *spinnaker* simmetrici. La fig. 6.16 n. evidenzia, nella vista di profilo rappresentata, il significato di linea frontale.

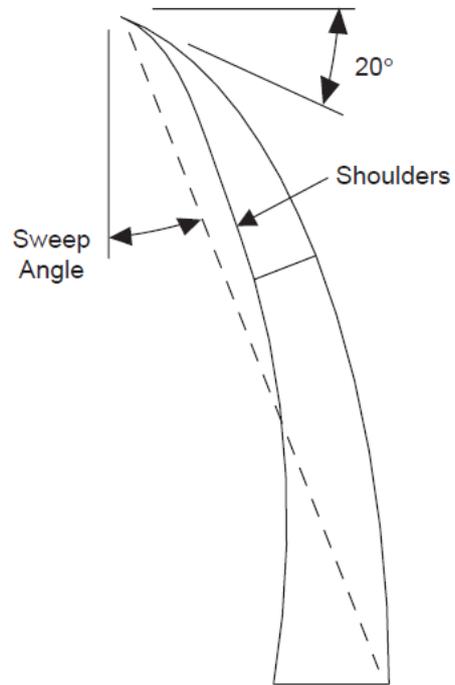


Fig. 6.15 – da [Lasher et al., 2005]

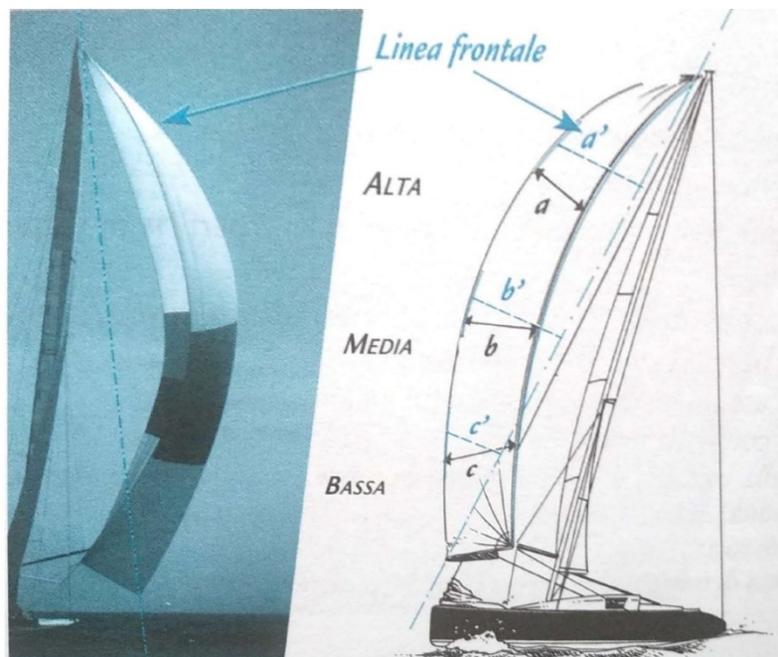


Fig. 6.16 linea frontale in uno *spinnaker* simmetrico – da [Cheret, 2003]

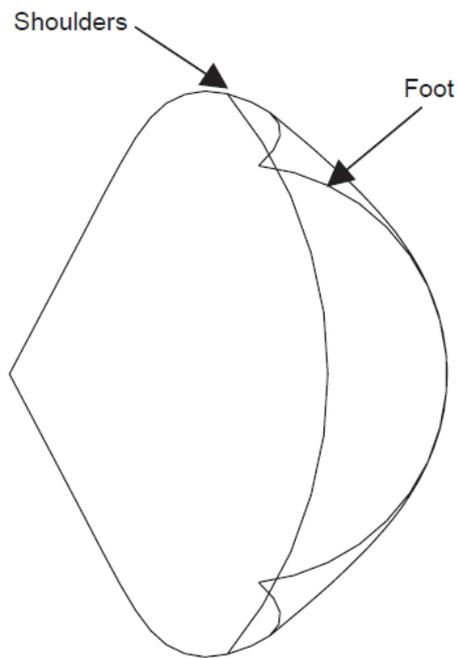


Fig. 6.17 rappresentazione dalla base del generico modello – da [Lasher et al., 2005]

La misura degli effetti della variazione di ciascun parametro geometrico caratteristico è stata ottenuta dal confronto delle polari delle rispettive caratteristiche degli *spinnaker* oggetto di studio presi a coppie, polari ottenute attraverso i test in galleria del vento.

Di seguito le polari ottenute per il modello n. 1.

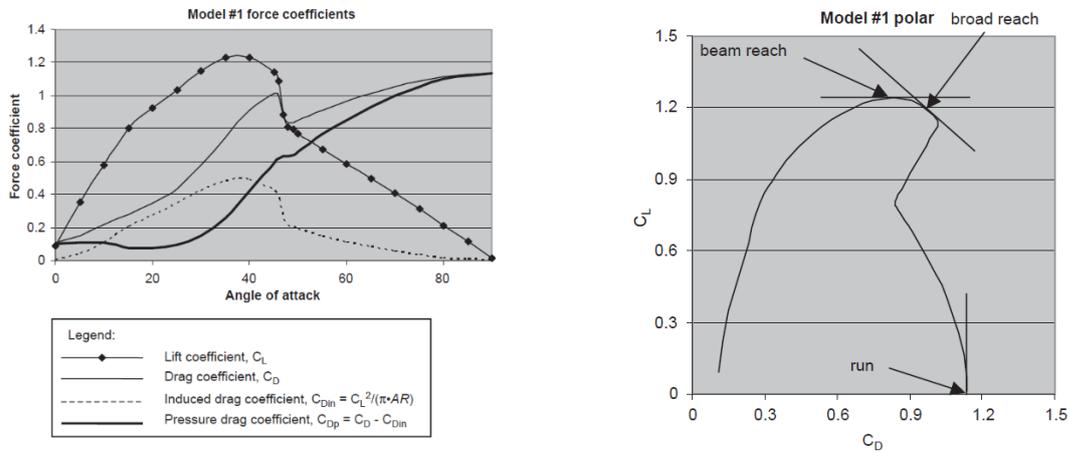


Fig. 6.18 – curve polari del modello n. 1 – da [Lasher et al., 2005]

La sintesi dei risultati ottenuti da tale confronto è riportata nella tabella seguente.

Essa evidenzia, in termini percentuali, la variazione della grandezza caratteristica delle prestazioni della vela (che, come si è visto in precedenza, dipende dall'obiettivo aerodinamico perseguito e quindi dalla andatura) ottenuta variando singolarmente ciascuno dei parametri geometrici elencati.

Models compared	Run		Broad reach		Beam reach	
	Parameter of fastest sail	Increase in driving force for faster sail (%)	Parameter of fastest sail	Increase in driving force for faster sail (%)	Parameter of fastest sail	Difference in force for faster sail
Comparison of sails with different sweep						
1 & 5	Low sweep	9	Low sweep	13	Low sweep	16% more lift
2 & 6	Low sweep	8	Low sweep	16	Low sweep	18% more lift
3 & 7	Low sweep	14	Low sweep	12	Low sweep	10% more lift
4 & 8	Low sweep	9	Low sweep	10	Low sweep	16% more lift
7 & 10	Low sweep	10	Low sweep	15	Low sweep	20% more lift
Comparison of sails with different camber						
1 & 2	Low camber	6	Low camber	6	Low camber	8% more lift
3 & 4	Low camber	3	High camber	11	Low camber	23% less drag
5 & 6	Low camber	7	Low camber	4	Low camber	6% more lift
7 & 8	Low camber	7	High camber	9	Low camber	13% less drag
7 & 9	Low camber	6	High camber	7	Low camber	20% less drag
Comparison of sails with different aspect ratio						
1 & 3	Low AR	4	Low AR	23	High AR	39% less drag
2 & 4	Draw	1	Low AR	5	High AR	18% less drag
5 & 7	Draw	0	Low AR	25	High AR	40% less drag
6 & 8	Draw	0	Low AR	10	High AR	22% less drag
Comparison of sails with different radius ratio						
7 & 11	2	5	1	7	2	20% less drag
Comparison of sails with different shoulder width						
7 & 12	Full width	16	Full width	29	Full width	28% more lift

Fig. 6.19 – da [Lasher et al., 2005]

Lo studio ha consentito quindi di riscontrare quanto segue.

È emerso quindi che:

- Bassi valori di *sweep* sono sempre preferibili
- Bassi valori del grasso (e quindi *spinnaker* piatti) sono preferibili nelle andature di poppa e di traverso
- Al lasco gli effetti generati dal grasso dipendono dal valore dell'*aspect ratio*
- L'effetto della variazione dell'*aspect ratio* è trascurabile nelle andature di poppa
- Nelle andature di lasco *spinnaker* con valori minori di *aspect ratio* sono più performanti, mentre al traverso risultano più efficaci valori maggiori di *aspect ratio*
- Nelle andature di lasco *spinnaker* con raggio di curvatura costante tra i profili delle sezioni sviluppano una spinta all'avanzamento maggiore rispetto a quelle con raggio di curvatura variabile
- Le vele con lunghezza piena dell'arco di sezione all'altezza delle spalle risultano migliori di quelle con lunghezza ridotta

Sulla base dei risultati ottenuti, in [Lasher et al., 2005] vengono successivamente sviluppate alcune considerazioni, specifiche per ciascuna delle tre andature prese a riferimento e con ricaduta anche sulle regolazioni ottimali di uno *spinnaker* simmetrico. Tali considerazioni trovano conferma in altri studi e nella pratica della regolazione.

Andature di poppa. I test hanno confermato che i fattori geometrici la cui variazione determina un aumento della proiezione frontale dell'area della vela determinano un incremento di spinta all'avanzamento. E ciò avverrebbe sia riducendo l'angolo di *sweep* sia il grasso, in particolare nei profili collocati tra base e spalle. I progettisti di imbarcazioni condizionano lo *sweep* e l'*aspect ratio*, lavorando sulla lunghezza dell'albero e del tangone, come conseguenza del triangolo di prua, e sulla larghezza della imbarcazione. I velai non sono in grado di agire sull'*aspect ratio* ma sugli altri parametri scegliendo la forma dei pannelli di tessuto con cui realizzare la vela. In navigazione i *tailer* sono in grado di modificare, attraverso le manovre correnti, lo *sweep* ed il grasso della vela.

In particolare, l'abbassamento del tangone consente di ridurre lo *sweep*, e quindi di aumentare la proiezione frontale dell'area. Contestualmente però tale manovra determina un aumento del grasso, soprattutto verso la parte alta (penna), effetto che inversamente contribuisce a ridurre la proiezione dell'area della vela: quest'ultimo aumento è dovuto al fatto che abbassando il tangone viene incrementata la tensione lungo le cadute prodiera e poppiera che quindi tendono ad avvicinarsi. In [Lasher et al., 2005] viene ipotizzato quindi che vi sia una posizione nel movimento verso il basso del tangone in corrispondenza alla quale l'aumento dell'area proiettata grazie alla diminuzione di *sweep* viene compensato dalla riduzione indotta dall'aumento del grasso in penna. Viene specificato però che tale supposizione in alcuni casi potrebbe non trovare riscontro, in particolare in condizioni di vento leggero, in quanto nella realtà la vela si trova ad operare all'interno di uno strato limite con un gradiente verticale di velocità del flusso.

Lo spostamento invece verso poppa del tangone porta ad un appiattimento dello *spinnaker* ovvero ad una riduzione del grasso. In [Lasher et al., 2005] si sottolinea

come nella realtà però per ridurre le dimensioni dell'ombra che la randa in tali andature getta sullo *spinnaker* oltre a spostare verso poppa il tangone si lascia anche la relativa scotta, vanificando così in parte l'effetto positivo prodotto dall'appiattimento generato dalla manovra sul tangone.

Andature al traverso (*beam reaching*). Altra conferma è pervenuta circa l'auspicio di avere bassi *sweep*, vele piatte ed elevati valori di *aspect ratio*. Risultati attesi in quanto in tali andature l'obiettivo aerodinamico è agevolare contestualmente lo sviluppo della componente portante della forza aerodinamica sviluppata dalla vela ed il contenimento della resistenza. Inoltre, l'aumento di area proiettata legata al perseguimento di bassi *sweep*, oltre a consentire un incremento della componente portante spinge il flusso a circondare la vela anziché tagliarla fuori passando al di sotto della base.

Inoltre, con queste andature una vela piatta è sempre auspicabile, anche se per motivi diversi. *Spinnaker* con minore *aspect ratio* se piatti sviluppano una maggiore componente portante rispetto a quelli più concavi, *spinnaker* con un valore di *aspect ratio* maggiore sviluppano se piatti una minore resistenza rispetto a quelli più concavi. Ciò si spiega considerando che:

- vele con *aspect ratio* minore, per le quali la resistenza indotta ha un peso elevato nel computo totale della resistenza, con l'appiattimento ottengono un aumento della componente portante in valore assoluto maggiore della diminuzione della resistenza
- vele con *aspect ratio* maggiore, per le quali la resistenza indotta ha un peso basso nel computo totale della resistenza, con l'appiattimento ottengono una diminuzione della resistenza in valore assoluto maggiore dell'aumento della componente portante della forza aerodinamica sviluppata.

Confrontando poi due *spinnaker* con valori diversi di *aspect ratio* nelle andature in questione si è notato che nella vela con il valore maggiore di tale parametro si ha una maggiore diminuzione della resistenza con profili più piatti piuttosto che più grassi.

Per quanto riguarda la distribuzione verticale del grasso è emerso che vele con una distribuzione di grasso uniforme sviluppano performance migliori rispetto a quelle caratterizzate da profili con un grasso che diminuisce muovendosi verso l'altezza delle spalle.

Le implicazioni sulla regolazione sono simili a quelle del caso precedente, ovvero un basso valore di *sweep* si ottiene tenendo basso il tangone mentre un grasso minore si ottiene tenendo il tangone verso poppa. Poiché gli effetti del grasso sono più evidenti con queste andature rispetto alle precedenti, è opportuno non abbassare eccessivamente il tangone, evitando di chiudere troppo lo *spinnaker* ed ingrassarlo nella parte alta a scapito delle prestazioni. Esiste anche un limite nello spostare verso poppa il tangone, corrispondente alla posizione in cui si trova sul punto di pungere. Una eventuale presenza della randa in tali andature ha un impatto minimo.

Andature di lasco. Si è verificato che sono auspicabili bassi valori di *sweep* e di *aspect ratio*. Bassi valori di *sweep* consentono una proiezione frontale dell'area maggiore e quindi una forza aerodinamica maggiore. Contemporaneamente, poiché la componente portante della forza aerodinamica ha un'azione utile in combinazione con la resistenza, bassi valori di *aspect ratio* consentono valori maggiori di resistenza indotta. Si è notato che *spinnaker* con un basso valore di *aspect ratio* devono essere piatti mentre con elevato valore di *aspect ratio* devono essere piene.

Le ricadute nell'ambito della regolazione sono particolari. Mentre è positivo mantenere basso il tangone, il fatto di tenere più verso poppa possibile il tangone dipende dall'*aspect ratio* della vela. Tirare verso poppa il tangone appiattisce lo *spinnaker*, aumentando la componente portante della forza aerodinamica totale sviluppata nel caso di vele con basso valore di *aspect ratio* e invece diminuendo la resistenza, e quindi la spinta netta all'avanzamento, nel caso di elevato valore di *aspect ratio*. Poiché abbassando il tangone diminuisce lo *sweep* ed aumenta il grasso all'altezza delle spalle i risultati consigliano di operare l'abbassamento per vele con alto *aspect ratio*, mentre nel caso di basso *aspect ratio* conviene mantenere il tangone un po' più alto.

6.6 Interazione *spinnaker* - randa

Lo studio dal punto di vista aerodinamico dell'interazione randa – vela di prua di un armo Marconi o bermudiano ha sempre avuto particolare attenzione.

In generale la randa produce effetti benefici sulla vela di prua, viceversa quest'ultima ha effetti negativi sulla prima. Ovviamente la qualità degli effetti associati alla presenza contemporanea delle due vele è riferita alla condizione in cui esse funzionino singolarmente (cioè, considerando le vele di prua, si può dire che rispetto al funzionamento in solitudine queste si avvantaggiano aerodinamicamente parlando dalla presenza contemporanea di una randa).

La tendenza appena descritta è marcata nelle andature al vento: la vela di prua gode di un maggior *upwash* e di maggiori velocità in corrispondenza al bordo di ingresso nella parte sottovento. Al variare però dell'andatura la posizione relativa delle due vele cambia.

In [Richards and Lasher, 2008] si è affrontata la questione dell'interazione tra vele nell'ambito delle andature portanti attraverso lo studio sperimentale in galleria del vento di modelli in vetroresina di randa e *spinnaker* simmetrico, affiancato all'utilizzo del metodo computazionale (CFD).

I test in galleria del vento e le simulazioni mediante CFD hanno avuto come obiettivo principale quello di rilevare per andature ben definite (120° e 100° di vento apparente), dopo aver individuato l'angolo di attacco ottimale dello *spinnaker*, l'andamento dei coefficienti di spinta all'avanzamento e di spinta laterale al variare dell'angolo che il boma genera rispetto all'asse di mezzeria della imbarcazione. Tale rilevazione è stata eseguita anche per la condizione rappresentata dalle vele a riva singolarmente.

Le conclusioni a cui gli autori sono arrivati in [Richards and Lasher, 2008] è che nella condizione di regolazione per la massima spinta all'avanzamento la randa ha pochi effetti benefici sul flusso attorno allo *spinnaker*, mentre allo stesso tempo lo *spinnaker* ha scarsi effetti avversi sulla randa. Questi ultimi assumono

maggiore significato con l'aumentare dell'angolo di scotta della randa (angolo tra boma e asse centrale dell'imbarcazione) e con angoli al vento apparente minori.

A supporto di tali conclusioni si riportano alcuni grafici riportati in [Richards and Lasher, 2008].

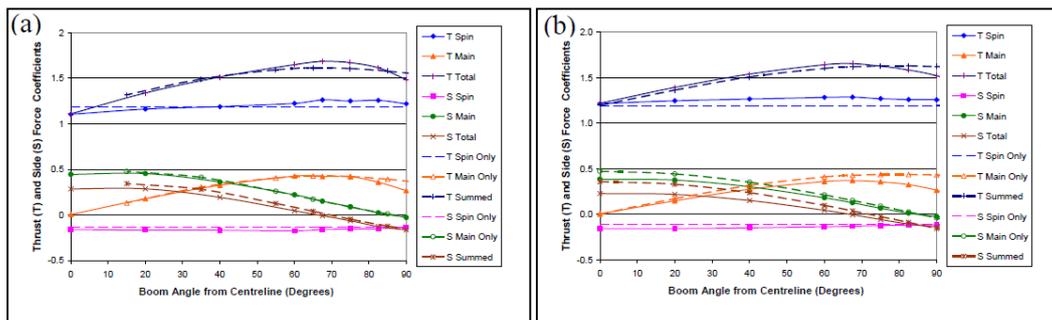


Fig. 6.20 – Effetti prodotti dalla variazione dell'angolo di scotta della randa, con l'angolo del tangone a 40° rispetto all'asse centrale dell'imbarcazione e con quello al vento apparente pari a 120° . Coefficienti di spinta all'avanzamento e laterale ottenuti con entrambe le vele a riva (linee continue) e con le vele a riva separatamente (linee tratteggiate). (a) Galleria de vento e (b) CFD - da [Richards and Lasher, 2008]

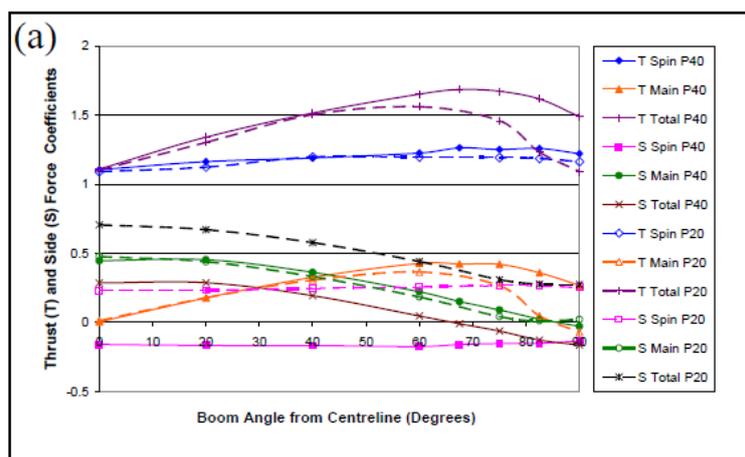


Fig. 6.21 – Effetti prodotti dalla variazione dell'angolo di scotta della randa, con l'angolo del tangone a 40° rispetto all'asse centrale dell'imbarcazione e con quello al vento apparente pari a 120° . Coefficienti di spinta all'avanzamento e laterale ottenuti - da [Richards and Lasher, 2008]

6.7 Conclusioni

Nel presente capitolo si è affrontata la questione delle vele utilizzate nelle andature portanti dal punto di vista aerodinamico, partendo dagli obiettivi aerodinamici che l'insieme delle andature in questione pone alle vele e passando dalle caratteristiche che una vela deve possedere per raggiungere tali obiettivi.

È stato messo in evidenza che, fermo restando la necessità di massimizzare la spinta all'avanzamento trasmessa all'imbarcazione, nelle andature portanti gli obiettivi aerodinamici posti ad una vela sono diversi da quelli richiesti in altre andature. Tali obiettivi prevedono diverse configurazioni della relazione tra portanza e resistenza, nelle quali anche la resistenza sviluppata dalla vela risulta possedere un ruolo nel produrre la suddetta spinta. La necessità di garantire rapporti portanza-resistenza diversi, con un ruolo anche dato alla seconda, impone la necessità di disporre, per avere la massima efficacia in tali andature, di forme innanzitutto diverse da quelle impiegate per andature al vento, e nettamente tridimensionali, attorno alle quali il flusso risulta anch'esso tridimensionale e subisce, in funzione della situazione, un distacco precoce dello strato limite, con la formazione di vortici. Tale configurazione rende complessa la simulazione del funzionamento di questo tipo di vele attraverso le tecniche numeriche.

Si è descritta la evoluzione della forma operativa degli *spinnaker*, sotto l'azione del particolare campo di moto e di pressione che per ogni situazione si strutturano attorno ad esse. Si è visto come varia il campo di moto e quello di pressione al variare dell'angolo al vento apparente e quindi dell'andatura.

Si sono inoltre visti, attraverso metodologie sperimentali, gli effetti prodotti dalla variazione individuale dei parametri geometrici caratteristici sulle prestazioni di uno *spinnaker* simmetrico fornendo un supporto giustificativo che confermi il ricorso alle regolazioni che normalmente vengono attuate nella pratica.

Infine, si è brevemente analizzata la interazione *spinnaker-randa*, confermando che in un piano velico Marconi o bermudiano la randa non danneggia anche in queste andature la vela di prua, purché regolate opportunamente.

7.CONCLUSIONI

Le vele sono in maniera semplificata assimilabili ad ali ed alla teoria sottostante queste ultime è possibile ricorrere per spiegarne il funzionamento e fornire gli strumenti per caratterizzarle. Il loro studio sperimentale conferma questo concetto. Una vela, quindi, possiede la specificità di veder sviluppare su di essa, interagendo con il vento, una forza aerodinamica riducibile non solo ad una componente diretta secondo la direzione di provenienza del vento stesso ma anche una diretta ortogonalmente. Questa componente, mutuando quanto vale per le ali, viene chiamata Portanza. È attraverso queste due componenti caratteristiche, espresse in termini adimensionali, che vengono normalmente caratterizzate le vele. È evidente che per piccoli angoli di attacco ai profili della vela la componente ortogonale risulta fondamentale per poter generare, calati in una realtà operativa, la spinta all'avanzamento necessaria, come risulta fondamentale ridurre al minimo la componente di resistenza.

Nelle andature portanti il rapporto tra queste due componenti deve mutare rispetto al caso appena descritto. Cambiano gli obiettivi aerodinamici posti al corpo portante denominato "vela" ed ai profili che la compongono. In questi obiettivi aerodinamici il ruolo della componente Resistenza è diverso al punto da diventare anche comparabile con quello della componente Portanza. Questo è il motivo per cui una vela destinata a garantire efficacia in tali condizioni richiede forme maggiormente concave ed inevitabilmente tridimensionali, rispetto a quelle di una vela che opera con andature più strette al vento e che quindi deve comportarsi in maniera molto simile ad un'ala.

Ovviamente forme concave e tridimensionali vedono attorno a loro stesse un campo di moto anch'esso tridimensionale (non approssimabile con modelli che replicano il flusso attorno ad un'ala), con fenomeni di distacco dello strato limite evidenti che possono avvenire anche in punti distanti dal bordo di uscita e quindi interessare vaste porzioni della vela. Le vele sviluppate per le andature portanti sono assimilabili a forme tozze piuttosto che a forme aerodinamiche (*airfoil*).

Queste sono sommariamente le caratteristiche degli spinnaker, vele più “tozze” di quelle utilizzate nelle andature al vento, di ampia superficie, i cui profili sono fortemente curvi e che operano con una discreta porzione della superficie sottovento in condizioni di distacco dello strato limite, con presenza non trascurabile di formazione di vortici. Per esse la resistenza aerodinamica diventa una componente utile e la teoria aerodinamica alla base dello studio delle ali fornisce un supporto troppo approssimativo: la simulazione attraverso tecniche numeriche del funzionamento di queste vele, per valutarne le caratteristiche, è una questione complessa, che necessita per ora di essere ancora affiancata a metodologie sperimentali, assai complicate e costose.

Hanno forme operative che evolvono con il variare dell’angolo al vento apparente, ovvero con l’andatura, e con loro evolvono, influenzandosi reciprocamente, i campi di moto e di pressione attorno ad esse; posseggono, nel caso degli *spinnaker* simmetrici, più variabili sottoponibili a regolazione, e quindi una certa complessità.

Il presente della ricerca su questi tipi di vele verte soprattutto sul tentativo di tener conto, nei modelli matematici implementati per approssimarne il funzionamento, anche dell’elasticità del materiale con cui normalmente vengono realizzati.

Bibliografia

- [Fossati, 2009] Fossati, F. (2009). Aero-Hydrodynamics and the performance of sailing yachts – Adlard Coles Nautical
- [Marchaj, 1996] Marchaj, C.A. (1996). Sail Performance – Adlard Coles Nautical
- [Whidden and Levitt, 1993] Whidden T., Levitt M. (1993). L'arte e la scienza delle vele - Mursia
- [Cheret, 2003] Cheret, B. (2003). Le Vele – Mursia
- [Howell, 2020] Howell, C. (2020). How sails work – North Sails
- [Davis, 2020] Davis T. (2020). La differenza tra un gennaker e uno spinnaker – North Sails
- [Deparday, 2016] - Deparday J. (2016). Experimental studies of Fluid-Structure Interaction on Downwind sails – tesi 2016
- [Garrett, 1987] - Garrett, R. (1987). The symmetry of Sailing. Adlard Coles, London. 8, 20, 21
- [Delussu et al., 2005] - Delussu G., Mulas M., Talice M. (Gruppo di Computational Fluid Dynamics CRS4, Sardegna) - “Aerodinamica delle Vele: diversa dalla aerodinamica classica?” Rivista Superyacht 2005
- [Hancock, 2003] – Hancock B. (2003). Maximum Sail Power – Nomad Press
- [Viola and Flay, 2009] – Viola I.M., Flay R.G.J. (2009). Force and pressure investigation of modern asymmetric spinnakers.
- [Ranzembach and Mairs, 1999] – Ranzembach R.C., Mairs C. (1999). Wind Tunnel Testing of Downwind Sails.
- [Viola and Flay, 2011] - Viola I. M., Flay R. - Sail pressures from full-scale, wind-tunnel and numerical investigations – Ocean Engineering
- [Viola et al., 2014] Viola I. M., Bartesaghi S., Van-Renterghem T., Ponzioni R. – Detached Eddy Simulation of a sailing yacht – Ocean Engineering
- [Viola and Flay, 2012] Viola I. M., Flay R. - Sail Aerodynamics: On-Water Pressure Measurements on a Downwind Sail – Journal of Ship Research

- [F. Fossati - S. Muggiasca - A.Vallicelli - I.M. Viola, 2006] - Caratterizzazione dell'Aerodinamica di Imbarcazioni a Vela con prove in galleria del Vento - IX Convegno Nazionale di Ingegneria del Vento, 18/06/06 - 21/06/06
- [Richards and Lasher, 2008] Richards P., Lasher W. (2008) - WIND TUNNEL AND CFD MODELLING OF PRESSURES ON DOWNWIND SAILS - BBAA VI International Colloquium on: Bluff Bodies Aerodynamics & Applications Milano, Italy, July, 20-24 200
- [Lasher et al., 2005] Lasher W.C., Sonnenmeier J. R., Forsman D. R., Tomcho J. (2005) – “The aerodynamics of symmetric spinnakers” - Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 93 (2005) 311–337