

## 4.- FONAMENTS DE LA TEORIA DE LA VELA

### 4.1.- INTRODUCCIÓ

La velocitat que un vaixell pot aconseguir degut a la seva posició en relació a la direcció del vent està determinada per la combinació de forces de diferents orígens: aerodinàmics, hidrodinàmics, flotabilitat i gravitacionals. Aquests factors depenen de la força del vent, la forma de les veles, l'aparell i els diferents sistemes de trimatge. També influeix la mida i forma del casc (en particular l'orsa i el timó), el desplaçament del vaixell i la distribució dels pesos (inèrcia i centre de gravetat), condicions climàtiques i el nivell d'experiència de la tripulació.

Des de bon principi, s'exposarà la teoria de la vela en condicions estables de navegació, és a dir, el vent tindrà una direcció determinada constant i la superfície del mar romandrà calmada. El motiu és simplificar al màxim fenòmens que poden fer més difícil entendre la teoria de la vela. A més, cal tenir present que el vent que realment percep la vela és l'anomenat vent aparent, que resulta de la composició del vent real més el vent generat pel propi moviment de l'embarcació. El twist que presenten les veles és una conseqüència directa d'aquest fet, i afecta també els resultats de les simulacions realitzades amb el nou software. A l'annex D es troben més detalls sobre el vent aparent i els seus efectes.

La millor manera d'endinsar-se en l'anàlisi d'un veler és entendre'l com la combinació d'una vela i un casc més els seus apèndixs (orsa i timó). Un bon vaixell de regates es caracteritza per l'eficiència aerodinàmica de les veles i l'eficiència hidrodinàmica de l'orsa, el timó i el casc, que són els encarregats de proporcionar a l'embarcació una estabilitat suficient per a portar correctament les veles, proporcionar una flotabilitat i acomodació adient, així com un bon espai de treball per a la tripulació.

Aquest projecte es centrarà en l'estudi aerodinàmic de les veles. Majoritàriament s'estudiaran treballant com un perfil que genera sustentació, situació que es dona quan l'embarcació rep el vent a un angle no superior als 90°. Per a angles superiors, la vela pràcticament no genera sustentació i les veles generen la força principalment per empenta directa del vent sobre la superfície vèlica. Com es comentarà al llarg de l'estudi, el comportament de les veles en un cas i un altre és completament diferent.

Tot i que en aquest apartat 4 només es dona una explicació molt bàsica, a l'annex D es troba informació molt més àmplia i detallada sobre la teoria de la vela. Totes les figures



que apareixen tant en aquest apartat com a l'annex complementari han estat extretes de [7], [8] i [9], així com la explicació de la majoria dels fenòmens que són presentats tot seguit.

## 4.2.- LA VELA COM A PERFIL SOTMÈS A L'ACCIÓ DEL VENT

Les baixes velocitats a les que circula el vent al nivell del mar en relació a la velocitat del so a l'aire, juntament amb el fet de que no es produeixen variacions importants de la seva densitat, condueix a considerar en el present estudi el fluid aire com a incompressible.

### 4.2.1.- L'equació de Bernouilli

El principi més important dins de tot aquest estudi, és el principi de Bernouilli, que en el cas de les veles i de manera molt simplificada (considerant negligibles les pèrdues per fricció) es pot resumir dient que “un augment de la velocitat va acompanyat d'una disminució de la pressió, i viceversa”, degut a que l'energia total d'una massa de fluid en moviment ha de romandre constant, i per tant, un augment de l'anomenada pressió dinàmica (velocitat) ha de comportar una disminució de la pressió estàtica, i viceversa. Aquesta energia del fluid es pot presentar en tres formes: velocitat, pressió i calor. Aquesta última forma és només present quan el gradient de pressions és elevat, i per tant, en el flux al voltant d'una vela on la magnitud dels gradients de pressió és petita, la temperatura del flux pràcticament no variarà i conseqüentment l'intercanvi d'energia es realitzarà entre velocitat i pressió. Una forma simplificada de l'expressió del teorema de Bernouilli tenint en compte les consideracions anteriors és:

$$p_{st1} + \frac{1}{2} \rho \cdot c_1^2 + H_m = p_{st2} + \frac{1}{2} \rho \cdot c_2^2 + \Delta h_{1-2} \quad (4.1)$$

A (4.1)  $p_{st}$  representa la pressió estàtica,  $\rho$  la densitat del fluid,  $c$  la velocitat,  $H_m$  el treball mecànic cedit o absorbit (en les veles és nul) i  $\Delta h_{1-2}$  les pèrdues del tram entre els punts 1 i 2. És important remarcar que l'equació de Bernouilli només és vàlida entre dos punts d'una mateixa línia de corrent.

És conegut que un cos com les veles dins d'un fluid pot experimentar una força deguda a una diferència de pressions. Si es té en compte que la velocitat del vent lluny del perfil és constant, i per tant, també la pressió, i que en canvi, per a generar les forces a les veles ha d'existir un gradient de pressions, és obvi que és necessària l'existència de dos cares diferenciades: una amb una pressió superior (cara de pressió) i una altre amb una pressió menor (cara de succió), i que tindran, si s'aplica el teorema de Bernouilli, velocitats



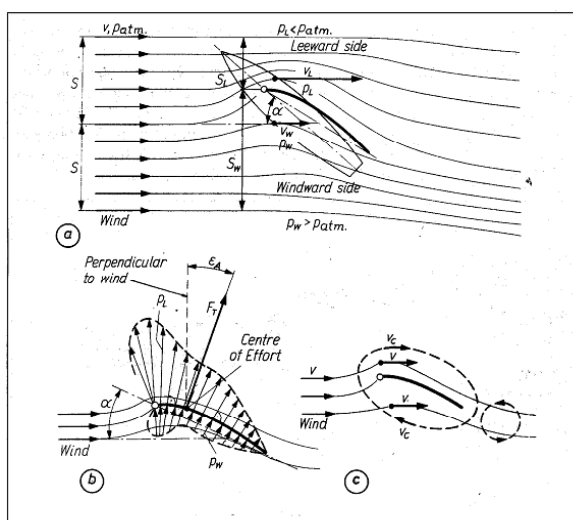
diferents. Així doncs, l'explicació per a trobar diferents velocitats partint d'una única (la del vent lluny del perfil) és l'aparició d'una circulació al voltant del perfil vèlic.

#### 4.2.2.- Distribució de pressions sobre una vela

La distribució de pressions sobre una vela depèn molt del rumb que porta l'embarcació. Per a rumbos on l'angle aparent és inferior a  $90^\circ$ , la distribució de pressions es caracteritza per una forta succió a la banda de sotavent de la vela, que té el seu pic màxim al gràtil de la vela. És en aquest tipus de rumbos on la vela impulsa l'embarcació gràcies a la sustentació originada, i la força resultant a la vela prové majoritàriament de la depressió al costat de sotavent de la vela. En canvi, per a angles superiors a  $90^\circ$ , la distribució de pressions a banda i banda canvia radicalment, i la succió a la cara de sotavent es veu reduïda dràsticament, de manera que ara la vela mou l'embarcació no per sustentació sinó bàsicament per efecte de la sobrepressió originada al costat de barlovent de la vela a partir de la transformació de la pressió dinàmica en estàtica a l'impactar el flux d'aire contra el perfil vèlic.

#### 4.2.3.- Distribució de pressions sobre una vela navegant en cenyida

És mol útil de cara a entendre el comportament del fluid al voltant d'una vela visualitzar les línies de corrent. Com a norma general es pot dir que quan més juntes estiguin les línies de corrent més velocitat hi haurà i a l'inrevés. La figura 4.1 mostra aquestes línies de corrent al voltant d'una major navegant en cenyida:



**Figura 4.1. Línies de corrent i distribució de pressions al voltant d'una vela**

Observant la figura 4.1.a, hom pot observar com les partícules de fluid es veuen obligades a passar al llarg de la vela o bé pel costat de sotavent, on les línies de corrent



s'ajunten, o be pel de barlovent, on les línies de corrent es separen. Per tant, a sotavent de la vela la velocitat del fluid és major induint una disminució de la pressió estàtica. El major canvi en la velocitat i en l'efecte de succió es troba al gràtil de la vela, tal i com mostra la figura 4.1.b. Per contra, a barlovent la velocitat serà menor i la pressió estàtica augmentarà respecte la del corrent lliure. Com a resultat, si s'agafa la pressió estàtica del corrent lliure igual a l'atmosfèrica, a la banda de barlovent hi ha sobrepressions i a la de sotavent depressions. Aquesta diferència de pressions és la que origina una força resultant  $F_T$ .

La pregunta és: "Quin és realment el mecanisme que provoca velocitats diferents a banda i banda del perfil?" Sembla ser que l'explicació recau en l'aparició d'una circulació al voltant del perfil, de manera que es pot assumir que el flux total està format per la superposició de dos fluxos: un flux constant a banda i banda de la vela i un vòrtex. Aquest vòrtex és el responsable d'accelerar el fluid a sotavent i frenar-lo a barlovent, provocant així l'aparició d'una força resultant. A l'Annex D, a l'apartat D.3, es pot trobar més informació sobre aquesta circulació i el seu procés de formació.

Per a estudiar la distribució de pressions sobre una vela, a (4.9) es defineix la diferència de pressions:

$$\Delta p = p - p_0 \quad (4.9)$$

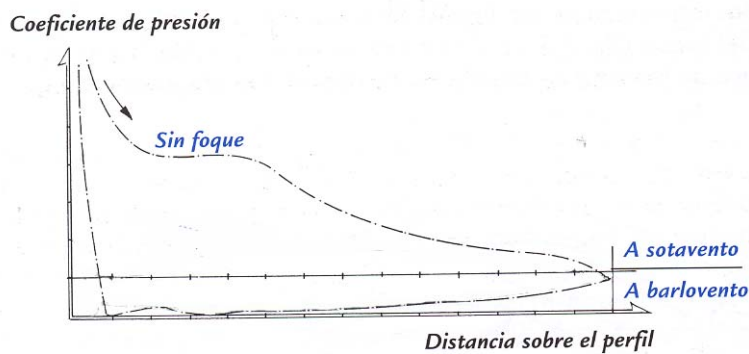
On  $p$  és la pressió estàtica sobre un punt qualsevol de la vela i el subíndex "0" indica que es tracta del valor corresponent del flux de corrent lliure. A fi i efecte d'obtenir un resultat independent de les condicions de velocitat del vent es divideix aquest valor entre la pressió dinàmica "q" del corrent lliure tal i com apareix definida a (D.2) (veure Annex D apartat D.2). D'aquesta manera es defineix el coeficient de pressió adimensional  $C_p$ :

$$C_p = \frac{\Delta p}{q_0} = \frac{p - p_0}{\frac{1}{2} \rho \cdot c_0^2} = 1 - \left( \frac{c}{c_0} \right)^2 \quad (4.10)$$

Aquest coeficient relaciona la pressió estàtica ( $p$ ) i la dinàmica ( $q$ ), i no pot excedir mai la unitat. El valor límit 1 significa que tota la pressió dinàmica es transforma en estàtica, i per tant, que la velocitat del flux és nul·la. Per tant, els punts d'estancament de la vela tenen  $C_p=1$ .

La distribució normal de pressions resultant en una vela navegant en cenyida és la mostrada a la figura 4.2:

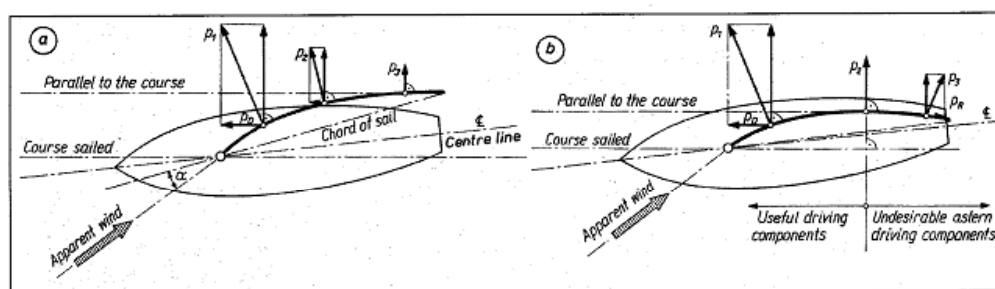




**Figura 4.2. Valor del coeficient de pressió i distribució de pressió sobre una vela major navegant en cenyida**

És obvi a partir de l'observació de la figura 4.2 que una vela presenta una cara de pressions amb un valor de les sobrepresions força uniforme, i una cara de succió amb una distribució de pressions força menys uniforme, de mode que els valors mínims de pressió es localitzen prop del gràtil ( $C_p$  més petit). Aquesta diferència de pressions és la que origina la força resultant, que a la vegada es pot descomposar en una base que permet observar la component de força d'avanç ( $F_D$ ) i la component d'escora ( $F_H$ ). Un fet que cal destacar de la navegació en cenyida, és l'ordre de magnitud de les succions en front de les sobrepresions: la contribució a la força resultant de les succions és de l'ordre del 60-75 %. Així doncs, és important intentar maximitzar aquesta succió.

A la figura 4.3 es pot veure la distribució de pressions en tres punts diferents de la vela i la descomposició vectorial mencionada anteriorment.



**Figura 4.3. Força resultant en una vela i la seva descomposició vectorial**

La figura 4.3 mostra novament com la màxima contribució a la força d'avanç es produeix al gràtil de la vela, doncs el vector resultant  $p_1$  té un mòdul superior als altres dos vectors. A mida que anem avançant des del gràtil fins a la baluma aquesta contribució disminueix ràpidament i pot arribar a ser negativa en veles amb balumes massa tancades,

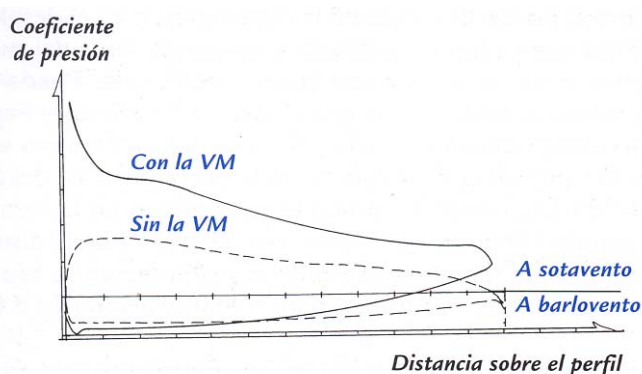


fet que genera un efecte contrari al desitjat, tal i com succeeix amb el vector resultant  $p_3$  de la figura 4.3.b.

#### 4.2.4.- Interacció entre gènova i major

Aquest és un dels punts més importants de tot el projecte, i un dels que es prestarà major atenció en el moment de realitzar la simulació. Les distribucions de pressió sobre ambdues veles quan aquestes interaccionen entre si són bastant diferents a lo exposat fins al moment degut als efectes que produeix la circulació apareguda en cada una de les veles per produir sustentació.

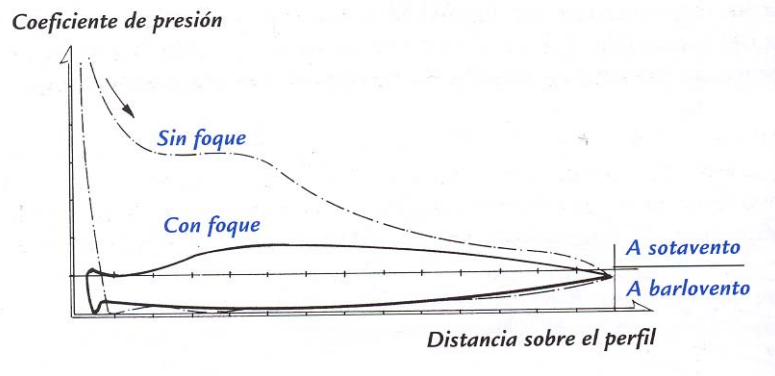
D'una banda, la circulació de la major provoca una modificació de les línies de corrent del fluid aigües amunt que provoca que l'angle amb que el flux incideix sobre el gènova sigui superior al que correspondria si només estigués el gènova. Així l'angle de caçat del gènova serà més gran que el de la major, i les succions a sotavent de la vela també majors. D'aquesta manera, es pot dir que el gènova surt beneficiat de la interacció amb la major, tal i com indica la figura 4.4:



**Figura 4.4. Coeficient de pressió sobre el gènova amb interacció amb la major (Con la VM) i sense (Sin la VM)**

En canvi, la interacció que la major pateix del gènova és ben diferent. La circulació originada al gènova provoca una disminució de la velocitat del flux a la cara de sotavent de la major, augmentant així la pressió i disminuint la diferència de pressions entre la cara de sotavent i la de barlovento on més important és la succió quan la major actua sense cap mena d'interacció amb cap altre vela, és a dir, al gràtil. Aquesta situació provoca una disminució de la força resultant generada per la major. Per tant, la interacció existent perjudica la major, tal i com indica la figura 4.5:





**Figura 4.5. Coeficient de pressió sobre la major amb interacció amb el gènova (Con foque) i sense (Sin foque)**

L'efecte global, però, és beneficiós per al veler, doncs s'empra el gènova com a motor del veler i la major com a timó, doncs com es veurà posteriorment, jugant amb la posició de la força resultant de les veles l'embarcació té un comportament o un altre. Tant si la vela davantera és un gènova o un foc, la interacció existeix igualment, però en aquest últim cas la magnitud de la interacció és molt menor degut a la menor superfície de la vela de proa.

Amb aquesta explicació es trenca per complet amb la creença que existeix entre alguns regatistes de que és el gènova que ajuda a la major ja que per l'efecte canal el flux s'accelera a sotavent de la major i per tant, la diferència de pressions entre barlovent i sotavent augmentaria.

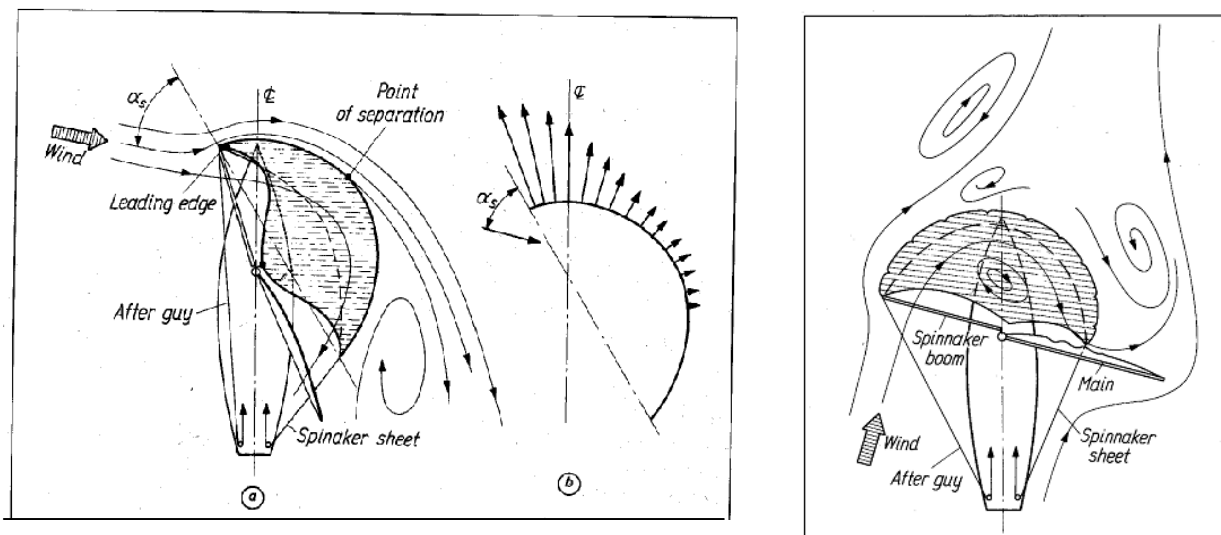
### 4.3.- LA NAVEGACIÓ A RUMB OBERTS: EL SPINNAKER

Fins ara, la major part de l'estudi s'ha centrat en el comportament aerodinàmic de les veles a rumb tancats, és a dir, rumb en el que l'angle del vent aparent respecte l'embarcació és inferior a  $90^\circ$ . En aquestes condicions, s'ha vist que la vela genera la força motriu per sustentació originada sobretot per la succió creada al costat de sotavent de la vela. En rumb oberts, però, el principi aerodinàmic que regeix el comportament de les veles ja no és la sustentació, sinó que la força motriu té el seu origen principalment en la sobrepressió creada al costat de barlovent de la vela. Aquest efecte és major a mesura que l'angle del vent aparent augmenta.

En aquestes condicions de navegació, apareix el spinnaker, una vela pensada i dissenyada per a treure el màxim rendiment de l'embarcació en rumb oberts. Inicialment, es va pensar per a rumb molt oberts, però actualment inclòs a rumb inferiors a  $90^\circ$



s'utilitzen spinnakers degut a les seves prestacions. Aleshores, si el rumb és proper a  $90^\circ$ , el spinnaker encara treballa generant sustentació, mentre que a mesura que l'angle del vent aparent augmenta la sustentació va perdent protagonisme poc a poc i la sobrepressió es converteix en el principal motor de l'embarcació. A la figura 4.6 es mostren les línies de corrent en els dos comportaments aerodinàmics del spinnaker: navegant a  $90^\circ$  i navegant en popa:



**Figura 4.6. Línies de corrent en la navegació al través i en popa amb spinnaker**

En general, el spinnaker es caracteritza per tenir una superfície vèlica i una profunditat bastant superior a la de qualsevol gènova o major. Això permet augmentar el valor de la força d'avanç a partir d'un cert angle del vent aparent. Actualment, aquesta vela s'empra des d'angles de vent aparent propers als  $70^\circ$  fins a angles de  $180^\circ$  (navegació en popa rodona). Com pot ser que la vela sigui eficient per a angles tant diferents, i conseqüentment, per a comportaments aerodinàmics tan diferents? La resposta està en que és una vela que canvia de forma fàcilment: pateix grans desplaçaments i té diversos mecanismes per a modificar la seva forma. Així doncs, apareix novament el navegant encarregat de trimar l'spi, que s'encarrega d'adequar la vela a cada situació de navegació. A L'Annex D apartat D.8 es mostra més informació sobre els diferents trimatges del spinnaker.

#### 4.4.- LES FORCES AERODINÀMIQUES

La força aerodinàmica resultant sobre una vela es pot descomposar en tres components: una primera que correspon a la component de la força d'avanç  $F_D$ , en la mateixa direcció de l'eix del vaixell, una segona corresponent a la força d'escora  $F_H$  responsable de l'estabilitat de l'embarcació, i una tercera referent a la component vertical perpendicular al pla de l'embarcació. Aquesta descomposició, de la que es pot trobar





informació més detallada a l'Annex D apartat D.4, permet estudiar l'eficiència de diferents forces, doncs una força resultant menor en mòdul pot ser millor si la component de la força d'avanç és major, i viceversa.

#### **4.4.1.- La força de resistència a l'avanç**

Com és d'esperar, no es pot obtenir sustentació sense un increment en la resistència a l'avanç de l'objecte, la qual limita la velocitat d'un veler, resistència procedent tant del pla vàlic com del casc i apèndixs de l'embarcació. La resistència a l'avanç deguda a les veles es pot classificar en resistència induïda, resistència de fricció i resistència de forma, segons els seus diferents orígens.

La resistència induïda apareix en el moment de considerar la vela com a una superfície finita tridimensional, el que provoca que en els extrems de la mateixa les pressions s'igualin disminuint la sustentació resultant, a més de generar tota una sèrie de vòrtexs que provoquen un augment de la resistència a l'avanç. En la magnitud d'aquesta resistència, l'allargament del perfil i la seva forma juguen un paper molt destacat, tal i com es pot observar a l'Annex D, on es pot trobar informació més detallada sobre les diferents components de la força de resistència a l'avanç.

La fricció de l'aire sobre la superfície de les veles és l'origen de l'anomenada resistència de fricció.

Finalment, la resistència de forma fa referència al possible despreniment del flux a la cara de sotavent de les veles, i està íntimament lligada a la forma del perfil vàlic. Per tant, torna a aparèixer la figura del trimer de les veles, que s'ha d'encarregar de donar a la vela una forma que eviti en la mesura del possible els despreniments a la vegada que maximitza la força d'avanç de l'embarcació.



