

Agustí Álvarez París i Gerard Vals Garcia

Enginyer Industrial

Febrer 2004 (pla 94)



Projecte de Fi de Carrera
Enginyer Industrial

Projecte 50 nusos. Optimització aerodinàmica d'una vela de windsurf de velocitat

MEMÒRIA

Autor: Agustí Álvarez París i Gerard Vals Garcia
Director: Enric Trillas Gay i Carlos Sierra Garriga
Convocatòria: Febrer 2004 (pla 94)



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

L'objectiu d'aquest PFC és optimitzar aerodinàmicament les veles de velocitat per a windsurfing amb la finalitat de batre el rècord del món de velocitat a vela i fer possible la navegació a vela a velocitats de fins a 50 nusos.

Per poder optimitzar el rendiment de les veles de velocitat, s'han estudiat les condicions de vent en les quals s'assoleixen velocitats superiors als 40 nusos, la posició relativa de la vela amb el vent en condicions de navegació i, sobretot, les diferents deformacions que sofreix la vela en aquestes condicions (que indirectament es tradueixen en inestabilitat, pèrdua d'empenta i sobreessorsos que ha de suportar el pilot).

Després de realitzar aquest primer anàlisi de les condicions de navegació, es defineixen els paràmetres aerodinàmics que permeten maximitzar l'empenta efectiva i també les forces que intervenen sobre l'embarcació i que han de garantir l'equilibri dinàmic del conjunt pilot - embarcació.

Un cop hem analitzat les forces i els angles que determinen la navegació de velocitat amb windsurfing s'analitza una vela real de velocitat amb l'ajuda de potents eines informàtiques com són els programes CAD i CFD. D'aquesta manera, enunciamos els punts dèbils de les veles que s'utilitzen actualment així com la descripció bàsica de com hauria de ser la vela aerodinàmica capaç de batre els 50 nusos.

Per optimitzar el rendiment d'una vela de windsurfing en condicions de navegació, es decideix perfilar aerodinàmicament la vela del pal fins a la baluma. Amb l'ajut dels programes CAD i CFD s'analitzen les possibles veles optimitzades aerodinàmicament i comprovem que una vela perfilada segons un perfil SELIG 1223 de $\approx 5 \text{ m}^2$ de superfície i 4 m d'envergadura és la que obté millors resultats, millorant de forma notable les veles actuals de velocitat.



Índex

RESUM	1
ÍNDEX	3
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	9
3. INTRODUCCIÓ	11
4. DESCRIPCIÓ D'UN WINDSURFING DE VELOCITAT	13
4.1. Components d'un windsurfing de velocitat	13
4.2. Veles de velocitat en condicions de navegació	16
5. MECÀNICA D'UN WINDSURFING	21
5.1. El vent i les forces aerodinàmiques	21
5.2. Paràmetres aerodinàmics	27
5.3. L'equilibri d'un windsurfing	28
5.3.1. Equilibri longitudinal.....	30
5.3.2. Equilibri lateral	31
5.3.3. Equilibri vertical.....	32
5.3.4. Equilibri de moments	33
5.4. Conclusions i consideracions finals	37
5.4.1. Valors geomètrics de càlcul	37
5.4.2. Anàlisi influència del pes i la posició del pilot	38
5.4.3. Altres factors	38
6. PARÀMETRES DE CONTROL	40
6.1. Velocitat de navegació	40
6.2. Ubicació.....	41
6.3. Vent aparent (V_A)	42
6.4. Angle de navegació (β) i Angle d'atac (α).....	44
6.5. Sweep, twist i contraescora	45
6.6. El rendiment vàlic (η)	45
6.7. Rendiment d'alleujament η_z	46
6.8. Resum dels paràmetres de control.....	47



7. OPTIMITZACIÓ AERODINÀMICA DE VELES DE VELOCITAT	49
7.1. Simulació aerodinàmica amb CFD	49
7.1.1. Avantatges i inconvenients de simular amb CFD	50
7.1.2. Metodologia a seguir i selecció de les eines	52
7.2. Modelització d'una vela de velocitat	53
7.3. Simulació d'una vela de velocitat	54
7.3.1. Condicions de simulació	54
7.3.2. Simulacions, resultats i conclusions	55
7.3.3. Anàlisi de la variació de la velocitat de V_A	63
7.4. Optimització de la vela de velocitat	65
7.5. Condicions de simulació de les possibles solucions	70
7.6. Simulació i resultats de les millores	71
7.6.1. Anàlisi d'alternatives al perfil Selig	81
7.6.2. Anàlisi de la variació de la contraescora	84
7.6.3. Anàlisi de la variació de l'angle de navegació (β)	85
7.7. Anàlisi i comparació dels resultats	86
8. PRESSUPOST	91
9. CONCLUSIONS	92
10. BIBLIOGRAFIA	93
10.1. Referències bibliogràfiques	93
10.2. Bibliografia complementària	94



1. Glossari

Terme o concepte	Símbol	Definició
Acceleració	a	
Angle d'atac	α	Angle entre la direcció del vent aparent i la direcció de la corda
Angle de cames	ω	Inclinació de les cames respecte el pla que forma la superfície del mar
Angle de cenyida	ϕ	Angle entre la direcció avanç de l'embarcació i la direcció del vent REAL
Angle de l'arnés	ξ	Angle existent entre la corda de l'arnés i el pla que forma la superfície del mar
Angle de navegació	β	Angle format per la direcció del vent aparent i la direcció d'avanç de l'embarcació
Centre vàlic		Lloc geomètric "teòric" on se situa la força total o vàlica generada per efectes aerodinàmics.
Contraescora	π	Angle d'abatiment respecte la normal del mar i la direcció d'avanç de l'embarcació
Corda	c	Corda d'un perfil aerodinàmic, línia que uneix la vora d'atac amb la de sortida.
Densitat del aire	ρ	
Dinàmica de fluids computaritzada	CFD	Computational Fluids Dynamics, referit al software.
Eix lateral	eix Y	Eix que serveix per definir l'orientació d'un vaixell. Direcció paral·lela al pla format per la superfície del mar, i perpendicular a la direcció d'avanç
Eix longitudinal	eix X	Eix que serveix per definir l'orientació d'un vaixell. Direcció d'avanç de l'embarcació



Eix vertical	eix Z	Eix que serveix per definir l'orientació del vaixell a l'espai. Direcció perpendicular al pla format pels eixos longitudinal i lateral.
Flotabilitat	E_{total}	Conjunt de forces hidrostàtiques (empenta d'Arquímedes) i hidrodinàmiques que garanteixen que una embarcació pugui surar.
Força aerodinàmica ascendent	F_z	Força vertical aerodinàmica, generada pels camps de pressions sobre la vela
Força de resistència a l'avanç	D	
Força de sustentació o <i>lift</i>	L	
Força lateral de l'aleta o antiabatiment de l'aleta	F_{Y_ALETA}	Força lateral de l'aleta, generada per les forces hidrodinàmiques de l'aigua del mar, degudes a l'avanç de l'embarcació.
Força lateral o deriva	F_{DERIVA} F_D	
Força motor o empenta	F_{MOTOR}	Força propulsora que fa avançar l'embarcació. Tècnicament se l'anomena Empenta vèlica i representa la força útil
Força total o força <i>vèlica</i>	F_{VELA}	
H_{vela}	H_{vela}	
Iso-superfícies		Corbes de nivell del fluent, ja siguin de pressions, velocitats, ...
Massa	m	
Moment d'equilibri del pilot	M_{ext}	
Número de Reynolds	Re	
Nus	kt	Velocitat de navegació, es mesura en milles nàutiques (1.853 m) per hora. Un nus és aproximadament 0.5 m/s



Pathlines		Línies generades el FLUENT que segueixen, per a cada punt, la direcció del flux
Pes del pilot	P	
Pes total	P_{total}	Pes del pilot, el casc i la vela
Plannform		Forma en planta. Terme comú en la nàutica per referir-se al la forma de la vela en alçat, i no al perfil o secció.
Referència <i>embarcació</i>	$Ref_{.EMB}$	
Referència <i>Terra</i>	$Ref_{.TERRA}$	
Rendiment d'alleugement	η_z	Quocient entre la força aerodinàmica ascendent i la força vèlica
rendiment vèlic	η / η_{VELIC}	Quocient entre la força motriu o motor i la força de deriva
Resistències aerodinàmiques	$R_{aero.}$	
Resistències hidrodinàmiques	$R_{hidro.}$	
Sobrevent		Part de l'embarcació per on entra el vent
Sotavent		Cara de la vela arrecerada del vent
Sweep	δ	Angle entre la normal del mar i el pal, fletxa
Tensió de l'arnés	T_p	
Tensió dels peus del pilot contra el casc	R_p	
Twist	τ	Angle existent entre les diferents seccions de la vela
Velocitat de l'embarcació	V_E	Velocitat pilot canviada de signe ($V_e = -V_{PILOT}$)
Vent aparent	V_A	
Vent real	V_R	



$Y_{\text{pes vela}}$	$Y_{\text{pes vela}}$	capítol 3, moments
Y_{peus}	Y_{peus}	capítol 3, moments
Z_{botavara}	Z_{botavara}	capítol 3, moments



2. Prefaci

Aquest Projecte Final de Carrera forma part d'un conjunt de Projectes interrelacionats entre sí sota el nom de Projecte 50 Nusos. L'objectiu global del Projecte 50 Nusos és dissenyar una embarcació lleugera de planeig capaç d'assolir un nou rècord de velocitat a vela. Per fer-ho, s'ha dividit el Projecte 50 Nusos en dos blocs diferenciats segons els elements bàsics d'una embarcació de vela de velocitat. D'una banda, l'estudi hidrodinàmic de les aletes, i de l'altra, l'estudi aerodinàmic de les veles.

El rècord del món absolut de velocitat a vela consisteix en:

- recórrer 500 m en línia recta en el mínim temps, sense haver de començar en repòs;
- impulsat exclusivament per la força del vent;
- emprant qualsevol mena d'embarcació sense limitacions dimensionals;
- amb la única condició que estigui permanentment en contacte a l'aigua;
- a mar obert;
- governat com a mínim per un tripulant;
- l'aspirant escull el lloc de la temptativa;
- l'aspirant decideix quan s'ha de realitzar la temptativa.

Aquestes són les condicions bàsiques que s'han de complir per a poder validar una temptativa de rècord. L'únic objectiu és anar ràpid amb la força del vent, sense cap mena de limitació de disseny. A la història del rècord hi han participat tota mena d'embarcacions: catamarans, planxes de windsurf i trimarans.

L'organisme que ha creat aquestes normes i l'únic capaç de validar una temptativa oficial de rècord és la WSSRC: World Sailing Speed Record Council, sota la tutela de la ISAF (International Sailing Federation). Es tracta d'una organització anglesa que des del 1972 és la única del món que pot validar un rècord de velocitat a vela. Així doncs, qualsevol que vulgui fer un assalt al rècord s'ha de posar en contacte amb les seves oficines a Hampshire per a que un equip de la WSSRC viatgi al lloc en qüestió i supervisi les proves.

A la Taula 2.1 hom pot observar els últims rècords de velocitat. Les planxes de windsurf són les embarcacions a vela més lleugeres i més ràpides que hi ha, a banda del *Yellow Pages*, una peculiar embarcació australiana (un trimarà amb una vela rígida, com si es tractés d'una



ala d'avió, que només permet encarar òptimament un rumb) que va assolir els fins ara imbatuts 46.52 nusos ja fa més de 10 anys. Vist així, podria semblar que batre aquest record passa per millorar o crear embarcacions sofisticades com el *Yellow Pages* però la realitat és molt més simple.

	EMBARCACIÓ	TRIPULANT	LLOC	VELOCITAT
1986	WINDSURF	Pascal Maka	Fuerteventura	38.86 kt
1988	WINDSURF	Erik Beale	Stes.Maries, França	40.48 kt
1990	WINDSURF	Pascal Maka	Stes.Maries, França	42.91 kt
1991	WINDSURF	Thierry Bielak	Stes.Maries, França	43.06 kt
1991	WINDSURF	Thierry Bielak	Stes.Maries, França	44.66 kt
1993	YELLOW PAGES	Simon McKeon	Sandy Point	46.52 kt

Taula 2.1 Històric dels rècords oficials segons WSSRC

El Projecte 50 Nusos té un antecedent immediat que s'anomenà Projecte 50 KT. D'aquell primer intent només es va aconseguir resoldre l'estudi de les aletes, que s'arribaren a fabricar i fins provar en una temptativa de record de velocitat a vela feta per l'especialista en windsurfing Björn Dunkerbeck l'any 2002 a Tenerife. Tot i fracassar la temptativa (només 41 nusos), es va obtenir una molt bona notícia: el pilot va reconèixer la superioritat i eficàcia de les aletes dissenyades pels components del Projecte 50 KT. Durant l'any 2002 i 2003, alguns especialistes de la velocitat a vela, entre ells Dunkerbeck, s'han animat a intentar batre un nou rècord de velocitat tot i que encara no s'ha pogut arribar, ni de bon tros, als 50 nusos. Aquest sobtat ressorgiment de temptatives demostra que el tema està de moda entre el sector, fet que ha portat l'Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials de Barcelona a continuar el Projecte 50 KT per tal d'aconseguir la fita marcada originalment.

En aquests moments, l'home que ostenta el Rècord de Velocitat amb Windsurfing, Finian Maynard, i Thierry Bielak, el primer pilot que superà la barrera dels 45 nusos, estan provant les aletes del Projecte 50 KT, preparant-se per una nova temptativa utilitzant una vela i una aleta dissenyades pel Projecte 50 Nusos, la continuació de l'antic Projecte 50 KT. Per Maynard i Bielak només hi ha un objectiu: batre els 50 nusos i iniciar una nova era de la velocitat a vela.



3. Introducció

L'embarcació destinada a batre el rècord de velocitat a vela és, sens dubte, el Windsurfing. Hi ha 3 motius que ajuden a pensar així:

- és l'embarcació més simple i lleugera, amb una manejabilitat fins ara no superada per cap embarcació de vela
- els excel·lents resultats que es van aconseguir a principis dels anys 90 només s'ajudaven de l'experiència dels pilots i de bons materials, però en cap cas es va fer un estudi aerodinàmic i hidrodinàmic per millorar els dos elements claus que permetrien batre el rècord: les aletes i les veles.
- després de provar les aletes del projecte 50 KT, Thierry Bielak i Finian Maynard ha aconseguit ultrapassar els 45 nusos, i acostar-se als 46.52 del *Yellow Pages*.

Dins del conglomerat de projectes formats pel Projecte 50 Nusos, aquest projecte tracta de l'aerodinàmica de veles. L'objectiu és optimitzar aerodinàmicament el disseny de veles de velocitat per a windsurfing. Això vol dir:

- dissenyar una vela capaç d'aprofitar òptimament la força del vent sense perdre estabilitat quan es navega a grans velocitats.
- garantir una vela lleugera i manejable, altrament cap pilot estarà disposat a enfrontar-se a la mar i el vent si no està completament segur que no corre riscos innecessaris.
- aconseguir un disseny que permeti una fabricació viable tant a nivell econòmic com tecnològic per a les empreses del sector que es dediquen a la fabricació de veles

Per poder optimitzar el rendiment de les veles de velocitat, aquest Projecte Final de Carrera ha estudiat les condicions de vent en les quals s'assoleixen velocitats superiors als 40 nusos, la posició relativa de la vela amb el vent, la col·locació del pilot i, sobretot, les diferents deformacions que sofreix la vela en aquestes condicions (que indirectament es tradueixen en inestabilitat, pèrdua d'empenta i sobresalts que ha de suportar el pilot). Un cop aconseguits els paràmetres que determinen l'eficiència de les veles a altes velocitats, es busca un disseny aerodinàmic òptim amb l'ajuda de potents eines informàtiques com són els programes CAD i CFD.



4. Descripció d'un windsurfing de velocitat

L'objectiu d'aquest capítol és descriure els elements més significatius dels windsurfings de velocitat així com la resposta de les veles en condicions de navegació. D'aquesta manera, obtindrem variables experimentals que ens serviran com a paràmetres de control per tal d'optimitzar les veles de velocitat i alhora avaluar-ne les solucions.

4.1. Components d'un windsurfing de velocitat

Com en tots els velers, els principals components del windsurfing són el casc, que ha de garantir flotabilitat i reduir al màxim el freg amb l'aigua, l'orsa que garanteix l'estabilitat durant la navegació, i la vela o òrgan propulsor. Però el windsurfing es diferencia dels velers convencionals en dos punts claus:

- la unió entre la vela i el casc. Es tracta d'una unió esfèrica, és a dir que permet la rotació de la vela respecte el casc en les tres direccions de l'espai. D'aquesta manera el navegant obté un millor, i sobretot més ràpid, control de la posició de la vela respecte el flux d'aire.
- la constitució física del pilot. Per aguantar i orientar òptimament la vela, no només cal habilitat i experiència sinó que també cal que el pilot tingui una constitució física important. Per aconseguir altes velocitats calen forts vents, i en aquestes condicions, només pilots que sobrepassin els 100 kg de pes poden mantenir la vela al capdavant d'un windsurfing. En el capítol 5 s'estudiarà més a fons aquest aspecte.



Fig. 4.1: T. Bielak el primer pilot que va sobrepassar els 45 nusos amb un windsurf de velocitat.



El windsurfing de velocitat és una embarcació de planeig lleugera que combina la gran manejabilitat del windsurfing convencional amb una gran capacitat per aprofitar la força del vent i reduir les forces de resistència a l'avanç ocasionades per l'aigua. Per aconseguir això, les solucions tècniques adoptades són:

- Casc allargat amb una gran flotabilitat a la popa
- Absència d'orsa
- Aleta llarga i profunda situada a la popa del casc
- Vela aerodinàmica

Per optimitzar una vela aerodinàmica primer ens cal de definir els elements que formen les veles de windsurfing. A la Fig. 4.2 es mostren aquests elements.

- Pal o arbre de la vela: encarregat de suportar la vela.
- Sables: petites peces allargades de secció variable que van dins uns funda cosida a la vela.
- Botavara: peça encarregada d'unir la vora de sortida de la vela amb el pal de la vela.
- Escota: el punt d'unió entre la botavara i la vora de sortida de la vela.
- Pujament: la part de la vora de sortida compresa entre el peu del pal i l'escota.
- Baluma: la part de la vora de sortida de la vela per sobre de l'escota.



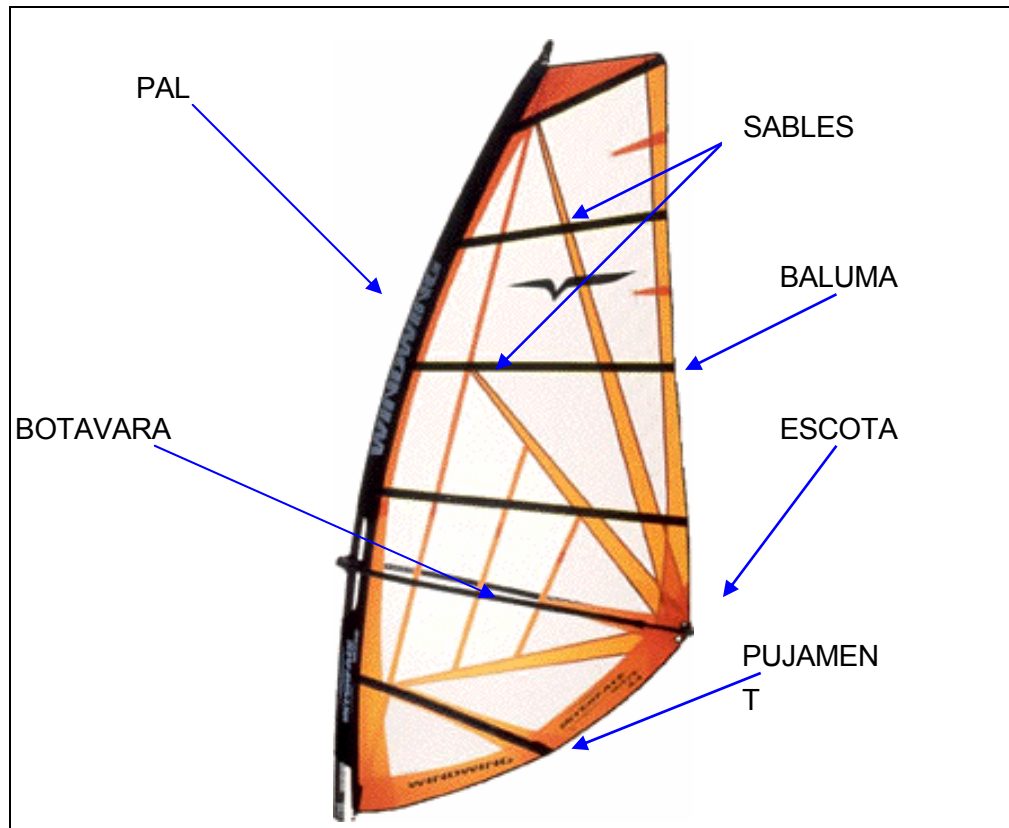


Fig. 4.2: Elements principals d'una vela de windsurf

Les veles aerodinàmiques es diferencien de les veles convencionals per la seva gran capacitat de resposta gràcies a la inclusió d'un dispositiu anomenat camber que, combinat amb els sables, augmenta el rendiment aerodinàmic d'una vela.

Els sables són unes petites barres de secció circular o rectangular que es fiquen dins unes fundes que estan cosides a la vela. Els sables tenen per missió aplanar la forma del teixit i donar un perfil aerodinàmic a la vela. D'aquesta manera es disminueixen les turbulències generades a la vora de sortida i es millora la capacitat de penetració dels perfils de la part superior de la vela.

Pel que fa al camber, com es pot veure a la Fig. 4.3, es tracta d'un perfil de plàstic que connecta els sables amb el pal. Si es tria el perfil adequadament, la vora d'atac de la vela queda perfilada com si es tractés d'una ala d'avió. D'aquesta manera, s'aconsegueix una millor entrada del corrent d'aire d'entrada, generant menys turbulències, obtenint més potència que amb una vela convencional.



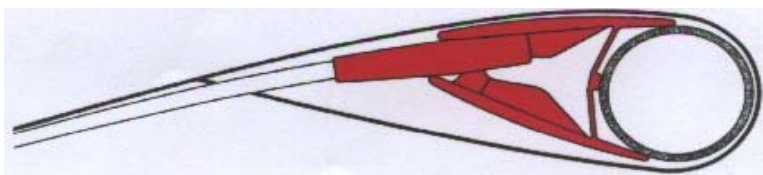


Fig. 4.3: El camber ajuda a perfilar la vora d'atac de la vela

Actualment, les veles de velocitat acostumen a tenir incorporat un camber de dimensions considerables, com el que es pot veure a la Fig. 4.4.



Fig. 4.4: El windsurfing de velocitat de Finian Maynard en plena acció a 46.26 nusos, la segona velocitat més alta que mai hagi assolit un veler.

4.2. Veles de velocitat en condicions de navegació

Per aconseguir millorar el rendiment actual de les veles de velocitat cal prestar atenció a com reaccionen les veles en condicions de navegació.

Tot i que a primera vista les veles de windsurfing puguin semblar elements rígids pel fet de ser de teixit monofilament i per disposar de sables que ajuden a rigiditzar-la, en condicions de navegació, sota l'efecte del vent, hom pot comprovar com les veles vibren i per tant, s'adapten, ni que sigui mínimament, al flux d'aire incident. En definitiva, les veles de windsurfing no són les membranes flexibles típiques dels velers ni tampoc són perfils rígids



d'ala d'avió, sinó que formen un grup especial de perfils aerodinàmics variables. Al llarg del projecte s'anirà comentant aquest tema (veure capítol 5).

La gran particularitat de les veles de windsurfing és que es poden configurar abans de sortir a navegar segons les condicions meteorològiques o la tècnica del pilot. En efecte, els sabres, la botavara i el pal poden ser tensats de manera que en funció d'aquests tensionats s'obté un perfil determinat. En altres paraules, a un mateix model de vela li podem donar diferents perfils abans de sortir a navegar. L'avantatge d'usar aquests elements tensionables és que així s'aconsegueixen veles molt versàtils. Quan s'estudien veles de velocitat de windsurfing en condicions de navegació cal tenir present aquesta variabilitat de configuracions. Ara bé, també és cert que quan es navega a grans velocitats, aquesta variabilitat es fa més petita, tot i que continua existint.

Per tal de definir el funcionament d'una vela de windsurf en condicions de navegació definirem tres paràmetres bàsics de la vela que no seran valors constants sinó intervals de valors, representant així la variabilitat de configuracions de la vela. Més endavant ens serviran com a variables a l'hora d'optimitzar el disseny aerodinàmic. Aquests paràmetres seran: el *sweep* (o corba d'inclinació), el *twist* (o torsió) i la contraescora.

El primer dels paràmetres, el *sweep*, és l'angle d'inclinació de la vela respecte la normal del terra (del mar). En aviació se l'anomena fletxa. En el cas particular de les veles de windsurfing:

- El *sweep* és un angle positiu (sentit de les agulles del rellotge)
- El pilot és qui li dona *sweep* a la vela.

El pilot inclina la vela per dos motius. En primer lloc perquè busca una posició en la qual se senti còmode evitant cansament i lesions innecessàries, i en segon lloc, i no menys important, per tancar o minimitzar el forat entre el pujament (part inferior de la vela) i la planxa. Aquest darrer factor és important de cara a minimitzar pèrdues. En la Fig. 4.5 podem veure un bon exemple:





Fig. 4.5: Visualització gràfica del sweep

El concepte de *twist* té a veure amb la resposta de la vela a les ràfegues de vent, obrint el perfil i deixant “escapar” aire per a reduir la força i evitar una bolcada. Com més vent hi ha més han de poder obrir-se els sables superiors per a poder reduir la superfície efectiva de la vela. D’aquesta manera es compensa l’increment de vent degut a la ràfega amb una reducció de la superfície efectiva i el navegant rep “sempre” el mateix esforç. Anàlogament, quan hi ha menys vent els perfils es tanquen per a augmentar la superfície efectiva de la vela.



Fig. 4.6: Fotografia on es pot apreciar el twist d'una vela





Fig. 4.7: Visualització gràfica del twist d'una vela.

Finalment cal parlar de l'angle de contraescora. Per escora s'entén la inclinació d'un vaixell damunt un dels seus costats. Per navegar a gran velocitat amb un windsurfing, el pilot ha de ser capaç d'aprofitar forts vents. En aquestes condicions, per garantir l'equilibri de l'embarcació, el pilot ha de mantenint-se en suspensió per evitar que la força del vent bolqui l'embarcació. D'aquesta manera, amb el seu propi pes, el pilot contraresta el moment de bolcada. Quan un pilot "es penja", automàticament la vela s'inclina cap a la seva posició, i diem que es navega amb un cert angle de contraescora. Un pilot experimentat pot aprofitar la contraescora per alleugerir la taula i reduir així la resistència hidrodinàmica.



Fig. 4.8: Imatge on es poden veure dos pilots de velocitat en acció. L'angle de contraescora pot variar segons com es penji el pilot tal i com es pot veure a la fotografia.

Convé recordar que aquests tres paràmetres, sweep, twist i contraescora, depenen fortament del vent i de la força i habilitat del pilot, per tant, no són variables que puguin



adoptar qualsevol valor sinó que estan molt restringides. La única manera de definir quins intervals de valors són raonables a l'hora de delimitar aquests tres paràmetres és a través de l'experiència dels pilots professionals. Empíricament, s'accepta que un pilot professional navegant a grans velocitats (més de 30 nusos) sol posicionar-se de tal manera que el rang de valors és:

Sweep	Twist	Contraescora
25-45°	20-45°	15-25°

Taula 4.1: Intervals usuals



5. Mecànica d'un windsurfing

Per optimitzar una vela cal tenir en compte tant els paràmetres aerodinàmics que permeten maximitzar l'empenta efectiva com el vent i les forces que garanteixen l'equilibri dinàmic del conjunt pilot - embarcació. Aquest és l'objectiu d'aquest capítol: fer un estudi dinàmic d'un windsurfing en condicions de navegació.

5.1. El vent i les forces aerodinàmiques

La vela és l'element motriu d'un windsurfing. A primera vista, podem comparar un veler amb el vol d'un avió. Un avió o un veler viatjant a velocitat constant (és a dir, amb acceleració nul·la) estan sotmesos a un conjunt de forces la resultant de les quals és nul·la.

En un avió, el pes està compensat per les depressions que es formen a les ales (força de sustentació o lift), i la resistència de l'aire (força d'arrossegament o drag) generat per l'empenta del motor a reacció. En un veler, en canvi, és l'empenta d'Arquímedes el que compensa el pes i permet que l'embarcació suri o planegi per damunt de l'aigua, i la resistència hidrodinàmica està totalment compensada per la força motriu aerodinàmica que la vela pugui aprofitar del vent. Si la força del vent varia (ja sigui en intensitat, ja sigui en orientació), es produeix un desequilibri momentani, que modifica la velocitat del veler fins que el pilot aconsegueixi un nou equilibri variant el sweep i l'angle d'atac.

Per analitzar dinàmicament un windsurfing, s'ha de tenir en compte que la velocitat del vent (la força motriu de l'embarcació) i les forces aplicades depenen de la Referència on ens situem. De referències d'estudi que ens puguin interessar, en el cas d'un veler n'hi ha dues: la Referència TERRA i la Referència EMBARCACIÓ, que viatja a velocitat constant respecte aquesta última. Òbviament, considerarem que la superfície de la Terra (la superfície damunt la qual el windsurfing navega) està en repòs (considerant la Terra com una referència galileana, [1]).

Un cop establertes les dues referències d'estudi, passem a analitzar com el vent incideix a la vela (Referència EMBARCACIÓ) i quines forces aerodinàmiques provoca sobre l'embarcació. Anomenem V_R (de vent real) a la velocitat de l'aire en relació a la Referència TERRA. Sobre un pla d'aigua, el vent real és la velocitat de l'aire en relació a la costa.

En una embarcació que es desplaça a velocitat V_E (velocitat de l'embarcació) respecte la Referència TERRA, el pilot nota un vent V_A (vent aparent), que no és res més que la velocitat



de l'aire en relació amb l'embarcació. Per això diem vent aparent. Ho expressem, matemàticament, com la següent suma de vectors:

$$\vec{V}_{APARENT} = \vec{V}_{REAL} + \vec{V}_{PILOT} \quad (\text{Eq. 5.1})$$

Aquesta relació vectorial, geomètricament dóna lloc al que s'anomena el TRIANGLE DE VELOCITATS. Coneixent la V_R i la V_E podem conèixer fàcilment V_A .

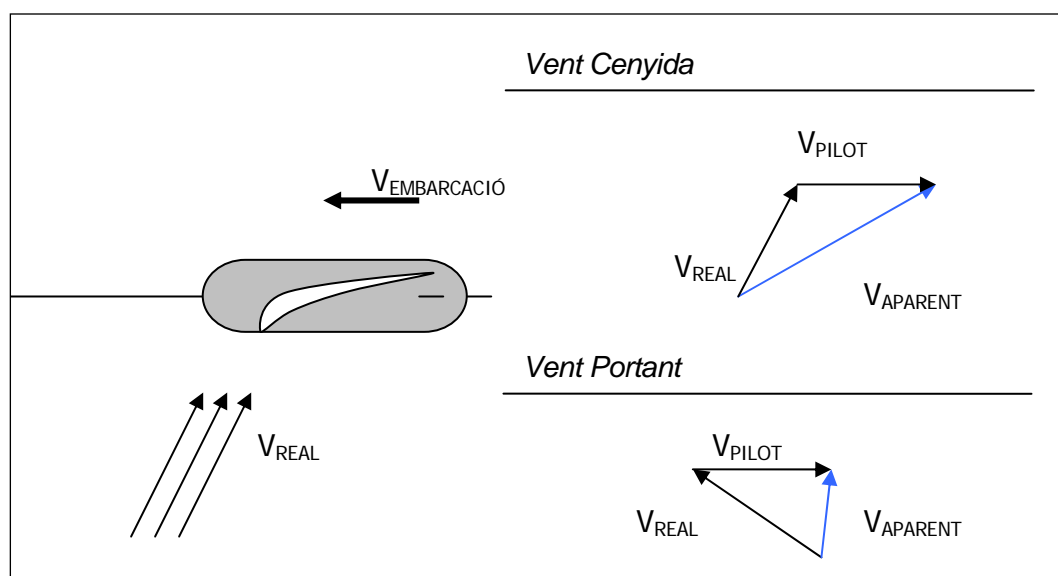


Fig. 5.1: Comparació entre vent de cenyida i portant.

Però el Triangle de Velocitats no només serveix per poder determinar el vent aparent sinó que també ens permet extreure les següents conclusions [2]:

- En els rums de cenyida, el vent aparent té més intensitat que el vent real, i l'angle que forma amb l'embarcació és menor que el que forma amb el vent real. Aquesta relació es fa més evident en embarcacions de velocitat, quan la V_E és molt alta. Dit això, podria semblar que la clau per aconseguir una bona velocitat és navegar en cenyida, i en canvi, a la pràctica no és així. El motiu és que els rums de cenyida són rums inestables i difícils de mantenir en línia recta, ja que el fort vent tendeix a desplaçar el vaixell de manera que la vela s'apropa cada cop més a la direcció del vent. A mesura que això passa, es perd velocitat i augmenta la deriva, fins que al final, s'ha d'obrir la vela i canviar de rumb si es vol continuar avançant.



- En els rumbos portants en canvi, la intensitat del vent aparent és menor. Els rumbos portants són rumbos estables i tranquils. Per aquest motiu, amb un mateix vent, segons com enfoquem l'embarcació i la vela, es pot navegar en cenyida sentint un gran vent o bé es pot navegar tranquil·lament amb un rumb portant. A l'annex B es parla amb més detall d'algunes particularitats dels windsurfs navegant amb rumbos portants.
- Per aconseguir grans velocitats cal arribar a un compromís entre rumb agressiu (cenyida) i rumb estable (portant). L'únic rumb que compleix aquests requisits és el rumb amb vent llarg [2]. Quan es navega en aquest rumb, les veles estan orsades (tensionades) com si es tractés d'un rumb de cenyida, però a diferència d'aquest, l'embarcació navega a favor del vent i per tant es té l'estabilitat que tenen els rumbos portants. Geomètricament, el rumb amb vent de llarg és un rumb portant "a punt de ser cenyida".
- Hi ha 3 paràmetres que ens serviran més endavant a l'hora d'optimitzar el disseny. D'una banda, la intensitat del vent aparent, ja que és el vent útil que origina les forces aerodinàmiques, i de l'altra, dos angles que determinen com incideix el vent sobre el perfil de la vela. Veure Fig. 5.2 a continuació. L'angle format pel vector vent aparent i el vector velocitat embarcació, en el dibuix angle b, que en termes tècnics s'anomena Angle de navegació mentre que l'angle format pel vent aparent amb el conjunt del perfil de la vela (línia de la corda) se l'anomena Angle d'atac (a en la Fig. 5.2).



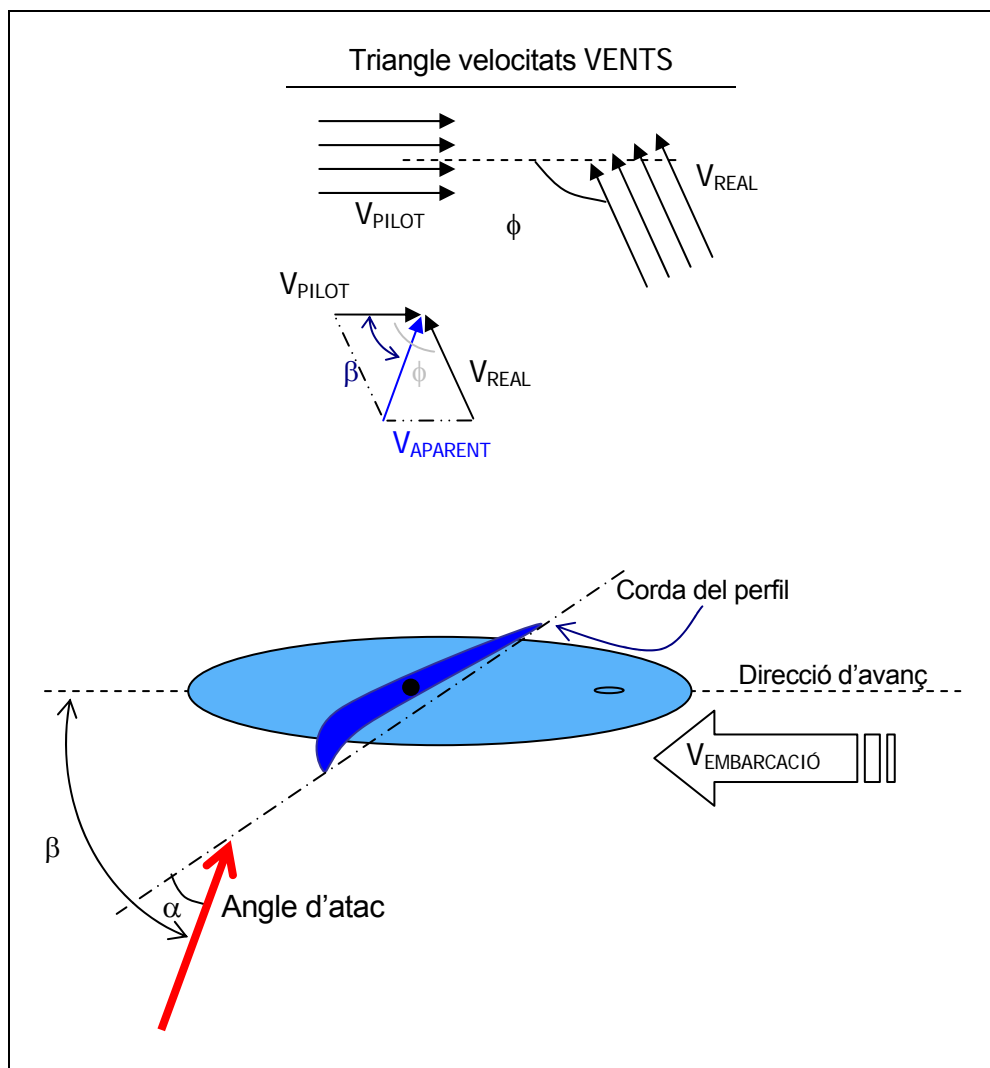


Fig. 5.2: Triangle de velocitats a l'embarcació.

- Si es navega amb la vela ben tensionada (cas dels windsurfings de velocitat), el vent aparent és tangent a la vora d'atac de la vela tal i com es pot veure a la figura anterior. Això es deu a què el vent no és el mateix al llarg del pal o arbre de la vela (hi ha un perfil de velocitats), de manera que es modifica la incidència (angle d'atac) des de la part superior fins a la part inferior. En altres paraules, al llarg de la vela varia l'angle d'atac (tot això es veurà gràficament en el capítol 5), i per tant, el punt d'estancament varia al llarg de la vela, formant-se el twist.

Fixant-nos detingudament en el Triangle de Velocitats, i amb uns mínims coneixements d'aerodinàmica, es pot explicar la paradoxa que suposa veure un veler navegant "amb el vent en contra" ([3], [7] i [9]).

Un veler es mou gràcies a l'acció del vent que incideix sobre la vela. Aquest vent efectiu no és el vent real sinó el vent aparent. Considerant la vela com un perfil aerodinàmic (variable),



l'acció del vent sobre la vela és anàloga a l'acció de l'aire sobre una ala d'avió (sobre un perfil aerodinàmic): una força de pressió a la cara d'intradós (per les veles s'anomena sobrevent) i una depressió a l'extradós (sotavent). A l'annex B es descriuen amb més detall l'origen de les forces en un perfil aerodinàmic i el nom que reben en nàutica.

És la depressió i no la força de pressió la que proporciona la major part de l'empenta vèlica, de la mateixa manera que un avió no vola surant per l'aire sinó que vola perquè aprofita un flux aparent d'aire que l'atreu cap amunt. La força vèlica, com qualsevol força aerodinàmica aplicada sobre un perfil, es pot descomposar en dues forces: una en la direcció del flux incident (que equivaldria al DRAG en una ala d'avió), i una perpendicular al flux (que equivaldria al LIFT en una ala d'avió). Sumant vectorialment ambdues forces, s'obté la resultant del vent sobre la vela. Tècnicament i empíricament es pot demostrar que en realitat no és possible navegar en contra del vent real, sinó que ha d'existir un cert angle entre la direcció d'avanç i el vent real (angle β a la Fig. 5.2) ja que, en cas contrari, la resultant del vent no permet avançar cap endavant.

Si considerem la tercera dimensió de l'espai, en una vela, com en qualsevol perfil aerodinàmic, apareix una tercera força perpendicular al pla format pel LIFT i el DRAG. Generalment, aquesta tercera component no és important, sobretot en aeronàutica. En el cas dels windsurfings, tanmateix i com veurem més endavant, aquesta tercera component juga un paper força important.

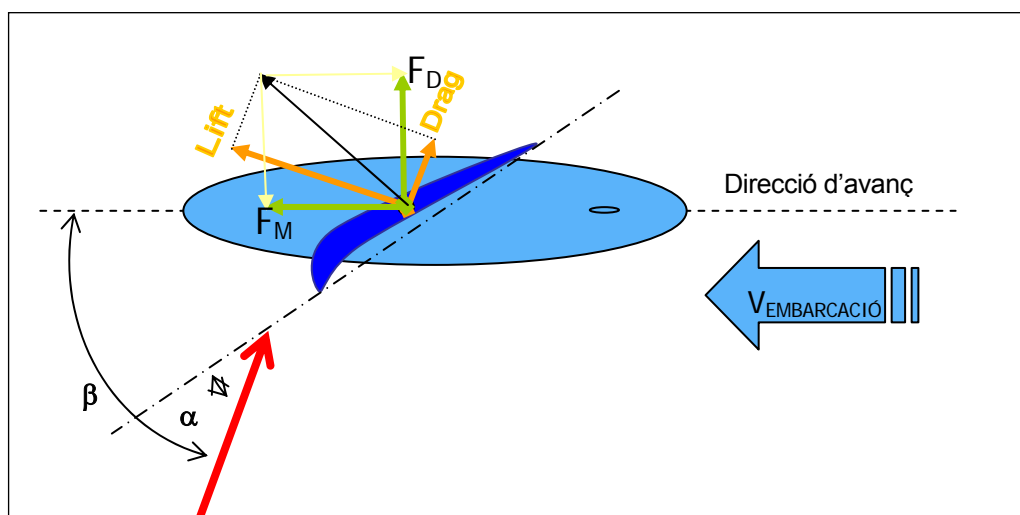


Fig. 5.3: Canvi de base de les forces aerodinàmiques

Ara bé, així com en aeronàutica la descomposició de lift i drag és la que ens interessa per valorar un bon disseny aerodinàmic, en el cas de les veles (nàutica), ens interessa



descomposar la *força total o força vèlica* (F_{VELA}) en dues components, MOTOR i DERIVA, segons la direcció del moviment de l'embarcació (Ref. EMBARCACIÓ) i la seva perpendicular en el pla. Quan es tracta d'embarcacions de planeig, no es possible obviar una tercera component perpendicular al pla que formen les altres dues. Així doncs, la F_{VELA} es pot estudiar component a component. Les tres components són:

- i. F_{MOTOR} : la força propulsora que fa avançar l'embarcació. Tècnicament se l'anomena Empenta vèlica i representa la força útil.
- ii. F_{DERIVA} : una força que provoca un moviment de deriva i un moment d'abatiment o bolcada. Tot i que en principi interessaria minimitzar-la o fer-la desaparèixer, el cert és que quan es navega a grans velocitats, és a dir, en cenyida, aquesta força d'abatiment resulta inevitable si es vol aconseguir una força de propulsió. En el procés d'optimització, comentat més endavant (vegeu capítol 5), s'estudiaran les condicions que minimitzen la força F_{DERIVA} i maximitzen la força F_{MOTOR} .
- iii. F_Z : una força vertical, els efectes de la qual solen ser molt petits si no es navega a grans velocitats (30 o més nusos). Aquesta força vertical és deguda al flux de l'aire al xocar contra la vela. F_Z és sempre una força ascendent que no sol tenir un paper gaire important en velers convencionals però sí que sol jugar un paper molt important quan es navega amb windsurfing amb rumb de cenyida. Inclinant el pal, podem aconseguir grans valors de força F_Z ascendent. Això té dos grans avantatges: en primer lloc, aixequem lleugerament el casc de l'embarcació i reduïm resistència hidrodinàmica (és a dir, perdem contacte amb l'aigua i planegem de manera que s'obtenen millors velocitats puntes amb un mateix vent), en segon lloc, el pilot pot controlar el pilot gràcies a les sensacions que experimenten mentre naveguen. Per contra, i com es demostrarà més endavant, una força F_Z elevada només es pot aconseguir si el pilot té una tècnica i constitució física imponents.

És important també tenir en compte el punt d'aplicació d'aquesta força com es veurà més endavant (anàlisi de moments sobre l'embarcació). Mentre en aeronàutica es parla del centre de pressions (punt on s'apliquen les forces aerodinàmiques), en nàutica, es parla de centre vèlic. En el cas dels velers, per ser les veles perfils aerodinàmics variables amb el temps, el centre vèlic no és fix. La seva ubicació depèn, en bona mesura, de la variació del camp de pressions existent en cada moment sobre la superfície de la vela. Això podrà variar degut a diverses raons, com podria ser la variació del vent aparent, angle d'atac,...

Tot això ens permet arribar als següents raonaments pel cas d'un windsurfing:



- La força del vent, a més d'empenta, afegeix un moviment de deriva i un moviment ascendent (de planeig). Per tant, una bona vela ha de tenir un disseny aerodinàmic que maximitzi l'empenta i minimitzi la deriva i la bolcada.
- El perfil que la vela adopti en condicions de navegació, condicionarà l'angle d'atac al llarg de la vela, i aquest la resultant de la força del vent aparent. Un bon disseny aerodinàmic ha de tenir en compte un bon camber i un bon twist que permeti optimitzar l'angle d'atac a la major part d'àrea vèlica possible.
- L'experiència i habilitat del pilot determinen l'angle de navegació. L'angle d'atac depèn del perfil de la vela però també de l'angle de navegació, de manera que, variant l'angle de navegació, un pilot pot fer variar l'angle d'atac, i per tant, pot "controlar" d'alguna manera la força resultant del vent. L'obtenció del rècord de velocitat depèn tant de l'experiència i habilitat del pilot com del disseny aerodinàmic de la vela.

5.2. Paràmetres aerodinàmics

Tenint en compte que la velocitat a la que es vol navegar és de 50 kt (uns 25 m/s), com que es tracta d'un règim clarament subsònic es pot considerar l'aire com un fluid incompressible, és a dir de densitat constant, i per tant es poden aplicar les teories clàssiques de sustentació i resistència (veure [5], [6] i [12]) mitjançant les següents equacions:

$$L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot S \cdot \rho \cdot V^2 \quad \text{força de sustentació} \quad (\text{Eq. 5.2})$$

$$D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot S \cdot \rho \cdot V^2 \quad \text{força de resistència a l'avanç} \quad (\text{Eq. 5.3})$$

$$M = \frac{1}{2} \cdot C_M \cdot S \cdot \rho \cdot V^2 \cdot c \quad \text{moment torsor} \quad (\text{Eq. 5.4})$$

on:

S és un paràmetre de superfície de la vela, normalment s'agafa l'àrea de la secció lateral (plannform),

ρ és la densitat de l'aire (aprox. 1,2255 kg/m³, a nivell de mar, a 15°C i 760 mmHg) segons [11],



V és la velocitat del vent aparent incident i

c és la corda del perfil.

C_L, C_D i C_M són els coeficients adimensionals característics d'un perfil aerodinàmic.

5.3. L'equilibri d'un windsurfing

El moviment real d'un windsurfing és, en realitat, una successió de règims transitoris. Per simplificar, considerarem vàlida la hipòtesi que quan el pilot navega amb un rumb fix i estable, l'embarcació rep una empenta que li produeix un moviment permanent amb petites variacions. Tot això equival a dir que l'acció del vent es compensa amb les reaccions de l'aigua i accions del pilot respecte l'embarcació (l'arnés i la tensió dels peus contra el casc compensen el pes). Aquesta hipòtesi és totalment vàlida pel cas d'un windsurfing que navega a gran velocitat en un canal o un medi (un llac, un delta) on les onades no solen ser importants, o fins i tot són inexistents. En canvi, aquesta mateixa hipòtesi no és vàlida per a determinades situacions com pot ser l'arribada a port o la navegació quan hi ha grans onades (per al nostre cas onades superiors a 30 cm). Aquestes situacions són, ara per ara, problemes inabordables des del punt de vista físic i matemàtic.

En definitiva, per a poder optimitzar una vela, estudiarem un windsurfing navegant a gran velocitat considerant que segueix un moviment uniforme (velocitat constant) seguint sempre el mateix rumb.

Per estudiar l'equilibri del conjunt de masses embarcació - pilot, s'accepta el concepte d'espai i temps clàssic o newtonià, de manera que podem aplicar les Lleis de Newton [1] a l'hora de determinar l'equilibri d'un windsurfing en moviment. Un equilibri a l'espai, matemàticament es pot descomposar en 3 equilibris segons les 3 dimensions que formen l'espai clàssic newtonià (espai tridimensional euclídic). Tot i que poden agafar-se 3 direccions qualsevulles sempre i quan siguin ortogonals entre elles, utilitzarem les 3 direccions ortogonals que se solen agafar per orientar una embarcació que sura sobre el mar (veure Fig. 5.4).



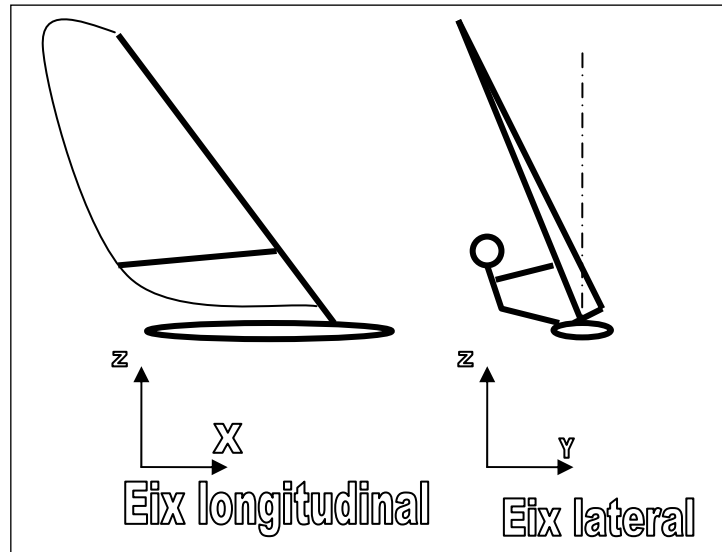


Fig. 5.4: Visualització dels eixos d'estudi

Considerant aquests tres eixos (Fig. 5.4), tenim:

- *Equilibri longitudinal* (EIX X), ve determinat per una resultant nul·la de totes les forces que tenen la direcció de l'avanç de l'embarcació, sempre que considerem que avancem amb velocitat constant. El balanceig de l'embarcació fa que, a cada instant de temps, hi hagi un equilibri longitudinal específic. En el cas d'un windsurfing navegant amb rumb fix a velocitats superiors als 30 nusos, en medis sense onades, els efectes del balanceig es poden depreciar per ser insignificants.
- *Equilibri lateral* (EIX Y), ve determinat per una resultant nul·la de totes les forces que tenen la direcció perpendicular a la direcció de l'avanç de l'embarcació i en el pla paral·lel a la superfície del mar. El capcineig de l'embarcació fa que, a cada instant de temps, hi hagi un equilibri lateral determinat. Tanmateix, els efectes del capcineig només són importants en medis on hi ha grans onades. Quan es fan temptatives de record de velocitat, que és el nostre cas d'estudi, se solen realitzar en indrets on no hi hagi onades (canals, deltes, llacs...).
- *Equilibri vertical* (EIX Z), ve determinat per una resultant nul·la de totes les forces que tenen una direcció perpendicular a la superfície del mar. Quan una embarcació efectua una guinyada, l'equilibri vertical varia substancialment. Aquest no és, per descomptat, el nostre cas.



5.3.1. Equilibri longitudinal

El conjunt de forces que garanteixen un equilibri longitudinal són (Fig. 5.5):

- Resistència hidrodinàmica (inclou casc i aleta)
- Resistència aerodinàmica
- Empenta vèlica útil o força motriu (F_{MOTOR})

$$\sum F_{ext} = m \cdot a \xrightarrow{V=cte} F_{\text{MOTOR}} = R_{\text{AERODINÀMIQUES}} + R_{\text{HIDRODINÀMIQUES}} \quad (\text{Eq. 5.5})$$

Les resistències aero- i hidrodinàmiques depenen bàsicament de la posició en la qual el pilot col·loca la vela i del quadrat de la velocitat a la qual es desplaça l'embarcació. L'empenta vèlica útil depèn del vent, la forma, la col·locació i els materials de la vela. Per un vent donat, una embarcació podrà accelerar fins que arribi a una velocitat a la qual les resistències tinguin un valor que compensi l'empenta vèlica.

Mentre $F_{\text{MOTOR}} > R_{\text{AERO.}} + R_{\text{HIDRO.}} \rightarrow \text{ACCELERACIÓ D'AVANÇ}$

A mesura que augmenta la velocitat, $R_{\text{AERO.}} + R_{\text{HIDRO.}} \uparrow$ fins que s'arriba a una velocitat que $F_{\text{MOTOR}} = R_{\text{AERO.}} + R_{\text{HIDRO.}}$. És aleshores quan s'assoleix la velocitat màxima.

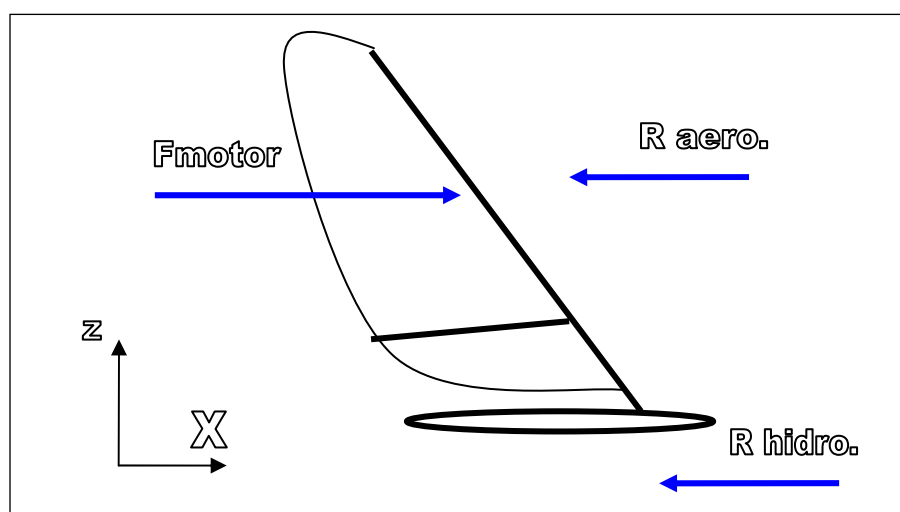


Fig. 5.5: Equilibri longitudinal



En els següent capítol, s'estudiarà la manera de minimitzar les resistències i augmentar l'empenta vèlica per a un vent donat, cosa que equival a dir que es buscarà aconseguir un equilibri en unes condicions de velocitat d'avanç superior a les possibles actualment

5.3.2. Equilibri lateral

El conjunt de forces que garanteixen un equilibri longitudinal són (Fig. 5.6):

- Força lateral de l'aleta o antiabatiment de l'aleta (F_{Y_ALETA})
- Força de deriva aerodinàmica o abatiment aerodinàmic o força de bolcada (F_D)

$$\sum F_{ext} = m \cdot a \xrightarrow{V=cte} \text{Antiabatiment hidrodinàmic} = \text{Força de deriva aerodinàmica}$$

$$F_D = F_{Y_ALETA} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

En windsurfs de velocitat es navega amb un cert angle entre la direcció del vent i la direcció d'avanç, de manera que la força de deriva és inevitable. Optimitzar una vela de velocitat significa arribar a un compromís entre empenta vèlica elevada i deriva mínima. Més endavant, quan s'analitzin els moments sobre l'embarcació, es descobrirà que la deriva està limitada pel pes del pilot i per la F_z .

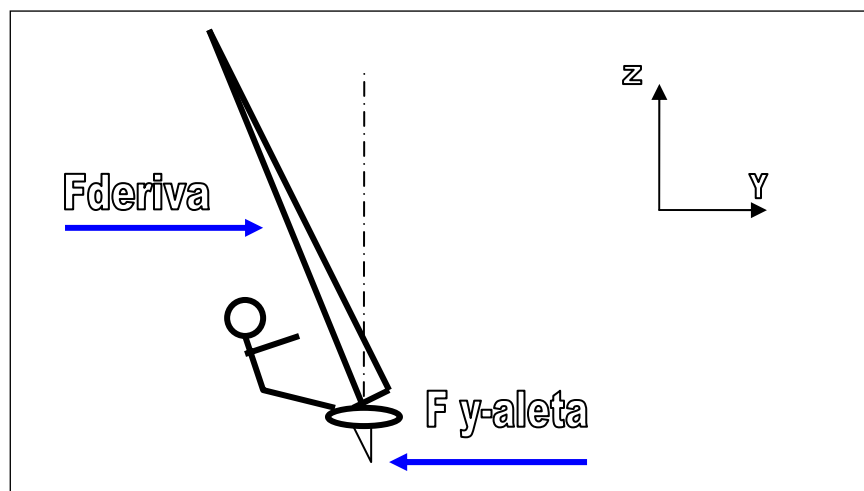


Fig. 5.6: Equilibri lateral.



5.3.3. Equilibri vertical

El conjunt de forces que garanteixen un equilibri vertical són:

- Flotabilitat (suma vectorial de l'empenta d'Arquímedes -força estàtica, l'empenta hidrodinàmica del casc, i una força hidrodinàmica descendent causada per l'aleta).
- Pes total (suma vectorial del pes del pilot, pes del casc i pes de la vela. Més endavant, quan es plantegin equacions de moments, es tindran en compte aquestes tres forces per separat)
- Força aerodinàmica ascendent o de planeig (F_z)

$$\sum F_{ext} = m \cdot a \xrightarrow{V=cte} P_{TOTAL} = E_{TOTAL} + F_z \quad (\text{Eq. 5.7})$$

on $E_{TOTAL} = E_{ARQ.} + E_{DIN} + F_{ALETA}$ i $P_{TOTAL} = P_{CASC} + P + P_{VELA}$

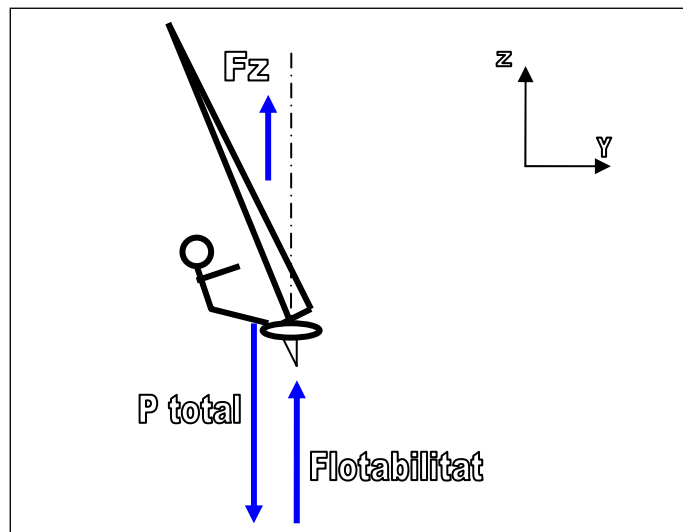


Fig. 5.7: Equilibri vertical

L'equació d'equilibri vertical permet explicar perquè els velers suren. En el cas d'un windsurfing apareix un terme addicional (F_z) que, combinada amb l'alta flotabilitat del casc, permet explicar perquè les planxes de windsurfing planejen.



L'empenta total o flotabilitat de l'embarcació representa dues forces; d'una banda l'empenta d'Arquímedes, que és una acció estàtica igual al pes del volum desplaçat pel casc en repòs, i de l'altra, l'empenta hidrodinàmica que correspon a una acció dinàmica.

El terme F_z sol ser un valor molt petit en els velers convencionals, fins al punt de ser despreciable, però en el cas dels windsurfings no és així degut a l'orientació de la vela quan es navega a certa velocitat. Interessa que l'empenta dinàmica i F_z siguin màximes ja que, en aquestes condicions, l'empenta d'Arquímedes disminueix o el que és el mateix, l'embarcació planeja reduint resistències hidrodinàmiques. L'empenta dinàmica depèn bàsicament del casc i la velocitat, per tant, en aquest projecte no entrem a valorar com podria augmentar-se ja que això pertanyeria a un projecte dedicat a millorar el casc de l'embarcació. Sí que s'estudiarà –en el capítol 5- com i sota quines condicions F_z és més o menys important, i quins efectes té sobre l'equilibri global.

Finalment, un cop s'ha fet l'equilibri de forces, es fa la suma de moments i s'imposa que sigui zero per tal de mantenir l'equilibri dinàmic.

5.3.4. Equilibri de moments

Fins ara hem tractat el conjunt embarcació – pilot com si fossin dues masses puntuals, buscant un equilibri de forces. Però perquè un sòlid estigui en equilibri a l'espai, són necessàries 3 condicions addicionals, que corresponen a les tres equacions de moments (segons el Teorema del Moment Cinètic, [1]).

De les rotacions possibles a l'espai, n'hi ha una que és de vital importància en qualsevol veler. Es tracta de l'equació de moments respecte l'eix X, és a dir, la condició que han de complir les forces pertanyent al pla $\gamma - z$ (lateral - vertical) per tal que l'embarcació es mantingui estable sense bolcar. L'equació de moments respecte l'eix X ens relaciona les tres variables més importants d'un veler: el pes, l'aleta i la força vèlica.

En el cas del windsurfing, abans de passar al càlcul de moments, és interessant caldrà primerament resoldre l'equilibri de forces al pilot per tal de poder determinar les accions d'aquest sobre l'embarcació. El motiu és evident: interessa descomposar el pes del pilot en les dues forces que realment pateix l'embarcació: l'arnés que lliga el pilot amb la vela, i la tensió dels peus amb el casc. D'aquesta manera, hom pot analitzar la seva distribució o respecte l'embarcació per tal d'obtenir la posició òptima del pilot dins dels límits marcats per la capacitat o perícia que tenen els professionals del windsurfing a l'hora de navegar a altes



velocitats. Aquest darrer factor es determinant, ja que els pilots més experimentats solen aconseguir col·locar-se de tal manera que maximitzen la resistència a la bolcada de l'embarcació i alhora aconseguen assolir velocitats més altes, en unes condicions de vent i onades determinada; en resum, optimitzen notablement la navegació.

Tot seguit, a la Fig. 5.8, podem veure l'anàlisi vectorial de forces exteriors i moments a l'embarcació generades pel pilot i l'anàlisi del cos pilot.

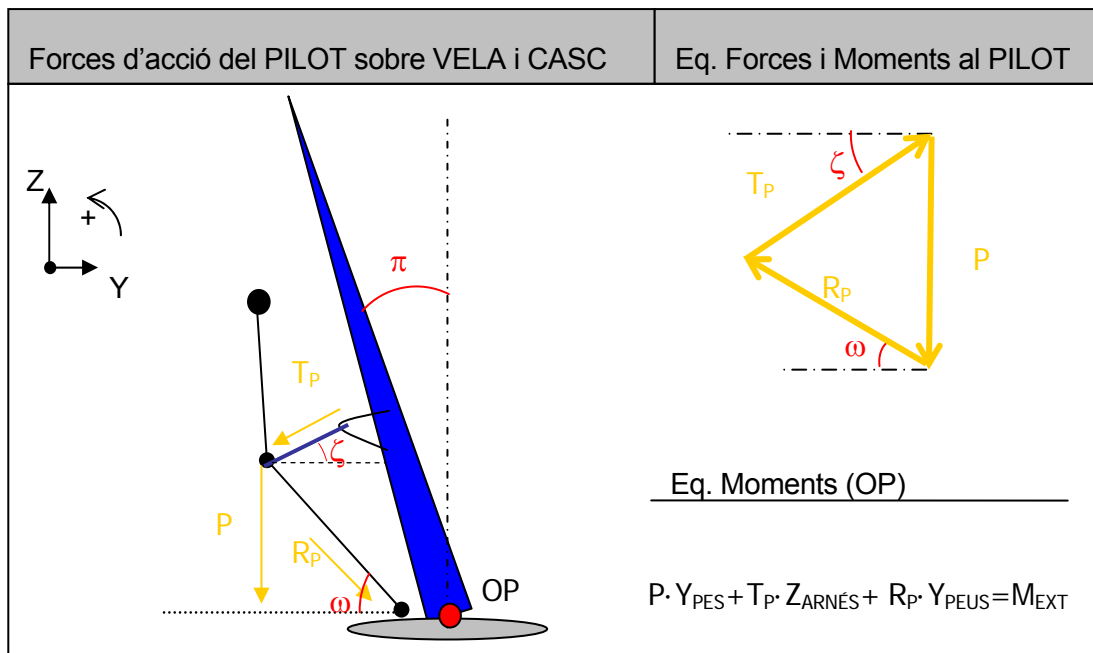


Fig. 5.8: Anàlisi de vectorial de forces i moments sobre el PILOT

D'aquest anàlisi podem arribar a aïllar les forces T_p i R_p en funció del pes del pilot i de la seva posició, això ens permetrà seguidament (en els paràgrafs següents) tenir el equilibri de tot el sistema, en els diferents eixos i o plans, en funció del pes, la posició del pilot i d'altres variables importants, i deixar de banda aquelles internes que ens són menys importants de cara al nostre l'estudi de la vela. Tanmateix ens ajudarà a optimitzar tant la vela com la posició del pilot.

Abans de continuar, posarem les forces generades pel pilot en funció del seu propi pes:

$$R_p = P \cdot \left[\frac{1}{\cos(\omega) \cdot \tan(\zeta) + \sin(\omega)} \right] = \kappa_1 \cdot P \tag{Eq. 5.8}$$

$$T_p = P \cdot \left[\frac{\cos(\omega)}{\cos(\omega) \cdot \sin(\zeta) + \sin(\omega) \cdot \cos(\zeta)} \right] = \kappa_2 \cdot P \tag{Eq. 5.9}$$



Tot seguit passarem a analitzar l'equilibri de moments sobre la vela.

Moments respecte l'eix X:

Les forces que causen moments respecte l'eix X són: el pes del casc, l'empenta o flotabilitat total, les accions del pilot, el pes de la vela (P_{VELA}), la deriva (F_D), la força lateral de l'aleta ($F_{Y_{ALETA}}$) i la força ascendent aerodinàmica (F_Z).

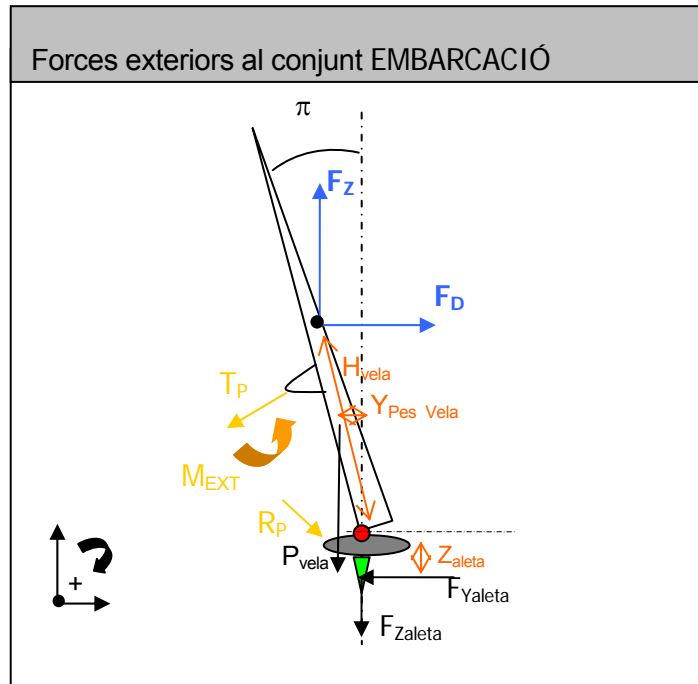


Fig. 5.9: Càlcul de moments a l'eix X

Si fem moments en la unió de la vela al casc (punt vermell a la) al punt adequat tenim la següent expressió (i tenint present la Fig. 5.8):

$$F_{DERIVA} \cdot H_{VELA} \cdot \cos(\pi) + F_Z \cdot H_{VELA} \cdot \sin(\pi) + F_{Y_{ALETA}} \cdot Z_{ALETA} = P_{VELA} \cdot Y_{PES_{ALETA}} + \underbrace{T_P \cdot Z_{ARNÉS} + R_P \cdot Y_{PEUS} + P \cdot Y_{PES}}_{= M_{EXT}}$$

(Eq. 5.10)

Si recordem les condicions d'equilibri anteriors, sabem que perquè el windsurfing mantingui el rumb, cal que es compleixi les condicions descrites a l'equilibri lateral (apartat 5.3.2)



$$F_D = F_{Y_ALETA} \quad (\text{Eq. 5.6})$$

Els integrants del projecte 50 KT van aconseguir optimitzar les aletes de windsurfing obtenint uns resultats espectaculars. Amb les aletes del projecte 50 KT, un windsurfing pot mantenir el rumb amb forces de deriva superiors als 2.000 N. Òbviament, ens interessa poder mantenir el rumb per a altes derives ja que, com ja s'ha dit repetidament, una alta força de deriva implica una gran força motor i per tant, la possibilitat d'assolir altes velocitats.

Combinant les equacions (Eq. 5.8), (Eq. 5.9), (Eq. 5.10) i (Eq. 5.10) a (Eq. 5.10) obtenim una nova equació restrictiva de moments a l'eix X:

$$F_D \cdot (H_{VELA} \cdot \cos(\pi) + Z_{ALETA}) + F_Z \cdot H_{VELA} \cdot \sin(\pi) = P_{VELA} \cdot Y_{PES_ALETA} + P_{PILOT} \cdot (Y_{PES} + K_1 \cdot Y_{PEUS} + K_2 \cdot Y_{ARNÉS}) \quad (\text{Eq. 5.11})$$

D'aquesta equació s'arriba a la conclusió que, per una aleta i un vent donats, un windsurfing tindrà la seva resistència a bolcar en funció de:

- El pes del pilot: com més alt sigui més grans seran les seves accions per contrarestar la bolcada produïda per la força d'estabilitat de l'aleta i la deriva del vent. Els pilots professionals, amb l'equip corresponent, solen pesar entre 100-110 kg. A més a més, si allunyem el centre de gravetat del pilot, de la vela, aconseguirem augmentar el parell generat per aquest.
- De la distància entre el centre de masses del pilot i el punt d'unió entre el pal i l'embarcació (en bona mesura, degut a l'angle ω) i la col·locació de l'arnés (angle ζ). Com més "penjat" estigui un pilot, més deriva podrà aguantar navegant (angle ω mínim i angle ζ mínim). A la pràctica, els valors òptims dins de les limitacions tècniques dels pilots professionals solen ser de $\omega = 25^\circ \pm 5^\circ$ i $\zeta = 35^\circ \pm 5^\circ$, com veurem a Fig. 5.10, i segons indicacions de [9].
- Del centre vèlic: com més baix sigui més estable serà el windsurfing. La situació exacte del centre vèlic és, ara per ara, un problema físico-matemàtic inabordable. Nosaltres considerarem la hipòtesi que un windsurfing navegant en cenyida té el centre vèlic força baix (a l'Annex B s'hi troba informació addicional sobre la posició del centre vèlic d'un windsurfing), en un punt proper al centre de gravetat de la vela. Tenint en compte l'angle de contraescora (π) (uns 20°), el centre vèlic queda tan sols a un altura de 1,5 metres respecte el punt d'unió entre el pal i el casc.



Fig. 5.10: Forces i angles de posició (ω i ζ) al PILOT.

5.4. Conclusions i consideracions finals

Un cop fet l'anàlisi de forces i moments, mirarem de fer un anàlisi de certs aspectes importants alhora que posarem valors a algunes de les variables per tal de quantificar o demostrar les influències i la rellevància de certs factors, com per exemple, la posició del pilot.

5.4.1. Valors geomètrics de càlcul

Els valors que prendrem com a valors de càlcul d'ara en endavant són promitjats a partir de l'anàlisi de diverses fotografies (com per exemple la Fig. 5.10) així com dels valors que es recomanen en els cursos de navegació amb windsurfing [9]. Així doncs els presentem a la taula següent:

H_{VELA}	1,50	m	K_1	1,225	π	20	°	
Z_{ALETA}	0,15	m	K_2	1,366	ω	25	°	
Y_{PES_ALETA}	0,50	m	$Y_{ARNÉS}$	1,35	m	ζ	35	°
Y_{PES}	1,30	m	Y_{PEUS}	0,40	m			

Taula 5.1: Resum de valors geomètrics de l'embarcació i pilot



Utilitzant els valors de la Taula 5.1 i substituint-los a (Eq. 5.11) arribem a una nova igualtat més reduïda:

$$1,56 \cdot F_D + 0,51 \cdot F_Z = 0,50 \cdot P_{VELA} + 3,09 \cdot P_{PILOT} \quad (\text{Eq. 5.12})$$

5.4.2. Anàlisi influència del pes i la posició del pilot

Si recordem la Fig. 5.8: Anàlisi de vectorial de forces i moments sobre el PILOT (i les equacions que en deriven) i la seva influència en l'(Eq. 5.11) veiem que tant T_P com R_P tenen un mòdul més elevat que el pes, això es degut a la inclinació del pilot, que provoca les components verticals siguin grans deguts a què els angles ω i ζ són força petits, i fan que calguin forces força elevades per contrarestar el pes.

Així podem dir que si el pilot fos capaç de baixar la seva posició fins a $\omega=15^\circ$, fent així que $\zeta \approx 28^\circ$ tindriem que K_1 i K_2 augmentarien en un 35% el seu valor, fent que al balanç global de moments (Eq. 5.12) el coeficient del pes del pilot augmentés un 20%. Aquest fet implicaria un augment considerable de la velocitat de navegació, com es veurà al capítol 5. Però com ja s'ha comentat amb anterioritat, disminuir els angles ω i ζ sense tenir una gran tècnica és perillós, donat que tota l'embarcació serà més difícil de maniobrar. És a dir, el pilot perd capacitat de suportar les possibles onades, ràfegues de vent,....

En efecte, si ens fixem en un pilot navegant amb onades, a mar obert, veurem que la seva posició és més elevada, doncs l'angle ω supera els 35° , fent decreixer un 12% el coeficient del pes de (Eq. 5.12) respecte el cas inicial. Val a dir, que els angles citats aquí (ω i ζ) són força variables durant la navegació. Clarament, sabem que el vent no serà constant durant la navegació, ni en direcció ni en velocitat, alhora que podem trobar variacions, tot i ser petites, en l'onatge. Tot això farà que el pilot hagi de modificar la seva posició contínuament i fent difícil establir uns valors exactes de cara al càlcul, és per això que prendrem uns valors, per al supòsit de fer la prova al canal, elevats. Òbviament, aquest serà un factor de seguretat de cara a garantir l'estabilitat del conjunt. Els valors que prendrem són els citats a la Taula 5.1.

5.4.3. Altres factors

A més de l'influència del pes i posició del pilot també hi ha altres punts que cal esmentar, tot i que són poc controlables. En primer lloc tenim la situació del centre vàlic, aquest serà molt important ja que ens determinarà el parell generats per les forces aerodinàmiques (F_{VELA}). Però com ja s'ha dit anteriorment, és un factor que ens vindrà determinat per la posició de la vela i de les condicions de navegació (vent, velocitat,...) fet que, en general, fa difícil que pugem millorar aquest aspecte, ja que el pilot posiciona la vela com pot. En altres paraules,



quan el pilot es posiciona, la seva posició sol limitar la capacitat d'orsar la vela. El darrer factor a destacar serà el valor de la força F_{VELA} així com la seva direcció (mitjançant la seva descomposició a l'espai) però aquest punt es tractarà al capítol 6.

Finalment cal tenir sempre present que tant la posició, pes del pilot,... són variables que els propis pilots solen negar-se a variar dràsticament, donat que estan acostumats a navegar amb una tipologia de veles molt concreta que els hi és molt familiar. Això òbviament, limita les opcions a l'hora de buscar solucions per millorar la velocitat ja que impedeix separar-se gaire del model tradicional de veles.

Per això aquest projecte el que fa, no és un nou disseny radicalment innovador, sinó un mètode d'optimització de les veles de velocitat a partir de models existent i ja contrastats. Arribats a aquest punt, és important remarcar el fet que vàries universitats (entre elles la UPC) ja han intentat redissenyar les veles de velocitat d'un windsurfing tractant les veles com si fossin ales d'avió intentant emular el Yellow Pages, la única embarcació que ha superat els windsurfs. L'experiència però, no ha estat gaire fructífera. El motiu és que el windsurfing depèn tant de l'aerodinàmica com de l'habilitat del pilot i la seva capacitat física. Les veles rígides com ales d'avió són pesades i difícils de manejar, de manera que el windsurfing perd la seva principal virtut: la seva versatilitat i manejabilitat.

De la mateixa manera si el pilot augmentés el seu pes, posant-se carregues de plom, augmentaria també, de forma lineal, el coeficient de moment del pes de l'equació (Eq. 5.12). És evident, que aquest és un factor emprat pels pilots de velocitat, però que també comporta un risc elevat d'ofegar-se en cas de caiguda, ja que el pilot pot quedar inconscient (degut a la elevada velocitat) i podria enfonsar-se per l'elevat pes. Per altra banda, també comportaria una davallada important de la flotabilitat de l'embarcació, fent augmentar així, les resistències hidrodinàmiques del casc, i possiblement, arribant a la paradoxa que més pes impliqués un menor velocitat.



6. Paràmetres de control

Un cop hem analitzat les forces i els angles que determinen la navegació de velocitat amb windsurfing podem definir com ha de ser la vela aerodinàmica capaç de batre els 50 nusos. Aquest capítol fa una descripció bàsica dels paràmetres emprarem per poder arribar a una solució òptima, fiable i viable tant a nivell econòmic com tecnològic, i que alhora ens serviran per a avaluar les possibles solucions amb criteris comuns.

Els punts a considerar són (tots estan relacionats entre ells):

- Velocitat que volem assolir navegant.
- Ubicació de l'indret on es farà la temptativa de rècord.
- Vent aparent (V_A).
- Angle de navegació (β) i Angle d'atac (α).
- Els angles de navegació (sweep, twist i contraescora).
- El rendiment vèlic (η).
- El rendiment d'alleujament (η_z)

6.1. Velocitat de navegació

Òbviament, el primer paràmetre de control és la velocitat que ha d'assolir l'embarcació. L'objectiu del projecte és optimitzar una vela de tal manera que sigui possible navegar a 50 nusos. Ja tenim, per tant, un paràmetre de control. Tanmateix, com ja s'ha vist en el capítol anterior, el que realment ens interessa és determinar quin és el vent aparent quan es navega a 50 nusos ja que és el vent aparent el que origina esforços sobre la vela.

Per determinar el vent aparent necessitem conèixer la velocitat de navegació, les condicions de vent real i l'angle entre el vent real i la velocitat de navegació. Un cop tinguem això, matemàticament (triangle de velocitats, veure capítol 5) podrem obtenir el vent aparent. Les condicions de vent real vénen donades per l'indret on s'intenta fer la temptativa de rècord. L'angle entre el vent real i la velocitat de navegació ve donat per l'experiència dels pilots a l'hora de mantenir l'equilibri amb el windsurfing.



6.2. Ubicació

Per batre el rècord del món de velocitat a vela, interessa navegar en un delta o un canal en el qual el vent pugui bufar fort "sempre" en una direcció i alhora les onades no puguin ser importants. Fins ara, els únics pilots de windsurfing que han sobrepassat els 45 nusos (Thierry Bielak, David Garrel i Finian Maynard) només ho han aconseguit en un canal artificial situat a França conegut simplement com *El canal*. El canal té una longitud de 1.100 metres de llargada i 15 d'amplada i es caracteritza per està situat en un lloc geogràfic on el vent té principalment dues components que bufen de manera més o menys constant amb una intensitat ideal per a navegar en windsurfing (en alguns indrets de les costes Canàries, el vent és més intens però les ratxes variables i les fortes onades impedeixen que els pilots pugin mantenir-se en equilibri).



Fig. 6.1: Localització geogràfica del canal

Nosaltres, per desenvolupar i optimitzar una vela de velocitat, acotarem el rang de vents a través de dos valors històrics que han donat grans resultats:

- Mistral (direcció N/NE) de mitjana 40 nusos (amb un vent de NE de 40 nusos Finian Maynard va batre els 46 nusos l'any 2003)
- Grec (direcció SE) de mitjana 50 nusos (amb un vent SE de 50 nusos Thierry Bileak va batre els 45 nusos per primera vegada en la història de la navegació a vela l'any 1.993)

Així doncs, el vent real a considerar prendrà valors de 40 a 50 nusos. En aquestes condicions, la vela haurà de ser capaç de donar una empenta que permeti obtenir una velocitat d'avanç de 50 nusos.



6.3. Vent aparent (V_A)

Per poder obtenir les condicions de vent aparent no n'hi ha prou amb els valors del vent real i velocitat de l'embarcació. Per poder completar el triangle de velocitats cal considerar l'angle que formen aquests dos vectors.

Anomenarem *angle de cenyida* a l'angle que s'estableix entre el vent real i la direcció d'avanç de l'embarcació. Si considerem els dos vents navegables que solen bufar al canal (grec i mistral), l'angle de cenyida depèn exclusivament del pilot i la seva habilitat per mantenir l'equilibri seguint un rumb amb el vent donat. En aquestes condicions de vents reals (de 40 a 50 nusos), els pilots de windsurfing naveguen amb un angle de cenyida d'aproximadament $\gamma=125^\circ$. En altres paraules, l'angle que s'estableix entre el vent real i la direcció d'avanç de l'embarcació és de 125° . Aquest rumb equival a vent llarg i per tant, és un rumb a mig camí entre un rumb de cenyida i rumb portant plàcid.

Un cop tenim els vectors vent real i velocitat de l'embarcació, així com l'angle que s'estableix entre ells, podem calcular el vent aparent matemàticament. Aplicant el triangle de velocitats podem obtenir el vent aparent que incideix sobre una vela donats un vent real, la velocitat de l'embarcació i l'angle que s'estableix entre aquests dos vectors. Tot seguit presentem una sèrie de taules on es pot apreciar el vent aparent en condicions d'altres velocitats (fixant l'angle de cenyida a 125°).

TRIANGLE DE VELOCITATS

ϕ	Angle $V_R - V_{PILOT}$	125	$^\circ$
V_R	Velocitat del vent real		Kt
V_{EMB}	Velocitat de l'embarcació		Kt
V_A	Velocitat del vent aparent		Kt
β	Angle $V_A - V_{EMB}$		$^\circ$

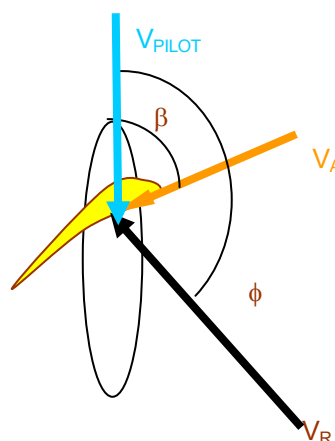


Fig. 6.2: Triangle de velocitats



Dades de vent	β	V_{EMB}	m/s	Knot
Bielak	67	44	22,2	43,15
Finian	55	46	23,0	44,71

Taula 6.1: Dades de vent de temptatives de record

VEL APR. PILOT	V_A	V_R								
		36	38	40	42	44	46	48	50	
	36	33	34	35	36	38	39	40	42	
	38	34	35	36	37	38	39	41	42	
	40	35	36	37	38	39	40	41	42	
	42	36	37	38	39	40	41	42	43	
	44	38	38	39	40	41	42	43	44	
	46	39	39	40	41	42	42	43	44	
	48	40	41	41	42	43	43	44	45	
	50	42	42	42	43	44	44	45	46	

Taula 6.2: Taula de vents i velocitats (en nusos)

En el nostre cas,

Vent real $V_R = 40 - 50$ nusos

Velocitat de l'embarcació $V_{EMB} = 50$ nusos

Vent aparent $V_A = 42 - 46$ nusos



6.4. Angle de navegació (β) i Angle d'atac (α)

El vent aparent és el vent que incideix sobre la vela, però la vela, com qualsevol perfil aerodinàmic, treballa en funció de l'angle d'incidència α , com s'anomena en aerodinàmica, Angle d'atac. L'angle d'atac és un paràmetre de control que determinarà el perfil aerodinàmic (la forma de la vela, en definitiva) a escollir.

L'angle d'atac d'una vela és l'angle format pel vent aparent amb el conjunt del perfil de la vela, i depèn tant del perfil de la vela com de l'habilitat del pilot (veure capítol 3). Determinant l'angle de navegació (que depèn bàsicament de l'habilitat del pilot), podem acotar el rang de valors dels angles d'atac que ens interessarà controlar quan optimitzem veles.

Si ens basem en rècords històrics, l'angle de navegació (β) es pot determinar matemàticament mitjançant el triangle de velocitats de manera anàloga al vent aparent. La Taula 6.3 mostra els diferents valors que pot prendre:

ANGLE β	V_E	V_R									
		34	36	38	40	42	44	46	48	50	
	36	59	63	65	68	71	73	76	78	80	
	38	56	60	63	65	68	71	73	75	77	
	40	54	57	60	63	65	68	70	72	75	
	42	51	54	57	60	63	65	67	70	72	
	44	49	52	54	57	60	63	65	67	69	
	46	46	49	52	55	58	60	63	65	67	
	48	44	47	50	53	55	58	60	63	65	
	50	42	45	48	50	53	56	58	60	63	

Taula 6.3: Angle β en funció dels vents

En el nostre cas, per tant, Vent real = 40 – 50 nusos

Velocitat de l'embarcació = 50 nusos

Angles de navegació = 50° – 63°



En aquestes condicions, i considerant l'entrada de la vela com un perfil aerodinàmic (gràcies al camber), podem estimar que un pilot expert navegarà amb angles d'atac de l'ordre de 30° a 50°.

Angles d'atac (rang orientatiu) = 30° – 50°

Per tant, el perfil de la vela ha de treballar amb angles d'atac molt grans, superiors als 20°. Els perfils aerodinàmics clàssics, com els NACA, no ens serveixen ja que els perfils d'ales d'avió estan pensats per treballar amb angles d'atac inferiors als 18° (veure capítol 7). Ara per ara, no existeix cap perfil aerodinàmic que no entri en pèrdues en condicions tan extremes com les que treballa una vela de velocitat. En conseqüència, a l'hora de perfilar la vela, el vent aparent i l'angle d'atac de treball serviran per fer una primera selecció. Es descartaran perfils que entrin ràpidament i/o bruscamment en pèrdues, tot seleccionant aquells perfils que tinguin comportaments estables.

6.5. Sweep, twist i contraescora

El vent aparent i l'angle d'atac ens permetran optimitzar un perfil 2D de la vela, però si es vol optimitzar una vela real cal considerar un volum perfilat. Per dissenyar una vela en 3D cal considerar els angles de sweep, twist i contraescora.

Els angles que caracteritzen la vela durant la navegació, tal i com havíem establert al capítol 2, a altes velocitats queden acotats segons la Taula 6.4:

Sweep	Twist	Contraescora
25-45°	20-45°	15-25°

Taula 6.4: Recull d'interval·ls usuals dels angles citats.

6.6. El rendiment vèlic (η)

La vela, com qualsevol perfil aerodinàmic, es regeix segons un Rendiment, que no és res més que el quocient entre les dues forces aerodinàmiques predominants. En el cas d'una ala d'avió, es considera que el rendiment aerodinàmic és el quocient entre el lift i el drag, i que per tant, un bon rendiment indica que una ala d'avió té molta sustentació i mínima resistència



a l'avanç. En el cas d'una vela, en canvi, es defineix el rendiment vàlic com el quocient entre la força de propulsió o motor (F_M) que garanteix l'avanç de l'embarcació i la força de deriva (F_D). Òbviament, una bona vela aprofitarà la major part de la força vàlica per transformar-la en força motor, minimitzant la deriva o el que és el mateix, tindrà un alt rendiment vàlic.

Tanmateix, el rendiment vàlic sempre està limitat per les equacions d'equilibri que limiten els valors de l'empenta i la deriva (veure capítol 5). En principi, no hi ha límit per la força d'empenta; com més gran sigui més velocitat pot assolir el pilot. Ara bé, si que hi ha límit de deriva (l'aleta, la F_Z i el pes del navegant limiten el valor màxim de la deriva), i la deriva i l'empenta estan íntimament relacionades car són descomposicions matemàtiques d'una mateixa força. En conseqüència, en realitat estem buscant un rendiment vàlic màxim respectant sempre un valor màxim de deriva (limitada per les (Eq. 5.6) i (Eq. 5.10)).

El rendiment vàlic d'una vela varia en funció del vent aparent, l'angle d'atac, el perfilat (la forma) i els angles de navegació (sweep, twist i contraescora).

A l'hora d'optimitzar una vela, cal disposar d'algun mètode que permeti obtenir rendiments aerodinàmics. Això només es pot aconseguir de dues maneres: mitjançant simulacions amb l'ajut de potents programes de càlcul numèric, o experimentant en un túnel de vent mitjançant maquetes o models.

6.7. Rendiment d'alleujament η_z

Finalment, l'últim paràmetre de control a l'hora d'optimitzar una vela de velocitat de windsurfing és la força aerodinàmica ascendent F_Z . Per valorar F_Z establim un nou rendiment que l'anomenarem rendiment d'alleujament, que no serà res més que el quocient entre la F_Z i la força vàlica.

El rendiment d'alleujament depèn dels mateixos paràmetres que el rendiment aerodinàmic, és a dir: del vent aparent, l'angle d'atac, el perfilat (la forma) i els angles de navegació (sweep, twist i contraescora). En principi, interessen rendiments d'alleujament màxims ja que això vol dir valors alts de F_Z o el que és el mateix: es redueixen les resistències hidrodinàmiques. Si dues veles tenen el mateix rendiment vàlic però diferent rendiment d'alleujament, s'aconseguiran velocitats més elevades per un mateix vent amb la vela que tingui el rendiment d'alleujament superior. Tanmateix, la força F_Z sempre està limitada per l'equació d'equilibri vertical (Eq. 3.10) i per l'equació de moments en l'eix x (Eq. 3.10). Una força F_Z massa elevada podria fer aixecar el windsurfing de l'aigua. Això és dolent no només perquè és gairebé sinònim de caiguda o pèrdua d'equilibri del pilot sinó perquè significa que s'infringeixen les normatives establertes per la WSSRC i per tant, en cap cas s'acceptaria



com a rècord de velocitat un windsurfing que s'aixeca totalment per sobre de l'aigua –ni que sigui un instant.

No hi ha cap mètode experimental que ens permeti calcular la força vèlica i les seves components amb total seguretat (de la mateixa manera que no hi ha cap equació matemàtica que descriu a la perfecció el flux real), de manera que no existeix un mètode infalible per poder determinar quins són els rendiments d'alleujament òptims. Tanmateix, podem fer algunes observacions o primeres estimacions aplicant el Teorema de Bernoulli i els Teoremes d'Euler ([2] i [4]) considerant que l'aire incideix sobre la vela com si fos un doll. És obvi que els resultats obtinguts d'aquesta manera no poden ser de cap manera valors concrets però sí que poden ser orientatius.

Si considerem una superfície vèlica (5 m^2), podem estimar una força vèlica total de l'ordre de 3000 Newtons. Si F_z ha de ser necessàriament inferior al pes del pilot (altrament l'embarcació s'aixecaria), això vol dir que F_z ha de ser inferior a 1200 Newtons en condicions de navegació. En conseqüència, per raons de seguretat, descartarem veles que tinguin un rendiment d'alleujament superior a 0.5. Però com que també convé una F_z elevada per reduir resistències hidrodinàmiques, nosaltres considerarem que, per optimitzar una vela de velocitat, s'ha de buscar un rendiment d'alleujament proper al 0.5 però sense sobrepassar-lo. Convé recordar que això és un valor arbitrari que hem agafat nosaltres, sent conservadors per assegurar una bona vela.

A l'hora d'optimitzar una vela, cal disposar d'algun mètode que permeti obtenir d'alguna manera el rendiment d'alleujament. Això només es pot aconseguir de dues maneres: mitjançant simulacions amb l'ajut de potents programes de càlcul numèric, o experimentant en un túnel de vent mitjançant maquetes o models.

6.8. Resum dels paràmetres de control

Per tant, per optimitzar una vela de velocitat fins arribar als 50 nusos, els paràmetres de control són els de la taula 6.5:

Abrev.	Magnitud	Rang de valors	Unitats	Comentaris
V_E	Velocitat de l'embarcació	50	nusos	



V_E				
V_R	Vent real	40 - 50	nusos	
V_A	Vent aparent	42 - 46	nusos	$V_A = V_E + V_R$
β	Angle de navegació	50° - 63°		
α	Angle d'atac	30° - 55°		
δ	Sweep	25° - 45°		En aeronàutica: fletxa
τ	Twist	20° - 35°		Torsió
π	Contraescora	15° - 25°		Abatiment
η	Rendiment vàlic	A maximitzar		Motor / Deriva Limitat per l'equació 3.10
η_z	Rendiment d'alleujament	Pròxim a 0.5		$F_z/F_{vèlica}$ Limitada per l'equació 3.10

Taula 6.5 Resum dels paràmetres a controlar

Com que se suposa que la temptativa de rècord es farà en el *Canal*, no es tindrà en compte l'efecte nociu de les onades.



7. Optimització aerodinàmica de veles de velocitat

Un cop ja hem analitzat una embarcació de windsurf i la seva mecànica (tant estàtica com dinàmica) ens els anteriors capítols, es hora de passar resoldre l'objectiu principal del projecte: optimitzar una vela de velocitat.

És per això que el present capítol ens servirà per poder presentar el mètode d'anàlisi d'una vela de velocitat que ens permetrà enunciar els possibles punts de millora. Un cop fet això passarem a desenvolupar el procés (disseny, modelització i simulació) que ens durà cap a l'optimització de la vela de velocitat, obtenint així la solució buscada pel present projecte. A més a més, en el darrer apartat farem un exhaustiu anàlisi d'aquesta solució.

7.1. Simulació aerodinàmica amb CFD

El projecte, com ja s'ha dit anteriorment, pretén optimitzar les veles actuals de velocitat de windsurf. És per això que un dels factors d'èxit del projecte serà la obtenció de diferents models o possibles solucions (disseny aerodinàmics) i la seva possible verificació mitjançant un eina ràpida, eficaç i sobretot, versàtil. Això últim ens ve imposat per les condicions variants que se solen presentar a l'hora de fer un intent per a batre qualsevol record del món, més concretament, el de velocitat a vela.

Per altra banda cal dir que, sobre la teoria i pràctica del disseny de veles no hi ha gaire bibliografia contrastada. I si anem a buscar informació sobre el disseny de veles de windsurf, el material existent es poc rigorós per no dir inexistent. Això fa, a la pràctica, impossible desenvolupar o establir un mètode per al disseny i o optimització de les veles de windsurf de forma clara i de qualitat a través de teories, taules o altres referències tècniques sobre la matèria. És per això, que en aquest projecte més que dissenyar, optimitzem veles de windsurfing. Per fer-ho, hem establert un mètode nou i (fins ara) inèdit per a poder optimitzar veles de windsurfing a partir de les existents.

Amb el que s'ha dit anteriorment, ja es veu que és difícil decidir quina metodologia emprar a l'hora de desenvolupar i optimitzar veles. En principi, construir models i assajar-los, i fer servir el mètode científic més conegut: "assaig – error". És evident que això implicaria fer un estudi molt profund de l'anàlisi de semblança i un temps i costos inassolibles per a un projecte final de carrera, amb una durada aproximada de 9 mesos.

Per això arribem a la determinació d'emprar els mètodes numèrics més moderns emprats en el camp de la mecànica de fluids, és a dir, els CFD (*Computational Fluids Dynamics*). Els actuals paquets de software ja permeten obtenir resultats molt acurats en molts casos, tots



ells contrastats amb experiències reals, mitjançant l'experimentació túnel de vent. Cal tenir en compte que, a data del projecte, els moderns PC's domèstics permeten, donada la seva elevada capacitat de càlcul, treballar amb programes que fins fa poc estaven reservats a les estacions de treball. D'aquesta manera, els PC's actuals, ens asseguraran uns bons temps de càlcul, fent així abordable aquest mètode amb una eina tan còmoda i barata com és un PC.

Dintre dels CFD hi ha una gran varietat de programes que cobreixen bastants camps de la Mecànica de fluids, des de problemes bàsics de la dinàmica de fluids bàsica fins a models de turbulència, transferència de calor (cambres de combustió, refrigeració, cicles termodinàmics), aerodinàmica, hidrodinàmica de bucs, fluxos supersònics, reologia, cavitació en màquines hidràuliques, models de difusió (dispersió de contaminants, respiració dels animals...), hemodinàmica... Entre els més coneguts i usats, destaquen el Visual Foil (recull de dades per a perfils aerodinàmics estandarditzats –NACA, FX, Göttingen...), FLUENT (el CFD per excel·lència, el programa més extens i versàtil), CHAM (programa per resoldre problemes d'enginyeria on intervenen fluxos que intercanvien massa i/o calor), TORNADO, AEROFOIL, GID...

7.1.1. Avantatges i inconvenients de simular amb CFD

La dinàmica de fluids computacional o CFD és l'eina físico-matemàtica que simula, mitjançant els ordinadors, el moviment dels fluids i les seves reaccions. Els paquets de CFD existents en el mercat són suficientment potents i fàcils d'utilitzar com perquè resultin rentables a nivell industrial. Els beneficis immediats d'utilitzar aquests programes són l'estalvi de temps i assajos, així com l'obtenció d'informació complementària que experimentalment és molt difícil d'aconseguir. En els últims anys, els CFD han entrat amb força dins del món industrial. Tanmateix, convé ser conscients de les seves limitacions així com de la perillositat d'un ús incorrecte que porta a resultats erronis.

Alguns dels principals avantatges i inconvenients són citats a continuació.

Avantatges:

- Reducció substancial del temps i dels costos en el disseny.
- Possibilitat d'analitzar sistemes o condicions molt difícils de simular experimentalment, en el nostre cas, per exemple, els CFD ens eviten disposar de túnel de vent.



- Capacitat d'estudiar sistemes sota condicions perilloses o més enllà de les pròpies condicions límit de funcionament, per exemple accidents.
- Capacitat d'obtenir una gran quantitat de dades que posteriorment es poden analitzar informàticament i analitzar detingudament.
- Nivell de detall pràcticament il·limitat. Els mètodes experimentals són més caros a mesura que es requereixin major nombre de punts de mesura, contràriament en els codis de CFD poden generar un gran volum de resultats sin cost afegit, i és summament fer estudis paramètrics.

Inconvenients:

- Nostres cas: difícilment contrastable, no disposem d'arxius amb dades reals.
- Dificultat de modelitzar models de turbulència. El flux 3D real és terriblement complicat: en realitat no hi ha cap model físico-matemàtic que permeti assegurar resultats. Obtenir resultats suficientment precisos depèn de les hipòtesis o simplificacions que inclogui el model matemàtic.
- És necessari un ús adequat. Segons les condicions a analitzar existeixen diferents hipòtesis físiques i diferents models matemàtics que s'ajusten a la realitat. És responsabilitat de l'usuari assegurar-se que usa les hipòtesis i el model correcte.
- És necessari discretitzar el volum o superfície de control, amb la sèrie de limitacions que això comporta. Per saber quants punts de malla ens cal per poder visualitzar "tots" els remolins d'un flux turbulent en 3D, s'eleva a $9/4$ el número de Reynolds del flux. En altres paraules, multiplicar per dos el número de Reynolds significa que serà necessari multiplicar per cinc, aproximadament, el número de punts a la malla. Per exemple, si es vol estudiar el flux al voltant d'un avió, és necessari mallar amb espais molt petits per tal d'assegurar-nos captar els remolins més petits. D'altra banda, la malla ha de ser prou gran per abordar tot l'avió i l'entorn més proper. Considerem un avió de 50 metres d'envergadura amb unes ales de 5 metres de corda, viatjant a 250 m/s a una altura de 10.000 m. Doncs bé, en aquestes condicions, si es volen obtenir resultats precisos del flux al voltant de la superfície de l'avió, es necessita una malla amb més d'un bilió de punts. Òbviament, no hi ha cap ordinador que pugui manejar malles així (i encara menys calcular tantíssimes equacions en un temps raonable). És per això, que sempre s'ha de ser conservador a l'hora d'analitzar els resultats ja que, difícilment podem assegurar que s'ha fet una discretització i per tant, un càlcul inequívocament precís.



- En el nostre cas hi ha un problema afegit: la simulació de veles és, ara per ara, un problema aerodinàmic impossible d'analitzar si no es fan certes simplificacions o hipòtesis. El problema de les veles recau en què són perfils aerodinàmics variables en el temps, és a dir, cada instant de temps hauríem de variar el mallat i la geometria del model en funció de la deformació de l'estat anterior. No cal ni dir que, actualment (difícilment en els pròxims anys) no hi ha un sol CFD que sigui capaç de realitzar una proesa com aquesta. En el nostre cas, les hipòtesis simplificadores que ens permetran simular i obtenir resultats coherents i acceptables són:
 - les veles de windsurfer no són de membrana sinó de monofilament. En conseqüència, tot i que es deformen segons el flux d'aire incident, la seva deformació és molt més petita que la que sofreixen les veles convencionals.
 - Les veles de velocitat es tensionen buscant el màxim de rigidesa possible. La part més pròxima al pal no és deforma. La major part de deformació és, per tant, de torsió.
 - En conseqüència, es pot considerar el twist com la deformació total de la vela en condicions de navegació. Realment, la part exterior de la vela no només es deforma sinó que també vibra i per tant el twist no és constant. Podem dir que la vela "s'obre i es tanca" constantment. Ara bé, nosaltres hem considerat la vela en les condicions més desfavorables, és a dir, quan la deformació és màxima.

7.1.2. Metodologia a seguir i selecció de les eines

Per tal de poder obtenir la solució final, vela optimitzada, caldrà fer un sèrie de passos previs fins a trobar aquesta solució òptima.

Primerament, agafarem una vela de velocitat moderna, aquesta vela de velocitat serà una de les més modernes i més avançades tecnològicament per tal de partir d'un cas real i alhora marcar-nos una base d'anàlisi de partida de bona qualitat. Això, simplement, be imposat pel fet de què estem mirant d'obtenir una vela que ens permeti millorar les marques actuals de velocitat i fer el rècord del món, és a dir, fer, possiblement, la millor vela de velocitat del món, o si més no la més optimitzada i dissenyada per enginyers i no pas per l'experiència d'un pilot, que tot i ser contrastada serà limitada, almenys aerodinàmicament parlant.

Partint de la vela de velocitat moderna (o real), la modelitzarem en un programa 3D, que en el nostre cas, serà el CATIA v5.0 (veure amb més detall Annex A), ja que ens permet modelitzar superfícies amb varies curvatures de forma fàcil i amb molta qualitat, a més de ser



perfectament compatible amb la majoria de programes. Un cop modelitzada amb CATIA, passarem a mallar-la i posteriorment farem els càlculs (simulacions) necessàries per tal de determinar com funciona aquesta vela i quins punts febles presenta, pel que fa a l'aerodinàmica de la vela.

Un cop tinguem això ben determinat, establim, a partir dels paràmetres definits al *Capítol 6*, possibles candidats com a solució (veles amb diferents valors de twist, sweep,...). Totes les possibles veles seran modelitzades en CATIA, mallades en GAMBIT ([13], [14], [15] i [16]) i simulades en FLUENT ([17] i [18]), de forma semblant a la vela de velocitat.

Finalment farem l'anàlisi i comparació entre les solucions possibles i la vela de velocitat, i així arribar al disseny final de la vela optimitzada, a més de poder quantificar qualitativament les millores aconseguides.

7.2. Modelització d'una vela de velocitat

Primerament varem mirar d'aconseguir una vela de velocitat de windsurf per poder-la muntar i posteriorment mesurar-la correctament per poder construir el model 3D al ordinador (mitjançant el software CATIA v5.0), veure amb més detall Annex A.

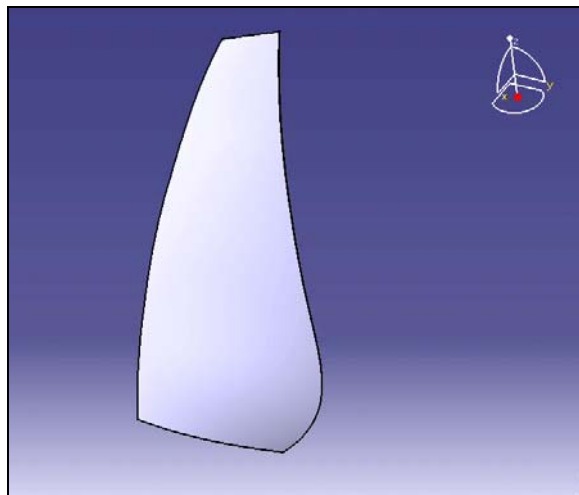


Fig. 7.1: Model 3D de la vela de velocitat emprada

Un cop ja tenim perfectament construïda la vela real en CATIA (Fig. 7.1), cal introduir-la en un programa de mallat per tal de poder, posteriorment, fer simulacions amb un programa tipus CFD. El programa triat per fer el model i mallat que farà possible el posterior càlcul amb el programa FLUENT (el programa de CFD escollit per a les simulacions, veure Annex A.2.2.3) serà el GAMBIT v2.0, això es degut a què és el programa de mallat que comercialitza la mateixa empresa que desenvolupa el FLUENT. Això ens garantirà de forma



més segura i clara les compatibilitats entre programes, alhora que ens facilitarà la definició de condicions de contorn, condicions internes del fluid, geometria,....

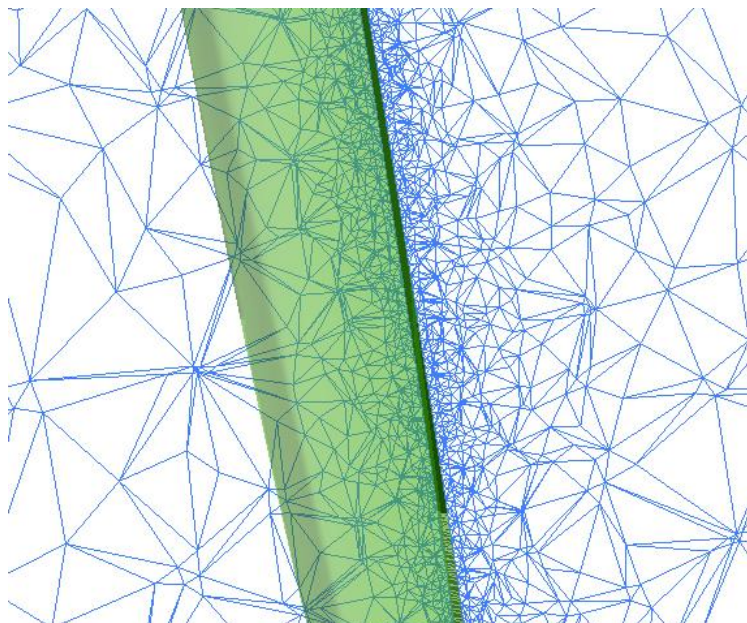


Fig. 7.2: Mostra del mallat al voltant de la vela, secció frontal (pla X-Z)

En la Fig. 7.2 podem apreciar perfectament com s'ha construït la malla al voltant de la vela de velocitat, i com a la zona més propera, on trobaríem problemes degut a la capa límit, és força petita i ja ens garantirà, en bona mesura, una correcta simulació. Per més informació i detall de com s'ha fet el model i posterior mallat, consultar l'Annex A del present projecte.

7.3. Simulació d'una vela de velocitat

7.3.1. Condicions de simulació

Per a la simulació de la vela de velocitat s'han emprat les condicions de contorn detallades al Annex A, on també trobarem figures demostratives dels eixos utilitzats. Bàsicament, cal dir que s'ha mirat d'obtenir com treballa la vela de velocitat en diversos angles d'atac, des de 30° fins als 55°, amb un pas de 5°. Això ens permet tenir una gran varietat de situacions en les que podria trobar-se el pilot, ja fos degut a un augment del angle β , variació en l'angle de navegació, o d'altres factors ja esmentats al Triangle de Velocitats (Fig. 5.2: Triangle de velocitats a l'embarcació., pàg. 21).

Per altra banda també farem simulacions enfocades a trobar la correlació de les forces generades per la vela a diferents numero de Reynolds, o el és el mateix, per a diferents condicions de vent aparent, més concretament, fixarem un angle d'atac de 40° i simularem el



comportament de la vela a 17.5, 20, 22.5, 25 i 27.5 m/s, sent rangs de valors de vent aparent molt probables durant la realització de la prova. Amb això podrem preveure el comportament de la vela en zones pròximes a la velocitat desitjada (els 50 nusos de velocitat d'avanç de l'embarcació).

7.3.2. Simulacions, resultats i conclusions

Un cop realitzades les diferents simulacions, passem a presentar un resum dels resultats i gràfics obtinguts que ens ajudaran a veure com treballa la vela de velocitat (més dades a Annex C). Primerament presentarem tot un seguit de taules amb els valors de forces aerodinàmiques (LIFT, DRAG i F_z , Capítol 5.1 i 5.2). Posteriorment passarem a descomposar aquestes forces en les components útil de navegació (F_{MOTOR} , F_{DERIVA} i F_z), a més de gràfics de la variabilitat de les forces, del rendiment vèlic i del rendiment d'alleujament.

$\alpha(^{\circ})$	Lift (N)	Drag (N)	F_z (N)	rend. -	Mòdul (N)
30	1862	495	661	3,76	2037
35	2074	681	760	3,05	2183
40	2232	894	853	2,50	2405
45	2244	1139	906	1,97	2516
50	2058	1334	883	1,54	2453
55	1643	1352	751	1,22	2128

Taula 7.1: Forces aerodinàmiques, $V_A=22,5$ m/s = 43,75 knot

Com que els valors de les forces de les taules anteriors (Taula 7.1) són seguint els conceptes i teoria d'aerodinàmica (Capítol 5.1 i 5.2) no ens seran les més adients per valorar l'efectivitat de la vela a l'hora de valorar com aquesta aprofita el vent que rep per a generar un avanç, i conseqüentment, una velocitat adient, és a dir, com més força d'avanç (F_{MOTOR}) més opcions tindrem d'arribar a més velocitat. Per la qual cosa i com s'havia explicat al Capítol 5, descomposarem les forces adientment, i per tal d'ajudar a visualitzar els angles emprats tenim el següent dibuix:



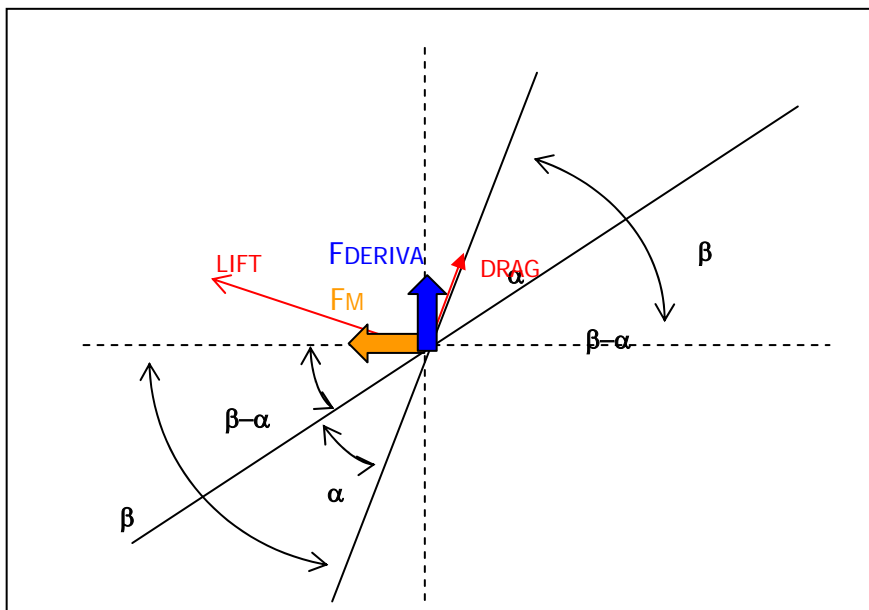


Fig. 7.3: Descomposició de forces

Les següents taules estan construïdes a partir de les anteriors, però descomposant, com mostra la Fig. 7.3, en les forces de navegació o útils.

$\alpha(^{\circ})$	F_M (N)	F_D (N)	F_z (N)	rend. vèlic	rend. alleu
30	1365	1359	661	1,00	0,32
35	1456	1627	760	0,89	0,33
40	1486	1891	853	0,79	0,33
45	1373	2108	906	0,65	0,34
50	1116	2184	883	0,51	0,34
55	747	1992	751	0,38	0,33

Taula 7.2: Forces útils (amb $\beta=60^{\circ}$), $V_A=22,5 \text{ m/s} = 43,75 \text{ knot}$



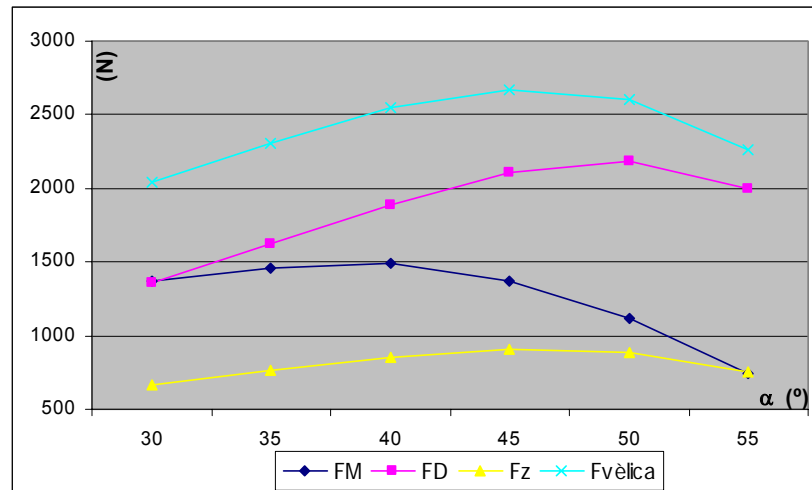


Fig. 7.4: Gràfic de l'evolució de F_{MOTOR} , F_{DERIVA} , F_z , i $F_{VÈLICA}$ en funció de α (amb $\beta=60^\circ$)

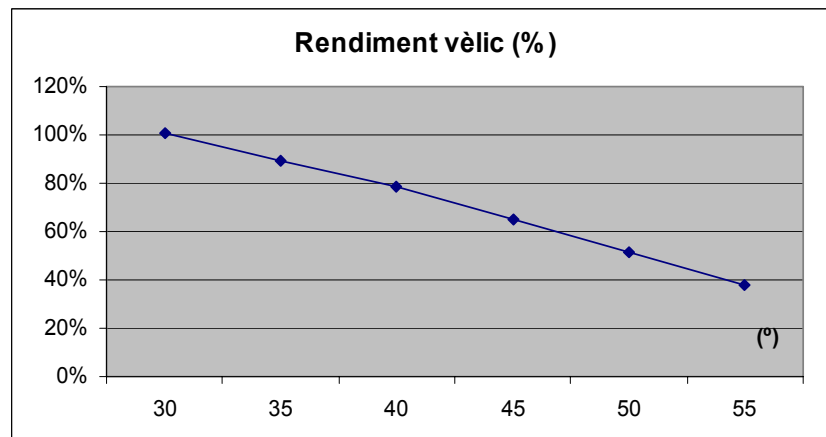


Fig. 7.5: Evolució del Rendiment vèlic en funció de l'angle d'atac (amb $\beta=60^\circ$)

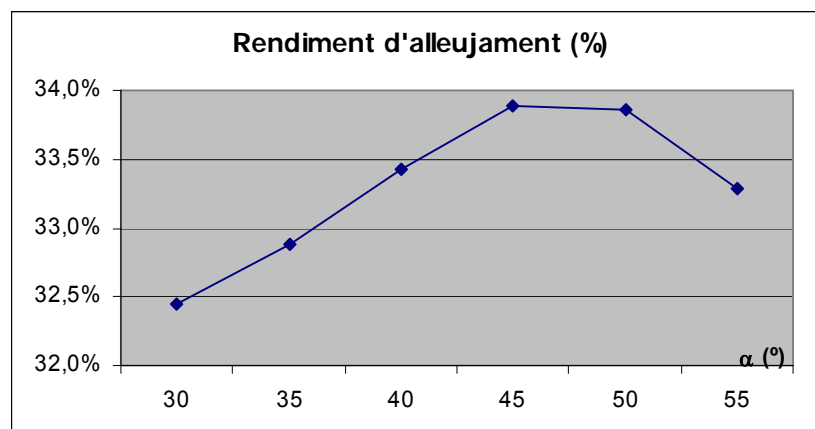


Fig. 7.6: Evolució del Rendiment d'alleujament en funció de l'angle d'atac.



A partir de Fig. 7.4, Fig. 7.5 i Fig. 7.6 podem dir que a partir dels $\alpha \geq 45^\circ$ podem comprovar com la F_{VELICA} comença a disminuir cada cop més. Aquest fet és força lògic, estem començant a treballar amb angles elevadíssims i en aquestes condicions és difícil que el perfil de la vela treballi bé. Aquest és un dels punts a mirar de millorar ja que és evident que en el moment de realitzar la prova de velocitat no podem garantir unes condicions òptimes constants i sempre les millors teòriques. És per això que és recomanable augmentar el rang d'angles d'atac òptims perquè en cas d'un augment sobtat del vent real, podria fer augmentar l'angle β i de retruc l' α , obligant al pilot a rectificar l'angle de navegació, fet que li podria ser complicat. Per tant, augmentaríem l'angle d'atac poden generar una inestabilitat prou gran a l'embarcació com per bolcar.

El problema de la bolcada també es fa notable si passem dels 40° , ja que el valor de F_{MOTOR} comença a disminuir de forma notable i en canvi F_{DERIVA} segueix augmentant (el que equival a dir que el rendiment disminueix), és a dir, perdríem velocitat i augmentaríem el risc de bolcada, aquest fet també bé remarcat pel màxim de rendiment d'alleujament. Per angles d'atac grans, F_Z és elevada, fet que permet assegurar-nos que en aquestes condicions les resistències hidrodinàmiques disminuiran. Però tot i que F_Z és elevada amb angles d'atac compresos entre 45° - 50° , cosa que ens interessa, el fet que per angles d'atac elevats F_{MOTOR} disminueixi més que no pas F_Z augmenta, i que F_{DERIVA} augmenti més que no pas F_Z , fa que, en aquestes condicions (angles d'atac grans), sigui impossible aconseguir bones velocitats d'avanç.

Així doncs, notem que la millor combinació de rendiment vàlic i rendiment d'alleujament es dona per a angles d'atac propers als 40° . El rendiment vàlic és màxim a 40° , i el rendiment d'alleujament presenta un màxim per a $\alpha=45^\circ$. Per angles d'atac menors de 40° , tot i que el rendiment d'alleujament no és tan gran com per 45° , presenten el clar avantatge que la deriva és molt inferior que per 45° .

Per tot això, podem concloure que una vela de velocitat hauria de treballar a angles d'atac preferentment inferiors als 40° o fins i tot inferiors als 35° , obligant així al pilot a forçar excessivament l'angle de navegació o bé esperar a tenir la sort de tenir un angle β inferior als 55° , és a dir, obtenir un vent real amb un angle de cenyida més baix (veure Triangle de velocitats, Capítol 5).

Per tal de veure el comportament i d'interacció VENT - VELA presentem algunes figures extretes del FLUENT, per més dades consultar Annex C. En aquestes figures es poden veure les línies de corrent en dos plans que tallen la vela. És interessant comprovar com a mesura que l'angle d'atac augmenta el desordre i la vorticitat, les línies de corrent no poden seguir el perfil. En els túnels de vent, empreses com Northsails i Toni Tió Veles, experimentalment han arribat a les mateixes conclusions que nosaltres:

