

Treball de Fi de Màster

Màster Universitari en Enginyeria Industrial

**CARACTERITZACIÓ I OPTIMITZACIÓ DE L'ESTABILITAT
LATERAL D'UN ARNÉS DE PARAPENT DE
COMPETICIÓ**

MEMÒRIA

Autor: Aitor Garcia Rovira
Director: Alexandre Presas Batlló
Convocatòria: Gener 2022



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

El present projecte tracta sobre l'estudi i caracterització de l'aerodinàmica i l'estabilitat lateral d'una cadira de competició de parapent, amb l'objectiu de poder explicar el fenomen d'inestabilitat lateral i poder donar criteris de disseny per tal de disminuir-lo.

En l'actualitat, les cadires de parapent, quan volen a elevades velocitats, pateixen un fenomen d'inestabilitat lateral que consisteix en l'augment de l'angle entre cadira i ala de parapent, angle de *twist*. Aquest fenomen pot fer cometre al pilot un error, motiu pel qual interessa conèixer les seves causes i disminuir-lo. Les accions d'aquest projecte es centraran en com afecta la part posterior de la cadira, la cua, al fenomen d'inestabilitat lateral.

Així, per aconseguir aquests objectius, primerament s'han caracteritzat els dos moments que actuen sobre la cadira de parapent, el moment aerodinàmic i el moment dels ancoratges. S'ha observat que el primer dels moments és el que fa tendir la cadira a entrar en *twist* i que, per tant, es pot considerar desestabilitzador. El segon d'ells intenta portar la cadira a la situació de zero *twist* i, per tant, es pot considerar estabilitzador.

En segon lloc, s'han modelat diferents geometries de cua per mitjà del programa *SolidWorks* i s'han dut a terme un seguit de simulacions paramètriques per mitjà del programa *Ansys*. Aquestes simulacions han permès veure el comportament aerodinàmic de les diferents geometries sota diversos angles del vent incident. Aquestes han permès concloure que la presència d'una cua millora l'aerodinàmica de la cadira i fa disminuir la tendència a *twist* per a angles de vent incident grans. Paral·lelament, també s'ha pogut confirmar que la tendència a *twist* augmenta ràpidament amb la velocitat, ja que les forces aerodinàmiques depenen del quadrat de la velocitat.

Finalment, s'ha determinat la dinàmica de moviment quasi-estàtica de les diferents geometries per l'acció conjunta del moment aerodinàmic i moment dels ancoratges. Els resultats d'aquesta anàlisi mostren que les cadires amb una àrea lateral major tenen una tendència a *twist* menor i que l'angle de *twist* al qual tendeixen és menor. Els resultats indiquen que no només és important l'augment de l'àrea lateral, sinó que la ubicació d'aquesta àrea lateral també és important; sent l'àrea lateral ubicada a la part posterior de la cua la que més afavoreix la disminució de la tendència a *twist*.

D'aquesta forma, es pot concloure que per tal de reduir la tendència a entrar en *twist* i el fenomen d'inestabilitat lateral, el disseny de la cadira de parapent ha d'incorporar una cua amb una gran altura a la part posterior de la geometria. Sent la longitud de la cua una variable secundària que es pot utilitzar per acabar d'ajustar les prestacions de la mateixa.

Sumari

1. GLOSSARI	7
2. ORIGEN I MOTIVACIÓ DEL PROJECTE	8
3. INTRODUCCIÓ	9
3.1. Objectius del projecte	9
3.2. Abast del projecte	9
3.3. Parapent	10
4. MARC TEÒRIC	13
4.1. Eficiència aerodinàmica	13
4.2. Estabilitat lateral del sistema cadira-pilot	15
4.3. Criteri de disseny	17
5. ESTAT DE L'ART	18
6. MODEL DE SIMULACIÓ	20
6.1. Simulació CFD	20
6.2. Modelat de la geometria	22
6.3. Model de turbulència	24
6.3.1. Models RANS	26
6.3.2. Validació del model	27
6.4. Mallat	28
6.4.1. Característiques	28
6.4.2. Anàlisi de sensibilitat	31
6.5. Condicions de contorn	32
7. MODEL ESTABILITAT LATERAL	34
7.1. Forces i moments aerodinàmics	34
7.2. Moments <i>antitwist</i>	35
8. SIMULACIONS INICIALS	42
8.1. Aerodinàmica	42
8.2. Estabilitat lateral	43
9. SIMULACIONS PARAMÈTRIQUES	46
10. DINÀMICA DE MOVIMENT QUASI-ESTÀTIC	52

11. PRESSUPOST	56
12. IMPACTE MEDIAMBIENTAL	58
CONCLUSIONS	59
AGRAÏMENTS	60
BIBLIOGRAFIA	61

1. Glossari

θ	Angle del vent incident en el pla X-Y
C_L	Coeficient adimensional de sustentació
C_D	Coeficient adimensional de resistència
L	<i>Lift</i> , sustentació
D	<i>Drag</i> , resistència
φ	Angle de <i>twist</i>
δ	Angle entre el vent incident i la cadira
σ	Angle del vent incident
u^+	Velocitat adimensional
y^+	Distància adimensional a la paret
CG	Centre de gravetat
F_z	Força aerodinàmica en l'eix x
CP	Centre de pressions
CP_x	Component x del centre de pressions
A_x	Component en x de la posició dels ancoratges
M_{tw}	Moment de <i>twist</i>
M_{atw}	Moment d' <i>antitwist</i>
γ	Angle entre la corda del parapent i la vertical
φ'	Angle de la corda amb <i>twist</i> , angle de <i>twist'</i>

2. Origen i motivació del projecte

Dintre del marc de cooperació universitat-empresa, *Niviuk* va proposar realitzar un estudi de la geometria de la cua d'una cadira de parapent per solucionar alguns dels problemes que es troben en l'actualitat.

L'ala del parapent ha sigut, històricament, l'element més estudiat d'aquest esport. Des de ja fa uns anys, les noves millores introduïdes han tingut un efecte limitat en l'eficiència de l'ala. D'aquesta manera, per continuar millorant l'eficiència del conjunt del parapent s'ha iniciat l'estudi i optimització de la cadira.

L'optimització d'aquest element ha portat a cadires cada cop més llargues i cada cop més aerodinàmiques. Aquestes millores han permès millorar les velocitats i distàncies de vol, però, degut a l'augment de les velocitats de vol, s'han incrementat els problemes d'instabilitat lateral; problema que afecta a gran quantitat de pilots i el tema d'estudi d'aquest treball.

La motivació d'aquest treball és, per tant, la de poder caracteritzar aquest fenomen d'instabilitat lateral que apareix a les cadires de parapent i poder donar criteris de disseny que disminueixin la seva aparició.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu d'aquest TFM és caracteritzar, dissenyar i optimitzar una cadira de parapent des del punt de vista de l'aerodinàmica i l'estabilitat lateral. Més concretament, aquestes accions es centraran en la part posterior de la cadira, la cua.

Es modelaran en 3D diverses cadires, s'avaluaran les prestacions d'aquestes a través de simulacions CFD (*Computational Fluid Dynamics*) i, mitjançant la anàlisi dels resultats, es donaran indicacions de disseny per tal de disminuir el fenomen d'instabilitat lateral. Al final del projecte, s'estarà en disposició de realitzar diversos prototips, amb les indicacions donades, i que siguin provats pels pilots experts de Niviuk.

3.2. Abast del projecte

Aquest treball final de màster té les següents etapes:

- Entendre el funcionament del parapent i el paper concret de la cadira.
- Determinar l'estat de l'art en el disseny de cadires de parapent.
- Modelar en 3D geometries de cadira per mitjà del programa *SolidWorks*.
- Definir el mallat i les condicions de contorn per realitzar les simulacions CFD amb el programa *Ansys*.
- Visualitzar el comportament de la cadira per mitjà d'unes simulacions inicials.
- Dissenyar una sèrie de simulacions sistemàtiques per la caracterització del fenomen d'instabilitat lateral.
- Presentació dels resultats obtinguts i conclusions.

Aquest treball només arriba fins el disseny conceptual i la simulació, per mitjans informàtics, de diverses geometries òptimes de cadira de parapent. Un cop finalitzat el projecte, s'estarà en situació de que Niviuk, amb les indicacions donades, construeixi els seus prototips i que siguin provats per pilots professionals, però aquesta etapa serà posterior a la presentació d'aquest treball i, per tant, queda fora de l'abast del mateix.

3.3. Parapent

El parapent és un esport que es va crear a finals del segle XX per l'enginyer d'alguns escaladors que van pensar en una forma més ràpida i senzilla de baixar dels cims de les muntanyes [1]. Aquest concepte també fa referència a l'ala, una de les parts més importants de l'equip.

El parapent és l'aeronau més senzilla que existeix que consta d'una ala d'estructura no rígida construïda de tela sintètica. Aquesta està formada per calaixos que tenen una obertura a la vora davantera i que quan s'inflen li confereixen un perfil aerodinàmic. L'ala s'uneix a l'arnès o cadira, que és on va assegut el pilot, per mitjà de cordes, també de material sintètic, i a través de dos ancoratges, un a cada banda del pilot. A la Figura 1 es poden apreciar els diferents elements que configuren l'ala i la cadira del parapent.

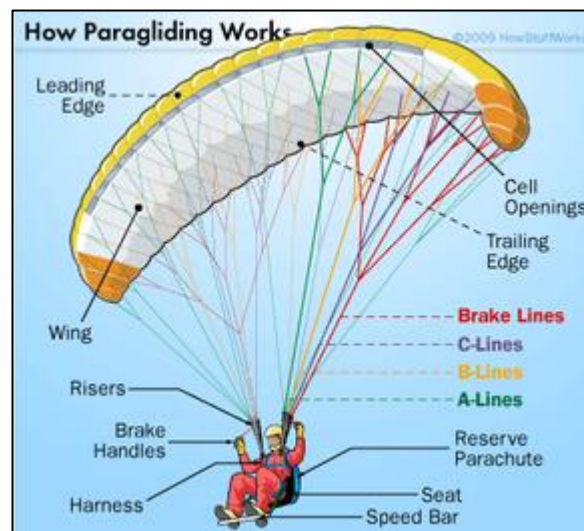


Figura 1 Parts principals d'un parapent [2].

Actualment, una bona definició d'aquest esport és: modalitat esportiva que consisteix en llançar-se des d'una pendent pronunciada amb un planador (perquè no consta de motor) lleuger (perquè el pes total de l'equip pot ser des de 2 a 20 kg) i flexible (perquè l'ala no consta de parts rígides) per realitzar un descens controlat ([3], [4]).

El pilot s'enlaira i aterra pels seus propis mitjans, és a dir, a peu. Donat que el parapent és un planador, el pilot necessita d'un vent moderat (15-25 km/h) per enlairar-se i de corrents de vent ascendents per guanyar altura. Aquestes corrents poden ser tèrmiques, si l'aire d'una zona es calenta, disminueix la seva densitat i llavors ascendeix; o dinàmiques, si la corrent de vent ascendent es genera per algun obstacle del terreny.

Com bé indica la definició, l'objectiu d'aquest esport ha evolucionat de simplement baixar les muntanyes d'una forma ràpida i simple a ser en sí un esport que té per objectiu maximitzar la distància de vol. Per aconseguir aquest objectiu, el pilot ha de volar d'una corrent ascendent a l'altra, tot mantenint una altura mínima que li permeti agafar la següent corrent ascendent amb seguretat.

D'aquesta forma, per poder arribar a la següent corrent ascendent, els parapents actuals, a part de maximitzar la seguretat, intenten maximitzar la relació de planatge o finesa; unitats de distancia avançada per cada unitat de distancia descendida. Amb aquesta finalitat, s'han realitzats molts avenços en l'aerodinàmica de les ales, per exemple, l'augment de la seva envergadura, la modificació del perfil aerodinàmic i la introducció de tela no porosa [1].

Pel que fa a la cadira, un dels últims avenços, i més significatius, ha estat l'evolució de l'arnès a una forma tipus canoa formada per una cua inflable. Forma molt més aerodinàmica i que ha permès guanyar més de 2 punts de relació de planatge [5]. A la Figura 2 es mostra l'evolució de la geometria de la cadira.



Figura 2 Evolució de la geometria de l'arnès al llarg dels anys.

Precisament, és la geometria de l'arnès, més concretament la geometria de la cua, el tema d'estudi d'aquest treball i el que s'anirà desenvolupant al llarg dels apartats.

Un cop s'està volant amb el parapent, per mitjà de moviments que el desequilibrin, es pot aconseguir control sobre els seus tres eixos [6]. Aquest eixos són els que es mostren a la Figura 3.

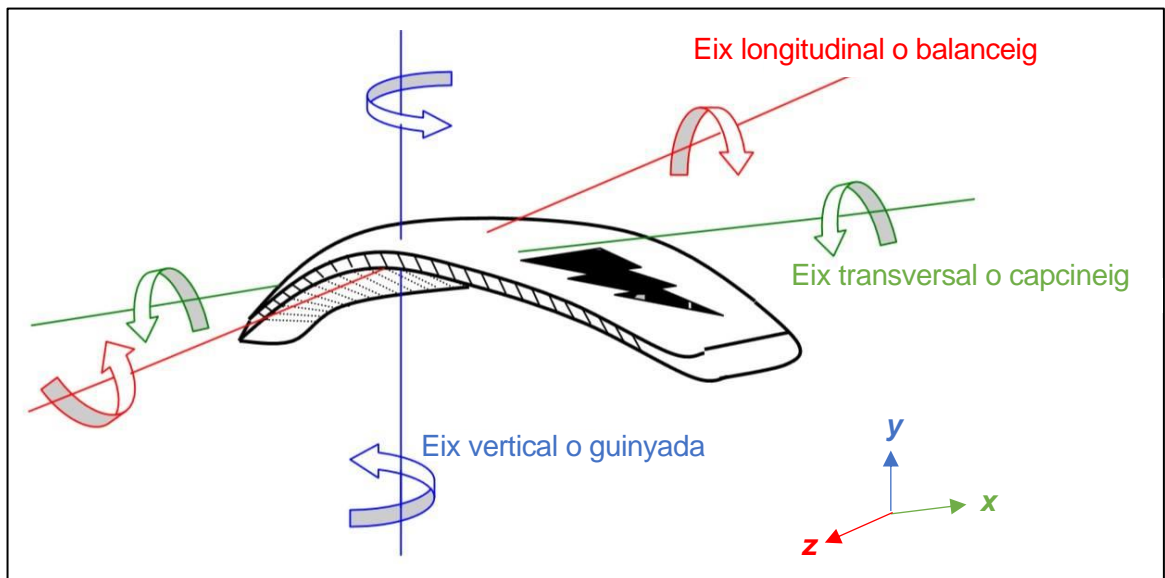


Figura 3 Eixos de moviment del parapent.

La rotació al voltant de l'eix transversal es fa per mitjà de l'accionament dels dos frens, que modifiquen l'angle d'atac de l'ala; alhora, això permet augmentar o disminuir la velocitat del parapent.

La rotació al voltant de l'eix longitudinal, és a dir, la inclinació lateral de l'ala, s'aconsegueix accionant un dels frens. Quasi totes les maniobres possibles al parapent s'aconsegueixen amb una combinació de rotació en els tres eixos.

En general, la rotació al voltant de l'eix vertical és un moviment controlat automàticament pel disseny de l'ala. Per aconseguir-ho s'ha de girar únicament amb els comandaments, sense inclinar el pes a la cadira. El pilot, però, no pot girar molt el parapent sense que és produeixi balanceig.

Com es pot veure, tots els controls del parapent son sobre l'ala d'aquest, no havent cap que de manera directa permeti actuar sobre la cadira. Això, de forma general, no suposa un problema, ja que en estar connectats ala i cadira, aquesta última tendeix a orientar-se d'igual forma que la primera. Tot i això, en algunes circumstàncies això no succeeix i dona lloc a inestabilitats; sent aquest el problema d'estudi d'aquest treball i que s'anirà desenvolupant al llarg dels apartats.

4. Marc teòric

4.1. Eficiència aerodinàmica

L'ala del parapent, com qualsevol altre perfil aerodinàmic, en ser submergit en una corrent de vent és sotmès a una sèrie de forces. La primera de les forces que actua sobre l'ala és una força en el sentit de la corrent, anomenada de resistència o *drag*. Aquesta força és la que s'oposa a l'avanç de l'objecte. La segona força que actua sobre l'ala, i que és molt major a la primera, és una força que té una direcció perpendicular a la de la corrent, anomenada de sustentació o *lift*. Aquesta segona força és la que sustenta l'ala a l'aire i permet planejar al parapent. A continuació, es mostra un esquema amb les principals forces que actuen sobre el parapent.

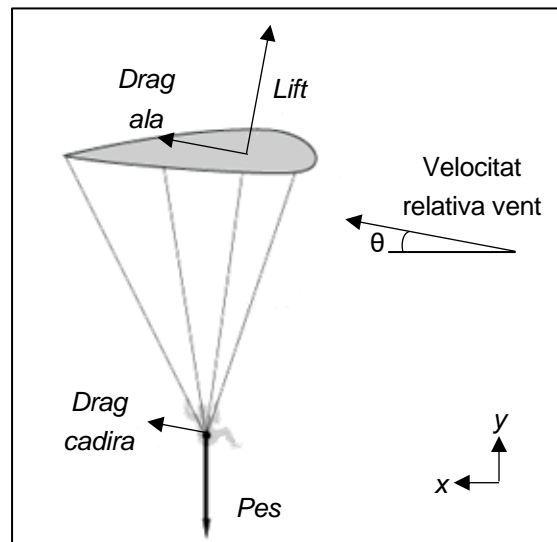


Figura 4 Diagrama de forces que actuen sobre el parapent.

Com es pot observar a l'esquema de la Figura 4, l'ala no és l'únic element del parapent que té una força de *drag* significativa, la cadira i el pilot també presenten una resistència a l'avanç. L'ala, però, sí que és l'únic element sobre el que interessa que es generi una força de *lift*, ja que si sobre la cadira es generés una força de *lift*, l'ala podria quedar destensada, plegar-se sobre ella mateixa i que el parapent entrés en caiguda.

Amb la finalitat de poder comparar diferents dissenys o geometries d'ala i cadires és necessari expressar els valors de *lift* i *drag* de forma adimensional. D'aquesta forma s'obtenen el coeficient de sustentació (C_L , Equació 1) i el coeficient de resistència (C_D , Equació 2). Les seves expressions es mostren a continuació [7]:

$$C_L = \frac{2 \cdot L}{\rho \cdot v^2 \cdot S} \quad (\text{Equació 1})$$

$$C_D = \frac{2 \cdot D}{\rho \cdot v^2 \cdot S} \quad (\text{Equació 2})$$

- On:
- $L = \text{lift}$ (N)
 - $D = \text{drag}$ (N)
 - $\rho = \text{densitat del fluid}$ (kg/m^3)
 - $V = \text{velocitat relativa del fluid respecte el cos}$ (m/s)
 - $S = \text{secció característica del cos}$ (m^2)

Utilitzant aquests dos coeficients es pot comparar la resistència aerodinàmica i la sustentació aerodinàmica creada per diversos perfils sense importar la forma o dimensions d'aquests. Addicionalment, el quocient entre aquests dos coeficients permet determinar la relació de planatge del parapent. Aquest fet es dedueix de plantejar la segona llei de Newton en l'eix x tal com es mostra a l'Equació 3.

$$F_x = m \cdot a_x \quad (\text{Equació 3})$$

- On:
- $F_x = \text{conjunt de forces que actuen en l'eix } x$ (N)
 - $m = \text{massa del parapent}$ (kg)
 - $a_x = \text{acceleració en l'eix } x$ (m/s^2)

Les úniques forces que actuen en l'eix x son les components x del *lift* (L) i del *drag* (D):

$$L \cdot \sin(\theta) - D \cdot \cos(\theta) = m \cdot a_x \quad (\text{Equació 4})$$

Si a l'Equació 4 es suposa que la velocitat de planatge és constant, és té que $a_x = 0$ i s'obté l'Equació 5:

$$L \cdot \sin(\theta) = D \cdot \cos(\theta) \quad (\text{Equació 5})$$

Reordenant l'expressió i substituint el quocient de forces pel quocient de coeficients adimensionals, s'obté l'Equació 6:

$$\frac{L}{D} = \frac{0,5 \cdot C_L \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S}{0,5 \cdot C_D \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S} = \frac{C_L}{C_D} = \frac{1}{\tan(\theta)} \quad (\text{Equació 6})$$

Per mitjà de l'esquema de la Figura 5 es demostra que l'últim terme de l'Equació 6 és igual a la relació de planatge:

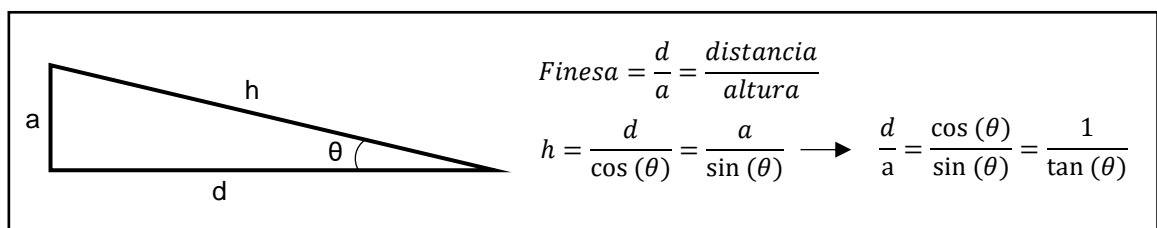


Figura 5 Esquema il·lustratiu de la relació de planatge.

Obtenint-se finalment l'Equació 7:

$$Finesa = \frac{C_L}{C_D} \quad (\text{Equació 7})$$

Aquest paràmetre té una interpretació directa en vol, ja que indica quants metres s'avancen per cada metre descendit. En una aeronau com el parapent, que no té propulsió, aquest és un paràmetre molt important, ja que sabent l'altura a la que estàs et permet calcular la distància que pots recórrer. En vols amb paramotor (parapent amb un motor d'hèlix) aquest és també un paràmetre important, ja que et dona una idea del consum del motor.

Donat que el tema d'estudi en aquest treball és la cadira del parapent, per maximitzar la finesa, i així la distància de vol, només es podrà actuar sobre el C_D de la cadira. Això passarà per estudiar la seva geometria i dimensions.

4.2. Estabilitat lateral del sistema cadira-pilot

Primerament, s'exposa la definició adoptada en aquest treball per estudiar el fenomen d'instabilitat lateral. Aquest fenomen consisteix en l'aparició d'un cert angle entre l'eix longitudinal de la cadira i el de l'ala del parapent quan s'està volant a velocitats elevades i hi ha un cert vent lateral. És un fenomen, que per sí sol no posa en risc la seguretat del vol, però pot inquietar al pilot i induir-lo a cometre un error, motiu pel qual es vol estudiar i disminuir. Aquest fenomen s'ha accentuat en els darrers anys, en els quals les optimitzacions de les geometries han millorat l'aerodinàmica del conjunt del parapent i han aconseguit velocitats de vol més elevades.

En segon lloc, es fa una aproximació teòrica al problema d'instabilitat. Es defineix estabilitat com la qualitat que té un cos de retornar a la posició d'equilibri de forma autònoma quan es produeix una pertorbació. Es distingeix entre estabilitat estàtica, quan les forces i moments generats després de la pertorbació empenyen el cos a recuperar el seu estat original; i estabilitat dinàmica, quan després d'una pertorbació, el cos tendeix a recuperar el seu estat d'equilibri amb el temps [8]. A la Figura 6 s'il·lustren els dos conceptes d'estabilitat.

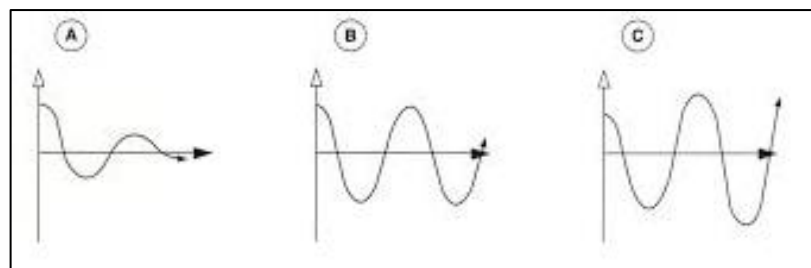


Figura 6 Exemples de combinacions d'estabilitat. A) Estable estàtica i dinàmicament. B) Estàticament estable i Dinàmicament neutre. C) Estàticament estable i dinàmicament inestable.

La anàlisi de l'estabilitat lateral de la cadira del parapent consisteix en analitzar com reacciona el moment total sobre la cadira en l'eix y , quan té lloc una pertorbació en l'angle entre l'eix longitudinal de la cadira i l'eix longitudinal de l'ala o eix x , angle de *twist* (φ).

Per tal d'estudiar la variació del moment total, primer s'ha de determinar i analitzar els moments que el conformen. El moment total en l'eix y està format per: el moment aerodinàmic, moment que creen les forces aerodinàmiques sobre la cadira; el moment dels ancoratges, moment originat per les forces que les cordes fan sobre els ancoratges; i el moment del pilot, moment que es capaç d'originar el pilot per tal de disminuir el *twist*. L'equació 8 expressa aquesta relació.

$$M_{tot} = M_{aerodinàmic} + M_{ancoratges} + M_{pilot} \quad (\text{Equació 8})$$

El moment aerodinàmic depèn de l'angle entre la velocitat relativa del vent i l'eix longitudinal de la cadira, angle δ . Aquest angle δ és suma de l'angle entre l'eix longitudinal de l'ala i la velocitat relativa de l'aire, angle σ , i de l'angle de *twist* (φ). El moment als ancoratges dependrà principalment de l'angle de *twist* (φ). El moment del pilot dependrà únicament de les forces que el pilot sigui capaç de fer sobre els ancoratges. Aquest últim moment, però, no es considerarà, ja que es vol estudiar el comportament inherentment estable o inestable de la cadira. A continuació, a la Figura 7, es mostra un esquema dels principals angles, forces i moments que actuen sobre la cadira de parapent.

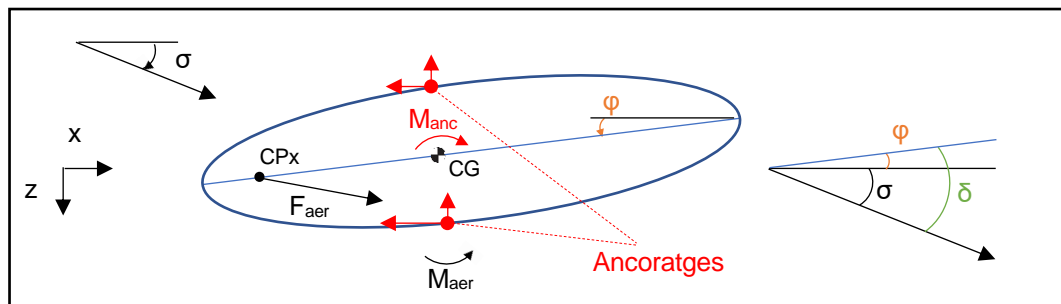


Figura 7 Il·lustració dels principals angles, forces i moments sobre la cadira de parapent.

Tots els moments són definits positius en el sentit positiu de l'eix y , eix que surt del pla del dibuix. En aquest esquema, es pot observar que el moment aerodinàmic tendeix a augmentar el *twist*, per tant, d'ara en endavant també s'anomenarà moment de *twist*. El moment dels ancoratges i del pilot s'oposen a l'augment del *twist*, per tant, d'ara en endavant també s'anomenaran moments *antitwist*.

Per tal de que el moment total pugui ser considerat estable i que φ retorni a la posició d'equilibri després d'una pertorbació, quan el valor de φ augmenti ha d'aparèixer un moment total negatiu i quan el valor de φ disminueixi ha d'aparèixer un moment total positiu, d'acord amb el criteri de signes proposat. És a dir, la derivada del moment total respecte φ ha de ser negativa. A continuació, a la Figura 8, s'il·lustra aquesta condició.

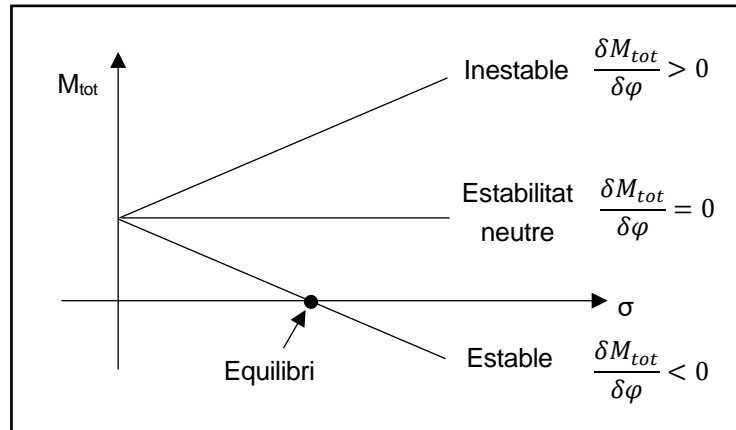


Figura 8 Condició d'estabilitat.

Prèviament a la anàlisi del comportament del moment total, i amb la finalitat de comprendre correctament el fenomen d'inestabilitat lateral, s'estudiarà separatament com evolucionen el moment aerodinàmic i el moment dels ancoratges en variar els angles dels quals depenen.

Es vol destacar que, donat que el fenomen subjecte d'estudi fa referència a l'angle de *twist* i la posició d'equilibri idealment desitjada és la de *twist* igual a 0° , independentment del caràcter estable o inestable del moment aerodinàmic respecte l'angle δ , del qual depèn, aquest moment serà considerat estabilitzador o desestabilitzador en funció de la seva afectació a l'angle de *twist*.

4.3. Criteri de disseny

Les geometries de cua que es modelin per les simulacions paramètriques seran dissenyades amb l'objectiu de minimitzar el drag, per tal de fer la cadira més aerodinàmica i així maximitzar la finesa, i amb l'objectiu d'obtenir informació sobre el fenomen d'inestabilitat lateral, per tal de poder donar unes indicacions clares de disseny que permetin disminuir-lo.

5. Estat de l'art

Abans de començar amb els càlculs i simulacions d'aquest projecte, s'ha fet una recerca de l'actual situació d'estudi de les cadires de parapent. S'ha buscat informació respecte l'aerodinàmica, l'estabilitat lateral i els actuals dissenys de cadires.

Respecte l'aerodinàmica de les cadires actuals i les seves millores respecte els models de la passada dècada, s'ha trobat poca informació. La poca informació disponible estableix que les cadires de parapent amb una cua posterior milloren l'aerodinàmica, però aquesta informació és justificada amb l'experiència dels pilots o de forma qualitativa i no amb càlculs o valors numèrics [5].

En referència a la inestabilitat lateral, no s'ha trobat cap tipus d'informació, al menys pública, que indiqui ser un tema d'estudi.

Centrant els esforços en la anàlisi dels dissenys de les cadires de competició de les principals marques de fabricants, s'observa que totes elles coincideixen en utilitzar una cua a la part posterior. Aquestes cues tenen unes longituds d'entre 0,7 i 1,1 m. Tot i això, no coincideixen en la utilitat o no de cobrir la part posterior del cap, ja que cadascun dels tres grans fabricants ofereix un nivell de cobriment diferent. A la Figura 9, Figura 10 i Figura 11 es mostren les cadires de competició de les tres principals marques de cadires.



Figura 9 Cadira Exoceat de la marca Ozone [9].



Figura 10 Cadira Kanibal Race II de la marca Kortel Designs [10].



Figura 11 Cadira X Rated 7 de la marca Woody Valley [11].

Aquests dissenys de cadires, obtinguts dels estudis interns de cada fabricant, semblen confirmar la teoria de que la introducció de cua es avantatjós per l'aerodinàmica; ja que de no ser així les marques no adoptarien aquesta configuració.

Tanmateix, en no haver recerca científica disponible del fenomen d'instabilitat lateral, de les possibles avantatges del cobriment de la part posterior del cap i de la pròpia aerodinàmica, s'haurà de partir dels raonaments teòrics previs que es puguin fer i dels resultats que es vagin obtenint al llarg d'aquest mateix projecte.

6. Model de simulació

En aquest apartat s'exposen, primerament, els coneixements necessaris per comprendre que és una simulació CFD. Tot seguit, s'explica el modelat de les geometries i el model de turbulència adequat per les simulacions. Posteriorment, s'exposen les característiques que ha de presentar el mallat i la anàlisi de sensibilitat realitzat sobre el mateix per determinar el seu refinament. Finalment, es fixen les condicions de contorn per les simulacions.

6.1. Simulació CFD

De cara a avaluar les prestacions i comportament de cada disseny de cua que es realitzi, s'utilitzarà la dinàmica de fluids computacional (CFD). Aquesta branca de la mecànica de fluids utilitza mètodes numèrics i models de turbulència per resoldre i analitzar problemes sobre flux de fluids.

Des de ja fa uns anys, aquesta eina ha guanyat en popularitat degut als avantatges que aporta. Permet obtenir resultats concloents sense necessitar de construir o modificar prototips i testejar-los, amb la quantitat de recursos econòmics i de temps que això suposa, permetent provar diferents opcions de forma relativament ràpida i senzilla. Tot i això, aquesta eina no exclou la necessitat de realitzar un experiment real, com bé es vol fer un cop acabat aquest projecte, però sí permet que aquest experiment es faci amb un prototip molt més estudiat i optimitzat.

Aprofundint en la metodologia de resolució, els programes CFD resolen les equacions de Navier-Stokes, equacions que expressen la conservació de la quantitat de moviment i la conservació de la massa per fluids newtonians, per a tot el medi d'estudi. A l'Equació 9, s'escriuen les equacions de Navier-Stokes.

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{du}{dt} \\ \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dv}{dt} \\ \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) &= \rho \frac{dw}{dt} \end{aligned} \quad (\text{Equació 9})$$

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = \nabla \cdot (\rho \vec{c}) = 0$$

Donat que considerant tot el medi com un únic element aquest és un problema inabordable, primerament, es discretitza tot el domini d'estudi en petits elements i llavors es resolen les equacions de Navier-Stokes en cadascun dels petits elements. Les equacions de Navier-

Stokes, però, són un conjunt d'equacions en derivades parcials no lineals de les quals no es disposa de solució general; tret de situacions i tipus de flux molt concret. D'aquesta forma, en no ser possible obtenir una solució analítica, és necessari recórrer a la anàlisi numèrica per determinar una solució aproximada.

Els softwares de simulació CFD obtenen aquesta solució aproximada per mitjà de resoldre les equacions de Navier-Stokes element a element. La solució aproximada que s'obté d'aplicar aquestes equacions una única vegada no és suficientment precisa com per donar el resultat per bo, d'aquesta manera, s'entra en un procés d'iteració en el que els resultats d'una iteració són els valors de partida de la següent. Aquest procés d'iteració finalitza quan els indicadors de residus, indicadors que avaluen les diferències entre els resultats d'una iteració i l'anterior, convergeixen i són suficientment petits.

La resolució d'un problema per mitjà de la dinàmica de fluids computacional, des de que es concep i planteja el problema fins que s'obté solució, consta de les següents etapes:

- 1. Modelat del domini.** Primerament, es modela la geometria del cos que es vol simular sota l'acció d'un fluid. Això es realitzarà amb el programa *SolidWorks*. Els softwares de CFD, però, obtenen resultats amb l'estudi del moviment del fluid, no del cos en el fluid. D'aquesta forma, el domini de simulació no és el del cos, sinó un domini de fluid, suficientment gran perquè els extrems del domini no tinguin acció en la simulació, al qual es sostreu la geometria del cos. Aquesta operació d'obtenció del domini de fluid es realitza amb el programa *Ansys*.
- 2. Mallat.** En aquesta etapa es discretitza el domini obtingut anteriorment en petits elements. És un pas crític ja que la qualitat de la malla determinarà la qualitat dels resultats. Aquesta ha de ser suficientment refinada i trobar-se dintre de les capacitats computacionals de les que es disposa.
- 3. Preparació del model.** En aquesta etapa s'estableixen les condicions de contorn de la simulació, les propietats físiques dels elements i les equacions físiques que regeixen la física del problema (selecció del model de turbulència i equacions complementaries).
- 4. Resolució del model.** El software inicia les iteracions i es monitoritzen les variables d'interès. Quan aquestes assoleixen una certa magnitud i grau de convergència la solució es pot donar per vàlida.
- 5. Extracció de resultats.** Un cop es té la solució, s'extreuen valors de magnituds, mapes de colors sobre la geometria i gràfics 2D i 3D per tal d'analitzar i entendre els resultats. Aquesta etapa permet, si escau, decidir la direcció de les següents simulacions.

Les quatre últimes etapes es realitzen totes per mitjà del software *Ansys* i s'aniran desenvolupant al llarg dels següents apartats. La Figura 12 il·lustra tot aquest procés.

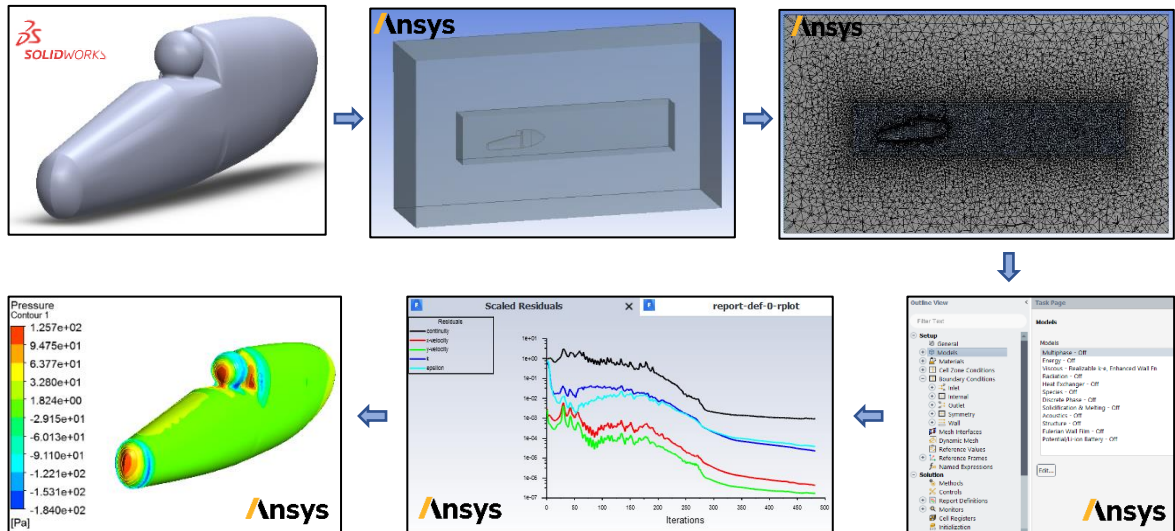


Figura 12 Conjunt d'etapes d'una simulació CFD.

6.2. Modelat de la geometria

Pel modelat 3D de les distintes geometries que s'estudiaran i simularan, s'ha utilitzat el programa *SolidWorks*. Donat que l'estudi d'aquest projecte es centra en la geometria de la cua, s'ha fixat la geometria de la part davantera de la cadira. La Figura 13 mostra la geometria de la part davantera.

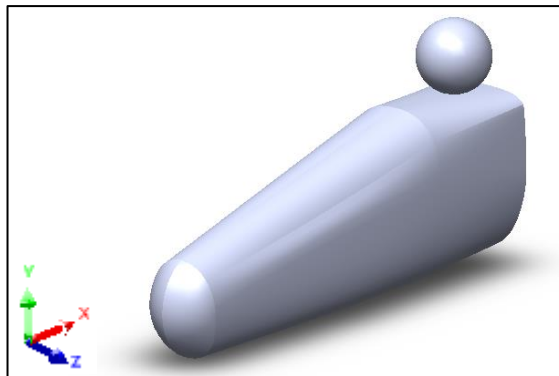


Figura 13 Geometria de la part davantera utilitzada per les cadires amb i sense cua.

D'aquesta geometria davantera, és important saber la seva longitud, per entendre el fenomen d'instabilitat lateral; la posició en x dels ancoratges i la separació entre ells, per tal de poder caracteritzar els moments sobre la cadira; i el punt més baix de la cadira respecte l'origen de coordenades, per conèixer el desfàs vertical de l'origen (que s'ha agafat com el punt més a l'esquerra de la geometria). Aquests valors es mostren a la Figura 14 i a la Figura 15.

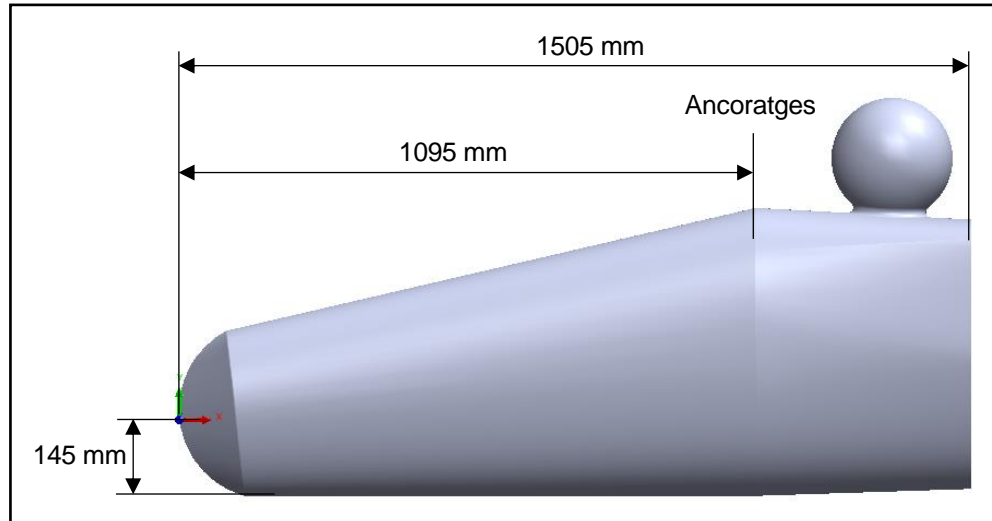


Figura 14 Vista lateral amb les dimensions de la part davantera de la cadira.

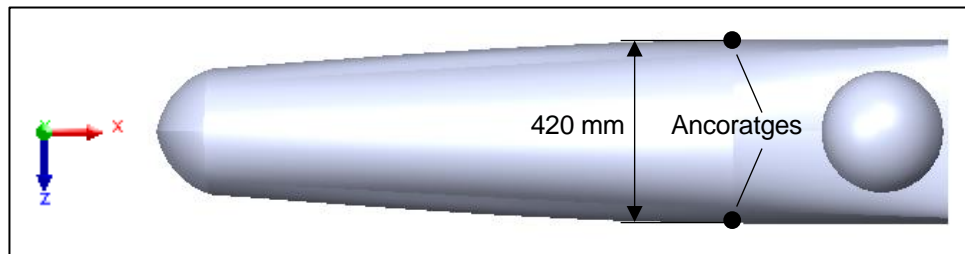


Figura 15 Vista en planta amb les dimensions de la part davantera de la cadira.

Pel modelat de la part posterior de la cadira, és a dir, de la cua, s'ha fet servir el mòdul de superfícies de *SolidWorks*; que ofereix una flexibilitat adequada pels dissenys d'aquest projecte. Tot seguit, a la Figura 16 i a la Figura 17, es mostren dues vistes d'una cadira amb cua on s'indiquen les dues variables que determinen les dimensions de la cua.

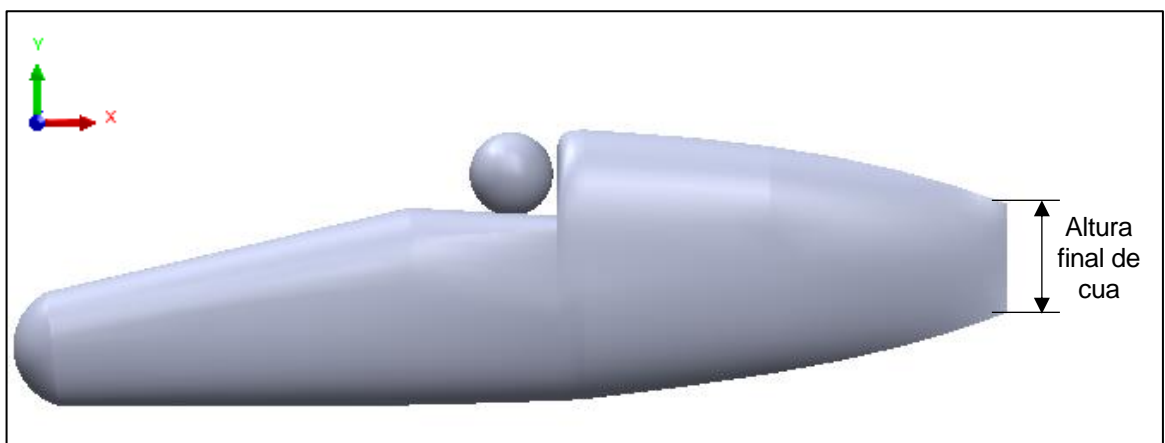


Figura 16 Vista lateral d'una cadira de parapent amb cua.

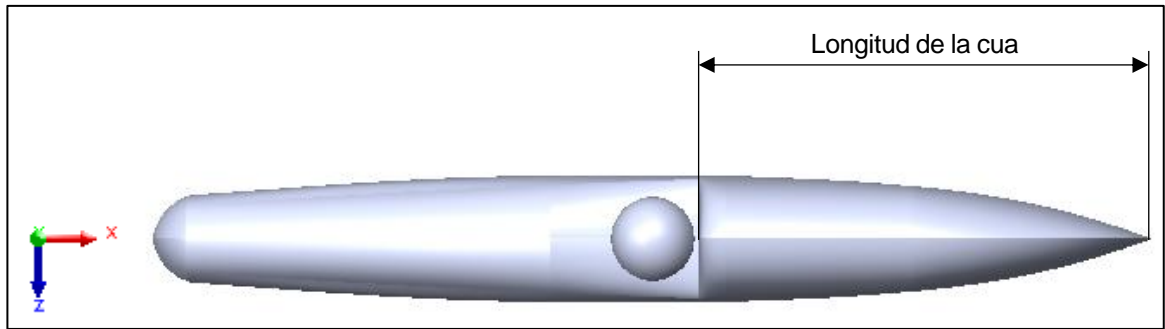


Figura 17 Vista en planta d'una cadira de parapent amb cua.

6.3. Model de turbulència

A la mecànica de fluids, una de les classificacions possibles dels fluids en moviment és en funció de la seva velocitat i trajectòria. Aquesta classificació dona lloc als fluxos laminars i fluxos turbulents.

El flux laminar es caracteritza per un moviment perfectament ordenat del fluid, estratificat, suau, de manera que el fluid es mou en làmines paral·leles sense barrejar-se. El flux turbulent es caracteritza per un moviment irregular, caòtic o impredecible, les partícules es mouen desordenades i apareixen remolins que afavoreixen la barreja. Aquest flux apareix a altes velocitats o quan hi ha obstacles en el moviment del fluid; essent, d'aquesta forma, un flux turbulent el flux d'aire al voltant de la cadira del parapent.

D'altra banda, quan un flux lliure, no afectat per la presència de cap element, es troba amb un sòlid, el moviment del fluid és pertorbat. A la mecànica de fluids, la capa límit és la zona on aquest moviment es pertorbat pel contacte amb el sòlid, la zona on la velocitat del fluid respecte el sòlid varia des del 0% fins al 99% de la velocitat de la corrent no pertorbada.

Aquest gradient de velocitats que apareix a la capa límit és degut, per un costat, a que a la superfície del sòlid apareix un esforç tallant que atura el fluid i, per l'altre, a la viscositat inherent a tots els fluids. Les característiques bàsiques de les capes límit laminars i turbulents així com les seves etapes de formació s'il·lustren a la Figura 18 [12].

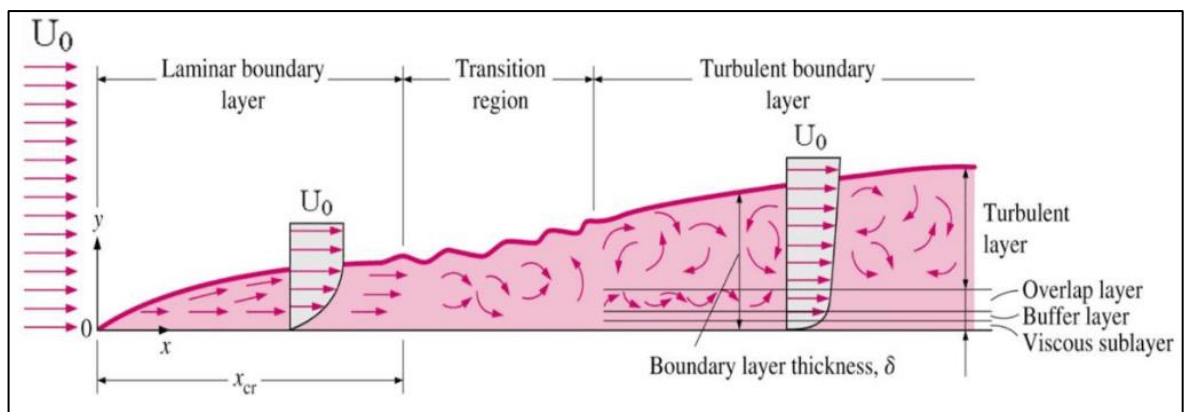


Figura 18 Etapes de formació de la capa límit i principals característiques.

El paràmetre que indica si la capa límit és laminar o turbulenta és el nombre de Reynolds. Aquest nombre adimensional (Equació 10) representa la relació entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses.

$$Re = \frac{\rho \cdot V \cdot D}{\mu} \quad (\text{Equació 10})$$

On

- ρ = densitat del fluid (kg/m^3)
- V = velocitat del fluid (m/s)
- D = dimensió lineal caract. (m)
- μ = viscositat dinàmica ($\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$)

Per nombre de Reynolds petits, la capa laminar i la velocitat del corrent canvien uniformement a mesura que s'allunya de la paret, com es mostra a la part esquerra de la Figura 18. A mesura que augmenta el nombre de Reynolds (amb la x ; variable que indica distància des de l'inici de la capa límit, és a dir, distància des de que el fluid incideix en el cos) el flux es torna inestable i, finalment, per valors de Reynolds elevats (típicament $> 5 \cdot 10^5$), la capa límit és turbulenta i la velocitat del corrent es caracteritza per fluxos de remolins inestables.

Aquesta capa límit turbulenta és la que es presentarà en una major part de la superfície de la cadira de parapent i la més difícil de modelar. Per tant, serà necessari que el model de simulació emprat modeli correctament aquest règim turbulent. Existeixen diferents mètodes per modelar les fluctuacions d'aquests tipus de flux. Aquests presenten diferències en el seu cost computacional (temps de simulació) i la seva precisió, fent que la seva elecció sigui de les parts més importants de la definició de la simulació. A continuació s'exposen els diferents models de turbulència [13]:

1. **Simulació Numèrica Directa** (*Direct Numerical Simulation*, DNS). Es tracta d'una solució completa de les equacions de Navier-Stokes de forma directa, sense emprar valors mitjans i resolent totes les escales de fluctuació del flux. Aquest model ofereix els resultats més precisos, però la malla ha de ser molt fina i necessita d'una gran capacitat computacional; només a l'abast de supercomputadors.
2. **Simulació de grans vòrtexs** (*Large Eddy Simulations*, LES). En aquest model s'aplica un filtre a les equacions de N-S de manera que es resolguin calculant només les grans escales de turbulència (els vòrtexs més grans del moviment turbulent). Per les escales petites s'assumeix un model que permet considerar de forma aproximada el seu efecte en el conjunt (mètode RANS). Tenen un cost computacional menor que les DNS i poden utilitzar una malla mes grossa, però tenen també una precisió menor.
3. **Equacions RANS** (*Reynolds-Averaged Navier Stokes*). Aquesta aproximació, proposada per Reynolds al 1895, està basada en la descomposició de les variables de flux en un valor mig i un altre fluctuant. Les equacions de N-S es formulen en funció de les variables mitjana, obtenint així un nou sistema d'equacions, denominats RANS, molt semblant a l'original però amb un terme addicional, el tensor de Reynolds, que fa que es necessitin més equacions per resoldre el sistema, equacions de transport. Aquest mètode és el que

consumeix menys recursos computacionals i permet utilitzar malles mes grosses. Els seus resultats no son del nivell dels mètodes anteriors, però continuen sent vàlids si es coneixen les seves limitacions; motiu pel qual aquest model és àmpliament utilitzat en el món industrial. Tot seguit, es mostren les equacions RANS; obtingudes d'omitjar les equacions de Navier-Stokes considerant que $u = \bar{u} + u', v = \bar{v} + v' i w = \bar{w} + w'$.

$$\begin{aligned} \rho g_x - \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} - \overline{\rho u'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} - \overline{\rho u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}}{\partial z} - \overline{\rho u'w'} \right) &= \rho \frac{d\bar{u}}{dt} \\ \rho g_y - \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} - \overline{\rho u'v'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} - \overline{\rho v'^2} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{v}}{\partial z} - \overline{\rho v'w'} \right) &= \rho \frac{d\bar{v}}{dt} \\ \rho g_z - \frac{\partial \bar{p}}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial x} - \overline{\rho u'w'} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial y} - \overline{\rho v'w'} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial \bar{w}}{\partial z} - \overline{\rho w'^2} \right) &= \rho \frac{d\bar{w}}{dt} \end{aligned} \quad \text{(Equació 11)}$$

$$\frac{\partial(\rho\bar{u})}{\partial x} + \frac{\partial(\rho\bar{v})}{\partial y} + \frac{\partial(\rho\bar{w})}{\partial z} = \nabla \cdot (\rho\vec{c}) = 0$$

A l'Equació 11, els termes que sumen dintre dels parèntesis són funció del valor mitjà de la velocitat i els termes que resten son funció de les fluctuacions. Els termes funció de les fluctuacions s'anomenen tensions turbulentes i son precisament els que s'intenten modelar amb els models de turbulència i les equacions de transport.

A continuació, a la Figura 19, es mostren els resultats de simular un raig amb els tres models explicats.

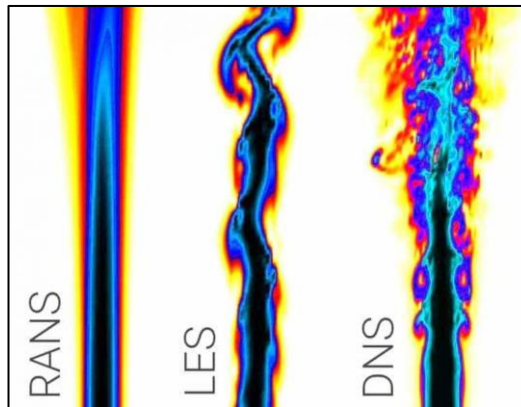


Figura 19 Resultats de simular un raig amb els tres models de turbulència explicats.

Per la realització de les simulacions d'aquest treball s'ha triat el mètode RANS; que s'ajusta als recursos computacionals dels quals es disposa i els resultats que ofereix son de la precisió i qualitat buscada.

6.3.1. Models RANS

Dintre del model de turbulència RANS, alhora, hi ha diversos models de turbulència. Els més importants, ordenats de menys a més cost computacional, s'expliquen a continuació [14]:

1. **Spallart-Allmaras.** De baix cost computacional i que resol una única equació de transport per la viscositat turbulenta. S'acostuma a utilitzar en aerodinàmica i turbomàquines quan es presenta separació de capa límit petita, tals com fluids supersònics/transsònics sobre perfils aerodinàmics, etc.
2. **Model k- ϵ .** Aquest model utilitza dos equacions en derivades parcials, una que deriva de l'equació de l'energia cinètica turbulenta (k) i l'altra que deriva del rati de la dissipació turbulenta (ϵ). Aquest model té dos variants àmpliament utilitzades:
 - 2.1. **Standard k- ϵ .** Els paràmetres del model estan calibrats utilitzant dades d'experiments de referència. Conté submodels per compressió, combustió, etc. És un model robust, d'ús general, però no dona bons resultats en fluxos amb un gran gradient de pressió advers o gran separació.
 - 2.2. **Realizable k- ϵ .** L'equació de dissipació (ϵ) es deriva de la mitjana dels quadrats de la fluctuació de la vorticitat, diferencia respecte el model anterior. Dona millors resultats en fluxos amb un fort gradient de pressió advers, separació i recirculació.
3. **Model k-w.** Aquest model també utilitza dos equacions en derivades parcials, una que deriva de l'equació de l'energia cinètica turbulenta (k) i una altra equació pel rati específic de dissipació turbulenta (w). Aquest model també té dos variants àmpliament utilitzades:
 - 3.1. **Standard k-w.** Robust per problemes amb Reynolds baix, resultats millorats per gradient advers de pressions. Àmpliament utilitzat a la indústria aeroespacial i de turbomàquines.
 - 3.2. **Shear Stress Transport k-w (SST k-w).** Utilitza una funció de mescla per fer una transició gradual del model Standard k-w a prop de la paret al model k- ϵ lluny de la paret. Dona resultats precisos de l'inici i mida de la separació sota un gradient de pressió advers.

Donat que la naturalesa del treball radica en la comparació de prestacions entre geometries, més que modelar amb exactitud la turbulència de l'aire, s'ha seleccionat el model Realizable k- ϵ , que dona una bona estimació de la turbulència amb un cost computacional acceptable. Aquesta elecció ha sigut contrastada amb el departament d'I+D de Niviuk, que també empra aquest model per la simulació de problemes similars.

6.3.2. Validació del model

Abans de donar aquest model per definitiu, s'ha volgut contrastar la precisió dels seus resultats, és a dir, validar el model de turbulència. Donat que no es disposa de resultats experimentals d'una cadira de parapent sotmesa a l'acció del vent, s'ha optat per utilitzar els resultats experimentals de diversos cossos sotmesos a una corrent de fluid; problemes ben definits a la literatura de mecànica de fluids [7].

Aquests resultats experimentals són els coeficients de drag per un Reynolds major a 10^4 , i els cossos utilitzats són un rombe i un rectangle amb morro arrodonit. A continuació, a la Figura 20, es mostren les geometries i els coeficients trobats experimentalment.

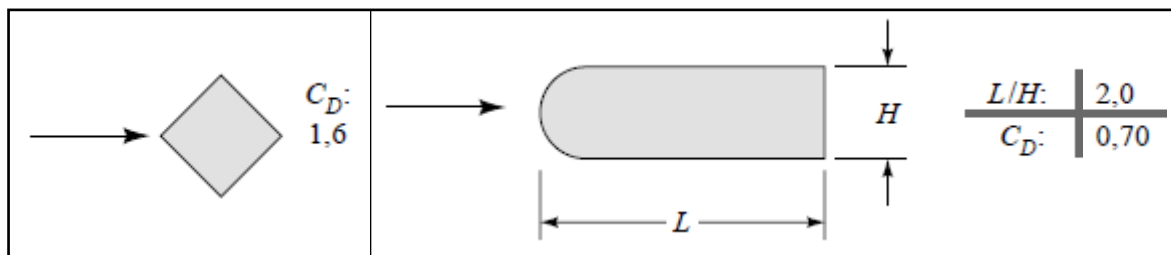


Figura 20 Geometria i resultats dels experiments de referència utilitzats per la validació del model de turbulència.

A la Figura 21 es mostren els resultats de simular les dues geometries anteriors amb el Reynolds adequat i amb el model de turbulència Realizable k- ϵ .

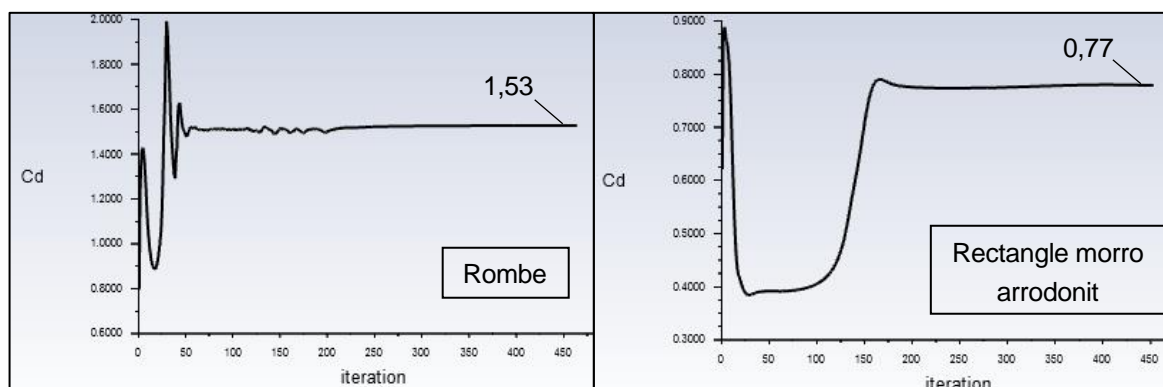


Figura 21 Coeficients de drag trobats per simulació d'un rombe i un rectangle amb morro arrodonit.

Els valors obtinguts per simulació tenen un error relatiu $\leq 10\%$ respecte els valors obtinguts experimentalment. Aquest error relatiu s'ha considerat acceptable en aquest estudi i, per tant, es dona per vàlid el model de turbulència.

6.4. Mallat

El mallat del domini subjecte d'estudi és un pas crític que afectarà directament a la precisió i qualitat dels resultats. Un mallat molt refinat (elevat nombre d'elements) permet, fins a cert punt, obtenir uns resultats de major qualitat, però, a major nombre d'elements els recursos computacionals que consumirà la simulació seran majors.

Al llarg d'aquest apartat es desenvoluparan les característiques que ha de presentar un mallat d'acord amb la bibliografia existent i s'exposarà la anàlisi de sensibilitat realitzada per tal de determinar el grau de refinament necessari.

6.4.1. Característiques

- **Estela del cos**

En tot cos sotmès a una corrent de fluid apareix una estela en la part posterior que correspon al despreniment de la capa límit, la magnitud de la qual afecta considerablement al coeficient de drag i dona una idea de l'aerodinàmica del cos. Que els resultats defineixin amb precisió

aquesta estela, i per tant la qualitat dels mateixos no es veu afectada per aquesta, depèn del mallat que es realitzi en la zona on ha d'aparèixer l'estela [15].

D'aquesta forma, a la part posterior del cos es realitzarà un refinament major que en la resta del domini. Per realitzar aquesta acció es divideix el domini d'estudi en una part interna, nucli que conté la geometria de la cadira i l'estela, i una part externa (Figura 22).

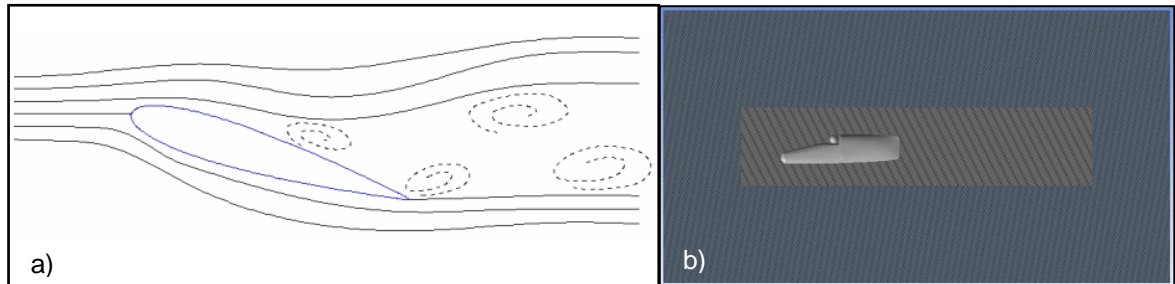


Figura 22 a) Esquematzació de l'estela formada a la part posterior d'un perfil aerodinàmic. b) Divisió del domini d'estudi per tal de refinar la zona on ha d'aparèixer l'estela.

- **Capa límit**

El model de turbulència escollit també afecta al tipus de mallat i les característiques que ha de presentar. Segons com el model de turbulència tracti la capa límit turbulenta, el mallat en aquesta zona haurà de ser d'una manera o altre [16]. Per caracteritzar la capa límit turbulenta i entendre el seu tractament s'han d'introduir dos nombres adimensionals, la velocitat adimensional (u^+ , Equació 12) i la distància adimensional a la paret (y^+ , Equació 13):

$$u^+ = \frac{u}{u_\tau} \quad (\text{Equació 12}) \quad y^+ = \frac{y \cdot u_\tau}{\nu} \quad (\text{Equació 13})$$

- On:
- u = velocitat en direcció paral·lela a la paret (m/s)
 - y = distància a la paret (m)
 - ν = viscositat cinemàtica del fluid (m^2/s)
 - u_τ = velocitat de fricció (m/s); obtinguda de l'Equació 14.

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (\text{Equació 14})$$

On τ_w són els esforços a la paret ($\text{N}/\text{m}^2 = \text{Pa}$) i ρ la densitat (kg/m^3).

Com s'observa a la Figura 18, la capa límit turbulenta està formada per diverses subcapes:

- Capa viscosa (*viscous sublayer*): aquesta subcapa es dona per valors de $y^+ < 5$ i el fluid és dominat per l'efecte viscos, de manera que es pot suposar que les forces d'inèrcia són menyspreable. L'Equació 15 expressa la llei de velocitats lineal.

$$u^+ = y^+ \quad (\text{Equació 15})$$

- Regió completament turbulenta (*turbulent layer*): aquesta subcapa es dona per valors de $y^+ > 30$ i domina l'efecte turbulent. El perfil de velocitats varia lentament amb una funció logarítmica de la distància (y). L'equació 16 descriu la llei de velocitats a aquesta regió amb la constant de Karman $k = 0,41$ i la constant $B = 5,2$.

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(y^+) + B \quad (\text{Equació 16})$$

- Zona d'esmoreïment (*buffer layer*): zona compresa entre les dues anteriors subcapes, on les forces viscoses i turbulentes tenen magnituds similars. Aquesta regió es dona per valors de $5 < y^+ < 30$.

La Figura 23 il·lustra les lleis que regeixen la velocitat al llarg de la capa límit turbulenta.

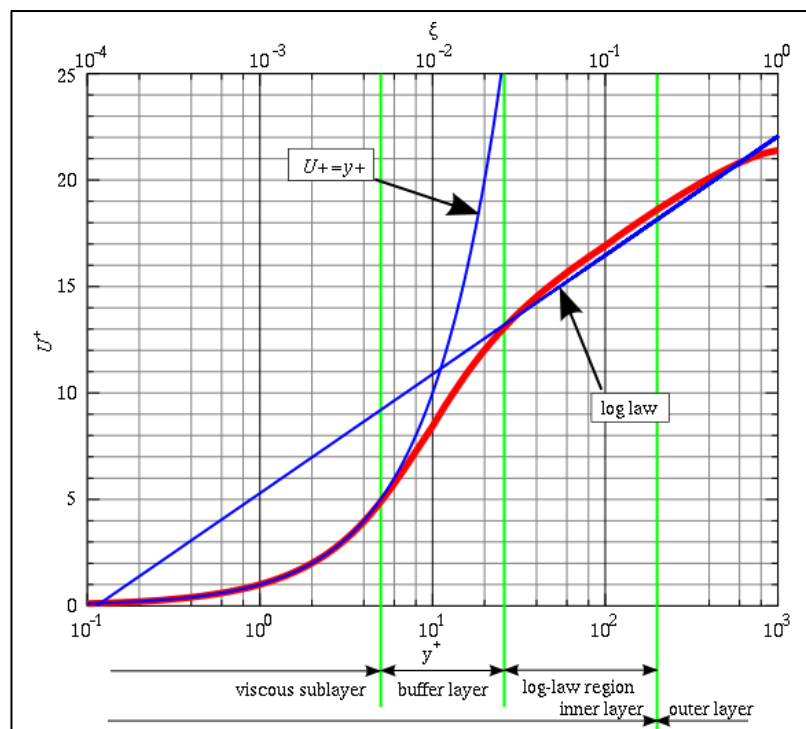


Figura 23 Llei de velocitats a la capa límit turbulenta.

Els models de turbulència es poden dividir en dos grans grups, segons com resolen la regió de la subcapa viscosa.

- Els primers, com el model $k-\omega$, integren la turbulència fins la paret. Resolen la zona afectada per la viscositat i presenten un mallat amb les primeres capes situades a la subcapa viscosa. En aquests models el centre del primer element ha d'estar a la subcapa viscosa, preferentment $y^+ = 1$.
- Els segons, com el model Realizable $k-\epsilon$ triat en aquest projecte, utilitzen funcions de paret que poden modelar la regió més pròxima a aquesta. Les funcions de paret són funcions determinades empíricament que satisfan les lleis físiques en aquesta zona.

Per assegurar la precisió dels resultats, el centre del primer element ha d'estar situat a la regió amb llei exponencial. Al no ser necessari resoldre la capa límit, la reducció en la mida del mallat i el cost computacional és considerable. El primer element ha d'estar situat amb un valor $30 < y^+ < 300$; per aquest projecte s'ha agafat que el centre del primer element tingui un valor de $y^+ = 50$, que correspon a una $y = 1,2$ mm.

- **Growth Rate i Maximum Layers**

Un altre aspecte a considerar en el mallat per la correcta resolució del problema és la rati de creixement dels elements, *Growth Rate*. Aquest rati representa el creixement de l'altura dels elements, amb cada capa consecutiva des de la superfície del cos [17]; a la superfície del cos es fixa la mida de l'element, però aquest aspecte es desenvoluparà en el següent apartat. D'acord amb la literatura el *Growth Rate* ha de ser inferior a 1,25; un valor d'1,2 assegura un bon mallat, en aquest aspecte, a la regió propera a la paret.

D'altra banda, per assegurar que la capa límit es resol correctament, s'ha de fixar el nombre màxim de capes des de la superfície, *Maximum Layers*. S'aconsella que el nombre de capes sigui d'entre 10 i 15 [18]. Els mallats d'aquest projecte utilitzaran 15 capes.

A la Figura 24, per il·lustrar l'efecte del *Growth Rate*, es mostren mallats amb 15 capes des de la superfície i valors de *Growth Rate* diferents.

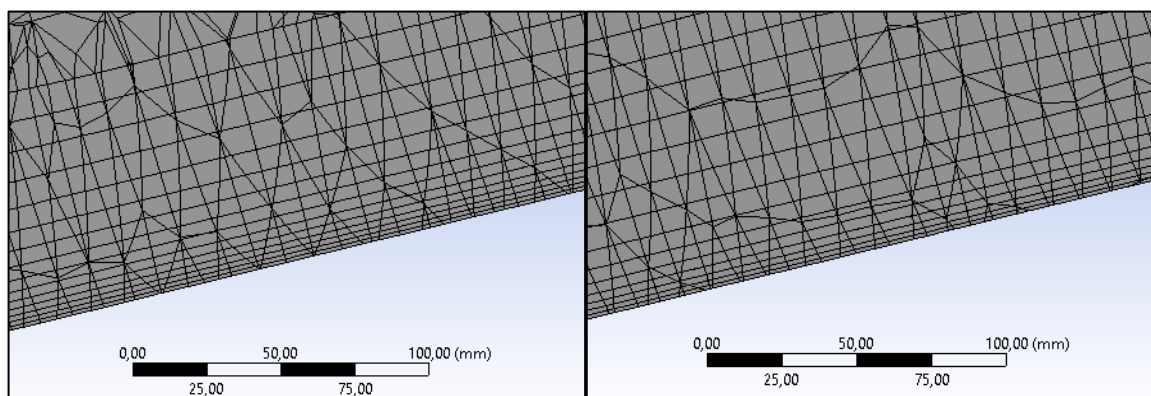


Figura 24 Captura de dos mallats amb valors de *Growth Rate* diferents.

6.4.2. Anàlisi de sensibilitat

Per tal de determinar el refinament necessari al mallat del domini, s'ha dut a terme una anàlisi de sensibilitat. Fixada la altura de la primera capa, el *Growth Rate* i el *Maximum Layers*, d'acord amb les característiques del problema i les bones pràctiques que indica la literatura, el paràmetre més significatiu que queda per determinar és la mida dels elements a la superfície del cos, *Sizing*. Així, per determinar el valor de *Sizing* en que un refinament ja no millora la precisió dels resultats, s'han realitzat simulacions d'una cadira amb cua amb diferents valors de *Sizing*. Els resultats es mostren a la Figura 25.

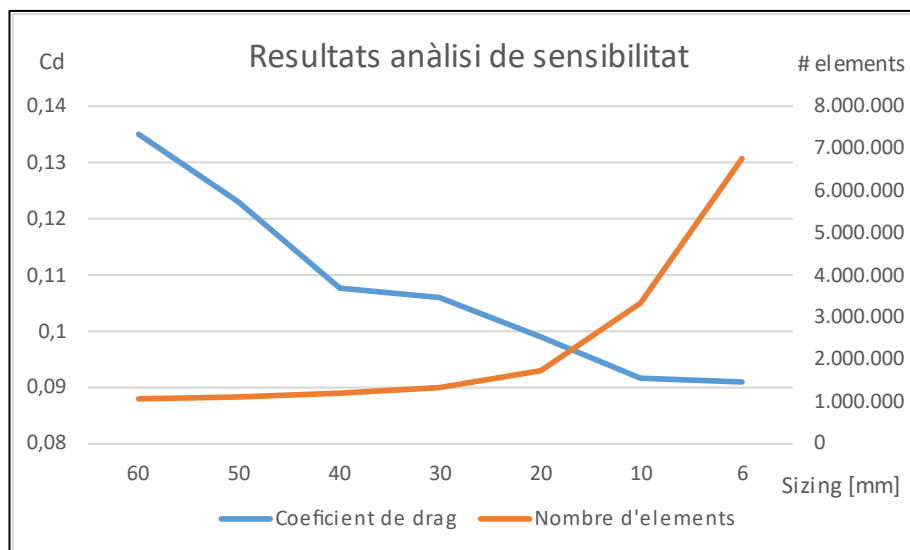


Figura 25 Resultats de la anàlisi de sensibilitat.

Analitzant els resultats de la Figura 25, s'observa que la millora en precisió que introdueix el refinament a un Sizing de 6 mm, respecte el Sizing de 10 mm, és inferior a l'1%, mentre que es dupliquen el nombre d'elements. En cas d'utilitzar un Sizing de 20 mm es tindria la meitat d'elements que en el cas de 10 mm, però els resultats s'allunyarien un 10% dels resultats amb la malla més refinada. D'aquesta forma, s'ha decidit utilitzar un Sizing de 10 mm, ja que ofereix un bon equilibri entre precisió de resultats i nombre d'elements.

6.5. Condicions de contorn

Finalment, per completar la definició del model de simulació, s'han de fixar les condicions de contorn de la simulació. Primerament, en el prisma que representa el domini de simulació, es fixa que l'aire només entra per la cara davantera i que surt per la cara posterior, ambdues cares paral·leles al pla Y-Z. A les restants quatre cares exteriors del prisma es fixa la condició de simetria, correcte ja que s'ha utilitzat un domini suficientment gran com perquè les parets del domini no afectin. Entre les cares de la divisió interior del prisma, realitzada per fer un refinament més gran de la zona de l'estela, es fixa la condició de que son part del mateix domini de fluid. A la Figura 26 es mostra el domini amb les diverses cares.

En segon lloc, s'ha fixat la velocitat de l'aire. D'acord amb les indicacions de Niviuk, les cadires de competició poden assolir velocitats de 50 - 60 km/h. Donat que la inestabilitat lateral és dona a elevades velocitats, s'ha acordat fer el gruix de les simulacions amb una velocitat en el pla X-Z de 15 m/s. Per tal de veure l'efecte de la velocitat al fenomen d'inestabilitat lateral, també es realitzaran algunes simulacions amb velocitats en el pla X-Z de 5 i 10 m/s.

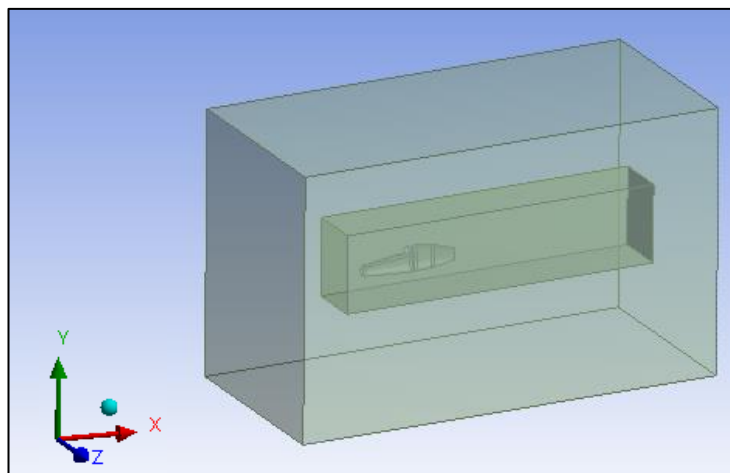


Figura 26 Domini de simulació.

En tercer lloc, s'ha fixat l'angle d'incidència del vent en el pla X-Z, angle σ . Per tal de comprendre el fenomen d'instabilitat lateral, s'ha vist que aquest angle no pot ser constant, sinó que ha d'anar variant per tal de veure l'evolució del comportament de la cadira. D'acord amb les situacions de vol reals, s'ha decidit estudiar el comportament de la cadira sota angles d'incidència del vent d'entre 0° i 20° (s'anomenarà flux frontal al cas $\sigma = 0$ i flux lateral al cas $\sigma \neq 0$). Per tal de facilitar la configuració de la simulació i l'extracció de dades, s'ha fet que l'orientació del domini variï d'acord amb l'angle d'incidència del vent. A continuació, a la Figura 27, es mostra una vista en planta d'un domini de simulació on s'il·lustra aquest fet.

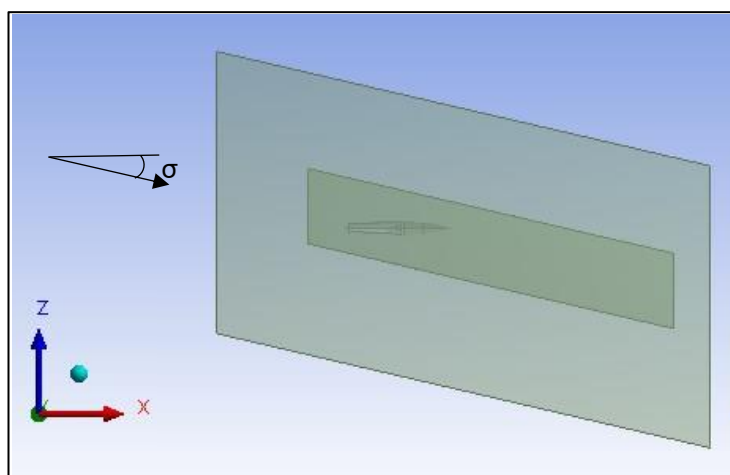


Figura 27 Vista en planta d'un domini de simulació.

Es vol destacar que l'angle que realment determinarà les forces i moments aerodinàmics no serà l'angle absolut del vent lateral, angle σ , sinó que serà l'angle relatiu entre el vent lateral i l'eix longitudinal de la cadira, angle δ . Donat que totes les simulacions es realitzen amb el pla de simetria de la cadira sobre el pla X-Y, equivalent a suposar un angle φ de *twist* de zero, el valor de l'angle relatiu entre vent i cadira δ coincidirà amb el valor de σ . D'aquesta forma, s'obtingran les forces i moments aerodinàmics sobre la cadira per diferents valors de δ únicament amb la variació de σ ; tot i que a la realitat, el valor de δ dependrà de σ i φ .

7. Model estabilitat lateral

De cara a entendre correctament el fenomen de la inestabilitat lateral, i prèviament a la realització de les primeres simulacions, es vol caracteritzar les diverses forces i moments que poden actuar sobre la cadira del parapent i la seva conseqüència sobre el fenomen d'inestabilitat lateral.

7.1. Forces i moments aerodinàmics

La primera de les forces, i la que s'analitza amb més detall en aquest treball, és la força deguda al moviment relatiu entre cadira i aire. Aquesta força aerodinàmica té component en les tres dimensions, però com es vol estudiar el seu efecte sobre el moment de *twist* (moment sobre l'eix vertical y , definit com a positiu sortint del pla del dibuix), només interessen les components en el pla X - Z . Dintre d'aquest pla, dues bases cobren especial interès: la formada per la direcció del vent i la seva perpendicular (base que va rotant amb l'angle d'incidència del vent) i la formada per l'eix longitudinal de la cadira i la perpendicular (base fixe). La primera de les bases permet representar el *drag* i la força lateral sobre la cadira, permetent avaluar l'aerodinàmica de la cadira pels diferents angles d'incidència del vent. La segona base permet determinar la força que fa un moment de *twist*, F_z , independentment de l'angle d'incidència del vent. A la Figura 28 s'il·lustren aquestes dues bases:

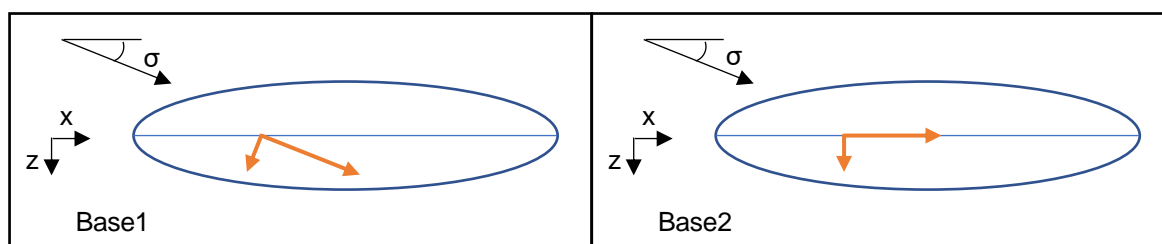


Figura 28 Bases d'interès del pla X - Z .

Per tal de calcular el moment de *twist* que la força aerodinàmica genera sobre la cadira és necessari determinar:

- **Fz**: component de la força aerodinàmica en l'eix z i, suposant que el centre de pressions es troba sobre el pla de simetria de la cadira (pla X - Y), única que realitza moment sobre l'eix vertical.
- **CPx**: component en x del centre de pressions situat sobre el pla de simetria de la cadira.
- **Ax**: component en x de la posició dels ancoratges de la cadira, punt sobre el qual es fa el moment de *twist*.

Així, el moment de *twist* es calcula com l'Equació 17:

$$M_{tw} = F_z \cdot (A_x - CP_x) \quad (\text{Equació 17})$$

Suposant que F_z serà sempre positiva, com sembla lògic per angles d'incidència del vent d'entre 0 i 20° , dos possibles situacions es poden donar. Que el CP_x estigui per davant d' A_x o per darrere; a la Figura 29 s'il·lustren aquestes dues situacions.

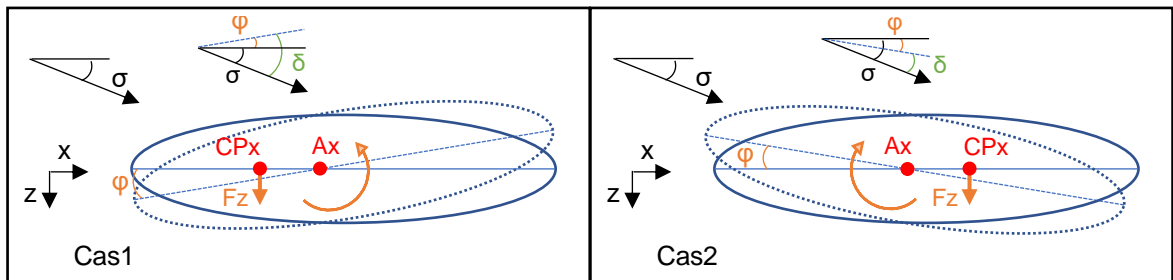


Figura 29 Esquemes de les dues possibles situacions en el càlcul del moment aerodinàmic. Amb línia contínua la cadira a la situació inicial i amb línia discontinua la cadira per acció del moment aerodinàmic.

Suposant que sobre la cadira només actua el moment aerodinàmic, si s'està en la situació 1 el moment en l'eix vertical serà positiu i serà un moment desestabilitzador, ja que el moment farà tendir la cadira a angles de *twist* positius; fent, a la vegada, augmentar l'angle relatiu entre vent i cadira δ . Si s'està a la situació 2, el moment serà negatiu i també serà desestabilitzador, ja que farà tendir la cadira a angles de *twist* negatius; en aquest cas disminuirà l'angle relatiu entre vent i cadira δ .

D'aquesta manera, s'haurà de prestar especial atenció a l'evolució de la posició del CP_x , ja que determinarà el signe del moment i l'angle de *twist* que apareguin.

7.2. Moments *antitwist*

D'altra banda, un seguit de moments estabilitzadors, que son independents de l'aerodinàmica de la cadira, també actuen sobre ella.

En primer lloc, es té el moment *antitwist* que pot realitzar el pilot per contrarestar els efectes del moment aerodinàmic. El pilot pot fer força amb el braços per tal de mantenir la cadira recta i un angle de *twist* petit. Donat que es pot considerar que l'acció del pilot té el mateix efecte sobre totes les cadires, independentment de la seva geometria, i es vol estudiar l'efecte de variacions sobtades en l'angle d'incidència del vent, on el pilot podria no estar concentrat i no reaccionar correctament, el moment *antitwist* que pot introduir el pilot no serà considerat en aquest projecte. No considerar-lo permetrà estudiar el comportament inherentment estable o inestable de la cadira i comparar els resultats de les diferents geometries en condicions d'igualtat.

En segon lloc, es té el moment que s'origina als ancoratges. La naturalesa d'aquest moment depèn de si hi ha un cert angle de *twist* o no, és a dir, depèn de si la projecció de la força aerodinàmica passa entre els ancoratges o no. Tot seguit, a la Figura 30, s'il·lustren les dues possibles situacions i com es distribueixen les forces sobre els ancoratges.

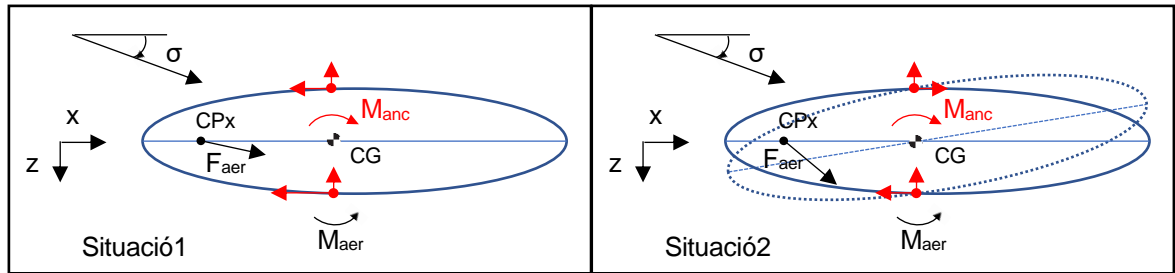


Figura 30 Esquemes de les dues possibles situacions en el càlcul del moment dels ancoratges.

A la situació 1 es té que la projecció de la força aerodinàmica passa entre els ancoratges. Si es resol les equacions de l'estàtica (sumatori de forces i moments igual a zero), s'obté que les dues forces que han d'exercir les cordes sobre els ancoratges en l'eix x són cap a l'esquerra. Per obtenir aquesta distribució de forces, és suficient amb que la cadira s'endarrereixi respecte l'ala del parapent. D'aquesta manera, mentre la projecció de la força aerodinàmica passi entre els dos ancoratges, es podrà mantenir l'equilibri sense necessitat d'entrar en *twist*, es podrà mantenir únicament amb l'endarreriment de la cadira respecte l'ala.

A la situació 2 es té que la projecció de la força aerodinàmica no passa entre els dos ancoratges. Si es resol les equacions de l'estàtica, s'obté que a l'ancoratge superior es necessita una força positiva en l'eix x i a l'ancoratge inferior una força negativa. Donat que aquesta distribució de forces no es pot obtenir únicament amb l'endarreriment de la cadira respecte la cua, es dedueix que aquesta situació 2 originarà un cert angle de *twist*, el necessari per tal de que el moment aerodinàmica i el dels ancoratges s'equilibrin.

Amb la realització de les primeres simulacions, s'ha observat que la projecció de la força aerodinàmica passa quasi sempre per fora dels ancoratges, degut a la gran distància del CP a l'Ax o del gran valor de la Força z . D'aquesta forma, s'ha decidit simplificar el problema i considerar que sempre s'està a la situació 2.

Així, el segon moment *antitwist* que és té és el que apareix quan el *twist* és diferent de 0° i que és degut a les forces que fan les cordes sobre els ancoratges. Aquestes forces sobre els ancoratges son conseqüència de treure les cordes del seu pla d'equilibri, pla paral·lel al Y-Z, i de que les cordes han de suportar el pes de la cadira i el pilot. Aquestes forces i moments són com els que apareixen en un gronxador quan es fa un cert *twist*.

Tot seguit, es desenvolupa la determinació de l'expressió del moment *antitwist* en funció del pes que han de suportar les cordes i l'angle de *twist* (φ).

La Figura 31 és un esquema simplificat del sistema de cordes d'un parapent en la situació inicial d'equilibri. L'anell superior i els seus dos punts representen la part del parapent que es pot considerar fixa en cas d'haver un cert *twist*. L'anell inferior representa la cadira amb els dos ancoratges; sobre aquests dos punts que representen els ancoratges recau el pes de la cadira i el pilot.

A la Figura 32 es representen les principals dimensions en una vista frontal de l'esquema. Addicionalment, es representen les forces que actuen sobre un dels ancoratges a la situació inicial d'equilibri. S'ha suposat que el pes s'aplica sobre el pla de simetria de la cadira, pla X-Y, i que, per tant, el pes es distribueix per igual entre els dos ancoratges. Donada la simetria de l'esquema i de les forces, i amb la finalitat de simplificar les figures, totes les representacions de forces es realitzaran únicament sobre un dels ancoratges.

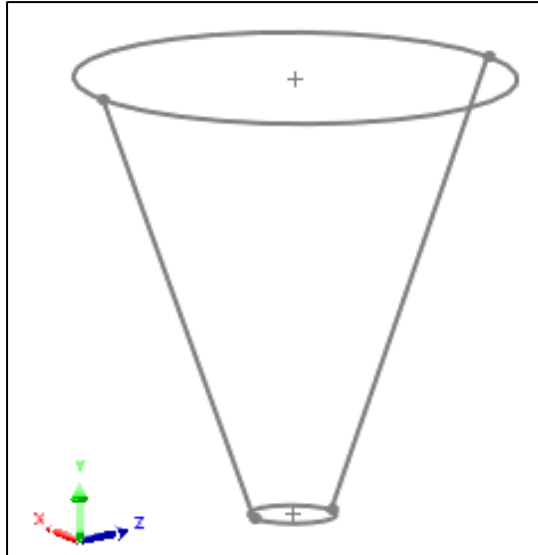


Figura 31 Esquematització del sistema de cordes d'un parapent.

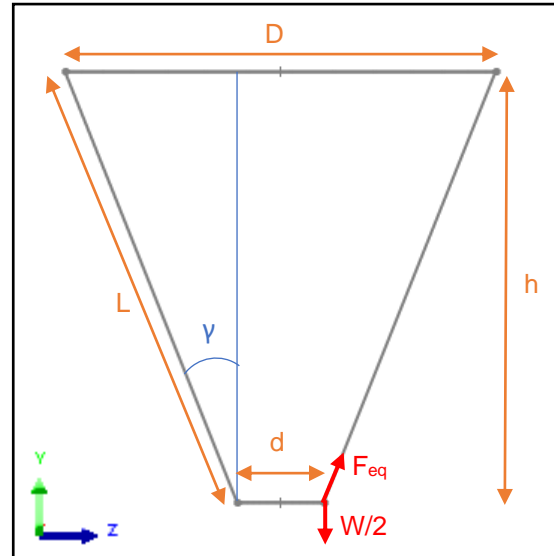


Figura 32 Dimensions de l'esquema i forces en la situació d'equilibri.

On:

- D = distància entre els punts superiors = 2 m
- d = distància entre ancoratges = 0,42 m
- L = longitud de la corda = 5 m
- h = distància vertical = 4,94 m (Equació 19)
- γ = angle entre la corda i la vertical = $9,1^\circ$ (Equació 18)
- W = pes de la cadira i el pilot = 1000 N
- F_{eq} = força que realitza una de les cordes a l'equilibri (Equació 20)

$$\frac{D}{2} - \frac{d}{2} = L \sin(\gamma) \quad (\text{Equació 18})$$

$$h = L \cdot \cos(\gamma) \quad (\text{Equació 19})$$

$$F_{eq} = \frac{W/2}{\cos(\gamma)} \quad (\text{Equació 20})$$

En cas de que es produeixi un cert *twist*, es pot suposar que la posició de l'ala roman constant. D'aquesta manera, en l'esquema de la Figura 31, els dos punts superiors quedarien fixes i els dos punts que representen els ancoratges rotarien respecte el centre de l'anell inferior. La nova posició de les cordes s'il·lustra a la Figura 33 en color blau. A la Figura 34 es representa l'angle de *twist* en una vista en planta.

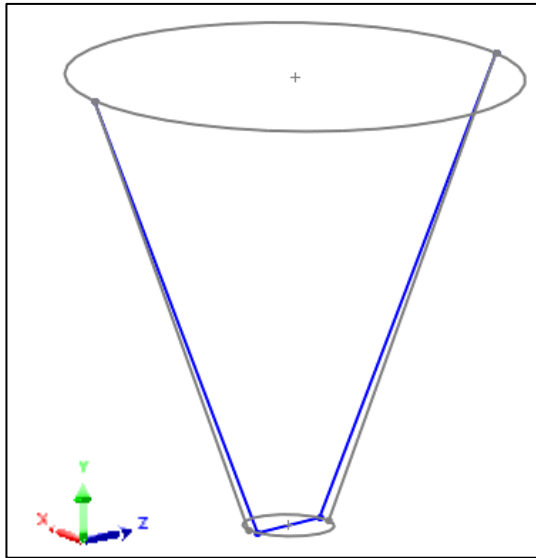


Figura 33 Esquematització del sistema de cordes d'un parapent en situació de twist.

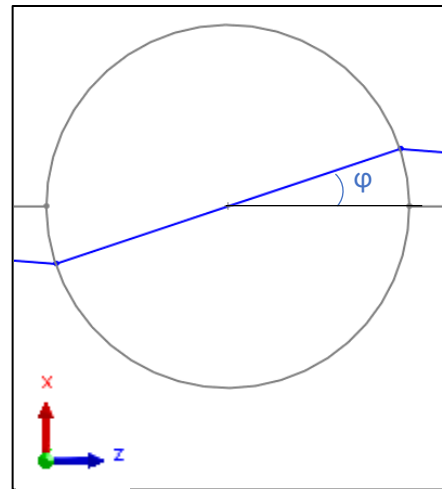


Figura 34 Angle de twist.

Per tal d'obtenir el moment *antitwist* que es genera amb un angle de *twist* de ϕ , s'ha de determinar la força tangencial a l'anell inferior que actua sobre l'ancoratge. Per obtenir-la, convé descompondre la força tridimensional que fa la corda en les seves tres components.

Primerament, s'obtidran les forces sobre el pla Y-Z. A la Figura 35 s'il·lustra en vermell les projeccions de la corda sobre el pla Y-Z i a la Figura 36 s'il·lustren les forces que actuen sobre un dels ancoratges en aquest mateix pla.

Donat que es vol estudiar el comportament per angles de *twist* petits, es pot suposar que l'angle γ es manté constant.

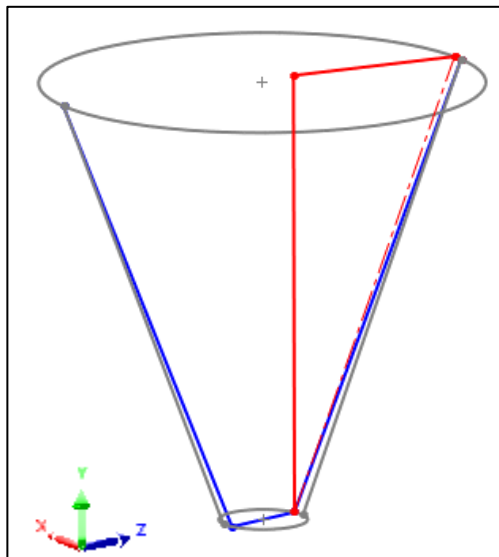


Figura 35 Projecció de la corda sobre el pla Y-Z en situació de twist.

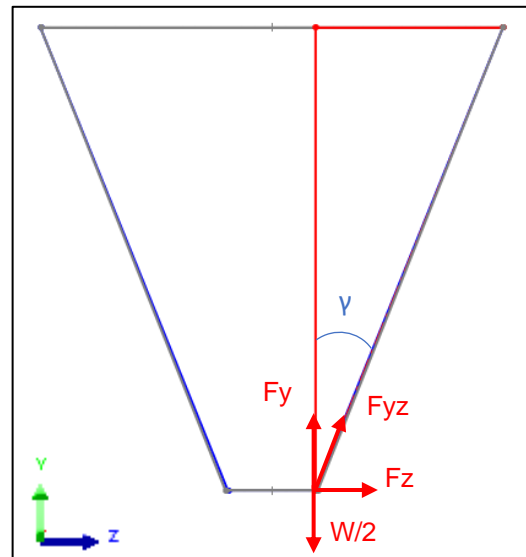


Figura 36 Forces en el pla Y-Z que actuen sobre un dels ancoratges.

On:
$$F_y = \frac{W}{2} \quad (\text{Equació 21})$$

$$F_{yz} = \frac{W/2}{\cos(\gamma)} \quad (\text{Equació 22})$$

$$F_z = \frac{W}{2} \cdot \tan(\gamma) \quad (\text{Equació 23})$$

A diferència de la situació d'equilibri inicial, en la situació amb *twist* apareix una força en l'eix z. A la Figura 37 es representen les projeccions de les forces restants en una vista en planta.

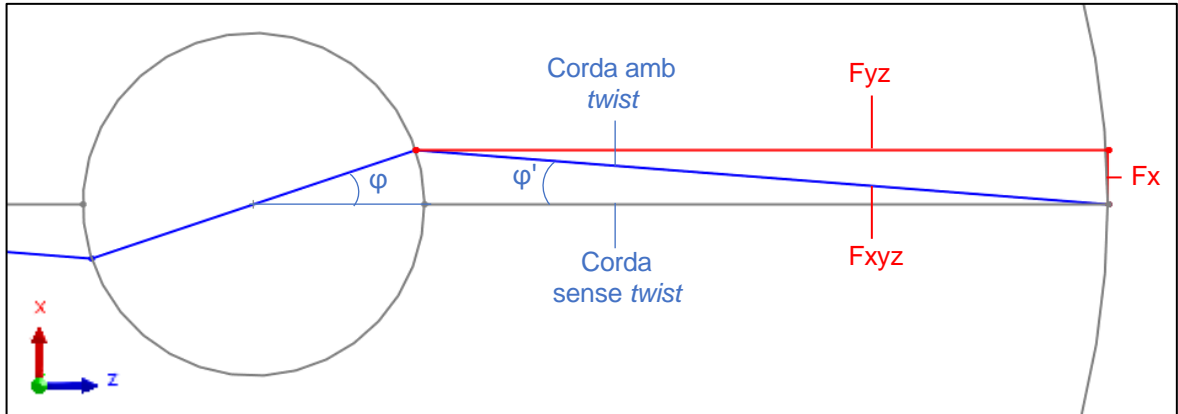


Figura 37 Vista en planta de la situació amb twist.

On:
$$F_{xyz} = \frac{F_{yz}}{\cos(\gamma')} \quad (\text{Equació 24})$$

$$F_x = F_{yz} \cdot \tan(\gamma') \quad (\text{Equació 25})$$

Per calcular el nou angle que apareix, φ' , es té:

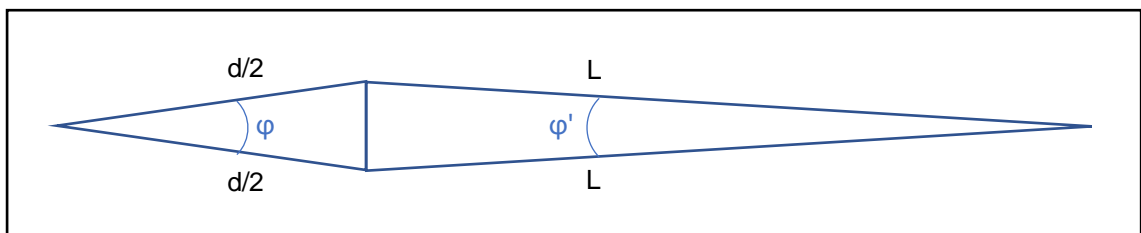


Figura 38 Relació entre l'angle de twist i l'angle de la corda.

D'on es dedueix:

$$\frac{d}{2} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right) = L \cdot \sin\left(\frac{\varphi'}{2}\right) \quad (\text{Equació 26})$$

$$\varphi' = 2 \cdot \text{asin}\left(\frac{d}{2 \cdot L} \cdot \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)\right) \quad (\text{Equació 27})$$

Finalment, per obtenir la força tangencial a l'anell inferior es té:

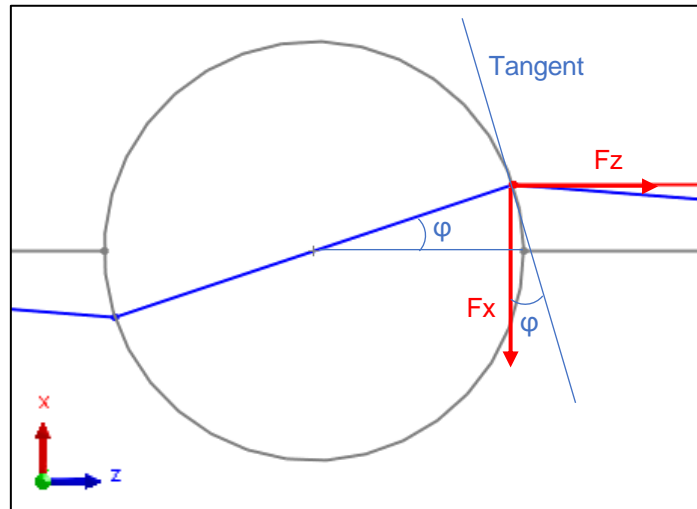


Figura 39 Forces sobre l'ancoratge que fan moment antitwist.

On:

$$F_{tangencial} = F_x \cos(\varphi) + F_z \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{Equació 28})$$

$$M_{antitwist} = -2 \cdot \frac{d}{2} \cdot F_{tangencial} \quad (\text{Equació 29})$$

Un cop obtinguda l'expressió de les forces (Equació 21,22, 23, i 25), l'expressió de l'angle de la corda (Equació 26 i 27), l'expressió del moment *antitwist* (Equació 28 i 29) i fixades les dimensions de les cordes del parapent, es pot determinar el moment que apareix per diferents valors d'angle de *twist*. A la Figura 40 es mostra el gràfic amb els valors obtinguts.

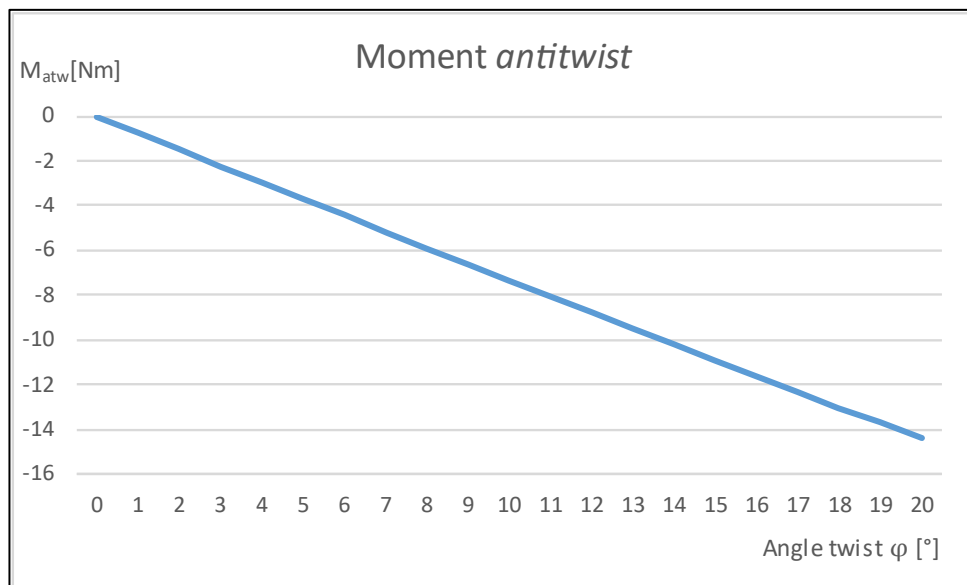


Figura 40 Moment antitwist en funció de l'angle de twist.

Aquest moment, per definició, és un moment estabilitzador, ja que només apareix quan hi ha un cert angle de twist i tendeix a disminuir-lo. En cas de no haver l'acció de cap altre moment, fa tendir la cadira a l'únic punt d'equilibri que és *twist* de 0° . Aquest moment també compleix la condició matemàtica necessària per ser considerat estable, que la seva derivada respecte l'angle sigui negativa.

Aquest moment *antitwist* que generen les cordes, igual que el del pilot, afecta a totes les geometries d'aquest treball per igual. Però, aquest moment es inherent a la cadira i apareix sempre que hi ha un cert twist. D'aquesta forma, la comparació del comportament aerodinàmic de les diferents geometries es realitzarà sense tenir aquest moment en compte i s'utilitzarà per veure el comportament real de les cadires, és a dir, el *twist* d'equilibri que assolixen les diferents geometries en funció dels diferents angles de vent lateral.

8. Simulacions inicials

8.1. Aerodinàmica

Primerament, es simulen diverses geometries amb l'objectiu de constatar les millores en aerodinàmica introduïdes pels avenços en el disseny de cadires i per orientar el disseny de les geometries per les simulacions paramètriques. Aquestes simulacions es realitzen amb flux frontal i les geometries seran: una cadira sense cua (C0), una amb cua i sense cobriment de la part posterior del cap (C1), una amb cua i cobriment parcial (C2), i una amb cua i cobriment total (C3). Les geometries d'aquestes quatre cadires es mostren a la Figura 41.

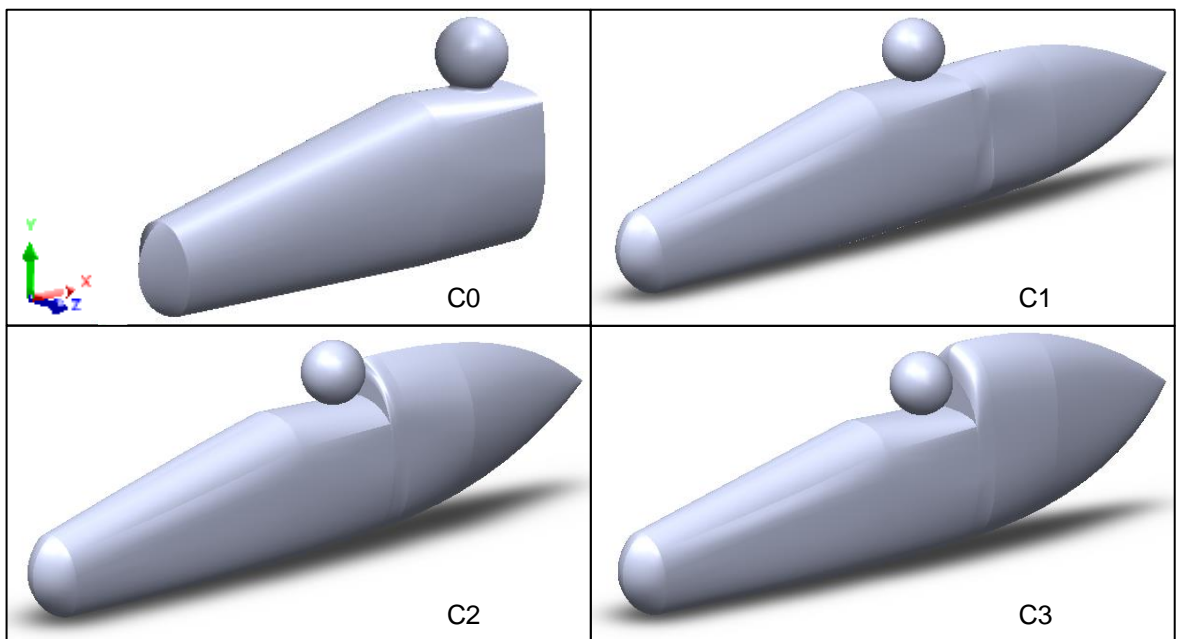


Figura 41 Geometries C0-C1-C2-C3 simulades inicialment per veure el comportament aerodinàmic.

Els resultats aerodinàmics de les simulacions es mostren a la Figura 42:

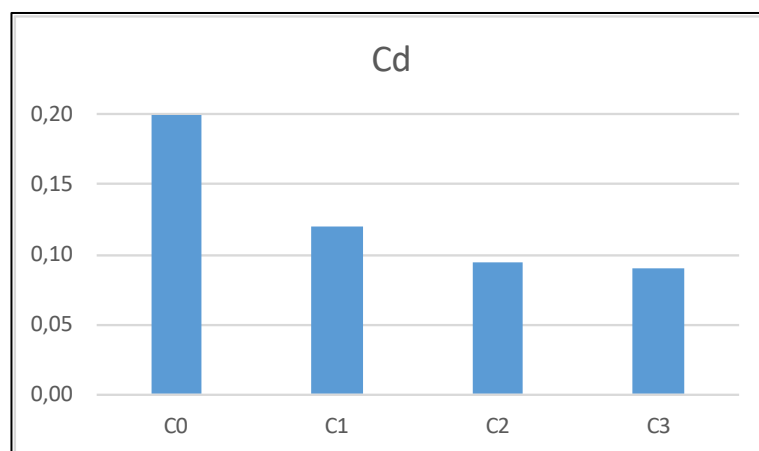


Figura 42 Coeficients de drag de les quatre geometries per la situació de flux frontal.

D'acord amb els coeficients aerodinàmics obtinguts, es pot confirmar que afegir una cua a la cadira del parapent aporta millores significatives en l'aerodinàmica de la mateixa. Addicionalment, també s'observa que cobrir la part posterior del cap aporta una altra millora; sent la geometria C3, que té un cobriment total de la part posterior del cap, la més aerodinàmica.

D'aquesta forma, els dissenys de les simulacions paramètriques inclouran tots una cua amb cobriment total de la part posterior del cap.

8.2. Estabilitat lateral

Per tal de comprendre el comportament d'una cadira de parapent i les diferències entre una cadira amb cua i una sense cua, s'han simulat dues geometries d'aquestes característiques sota diversos angles de vent lateral. La geometria sense cua, C0, és la de la Figura 14 i la geometria amb cua, C3, té una cua d'1 m que cobreix la part posterior del cap. Les dues geometries en qüestió es mostren a la Figura 43:

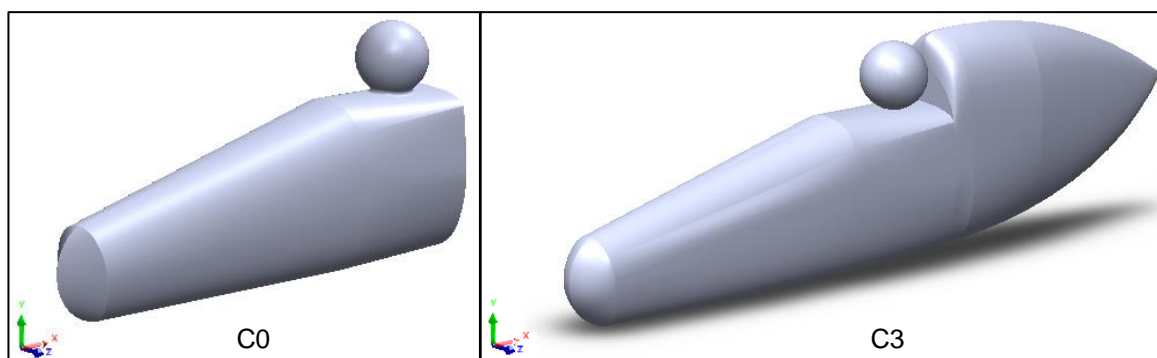


Figura 43 Geometries C0 i C3 simulades.

Un cop simulades totes les configuracions, es mostren els resultats de les principals variables d'interès.

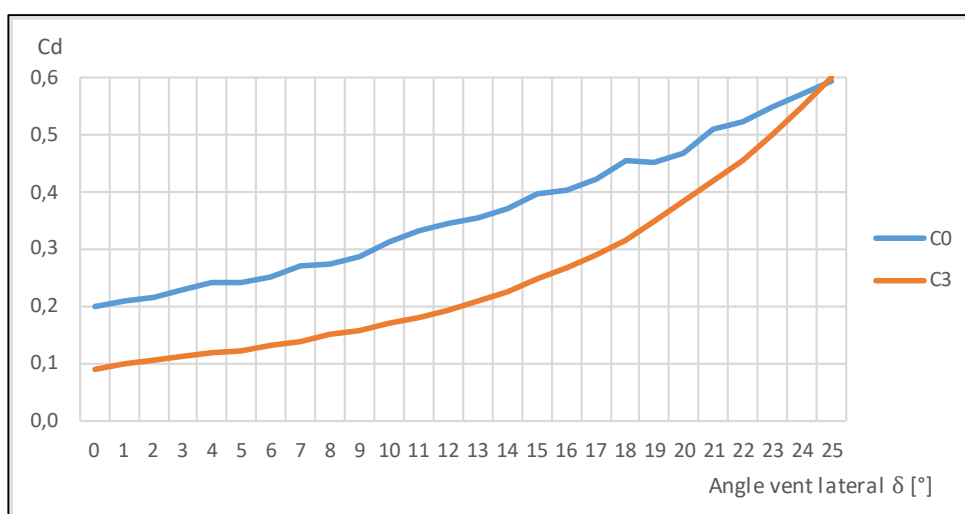


Figura 44 Representació del coeficient de drag per les dues geometries i diferents angles de vent lateral.

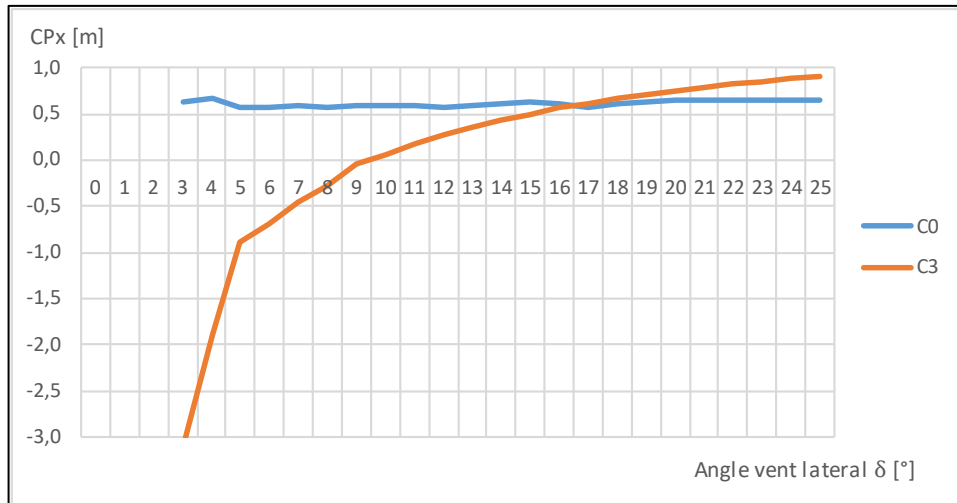


Figura 45 Evolució de la component en x del Centre de Pressions per les dues geometries i diferents angles de vent lateral .

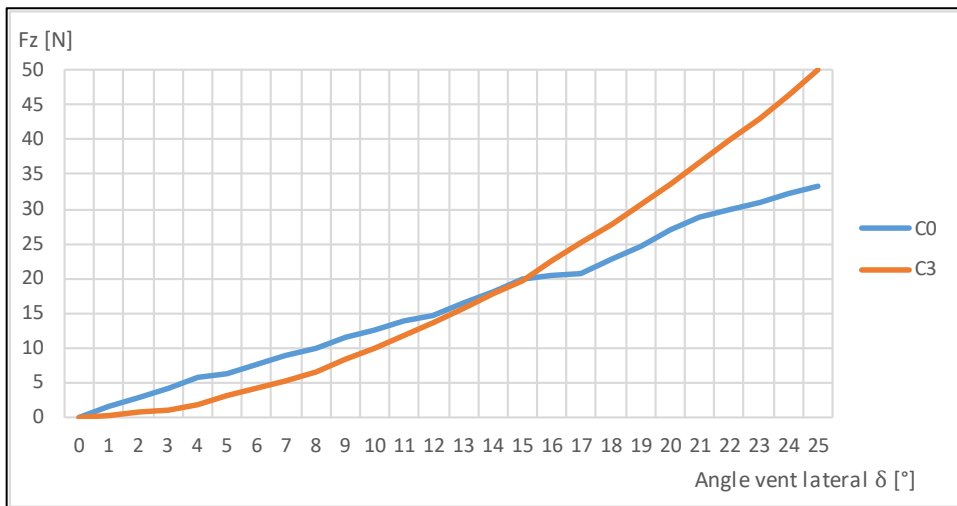


Figura 46 Evolució de la Força aerodinàmica en l'eix z sobre la cadira per les dues geometries i diferents angles de vent lateral.

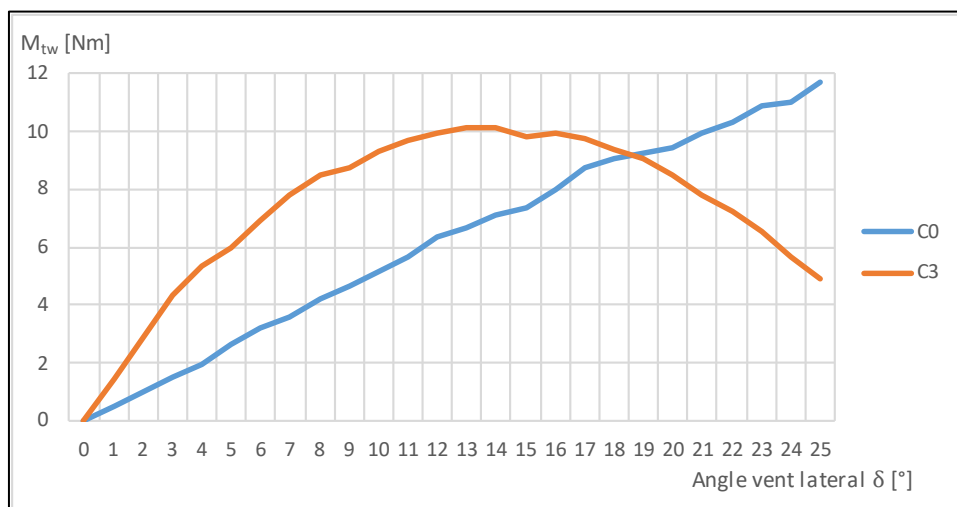


Figura 47 Evolució del moment de twist sobre els ancoratges per les dues geometries i diferents angles de vent lateral.

En una primera anàlisi dels resultats, a la Figura 44 s'observa que la resistència aerodinàmica de la geometria C3 és significativament més petita a l'inici. Però, a partir d'un angle de 12-15° de vent lateral, la resistència aerodinàmica de la geometria C3 augmenta en una major proporció; arribant a igualar-se per a un angle de 25°. Això és degut a que a mesura que augmenta l'angle d'incidència del vent, la superfície perpendicular al vent de la cadira C3 augmenta amb major velocitat que la de la cadira C0, al tenir la cadira C3 la cua. Això fa que la cadira C3 oposi cada cop més resistència i arribi un moment en que la cadira C0 és més aerodinàmica.

Observant el gràfic de l'evolució de la component x del centre de pressions, Figura 45, es veu una clara diferència entre les dues geometries. La cadira C0 presenta una CP_x pràcticament constant mentre que la cadira C3 comença amb valors negatius i a mesura que l'angle del vent augmenta el CP_x es va desplaçant enrere, cap els ancoratges; punt respecte el qual s'aplica el moment.

El gràfic de la Força en l'eix z , Figura 46, mostra una tendència similar al gràfic del coeficient aerodinàmic, produint-se el punt de tall entre les corbes de les dues cadires a uns 15°.

Finalment, es té el gràfic més important, el gràfic del moment en l'eix vertical, Figura 47, que il·lustra la tendència de la cadira a entrar en *twist*. S'observa que, al ser el CP_x de la cadira C0 pràcticament constant i la Força en z monòtonament creixent, el moment de *twist* també és monòtonament creixent. El moment de *twist* a la cadira C3, però, augmenta mentre el creixement de la Força en z és proporcionalment major a la disminució del terme $(Ax-CP_x)$, i disminueix quan el terme $(Ax-CP_x)$ disminueix amb major proporció; apropant-se a 0 a mesura que el CP_x s'apropa a la posició dels ancoratges.

Dos aspectes importants es deriven d'aquest gràfic. El primer és que la tendència a *twist* de la cadira C0 per a angles d'incidència del vent petits és inferior a la de la cadira C3. Conseqüència del ràpid augment del moment de *twist* de la cadira C3 produït pels valors negatius inicials de CP_x . Així, per tenir una cadira amb cua i menor tendència a *twist*, tant a angles petits com a angles grans, s'hauria d'aconseguir que tots els valors de moment fins el màxim de la corba siguin més petits que els respectius moments de la cadira C0 en aquells angles d'incidència del vent. El segon que és deriva, és que efectivament és de vital importància l'evolució del CP_x de la cadira. Si s'aconsegueix que el CP_x d'una cadira amb cua evolucioni ràpidament cap a la posició dels ancoratges, el màxim de la corba de moment coincidirà amb un CP_x proper a la posició dels ancoratges i, per tant, el valor d'aquest serà petit. D'altra banda, si s'aconsegueix que el CP_x passi la posició dels ancoratges, el moment aerodinàmic serà negatiu.

D'aquesta manera, aprofitant la tendència que introdueix la presència de la cua, s'exploraran dissenys amb una longitud de cua i àrea lateral majors per forçar el ràpid desplaçament del CP_x cap a la posició dels ancoratges.

9. Simulacions paramètriques

Amb l'objectiu d'acabar d'entendre el fenomen de la inestabilitat lateral d'una cadira de parapent i obtenir una geometria amb una bona estabilitat lateral i aerodinàmica, es duu a terme un seguit de simulacions amb diverses geometries i diversos angles de vent. El disseny de les geometries d'aquestes simulacions, que ha tingut en compte tota la informació extreta de les simulacions inicials, s'ha realitzant en base als següents principis:

- Totes les geometries es realitzen amb cobriment de la part posterior del cap, ja que millora l'aerodinàmica per la situació de flux frontal.
- La forma del perfil de la cua en una vista en planta no s'ha considerat una variable a estudiar, ja que, vistes diverses simulacions on es varia aquest perfil, no s'han observat millores significatives respecte a reduir suaument la secció transversal de la cua amb un perfil en planta format per un spline.
- Per tal d'aprofundir en els efectes de la cua, s'han obtingut diferents geometries modificant dos variables que determinen la seva forma:
 - o Longitud de la cua: s'han utilitzat tres valors d'aquesta magnitud

L1 = 1 m	L2 = 1,25 m	L3 = 1,55 m
----------	-------------	-------------

- o Altura final de la cua: s'han utilitzat dos valors d'aquesta magnitud

A1 = 300 mm	A2 = 600 mm
-------------	-------------

D'aquesta forma, s'obtenen sis geometries a simular que es mostren a la Figura 48:

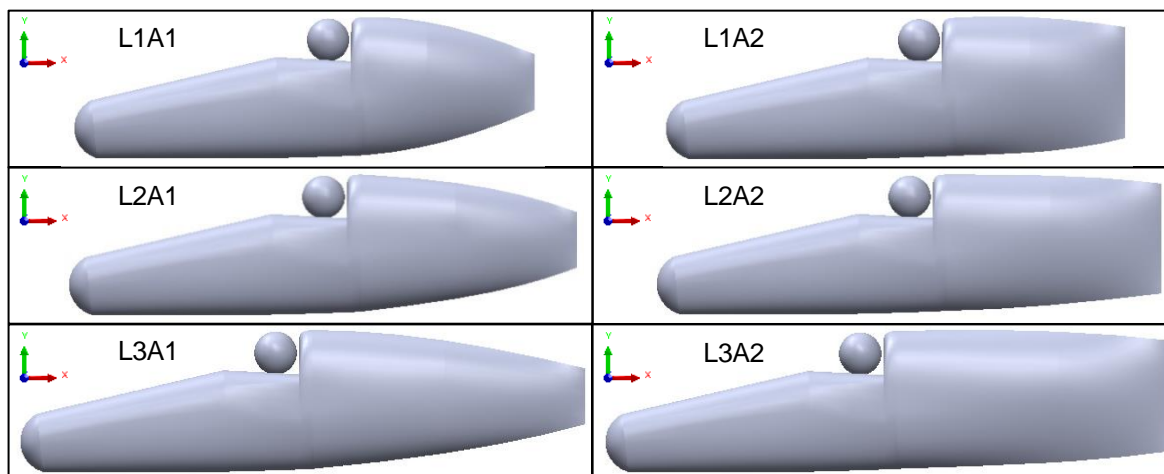


Figura 48 Geometries de les simulacions paramètriques.

Tot seguit, es mostren els resultats de les principals variables d'interès.

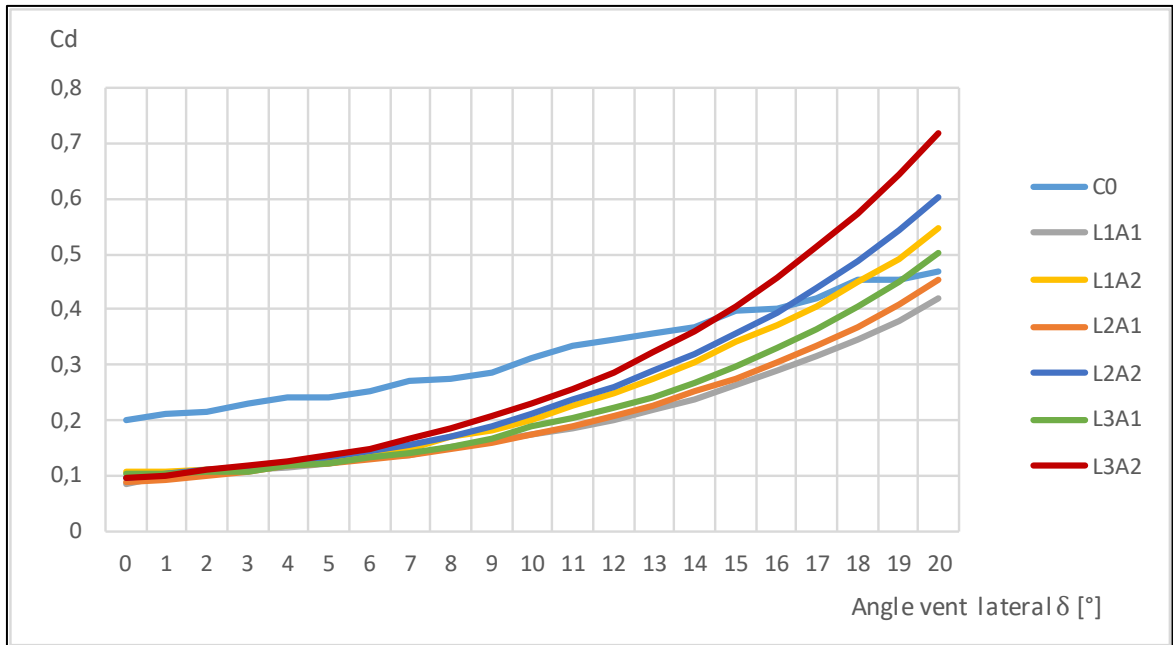


Figura 49 Evolució del coeficient de drag de les diferents geometries en funció dels diferents angles de vent lateral.

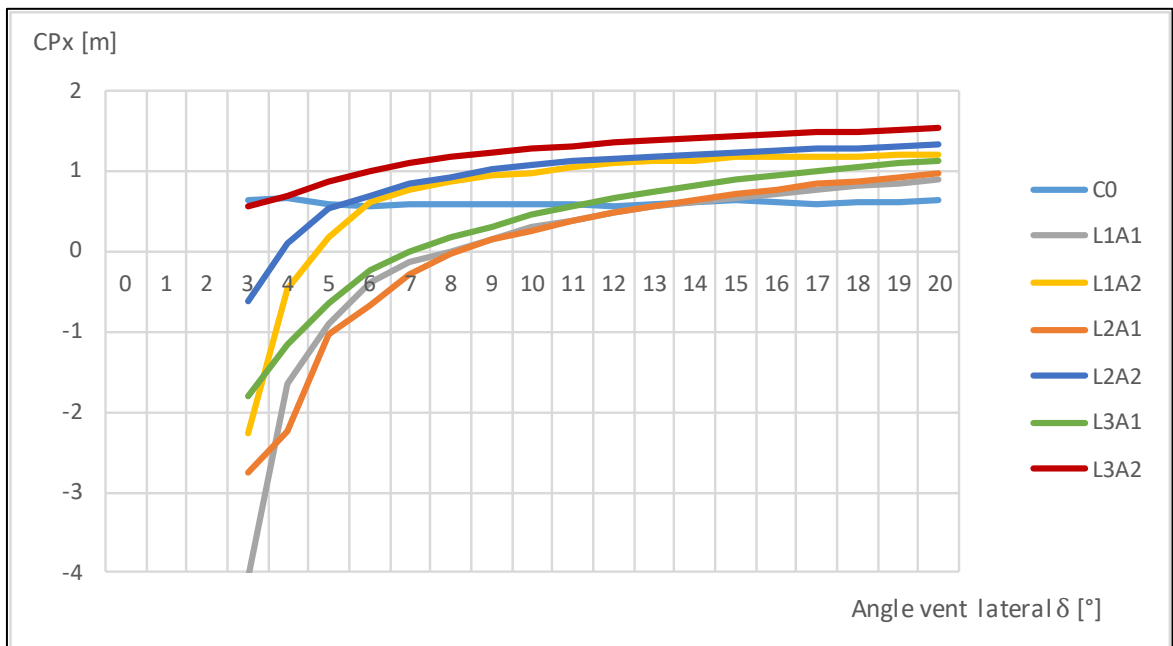


Figura 50 Evolució de la component en x del Centre de Pressions de les diferents geometries en funció dels diferents angles de vent lateral.

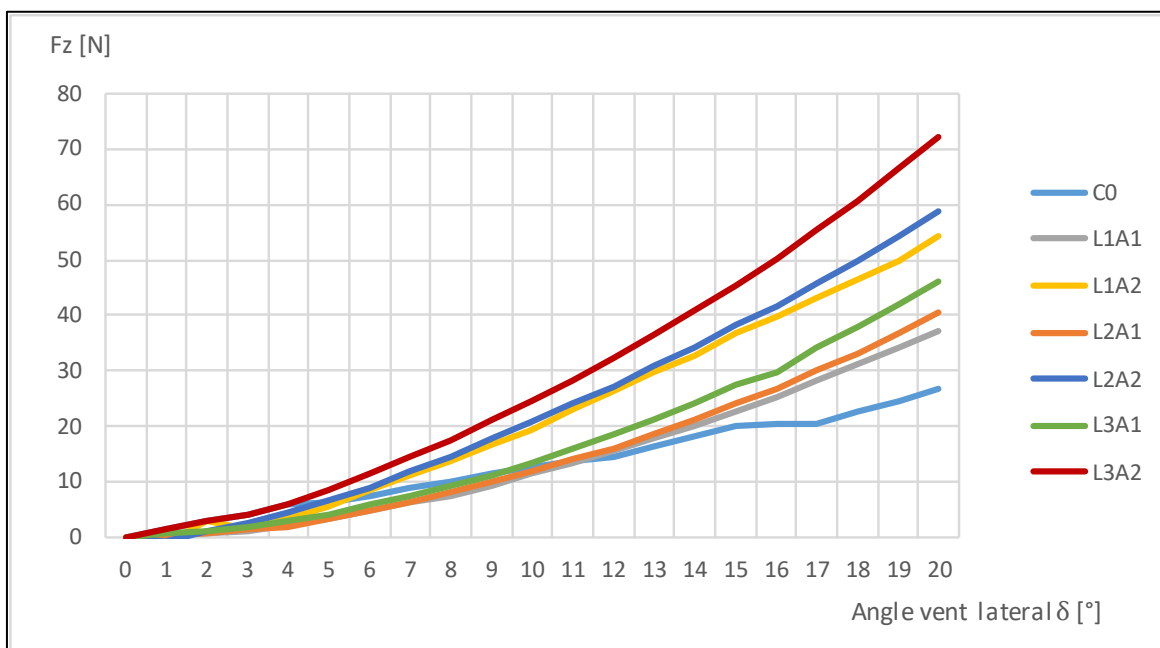


Figura 51 Evolució de la Força en z de les diferents geometries en funció dels diferents angles de vent lateral.

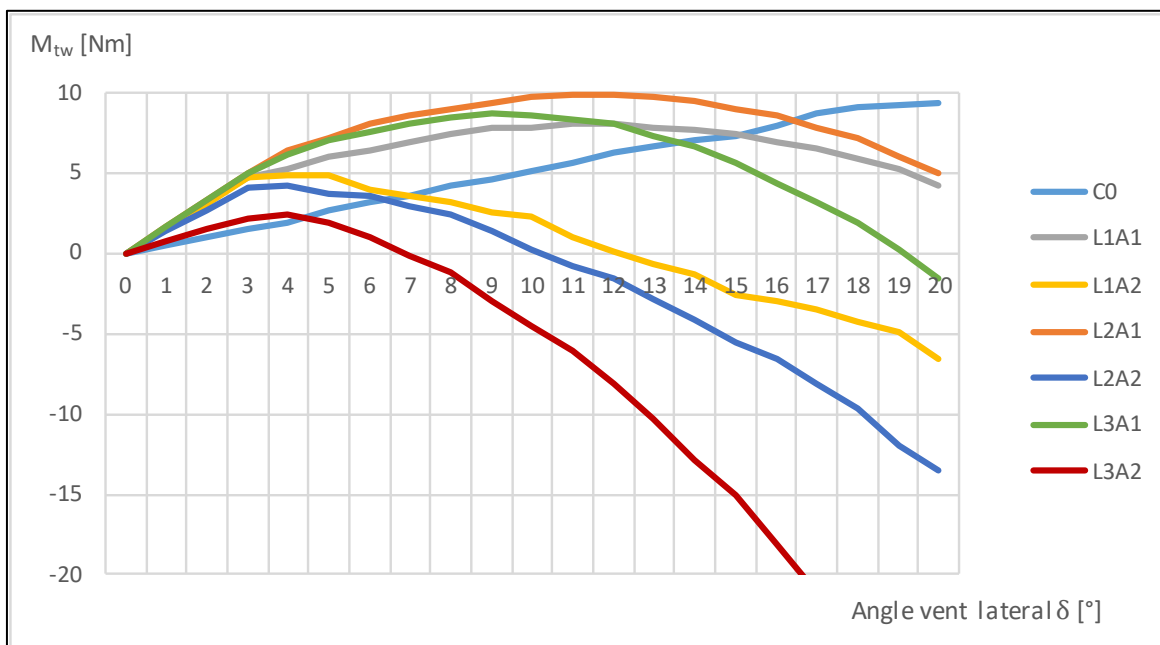


Figura 52 Evolució del moment de twist de les diferents geometries en funció dels diferents angles de vent lateral.

El primer que es vol aclarir dels gràfics anteriors és que els valors que s'obtenen de CPx per a totes les geometries en el rang 0-2° són incongruents, ja que les forces que determinen la seva posició són molt petites i petits errors en la seva determinació donen lloc a errors significatius; per aquest motiu s'ha optat per no representar-los. Aquesta incongruència fa que per aquest mateix rang el M_{tw} no es pugui calcular. Però, es sap que la Fz per un angle de 0°, flux frontal, és de 0 N, ja que per simetria les pressions a banda i banda es compensen, i que per tant el M_{tw} per un angle de 0° també és zero. Així, per afavorir la interpretació del gràfic, s'ha optat per interpolar els valors de M_{tw} pels angles de 1 i 2°.

A la Figura 49 es manté la tendència observada a l'apartat anterior en els coeficients de drag. Per la situació de flux frontal i respecte la cadira sense cua, la presència de cua a la cadira millora entre un 45 i un 55% el coeficient de drag. Sent les geometries més aerodinàmiques la L1A1, L2A1 i L3A2, en aquest ordre. També s'observa com, a mesura que augmenta l'angle d'incidència del vent, el coeficient de drag de les geometries amb cua augmenta amb una major proporció que el de la geometria sense cua; passant a ser major el coeficient de drag de les cadires amb cua a partir de 15-25°. Dintre de les cadires amb cua, les que tenen un augment major del coeficient de drag són les A2, les que tenen una altura de final de cua major. Això es degut, novament, a que aquestes cadires, a mesura que augmenta l'angle d'incidència del vent, tenen una major superfície que s'oposa al seu pas i, per tant, més resistència.

Centrant-se en la Figura 50, s'observa com a mesura que l'angle d'incidència del vent augmenta, totes les geometries tenen un augment en el valor del seu CPx. Per un mateix valor d'angle d'incidència del vent, les geometries A2 tenen un CPx més gran que les respectives geometries A1. Això, ja no es degut únicament a la presència d'una major superfície que s'oposa al pas de l'aire, sinó a la localització d'aquesta major superfície. Les geometries A2 tenen una gran àrea lateral a la part posterior de la cadira i les pressions que actuen sobre aquesta àrea tenen un gran impacte en la determinació del CPx.

El CPx es determina com la component en x on ha d'estar situada la força resultant per tal de que tingui el mateix efecte que la suma dels efectes de les diferents pressions; sent el moment generat per les forces aerodinàmiques en el CP zero per definició. D'aquesta forma, les pressions que actuen en els extrems de la geometria ponderen més que les que actuen en la part central de la geometria. Així, les geometries A2 estan introduint una àrea el més enrederida possible que aconsegueix desplaçar el CPx cap a ella, és a dir, aconsegueixen augmentar el valor del CPx.

Es per aquest motiu que l'augment de CPx introduït per l'augment de l'altura de final de cua és molt més elevat que l'augment introduït pel fet d'augmentar la longitud de cua. A la Figura 50 també s'observa com la corba de les geometries amb cua tendeix cap a un cert valor de CPx i com les geometries A2 hi tendeixen més ràpid.

A la Figura 51, novament, es pot observar la mateixa tendència que en el gràfic del coeficient de drag. Les geometries amb cua tenen un augment de la Força en z major que la geometria sense cua; i d'entre les geometries amb cua, les geometries A2 són les que tenen un augment més elevat.

Finalment, a la Figura 52 es pot veure l'evolució de la variable que determina la tendència de *twist*, el moment aerodinàmic sobre la cadira. El primer que s'extreu d'aquest gràfic, i de l'expressió del M_{tw} , és que totes les geometries amb cua simulades tenen una primera etapa en que el M_{tw} augmenta, des de zero fins un valor màxim; una segona etapa en que el M_{tw} es positiu i disminueix fins a zero; i una tercera etapa en que M_{tw} és negatiu, per la geometria L1A1 i L2A1 aquesta etapa comença al voltant dels 24°. La primera etapa es correspon amb el rang d'angles en que Fz augmenta amb major proporció que la disminució del terme (Ax-CPx). La segona etapa correspon al rang d'angles en que CPx < Ax i el terme (Ax-CPx) disminueix amb una major proporció que l'augment de Fz. La tercera etapa correspon al rang d'angles en que CPx > Ax.

Aquestes observacions tenen diverses conseqüències directes. La primera d'elles és que el comportament del moment aerodinàmic de totes les cadires simulades és inestable per angles petits d'incidència del vent. La primera etapa de les corbes de moment de *twist* té una pendent positiva, complint amb la condició matemàtica d'inestabilitat i, per tant, la geometria s'allunya del punt d'equilibri $\delta = 0^\circ$ quan hi ha una pertorbació.

La segona d'elles és que l'etapa dos i tres de les corbes de moment té un comportament estable; ja que la pendent és negativa. Això es tradueix en que quan s'està al segon punt d'equilibri (punt de tall de la corba de moment amb l'eix x per $\delta \neq 0^\circ$) i hi ha una pertorbació, la tendència és retornar a ell.

D'aquesta forma, el primer punt d'equilibri ($\delta = 0^\circ$, comú per totes les geometries) és inestable i quan estant en ell hi ha una pertorbació, es tendeix al segon punt d'equilibri; que és un punt d'equilibri estable. A efectes de σ i φ , i suposant que només actua el moment aerodinàmic, quan s'estudia l'evolució del sistema sota unes condicions inicials determinades l'angle que variarà serà φ , ja que σ depèn del vent i no varia amb el moviment de la cadira.

Així, partint de la situació inicial en que ambdós són zero, o la suma dels dos és zero, quan hi ha una variació en l'angle absolut del vent σ o una pertorbació en l'angle de *twist* φ , φ augmenta o disminueix fins que la suma dels dos angle és igual al segon punt d'equilibri; φ ajusta el seu valor fins que el moment aerodinàmic sobre la cadira és zero. D'aquest comportament es dedueix que el φ d'equilibri dependrà únicament de la geometria de la cadira i de l'angle absolut del vent, d'acord amb l'Equació 30:

$$\varphi_{eq} = \delta_{eq_estable} - \sigma \quad (\text{Equació 30})$$

Totes aquestes deduccions i dinàmica de moviment, però, són per una situació en que sobre la cadira només actua el moment aerodinàmic; en que no actua cap tipus de moment *antitwist*. Aquesta situació seria equivalent a que la cadira estigues penjada d'un únic fil i aquest no fes cap moment quan la cadira entrés en *twist*.

Donat que la situació real no és aquesta, sinó que les cordes fan un moment *antitwist*, en el següent apartat s'estudia el comportament de les diverses geometries sota l'acció conjunta dels dos moments.

Adicionalment, també es vol observar com afecta la variació de la velocitat de l'aire incident a la magnitud dels moments. Així, es determinen les corbes de moment aerodinàmic per les cadires L3A1 i L3A2, i unes velocitats de 5 i 10 m/s. Els resultats es mostren a la Figura 53:

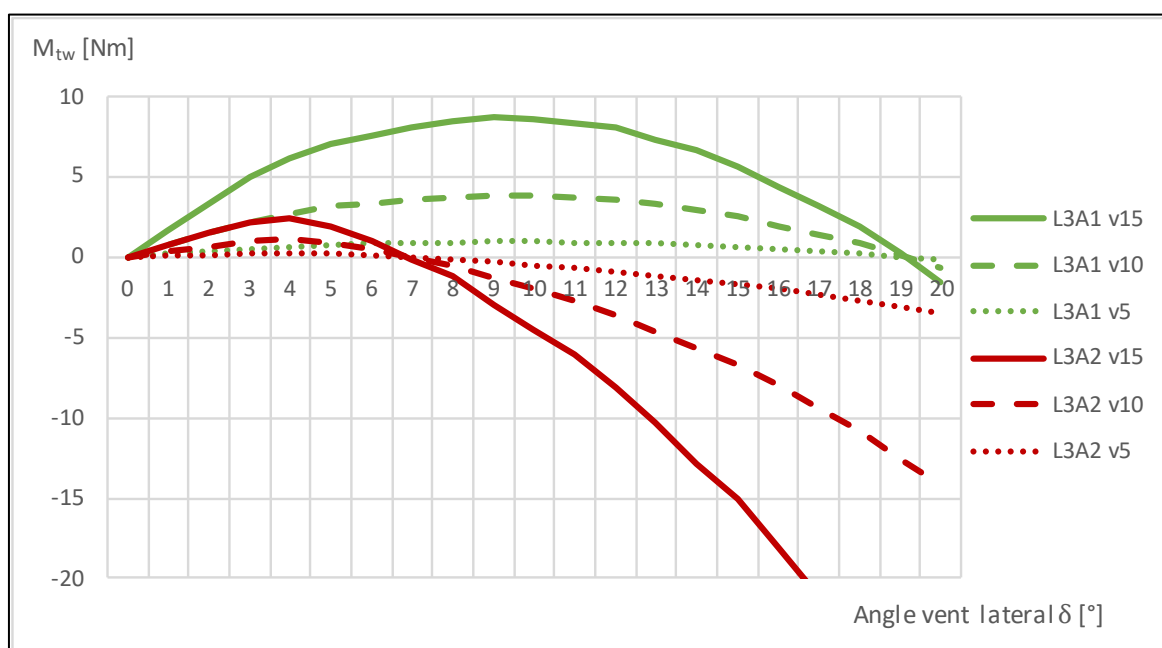


Figura 53 Evolució del moment de twist per les geometries L3A1 i L3A2 en funció de diferents velocitats de vent i angles de vent lateral.

D'acord amb els resultats, es confirma que el valor dels moments i la tendència a *twist* augmenta ràpidament amb la velocitat, com es deia a l'inici del treball. La magnitud dels moments depèn del quadrat de la velocitat i en disminuir la velocitat un 33%, el valor del moment disminueix un 56%. Tot i la disminució dels valors, la forma del gràfic continua sent la mateixa, obtenint-se així els mateixos punts d'equilibri si es considera únicament el moment aerodinàmic. En el següent apartat, també es determinarà com afecta la velocitat a l'acció conjunta del moment aerodinàmic i el moment *antitwist* de les cordes.

10. Dinàmica de moviment quasi-estàtic

Com s'ha comentat als apartats anteriors, sobre la cadira de parapent actuen dos moments: el moment aerodinàmic originat quan l'angle relatiu entre vent i cadira és diferent de zero i el moment originat per les cordes sobre els ancoratges quan es produeix un cert *twist*.

Aquest dos moment, però, són funció de dos angles diferents. El primer moment és funció de l'angle d'incidència del vent δ i d'actuar sol, faria tendir la cadira al punt d'equilibri estable propi de cada geometria. El segon moment és funció de l'angle de *twist* φ i d'actuar sol, faria tendir la cadira a un *twist* de zero.

Com el fenomen d'instabilitat lateral fa referència a l'aparició d'un cert angle de *twist* en aparèixer un cert vent lateral, en tenir un angle σ diferent de zero, s'ha d'estudiar com afecta la variació de l'angle d'incidència del vent σ al *twist* de la cadira; fet que passa per estudiar l'acció conjunta del moment aerodinàmic i del moment *antitwist* que fan les cordes.

Partint de la situació inicial i d'equilibri en que el *twist* i l'angle d'incidència del vent σ són zero, l'aparició d'un moment aerodinàmic positiu farà aparèixer un cert angle de *twist*. Aquesta aparició de *twist* farà aparèixer un moment *antitwist* negatiu als ancoratges que farà variar el *twist* fins arribar a un nou equilibri en que moment aerodinàmic i *antitwist* siguin iguals i de signe contrari. En cas d'estar a una situació d'equilibri de zero *twist* i que una pertorbació en l'angle d'incidència del vent produís un moment aerodinàmic negatiu, es produiria un angle de *twist* negatiu que, alhora, faria aparèixer un moment *antitwist* positiu. L'angle de *twist* augmentaria fins que, novament, moment aerodinàmic i *antitwist* fossin iguals i de signe contrari.

Així, s'observa que per cada angle d'incidència del vent σ es trobarà un nou *twist* d'equilibri en que moment aerodinàmic i moment *antitwist* s'igualin. Aquest nou comportament implica que la suma del *twist* d'equilibri i de l'angle d'incidència del vent σ , per cada angle d'incidència del vent σ , no es manté constant. És a dir, l'angle relatiu d'equilibri entre vent i cadira δ és diferent per a cada angle absolut del vent σ ; a diferència del que passava en el cas de només considerar el moment aerodinàmic, en que la suma del *twist* d'equilibri i de l'angle d'incidència del vent σ sempre era constant i igual al punt d'equilibri estable de cada geometria $\delta_{eq_estable}$.

D'aquesta forma, per tal de veure la dinàmica de moviment real de cada geometria, és a dir, com evoluciona el *twist* d'equilibri per cada geometria en funció de l'angle d'incidència del vent σ , es resol l'equació 31 per a cada angle d'incidència del vent σ i geometria. Els resultats es mostren a continuació.

$$M_{tw}(\sigma, \varphi) + M_{atw}(\varphi) = 0 \quad (\text{Equació 31})$$

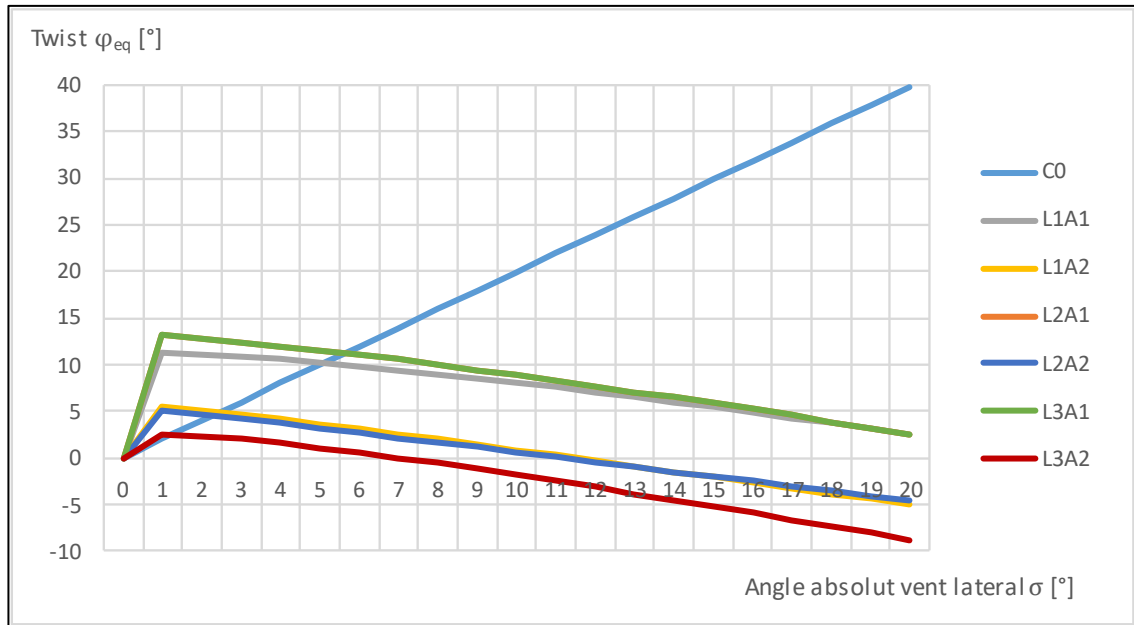
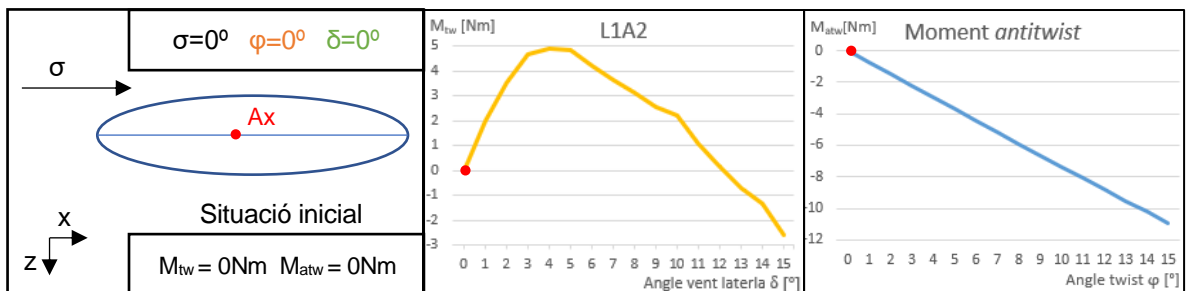


Figura 54 Twist d'equilibri per les diverses geometries i angles d'incidència del vent a 15m/s.

D'acord amb els raonaments anteriors i els resultats de la Figura 54, es pot concloure que el sistema format per la cadira, els ancoratges i les cordes, i sotmès a les forces aerodinàmiques és un sistema no lineal estable des del punt de vista del *twist* i marginalment estable des del punt de vista de l'angle d'incidència del vent σ . L'única excepció al comportament estable des del punt de vista del *twist* és la situació d'equilibri de σ i ϕ igual a zero, en que una pertorbació de ϕ faria tendir la cadira a un ϕ diferent de zero; sent, per tant, un punt d'equilibri inestable.

Partint d'un angle d'incidència del vent σ determinat i el corresponent *twist* d'equilibri, si només hi ha una pertorbació en el *twist*, aquest tornarà al *twist* d'equilibri (estable); i si només hi ha una pertorbació en l'angle d'incidència del vent, aquest trobarà un nou *twist* d'equilibri (marginalment estable).

Per acabar d'explicar el comportament del sistema cadira en una anàlisi quasi-estàtica, a la Figura 55 s'il·lustra l'evolució, pas a pas, de la cadira L1A2 des de la situació inicial de σ i ϕ igual a zero fins l'equilibri, quan amb una velocitat del vent de 15m/s apareix una pertorbació en l'angle de vent lateral de σ igual a 4°.



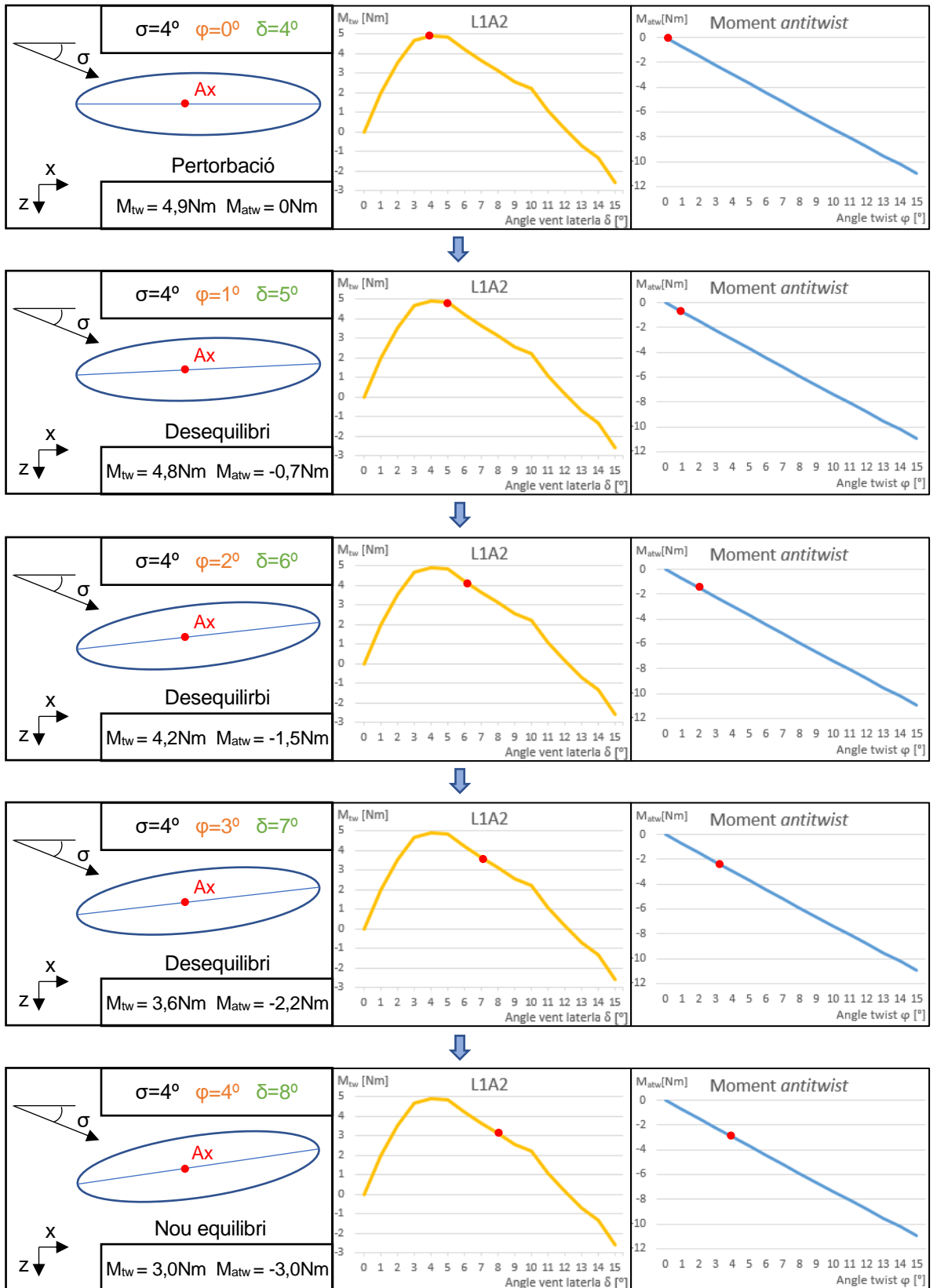


Figura 55 Evolució de la cadira L1A2 fins al nou equilibri davant un valor de σ de 4° .

Finalment, per veure com afecta la variació de la velocitat del vent incident a la dinàmica de moviment, es determina els diferents *twist* d'equilibri per a les cadires L3A1 i L3A2, i per velocitats del vent de 5, 10 i 15 m/s. Els resultats es mostren a la Figura 56.

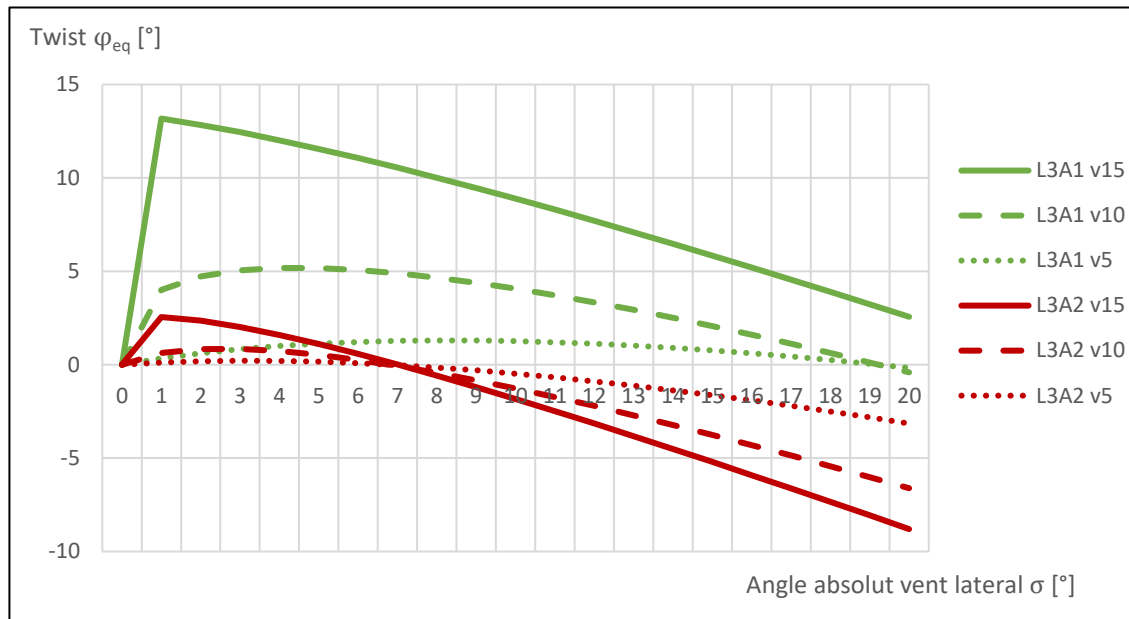


Figura 56 Evolució del twist d'equilibri per les geometries L3A1 i L3A2 en funció de diferents velocitats de vent i angles absoluts de vent lateral.

Amb aquest gràfic, s'acaben de confirmar les indicacions sobre la situació actual del parapent. L'augment de la velocitat, produïda pels augments en aerodinàmica dels darrers anys, produeixen un ràpid augment de la tendència a *twist* i de la magnitud del *twist* d'equilibri. Aquest augment de la tendència a *twist*, és més acusat en cadires que tenen una altura de final de cua petita. Tanmateix, la variació de la velocitat no fa variar la forma del gràfic.

11. Pressupost

A continuació, s'estimen els costos de la realització del present projecte. Aquests costos es dividiran en cost de personal, cost d'equips i llicències, i cost energètic.

- **Cost de personal**

El projecte ha sigut realitzat per un únic estudiant que li ha dedicat unes 450 h. El total d'hores utilitzat pel desenvolupament d'aquest projecte es desglossen a la Taula 1.

Taula 1 Desglossament de les hores dedicades a cada tasca

Tasca	Temps invertit [h]
Planificació	80
Documentació	50
Modelat 3D	50
Simulació	100
Anàlisi de resultats	140
Redacció memòria	30
Total	450

Aquestes hores de feina es poden comptabilitzar com hores de treball d'un enginyer superior, podent assignar un preu de 40 €/h. D'aquesta forma, el cost de personal es pot estimar en **18.000 €**.

- **Cost d'equips i llicències**

Per la realització d'aquest projecte s'ha utilitzat un ordinador de sobretaula, en el que es feien les simulacions i amb el qual es treballava en remot, un ordinador portàtil, el software *SolidWorks* i el software *Ansys*. A partir dels costos d'aquests elements, la seva vida útil i el temps d'ús, es calcular el cost que es pot imputar a aquest treball. Els resultats es mostren a la Taula 2.

Taula 2 Costs d'equip i llicències

Element	Cost total [€]	Vida útil [mesos]	Temps d'ús [mesos]	Cost [€]
Ordinador sobretaula	1.500	60	6	150
Ordinador portàtil	750	60	6	75
<i>Solidworks</i>	6.600	12	6	3.300
<i>Ansys</i>	30.000	12	6	15.000
Total	-	-	-	18.525

- **Cost energètic**

Finalment, s'imputarà el cost de l'electricitat consumida pels dos ordinadors. Per aquest càlcul es suposa un preu mig de l'electricitat de 200 €/MWh. Els resultats es mostren a la Taula 3

Taula 3 Cost energètic.

Equip	Potència [W]	Temps d'ús [h]	Energia [MWh]	Cost [€]
Ordinador de sobretaula	220	2000	0,44	88
Ordinador portàtil	100	500	0,05	10
Total	-	-	0,49	98

- **Cost total**

La suma del cost total del projecte es mostra a la Taula 4.

Taula 4 Cost total.

Concepte	Cost [€]
Cost de personal	18.000
Cost d'equips i llicències	18.525
Cost energètic	98
Total	36.623

12. Impacte mediambiental

En ser aquest projecte merament teòric i no incloure l'ús de cap equip o element especial ni la construcció d'un prototip, que implicaria fer un estudi dels impactes dels materials utilitzats, l'impacte mediambiental es pot limitar a les emissions associades a l'energia elèctrica consumida.

D'acord amb Red Eléctrica Española [19], les emissions de CO₂ per cada MWh d'electricitat es poden aproximar a 0,287 tones. Així, el consum d'electricitat en la realització d'aquest projecte ha suposat l'emissió d'unes 141 kg de CO₂.

Conclusions

Un cop acabat l'estudi del fenomen d'instabilitat lateral de les cadires de parapent i el comportament d'aquestes en vol, es pot concloure:

- S'ha pogut constatar que la introducció d'una cua a la cadira de parapent millora l'aerodinàmica significativament. El coeficient adimensional de drag es redueix en més d'un 50%. La introducció de cobriment de la part posterior del cap també introdueix millores en l'aerodinàmica tot i que no tan significatives.
- Sobre una cadira de parapent, de manera inherent, actuen dos moments. El moment aerodinàmic, que és desestabilitzador, i el moment *antitwist* que generen les cordes sobre els ancoratges, que és estabilitzador. El primer dels moments depèn de l'angle entre el vent i l'eix longitudinal de la cadira, i el segon depèn de l'angle de *twist*.
- Totes les geometries de cadira simulades, amb o sense cua, presenten un augment de *twist* quan amb flux frontal hi ha un augment de l'angle absolut d'incidència del vent. S'ha observat que el moment aerodinàmic de les cadires amb cua presenta una primera etapa de creixement i una segona i tercera etapa en que disminueix. Això, fa que el comportament de la cadira sota l'acció conjunta dels dos moments només presenti dos angles d'incidència del vent en que el *twist* és zero.
- El problema recau, per tant, en la magnitud del *twist* que es produeix amb la variació de l'angle d'incidència del vent. S'ha observat que la presència de cua disminueix el *twist* màxim que apareix. També s'ha observat que l'augment de l'àrea lateral de la cua disminueix els moments aerodinàmics i per tant el màxim *twist*. Finalment, s'ha advertit que no només és important l'augment de l'àrea lateral de la cua per la disminució del *twist* màxim, sinó que té més importància la localització d'aquesta. Sent l'augment d'àrea lateral al final de la cua la que té un pes major.
- Addicionalment, s'ha pogut confirmar que les forces aerodinàmiques depenen del quadrat de la velocitat i com els moments aerodinàmics i els *twist* d'equilibri augmenten ràpidament en augmentar la velocitat d'incidència del vent.
- En referència als criteris de disseny que s'extreuen d'aquest projecte, s'ha posat de manifest que la variable altura final de cua és un paràmetre clau del comportament lateral d'una cadira. Si es vol dissenyar una cadira de competició, pensada per volar a elevades velocitats, en que no hi hagi una gran tendència a *twist*, s'haurà d'utilitzar una altura de final de cua elevada, altura similar a la del pilot assegut. Respecte a la longitud de la cua, aquesta es pot utilitzar per acabar d'ajustar el caràcter estable lateral; de no ser així, convé que sigui petita per així no augmentar el pes de la cua.

Agraïments

Primerament, es vol agrair al tutor del projecte, Alexandre Presas, el seu constant suport i ajuda al llarg de tot el projecte.

En segon lloc, es vol agrair a Niviuk l'oportunitat facilitada. Poques vegades es té l'oportunitat de realitzar un estudi d'aerodinàmica tan interessant com el d'aquest projecte amb la col·laboració d'una marca puntera en el sector.

Bibliografia

- [1] Overfly Tenerife, «Overfly Tenerife,» 11 Setembre 2019. [En línia]. Available: <https://overflytenerife.com/es/historia-del-parapente/>. [Últim accés: 16 Octubre 2021].
- [2] HowStuffWorks, «How Paragliding Works,» HowStuffWorks, [En línia]. Available: <https://adventure.howstuffworks.com/paragliding.htm#pt2>. [Últim accés: 17 Octubre 2021].
- [3] Wikipedia, «Parapente,» Wikipedia, [En línia]. Available: <https://es.wikipedia.org/wiki/Parapente>. [Últim accés: 16 Octubre 2021].
- [4] RAE, «Parapente,» RAE, [En línia]. Available: <https://dle.rae.es/parapente>. [Últim accés: 16 Octubre 2021].
- [5] R. Urribarres, «La silla de vuelo,» Cuba Parapente, 23 Juny 2021. [En línia]. Available: <http://cubapapapente.com/la-silla-de-vuelo-primera-parte/>. [Últim accés: 16 Octubre 2021].
- [6] G. A. Saez, Manual del parapentista.
- [7] F. M. White, Mecànica de Fluids, Mcgraw-Hill, 1979.
- [8] S. E. Roncero i F. G. Jiménez, *Mecánica del Vuelo del Avión Parte II: Estabilidad y Control*, Sevilla, 2009.
- [9] Ozone, «Exocean,» [En línia]. Available: <https://www.flyozone.com/paragliders/es/products/harnesses/exocean>. [Últim accés: 22 Octubre 2021].
- [10] Kortel Designs, «Kanibal Race II,» [En línia]. Available: <https://www.korteldesign.com/es/produits/kanibal-race-ii/>. [Últim accés: 22 Octubre 2022].
- [11] Woody Valley, «X Rated 7,» [En línia]. Available: <https://www.woodyvalley.eu/es/x-rated-7.php>. [Últim accés: 22 Octubre 2022].
- [12] N. Connor, «¿Qué es la capa límite? Definición,» 30 Setembre 2019. [En línia]. Available: <https://www.thermal-engineering.org/es/que-es-la-capa-limite-definicion/>. [Últim accés: 7 Novembre 2021].

- [13] C. R. Pestaña, «Simulación Numérica de la Estela tras un Cuerpo de Base Roma a Números de Reynolds Altos: La Influencia de los Modelos de Turbulencia,» Madrid, 2015.
- [14] Ansys, «Introduction to Ansys Fluent: Turbulence Modeling,» 2010.
- [15] G. Bangga, «Aerodynamic performance of a small vertical axis wind turbine using an overset grid method,» 2016.
- [16] Jousef, «Simscale: What is y^+ ?», Maig 2018. [En línia]. Available: <https://www.simscale.com/forum/t/what-is-y-plus/82394>. [Últim accés: 1 November 2021].
- [17] C. Ninja, «Ansys Meshing – Sizing (SOFT / HARD),» 13 Març 2020. [En línia]. Available: <https://cfd.ninja/ansys-meshing/ansys-meshing-sizing-soft-hard/#:~:text=The%20Growth%20Rate%20represents%20the,each%20succeeding%20layer%20of%20elements..> [Últim accés: 6 Novembre 2021].
- [18] LEAP CFD Team, «TIPS & TRICKS: INFLATION LAYER MESHING IN ANSYS,» LEAP, 6 Gener 2012. [En línia]. Available: <https://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-inflation-layer-meshing-in-ansys/>. [Últim accés: 10 November 2021].
- [19] R. Roca, «El sistema eléctrico español dispara sus emisiones un 18% en 2017 hasta las 74,8 millones de TCO₂,» Diciembre 2018. [En línia]. [Últim accés: Novembre 2021].
- [20] Ansys, «Introduction to Ansys Fluent: Turbulence Modeling 2,» 2010.