

RESUM

La fluidodinàmica en el windsurf pren una importància que pot arribar a ser decisiva en l'esdevenir d'una competició, ja sigui de velocitat, de agilitat a la taula, etc. És per això que és important estudiar la aerodinàmica i la hidrodinàmica de la taula i de la vela de windsurf per a aconseguir un aparell idoni per al windsurfista.

L'objectiu d'aquest treball és la realització d'un estudi específic d'una de les parts més importants de la taula: l'aleta. S'ha basat en l'estudi de la sustentació i la resistència d'una sèrie de perfils, arribant a 2 resultats, amb els quals s'han fet els estudis pertinents, estudiant diferents possibles formes d'aleta amb aquests dos perfils.

Utilitzant el programa de simulació CFD, s'estudiarà quantitativament i qualitativament l'efecte que té una aleta o una altra en la velocitat que es podrà arribar a aconseguir i el comportament que tindrà la taula en funcionament.

ÍNDEX

1. Glossari.....	5
2. Introducció i objectius.....	7
2.1 Introducció.....	7
2.2 Objectius del projecte.....	7
2.3 Abast del projecte.....	7
3. Descripció del windsurf.....	9
3.1 Història del windsurf.....	9
4. Introducció a la dinàmica de fluids.....	11
4.1 Nombres adimensionals i forces.....	11
4.2 Equacions.....	13
4.3 Model de la Capa límit i del flux potencial.....	16
4.4 Eficiència hidrodinàmica.....	17
5. Estudi dels paràmetres.....	18
5.1 Condicions de contorn.....	18
5.2 Valoració de paràmetres.....	19
5.3 Anàlisi de dades amb DesignFoil.....	20
5.4 Paràmetres del perfil.....	30
5.5 Elecció dels perfils.....	30
5.6 Estudi dels paràmetres d'aletes en 3 dimensions.....	32
6. Simulació de les aletes amb CFD en dos dimensions.....	34
6.1 Introducció al CFD.....	34
6.2 Pre-procés 2D.....	35
6.3 Solució.....	38
6.4 Anàlisi dels resultats.....	39

7. Simulació de les aletes amb CFD en tres dimensions.....	46
7.1 Dimensions de les aletes.....	46
7.2 Aletes escollides.....	47
7.3 Pre-procés 3D.....	50
7.4 Anàlisi dels resultats.....	53
8. Planificació temporal.....	62
9. Impacte ambiental.....	63
10. Pressupost.....	64
11. Conclusions.....	66
Agraïments.....	67
Bibliografia.....	68
Annex.....	70

1. GLOSSARI

Hidrodinàmica: branca de la mecànica de fluids que estudia el comportament dels cossos en moviment al voltant d'un fluid, en aquest cas, l'aigua.

Capa límit: zona on el moviment d'un fluid és pertorbat a causa de la presència d'un sòlid amb el qual està en contacte. La velocitat presenta un gradient dins d'aquesta zona, variant des de 0 fins al 99% de la velocitat del fluid respecte el cos.

Coefficient de resistència a l'avanç C_d : coeficient que indica la resistència al moviment en la direcció d'un cos que aquest pateix.

Coefficient de sustentació C_l : coeficient que indica la capacitat que té un cos a crear una força en la direcció perpendicular al moviment del fluid.

Component de pressió $C_{DPressió}$: Component del C_d que depèn de la forma del cos .

Component de fricció $C_{DFricció}$: Component tallant del C_d produït degut als esforços viscosos sobre la superfície del cos.

Força de resistència a l'avanç: força causada per la fricció de l'aleta amb el fluid, oposada al moviment del cos.

Força de sustentació: força que es crea perpendicular a la direcció del moviment provocada per la diferència de pressions que es generen en el perfil de l'aleta.

Nombre de Reynolds: nombre adimensional que s'utilitza per caracteritzar el moviment del fluid relacionant velocitat, viscositat, densitat i dimensió del fluid.

Eficiència hidrodinàmica: relació entre la força de sustentació i la resistència a l'avanç.

Corda: línia que uneix la vora d'atac del cos amb la de sortida.

Angle d'atac α : angle que formen la corda del perfil amb la direcció del fluid.

CFD (Computational Fluid Dynamics): branca de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i algorismes per analitzar i resoldre problemes sobre el flux de substàncies.

Densitat del fluid ρ : quantitat de massa d'un fluid en un determinat volum.

Viscositat dinàmica del fluid μ : resistència interna d'un fluid a les deformacions graduals produïdes per tensions tangencials.

Viscositat cinemàtica del fluid ν : és el quocient entre la viscositat dinàmica del fluid i la seva densitat.

Flux laminar: quan el moviment del fluid és ordenat, estratificat i suau. El fluid es mou en làmines paral·leles sense barrejar-se entre elles.

Flux turbulent: quan el moviment del fluid es dóna de forma caòtica, on les partícules es mouen de forma desordenada i les trajectòries de les partícules formen petits remolins periòdics però no coordinats.

2. Introducció i objectius.

2.1 Introducció.

El windsurf és un esport de vela on tant l'aerodinàmica com la hidrodinàmica són essencials per assolir les velocitats desitjades. En aquest treball s'estudiarà amb més detall el comportament que té la taula en contacte amb l'aigua, on un bon disseny d'aquesta permet obtenir uns bon coeficients de resistència a l'avanç i de sustentació, fet que facilita aconseguir millors resultats. A la taula de windsurf, l'element que és més rellevant en quant a aconseguir aquests bons coeficients és l'aleta, situada a la part inferior.

Per a la realització d'aquest estudi s'utilitzarà la Simulació CFD (Computational Fluid Dynamics) que permetrà observar com funcionen aquestes aletes davant un entorn relacionat amb el flux de fluids, en aquest cas l'aigua de mar, i altres fenòmens a través de simulacions per ordinador. Aquest simulador dona un assaig fiable i econòmic i, a més, ofereix una versatilitat elevada a l'hora de canviar els diferents paràmetres i condicions.

2.2. Objectius del projecte.

Abans de començar aquest projecte, s'ha de definir uns objectius que es volen assolir. Primer de tot, posar en pràctica tots els coneixements adquirits a l'assignatura amb la que es fonamenta aquest projecte, mecànica de fluids. Poder aplicar aquests coneixements apresos de manera teòrica en un àmbit prou comú a la vida diària com són aquests tipus d'esports. Es vol comprendre el paper tan important que juguen les aletes en l'estabilitat i la velocitat de la taula. S'hauran de calcular les forces que actuen sobre la taula, juntament amb els coeficients aerodinàmics. A partir d'aquí, es buscaran quines són els avantatges i desavantatges de cada perfil en quant a la pràctica de windsurf.

Per portar a terme aquests estudis, s'haurà d'aprendre amb més profunditat a utilitzar una sèrie de programes que ajudaran a realitzar aquest projecte, com són el programa SolidWorks, que permetrà fer uns dissenys de les aletes suficientment precisos a la realitat, o el programa CFD, que permetrà, mitjançant una sèrie d'hipòtesis, fer una simulació del comportament d'un fluid davant la taula.

2.3. Abast del projecte.

Aquests tipus d'estudi utilitzant aquestes simulacions són molt útils per a les empreses dedicades a la fabricació d'aquestes taules i aletes ja que permeten realitzar unes simulacions amb uns resultats pràcticament iguals als de la realitat. Això significa que aquestes simulacions permeten evitar la realització d'una sèrie d'assajos en túnels de

vent, amb la corresponent fabricació de maquetes. Aquest fet es trasllada a una reducció considerable del preu de l'estudi.

Aquest projecte es durà a terme mitjançant els següents passos:

- Es farà un estudi teòric sobre la hidrodinàmica de la taula de windsurf. Principis bàsics de la fluidodinàmica, forces que hi actuen i fenòmens que apareixen.
- Preselecció dels perfils (2D) amb millors rendiments extrets d'una base de dades mitjançant el software DesignFoil i l'eina AirfoilTools.
- Disseny dels models de les aletes que es portaran a estudi, mitjançant el programa SolidWorks.
- Fixació d'unes condicions de contorn el més semblant possible a la realitat per a realitzar l'estudi.
- Simulació de l'estudi amb l'ajuda del CFD i càlcul de les solucions.
- Comparació dels resultats obtinguts amb DesignFoil i els obtinguts amb el Fluent.
- Disseny mitjançant SolidWorks de les aletes en 3D amb diferents formes utilitzant els perfils que donen millors prestacions.
- Utilitzant les condicions de contorn del 2D, se simularà amb l'ajuda del CFD i s'avaluaran els resultats.
- Selecció de les millors aletes dissenyades.

3. Descripció del Windsurf.

El windsurf és un esport d'aigua que es practica amb una taula impulsada per la força del vent. L'esportista utilitza el seu cos per a aprofitar al màxim la força del vent i així desplaçar-se a velocitats elevades. Pel fet d'utilitzar el vent per a desplaçar-se, el windsurf es pot practicar en qualsevol lloc tot i no tenir onades, com per exemple llacs, rius o al mar en calma. A més, a diferència de la majoria d'altres formes de navegació, l'esportista se situa molt a prop de l'aigua, inclús en contacte amb ella.

3.1 Història del windsurf.

El primer contacte amb aquest esport es remunta als anys 30, on Tom Blake, pioner del surf en general, va pensar que en comptes d'haver de remar cada cop per tal d'agafar una onada, seria bona idea crear un sistema per poder usar la força del vent per poder agafar onades amb més facilitat. També va ser el creador dels primers dissenys d'alerons i la millora de l'aerodinàmica de les taules de windsurf



Figura 3.1.1

Com es pot veure a la imatge, els primers dissenys que va crear van ser bastant rudimentaris, i aquests no van tenir una gran acceptació. No va ser fins a finals dels anys 60 on l'enginyer Tim Drake i el surfista Hoyle Schweitzer van patentar la primera de taula de windsurf i van començar a comercialitzar-la, fent-se popular uns anys després, a la dècada dels 70. Finalment va arribar a ser esport olímpic al 1984, a Los Ángeles, Estats Units.

Els principis d'aquest esport segueixen sent els mateixos tot i la seva aparició al més alt nivell, ja fa més de 30 anys. Tot i això, aquest esport ha variat molt a causa de l'augment de la tecnologia i actualment existeixen diferents estils, alguns per a aprendre i altres més avançats que consisteixen a assolir grans velocitats. En el primer cas es busquen taules amb gran estabilitat, aconseguida no tant amb longitud i amplada sinó amb un elevat volum. En quant a les taules per assolir grans velocitats, tenen l'objectiu d'hidroplanejar, és a dir, que es mantinguin per sobre de la superfície aquàtica, igual que els vaixells d'alta velocitat, amb la qual cosa es produeix un gran augment de la velocitat degut a la seva menor fricció.

A continuació es mostra la forma bàsica d'una taula de windsurf amb les seves parts anomenades:

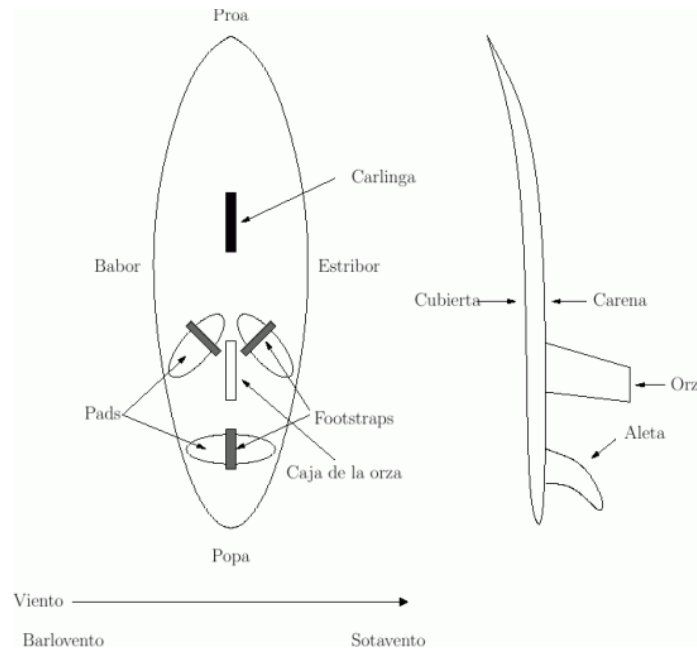


Figura 3.1.2

Com es pot veure, la taula de windsurf té a la part inferior dues aletes, una d'elles anomenada orza. Aquest element serveix per evitar la deriva de la taula a velocitats baixes i és opcional ja que, a nivell expert no és necessària. En canvi, l'aleta sí que es pot trobar a totes les taules de windsurf ja que evita la deriva a velocitats elevades o d'hidroplanatge.

4. Introducció a la dinàmica de fluids.

4.1 Nombres adimensionals i forces.

Un nombre adimensional és una propietat que pot descriure les forces hidrodinàmiques que actuen en el contacte entre l'aigua i els perfils. Amb aquests nombres s'és capaç de controlar diferents característiques, per això és útil per a realitzar simulacions amb computador.

Nombre de Reynolds.

Una de les característiques més importants a tenir en compte en un estudi hidrodinàmic és la viscositat de l'aigua. Per a tenir el control d'aquesta és necessari un nombre adimensional: el nombre de Reynolds.

Aquest nombre de aconseguir relacionar les forces inercials i les forces viscoses mitjançant la següent fórmula:

$$Re = \frac{\rho v_s D}{\mu}$$

ρ : Densitat del fluid

v: Velocitat del fluid

D: Longitud característica del sistema

μ : Viscositat dinàmica

Tenint en compte aquesta equació, un Reynolds elevat suposarà un flux poc viscos del fluid o a velocitats elevades (turbulent), mentre que un Reynolds petit, implicarà un flux més viscos o bé baixes velocitat (laminar).

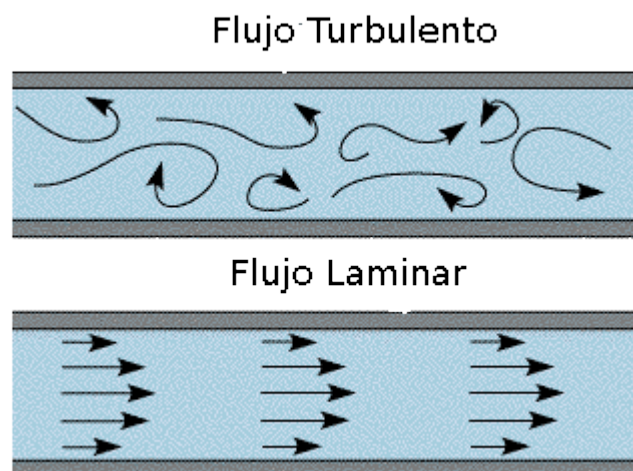


Figura 4.1.1

De nombres adimensionals es poden trobar tants com es vulguin, entre els quals, a part del Reynolds, existeixen d'altres també importants com són els coeficients de sustentació i de resistència al avanç.

Força de sustentació

És la força que es crea perpendicular a la direcció del moviment provocada per la diferència de pressions que es generen en el perfil de l'aleta, fet que porta a que la taula s'aixequi, disminuint el fregament d'aquesta amb l'aigua. Aquesta disminució del fregament genera un augment de la velocitat de la taula.

$$F_L = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_L$$

Coefficient de sustentació:
Aquest nombre adimensional queda directament relacionat amb la força de sustentació que produeix el perfil.

- Angle d'atac

És un paràmetre que influeix decisivament en la capacitat per generar sustentació en el perfil. Com més s'augmenta aquest angle més augmenta la sustentació. No obstant, aquest augment té un límit a partir del qual la sustentació disminueix bruscament tal i com es pot veure a la figura que es mostra a continuació. Aquest fenomen s'anomena entrada en pèrdua.

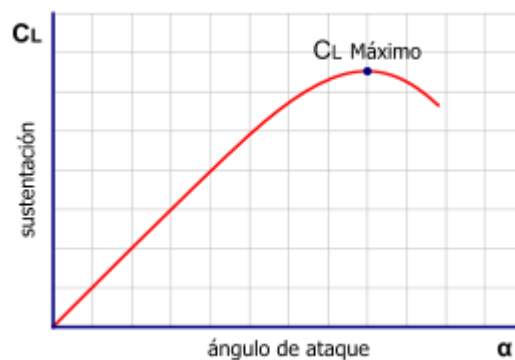


Figura 4.1.2

Força de resistència a l'avanç

És la força causada per la fricció de l'aleta amb el fluid. Aquesta força s'oposa al sentit de la velocitat. Les partícules de l'aigua entren en contacte amb l'aleta de la taula. A causa de la viscositat del fluid, les partícules que es troben més a prop del perfil tenen una pèrdua de velocitat, fet que provoca un fenomen anomenat capa límit.

$$F_f = \frac{1}{2} \rho A v^2 C_f$$

Coeficient de fricció: Aquest nombre adimensional és un terme que expressa l'oposició del moviment davant el fluid. Normalment s'intenta disminuir aquest nombre, tot i que segurament això provocarà que el coeficient de sustentació disminueixi. S'haurà de buscar un terme mig entre els dos.

4.2 Equacions.

Tant l'aerodinàmica com la hidrodinàmica es basen en 3 lleis físiques:

Bernoulli

És un cas particular de principi de la conservació de l'energia. Aquest teorema diu que l'energia que té un punt d'un fluid ideal a través d'un cos, es manté constant al llarg de la seva línia de corrent. L'equació aconseguirà relacionar la pressió estàtica, la pressió dinàmica i l'alçada del fluid en un determinat punt amb les característiques d'un altre punt en una mateixa línia de corrent. En aquest darrer punt, també apareixeran termes que condicionen aquest manteniment de l'energia, com són les pèrdues per fricció amb el cos a través del qual flueix el fluid, a elements singulars o el treball mecànic que produeixen possibles bombes i vàlvules.

$$\frac{P_1}{\rho g} + \frac{v_1^2}{2g} + z_1 = \frac{P_2}{\rho g} + \frac{v_2^2}{2g} + z_2 + h_{f_{1-2}} + h_m$$

- On:
- P_x = Pressió al punt x
 - ρ = Densitat del fluid
 - g = Gravetat
 - v_x = Velocitat al punt x
 - z_x = Altura del punt x
 - h_{f1-2} = Pèrdues per fricció
 - h_m = Treball mecànic

Aquest fenomen de Bernoulli es pot veure perfectament en els elements aerodinàmics i hidrodinàmics. Quan flueix un fluid a través d'un cos no simètric, com podria ser el cas d'estudi entre l'aigua i l'aleta de windsurf, el fluid fluirà al voltant de l'aleta de manera diferent segons cap a quina part es dirigeixi. La velocitat del fluid per una part de l'aleta serà major que la velocitat per una altra zona i, per a conservar l'energia, les pressions seran baixes a la zona amb majors velocitats i viceversa. Aquestes diferències de pressions faran que apareguin les forces ja esmentades, com per exemple la de sustentació.



Figura 4.2.1

Podem veure que al ser un perfil asimètric, la zona per on el fluid ha de fer més recorregut, adquirirà una velocitat més elevada i, en conseqüència, una disminució de la pressió.

Continuïtat

Aquest teorema diu que la massa ni es crea ni es destrueix. En altres paraules, la massa de fluid que entra en un cos és la mateixa que la que surt. Per aquest motiu de conservació de la massa, si el conducte per on circula el fluid disminueix, la velocitat haurà d'augmentar per a que la massa que surti sigui la mateixa que a l'entrada.

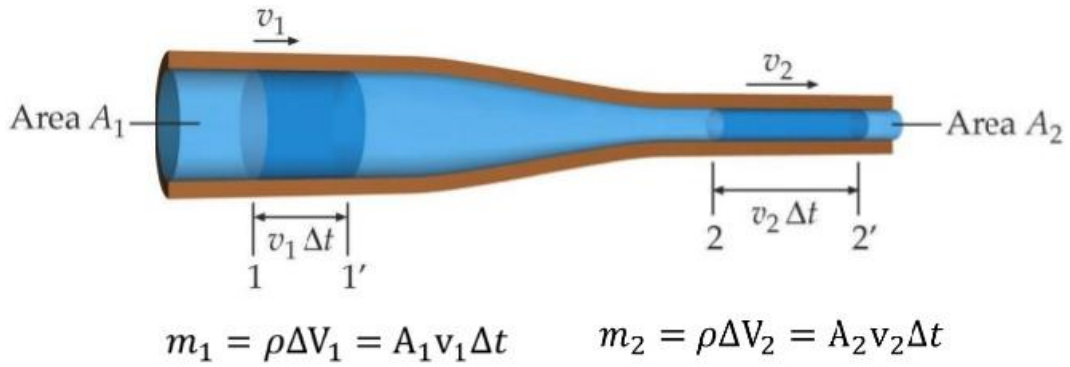


Figura 4.2.2

On m_1 i m_2 són iguals.

Efecte Venturi

Aquest efecte relaciona els dos fenòmens anteriors. Quan l'àrea del conducte disminueix, la velocitat del fluid augmentarà, i quan l'àrea torni a la mida inicial, la velocitat tornarà a disminuir fins a la velocitat que tenia inicialment.

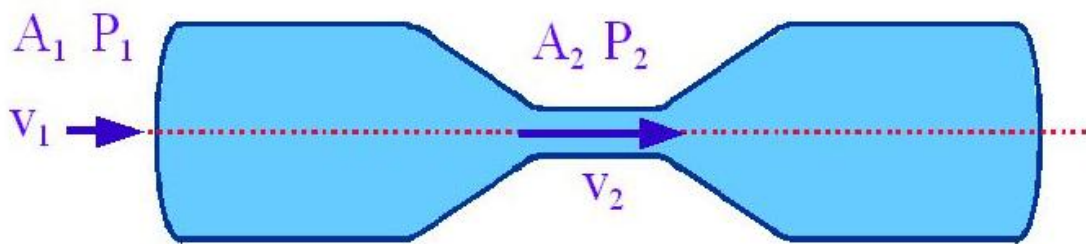


Figura 4.2.3

On al final del conducte, la velocitat tornarà a ser V_1 .

4.3 Model de la Capa límit i del flux potencial.

Es tracta d'un model que serveix a elevats nombres de Reynolds i que la seva característica essencial es la divisió d'un flux en 2 regions:

- Una capa prima, on el flux és viscos i rotacional → la Capa Límit
- Un flux exterior en el qual es poden despreciar els efectes de la viscositat i la rotació → El Flux Potencial

Tal i com s'ha explicat al glossari, la capa límit és la zona on el moviment de fluid és pertorbat per la presència d'un sòlid amb el que està en contacte. És la regió en la que la velocitat del fluid respecte al sòlid varia des de zero fins al 99% de la velocitat de la corrent que no ha estat pertorbada.

Segons el perfil de velocitats creat es distingeixen 3 zones:

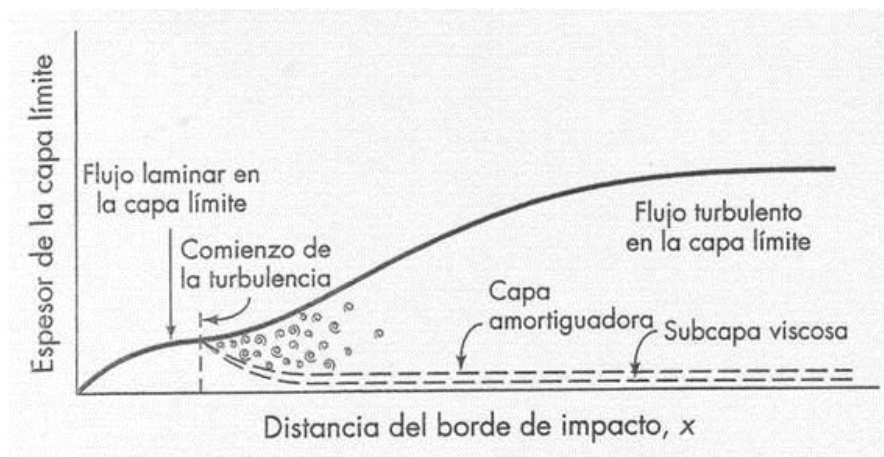


Figura 4.3.1

- Flux laminar
- Flux de transició
- Flux turbulent

Pot ser que en la superfície del perfil, on la velocitat serà nul·la a causa de la velocitat, el fluid no pugui sobrepassar a pressió adversa i retrocedeixi. Quan això passa, el fluid deixa d'estar en contacte amb el sòlid. Aquest fenomen s'anomena desprendiment de la capa límit. Això genera l'aparició de turbulències i, per tant, una baixada molt important de la pressió en la zona posterior de l'objecte. Aquest fet provoca que es perdi el control sobre la taula de windsurf i tinguis un gran risc d'acabar caient a l'aigua. És per això que, igual que passa amb els avions, es busca una capa turbulenta, ja que aquesta dificulta que aparegui aquest desprendiment.

Hi ha alguns aspectes que ajuden a que no es produeixi el despreniment de la capa límit o, al menys, retardar-la:

- Augment de la velocitat → és a dir, augment de l'energia cinètica.
- Disminució de pressions → és a dir, disminució de l'energia potencial.
- Petites rugositats controlades → com per exemple les pilotes de golf o les de tennis, que no es fabriquen de manera llisa.
- Transició ràpida de laminar a turbulent.

4.4 Eficiència hidrodinàmica.

És la relació entre la força de sustentació i la força de resistència a l'avanç.

$$E_f = \frac{F_l}{F_d} = \frac{C_l}{C_d}$$

És el paràmetre més important, ja que per a aconseguir la màxima velocitat, s'ha de maximitzar la força de sustentació, i minimitzar la força de resistència a l'avanç.

5. Estudi dels paràmetres.

5.1 Condicions de contorn.

En aquest estudi s'hauran d'establir una sèrie de condicions de contorn que considerarem constants al llarg del projecte:

- Velocitat: 24 nusos, que equival a aproximadament 12 m/s.
- Temperatura: 17,9°C, agafant la temperatura mitja de l'aigua del mar a Catalunya durant els 12 mesos de l'any.
- Pressió: 1 atmosfera, sense tenir en compte que l'aleta està lleugerament sota l'aigua.
- Densitat constant: Considerem el fluid incompressible, ja que el nombre de Mach serà molt menor a 0,3 (ens trobem clarament en un règim subsònic).
- Estacionari: Es considera estacionari ja que es consideren unes condicions de contorn del fluid invariables en el temps.
- Viscositat cinemàtica: es considera un valor també constant ja que la variació del percentatge de sal a l'aigua de mar no serà suficientment significativa per haver de considerar-la no constant. La viscositat també depèn de la temperatura, considerada també constant. El valor serà de $1,2 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$.
- Flux turbulent: El model més habitual en estudis fluidodinàmics és el de turbulència K-Epsilon. Aquest model s'utilitza com la base de càlculs de l'energia cinètica turbulenta i el rati de dissipació turbulenta. Amb motiu d'aquesta turbulència apareix un increment del transport de la quantitat de moviment i del transport de la calor en direccions normals a la superfície o normals a la component més gran de la velocitat del flux, respecte a la del cas del flux laminar.
- Se simularà l'aleta com a cos rígid, degut a les característiques del programa de simulació que s'usarà.
- S'estableix un rang d'angles d'atac compresos entre 0° i 4°. S'ha escollit aquests angles ja que ens hem informat sobre els angles que solen assolir els esportistes de windsurf, i en la gran majoria de casos es treballa dins d'aquest rang.

5.2 Valoració de paràmetres.

S'ha de considerar que la forma més habitual de representar perfils fluidodinàmics és en plans de dues dimensions, raó per la qual es realitza primerament un estudi en 2D. Un cop estudiats tots els perfils candidats, s'extrauran els que millors s'adaptin a les condicions i s'extrapolerà l'estudi a 3 dimensions.

Estudi de paràmetres de 2D.

S'ha hagut de treballar amb una base de dades de perfils hidrodinàmics amb unes mateixes condicions de treball. Per a l'elecció dels millors perfils d'aquesta base de dades a estudiar s'ha utilitzat el Software DesignFoil i l'eina AirfoilTools. Aquests programes permeten realitzar un anàlisi comparatiu dels diferents perfils amb l'objectiu d'acotar el rang de perfils aptes per a aquest estudi. Utilitzen un mètode propi basat en estudis en túnels de vent reals, on s'obtenen els coeficients de forma amb diferents paràmetres de flux i geometries d'un munt de perfils ja existents.

El primer pas en el disseny és realitzar una primera selecció de perfils hidrodinàmics de la base de dades d'aquest programa i estudiar-los per, a partir d'ells, obtenir uns perfils definitius amb els que, finalment, realitzar i construir la desitjada aleta.

Per a la tria d'aquests millors perfils seleccionats s'ha tingut en compte una sèrie de paràmetres i característiques:

- Una eficiència el més elevada possible, per a obtenir relacions entre la sustentació i la resistència elevades. Estudiar el desenvolupament d'aquesta eficiència per a un rang d'angle d'atac.
- L'espessor del perfil.
- Força de sustentació elevada.
- Força de resistència mínima, per així minimitzar la resistència a l'avanç generada per l'aleta.
- Un perfil asimètric, ja que proporcionen alts rendiments hidrodinàmics en un sentit de navegació tot i que, per contra, l'empitjoren en l'altre.

Cal dir que un espessor petit és més propens a donar rendiments més alts. Com més prim sigui, l'aleta tendirà a obtenir una menor resistència a l'avanç, encara que es pot trobar problemes de poc coeficient de sustentació. Tot i així, aquest tipus d'aletes tenen un problema; tenen relativa facilitat a patir una ruptura degut al petit espessor. És per això que en la tria s'intentarà trobar uns perfils mínimament gruixuts per tal d'evitar aquest problema però que segueixi tenint un alt rendiment.

Degut a aquesta qüestió, s'ha decidit estudiar i triar dos tipus de perfils: un tipus amb espessors prims i un altre tipus amb perfil més gruixut que, tot i no tenir un rendiment tan elevat com els prims, ofereix una seguretat en l'estudi d'aquests perfils. En el món del windsurf, les aletes més gruixudes solen estar dirigides a persones amb poca experiència, ja que són fàcils de conduir, arriben amb certa facilitat al planatge... En canvi, les aletes més primes són utilitzades per gent més veterana, ja que resulten més nervioses i es necessita una tècnica més avançada per controlar la taula. Un cop s'aconsegueix controlar-la, s'aconsegueixen velocitats molt més altes.

5.3 Anàlisi de dades amb DesignFoil.

Com s'ha dit, el paràmetre del rendiment serà la principal dada per a triar els millors perfils. No obstant, a part de trobar el millor rendiment, també es calcularà el que tingui més capacitat de maniobra. Es mesurarà amb el paràmetre C_M (Coeficient del moment).

L'anàlisi de dades s'ha dut a terme mitjançant el programa DesignFoil i amb l'ajuda de l'eina d'anàlisi AirfoilTools, la qual resulta molt útil a l'hora d'estudiar els diversos paràmetres dels diferents perfils existents.

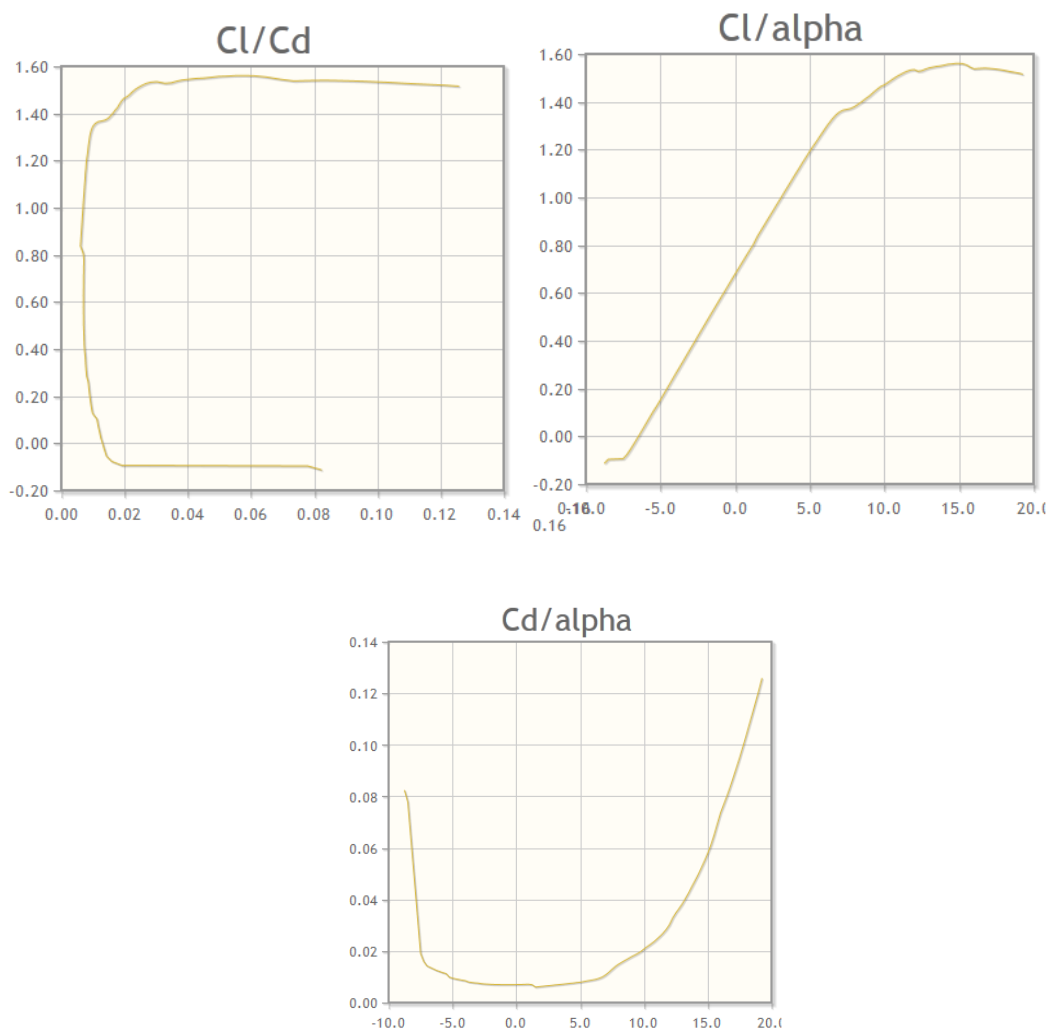
5.3.1 Perfil prim.

Analitzant molts perfils que s'han considerat prims (amb un Reynolds de 10^6), mitjançant el programa DesignFoil, els escollits són:

NACA 6409

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	C_M
0	0.6790	0.0070	97.0	-0.1479
1	0.7810	0.00710	110.0	-0.1460
2	0.8884	0.00629	141.24006	-0.1457
3	0.9905	0.00682	145.2346	-0.1438
4	1.0930	0.00733	149.11323	-0.1421
5	1.1928	0.00790	150.98734	-0.1401
5	1.1928	0.00790	150.98734	-0.1401

Taula 5.3.1.1

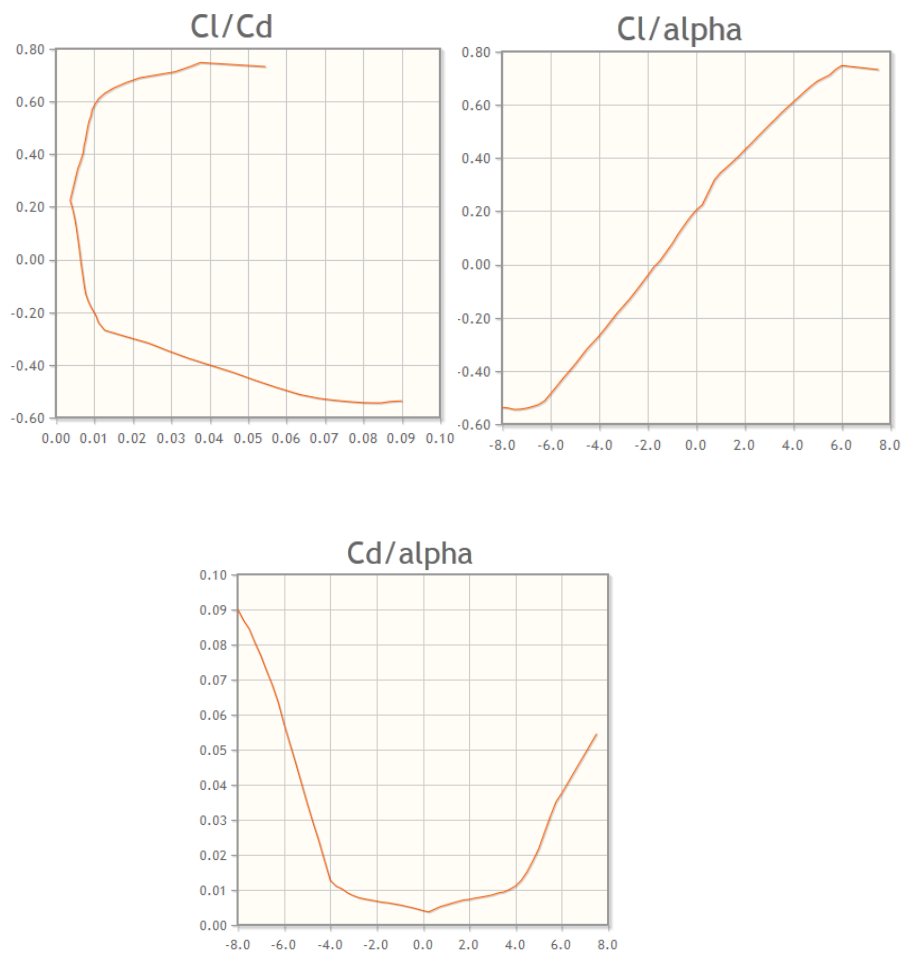


5.3.1.1 Gràfiques de NACA 6409

GOE 10K

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	C_M
0	0.2040	0.00411	49.63504	-0.0516
1	0.3446	0.00569	60.56239	-0.0591
2	0.4305	0.00729	59.0535	-0.0542
3	0.5230	0.00858	60.95571	-0.0502
4	0.6105	0.01112	54.90108	-0.0447
5	0.6892	0.02171	31.74574	-0.0349
3	0.5230	0.00858	60.95571	-0.0502

Taula 5.3.1.2

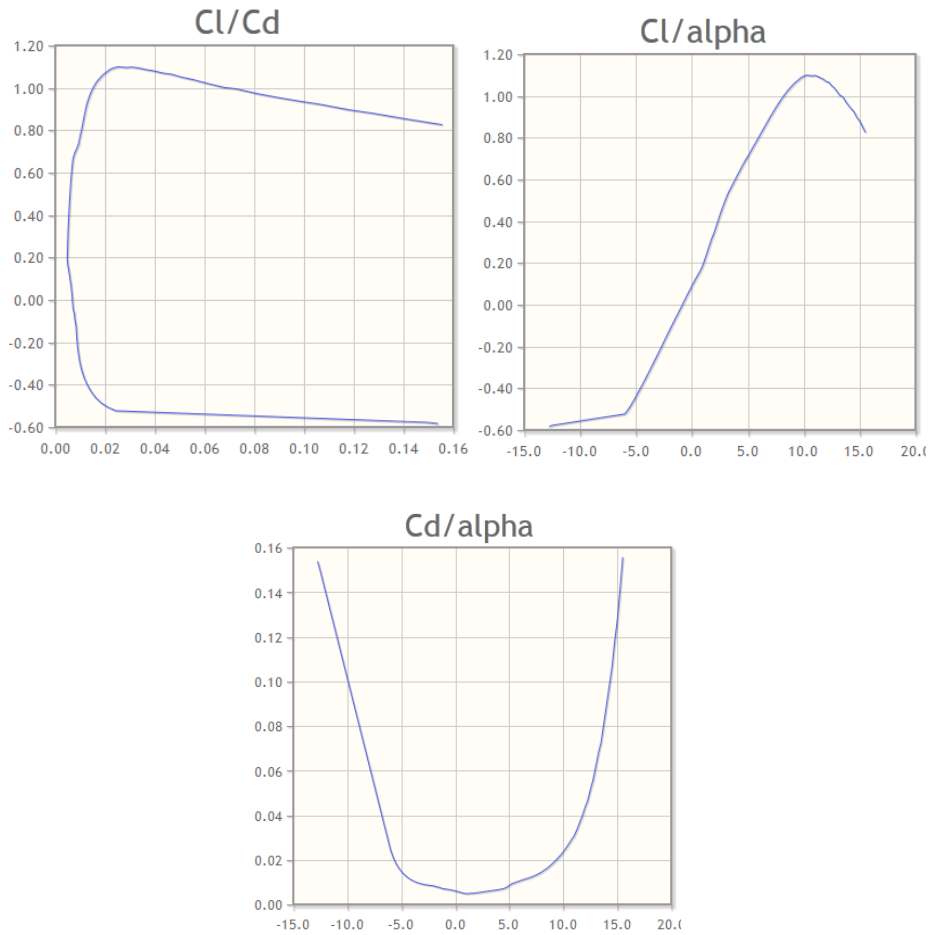


5.3.1.2 Gràfiques GOE10K

MH20

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	C_M
0	0.0902	0.00604	14.93377	-0.0039
1	0.1920	0.00480	40.0	-0.0016
2	0.3465	0.00521	66.50672	-0.0111
3	0.5026	0.00592	84.89865	-0.0216
4	0.6130	0.00663	92.45852	-0.0221
5	0.7107	0.00852	83.41549	-0.0209
4.5	0.6641	0.00712	93.27247	-0.0216

Taula 5.3.1.3

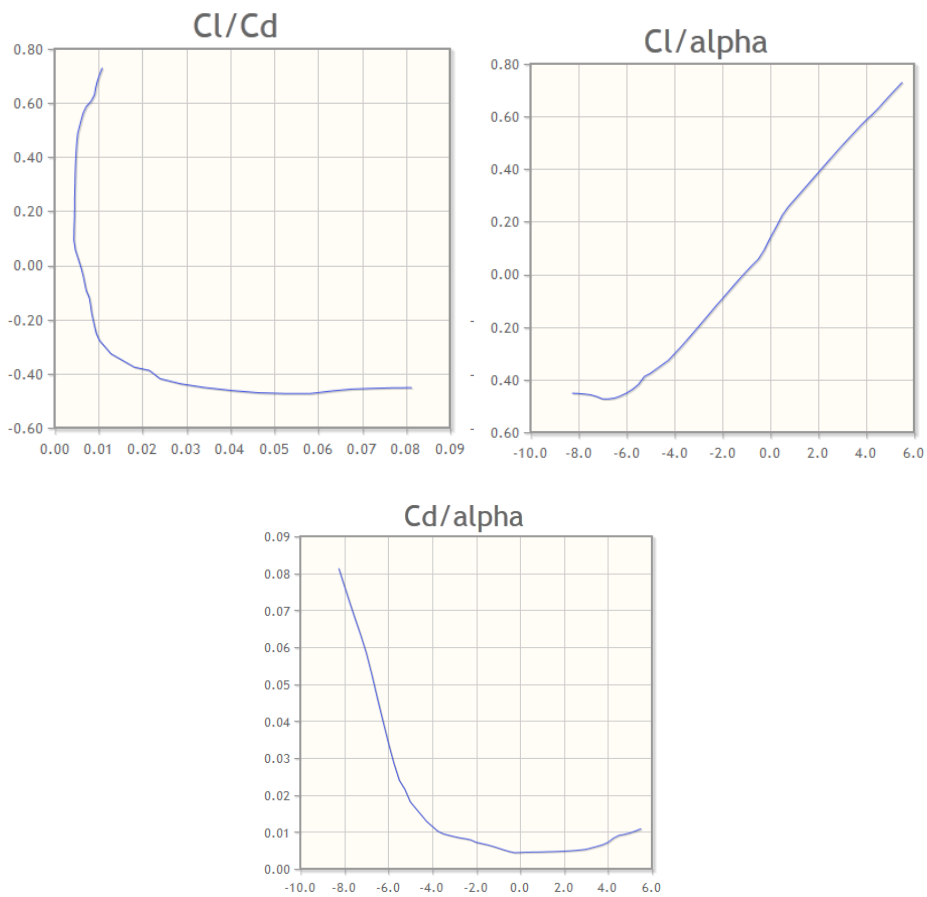


5.3.1.3 Gràfiques MH20

MH22

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	C_M
0	0.1388	0.00443	31.33183	-0.0197
1	0.2820	0.00458	61.57205	-0.0267
2	0.3861	0.00478	80.77406	-0.0250
3	0.4896	0.00528	92.72727	-0.0234
4	0.5861	0.00717	81.74338	-0.0214
5	0.6805	0.00972	70.01029	-0.0187
3	0.4896	0.00528	92.72727	-0.0234

Taula 5.3.1.4

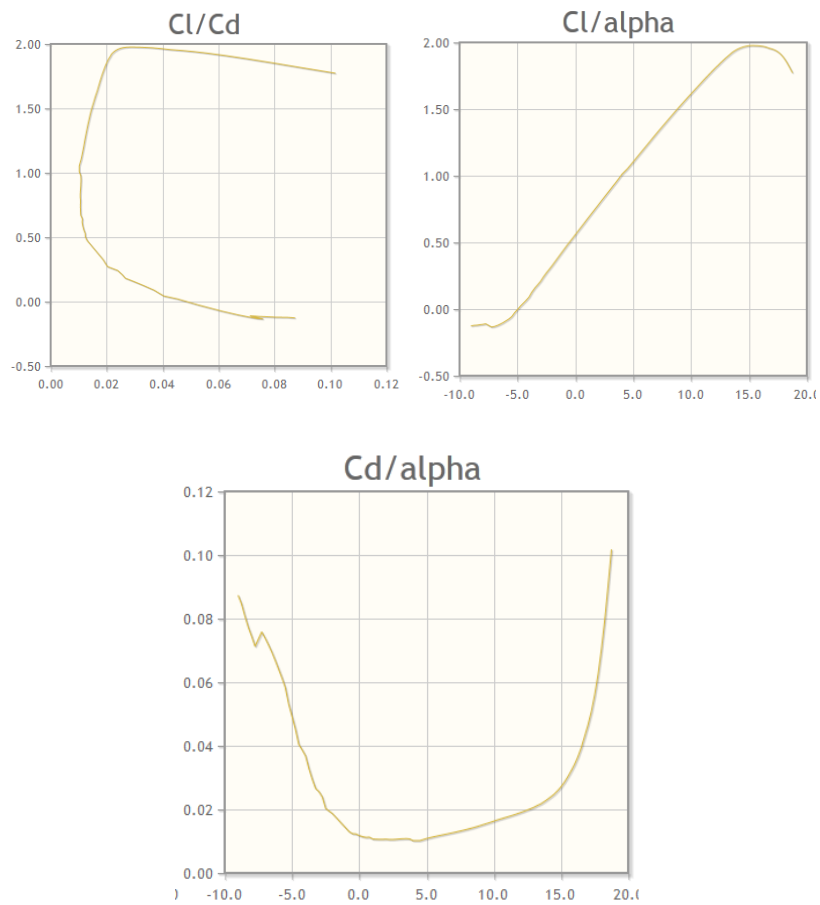


5.3.1.4 Gràfiques MH22

Wortmann Fx M2

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	C_M
0	0.5585	0.01179	47.37065	-0.0990
1	0.6718	0.01072	62.66791	-0.0984
2	0.7833	0.01066	73.48030	-0.0977
3	0.8948	0.01073	83.39236	-0.0970
4	1.0086	0.01018	99.07662	-0.0977
5	1.1044	0.01086	101.69429	-0.0941
7.25	1.3414	0.01297	103.42328	-0.0912

Taula 5.3.1.5

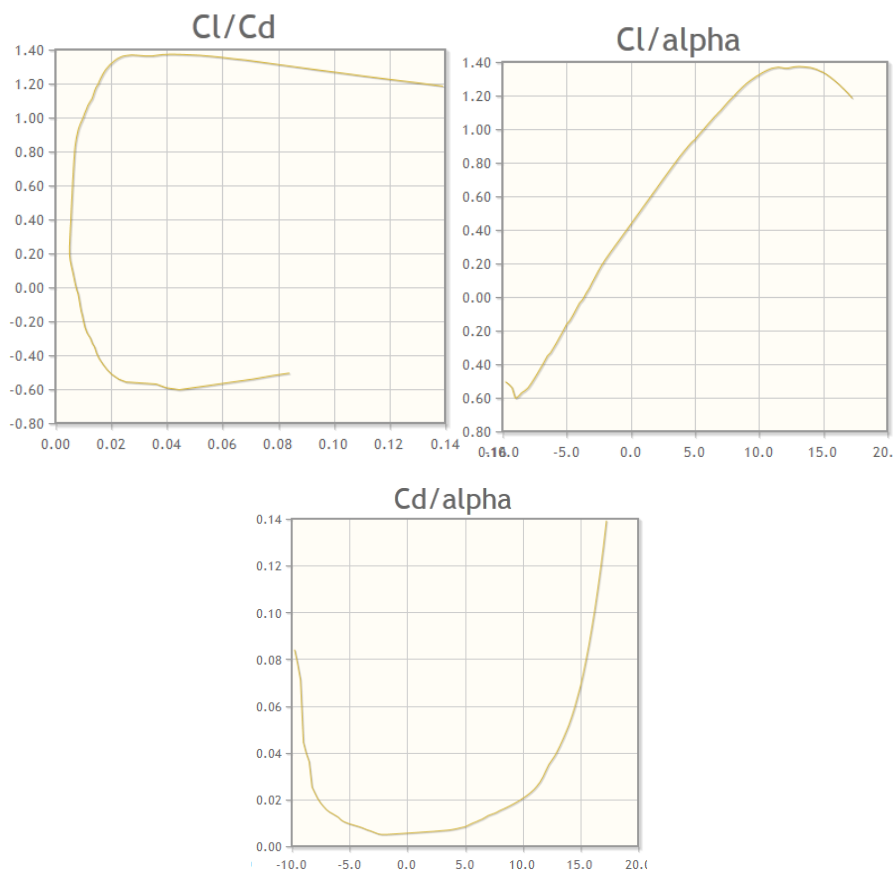


5.3.1.5 Gràfic Wortmann FX M2

E211

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	C_M
0	0.4214	0.00621	77.02847	-0.1035
1	0.5297	0.00649	90.91062	-0.1028
2	0.6371	0.00687	102.78662	-0.1020
3	0.7421	0.00747	112.79279	-0.1008
4	0.8403	0.00867	96.92042	-0.0986
5	0.9311	0.01049	88.76072	-0.0953
3.75	0.8185	0.00813	100.67651	-0.0996

Taula 5.3.1.6



5.3.1.6 Gràfiques E211

5.3.2 Perfils gruixuts.

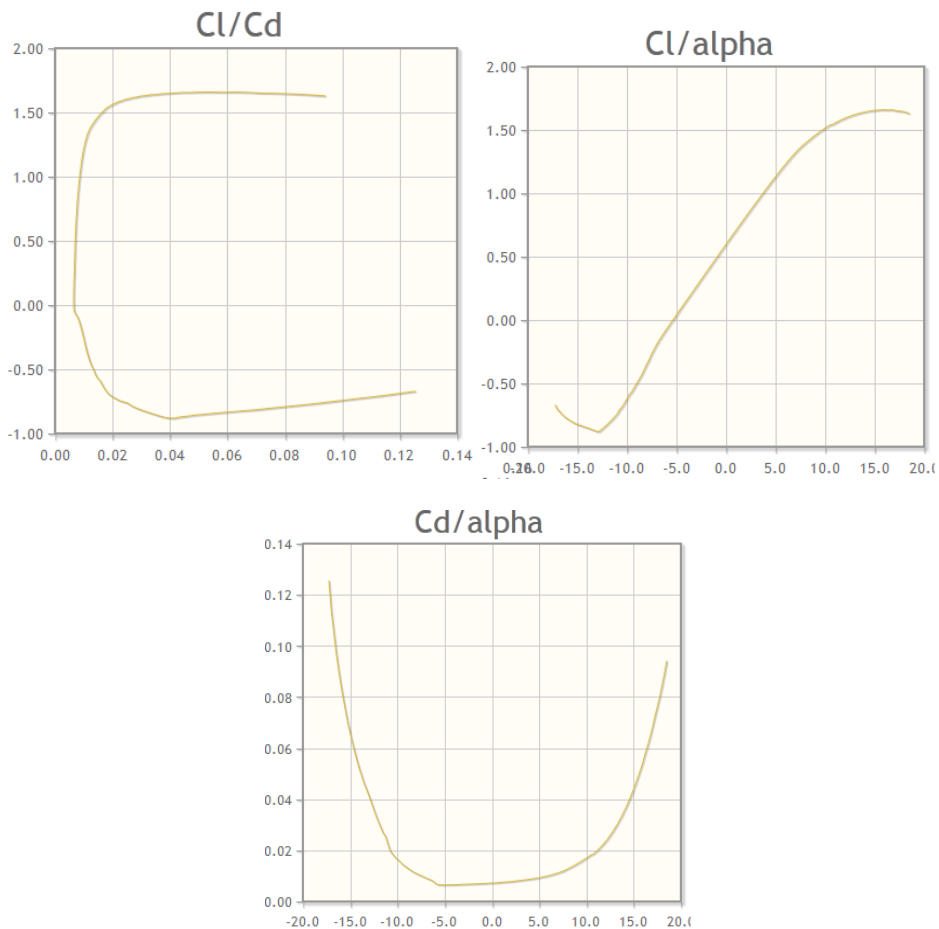
Aquests tipus de perfils pretenen ser més robustos, però donen més facilitat de maniobrar. El fet que aquests perfils siguin més amples, fa que provoqui un augment de la resistència a l'avanç, tot i que es compensa parcialment amb un augment del coeficient de sustentació.

A continuació es mostren els perfils gruixuts estudiats amb el DesignFoil:

EPPLER 557

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	C_M
0	0.5965	0.00720	82.84722	-0.1462
1	0.7061	0.00748	94.39840	-0.1457
2	0.8152	0.00778	104.78149	-0.1452
3	0.9220	0.00820	112.43902	-0.1443
4	1.0275	0.00868	118.37558	-0.1432
5	1.1296	0.00931	121.33190	-0.1432
5.5	1.1798	0.00966	122.13251	-0.01405

Taula 5.3.2.1

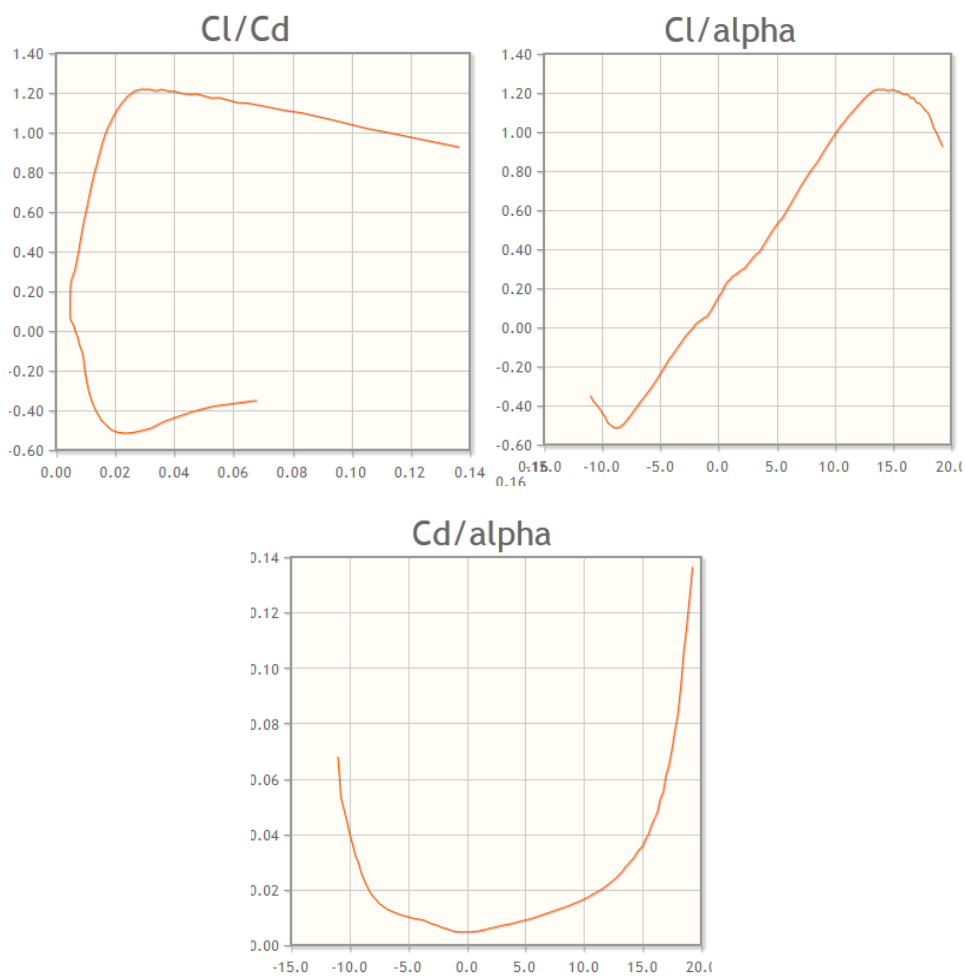


5.3.2.1 Gràfiques EPPLER E557

MH27

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	C_M
0	0.1542	0.00479	32.19207	-0.0306
1	0.2441	0.00506	48.24111	-0.0258
2	0.2955	0.00614	48.12704	-0.0122
3	0.3585	0.00709	50.56417	-0.0024
4	0.4330	0.00796	54.39698	0.0044
5	0.5257	0.00907	57.96031	0.0068
7.5	0.7625	0.01245	61.24498	0.0102

Taula 5.3.2.2

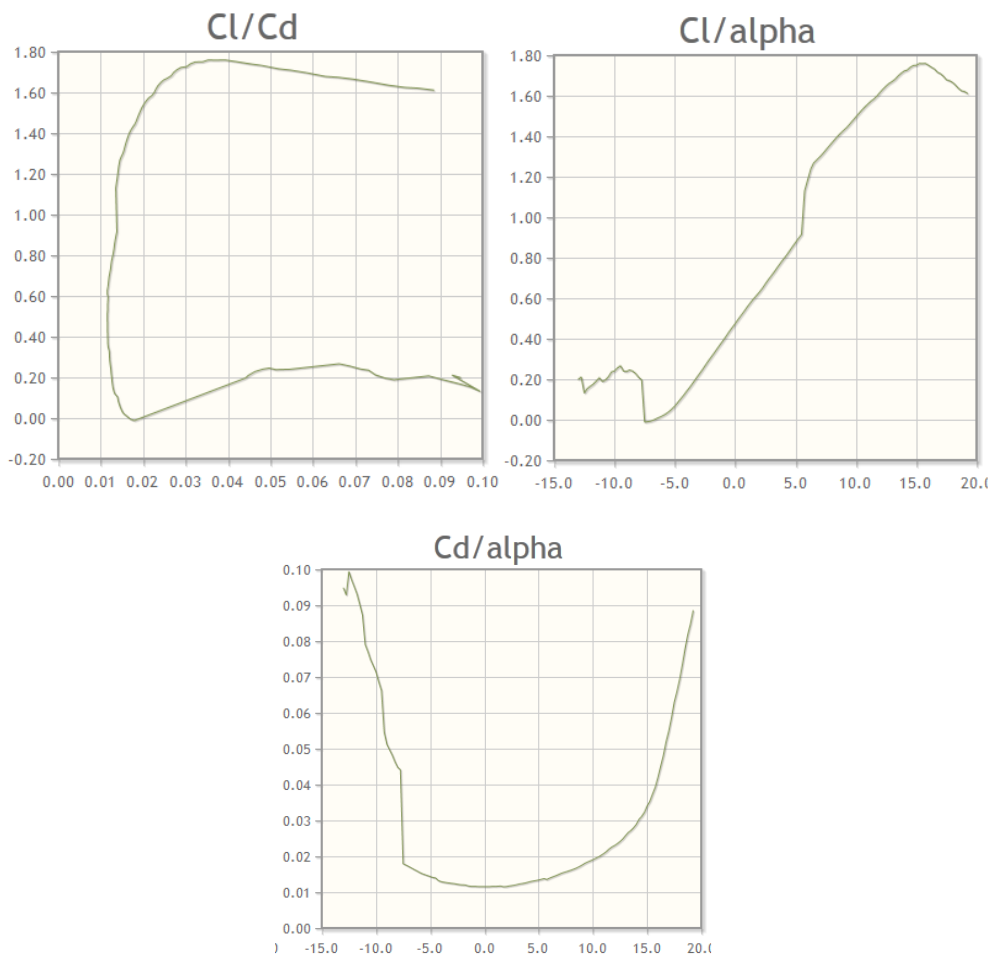


5.3.2.2 Gràfiques MH27

GOE511

Angle d'atac (°)	C_L	C_D	C_L/C_D	C_M
0	0.4742	0.01157	30.20382	-0.0607
1	0.5567	0.01161	47.95004	-0.0547
2	0.6294	0.01156	54.44637	-0.0471
3	0.7110	0.01212	58.66337	-0.0416
4	0.7925	0.01276	62.10815	-0.0364
5	0.8751	0.01341	65.25727	-0.0318
6.5	1.2673	0.01451	87.33977	-0.0846

Taula 5.3.2.1



5.3.2.3 Gràfiques GOE511

5.4 Paràmetres del perfil.

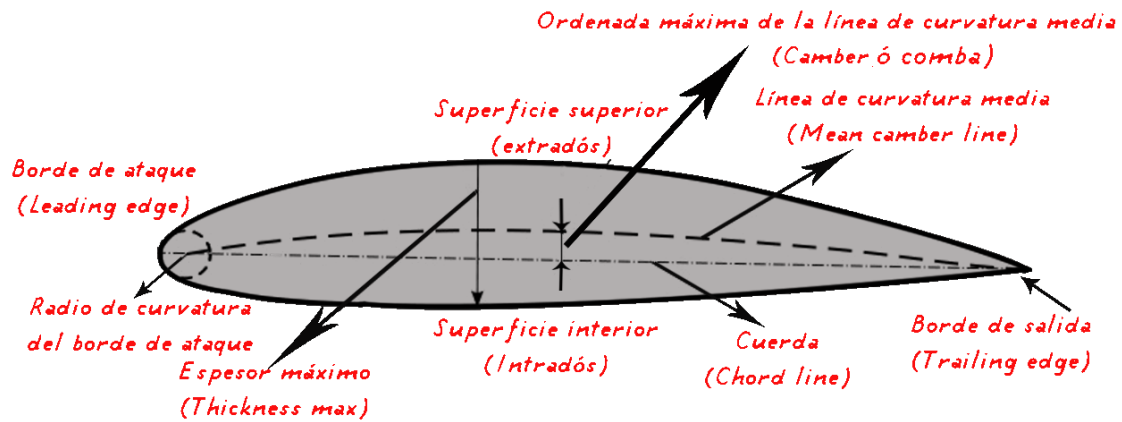


Figura 5.4.1

El fluid arriba al perfil i entra en contacte amb aquest pel caire d'atac. Aquest primer contacte tindrà molta importància en el seu rendiment ja que definirà, en part, la posterior expansió del fluid pel voltant del perfil. A l'altre extrem es troba el caire de sortida, punt del perfil pel qual el fluid pertorbat retorna a la corrent lliure. Entre el punt de caire d'atac i el de sortida es pot veure l'extradós (part superior del perfil) i l'intradós (part inferior del perfil). L'espessor màxim és la distància màxima que existeix entre l'extradós i l'intradós. Aquest espessor s'expressarà com un percentatge de la dimensió de la corda. La corda és la distància que hi ha entre el caire d'atac i el de sortida. L'angle d'atac és l'angle que formen la direcció de flux de l'aigua i la línia imaginària de la corda. Aquest angle pot fer variar l'acció de sustentació de l'aleta.

Serà important conèixer tots aquests paràmetres per a l'estudi, sobretot la corda i l'angle d'atac, juntament amb els paràmetres ja descrits anteriorment com són el coeficient de sustentació, o el de resistència al avanç.

5.5 Elecció dels perfils.

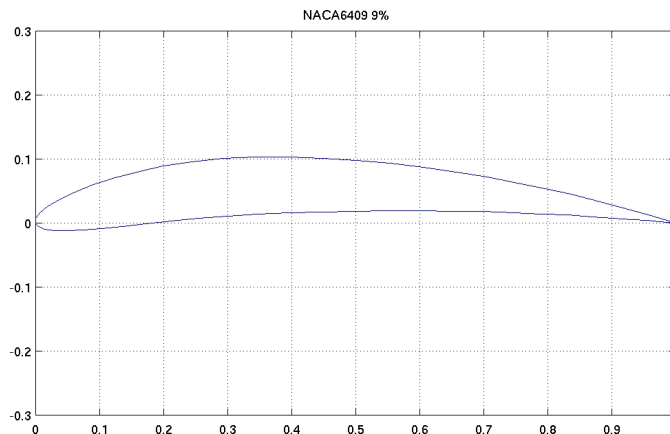
La primera família de perfils que s'ha eliminat ha estat la HN. El seu petit espessor ha fet que siguin eliminades ja que la seva fabricació resultaria costosa. Seguidament, han estat eliminades la família AG i HL.

També se sap que, tot i que el rendiment dels perfils no seran iguals en 3D que en 2D, aquest rendiment seguirà sent baix en 3D si ja ho era en 2D.

Perfil prim.

L'aleta de perfil prim és una decisió que pot resultar problemàtica degut a que una aleta massa prima pot resultar en una ruptura per flexió. És a dir, un perfil prim sofrirà una major deformació que un perfil gruixut sotmesos a la mateixa força. Tenint en compte aquest factor, el perfil que finalment s'escollirà serà el que doni el màxim rendiment.

Per tant, tenint en compte les taules donades anteriorment, el que es pot veure ràpidament és que el perfil NACA6409 és el que dona més sustentació i a la vegada menys resistència a l'avanç, arribant al rendiment màxim quan l'angle d'atac és de 5 graus. Tot i tenir un coeficient de moment més elevat que d'altres perfils estudiats, es considera que el rendiment és una prioritat a l'hora de triar el millor perfil, i el paràmetre d'aquest perfil supera amb creus qualsevol altre perfil.

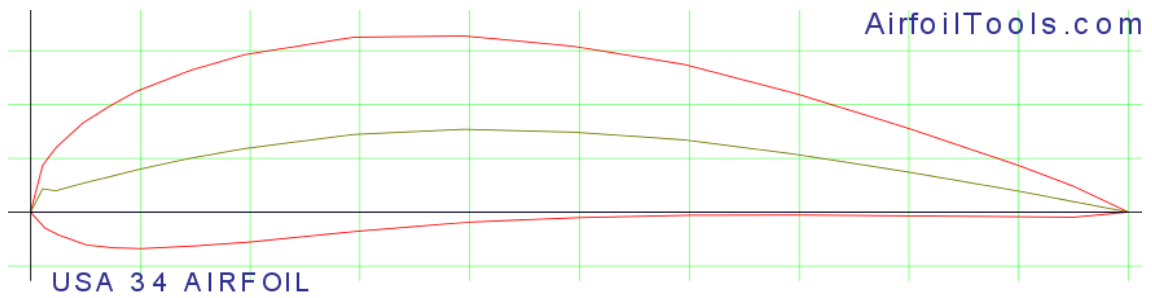


Taula 5.5.1

Perfil gruixut.

Aquesta opció suposa un perfil de no tant risc com el perfil prim, ja que tindrà més dificultat de trencar-se i no caldrà un disseny tan acurat, tot i que, probablement, comporti una lleugera baixada del rendiment. És per això que, en aquest cas, el paper del rendiment serà important però no tan decisiu a l'hora de triar el millor perfil.

El perfil que presenta més rendiment és l'EPPLER557. No obstant, aquest perfil crea un moment massa elevat que provocaria dificultats a la navegació. És per això que es decideix a descartar aquest perfil i decantar-se finalment pel perfil GOE511 que, tot i tenir un rendiment més baix, presenta també un moment molt més baix que el perfil EPPLER557.



Taula 5.5.2

5.6 Estudi dels paràmetres d'aletes en 3 dimensions.

Com s'ha dit, el rendiment d'una aleta no serà igual en 2D que en 3D, ja que el comportament del fluid no depèn només del perfil que defineix la seva secció: és important saber com influeix la forma en planta de l'aleta. És per això que un anàlisi d'una aleta en 3D es complica en comparació amb un estudi en 2D.

Primer de tot:

La resistència al avanç d'un cos (C_D) té dues components principals, la component de pressió i la de fricció.

$$C_D = C_{DPressió} + C_{Dfricció}$$

On:

- $C_{DPressió}$: També conegut amb el nom de resistència de forma. La diferència entre la zona d'alta pressió que es produeix en la zona d'estancament i la zona de baixa pressió que es produeix en la part posterior de separació del flux causa aquesta contribució a la resistència d'avanç. Depèn de la geometria del perfil i de la rugositat superficial.
- $C_{Dfricció}$: També conegut amb el nom de resistència de superfície. És la component tallant degut als esforços viscosos sobre la superfície del cos. Depèn de la forma de la planta i l'allargament, entre d'altres.

El percentatge d'influència de cada una de les components varia segons la forma del cos i, sobretot, del seu espessor. Per exemple, en cossos amb espessors petits, quasi el

total del coeficient de resistència al avanç serà de resistència de fricció, i la resistència de forma serà pràcticament 0. Això es deu a l'efecte del despreniment de la capa límit.

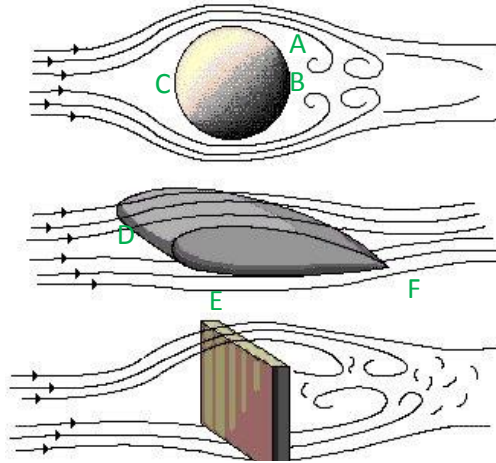


Figura 5.5.1

A la part AB d'esfera es produeix un efecte de despreniment de la capa límit, i apareix una zona de baixa pressió que no contribueix a compensar la sobrepressió existent a la zona CA frontal. Això crea una gran resistència de forma. En canvi, en aquest cas, la resistència de superfície és negligible.

En el segon cas, la sobrepressió a DE es compensa amb la sobrepressió existent a la zona EF ja que la capa límit no es desprèn, cosa que fa que la component majoritària serà la component de fricció.

En el tercer cas es pot veure que, igual que en el primer, es desprèn ràpidament la capa límit, el que provocarà que hi hagi més component de forma.

Per a un flux laminar, l'efecte de despreniment en cossos arrodonits és més vulnerable, ja que la capa límit és menys resistent als despreniments i la separació d'aquesta capa límit tendeix a produir-se abans, pel que la zona posterior sotmesa a depressió es major i, per tant, es compensa menys la sobrepressió frontal.

En canvi, una capa límit turbulenta és més resistent al despreniment, ja que la separació es produeix més tard, fet que suposa una menor àrea sotmesa a depressió, i per tant tindrà coeficients de resistència més baixos.

6. Simulació de les aletes en dos dimensions amb CFD.

6.1 Introducció al CFD.

Els comportaments dels fluids, ja sigui en estat líquid (aigua) o gas (aire), són modelats a través d'unes equacions de derivades parcials, anomenades Navier-Stokes, que representen tot el que s'ha estat parlant en tot l'estudi teòric, conservació de l'energia, massa i moment angular. El càlcul del comportament aerodinàmic de la taula de windsurf, s'hauria de realitzar a través d'aquestes complicades equacions per a cada punt de control a cada dt, cosa que comportaria una feina i un temps completament desorbitat. És per això que el disseny per simulació cobra tal importància. El que permet el CFD és poder deixar de treballar amb aquestes derivades parcials i canviar-les per una sèrie d'expressions aproximades que permeten arribar a unes solucions molt aproximades a les reals.

Aquestes simulacions es poden realitzar en qualsevol moment del procés, tant en estudis previs, com per redissenyar el model. Tot i així, l'ideal en un estudi és combinar aquestes simulacions via CFD amb estudis experimentals (túnels de vents, etc). El CFD hauria de ser un complement a les proves al laboratori per tal de reduir costos, esforços i temps.

Aquestes aproximacions que es duen a terme en la simulació es realitzen mitjançant el sistema d'elements finits. S'agafa un volum de control amb els seus corresponents elements finits, i en cadascun d'aquests es resolen una sèrie d'equacions, arribant a un resultat aproximat i molt similar a la solució real (error menyspreable).

L'anàlisi per simulació amb CFD consta de 3 etapes:

1. Pre-procés: Es constitueix la geometria (en aquest cas la geometria es realitza mitjançant el programa SolidWorks, i aquesta s'importa al CFD) i es crea la malla d'elements finits. S'apliquen les condicions de contorn necessària al voltant de la geometria d'aquest, i es defineixen les característiques del fluid amb el qual entrarà en contacte el model.
2. Solució: Es defineix el mètode de càlcul, optimització de les iteracions necessàries per aconseguir una solució suficientment aproximada amb les menors iteracions possibles. Realitzar masses iteracions provoca un augment en el temps que es necessita per realitzar la simulació, cosa que podria afectar en la productivitat de l'empresa o en l'allargament del projecte.

3. Post-procés: S'analitzen els resultats obtinguts en la segona etapa (solució). Es fan unes gràfiques determinades per les diferents propietats del fluid. Aquí es comparen els resultats obtinguts amb els aconseguits a la realitat per a poder validar el model i, a partir d'aquí, estudiar possibles millores del model.

6.2 Pre-procés 2D.

Inicialment s'ha realitzat la simulació en dos dimensions per a l'aleta GOE511. A continuació s'explicarà detalladament el procés que s'ha seguit per a la simulació.

Creació de la geometria.

El primer que es fa és inicialitzar el programa Ansys. Aquest programa dona dues opcions per tal de dur a terme aquest estudi: CFX i CFD. Com s'ha explicat, finalment s'ha pres la decisió de treballar amb CFD (o Fluent).

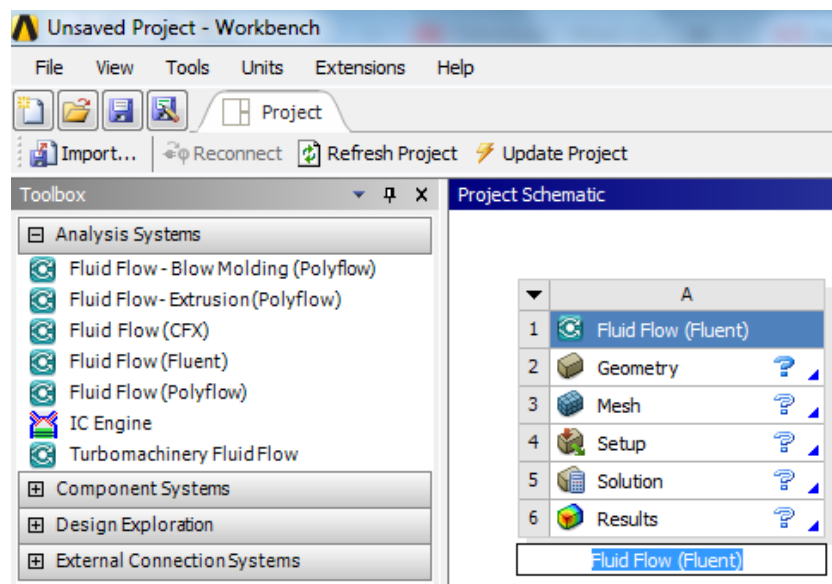


Figura 6.2.1

Com es pot visualitzar en la imatge, en el moment de triar la opció de Fluent, s'obre una finestra on es veu que el primer pas a realitzar és introduir la geometria del perfil que es voldrà estudiar. Aquesta geometria, com s'ha dit anteriorment, s'importarà d'un disseny ja creat usant el programari SolidWorks.

Creació del mallat.

És un dels passos més delicats del procés. Es tracta de dividir la geometria importada en diversos elements. És necessari crear un nombre d'elements suficientment nombrós com per què, mitjançant el mètode dels elements finits, s'arribi a una solució el més similar possible a la realitat. Tot i això, també s'ha de tenir en compte que

dividir la geometria en masses elements provocarà un increment de temps perdut en la resolució del problema. És per això que s'ha decidit crear una malla no uniforme, ja que la part que interessa haurà de tenir molts elements per a una simulació més precisa, mentre que quan un s'allunya del perfil, aquesta precisió deixa de ser tan important i en aquest cas no caldrà un refinament tan elevat. De cada node es podrà extreure diferents paràmetres com són la posició, velocitat, pressió...

En un entorn 2D, el mallat discretitza els subdominis en elements triangulars o bé quadrilaterals. Aquest fet implica que per a geometries corbes aquests elements representen tan sols una aproximació i, per tant, mai es podrà aconseguir una adaptació total a una geometria corba.

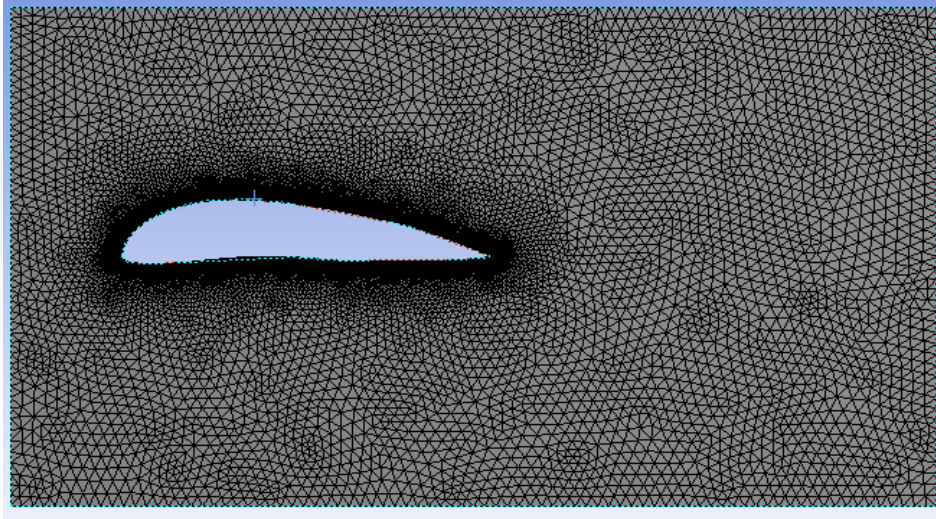
Mitjançant el mètode de la convergència, que consisteix en refinar el mallat i realitzar la simulació, es pot verificar l'eficiència del mallat. En el cas que s'apreciessin canvis en la solució, derivats del refinament del mallat, significaria que la solució és dependent de la malla, amb la qual cosa s'hauria de realitzar un mallat més fi.

A l'hora de fer el mallat, el primer que s'ha fet ha estat generar el mallat que crea el programa per defecte. Al ser un mallat massa poc precís, s'ha hagut de modificar la mida dels elements i realitzar una sèrie de refinats, precisant més en els punts més propers al perfil.

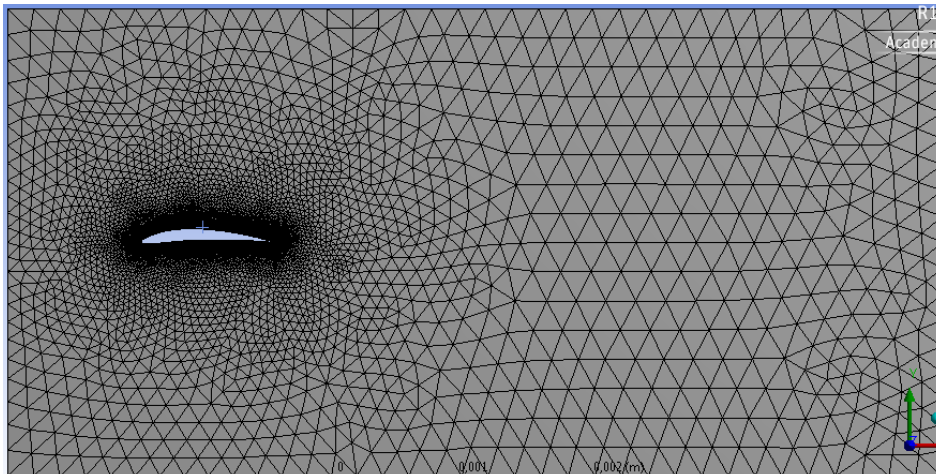
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Initial Size Seed	Active Assembly
Smoothing	High
Transition	Slow
Span Angle Center	Fine
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sources	Faces and Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	6,0562e-007 m
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	6,0562e-007 m
<input type="checkbox"/> Max Face Size	6,0562e-005 m
<input type="checkbox"/> Max Size	1,2e-004 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)

Figura 6.2.2

A part de canviar les mides, també s'ha fet un refinat a la cara a estudiar del perfil, les corbes del perfil i el vèrtex.



6.2.3 Mallat GOE511



6.2.4 Mallat NACA6409

Implementació de les condicions de contorn.

Un cop mallat el disseny, s'han de generar les condicions de contorn de la geometria; s'ha d'especificar què és cadascun dels elements i cares creades del volum de control (entrada i sortida del fluid, simetries, etc.):

- Velocity-inlet: Es col·loca aquest element a la cara per on s'introdueix el fluid. Aquesta superfície ha de ser perpendicular a la direcció del flux i, en l'estudi, és la cara que queda més propera a l'aleta.

- Pressure-outlet: Element encarregat de retirar el fluid el qual, davant d'una possible pèrdua de càrrega dins l'estudi, pot limitar la pressió de sortida. Ha de ser també perpendicular a la direcció del flux.
- Wall: S'utilitza per representar superfícies sòlides on s'adhereix el flux les quals influeixen directament al seu comportament.
- Symmetry: Com diu el nom, s'utilitza en les cares on hi ha simetria, però també s'usa en les cares frontals per evitar pèrdues laterals .

Per tal d'implementar les condicions de contorn ja descrites, s'usen uns paràmetres específics del CFD:

- Pressure-based, per a fixar el flux com a incompressible (densitat constant).
- Absolute Velocity formulation, ja que es treballa en referència absoluta, és a dir, fora del sistema.
- Viscous-laminar → k-epsilon.
- Fluid: water → density: 1027 kg/m^3 .
Dynamic viscosity: $0.00115 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$.
- Velocity: 12 m/s .
- Gauge pressure: 0 Pa (pressió relativa).
- Intensity and Viscosity Ratio: es tria aquesta opció perquè s'utilitza en casos de fluids externs. A la intensitat es recomana triar un nombre entre l'1% i el 5%, mentre que la viscositat se sol posar entre 1 i 10.

6.3 Solució.

Un cop definits aquests conceptes, s'ha d'imposar una solució inicial per després executar els controls i estudiar convergències. Les solucions de les equacions del sistema s'obtenen mitjançant un procés iteratiu que requereix temps i iteracions per aconseguir la solució. Es pot assegurar que s'ha arribat a la convergència (a la solució) quan els canvis de les variables de la solució d'una iteració i de la següent són nuls o quasi nuls (diferències negligibles). Per donar fe d'aquests canvis, el fluent va mostrant els residus de les solucions.

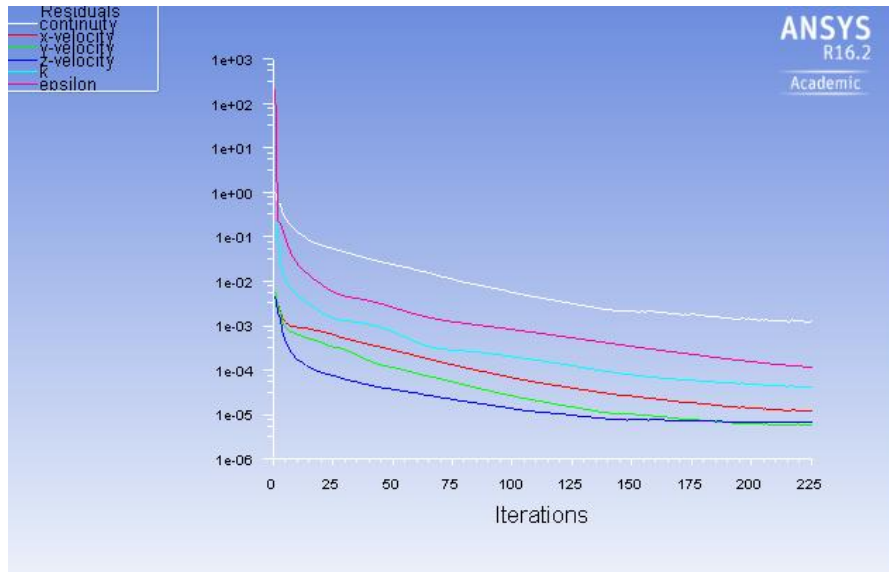


Figura 6.3.1. Residus GOE511

Aquests residus de velocitat i de continuïtat han de disminuir en tot moment per a assegurar-se que s'està realitzant una bona simulació.

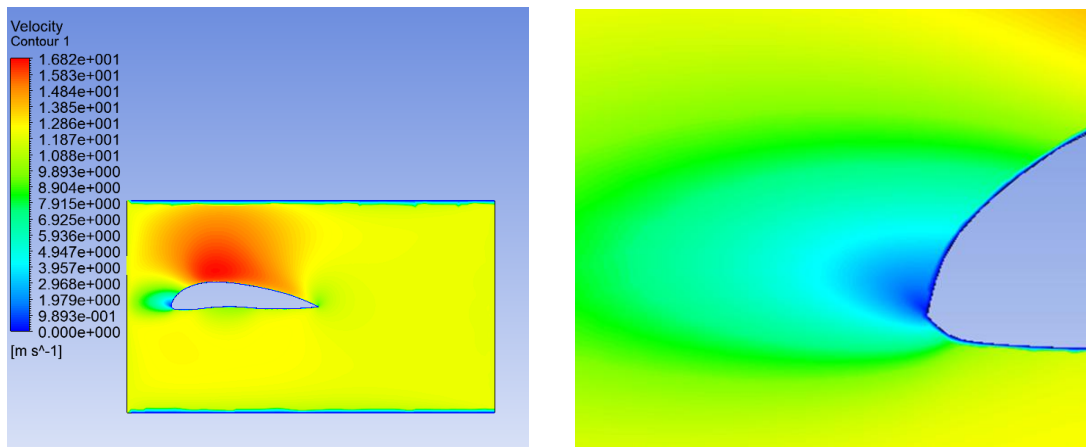
En el cas del perfil NACA6409 també es comprova que, efectivament, els residus disminueixen.

6.4 Anàlisi dels resultats.

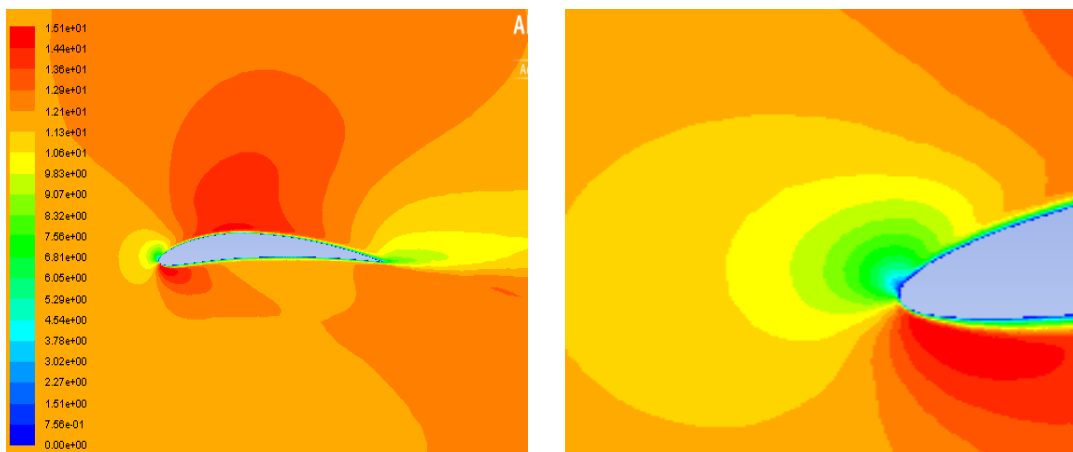
Aquest darrer pas consisteix en visualitzar els resultats, per analitzar-los i per considerar posteriors revisions al model utilitzat.

Dins dels anàlisis dels resultats, s'han d'estudiar més en profunditat tant l'anàlisi de velocitats com els de pressió, ja que aquests permetran, més tard, comparar-los amb les dades experimentals i, per tant, corroboraran si s'està fent bé les simulacions o no.

6.4.1 Perfil de velocitats (2D)



6.4.1.1 Perfil de velocitat GOE511



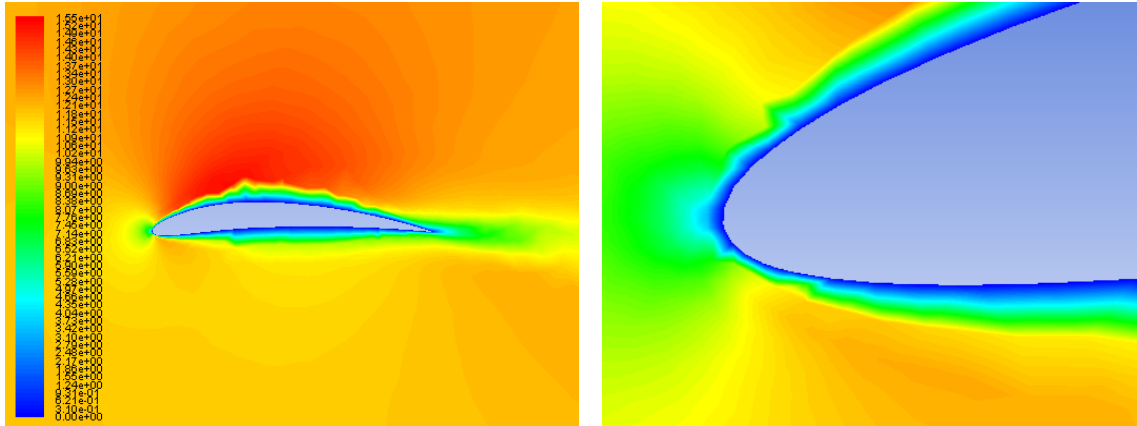
6.4.1.2 Perfil de velocitat NACA6409

Com es pot veure a les imatges, el punt d'estancament es troba a la part de davant del perfil, on les velocitats s'arriben a anul·lar, mentre que a l'extradós, la velocitat augmenta i arriba a una velocitat major dels 12m/s. Com les velocitats del fluid ha de ser igual just al sortir del perfil tant per la superfície de l'extradós com la de l'intradós, i la longitud de les línies de corrent és més gran a l'extradós, és lògic poder observar com la velocitat a l'extradós guanya a la velocitat de l'intradós.

S'observa que, en el nostre estudi, el que està en moviment és el fluid, mentre que el perfil està aturat. És per això que, al voltant del perfil, es pot apreciar una velocitat nul·la (capa blava).

Les mateixes simulacions s'han fet amb diferents angles d'atac. Es pot observar que la diferència de velocitats augmenta a mesura que elevem aquest angle d'atac. Aquest fet és provocat ja que el punt d'estancament es desplaça cap a baix, és a dir, cap a l'intradós. Això provoca que les línies de corrent de l'extradós augmentin de longitud, el qual implica que la velocitat per aquesta zona també s'elevi consegüentment.

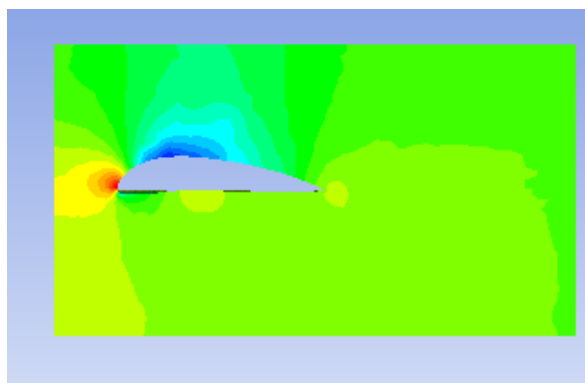
Aquest canvi de perfil de velocitats també comporta un canvi en el perfil de pressions; com més s'augmenti l'angle d'atac, es crearà una força de sustentació més gran.



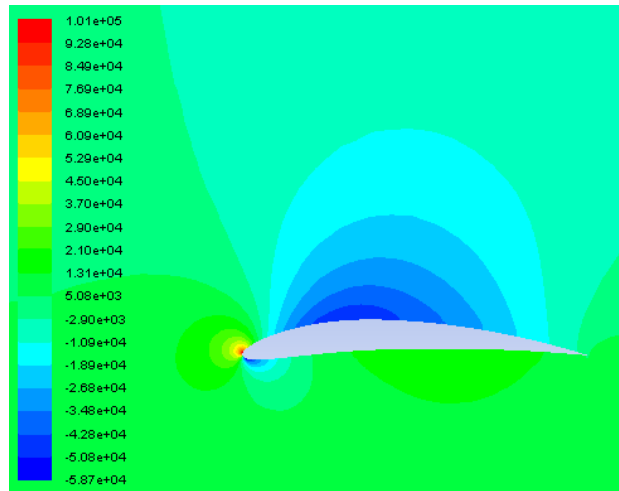
6.4.1.3 Perfil de velocitat NACA 6409 a 4º

També es pot observar que amb aquest angle amb el qual s'ha treballat, en cap moment es produeix la separació de capa límit. Se sap ja que quan aquest fenomen es produeix, apareixen unes velocitats en sentit contrari a l'entrada del fluid que no es poden apreciar en l'estudi.

6.4.2 Perfil de pressions (2D)



6.4.2.1 Gràfic de pressions GOE511

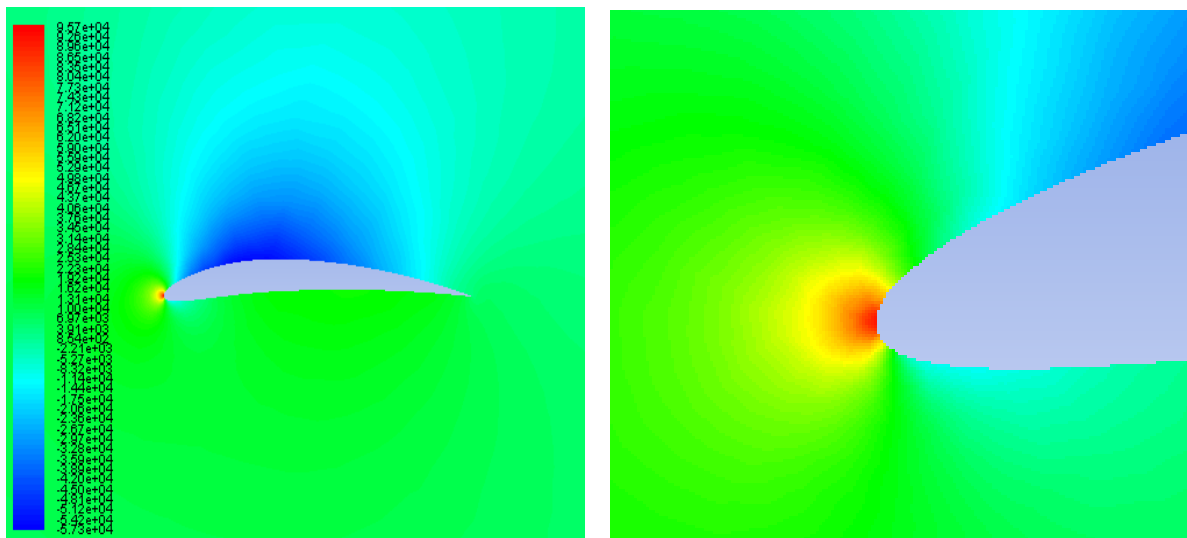


6.4.2.2 Gràfic de pressions NACA6409

La diferència de velocitats que es crea degut a les longituds que les línies de corrent han de recórrer provoquen que també es creï una diferència de pressions. Després del punt d'estancament, on la pressió augmenta de manera accentuada, la velocitat sofreix un sobtat canvi tant de mòdul com de direcció. Això comporta que a l'extradós hi hagi una baixada de pressió considerable.

Augmentant l'angle d'atac, aquesta depressió de la pressió anirà fent-se més gran.

També es pot veure que, en el punt d'estancament, es crea una pressió elevada. Aquest canvi de pressió ajudarà a la creació de la força de sustentació.



6.4.2.3 Gràfic de pressions NACA6509 a 4°

Per altra banda, com s'ha detallat, la velocitat a la zona de l'intradós serà més petita, ja que les línies de corrent seran més petites que a l'extradós per arribar a la sortida del perfil, on les dues velocitats han de coincidir. El fluid intercanvia quantitat de moviment per a augmentar la pressió a l'intradós creant a la vora d'atac una zona de sobrepressió. A la vora de fuga, la capa límit se separa de la superfície del perfil i es forma una estela. Això fa que les línies de corrent de flux siguin empeses cap enfora i s'alteri la distribució total de pressions. La pressió en aquella zona és baixa i quasi constant.

Aquesta conservació s'explica amb el teorema de Bernoulli, i serà molt útil utilitzar aquesta equació per confirmar si s'ha realitzat correctament la simulació:

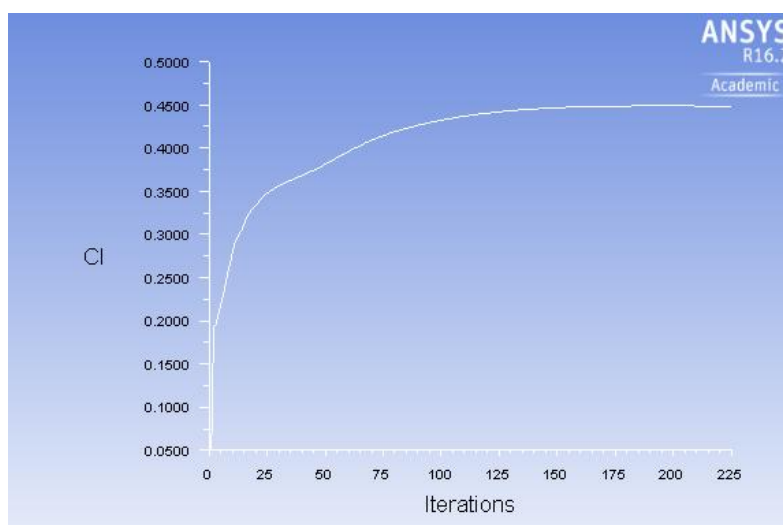
$$V = 12 \text{ m/s} ; g = 9.81 \text{ m/s}^2 ; \gamma = \rho \cdot g = 1027 \cdot 9.81 = 10074.25 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}^2$$

Fent els càlculs, $P_1 = 73939 \text{ Pa}$, nombre similar al obtingut al perfil GOE511, que és de 93000 Pa .

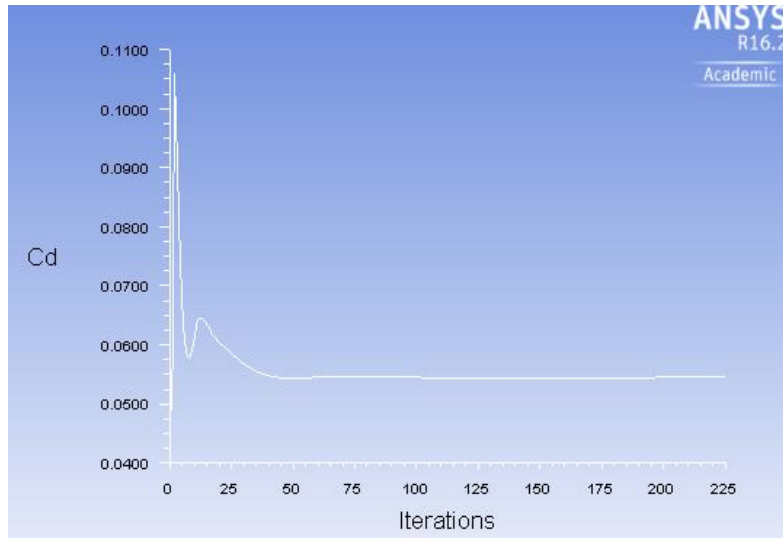
L'error sorgit té com a origen que, en la simulació, s'ha triat un model viscos, mentre que l'equació de Bernoulli considera uns esforços viscosos nuls. Hi ha altres coses que fan que aquesta comprovació no sigui del tot precisa, però es va considerar una manera ràpida i eficaç de corroborar els resultats obtinguts a la simulació.

6.4.3 Coeficients de resistència i sustentació.

Un altre instrument per a considerar els resultats com a correcte és l'estudi del coeficient de sustentació i de resistència al avanç.



6.4.3.1 CL del GOE511 a 0º



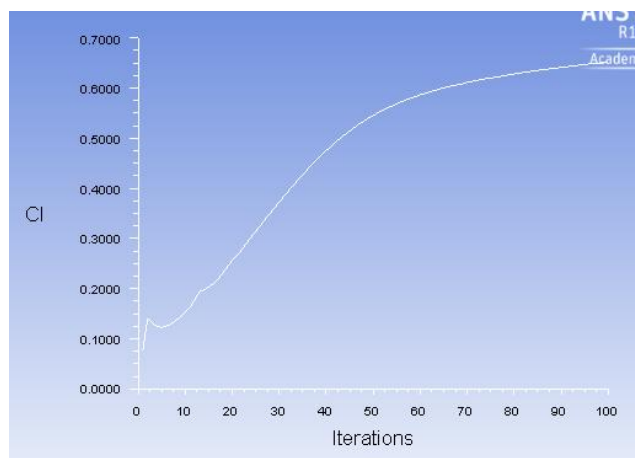
6.4.3.2 CD del GOE511 a 0º

Es pot observar que els resultats donen un C_L de 0.4824, nombre molt similar al que s'havia vist amb el programa DesignFoil, que era de 0.4742.

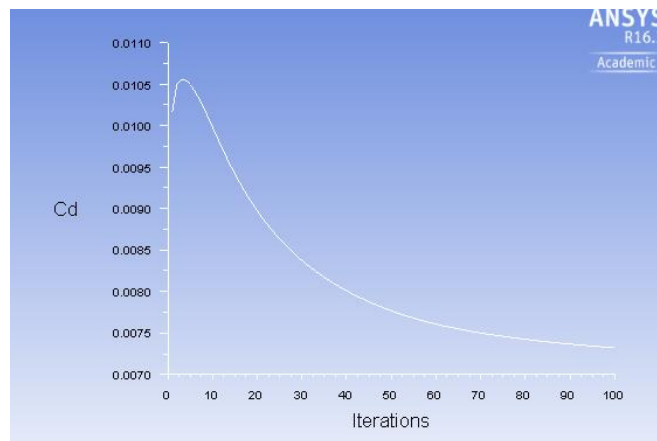
D'altra banda, el C_D obtingut ha estat de 0.054, mentre que s'havia previst $C_D = 0.01157$. Tot i ser una solució no tan precisa com el C_D , s'ha considerat una aproximació suficient per donar-la com a correcta.

Similars resultats s'han obtingut del perfil prim NACA6409. El C_L referència era, a 0 graus, de 0.6790, mentre que el coeficient de resistència a l'avanç que es tenia establert era de 0.007.

Els resultats obtinguts a la simulació d'aquest perfil són els següents:



6.4.3.3 CL del NACA6409 a 0º



6.4.3.4 C_D del NACA6409 a 0°

Es pot observar en aquests gràfics que el C_L que s'obté és de 0.65197, nombre molt proper al que s'havia marcat, 0.6790.

També es pot dir que s'ha aconseguit un bon resultat amb el C_D ja que la simulació dóna un nombre de 0.0074 (0.007 previst).

7. Simulació CFD en 3 dimensions.

A l'hora de donar forma a una aleta de tal forma que aquesta pugui assolir els objectius de l'estudi, es tractarà, principalment, de maximitzar la sustentació i minimitzar la resistència al avanç. Partint d'això, s'intentarà donar una forma en planta de 3 dimensions, usant com a base els perfils d'aleta que han estat escollits anteriorment. S'escolliran diverses formes de planta comunament usades amb l'objectiu d'analitzar les seves prestacions i saber quina forma serà la més adient.

Mitjançant, de nou, el programa Ansys, es portaran a terme unes simulacions de manera similar a les ja emprades en l'estudi dels perfils alars. Aquestes simulacions s'usaran per a obtenir les forces de resistència a l'avanç i la de sustentació i, a partir d'aquests resultats, es triaran les aletes més favorables per a l'estudi.

7.1 Dimensions de les aletes.

L'objectiu principal d'aquest projecte és el de dissenyar una aleta que tingui unes característiques que permeti anar el més ràpid possible (és a dir, tenir un alt rendiment hidrodinàmic), mantenint una certa estabilitat que permeti que no només els més experimentats siguin capaços de utilitzar-la. S'utilitzaran 3 tipus de disseny: trapezoïdal, el·líptica i mitja lluna. Aquesta última és la forma que normalment tenen les aletes dels animals marins, les quals els permeten aconseguir la velocitat adequada. A partir d'aquestes 3 bases, s'intentarà optimitzar l'angle d'atac de cadascuna i s'estudiarà les línies d'atac per a aconseguir trobar el millor resultat possible pel nostre projecte.

Influència de la profunditat de l'aleta en la navegació

En una taula de windsurf, no existeix una profunditat d'aleta ideal. Primer de tot, com ja s'ha explicat, la profunditat adequada depèn de si l'objectiu és aconseguir velocitat o facilitat de maniobra. Però a més d'això, una aleta ideal dependrà de moltes coses: velocitat del vent, superfície de la vela, pes del windsurfista, tècnica, etc.

Per exemple, en situacions de poc vent, l'aleta ideal tendria a ser més profunda. Tot i així, el poc vent requerirà tenir una vela més gran, el que comportarà una major resistència a l'avanç.

Un windsurfista d'alt pes, podrà aplicar una major força sobre l'aleta, fet que, a partir d'una determinada velocitat, repercutirà en una generació més elevada de la sustentació. Tot i així, com és habitual, no tot és tan fàcil. Si s'aplica una força massa elevada a l'aleta, arribarà un moment on la força aplicada serà més gran que la màxima força de sustentació que l'aleta és capaç de generar. Quan succeeix aquest fet, l'aleta pot entrar en pèrdua i crear-se el fenomen del spin-out. És per això que, una

persona de més pes, li convé una aleta més llarga, la qual tindrà més capacitat de sustentació, i li serà més difícil arribar a aquest punt de pèrdua. Tot i així, un windsurfista professional tindrà bastant controlat aquest aspecte i no tindrà, en principi, problemes d'aquest tipus. A mesura que es guanya experiència en aquest esport es tendirà a reduir la profunditat per tal de guanyar velocitat.

Un fenomen també important que cal evitar en el moment de crear la forma i profunditat de planta és el de cavitació. Aquest fenomen es produeix quan l'aigua arriba a l'aleta. En el moment de passar, es produeix una descompensació del fluid degut a la conservació de Bernoulli. La part de l'extradós sofrirà una pèrdua notable de pressió per a compensar la velocitat que obtindrà respecte l'intradós. La cavitació es crea en el moment que aquesta pressió baixa tant que s'arriba a la pressió de vapor d'aigua, és a dir, l'aigua del voltant de l'aleta es transforma a vapor.



Figura 7.1.1

Una de les conseqüències d'aquest fenomen és la pèrdua d'eficiència.

L'aleta es pot posar i treure fàcilment, així que un windsurfista usarà una aleta o una altra dependent de les condicions ambientals que es trobarà al moment de practicar-lo.

S'han fet ja estudis que relacionen la millor profunditat d'aleta per superfícies de la vela, i els resultats giren al voltant d'entre 40 i 65 cm en un windsurfista estàndard. Tot i així, per a aconseguir grandíssimes velocitats, s'arriben a utilitzar aletes de només uns 20 cm.

7.2 Aletes escollides.

Preliminars

Els perfils de 2D escollits han estat els perfils de gran rendiment C_L/C_D trobats amb el DesignFoil. Això comporta que la superfície de l'aleta pugui ser més petita. L'àrea utilitzada per al càlcul dels coeficients ha estat de 0.012 m^2 per als 6 casos.

Les aletes que se simularan, com s'ha explicat, seran de 3 formes diferents: trapezoïdal, el·líptica i mitja lluna.



7.2.1 Diferents geometries d'aletes

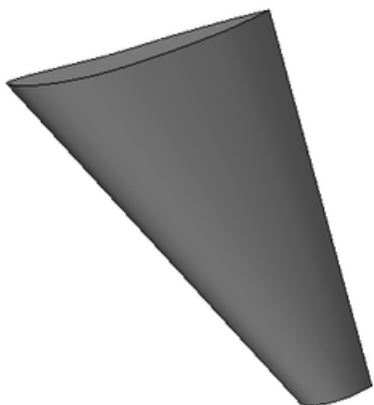
El següent punt important és la longitud de la corda de l'aleta. Aquesta variarà segons la forma que tingui la planta de l'aleta. Per exemple, per a l'aleta trapezoïdal s'usarà una corda de longitud 63mm, que és la que s'usa generalment per aquest tipus de forma. Per a les altres dues formes, s'usarà una longitud de corda de 70mm.

Aletes proposades

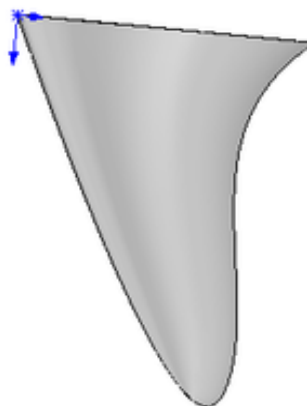
Com s'ha dit, les aletes s'han generat a partir dels perfils 2D que han estat escollits com els idonis per a l'estudi. S'han escollit els dos millors perfils amb gruixos diferents en quant a les prestacions obtingudes.

- GOE511: perfil gruixut
- NACA 6409: perfil prim

Amb aquests dos perfils s'han generat fins a sis aletes diferents, amb tres formes d'aleta per a cada secció. A continuació es mostren les sis aletes realitzades mitjançant el SolidWorks.



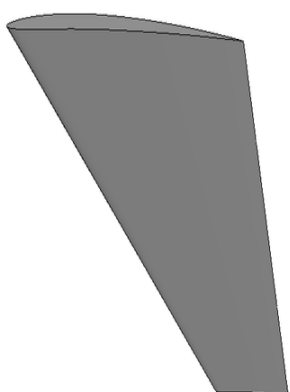
7.2.2 GOE511 trapezoïdal



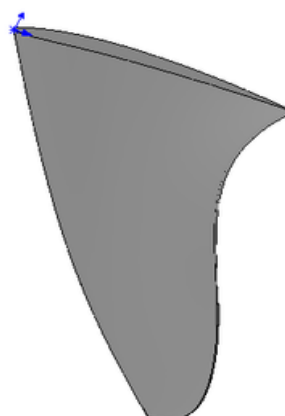
7.2.3 GOE511 mitja lluna



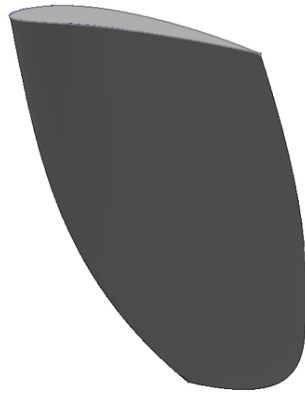
7.2.3 GOE511 el·lipse



7.2.4 NACA6409 trapezoïdal



7.2.5 NACA6409 mitja lluna



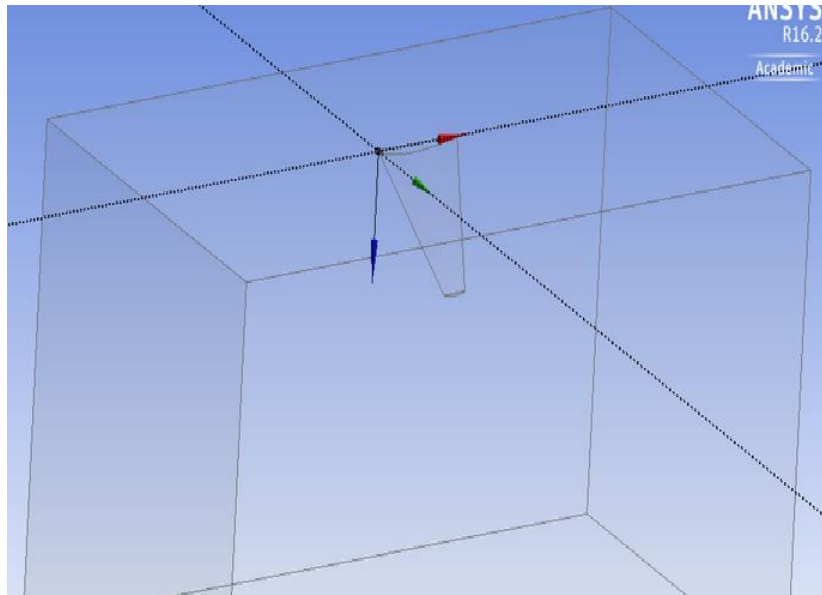
7.2.6 NACA6409 el·lipse

7.3 Pre-procés 3D.

El procediment a l'hora de realitzar la simulació d'una aleta en 3D és pràcticament el mateix que el dut a terme amb l'estudi dels perfils en 2D. Així doncs, s'ha realitzat primerament la simulació en 3D per a l'aleta GOE511 amb forma trapezoïdal tal i com s'explica a continuació.

Creació de la geometria.

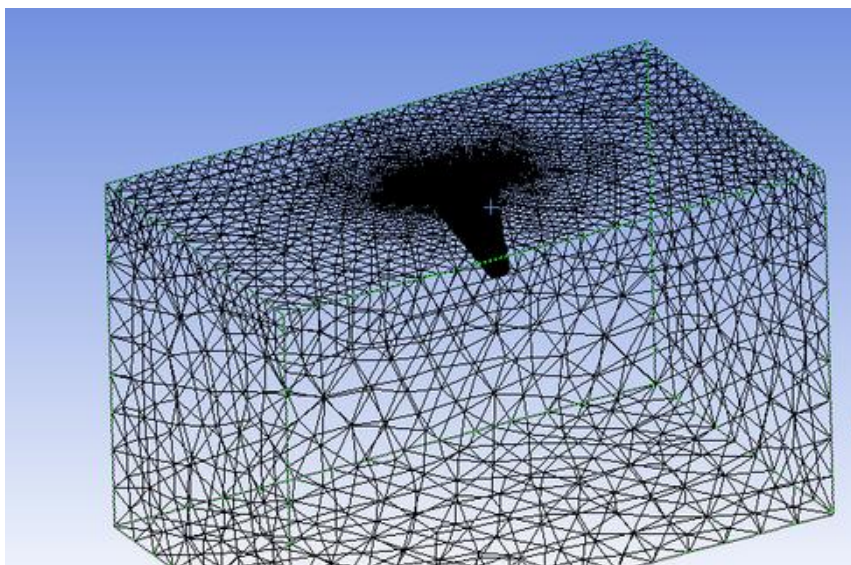
Es crea la geometria determinada depenent del tipus d'aleta que es vol dissenyar (trapezoïdal, el·líptica o mitja lluna) mitjançant SolidWorks. Un cop obtingut el disseny, per a aconseguir el volum de control al voltant de l'aleta es realitza mitjançant el Workbench. S'importa la geometria del SolidWorks i mitjançant la funció 'Enclosure' es crea un volum de control al voltant de la peça en totes direccions excepte la del pla de la part superior de l'aleta. S'ha construït el disseny així ja que d'aquesta manera es podrà simular d'una millor manera que aquesta part superior de l'aleta no entra en contacte amb el fluid sinó que està en contacte amb la taula de windsurf. Un cop creat, amb la funció 'Boolean' es buida el volum que conté l'aleta mitjançant l'opció *subtract*.



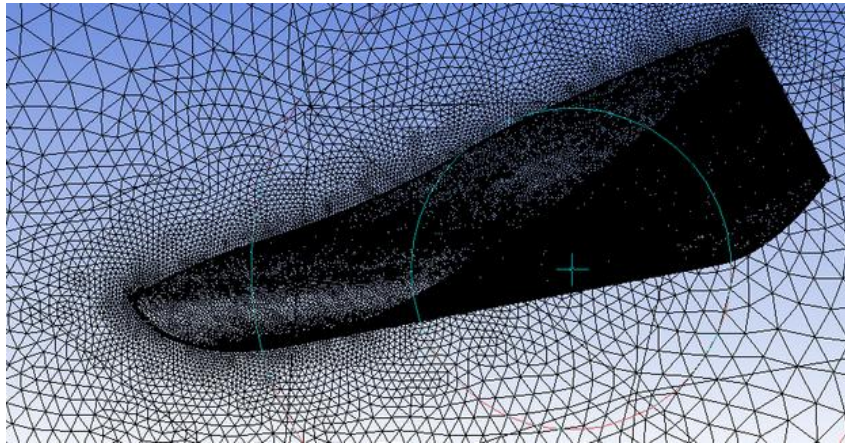
7.3.1 GOE511 trapezoïdal

Creació de la malla.

El primer que s'ha de fer és ajustar la malla del volum de control. La quantitat de nodes que s'hauran d'utilitzar serà molt elevada, així que haurem de posar especial atenció a la concentració de nodes en determinades zones. Es farà que aquesta concentració augmenti a mesura que es va apropant a l'aleta. Així s'aconsegueix un mallat més adaptat a la geometria, on el mallat s'intensifica en zones de grans gradients i comportaments turbulents. Aquest mallat també ha de ser el suficientment precís per a que descrigui el millor possible les línies de corrent per tal de minimitzar l'error en els resultats.



7.3.2 GOE511 trapezoïdal mallat



7.3.3 GOE511 trapezoïdal mallat

Implementació de les condicions de contorn.

S'imposen els paràmetres oportuns de velocitat, pressió, etc., tenint en compte que la part superior de l'aleta no interactua amb el fluid ja que està en contacte amb la taula.

- Velocity-inlet: la part frontal, per on ve el fluid i on entraran en contacte l'aigua i l'aleta.
- Pressure-outlet: part posterior, per on se'n va el fluid, on deixaran d'estar en contacte l'aigua amb l'aleta.
- Wall: part superior, que està en contacte amb la secció de l'aleta, i inferior del volum de control.

Abans de començar amb l'execució de la solució, s'ha seleccionat el model de turbulència més adequat per l'estudi (k-epsilon, igual que en el cas de 2D), s'han definit les propietats del fluid (propietats de l'aigua de mar), i s'han establert les condicions d'operació i de contorn. És a dir, pràcticament tot igual a l'estudi realitzat en 2D.

Igual també que en el cas de 2D, trobar la solució correcta dependrà del bon plantejament del problema, del bon modelat i mallat.

La diferència amb l'estudi de 2D estarà en què els resultats que s'obtinguin no podran ser corroborats pels diferents programes usats en 2D on ja havien estat estudiats tots els perfils. Així que el procés s'haurà de portar a terme amb molta cura i, un cop obtinguts els resultats, assegurar-nos que els resultats són correctes.

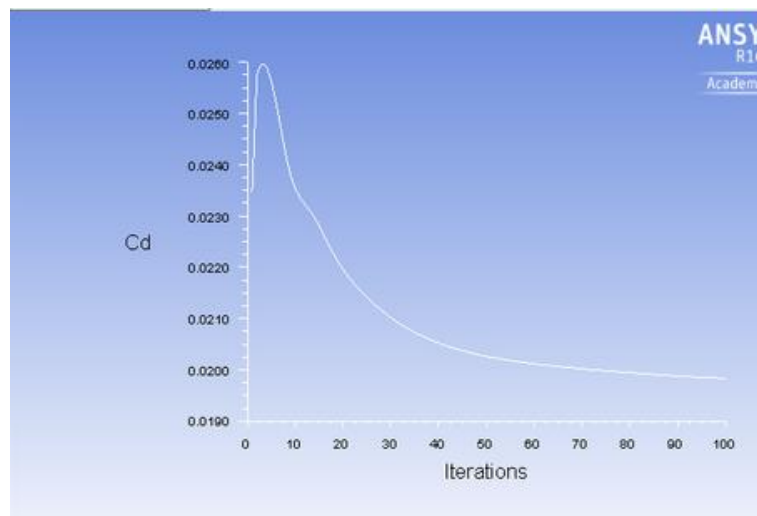
A l'Annex 1 s'incorporen els volums de control i els mallats que s'han realitzat per a les altres cinc aletes.

7.4 Anàlisi dels resultats.

GOE511 trapezoïdal

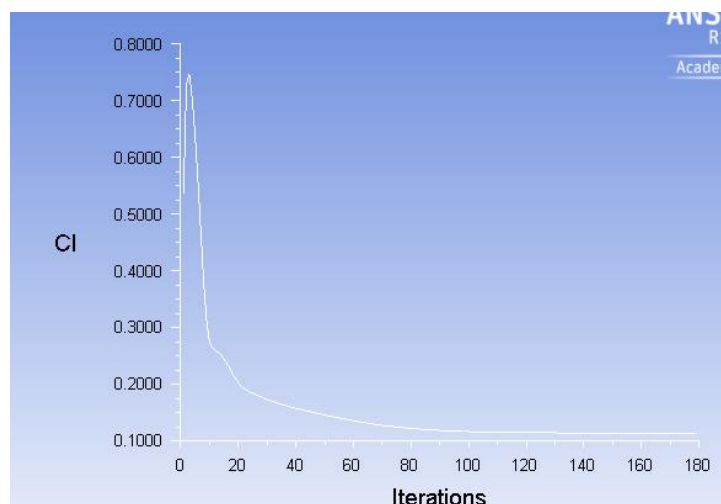
Un cop s'ha realitzat la simulació, s'han analitzat els resultats obtinguts posant més èmfasi en els valors de C_D i C_L , ja que són aquests els que faran decidir sobre quina de les aletes dona un rendiment major. A més, s'han calculat aquests coeficients variant els angles d'atac, des de 0° fins a 4° . A continuació es mostren les imatges dels coeficients amb un angle d'atac de 0° .

$$C_D = 1.983 \cdot 10^{-2}$$



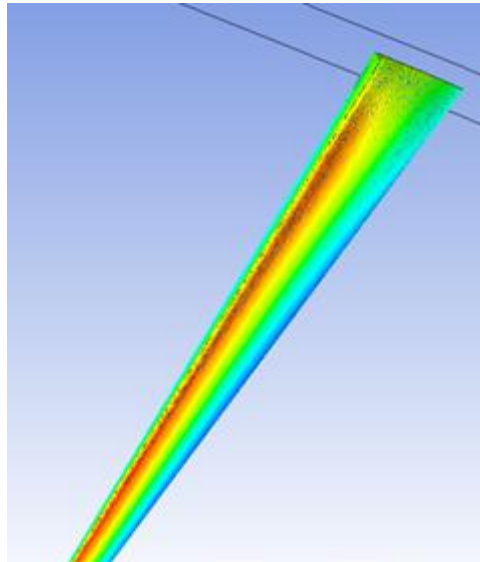
7.4.1 C_D GOE511 trapezoïdal

$$C_L = 1.306 \cdot 10^{-1}$$



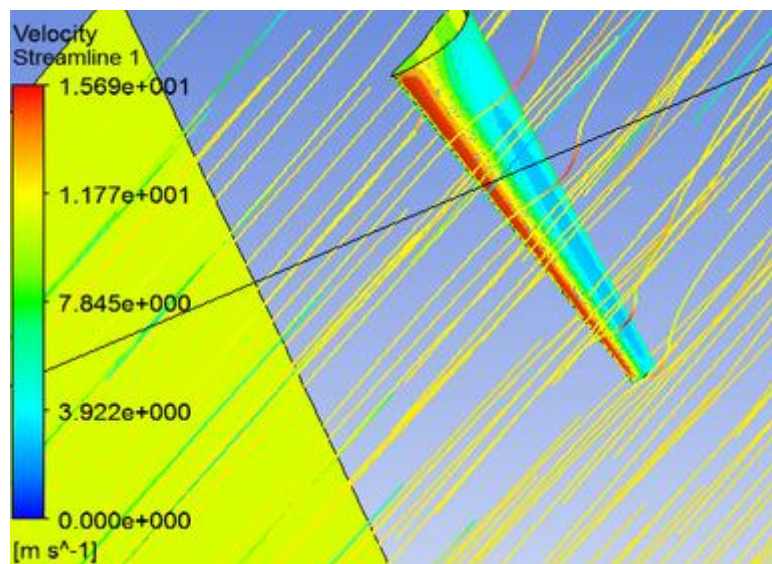
7.4.2 C_L GOE511 trapezoïdal

També s'han analitzat les pressions i velocitats obtingudes en la simulació observant les gràfiques que proporciona el Fluent.



7.4.3 Gràfic pressions GOE511 trapezoïdal

Com es pot veure a la imatge superior, la pressió màxima es troba a la part frontal de l'aleta, coincidint amb el punt de velocitat mínima i complint així el principi de Bernoulli. De la mateixa manera, la pressió mínima es troba en punts de l'extradós, ja que és en aquesta zona on les línies de corrent tenen més longitud i, per tant, provoquen una major velocitat del fluid. Aquest fet es pot comprovar en la figura que es mostra a continuació, on s'observa que les velocitats a les línies de corrent arriben a superar els 12m/s.

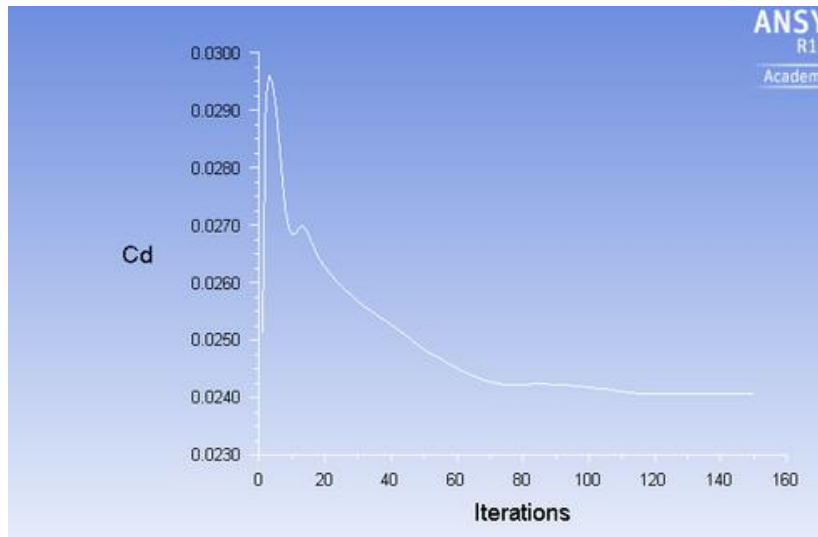


7.4.4 Pressions i línies de corrent GOE511 trapezoïdal

Un cop feta la primera simulació, s'ha repetit el procés amb les formes d'aleta de mitja lluna i d'el·lipse.

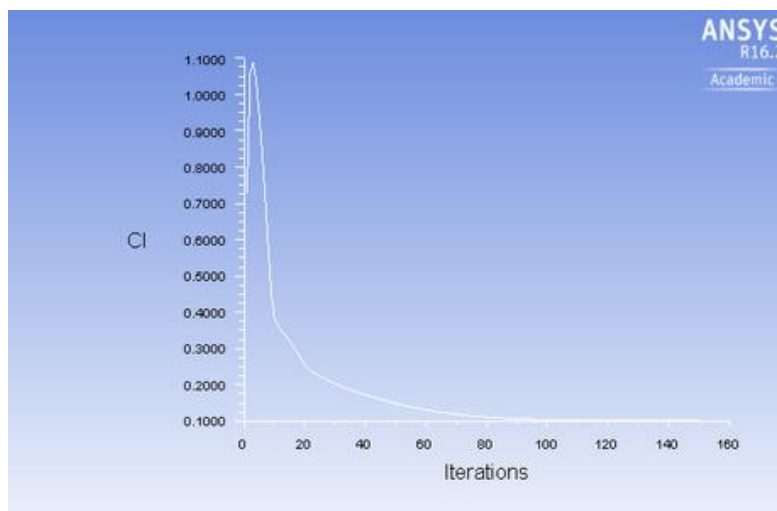
GOE511 mitja lluna

$$C_D = 2.4075 \cdot 10^{-2}$$



7.4.5 C_D GOE511 mitja lluna

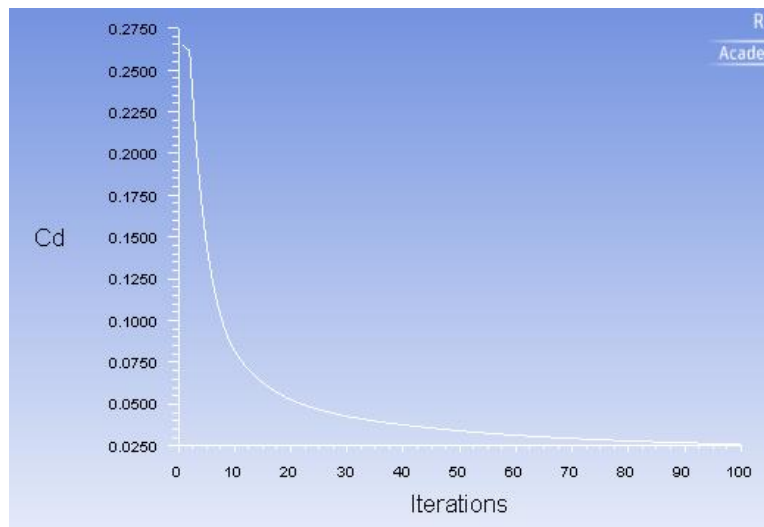
$$C_L = 1.0434 \cdot 10^{-1}$$



7.4.6 C_L GOE511 mitja lluna

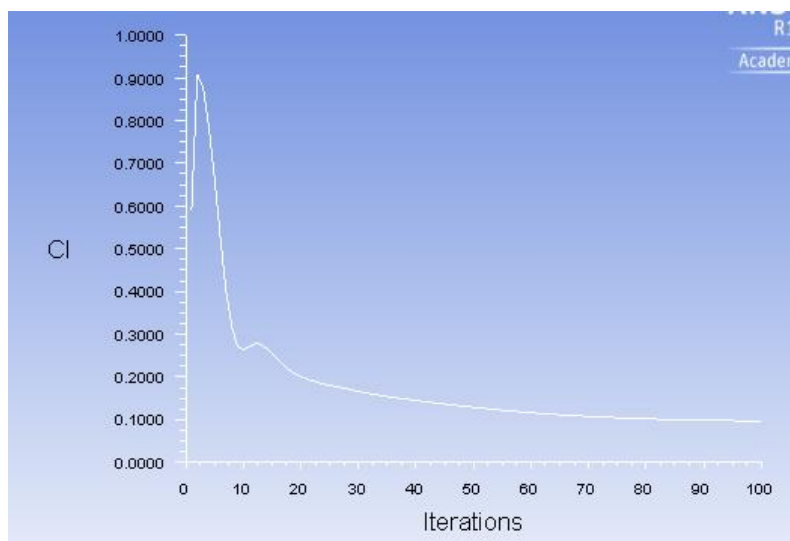
GOE511 el·lipse

$$C_D = 2.5904 \cdot 10^{-2}$$



7.4.7 C_D GOE511 el·lipse

$$C_L = 9.7088 \cdot 10^{-2}$$



7.4.8 C_L GOE511 el·lipse

A continuació es mostra un resum dels valors obtinguts per al perfil GOE511 utilitzant les diferents formes i amb els diferents angles d'atac, així com les forces de sustentació i de resistència, calculades amb la velocitat amb la que s'ha fet la simulació (12m/s).

	ANGLE	C_D	C_L	$F_D(N)$	$F_L(N)$	L/D
T	0	0.0193	0.1306	17.125	115.88	6.77
	1	0.0208	0.253	18.45	224.49	12.16
	2	0.0237	0.318	21.02	282.17	13.41
	3	0.0226	0.402	20.05	356.7	17.78
	4	0.0218	0.439	19.34	389.53	20.13
MLL	0	0.02407	0.1043	21.36	92.58	4.33
	1	0.02562	0.1658	22.73	147.13	6.47
	2	0.02701	0.2159	23.97	191.59	7.99
	3	0.02685	0.2549	23.82	226.19	9.49
	4	0.02752	0.2835	24.42	251.56	10.30
E	0	0.02590	0.0979	22.98	86.15	3.75
	1	0.02531	0.1771	22.44	157.14	7.00
	2	0.02817	0.2534	24.94	224.85	9,01
	3	0.02763	0.3416	24.49	303.11	12,37
	4	0.02687	0.3972	23.78	352.45	14,82

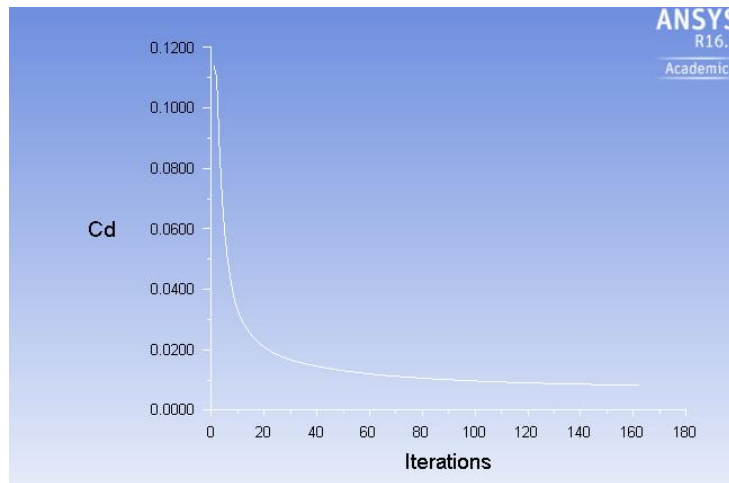
Taula 7.4.1

Observant els resultats dels perfils gruixuts, es pot veure com l'eficiència hidrodinàmica augmenta a mesura que s'incrementa l'angle d'atac. Això és degut a què la sustentació augmenta considerablement, mentre que la resistència pràcticament no varia.

Comparant els resultats amb les diferents formes d'aleta, s'observa que la forma d'aleta per al perfil GOE511 que dona una millor sustentació, així com una millor eficiència hidrodinàmica, calculada amb la relació entre la sustentació i la resistència a l'avanç, és la forma trapezoïdal. A més, es pot veure que les formes de mitja lluna i el·lipse no presenten unes diferències significatives entre elles en cap dels dos coeficients.

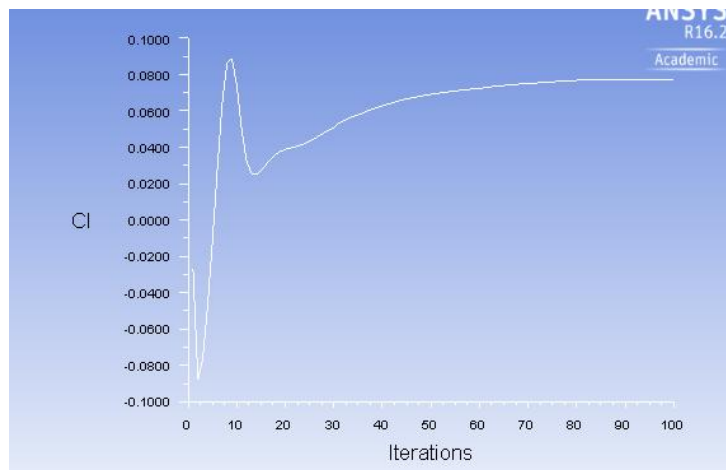
Un cop fetes les tres simulacions del perfil GOE511, s'ha passat a realitzar el mateix amb el perfil prim escollit, el NACA6409.

$$C_D = 8.296 \cdot 10^{-3}$$



7.4.9 C_D NACA6409 trapezoïdal

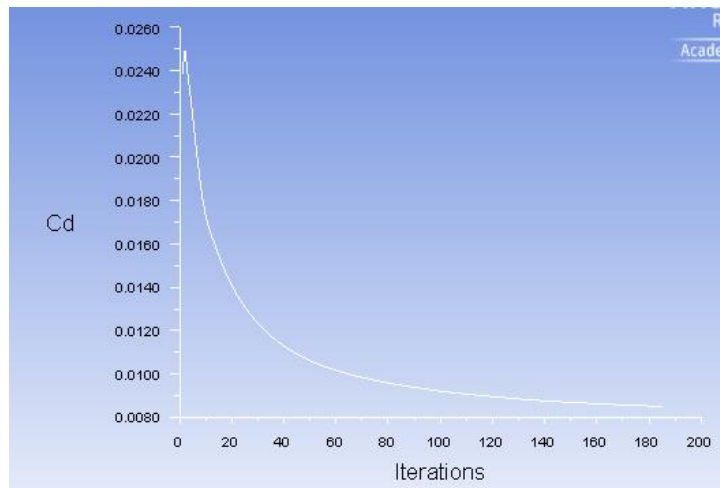
$$C_L = 7.676 \cdot 10^{-2}$$



7.4.10 C_L NACA6409 trapezoïdal

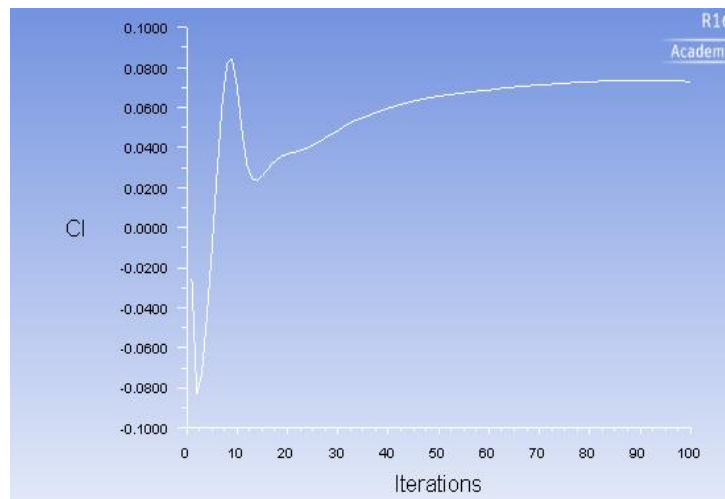
Estudi hidrodinàmic de les aletes de windsurf

$$C_D = 8.5062 \cdot 10^{-3}$$



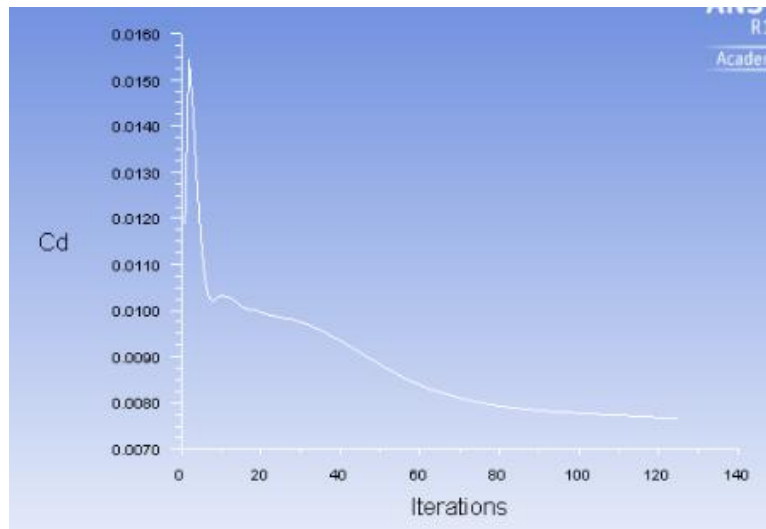
7.4.11 C_D NACA6409 mitja lluna

$$C_L = 7.2838 \cdot 10^{-2}$$



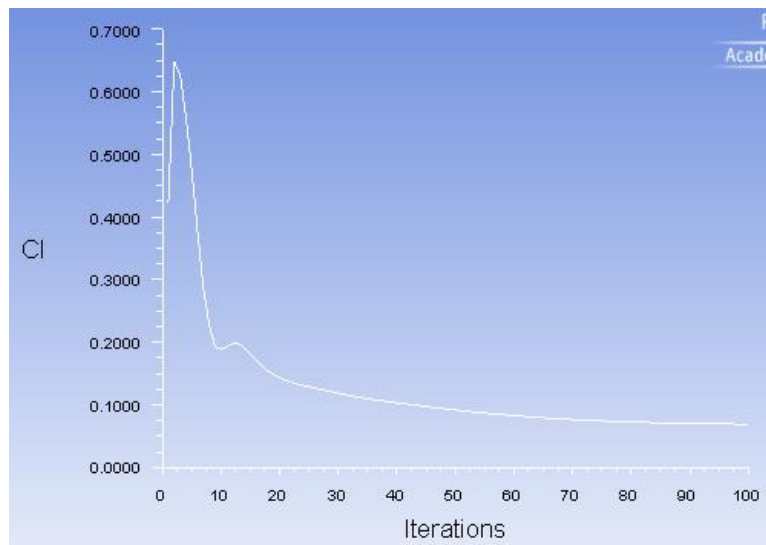
7.4.12 C_L NACA6409 mitja lluna

$$C_D = 7.6602 \cdot 10^{-3}$$



7.4.13 C_D NACA6409 el·lipse

$$C_L = 6.93 \cdot 10^{-2}$$



7.4.14 C_L NACA6409 el·lipse

	ANGLE	C _D	C _L	F _D (N)	F _L (N)	L/D
T	0	0.008296	0.0767	7.36	68.11	9.25
	1	0.008539	0.1249	7.57	110.82	14.63
	2	0.008472	0.1874	7.51	166.28	22.11
	3	0.008527	0.2351	7.57	208.61	27.57
	4	0.008725	0.3072	7.74	272.59	35.2
MLL	0	0.0085062	0.0728	7.55	64.63	8.56
	1	0.00853	0.1073	7.57	95.21	12.58
	2	0.00871	0.1595	7.72	141.52	18.31
	3	0.00868	0.1956	7.70	173.56	22.53
	4	0.00881	0.2582	7.81	229.11	29.31
E	0	0.00766	0.0693	6.79	61.52	9.05
	1	0.00795	0.0983	7.01	87.28	12.37
	2	0.00814	0.1327	7.22	117.75	16.31
	3	0.00805	0.1836	7.14	162.91	22.79
	4	0.00796	0.2593	7.6	230.08	32.56

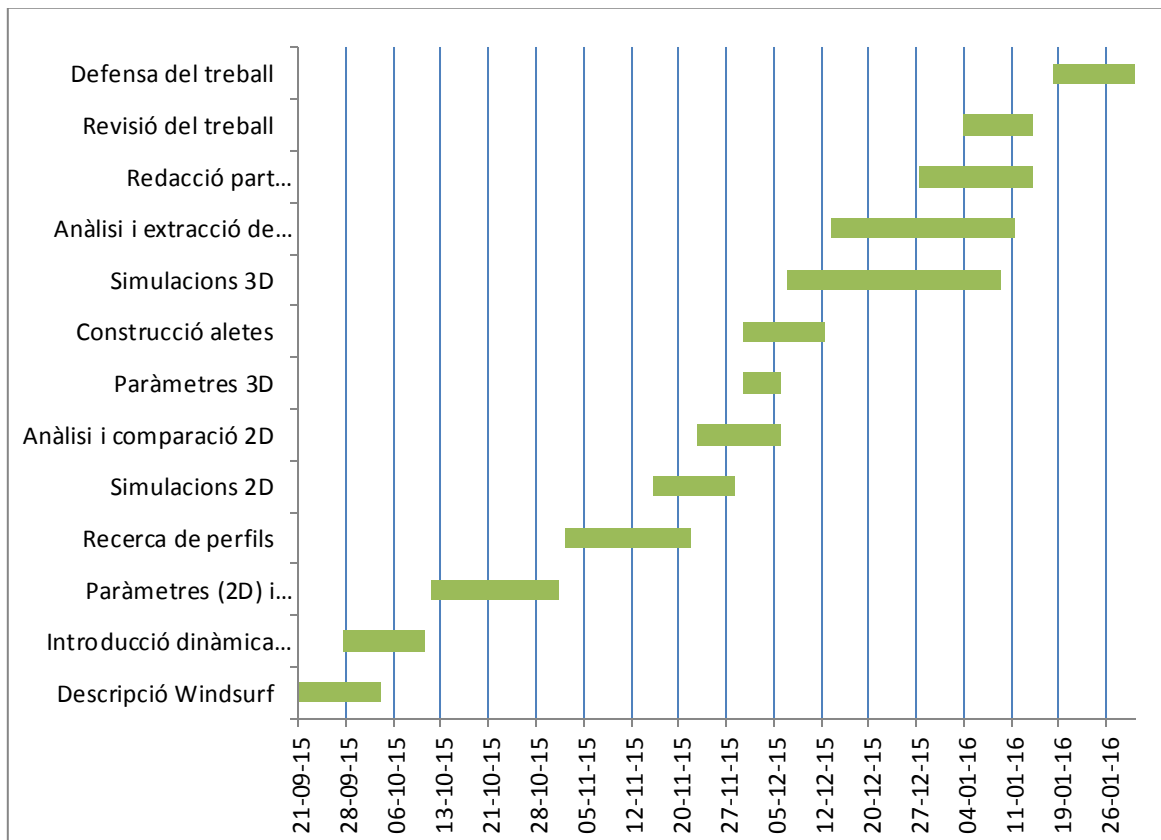
Taula 7.4.2

En el cas dels perfils prims, altre cop es pot veure com a mesura que s'augmenta l'angle d'atac els coeficients de sustentació augmenten considerablement. A més, també s'observa que tant aquests coeficients com els de resistència són molt menors als obtinguts amb els perfils gruixuts. Tot i això, tal i com s'ha comentat durant el treball, aquests perfils tenen una eficiència més elevada.

D'entre les diferents formes d'aletes, s'observa que la que genera uns coeficients millors és novament la trapezoïdal, tot i que en aquest cas els resultats obtinguts no presenten tant diferència com en els perfils gruixuts.

8. Planificació temporal.

La durada d'aquest treball ha estat d'un quadrimestre, per la qual cosa la planificació ha comprés aquest període de temps. La data d'inici és el 21/9/2015, dia en què es va registrar el treball i la data de finalització de la memòria és el 15/1/2015, ja que és la data límit per entregar el treball. Tot i això, també s'hi ha afegit la preparació de la defensa del treball. A continuació es mostra el diagrama de Gantt amb la distribució per parts del treball.



8.1 Diagrama de Gantt

9. Impacte ambiental.

En aquest treball ja s'ha comentat en diverses ocasions la facilitat que donen aquestes simulacions realitzades mitjançant l'Ansys, tant en termes d'estalvi de temps com de reducció de costos ja que amb aquestes simulacions s'aconseguia evitar la necessitat de realitzar experiments en el túnel de vent. Però aquests estudis poden tenir també un impacte en el medi ambient, així que s'ha de tenir en compte abans i després de realitzar els estudis.

El fet de no haver de fer maquetes pel túnel de vent ha reduït l'impacte ambiental que el treball podria tenir, ja que s'hauria d'estudiar el material amb el qual es construirien aquestes maquetes (s'hauria de fer una per quasi cada simulació), igual que la quantitat d'energia que es necessitarà per simular el millor possible les condicions ambientals. Tot això, més enllà de l'augment que suposa del pressupost, són coses que si es poden evitar, molt millor.

L'ordinador, eina principal del projecte, és quelcom també important. Moltes de les simulacions han comportat haver de mantenir la computadora encesa a ple funcionament durant moltes hores. Això implica un major desgast d'alguns dels seus components, i també un augment de l'ús de l'electricitat de la xarxa.

També cal esmentar que s'està treballant en un esport de vela, és a dir, utilitza l'aire i l'aigua com a font d'energia per moure's. Aquest és un fet diferencial amb altres esports de motor, on l'estudi dels coeficients de sustentació i de resistència tindria un factor molt més important per l'impacte ambiental, ja que uns bons coeficients permeten una reducció en el consum de combustible.

10. Pressupost.

Per tal de realitzar un pressupost el més acurat possible, s'han considerat tots els costos que hi han hagut darrere, tant costos que hem hagut de resoldre nosaltres com costos que s'han fet ja anteriorment al projecte, com són les llicències dels diferents programes, l'ordinador,... També s'ha considerat el sou que tindria el personal que ha dut terme aquest estudi (en aquest cas 2 enginyers industrials). Tot això s'ha fet així per a poder veure les dimensions reals que té un projecte d'aquesta mida, sigui aquest mateix o un altre. El temps estimat de durada del projecte era de 300 hores (12 ECTS multiplicat pel 25 hores/ECTS). La durada final ha estat major, ja que s'han produït problemes i situacions no previstes.

Concepte	Unitat [unt]	Preu/unitat [€/unt]	Cost Total [€]
Enginyer Industrial 1	225 hores	20	4500
Enginyer Industrial 2	225 hores	20	4500
Ansys	1	10000	10000
Llicència Ansys	1	4000	4000 €/any
SolidWorks	1	6000	6000
Llicència SolidWorks	1	1500	1500 €/any
Ordinador	2	900	1800
Impressió	1	30	30

Taula 10.1

TOTAL NET	32330 €
TOTAL AMB IVA (21 %)	39119 €

Taula 10.2

El cost pressupostat ha estat de 39119€. Tot i així, el preu hagués augmentat de manera molt pronunciada si els estudis realitzats s'haguessin complementat amb anàlisis en túnels de vent. S'hagués hagut de buscar més personal per a la fabricació de les maquetes, per a la realització dels experiments, personal de control dels túnels, etc.

És per això que pren tanta rellevància les simulacions de l'Ansys, ja que si no es fan uns bons anàlisis, a l'hora de provar-ho en el túnel de vent no s'obtidran els resultats esperats. El fet d'haver de repetir totes les maquetes, experiments, etc. sortiria molt costós i, segurament, inviable econòmicament.

Al següent gràfic es pot apreciar de manera més visual els diferents costos calculats.

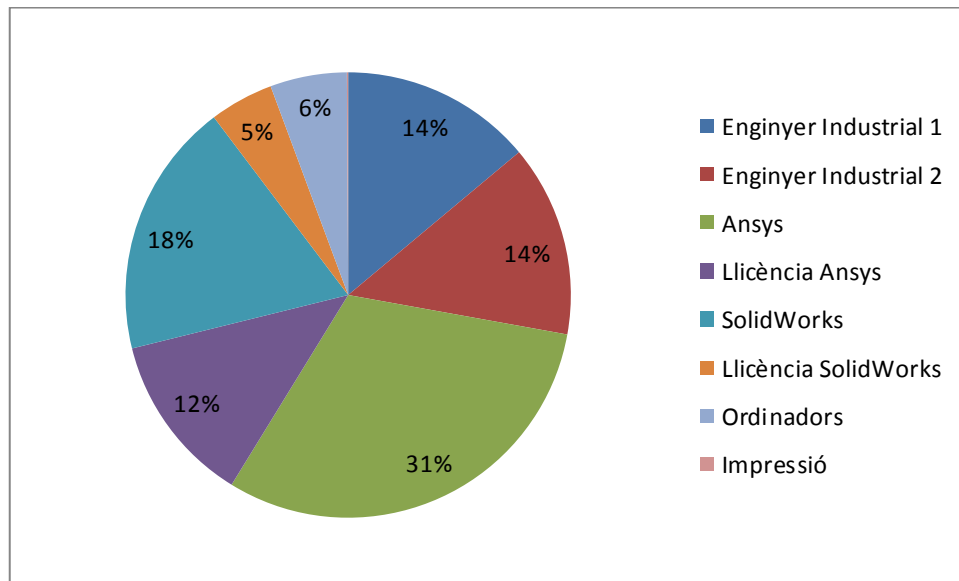


Figura 10.1

Es pot visualitzar clarament quines són les majors despeses d'aquest projecte; entre les llicències i els dos programes utilitzats sumen el 56% del cost total del projecte. En segon lloc ve el cost del personal, els 2 enginyers, i el menys costós han estat els ordinadors i la impressió, aquesta última intrascendent.

11. Conclusions.

S'han pogut extreure varies conclusions amb aquest treball en base als coneixements adquirits de mecànica de fluids i sobre el món del windsurf.

En primer lloc, podem dir que s'han assolit els objectius plantejats relatius a l'ús i aprenentatge més avançat de programes com el SolidWorks i el Fluent o, inclús, el del software DesignFoil, aquest últim desconegut per a nosaltres a l'inici del projecte, i del qual s'ha hagut d'aprendre a utilitzar durant el seu transcurs.

D'altra banda, s'ha vist la infinitat de perfils existents a l'actualitat i la diferència de comportament de la taula segons si en triem un o un altre, fet que indica la importància real d'un bon disseny de l'aleta. Aquest disseny pot ajudar a augmentar pronunciadament la velocitat o a aconseguir un comportament suficientment estable per a que sigui més fàcil per a qui estigui començant.

Com s'ha anat dient durant tot el treball, el perfil prim pot generar més problemàtica pel fet de ser més inestable i té més facilitat d'arribar a la ruptura, fet que és probable en aigües mogudes. A més, s'ha pogut comprovar durant la realització del treball que aquests perfils presenten més dificultats a l'hora de fer el disseny i les simulacions amb el CFD.

Un cop vistos els resultats obtinguts, podem concloure que l'aleta de forma trapezoïdal és la que genera un millor coeficient de sustentació, així com una eficiència major, tant en un perfil gruixut com en un prim i, per tant, és amb la que seria més factible aconseguir una velocitat major, així com un millor control de la taula. En el cas dels perfils prims, l'eficiència trobada és bastant superior a la dels perfils gruixuts fet que ajudaria a aconseguir uns millors resultats amb la taula, però tal i com s'ha dit, aquests perfils són també més inestables, per la qual cosa requeririen un gran control i experiència per part del windsurfista.

Agraïments.

Agraïm al professor Enric Trillas, director d'aquest Treball Fi de Grau, per haver acceptat dirigir el nostre treball, així com per guiar-nos sobre com realitzar-lo i per les seves aportacions documentals.

D'altra banda, agraïm també al professor Joaquín Fernández, del departament d'Expressió Gràfica, per la seva bona disposició i amabilitat quan li vam demanar consell en un problema que ens va sorgir a l'hora de realitzar algunes de les aletes en tres dimensions mitjançant el SolidWorks.

Bibliografia.

- [<http://ingenieros2011unefa.blogspot.com.es/>]
- [<http://www.lawebdefisica.com/dicc/bernoulli/>]
- [<http://howtowindsurf101.com/spin-out/>]
- [<http://www.monografias.com/trabajos82/teoria-capalimite-sustentacion-arrastre/teoria-capalimite-sustentacion-arrastre.shtml>]
- [http://webserver.dmt.upm.es/zope/DMT/docencia/mecanica-de-fluidos-i/material/Capa_Limite_Laminar_Introduccion.pdf]
- [<http://fisica.laguia2000.com/dinamica-clasica/flujo-laminar-y-flujo-turbulento>]
- [<https://www.uclm.es/profesorado/xaguado/ASIGNATURAS/BTD/4-Apunte/06.pdf>]
- [<http://oa.upm.es/6531/1/amd-apuntes-fluidos.pdf>]
- [<http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV12.html>]
- [<http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/capalimite/capalimite.html>]
- [<http://mecanicafluidos5.blogspot.com.es/>]
- [<https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/geom.html>]
- [<http://www.windsurfing-guide.com/history-of-windsurfing.html>]
- UIUC AIRFOIL COORDINATES DATABASE. Airfoil Data Site. U.S.A., 2004
[http://m-selig.ae.illinois.edu/ads/coord_database.html]
- [<http://airfoiltools.com>]
- PDF i apunts sol·licitats de l'assignatura 'Mecànica de Fluids'
- PDF i apunts sol·licitats de l'assignatura de 'Aerodinàmica':
 - ANSYS FLUENT Getting Started Guide
 - ANSYS FLUENT Tutorial Guide
 - ANSYS FLUENT User's Guide
 - ANSYS FLUENT in ANSYS Workbench User's Guide
 - PWP Introducció al CFD

Estudi hidrodinàmic de les aletes de windsurf

· UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. HIDRODINÀMICA I APLICACIÓ DELS HYDROFOILS AL WINDSURF.

Barcelona, 2015 [<http://upcommons.upc.edu/handle/2117/79730>]

· UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA. DISSENY D'UN HYDROFOIL PER A UNA EMBARCACIÓ ESPORTIVA AC45.

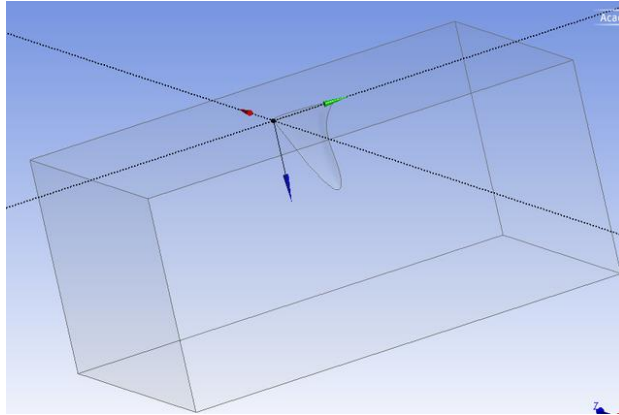
Barcelona, 2015

· [<http://youtube.com>]

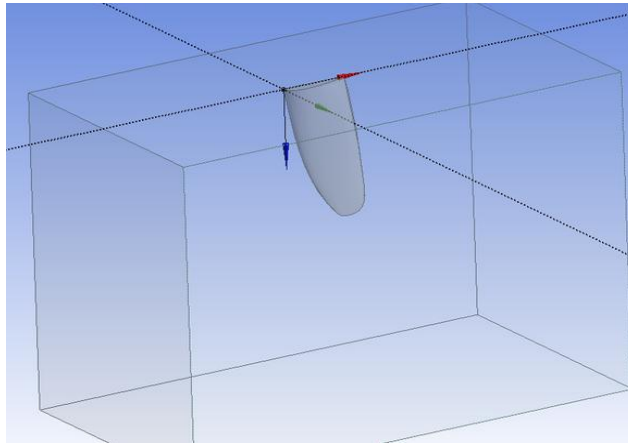
· [<https://es.wikipedia.org>]

ANNEX

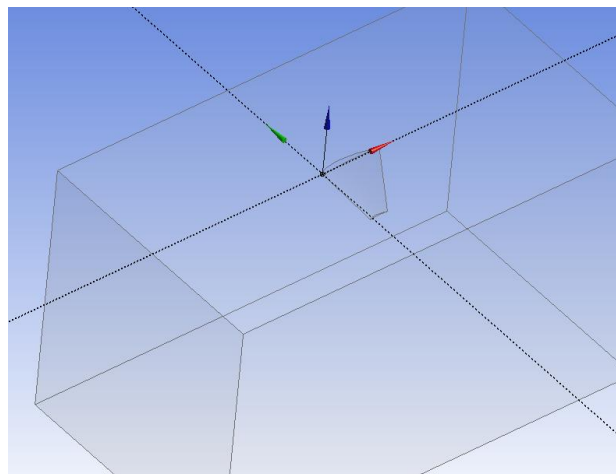
1. Volum de control de les aletes.



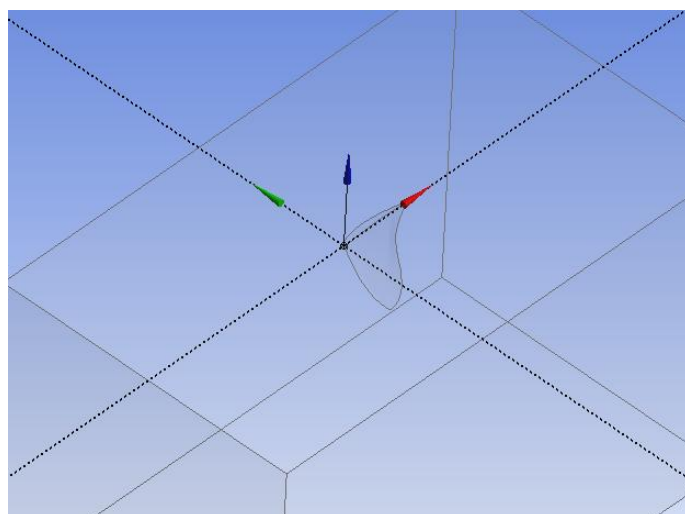
GOE511 mitja lluna



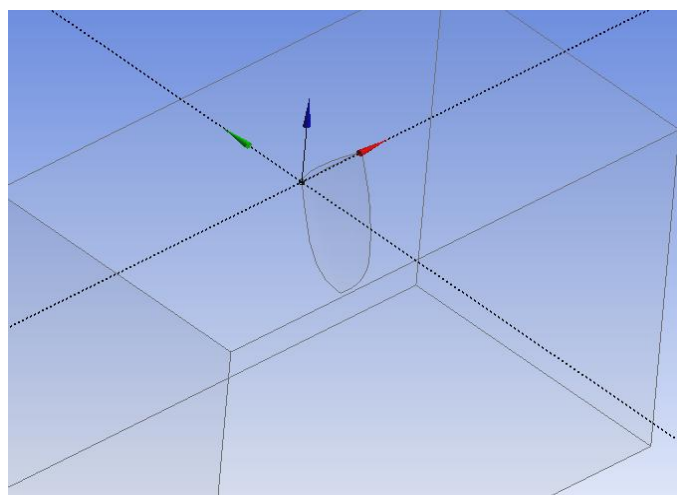
GOE511 el·lipse



NACA6409 trapezoïdal

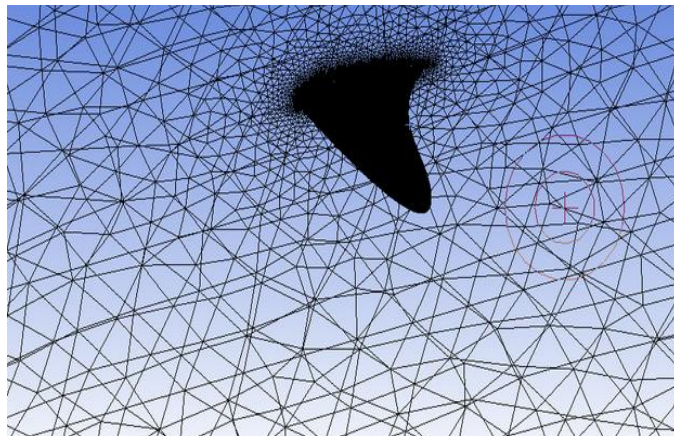


NACA6409 mitja lluna

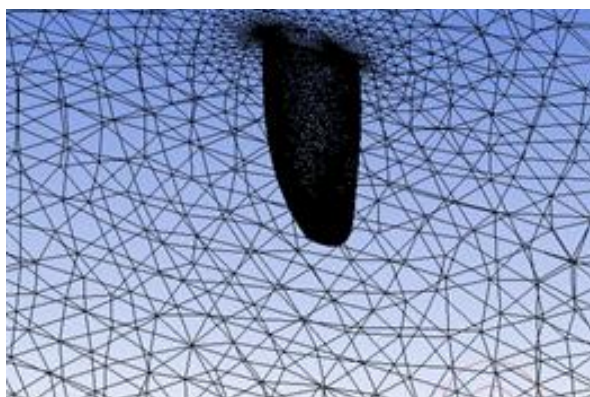


NACA6409 el·lipse

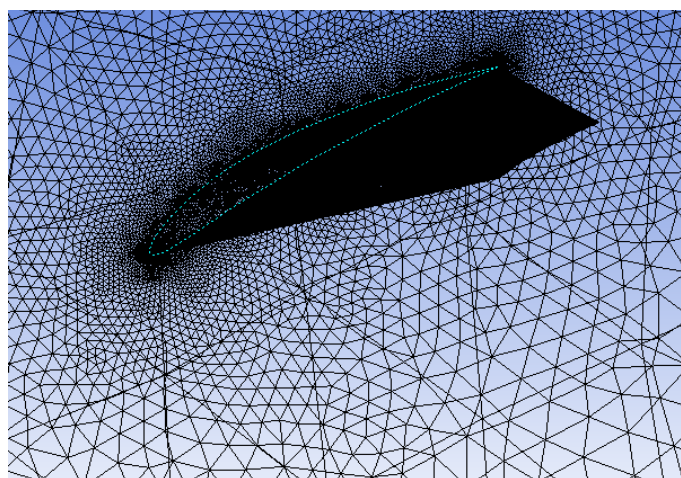
2. Mallat de les aletes.



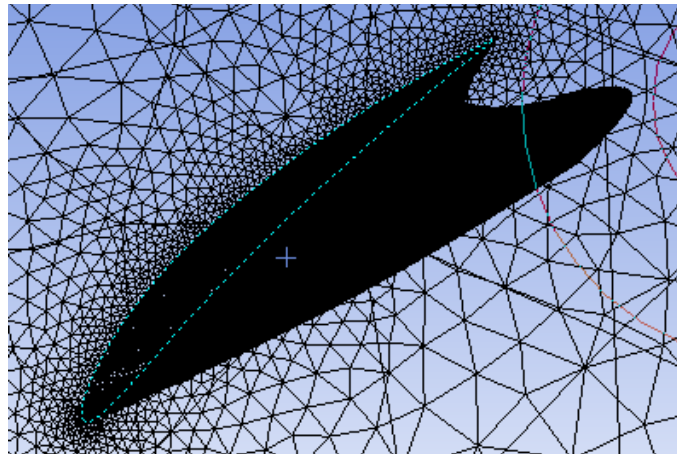
GOE511 mitja lluna



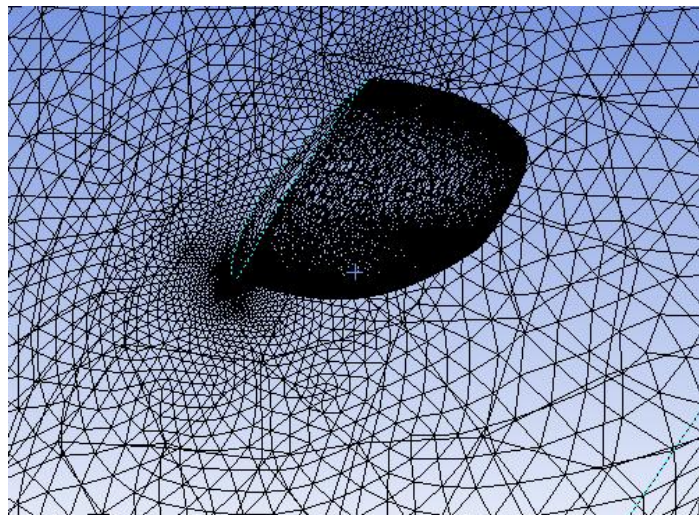
GOE511 el·lipse



NACA6409 trapezoidal

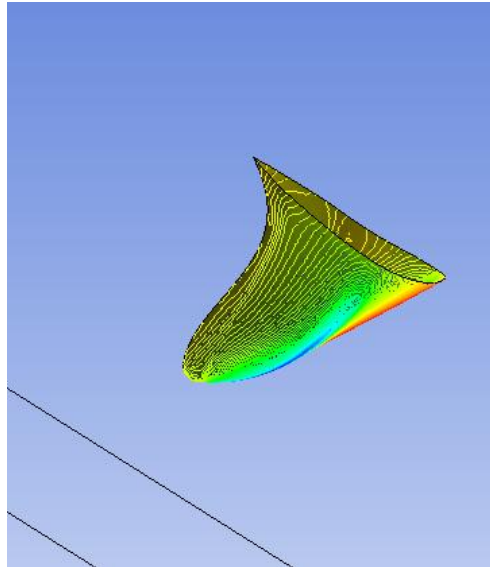


NACA6409 mitja lluna

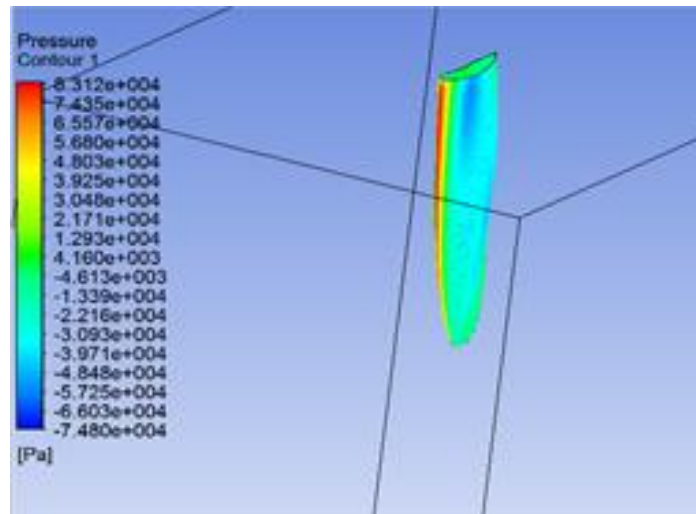


NACA6409 el·lipse

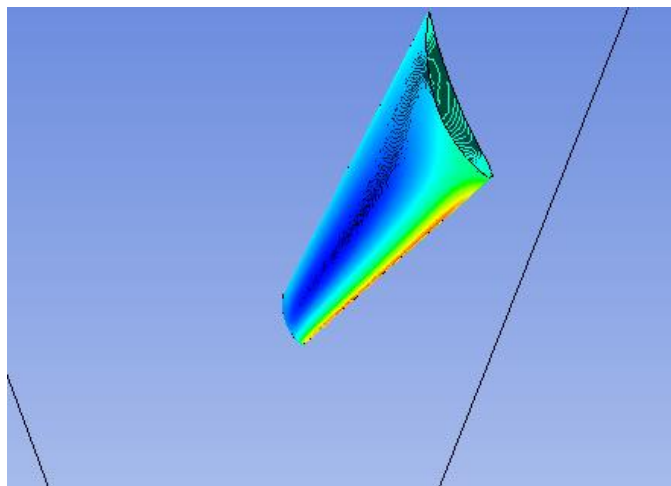
3. Gràfics de pressions de les aletes.



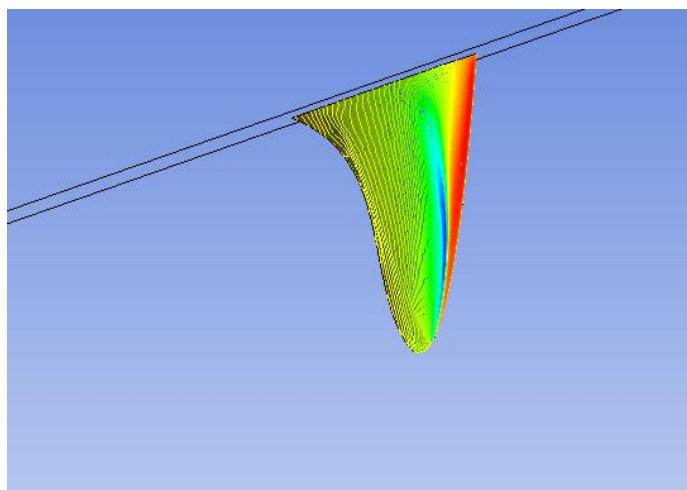
GOE511 mitja lluna



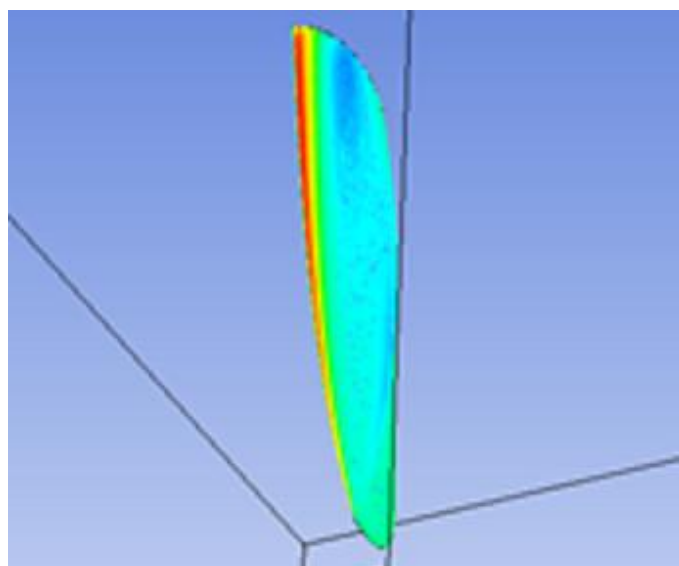
GOE511 el·lipse



NACA6409 trapezoïdal



NACA6409 mitja lluna



NACA6409 el·lipse

