

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

# **Hydrofoils. Aplicació a la Copa Amèrica**

**Memòria**

**Autor:** Francesc Xavier Amenós Murtra

**Director:** Enric Trillas Gay

**Convocatòria:** Setembre 2016



Escolta tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona



## Resum

“Hydrofoils. Aplicació tècnica a la copa Amèrica.” És un treball que té cabuda dins de l'àmbit de la mecànica de fluids amb l'objectiu d'entendre d'una millor manera el com funcionen les hidroales, i un possible disseny i aplicació en les embarcacions que corren l'anomenada copa Amèrica.

Els hydrofoils son uns perfils alars amb la peculiaritat que estan dissenyats per treballar a l'aigua, com que la densitat de l'aigua es de l'ordre de 1000x superior a la de l'aire, són perfils relativament petits (en comparació amb els d'un avió), a més que la massa és molt inferior i per tant la sustentació necessària també. Es busca aquesta sustentació per tal d'elevat el casc de l'aigua i reduir-ne la resistència a l'avanç.

El treball estarà dividit en ambdues parts. La primera part tindrà lloc una breu introducció a la copa Amèrica, la seva normativa, i una part més teòrica a nivell tècnic sobre el funcionament de les hidroales, i el com es genera la força de sustentació. A la segona part del treball es procedirà a dissenyar els dos perfils alars que es porten a la copa Amèrica partint de la normativa que el regeix.

A més l'interès en l'estudi d'aquestes hidroales destaca pel seu ús no només a la Copa Amèrica sinó per la multiplicitat d'aplicacions que podem trobar-hi en tot l'àmbit de la nàutica proveint d'una major autonomia dels vehicles, i en detriment dels nivells de contaminació provocats pels vaixells a combustió.

Finalment també trobarem la manera òptima per poder “dissenyar” els perfils alars que s'adeqüin més a les nostres necessitats, i requeriments tècnics que “imposa” la reglamentació.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>5</b>
<b>1. PREFACI</b>	<b>7</b>
1.1. Origen del projecte	7
1.2. Motivació	7
<b>2. INTRODUCCIÓ</b>	<b>9</b>
2.1. Objectius del projecte	9
2.2. Abast del projecte	9
<b>3. LA COPA AMÈRICA I ELS HYDROFOILS. INTRODUCCIÓ TEÒRICA</b>	<b>11</b>
3.1. La copa Amèrica	11
3.1.1. Història	11
3.1.2. Històric campionats	13
3.2. Reglament	20
3.2.1. El deed of gift	20
3.2.2. Protocols	21
3.2.3. Terms of challenge (TOD)	21
3.2.4. Regles ACC	22
3.3. L'America's Class	23
3.3.1. Definició	23
3.3.2. Característiques	23
3.4. Què són les hidroales?	25
3.4.1. Principi teòric	25
3.4.2. Paràmetres d'una hidroala	26
3.4.3. Altres aplicacions	28
<b>4. DETERMINACIÓ DELS PERFILS</b>	<b>29</b>
4.1. Càlcul del Cl necessari	29
4.1.1. Càlcul de l'Àrea de lift ( $A_L$ )	29
4.1.2. Càlcul de $F_L$	29
4.1.3. Càlcul del coeficient de lift	30
4.2. Escollint el perfil	30
4.2.1. Visual Foil	30
4.2.2. Criteris de selecció	30
4.2.3. Perfils EPPLER	31

4.2.4.	Llistat perfils trobats.....	31
4.2.5.	Anàlisi previ.....	32
<b>5.</b>	<b>ANÀLISI PERFIL DARRER (RUDDERBOARD)</b> _____	<b>37</b>
5.1.	Disseny del perfil .....	37
5.2.	Mallat .....	39
5.3.	Metodologia emprada (Set Up) .....	47
5.4.	Primers resultats.....	53
5.4.1.	Cl .....	53
5.4.2.	Cd .....	54
5.4.3.	Distribució de velocitats .....	55
5.4.4.	Velocitat màxima .....	56
5.4.5.	Punt d'estancament.....	57
5.4.6.	Deixant.....	58
5.4.7.	Distribució de pressions.....	59
<b>6.</b>	<b>ANALISI PERFIL DAVANTER (DAGGERFOIL)</b> _____	<b>60</b>
6.1.	Determinació del perfil .....	60
6.2.	Simulació perfil davanter .....	62
6.2.1.	Model matemàtic .....	62
6.2.2.	Cl .....	63
6.2.3.	Cd .....	64
6.2.4.	Distribució de Velocitats.....	65
6.2.5.	Velocitat màxima .....	66
<b>7.</b>	<b>IMPACTE MEDIAMBIENTAL</b> _____	<b>67</b>
<b>8.</b>	<b>PLANIFICACIÓ TEMPORAL</b> _____	<b>68</b>
<b>9.</b>	<b>VIABILITAT ECONÒMICA</b> _____	<b>70</b>
<b>10.</b>	<b>LÍNIES DE FUTUR</b> _____	<b>72</b>
	<b>CONCLUSIONS</b> _____	<b>73</b>
	<b>AGRAÏMENTS</b> _____	<b>74</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b> _____	<b>75</b>
	Referències bibliogràfiques.....	75
	Bibliografia complementària.....	75
	<b>SUMARI FIGURES</b> _____	<b>76</b>

# 1. Prefaci

## 1.1. Origen del projecte

Sempre m'ha fascinat el món de la mecànica de fluids, en especial, l'aerodinàmica, o en aquest cas hidrodinàmica, ja fos per la seva complexitat o per la seva capacitat de fer, per exemple, que un cotxe "s'enganxi" a l'asfalt, o com en el cas que ens ocupa la seva capacitat de fer que un cos cobri vida i voli literalment.

Jo inicialment desconeixia l'existència d'aquestes hidroales, fou el tutor Enric Trillas qui me'n va parlar per primera vegada, i després d'estudiar-ho a fons vaig decidir-me per iniciar el treball.

## 1.2. Motivació

Des de ben petit guardo molts bons records de quan els meus germans i jo fèiem regates amb velers radio controlats, quan l'Enric me'n va comentar l'existència d'aquestes hidroales no vaig dubtar en interessar-m'hi.

Si a aquest fet li afegeixes que sempre m'ha interessat tot el tema de simulació d'ansys ja sigui a nivel de mecànica de fluids o d'estructures. Opino que l'anàlisi computacional és una eina potentíssima que considero que cal dominar en la major mesura posible, ja que permet solucionar problemas anàlits realment complicats que analíticament serien difícils, sinó quasi bé impossibles de solucionar.

## 2. Introducció

### 2.1. Objectius del projecte

Els diversos objectius que té el projecte són els següents

- Aprofundir en l'assignatura de mecànica de fluids
- Aprendre com funcionen les hidroales
- Paràmetres rellevants que poden afectar-ne el funcionament
- Aprendre a dissenyar les hidroales per aconseguir les prestacions desitjades
- Aconseguir una simulació acurada del comportament real de la hidroala per mitjà de Ansys.

### 2.2. Abast del projecte

Degut a les diverses limitacions temporals a les que ha estat sotmès, el treball també ha quedat acotat.

Es dissenyaran les 2 hidroales presents en una embarcació del tipus America's Class, seguint tota la reglamentació pertanyent a l'America's Class (disponible a l'annex):

-Perfil darrer (*rudderboard*): A més de ser el timó de l'embarcació, en règim estacionari és qui aguantarà el pes de l'embarcació a velocitat de creuer.

-Perfil davanter(*daggerfoil*): Entre altres funcionalitats té la de donar una sustentació extra per ajudar a aixecar (accelerar) l'aixecament del casc respecte l'aigua.

Per fer això s'analitzaran diversos perfils alars amb el suport del software VisualFoil 5.0, que conté una base de dades prou important, evidentment els dissenys utilitzats en la competició poden discernir dels escollits en aquest treball degut al caire competitiu del torneig.

Finalment es comentaran els resultats i s'intentarà ser crític amb els resultats obtinguts i les simplificacions imposades.



## 3. La copa Amèrica i els hydrofoils. Introducció teòrica

### 3.1. La copa Amèrica

La copa Amèrica és una competició de catamarans bicascos a vela. En aquesta competició es fonamental tan la destresa dels operaris com el disseny de la nau, com de bona hidrodinàmicament sigui etc... A més aquestes naus actualment disposen de 4 hidroales situades a la zona inferior del casc, que permeten elevar-los el suficient de l'aigua per reduir-ne el drag. El treball se centrarà en aquest aspecte, en el disseny de les 2 hidroales que hi ha a cada "monocasc".



Figura 3.1 Trofeu de la Copa Amèrica

És diu que és la segona competició més important a nivell esportiu darrere de les Olimpíades.

#### 3.1.1. Història

La copa Amèrica fou la primera competició esportiva de tota la història. Es va disputar per primera vegada l'any 1851 i roman activa fins l'actualitat. Es considera la competició més prestigiosa a tot el món de la navegació.



Figura 3.2 Veler Amèrica

L'any 1851 precisament es celebrava l'anomenada Exposició Internacional a Anglaterra amb la idea de presentar al món els últims avenços realitzats en investigació i tecnologia amb la finalitat de demostrar a la resta del món la supremacia del regne britànic. Entre aquests actes es realitzaria una regata al voltant de l'illa de Wight, al sud d'Anglaterra. Amb el matís per part del govern anglès que va decidir convidar a un

participant estranger, en aquest cas l'escollit fou el "Amèrica" del club de vela de Nova York.

Contra tot pronòstic el guanyador d'aquesta regata va ser precisament el "Amèrica", d'aquesta forma neix l'anomenada Copa Amèrica, una competició amistosa entre nacions. En els seus inicis, només la disputaven Estats Units i Anglaterra, no fou fins el 1876 que Canadà s'hi va unir.

Degut a la primera guerra mundial la competició romangué aturada fins el 1920.

Durant els anys 30 hi havia instaurada l'anomenada classe J, unes embarcacions que podien arribar fàcilment als 42m d'eslora i portaven varies veles a proa, tot i que ja s'utilitzava una única vela a popa.



Figura 3.3 Lionheart, veler de la classe J

Amb l'inici de la segona guerra mundial es torna a suspendre la Copa Amèrica, en aquest cas fins el 1958.

Degut a la dificultat de creuar l'atlàntic amb grans embarcacions, es va dissenyar una nova classe, l'anomenada 12-M, creada el 1907. La seva eslora estava al voltant dels 20 metres. A més ja no calia creuar l'atlàntic amb la pròpia embarcació (sinó que es podria transportar al interior d'un altre vaixell de transport), aquest fet afavoreix la participació d'Austràlia l'any 1962. L'any 1974 apareixen les primeres embarcacions d'alumini (fins el moment totes eren de fusta).



Figura 3.4 Maqueta del Australia II (classe J)

Durant més d'un segle (des del 1851 al 1983) els americans mantingueren l'hegemonia a la Copa fins que Austràlia l'any 1983 els hi arrebatà el títol. A més per primer cop el Austràlia II revoluciona les quilles amb una terminació amb ala (del tipus hydrofoil que s'estudiarà en aquest treball).

Discrepàncies varies degut a l'aparició d'un participant amb una nau de 40 m d'eslora, obliguen a l'organització a prendre la mesura d'instaurar l'IACC (International America's Cup Class), on hi havia una sèrie de directrius que haurien de complir els participants com per exemple quedava fixada l'eslora de les embarcacions entre altres. A partir d'aquell moment es premiava més la creativitat i l'enginy dels equips per millorar les embarcacions dins del reglament.





No fou fins l'any 1991 que Espanya participa a la prova amb








una molt respectable cinquena posició. Fins l'any 2003 la copa mai havia viatjat al continent Europeu gràcies, en aquesta ocasió, a la victòria de l'equip suís. Això fou possible degut que es va suprimir la preselecció de defensors, aleshores molts regatistes del equip novazelandès quedaren disponibles, i alguns d'ells van fitxar per l'equip suís.







L'any 2010 els americans recuperen la Copa Amèrica de les mans dels suïssos sota la vela del BMW Oracle Racing.

L'any 2013 el club defensor (Club de yates Golden Gate) repeteix, abandonant la IACC i creant la classe AC72.[1]

### 3.1.2. Històric campionats




Any	Localització	País campió	Nom	Imatge
1851	Illa de Wight	EUA	America	
1870	Nova York	EUA	Magic	
1871	Nova York	EUA	Columbia	
1876	Nova York	EUA	Madeleine	


1881	Nova York	EUA	Mischief	
1885	Nova York	EUA	Puritan	
1886	Nova York	EUA	Mayflower	
1887	Nova York	EUA	Volunteer	
1893	Nova York	EUA	Vigilant	
1895	Nova York	EUA	Defender	
1899	Nova York	EUA	Columbia	

1901	Nova York	EUA	Columbia	
1903	Nova York	EUA	Reliance	
1920	Nova York	EUA	Resolute	
1930	Newport	EUA	Enterprise	
1934	Newport	EUA	Rainbow	
1937	Newport	EUA	Ranger	
1958	Newport	EUA	Columbia	



1962	Newport	EUA	Weatherly	
1964	Newport	EUA	Constellation	
1967	Newport	EUA	Intrepid	
1970	Newport	EUA	Intrepid	
1974	Newport	EUA	Courageous	



1977	Newport	EUA	Courageous	
1980	Newport	EUA	Freedom	
1983	Newport	Austràlia	Australia II	
1987	Fremantle	EUA	Stars & Stripes 87	
1988	San Diego	EUA	Stars & Stripes 87	

<p>1992</p>	<p>San Diego</p>	<p>EUA</p>	<p>America</p>	
<p>1995</p>	<p>San Diego</p>	<p>Austràlia</p>	<p>NZL-32</p>	
<p>2000</p>	<p>Auckland</p>	<p>Austràlia</p>	<p>NZL-60</p>	
<p>2003</p>	<p>Auckland</p>	<p>Suïssa</p>	<p>SUI-64</p>	
<p>2007</p>	<p>Valencia</p>	<p>Suïssa</p>	<p>SUI-100</p>	



2010	Valencia	EUA	USA-17	
2013	San Francisco	EUA	Oracle team USA-17	
2017	Bermuda	¿?		¿?

Taula 1 Línea cronològica dels campions de la Copa America [2]

A l'històric destaca clarament el protagonisme de les embarcacions nord-americanes amb un total de 30 victòries d'un total de 35 (un 85,71%). Tot i que es veritat que fins la primera victòria australiana l'any 1983 hi havia una clara hegemonia americana en els últims 33 anys el seu rati de victòries descendeix fins a un 50%, que no es gens negligible, però simbolitza l'augment de la competitivitat dels diferents equips, especialment destaquen l'equip australià i el suís, amb 3 i 2 victòries respectivament.

És notòria la mala ratxa que van passar els equips americans des de l'any 1992 (on guanyen la seva última copa Amèrica) fins el 2010 que no repeteixen, tot i això sembla que en els darrers anys l'equip americà s'està recuperant amb victòries tant l'any 2010 com 2013 amb l'equip Oracle. La pròxima competició tindrà lloc l'any 2017 a l'illa de Bermuda.

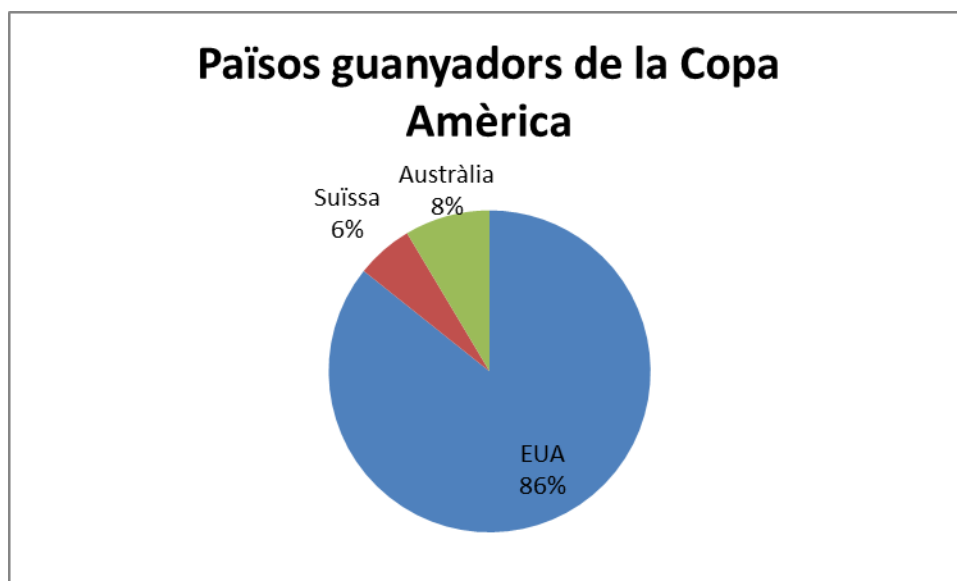


Figura 3.5 Repartiment de les victòries de la Copa Amèrica

## 3.2. Reglament

Hi ha múltiples parts del reglament dedicats a cada secció aquí només farem 5 cèntims de les més importants.[3]

### 3.2.1. El deed of gift

És el document bàsic que regeix la competició. El seu article més important és el de “Mutu Acord” on s’estableix que “Challenger of Record” s’ha de posar d’acord amb el defensor de la copa de la present edició per establir les normes que regiran durant aquella edició, tipus d’embarcacions, característiques tècniques, quins clubs poden desafiar etc...

Si no s’arribés a cap acord (fet que només ha succeït una vegada en tota la història), existeix una normativa estàndard per al desenvolupament normal de la competició. Especifica quins clubs estan autoritzats a participar, i que les naus hauran de ser construïdes al país d’origen.

Des de 1871 s’ha discutit molt la interpretació per part dels desafiants i dels defensors. L’any 1956 es permet competir amb barques de 12 metres i s’elimina la clàusula que obligava a les embarcacions a anar navegant des de el país d’origen.

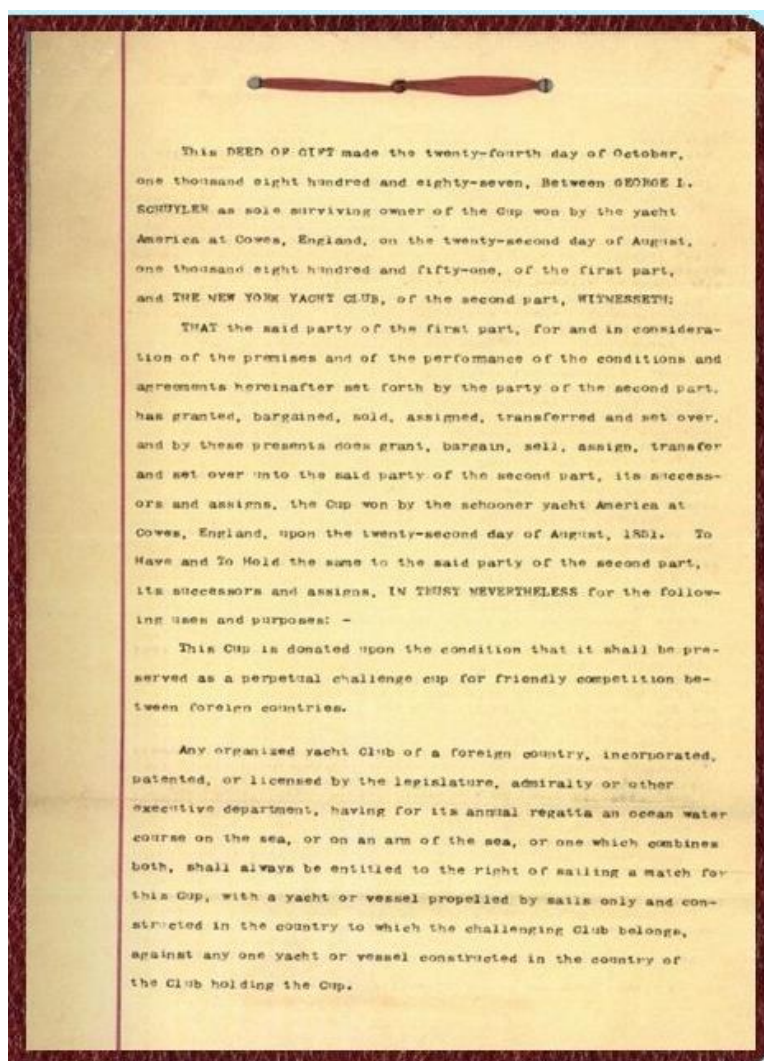


Figura 3.6 Reglamentació Deed of gift

### 3.2.2. Protocols

Document que descriu les normes generals de l'edició en concreta de la Copa Amèrica. Detalla l'organització de la regata. L'acord arribat a l'article 8 del deed of gift entre "challenger" (el primer club nàutic que desafia) i defensor. La part més important del protocol és la que fa referència a les regates per selecció dels desafiants (com unes classificatòries per veure qui es apte per participar a la competició).

El Protocol limita el nombre d'embarcacions noves així com el nombre de veles utilitzables. Posa els límits a les activitats de reconeixement dels participants per tal que gaudeixin de certa privacitat en les seves proves i entrenaments.



#### The Protocol Governing the 35<sup>th</sup> America's Cup

JUNE 2, 2014

Incorporating Amendments 01 through 11



Figura 3.7 Protocol America's Cup

### 3.2.3. Terms of challenge (TOD)

En aquest document es defineixen els drets i les obligacions tant dels participants com de l'organització. El seu objectiu es organitzar millor els aspectes comercials per al benefici de tots els competidors.

Detalla els requeriments necessaris per convertir-se en "Challenger". El programa de la competició. Les característiques de la ciutat acollidora de la competició, altres punts com publicitat i marketing, tv, premsa... Així com la seguretat que hi haurà durant la competició assegurances i responsabilitats.

### 3.2.4. Regles ACC

Especifica les característiques i mesura de les embarcacions que participaran a la Copa Amèrica.

Estableixen una sèrie de restriccions en les mesures però deixen marge a la imaginació de l'equip d'enginyers per construir el veler més ràpid i segur que pugui alçar-se amb la victòria.

Per prendre decisions que defineixen l'embarcació, no només serà necessari conèixer les regles ACC, sinó les condicions meteorològiques de mar i vent amb els que navegaran, i aquí entre en joc el coneixement i experiència dels regatistes a l'hora de definir correctament el veler.

Aquesta és la reglamentació estudiada a l'hora de dissenyar els perfils.



*Figura 3.8 Reglamentació tècnica America's Cup*

### 3.3. L'America's Class

#### 3.3.1. Definició

L'america's Class serà l'embarcació d'estudi, consisteix en un catamarà amb les següents característiques.

#### 3.3.2. Característiques

- Multihull (2 cascs).
- Estructura transversal i simètrica.
- 2x Rudderwing (ala i timó darrer darrere) a cada casc.
- 2x Daggerboard (hidroala tipo L davantera) a cada casc.
- Pes en ordre de marxa 2907 (2382 Kg sense tripulació + 525Kg provinents de la tripulació (6 persones))Rudderwing i daggerboard.

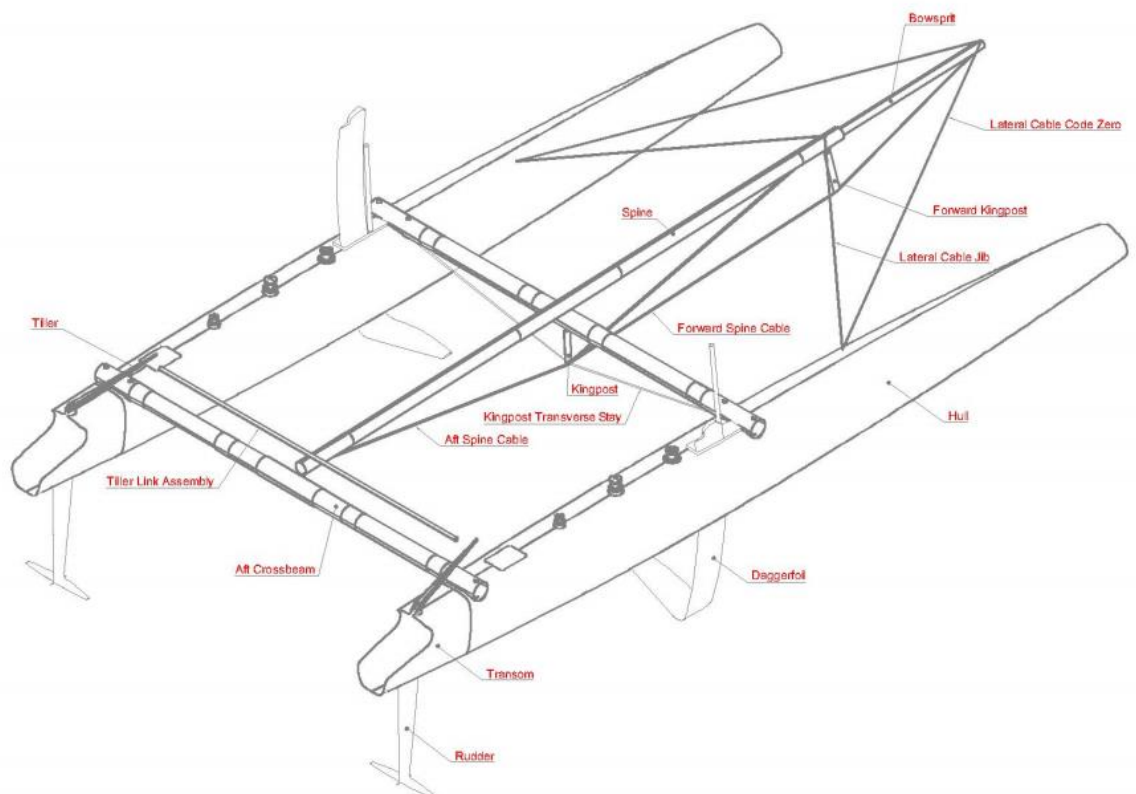


Figura 3.9 Esquemàtic de l'estructura del AC

Rudderwing: es l'ala darrera s'encarregarà de generar la sustentació necessària en estat estacionari a més de portar incorporat el timó de nau. A més porta incorporat el timó i per tant tmb serà la responsable del govern de la nau.

Daggerboard: Aquesta hidroala es retràctil degut a que té principalment dues funcionalitats.

La primera és la de donar suport a les maniobres de viratge, clavant l'ala a la superfície aquosa amb un angle d'atac determinat el que aconsegueixen és augmentar-ne el drag de manera que un dels dos cascots tingui menys velocitat que l'altre fet que fa desplaçar el CIR de l'infinit a un cert punt amb la finalitat que l'embarcació giri més ràpid, per exemple al donar la volta a una boia.

La seva segona finalitat és la de donar suport a l'acceleració vertical a baixes velocitats de la nau, en definitiva donar un extra de sustentació amb l'objectiu d'eivar-la el més aviat possible de la superfície aquosa. En aquest segon aspecte és en el que ens centrarem al llarg del treball.

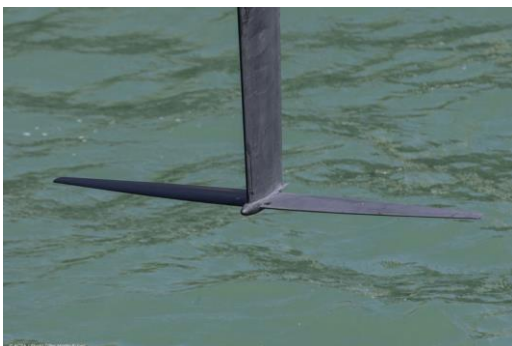


Figura 3.10 Rudderwing (hidroala darrera)

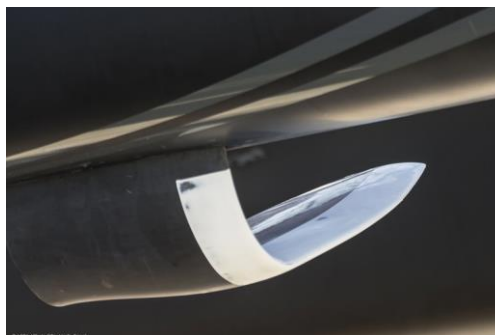


Figura 3.11 Daggerfoil (Hidroala davantera)



Figura 3.12 Rudderwing i Daggerfoil en un AC45

## 3.4. Què són les hidroales?

### 3.4.1. Principi teòric

Hi ha vàries possibilitats per aconseguir sustentació al voltant d'un cos.

El primer principi físic que regeix la sustentació de les hidroales és el mateix que regeix la sustentació en els avions i aquest és el següent:

Tot flux circulant per un cos asimètric genera una diferència de pressions degut a una variació en la velocitat del fluid en ambdues zones (degut al canvi de secció). Aquesta diferència de pressions es transforma en una força de sustentació situada en el centre de pressions del perfil alar.

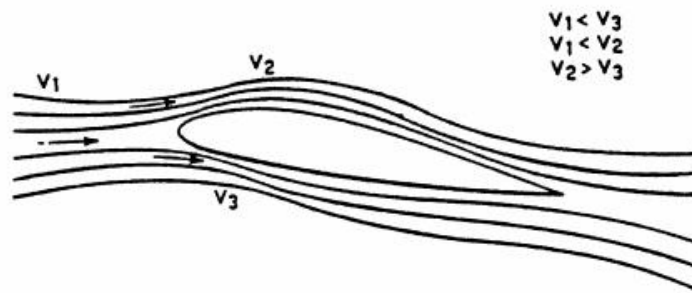


Figura 3.13 Distribució de velocitats teòrica al voltant d'un perfil alar

En un volum de control finit, i degut a l'equació de la continuïtat, el fet de que la secció superior sigui menor a la secció inferior farà que aquest fluid circuli més ràpid per dalt que per baix. Aquest fet té com a conseqüència que la pressió del fluid sigui inferior en la part superior del perfil degut a la llei de conservació de l'energia de Bernoulli:

$$\frac{C^2 \cdot \rho}{2} + P + \rho \cdot g \cdot z = ctt$$

En el dibuix de la figura 3.13 com més juntes estiguin representades les línies de corrent major serà la velocitat del fluid i per tant menor la pressió. D'aquí podem deduir que existirà



una pressió a la zona inferior major que a la zona superior i per tant una força de sustentació. (veure figura 3.14) [4]

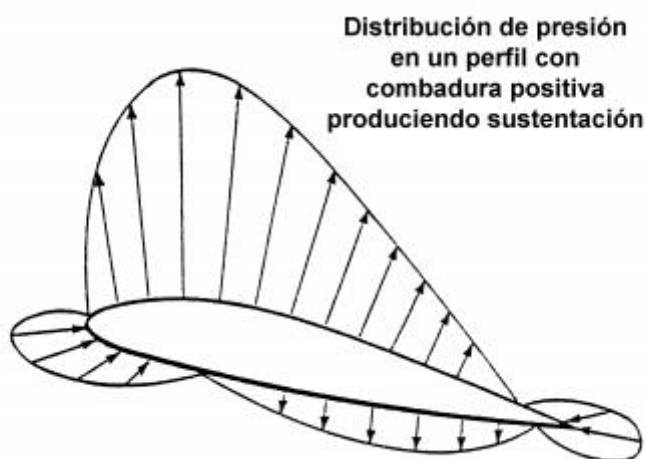


Figura 3.14 Distribució de pressions teòrica al voltant d'un perfil alar

Tot i aquesta és la manera més natural d'aconseguir sustentació, no podem dir que sigui l'única, ja que existeix la teoria de Kutta-Yukovski aplicada que resa el següent:

Un perfil alar, amb un angle diferent de 0 (tot i ser simètric) també pot generar sustentació, degut a la circulació del fluid.[5]

### 3.4.2. Paràmetres d'una hidroala

Les diferents parts que constitueixen el perfil alar són les següents:

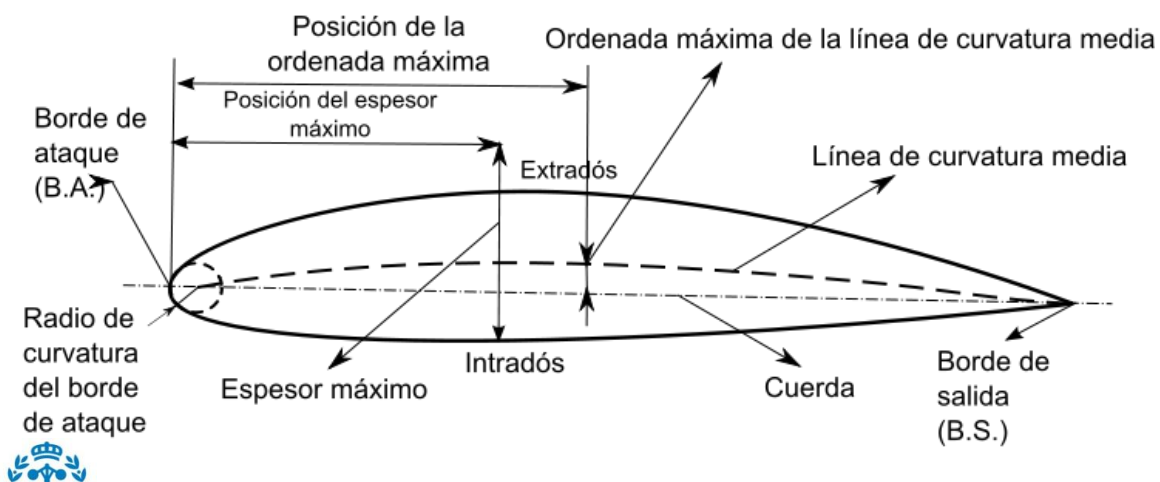


Figura 3.15 Esquemàtic de les diferents especificacions tècniques



Corda: línia recta que uneix el cantó d'atac amb el cantó de fuga.

Línia de curvatura mitja: Línia equidistant entre el extradós (part superior del perfil) i l'intradós (part inferior del perfil).

Angle d'atac: No es una característica pròpia d'un perfil sinó de l'orientació de la corda en relació a la velocitat relativa del perfil dins del fluid.

Gruix: és refereix al gruix màxim entre extradós i intradós s'acostuma a donar en % de la corda.

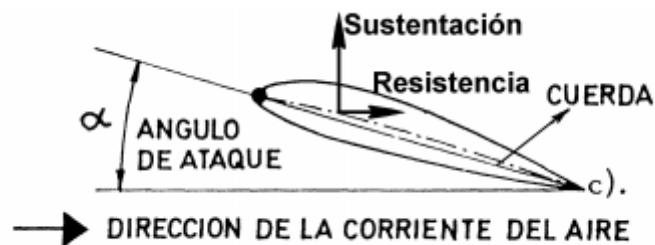


Figura 3.16 Distribució de les diferents forces que intervenen

### 3.4.3. Altres aplicacions

Hi ha múltiples aplicacions que poden tenir aquestes hidroales desde les joguines més simples a les embarcacions més complexes.

Joguines



*Figura 3.17 Embarcació "Parrot"*

De recreació



*Figura 3.18 Embarcació de recreació*

Windsurf, kitesurf, surf...



*Figura 3.19 Taula de surf*

## 4. DETERMINACIÓ DELS PERFILS

### 4.1. Càlcul del CI necessari

#### 4.1.1. Càlcul de l'Àrea de lift ( $A_L$ )

Per al perfil darrer sabem per normativa que ha de complir amb les següents 3 característiques:

- 1) No pot superar 1.25m en la direcció transversal ( $p=1.25m$ )
- 2) Ha de ser simètrica respecte el casc
- 3) L'àrea en planta, excloent els 8 cm més propers al pla de simetria, no pot ser inferior a  $0.170m^2$  i no superior a  $0.190m^2$ . ( $A'=0.180 m^2$ )

A partir d'aquesta normativa i igualant les següents equacions trobem l'àrea permesa per normativa.

$$A' = 0.18 m^2 = (1.25 - 2 \cdot 0.08) \cdot C \rightarrow C = 0.165137 m$$

$$A = C \cdot P = 0.165137 \cdot 1.25 m = 0.206422 m^2$$

#### 4.1.2. Càlcul de $F_L$

Per poder determinar el CI necessari cal fer una mica de recerca en la normativa més recent. Observant el reglament sabem que el pes total real durant la carrera serà la resultant de:

$$M_{real} = M_{sailing} + M_{crew} = 2907 Kg$$

Amb:

$$M_{sailing} = M_{OM} + M_{wing} = 2382 Kg$$

$$M_{crew} = 525 Kg$$

Per tant i com que en el nostre cas podem aplicar simetria, podem reduir el problema d'estudi a estudiar només un monocasc amb la meitat de càrrega (s'ha deprecia l'empenta, degut a que el volum submergit en ordre de marxa seria petit):

$$F_L = \frac{M \cdot g}{2} = 14264.649 \text{ N}$$

#### 4.1.3. Càlcul del coeficient de lift

Com hem comentat aquestes són unes màquines que fàcilment poden arribar als 55 km/h que són uns 15,43 m/s. Amb aquesta dada podem trobar el Cl necessari.

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

$$C_L = 0.566$$

## 4.2. Escollint el perfil

### 4.2.1. Visual Foil

Visual Foil és un software d'un professor del MIT que conté una base de dades enorme amb una varietat enorme de perfils amb una sèrie de gràfics que ens permetrà triar el perfil més òptim possible. El programa ens facilitarà informació com pot ser:

Coeficient de sustentació teòric en funció de l'angle d'atac

Eficiència (Cl/Cd) del perfil en funció de l'angle d'atac

Paràmetres del perfil respecte la corda, gruix etc...

### 4.2.2. Criteris de selecció

Bàsicament mirarem que el perfil triat compleixi amb les següents condicions:

- S'aproximi al màxim al coeficient de sustentació desitjat.
- Sigui un perfil estable, que sigui estable implicarà que la corba de l'eficiència que els pendents siguin el més suaus possibles, és a dir, que a la zona del pic la corba es mantingui el més plana possible.

### 4.2.3. Perfils EPPLER

A la competició molt probablement cada equip portarà els seus perfils de disseny propi (és a dir que estan en domini privat i no hi tenim accés). No obstant per fer aquest treball s'ha utilitzat una base de dades (UIUC), que conté una gran varietat de perfils de domini públic, entre ells la família de perfils EPPLER.

Els perfils EPPLER són perfils dissenyats per un enginyer alemany concebuts especialment per naus que han de circular a baixes velocitats, vaja que necessiten molta sustentació a una velocitat petita.

És per aquest motiu que es decideix filtrar tota la base de dades per perfils EPPLER que s'aproximin al coeficient de sustentació desitjat (0,56)

### 4.2.4. Llistat perfils trobats

Fent un primer anàlisi s'ha decidit per optar per un perfil de la família EPPLER, primerament farem una primera criba amb tots els perfils que poc o molt s'apropen al coeficient de sustentació desitjat

Perfil	Cl	Variació Cl % (a 0 graus)	Observacions
E393	0,5549	1,96	
E432	0,5891	4,08	
E553	0,5152	8,97	
E558	0,53	6,36	ESTABLE
E582	0,5938	4,91	
E583	0,5571	1,57	
E584	0,546	3,53	
E655	0,5417	4,29	
E67	0,5659	0,017	
E793	0,5894	4,13	ESTABLE
E853	0,5414	4,34	

Taula 2 Llistat de perfils Eppler

D'aquí traiem que a primera vista i numèricament el perfil que més s'aproxima és el E67 que pràcticament calca el CI desitjat per un angle d'atac de 0° però en les gràfiques següents veurem que no és el més adient per altres motius

### 4.2.5. Anàlisi previ

A continuació es mostra les gràfiques de l'eficiència en vers l'angle d'atac per poder trobar el perfil més òptim. El Re al que es mostren aquestes gràfiques és de 3,52 milions (el que proporciona per defecte Visual Foil). Tot i no ser el Re al que estem treballant les gràfiques són igualment vàlides degut a que el flux es turbulent ( $Re > 10000$ ) en ambdós casos i per tant el CI i el Cd ( així com l'eficiència indirectament), són independents del Re (només resten afectats per valors alts d'angle d'atac, però a la zona d'estudi roman inalterat).

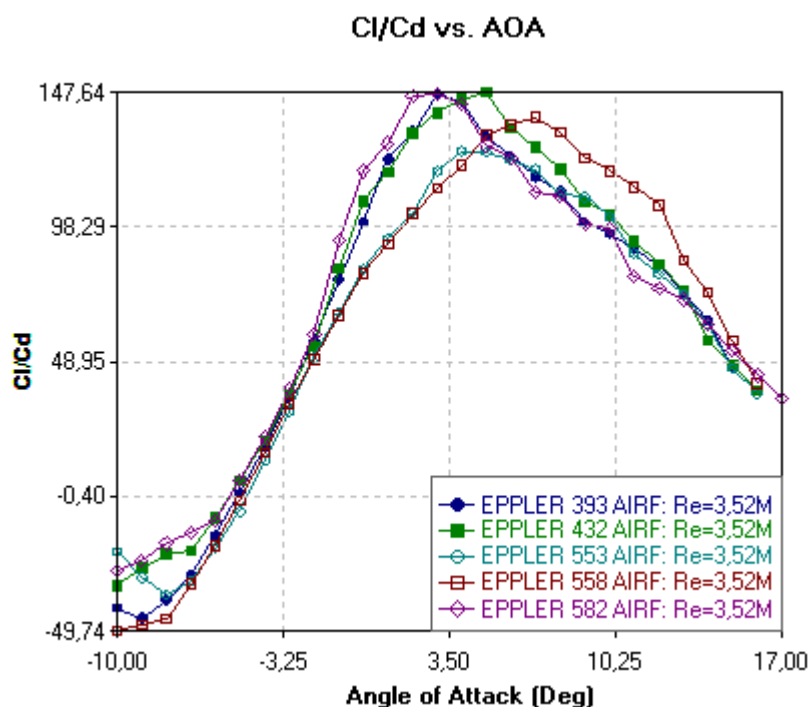


Figura 4.1 Eficiència en funció de l'angle d'atac (grup 1)

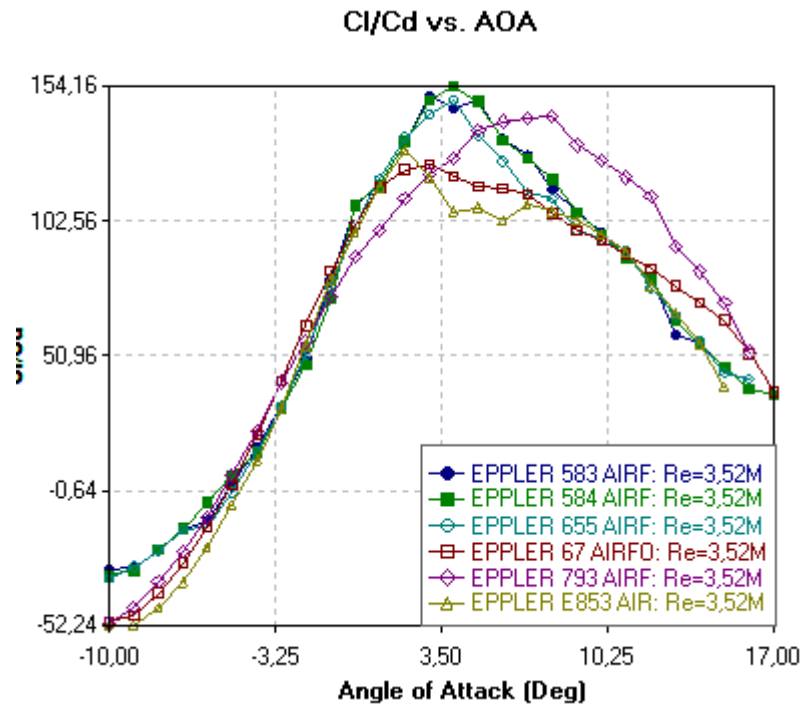


Figura 4.2 Eficiència en funció de l'angle d'atac (Grup 2)

En aquesta imatge es pot observar el motiu pel qual descartarem el E67, i és que la seva eficiència és de les pitjors de tota la gama de perfils analitzats.

Si tenim en compte que no només busquem una alta eficiència sinó que aquesta es mantingui plana el màxim temps possible, hi ha dos perfils que destaquen clarament per sobre la resta que són el E558 i el E793. A continuació es mostra una gràfica amb només els dos perfils que han passat a la fase final de selecció.

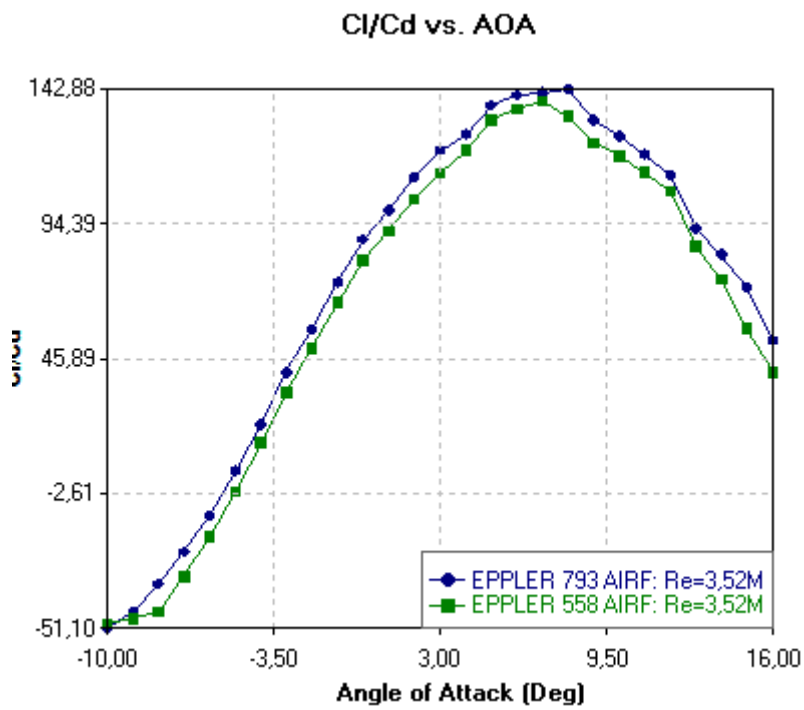


Figura 4.3 Eficiència en funció de l'angle d'atac (finalistes)

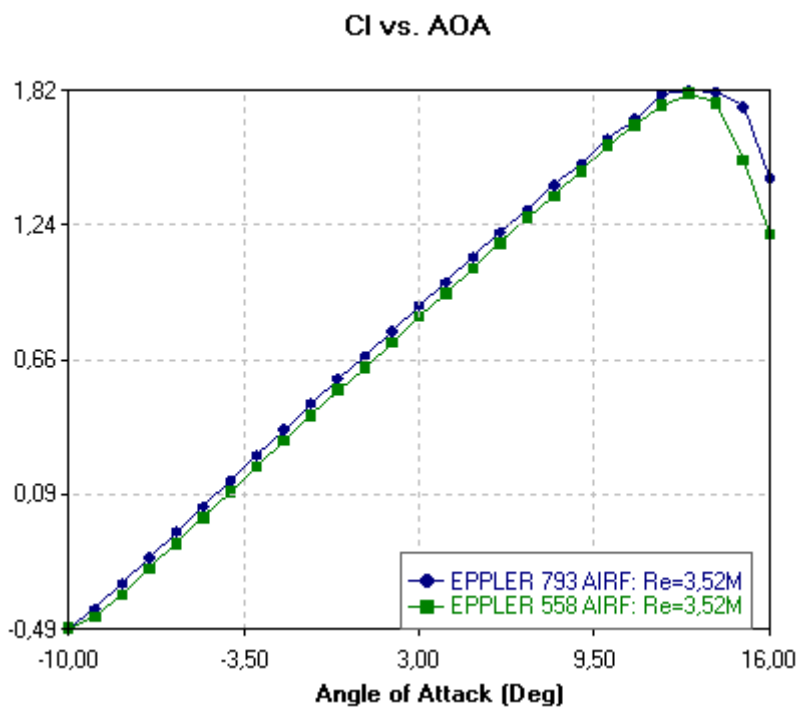


Figura 4.4 Cl en funció de l'angle d'atac (finalistes)



Tot i que tots dos són perfils molt similars, es pot observar que el E793 està lleugerem per sobre en quan a estabilitat i en quan a  $C_l$  s'aproxima més al valor desitjat per un angle de  $0^\circ$ . Per tant el perfil escollit per al disseny serà el E793.

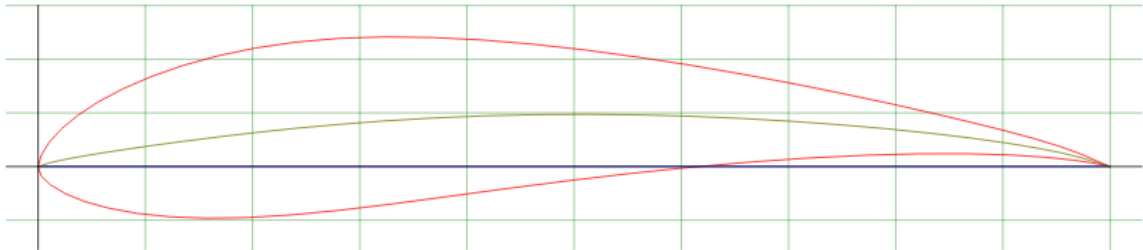


Figura 4.5 Perfil Seleccionat E793

L'angle d'atac inicial amb el que es dissenyarà serà de 0 graus degut a que té un drag pràcticament mínim per el lift que necessitariem, com s'observa a la següent figura.

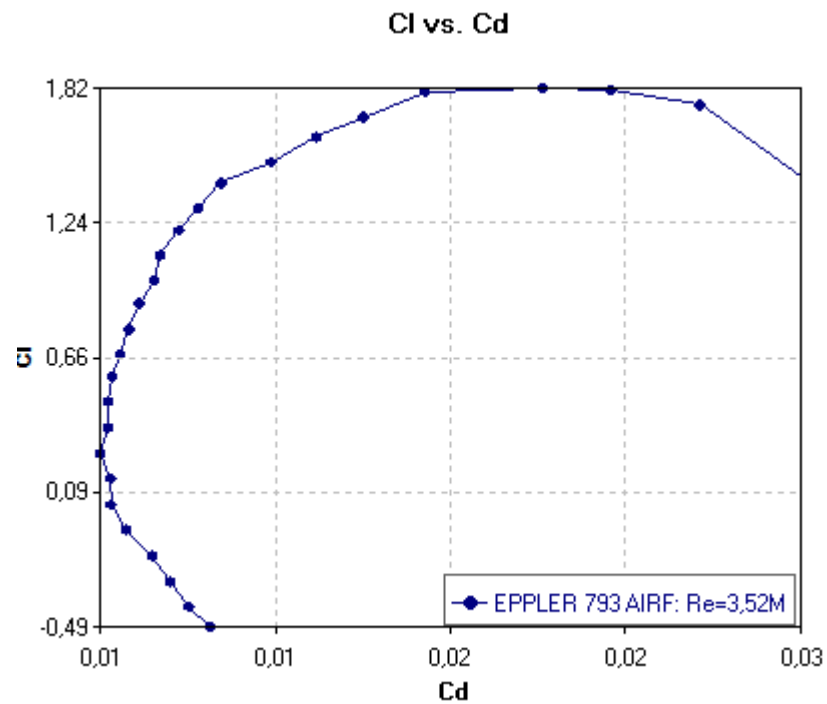


Figura 4.6  $C_l$  en funció  $C_d$  (perfil E793)

Per un CI de 0,58 aprox veiem que cau a la zona de tangència amb l'eix d'abcisses de la gràfica que es correspon alhora amb la zona de drag mínim, és per aquest motiu que triarem un angle inicial d'atac de 0 graus.

## 5. ANÀLISI PERFIL DARRER (RUDDERBOARD)

### 5.1. Disseny del perfil

Primerament s'ha considerat únicament el perfil sense la quilla per tal de validar el perfil. Per fer-ho s'ha creat un volum finit que representarà tot el domini de l'aigua, amb unes distàncies prou grans respecte les parets perquè no es generi efecte "terra".

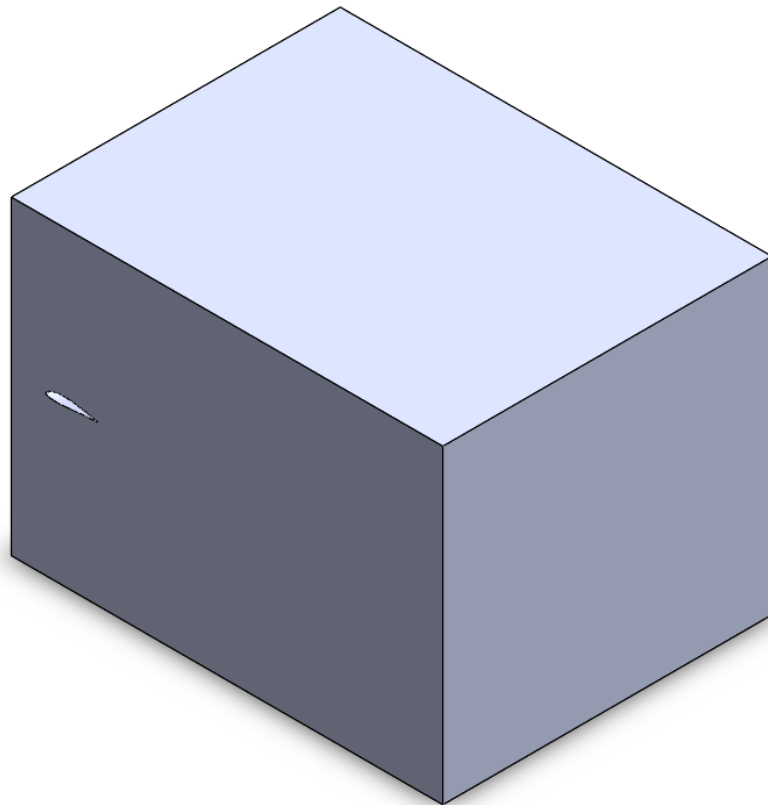
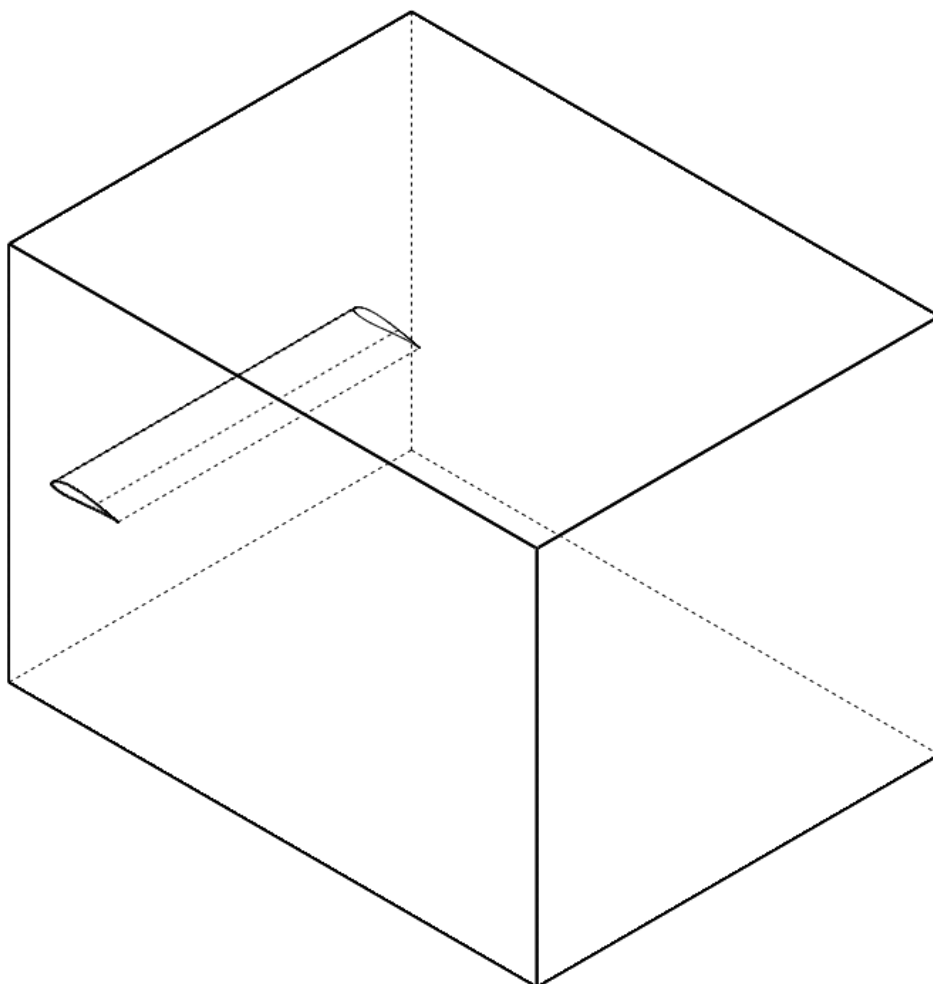


Figura 5.1 Volum finit d'estudi



*Figura 5.2 Extrusió del perfil al llarg del Volum finit*

Al volum finit s'ha fet un extrusió tallant del que seria el perfil darrer suposant-lo de secció constant tot i que a l'hora de la veritat és lleugerament decreixent conforme s'acosta al extrem. Això afectaria al drag en qualsevol cas, tot i que de forma menys exagerada del que ho faria en el perfil davant com veurem més endavant.

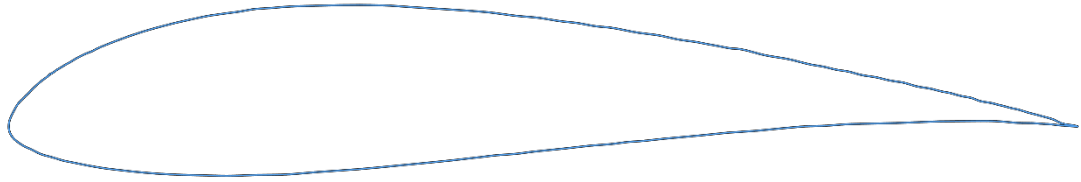


Figura 5.3 Perfil calcat i escalat de l'original (E793)

És convenient destacar que en l'anàlisi negligirem el suport submergit, ja que la intenció d'aquesta primera simulació és la de validar el model teòric obtingut amb el software de Visual Foil 5.0.

## 5.2. Mallat

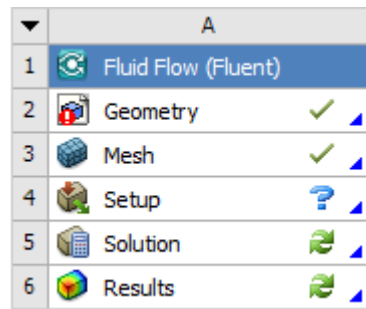


Figura 5.4 Procés global de simulació

La fase del mallat es possiblement la que comporta un major consum de temps ja que regularà la precisió dels resultats obtinguts. En aquest cas s'ha fet la subsegüent sèrie d'operacions.

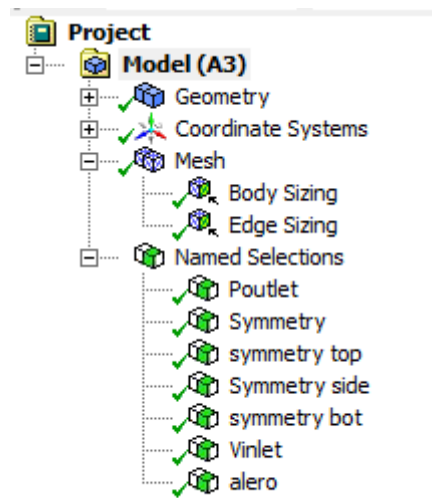


Figura 5.5 Operacions fetes durant el mallat

A més de fer el mallat també s'ha generat el “named selections” de cada part per a que posteriorment poguem definir correctament les condicions de contorn.

**-Tipus d'element:** Tetraedres, s'adaptaran millor a la geometria irregular amb corbes com el cas que ens ocupa.

Assembly Meshing	
Method	Tetrahedrons
Feature Capture	Program Controlled
Tessellation Refinement	Program Controlled
Intersection Feature Creation	Program Controlled

Figura 5.6 Mètode implementat de tetraèdres

**-Solucionador:** Fluent, és el *solver* per defecte que s'ensenya a l'escola.

**-Use advance Size Function:** On, Proximity an Curvature: Aquesta opció dota de certa intel·ligència al mallat per que sigui capaç d'automàticament refinar-se en tant i en quan s'acosta a una zona corba (com es tot el perfil).

Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
<input type="checkbox"/> Relevance	0
Sizing	
Use Advanced Size Function	On: Proximity and Curvature
Relevance Center	Fine
Smoothing	Medium
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default (18,0 °)
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	Default (3)
Proximity Size Function Sour...	Edges
<input type="checkbox"/> Min Size	Default (4,3348e-004 m)
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	Default (4,3348e-004 m)
<input type="checkbox"/> Max Size	Default (5,5486e-002 m)
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,20)
Minimum Edge Length	0,16760 m

Figura 5.7 Solucionador i opcions sizing definides

**-Relevance Center:** *Fine* aquesta opció disminueix la mida màxima i mínima d'element per defecte amb la intenció d'aconseguir un millor refinament de la malla.

**-Transition:** *Smooth* Això fa que les transicions entre un tipus de mallat i altre no siguin brusques, d'altre manera podrien aparèixer singularitats i valors anòmals.

**-Body sizing:** Considerant tot el volum d'aigua com a "body" el que fixarem és un mínim de mida d'element que volem tenir a tota la distribució, en aquest cas serà de 1cm.

Details of "Body Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	1, e-002 m
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (4,3348e-004 m)

Figura 5.8 Característiques Body Sizing

**-Edge sizing:** Finalment dividirem el perfil de la hidroala en costats d'1 mm per aconseguir la màxima precisió.

Details of "Edge Sizing" - Sizing	
<b>Scope</b>	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	4 Edges
<b>Definition</b>	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	1,e-003 m
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (4,3348e-004 m)

Figura 5.9 Característiques Edge Sizing

**Inflation:** S'ha estudiat la possibilitat de fer un inflation al voltant del perfil però en vista als resultats obtinguts en els estadístics (unes variables que indiquen la qualitat del mallat), i el corresponent CI s'ha acabat descartant l'opció.

Body sizing	Inflation	Element Quality	Skewness	Orthogonal quality	CI
0,02	SI	0,79024	0,24676	0,8614	0,44
0,02	NO	0,829	0,24	0,8542	0,499
0,01	NO	0,84	0,222	0,86254	0,51

Figura 5.10 Taula de valoració del mallat

Tot i que és cert que no representa una gran variació en el CI del 2on al 3r mallat, els estadístics de referència són lleugerament millors en aquest últim cas, és per aquest motiu que finalment el mallat a implementar serà aquest darrer.

A més notem que en el 1er mallat que havíem fet l'*inflation* amb tota la resta de paràmetres constants respecte el 2on, l'element *quality* cau quasi bé en 0,04 punts, aquesta variació queda reflectida en el CI que cau en proporció 0,5 punts aproximadament. És per aquest motiu que tot i ser altament recomanable fer l'*inflation* d'entrada, s'hagi acabat descartant per què no s'adequava a les necessitats de l'estudi.



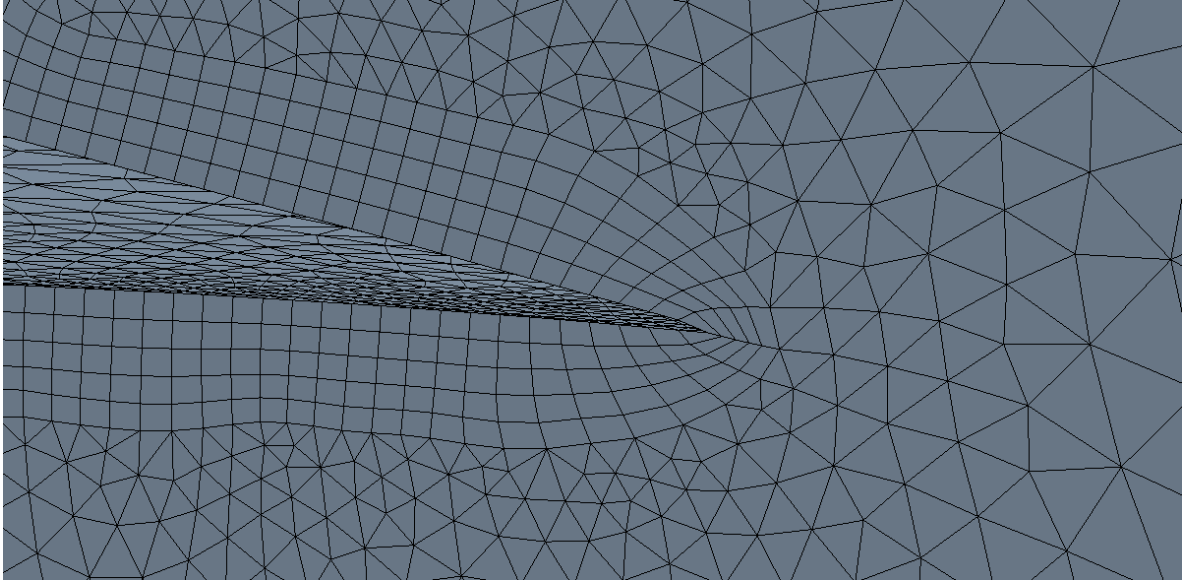
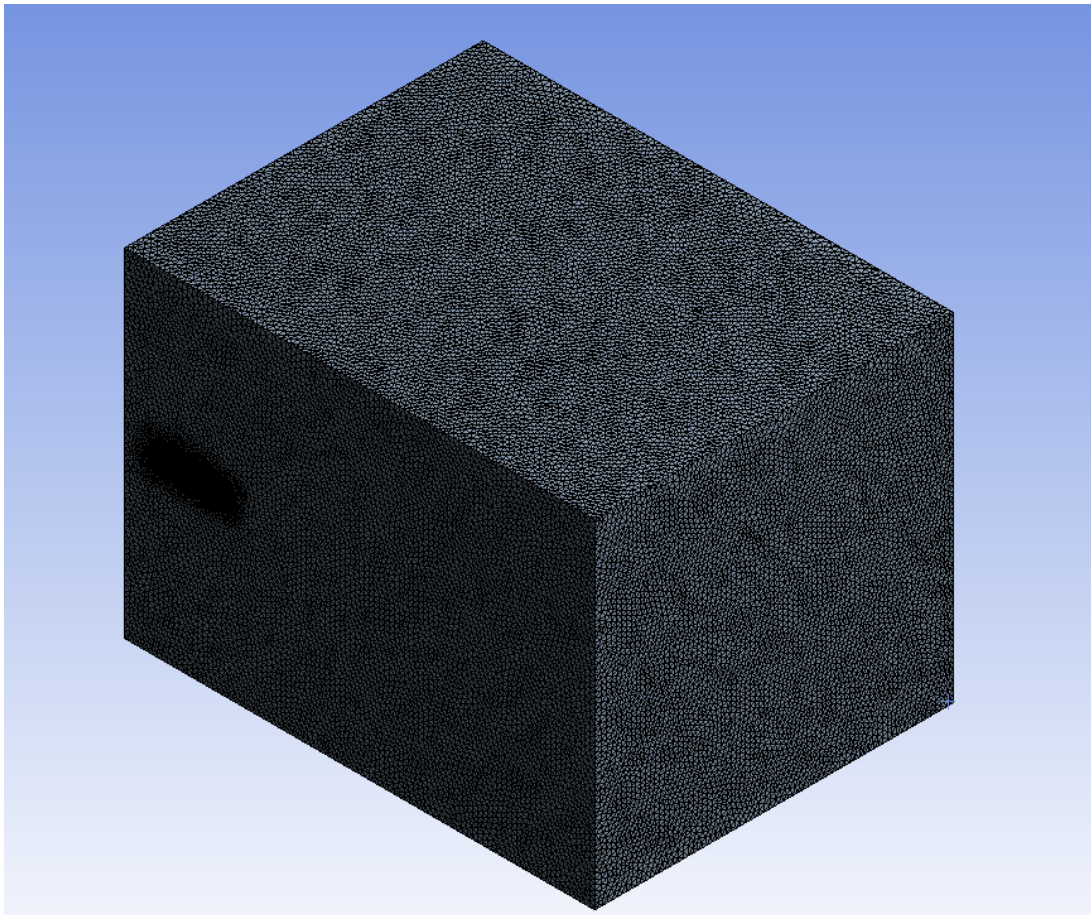


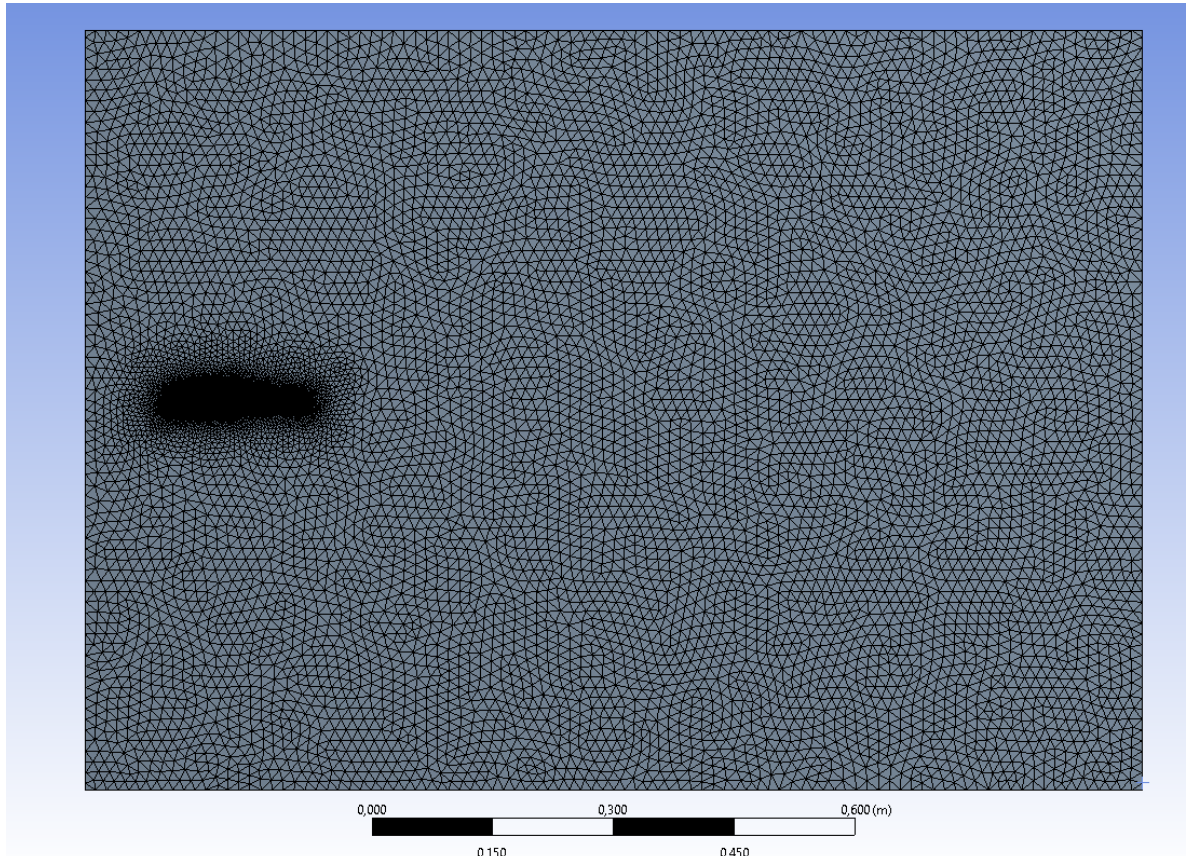
Figura 5.11 Aplicació del *inflation* al mallat

Si observem els elements més propers a la cantó de sortida veiem que pateixen una clara distorsió, aquest podria ser un dels motius pels quals l'element *quality* cau a l'hora que el *skewness* creix i el *inflation* desvirtua els resultats.

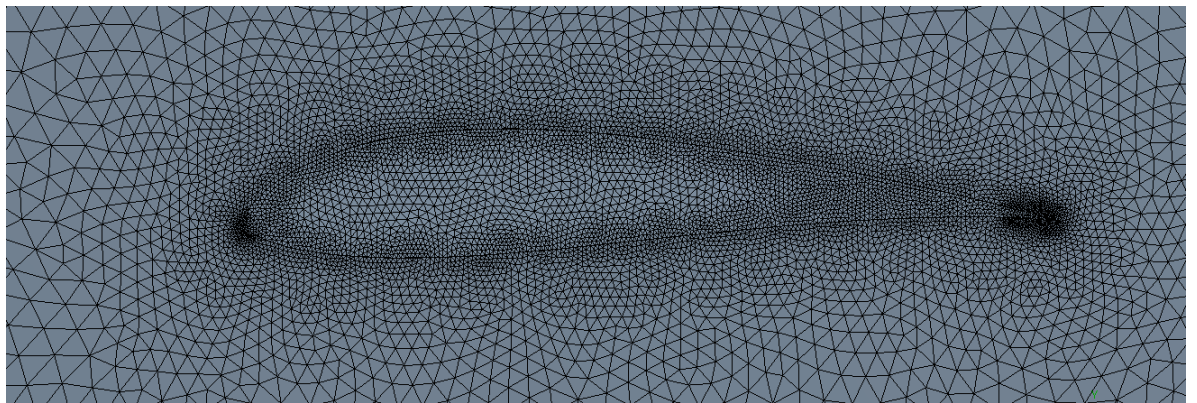
A continuació es mostren una sèrie d'imatges qualitatives al voltant del procés seguit, així com unes imatges qualitatives del mallat final.



*Figura 5.12 Mallat del volum de control*



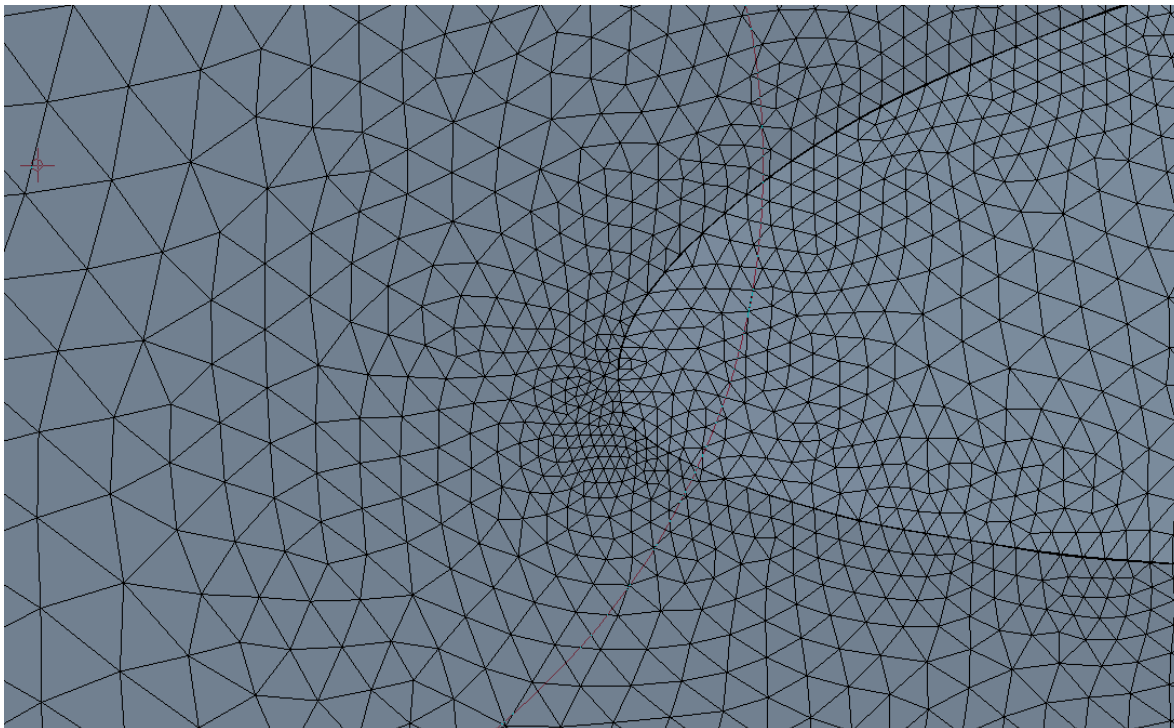
*Figura 5.13 Vista lateral del mallat*



*Figura 5.14 Aproximació al mallat del perfil*



Com es pot observar el mallat disminueix de tamany en tan i en quan ens acostem al perfil, això es degut a la opció *refine at curvature and proximity* que vol dir que fa el mallat més fi en tan i en quan s'acosta a una zona amb geometria corba.



*Figura 5.15 Aproximació del mallat al cantó d'atac*

### 5.3. Metodologia emprada (Set Up)

A continuació és mostrarà tot el procediment emprat pas a pas per poder realitzar la simulació correctament.

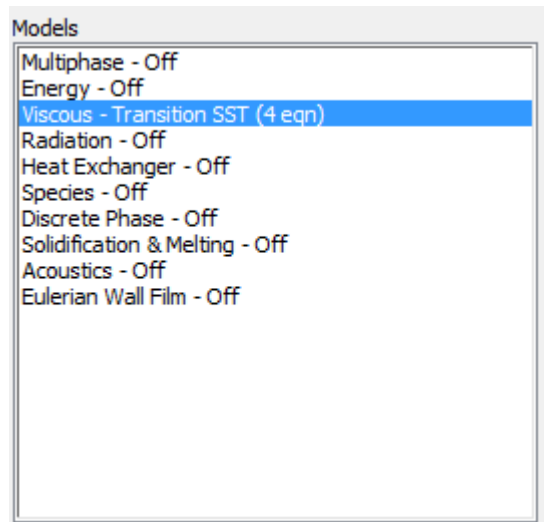


Figura 5.16 Model matemàtic escollit

Primer que tot seleccionem el model matemàtic que farem servir per que fluent iteri fins a la convergència d'aquestes equacions. El model triat en aquest cas és el SST de 4 equacions que té el doble d'equacions que el model K-epsilon clàssic però que, per contra partida, triga més temps a convergir.

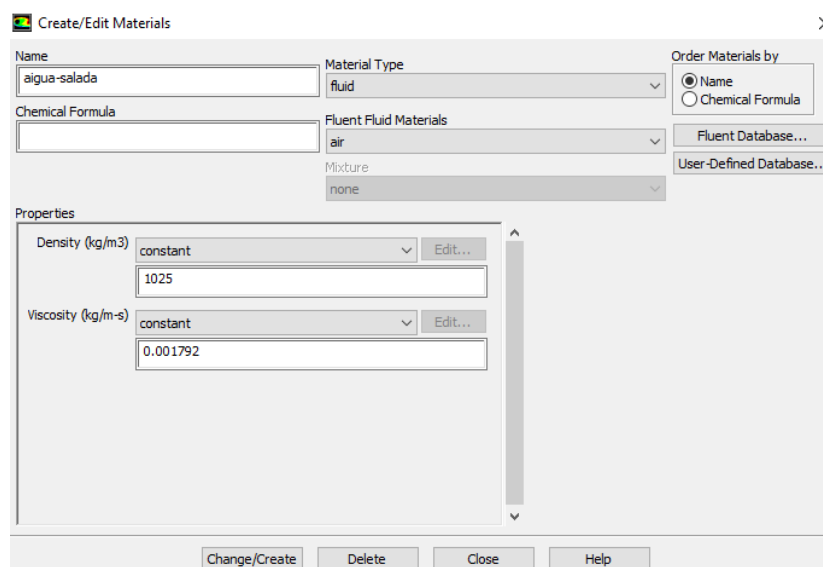


Figura 5.17 Definició propietats del fluid

El segon pas és definir les propietats del fluid, en el nostre cas, aigua de mar salada, amb una densitat de 1025 i una viscositat dinàmica de 0.001792, corresponent a l'aigua salada al voltant dels 0 °C com a cas de navegació extrema.

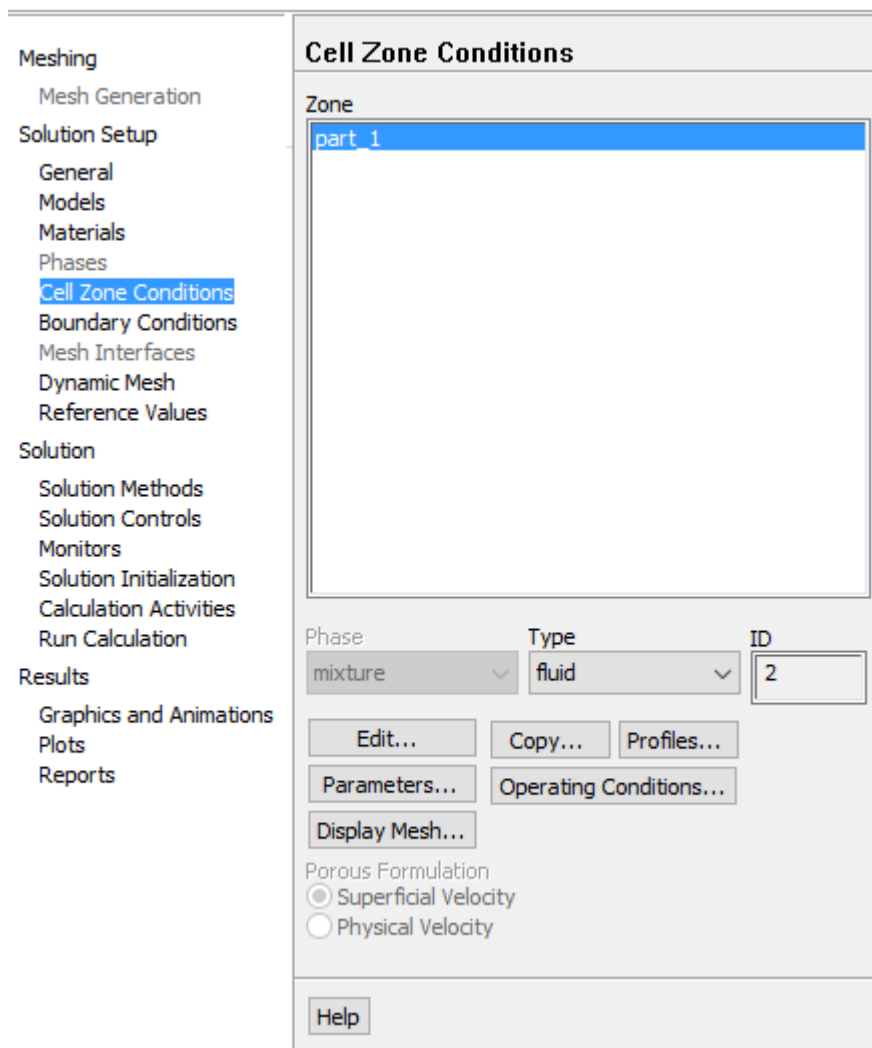


Figura 5.18 Condicions volum finit

Tot seguit cal assignar al volum finit que es comporti com a fluid.

En aquest apartat és defineixen les condicions de contorn de les zones prèviament definides.

Aleró: Les 3 superfícies corresponents a l'hidroala, definides en el seu conjunt com a tipus wall.

Vinlet: La superfície d'entrada del fluid, definit com a Velocity-inlet.

Poutlet: La superfície de sortida del fluid definit com a Pressure-outlet.

Symmetry\_zona: Les diferents superfícies que és definiran com a simetria, en aquest cas els quatre laterals paral·lels a la corda del perfil. Aquesta condició a efectes pràctics l'únic que farà es reduir les tallants sobre les parets a 0, com a la realitat.

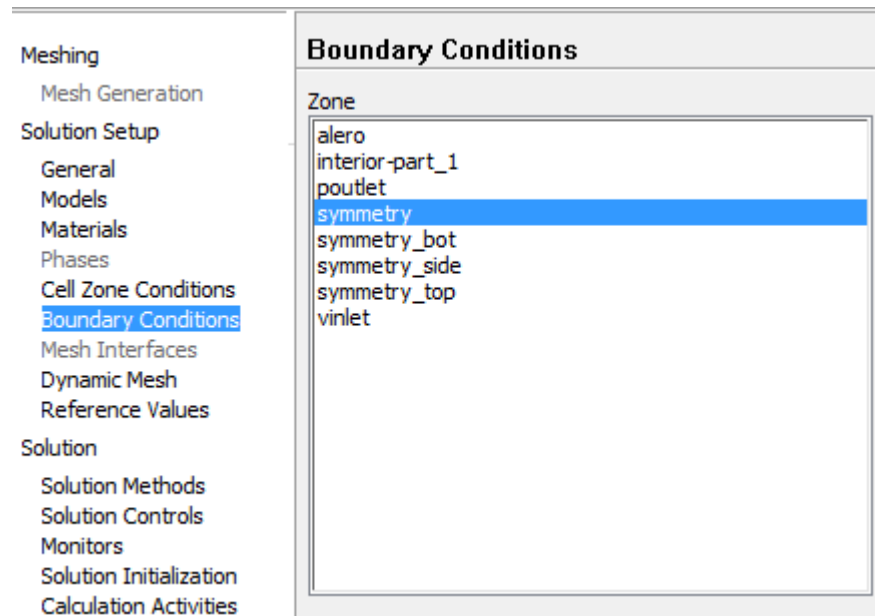


Figura 5.19 Condicions de contorn

Un cop definides les zones com a walls symmetry etc procedirem a assignar valors a la velocitat d'entrada, així com a la pressió de sortida.

A continuació cal definir la velocitat d'entrada 15.43m/s que corresponent als 55 km/h que poden arribar fàcilment aquestes embarcacions.

Velocity Inlet

Zone Name  
vinlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS

Velocity Specification Method: Magnitude, Normal to Boundary

Reference Frame: Absolute

Velocity Magnitude (m/s): 15.4333 constant

Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 0 constant

Turbulence

Specification Method: Intermittency, Intensity and Viscosity Ratio

Intermittency: 1 constant

Turbulent Intensity (%): 5 P

Turbulent Viscosity Ratio: 10 P

OK Cancel Help

Figura 5.20 Definició Vinlet



Cal definir els valors de referència que el fluent farà servir per calcular  $C_l$ ,  $C_d$  etc... Fent clic a "Compute from Vinlet" carregarà directament els valors fets servir a l'entrada.

**Reference Values**

Compute from  
vinlet

Reference Values

Area (m <sup>2</sup> )	0.103125
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1025
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	0.165
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	288.16
Velocity (m/s)	15.4333
Viscosity (kg/m-s)	0.001792
Ratio of Specific Heats	1.4

Reference Zone  
part\_1

Help

Figura 5.21 Valors de referència

Pressure Outlet

Zone Name  
poutlet

Momentum | Thermal | Radiation | Species | DPM | Multiphase | UDS

Gauge Pressure (pascal) 0 constant

Backflow Direction Specification Method Normal to Boundary

Radial Equilibrium Pressure Distribution  
 Average Pressure Specification  
 Target Mass Flow Rate

Turbulence

Specification Method Intermittency, Intensity and Viscosity Ratio

Backflow Intermittency 1 constant

Backflow Turbulent Intensity (%) 5 P

Backflow Turbulent Viscosity Ratio 10 P

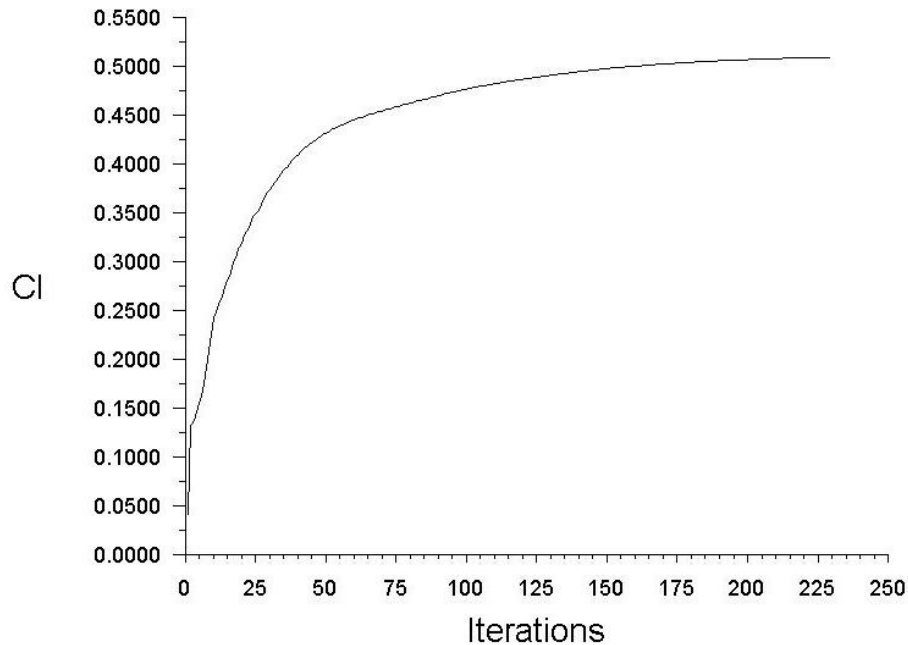
OK Cancel Help

Figura 5.22 Definició de la pressió de sortida

I finalment cal indicar que la pressió relativa del fluid a la sortida és 0 és a dir tota la pressió és l'atmosfèrica, l'equivalent a dir que tota l'energia del fluid serà cinètica. Serveix per imposar que les condicions del flux a la sortida siguin les mateixes que a l'entrada.

## 5.4. Primers resultats

### 5.4.1. CI



*Figura 5.23 CI perfil darrer*

En aquests primers resultats el CI obtingut és de l'ordre de 0.51 quan el teòric recordem que era de 0,58 això principalment és degut al motiu següent.

El mètode numèric és només una aproximació al model real, intrínsecament té un error que no sempre es pot eliminar, tot i que si reduir, a partir de augmentar la potencia de càlcul.

### 5.4.2. Cd

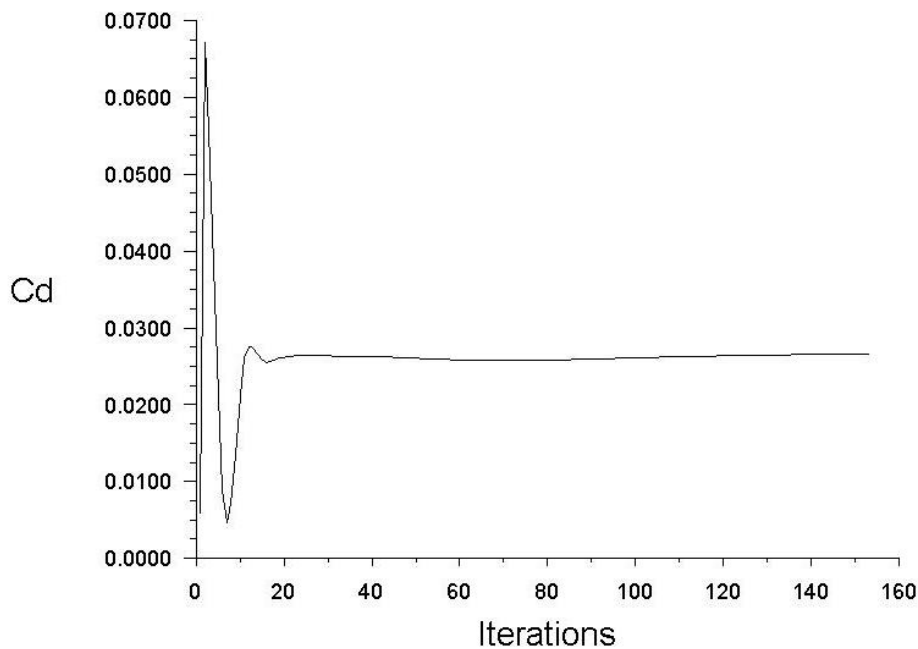


Figura 5.24 Cd perfil darrer

El principal motiu de que aquest Cd sigui una mica elevat (de l'ordre de 0.025) és que a l'anàlisi teòric es contempla el cas 2D. Aquí, en canvi, estem estudiant el model 3D, i en aquest model (més pròxim a la realitat), existeixen unes turbulències als extrems (resistència induïda) de l'ala que fan que aquest Cd augmenti respecte el teòric.

Per solucionar-ho caldria posicionar un *winglet*, que és una ala vertical fixada al extrem de la hidroala (similar al que porten els avions) que impediria que es formessin aquestes turbulències. Una altra opció seria la de fer un estrenyiment de la secció per tal que la superfície al extrem fos menor i per tant la resistència induïda també.

Tot i que aquestes solucions serien vàlides per solucionar el problema, la realitat és una altre, i és que en aquest cas els velers no disposen d'aquestes millores per tant no es correspondria millorar-lo.

### 5.4.3. Distribució de velocitats

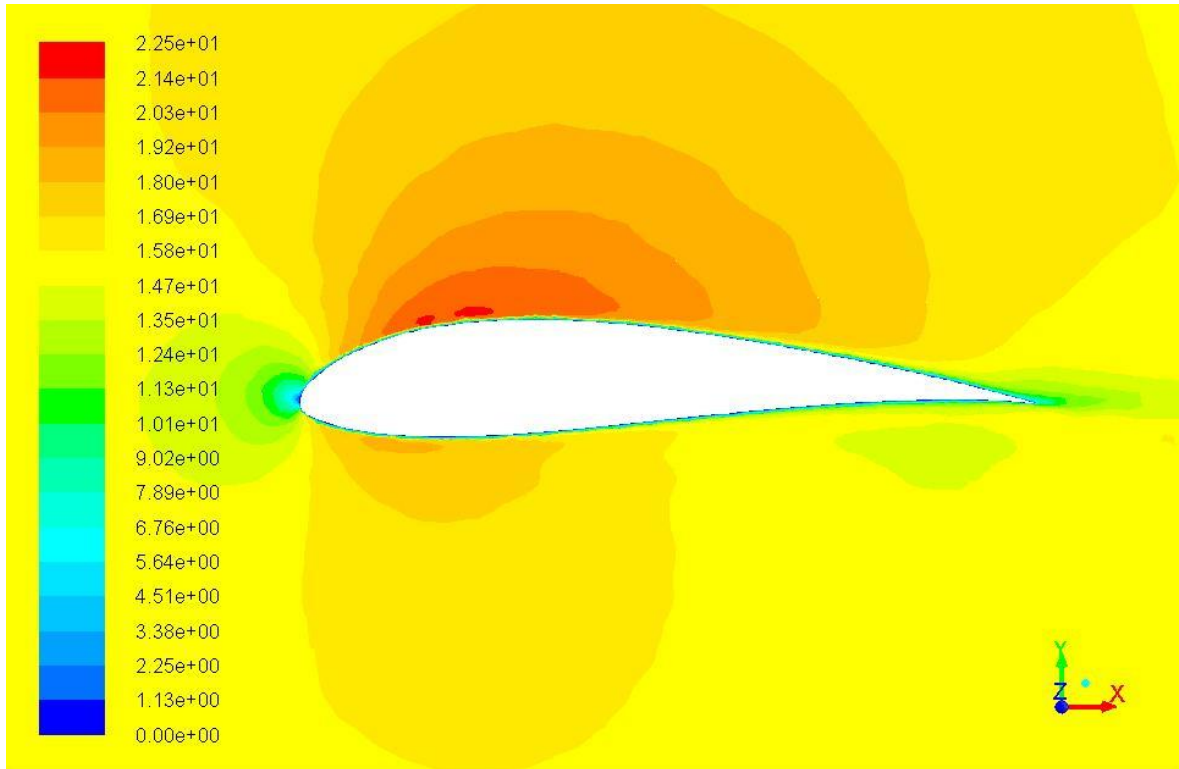


Figura 5.25 Distribució de velocitats perfil darrer [m/s]

En aquesta imatge queda reflectida clarament la distribució de velocitats, es veu com la velocitat màxima circula per la part superior a 22,5 m/s i per tant serà el punt de mínima pressió. També es pot observar que el deixant o estela es relativament petit, fet que fa que quedava reflectit en la imatge anterior on el *drag* era força reduït.

#### 5.4.4. Velocitat màxima

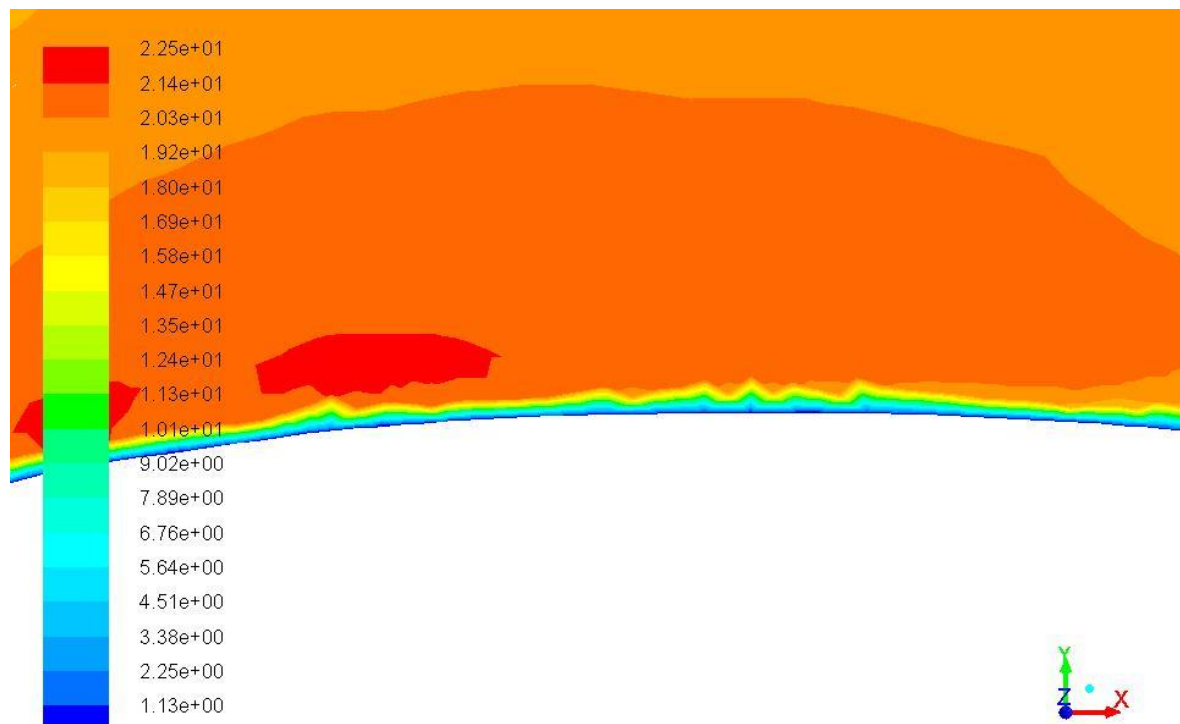


Figura 5.26 Velocitat màxima del perfil darrer [m/s]

A més podem comprovar la teoria de *Helmholtz- Kirchhoff*, per la qual un cop superada la major curvatura del cos la velocitat màxima del fluid on la pressió es manté més o menys constant val aproximadament 1,5x la velocitat de corrent lliure. En aquest cas la velocitat surt de l'ordre d'uns 22,5 m/s que és uns 1,46x la velocitat de corrent lliure, per tant donarem la teoria per validada. [6]

### 5.4.5. Punt d'estancament

Aquí es pot veure el punt de de velocitat 0 o on la pressió serà màxima també la continuïtat de les formes fa pensar que el mallat és prou acurat.

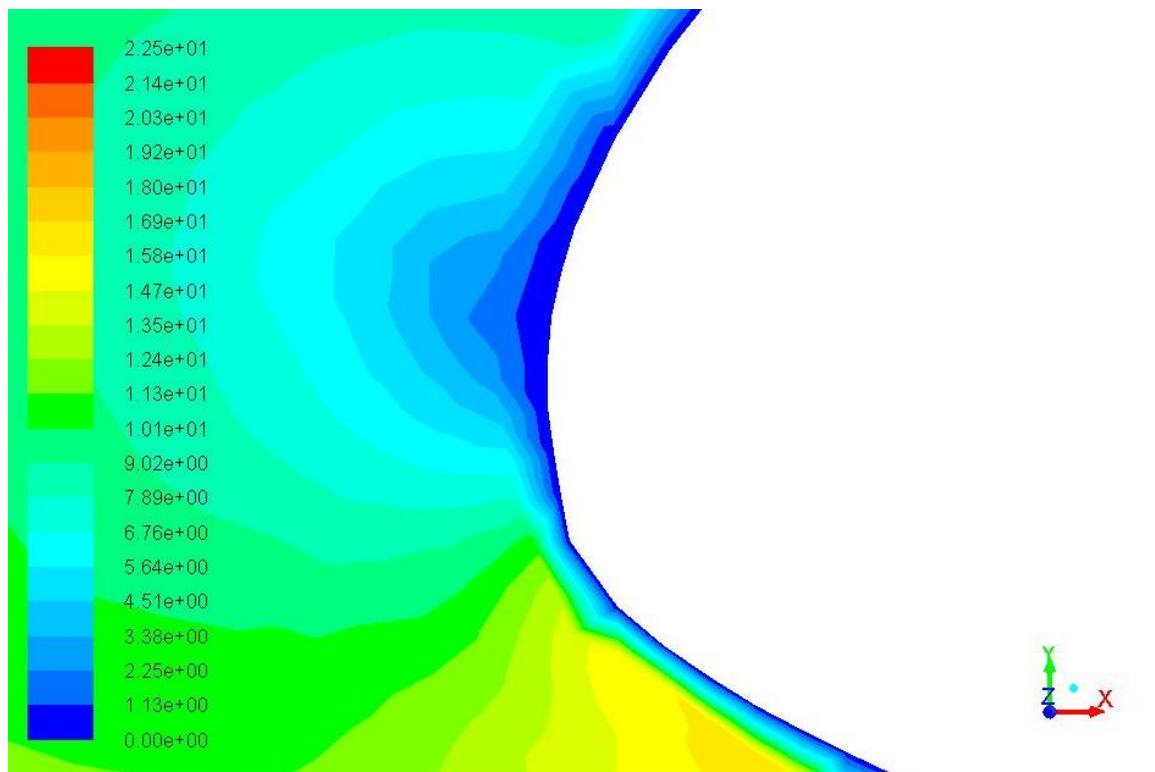


Figura 5.27 Punt d'estancament perfil darrer [m/s]

### 5.4.6. Deixant

A la següent imatge s'intenta representar l'estela que deixar anar, també és es pot apreciar com s'enganxa la capa límit al perfil fins al final degut a la seva forma hidrodinàmica. Aquest fet també fa constatar de nou que el drag serà mínim.

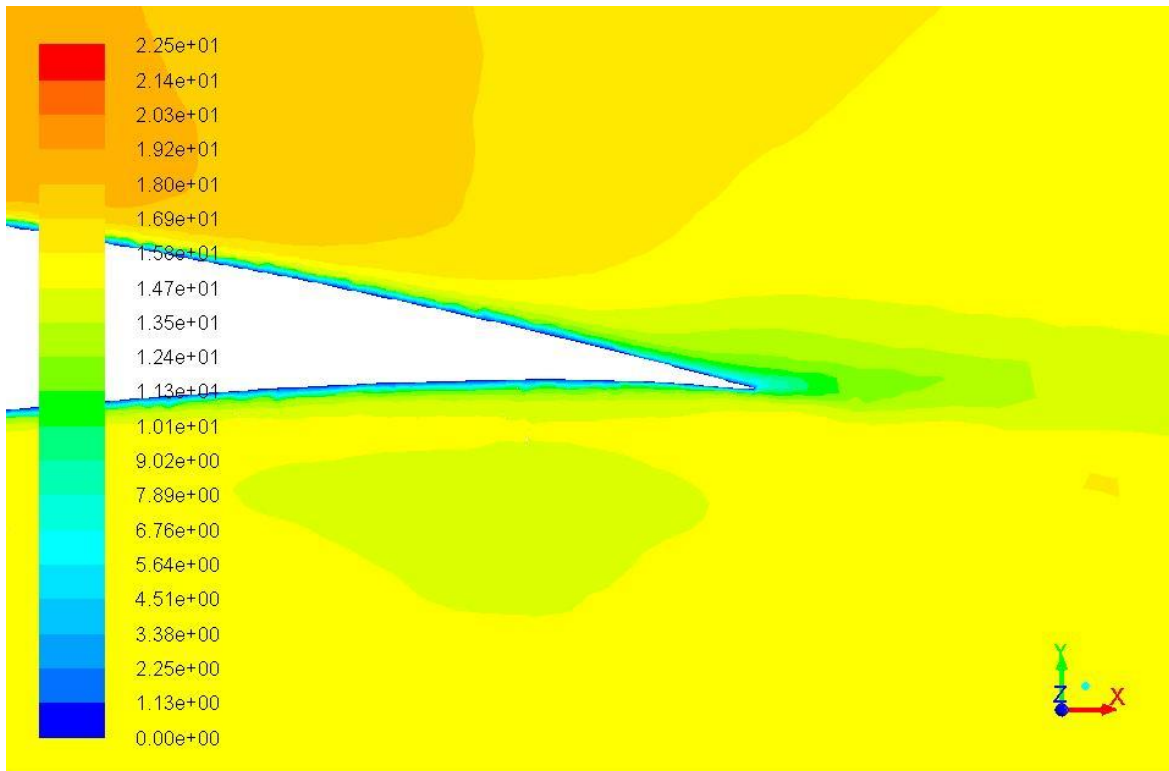


Figura 5.28 Deixant del perfil darrer [m/s]



### 5.4.7. Distribució de pressions

A la següent imatge es presenta la distribució de pressions que pel principi teòric que s'ha explicat hauria de ser complementari amb la distribució de velocitats que acabem de veure.

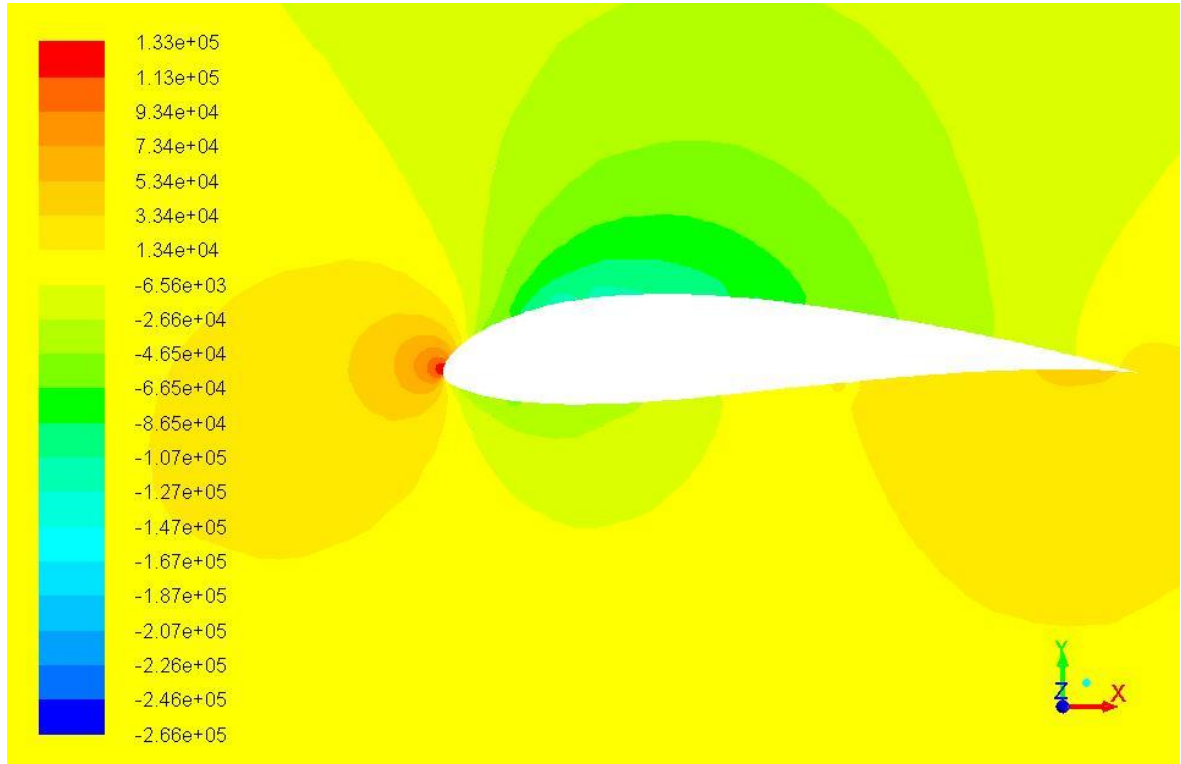


Figura 5.29 Distribució de pressions perfil darrer [Pa]

Efectivament és corroborada la teoria i es veu que el punt de pressió màxima de  $1,33 \cdot 10^5$  Pa es troba al cantó d'atac del perfil.

Finalment també es verificable que el punt d'estancament (punt de pressió màxima), la pressió total dinàmica experimental és de  $1,33 \cdot 10^5$  mentre que la teòrica és de l'ordre de  $1,22 \cdot 10^5$  Pa. Recordem que la pressió dinàmica es calculava com:

$$P_{Dinàmica} = \frac{1}{2} \rho \cdot C^2$$

## 6. ANALISI PERFIL DAVANTER (daggerfoil)

### 6.1. Determinació del perfil

La reglamentació en aquest apartat és molt més flexible del que podria ser en la hidroala darrera. Pràcticament no té limitacions, per fer el disseny es faran les següents hipòtesis.

-Suposarem que es vol dissenyar amb el mateix perfil, (E793).

-Es vol dissenyar perquè a una determinada velocitat entre els dos perfils aportin (en suma) la mateixa sustentació necessària. És a dir:

$$F_L = \frac{M \cdot g}{2} = 14264.649 \text{ N} = F_{L\text{traserera}} + F_{L\text{davantera}}$$

Així doncs si la velocitat de treball és considera de 10 m/s (uns 36 km/h) la  $F_{L\text{traserera}}$  quedarà de la següent forma:

$$F_{L\text{traserera}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A \cdot C_L = 6123,35 \text{ N}$$

$$C_L = 0.58$$

Per tant:

$$F_{L\text{davantera}} = 14264.649 \text{ N} - F_{L\text{traserera}} = 8141,299 \text{ N}$$

$$F_{L\text{davantera}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot c^2 \cdot A_{\text{necessària}} \cdot C_L = 8141,299 \text{ N}$$

$$A_{\text{necessària}} = 0,273 \text{ m}^2$$

Aleshores, suposant que volem dissenyar-ho amb una corda d'uns 20 cm de corda.

Quedarà que la profunditat necessària serà de l'ordre de 1,3694 m.(suposant secció

constant).

Es fa notori que és necessita major superfície degut a la baixa velocitat a la que circularà al principi, i com que el lift depèn de forma quadràtica de la velocitat, si aquesta és constant l'àrea necessària creix més ràpidament a baixes velocitats.

A més cal notar que la secció en el perfil davanter tendeix a no ser constant (figura 6.1), aquest fet es fa per tal de minimitzar el drag del perfil, però en aquest cas no es simularà i es suposarà secció recta, assumint un error en el drag. En aquesta primera aproximació tampoc es simularà el suport ja que únicament és buscar validar el CI del perfil a nivell teòric. El suport pràcticament no restara lift, només afegiria drag (ja que l'àrea de lift del perfil a restar seria mínima).



*Figura 6.1 Vista en detall de l'estricció de la secció*

## 6.2. Simulació perfil davanter

Anàlogament al perfil darrer s'ha simulat, amb el mateix procediment, l'aleró darrer. Amb la diferència que la velocitat del fluid a l'entrada serà de 10 m/s, tot i que, per validar el model tampoc és imprescindible ja que el CI és independent de la velocitat del fluid en un règim turbulent.

També cal destacar que per ser puristes, en aquesta simulació caldria l'addició d'un winglet per anul·lar la resistència induïda que a la realitat és molt menor .

### 6.2.1. Model matemàtic

El model utilitzat és el SST de 4 equacions que ofereix el doble de resolució que el clàssic K-epsilon ja que utilitza el doble d'equacions a costa de l'augment del temps de càlcul.

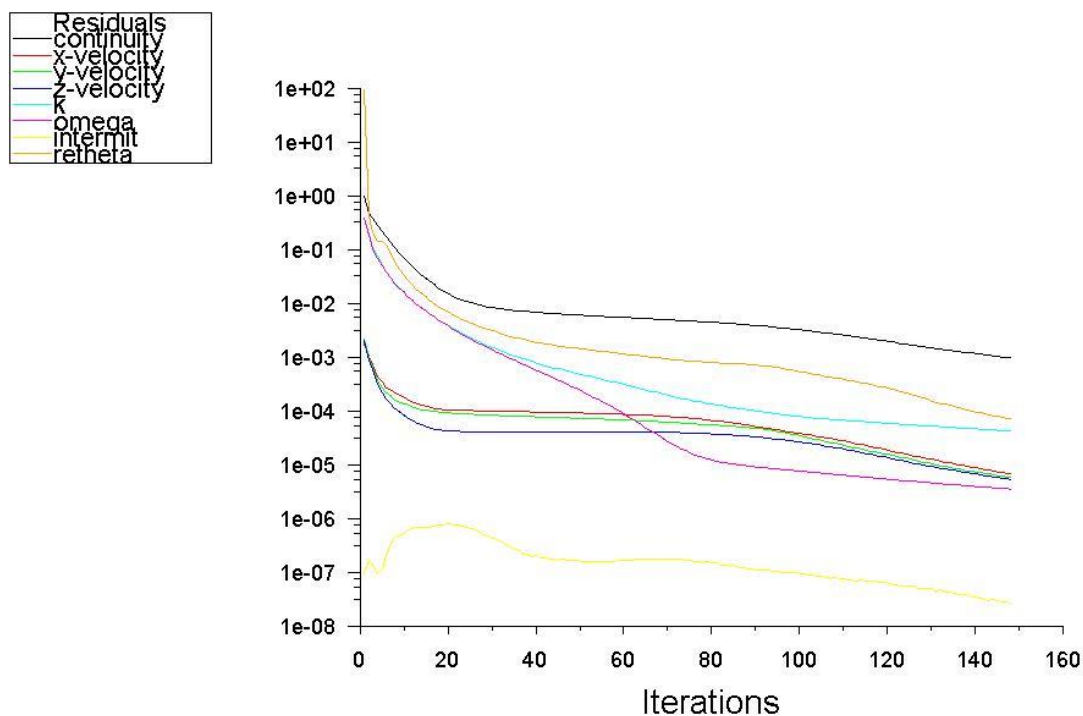
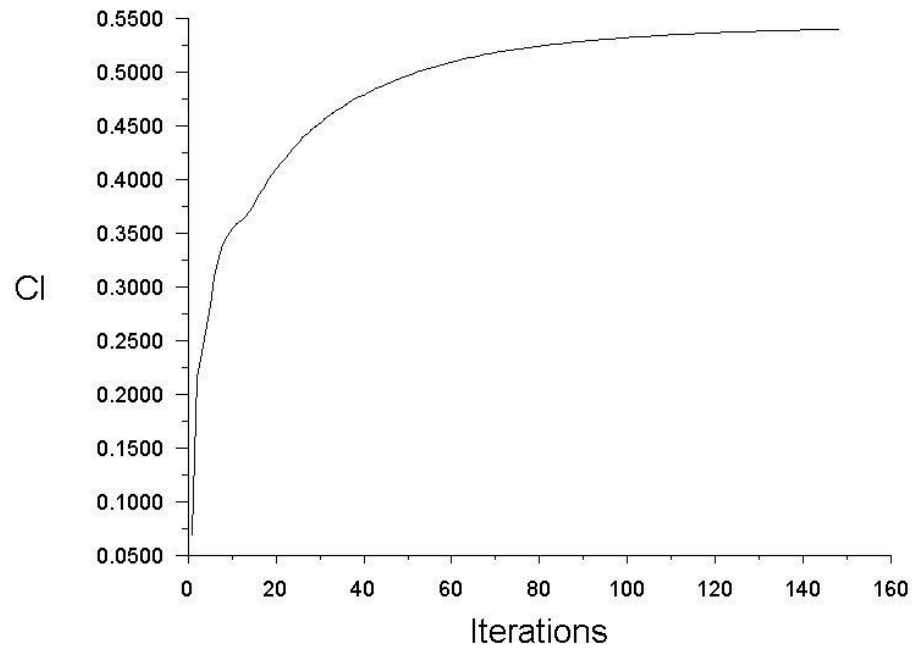


Figura 6.2 Convergència dels paràmetres del model SST

### 6.2.2. CI

El CI en aquest cas ronda molt més el valor esperat de 0,58 està sobre els 0,54 (un 6% d'error aproximadament).



*Figura 6.3 CI perfil davanter*

Per tant podem concloure, com ja era d'esperar, que el CI és el mateix independentment de l'àrea i de la velocitat del fluid, en el supòsit que aquest sigui turbulent. És únicament funció de característiques geomètriques del perfil E793.

### 6.2.3. Cd

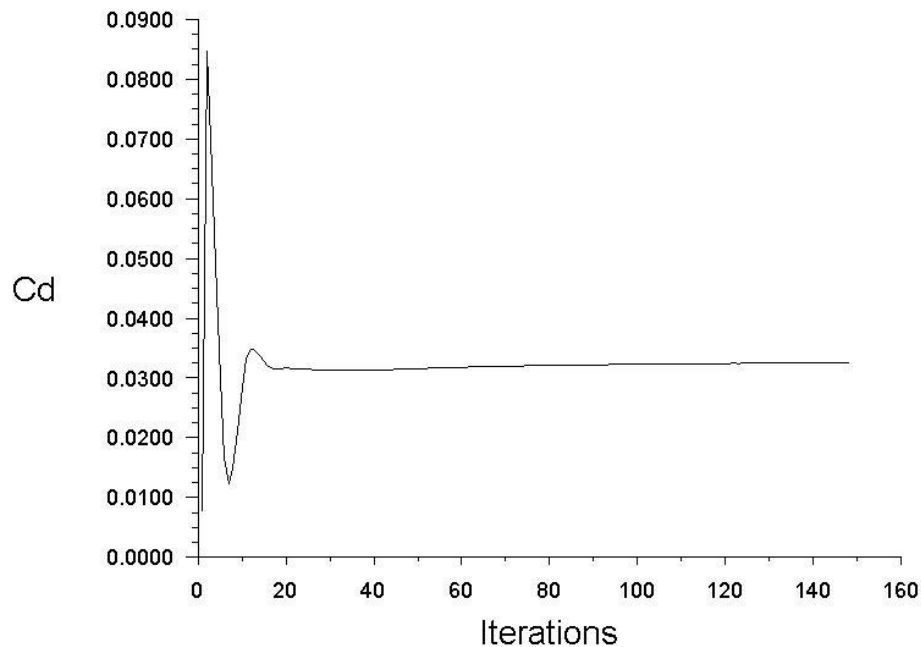


Figura 6.4 Cd perfil davanter

Aquest coeficient de *drag* (0.0325) tot i ser el calculat numèricament no és real i és que s'ha fet l'aproximació de que la secció és constant quan en veritat no ho és, ja que aquestes naus al perfil davanter pateixen una certa estricció de la secció fet que, teòricament, fa disminuir la resistència induïda.

Per solucionar això es podrien fer diverses coses una és simular el model 3D real, però és complicat saber el valor exacte de l'estricció de la secció degut recordem al caire competitiu dels dissenys.

La segona opció seria simular igualment amb secció constant però afegint-hi un winglet, aquesta opció era la que es volia fer inicialment en els objectius inicials del treball però s'ha hagut de retallar per limitacions temporals.

#### 6.2.4. Distribució de Velocitats

En aquest cas veiem que la distribució de velocitats, és similar al del perfil darrer però reescalat a 10 m/s.

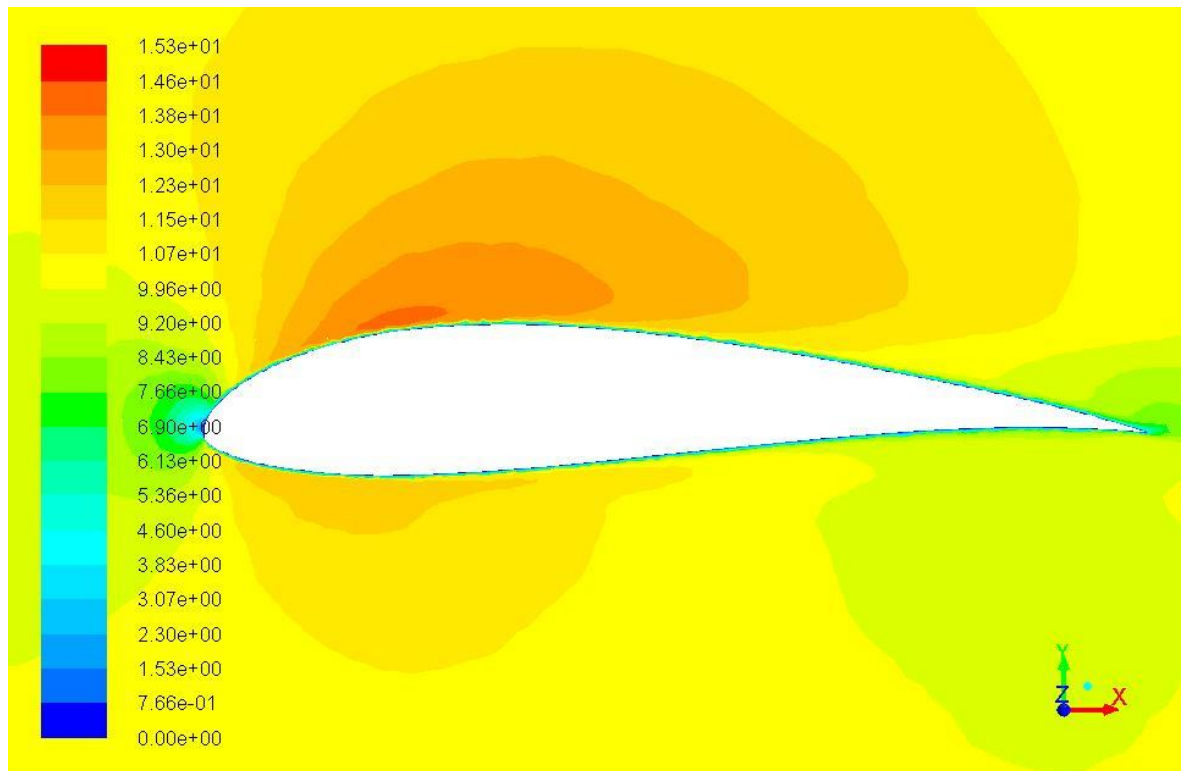


Figura 6.5 Distribució de velocitats perfil davanter [m/s]

Podem observar que el punt d'estancament està situat al mateix lloc que en el disseny anterior, com era d'esperar. També s'atisba un deixant estret, en concordança amb el drag relativament petit.

### 6.2.5. Velocitat màxima

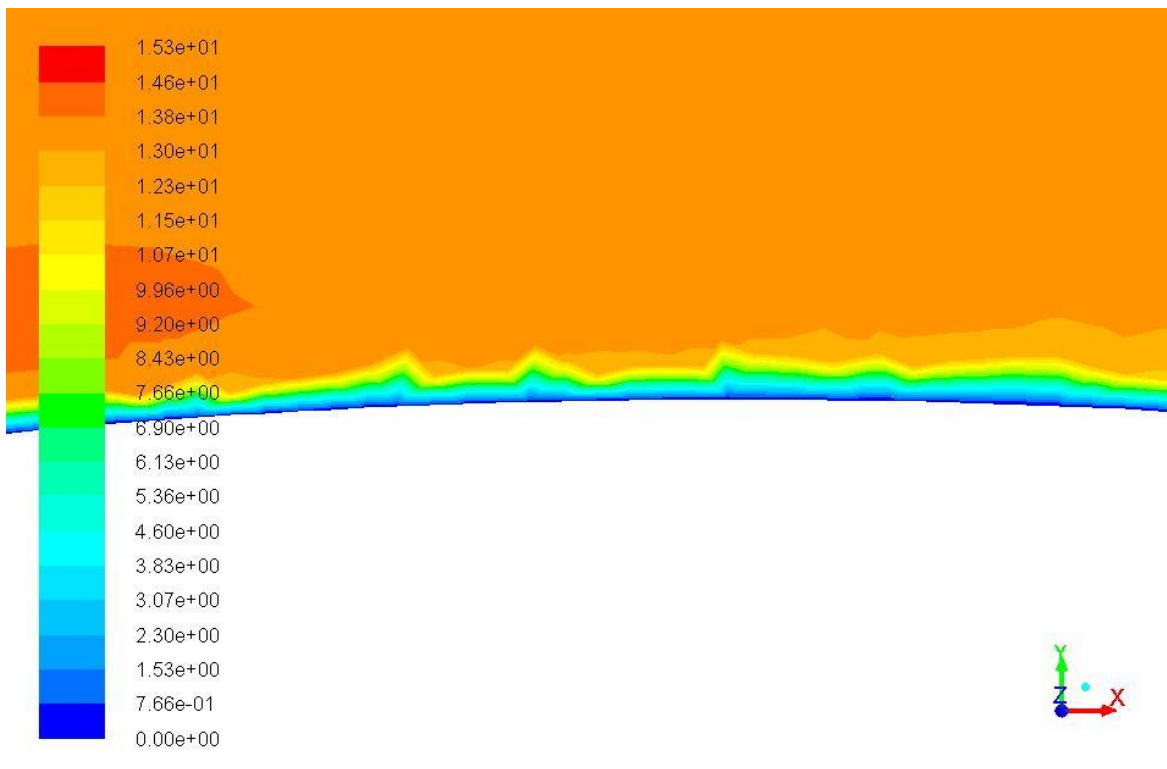


Figura 6.6 Velocitat màxima perfil davanter [m/s]

En aquesta ocasió la velocitat màxima ronda els 15,3 m/s quan segons la teoria de *Helmholtz-Kirchoff* (comentada en el perfil darrer), hauria de voltar els 15m/s per tant sembla prou raonable el seu valor. També podem observar petites irregularitats del mallat que es podrien interpretar com la necessitat de fer un mallat una mica més acurat, tot i que, com s'ha vist al perfil darrer, s'ha rebutjat fer *l'inflation*.



## 7. Impacte mediambiental

L'impacte mediambiental d'aquest projecte ha resultat ser força reduït degut als següents factors:

És un projecte realitzat a partir de simulacions numèriques d'ansys, per tant el consum d'energia és relativament petit ja que només tenim el consum de l'energia elèctrica dels ordinadors durant les múltiples simulacions que hi ha hagut al llarg del treball.

A més l'estudi de les hidroales té connotacions positives des del punt de vista ecològic ja que permeten a les embarcacions viatjar amb un *drag* força més reduït i per tant amb menys consum d'energia. Ben cert és que en aquest cas particular l'energia primària resultava ser l'aire i per tant el seu impacte mediambiental és nul.



Figura 7.1 Les hidroales protegeixen el medi ambient

Tot i que l'aplicació d'aquest projecte eren les embarcacions participants a la Copa Amèrica, les hidroales tenen moltes altres aplicacions que hem anat veient, algunes d'elles amb un consum d'energia important i provinent d'energies no renovables. Aquest fet dota d'importància les hidroales des d'un punt de vista mediambiental.

## 8. PLANIFICACIÓ TEMPORAL

Degut a que gran part del projecte s'ha realització del projecte s'ha fet en horari no lectiu (mesos de juliol i agost), la planificació temporal ha quedat molt condensada en aquests mesos com es descriu en la següent taula.

Concepte	Setmana d'inici	Durada	Calendari
Registre TFG	1	-	14/03/2016
Planificació d'objectius	1	3	14/03/2016-3/04/2016
Històrica Copa Amèrica	4	2	4/04/2016-17/04/2016
Teoria America's Class	6	3	18/04/2016-08/05/2016
Teoria hidroales	9	2	9/05/2016-22/05/2016
Elecció perfil	11	2	23/05/2016-5/06/2016
Anàlisi Perfil darrer	13	2	11/07/2016-24/07/2016
Anàlisi perfil davanter	15	2	25/07/2016-07/08/2016
Viabilitat econòmica/Impacte mediambiental	17	1	08/08/2016-14/08/2016
Planificació Temporal	18	1	15/08/2016-21/08/2016
Redacció Final	19	2	22/08/2016-04/09/2016
Revisió i entrega final	21	1	

Taula 3 Planificació temporal de les tasques

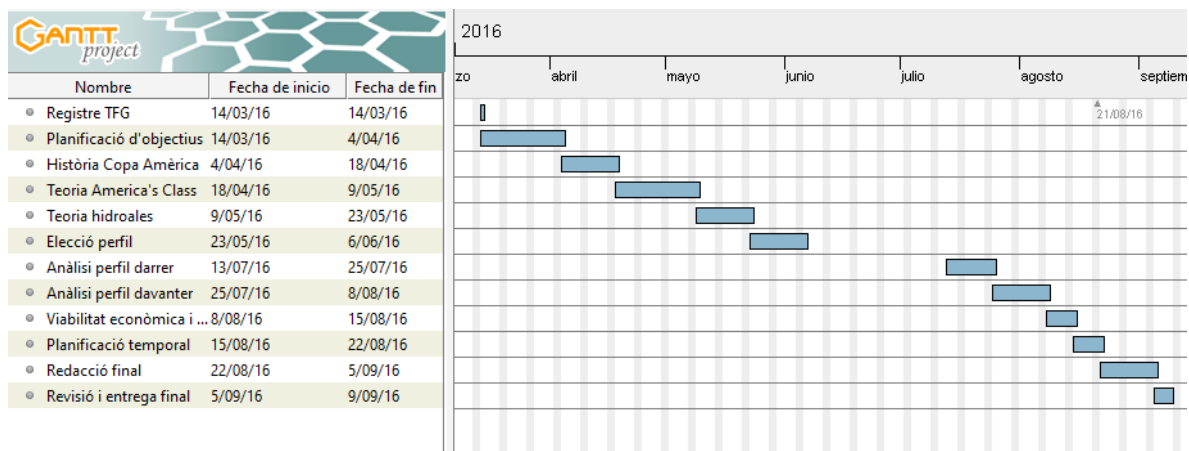


Figura 8.1 Diagrama de Gantt de les tasques

Al diagrama de Gantt podem observar un buit, corresponent al període d'exàmens finals i reavaluacions de l'escola, on no es va poder avançar en el projecte.

## 9. Viabilitat econòmica

En l'estudi sobre la viabilitat econòmica d'aquest projecte s'ha tingut en compte diversos factors a considerar.

Concepte	Hores [h]	Preu unitari [€/h]	Cost [€]
Enginyer Industrial	300	22,5€/h	6.750
Llicència ansys fluent [7]			200
Llicència Solidworks[8]			250
Llicència Office [9]			110
Ordinador per simular			1.200
Llicència Visual Foil 5.0] [10]			100
TOTAL(sens e impostos)			8.610
Total			10.418,10

*Taula 4 Distribució de costos del projecte*

Aquest projecte té associat un cost total de 10.418,10 €, tenint un marge de benefici per l'empresa de 0€, si per exemple imposéssim un marge de benefici per ser competitius del 10%, el cost total ascendiria fins els 11459,91 € amb un benefici total de 1041,81€ per l'empresa.

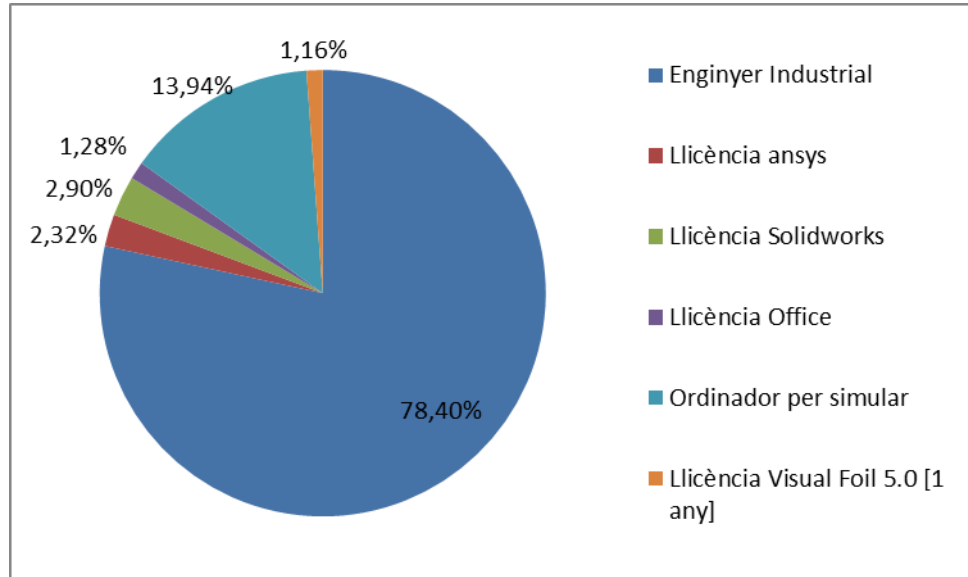


Figura 9.1 Gràfica percentual de la distribució de costos

Vist amb una mica de perspectiva podem veure que el que representa un major consum de capital és el salari del enginyer en relació a la resta de despeses.(78,4%).

## 10. LÍNIES DE FUTUR

Com s'ha destacat al llarg del treball, els perfils simulats, no necessàriament són els utilitzats en la competició, ja que part de la gràcia de la competició està en millorar aquests perfils per millorar la velocitat punta de les naus. Si tots partissin amb les mateixes hidroales es perdria part de l'esperit competitiu del torneig. És per això que el primer que caldria fer es provar moltes més geometries, a ser possible que no fossin d'una base de dades pública, (com és el cas).

En segon lloc caldria corregir el *drag* del perfil davanter, per mitjà o del re-disseny del perfil davanter amb la secció variable, o bé adherint el *winglet* que ja s'ha comentat anteriorment.

Finalment tot i que per motius obvis no és de gaire rellevància seria interessant fer simulacions amb tot el suport treballant en medi aquos també, el qual, previsiblement, afegiria drag i restaria una mica de lift però el lift que restaria tendria a zero ja que l'àrea que ocuparia el suport seria mínima.

També podria ser interessant l'estudi de distribució de pesos que hi ha a l'embarcació, per mitjà de l'estudi del moment que generaria la hidroala (que amb ansys es relativament fàcil d'esbrinar). Amb aquest estudi es podria determinar com s'ha de distribuir els pesos per aconseguir una navegació més estable.



Figura 10.1 Vista en perspectiva d'un AC45

## Conclusions

Les conclusions que es poden extreure d'aquest treball són les següents:

El poc ús que encara avui en dia se'n fa (tot i que va en augment), com en tot avanç tecnològic el primer pas és la competició següent la seva implementació en embarcacions més quotidianes.

La gran utilitat en quan a reducció de la força de resistència al avanç que aquestes hidroales poden proporcionar.

Ha ajudat a comprendre el funcionament de la hidrodinàmica de baixes velocitats.

S'ha après a dissenyar les hidroales en base als diferents requeriments que podem demanar, normatives especificacions tècniques i de més.

En el cas del perfil darrer (Eppler 793), s'ha pogut verificar la seva força de sustentació i de drag.

En el cas del perfil davanter, hem pogut notar com havia d'augmentar en superfície degut a la importància de la velocitat del flux en l'estudi, i tot i no haver estat prou puristes amb l'addició del winglet per reduir el drag i simular l'estrenyiment de la secció, si que s'ha pogut verificar que el coeficient de sustentació és l'esperat.

Finalment la metodologia d'estudi d'aquest projecte el converteix en un projecte sostenible tan des del punt de vista econòmic(no requereix d'una gran inversió) com des del punt de vista mediambiental.

## Agraïments

Agraïr tota la paciència i suport que amics i familiars m'han donat al llarg de tot el treball, així com la tutorització del treball per part de l'Enric Trillas Gay que ha estat de gran ajuda durant tot el projecte.



# Bibliografia

## Referències bibliogràfiques

- [1] [http://www.fondear.com/todo\\_regatas/Copa\\_America/Historia/Historia\\_CA.htm](http://www.fondear.com/todo_regatas/Copa_America/Historia/Historia_CA.htm)
- [2] [https://en.wikipedia.org/wiki/America%27s\\_Cup](https://en.wikipedia.org/wiki/America%27s_Cup)
- [3] [http://www.fondear.com/todo\\_regatas/Copa\\_America/Metodologia/Reglamento.htmCA](http://www.fondear.com/todo_regatas/Copa_America/Metodologia/Reglamento.htmCA)
- [4] [kimerius.com/app/download/5782479311/Aerodinamica+de+perfiles.pdf](http://kimerius.com/app/download/5782479311/Aerodinamica+de+perfiles.pdf)
- [5] <http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/tema10/tema10-3.htm>
- [6] Mecánica de Fluidos de Frank M.White (5ena edició)
- [7] <http://www.ansys.com/es-ES/Products/>
- [8] [https://store.solidworks.com/studentstore/default.php?scid=sw\\_purchasestudentedition\\_list](https://store.solidworks.com/studentstore/default.php?scid=sw_purchasestudentedition_list)
- [9] [https://www.microsoftstore.com/store/mseea/es\\_ES/cat/Office/categoryID.66226700](https://www.microsoftstore.com/store/mseea/es_ES/cat/Office/categoryID.66226700)
- [10] <http://www.hanleyinnovations.com/vf50.html>

## Bibliografia complementària

Reglamentació de l'America's Cup (inclosa als annexos).

## SUMARI FIGURES

Figura 3.1 Trofeu de la Copa Amèrica .....	11
Figura 3.2 Veler Amèrica.....	11
Figura 3.3 Lionheart, veler de la classe J.....	12
Figura 3.4 Maqueta del Australia II (classe J) .....	12
Figura 3.5 Repartiment de les victòries de la Copa Amèrica.....	19
Figura 3.6 Reglamentació Deed of gift.....	20
Figura 3.7 Protocol America's Cup.....	21
Figura 3.8 Reglamentació tècnica America's Cup.....	22
Figura 3.9 Esquemàtic de l'estructura del AC .....	23
Figura 3.10 Rudderwing (hidroala darrera) .....	24
Figura 3.11 Daggerfoil (Hidroala davantera) .....	24
Figura 3.12 Rudderwing i Daggerfoil en un AC45.....	24
Figura 3.13 Distribució de velocitats teòrica al voltant d'un perfil alar .....	25
Figura 3.14 Distribució de pressions teòrica al voltant d'un perfil alar .....	26
Figura 3.15 Esquemàtic de les diferents especificacions tècniques .....	26
Figura 3.16 Distribució de les diferents forces que intervenen.....	27
Figura 3.17 Embarcació "Parrot" .....	28
Figura 3.18 Embarcació de recreació.....	28
Figura 3.19 Taula de surf .....	28
Figura 4.1 Eficiència en funció de l'angle d'atac (grup 1).....	32
Figura 4.2 Eficiència en funció de l'angle d'atac (Grup 2) .....	33
Figura 4.3 Eficiència en funció de l'angle d'atac (finalistes) .....	34

Figura 4.4 CI en funció de l'angle d'atac (finalistes) .....	34
Figura 4.5 Perfil Seleccionat E793 .....	35
Figura 4.6 CI en funció Cd (perfil E793) .....	35
Figura 5.1 Volum finit d'estudi .....	37
Figura 5.2 Extrusió del perfil al llarg del Volum finit.....	38
Figura 5.3 Perfil calcat i escalat de l'original (E793).....	39
Figura 5.4 Procés global de simulació.....	39
Figura 5.5 Operacions fetes durant el mallat.....	40
Figura 5.6 Mètode implementat de tetraèdres.....	40
Figura 5.7 Solucionador i opcions sizing definides.....	41
Figura 5.8 Característiques Body Sizing .....	41
Figura 5.9 Característiques Edge Sizing .....	42
Figura 5.10 Taula de valoració del mallat.....	42
Figura 5.11 Aplicació del inflation al mallat.....	43
Figura 5.12 Mallat del volum de control.....	44
Figura 5.13 Vista lateral del mallat .....	45
Figura 5.14 Aproximació al mallat del perfil.....	45
Figura 5.15 Aproximació del mallat al cantó d'atac .....	46
Figura 5.16 Model matemàtic escollit .....	47
Figura 5.17 Definició propietats del fluid.....	47
Figura 5.18 Condicions volum finit .....	48
Figura 5.19 Condicions de contorn.....	49
Figura 5.20 Definició Vinlet.....	50

Figura 5.21 Valors de referència .....	51
Figura 5.22 Definició de la pressió de sortida.....	52
Figura 5.23 CI perfil darrer.....	53
Figura 5.24 Cd perfil darrer .....	54
Figura 5.25 Distribució de velocitats perfil darrer <b>[m/s]</b> .....	55
Figura 5.26 Velocitat màxima del perfil darrer <b>[m/s]</b> .....	56
Figura 5.27 Punt d'estancament perfil darrer <b>[m/s]</b> .....	57
Figura 5.28 Deixant del perfil darrer <b>[m/s]</b> .....	58
Figura 5.29 Distribució de pressions perfil darrer <b>[Pa]</b> .....	59
Figura 6.1 Vista en detall de l'estricció de la secció .....	61
Figura 6.2 Convergència dels paràmetres del model SST.....	62
Figura 6.3 CI perfil davanter .....	63
Figura 6.4 Cd perfil davanter .....	64
Figura 6.5 Distribució de velocitats perfil davanter <b>[m/s]</b> .....	65
Figura 6.6 Velocitat màxima perfil davanter <b>[m/s]</b> .....	66
Figura 7.1 Les hidroales protegeixen el medi ambient.....	67
Figura 8.1 Diagrama de Gantt de les tasques.....	69
Figura 9.1 Gràfica percentual de la distribució de costos.....	71
Figura 10.1 Vista en perspectiva d'un AC45 .....	72