

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

# ESTUDI AERODINÀMIC DE L'ALERÓ DAVANTER D'UN FORMULA E

**Memòria**

**Autor:** Francisco Miguel Moreno Menor

**Director:** Enric Trillas Gay

**Convocatòria:** Setembre 2016



Escola Tècnica Superior  
d'Enginyeria Industrial de Barcelona





## Resum

La fórmula E és una competició de monoplaques elèctrics que organitza la Federació Internacional de l'Automòbil (FIA). La qual es l'expositor del desenvolupament de vehicles elèctrics per promoure i accelerar la seva popularitat. Aquesta categoria es va formar l'any 2014 i tot just ha acabat la segona temporada.

Davant la popularització d'aquesta nova competició i en conseqüència, les poques dades que es poden obtenir bibliogràficament, es decideix fer un estudi aerodinàmic de l'aleró davanter d'un monoplaça i fer una aproximació a aquest amb la normativa que imposa la FIA a les escuderies participants.

Per això, s'utilitzarà el concepte d'eficiència aerodinàmica o rendiment aerodinàmic, que és la relació de dividir la força downforce i drag, component vertical de sentit perpendicular a la direcció d'incidència d'aire i component horitzontal del mateix sentit a la direcció d'incidència d'aire respectivament. A més, es veurà com l'Aspect Ratio (AR), relació entre l'envergadura i la corda del perfil, afecta sobre la configuració de la posició òptima de l'aleró davanter. Per esbrinar-ho s'empra un programari que simula de manera aproximada els estudis que es duen a terme de diferents formes en les escuderies que participen en altres categories automobilístiques.

En primer lloc, s'explica de manera breu una sèrie de conceptes sobre aerodinàmica que s'empraran en l'estudi dels resultats obtinguts. A continuació, s'introdueix breument les principals característiques de la Formula E, així com les diferents parts aerodinàmiques d'aquesta competició.

Seguidament, s'explica amb més deteniment les característiques d'un aleró davanter i el seu perfil alar. Finalment, es configurarà aquest component aerodinàmic depenent de les característiques del circuit on tindrà lloc els gran premis de Formula E. Els resultats de l'estudi són aquells paràmetres que fan d'ells un ús ideal que maximitzen el rendiment davant situacions diferents.

La conclusió a la que arriba l'estudi és, davant el perfil imposat per la FIA, com s'ha de configurar l'aleró que més contribueix a l'aerodinàmica del cotxe. És a dir, La relació entre la resistència a l'avanç i la força de sustentació adient.



## Sumari

|  |           |
|--|-----------|
| <b>RESUM</b>   | <b>3</b>  |
| <b>1. PREFACI</b>  | <b>7</b>  |
| 1.1. Origen del projecte .....                               | 7         |
| 1.2. Motivació .....   | 7         |
| 1.3. Requeriments previs .....                               | 7         |
| <b>2. INTRODUCCIÓ</b>  | <b>8</b>  |
| 2.1. Objectius del projecte .....                            | 8         |
| 2.2. Abast del projecte .....                                | 8         |
| <b>3. AERODINÀMICA</b>                                       | <b>9</b>  |
| 3.1. Tipus de fluxos .....                                   | 9         |
| 3.2. Perfil alar .....                                       | 10        |
| 3.3. Capa límit .....  | 11        |
| 3.4. Forces aerodinàmiques .....                             | 13        |
| 3.4.1. Resistència aerodinàmica ( <i>drag</i> ) .....        | 13        |
| 3.4.2. Sustentació ( <i>lift</i> ) .....                     | 15        |
| 3.5. Propietats Aerodinàmiques .....                         | 17        |
| 3.5.1. Rendiment aerodinàmic o eficiència aerodinàmica ..... | 17        |
| 3.5.2. Aspect Ratio .....                                    | 17        |
| <b>4. FÓRMULA E</b>  | <b>19</b> |
| 4.1. Breu història .....                                     | 20        |
| 4.1.1. Temporada 2014-15 .....                               | 20        |
| 4.1.2. Temporada 2015-16 .....                               | 22        |
| 4.2. Components aerodinàmics .....                           | 23        |
| 4.2.1. Aleró davanter i posterior .....                      | 23        |
| 4.2.2. Deflectors .....                                      | 25        |
| 4.2.3. Fons pla .....  | 26        |
| 4.2.4. Difusor .....   | 26        |
| <b>5. ALERÓ DAVANTER D'UN FÓRMULA E</b>                      | <b>28</b> |
| 5.1. Perfil alar .....                                       | 29        |
| 5.2. Fairings .....  | 31        |
| 5.3. Generadors de vòrtexs .....                             | 32        |
| <b>6. DISSENY, SIMULACIÓ I ANÀLISI DE L'ALERÓ DAVANTER</b>   | <b>33</b> |
| 6.1. Disseny de l'aleró .....                                | 33        |

|   |           |
|---|-----------|
| 6.2. Software.....  | 34        |
| 6.2.1. Preprocés de l'anàlisi aerodinàmica de l'aleró davanter..... | 34        |
| 6.2.1.1. Geometria del model a analitzar.....                       | 34        |
| 6.2.1.2. Mallat del model a analitzar.....                          | 37        |
| 6.2.1.2.1.....Inflation _____                                       | 38        |
| 6.2.1.2.2.....Elecció mallat _____                                  | 39        |
| 6.2.1.3. Setup.....   | 42        |
| 6.2.1.4. Models de Turbulència a CFX.....                           | 44        |
| 6.2.2. Solucionador.....  | 45        |
| 6.2.3. Postprocessador.....   | 49        |
| 6.3. Anàlisi aerodinàmic.....                                       | 52        |
| 6.3.1. Circuit amb alta càrrega aerodinàmica.....                   | 52        |
| 6.3.2. Circuit amb baixa càrrega aerodinàmica.....                  | 60        |
| <b>7. COST ECONÒMIC DEL PROJECTE _____</b>                          | <b>68</b> |
| <b>8. IMPACTE MEDIAMBIENTAL _____</b>                               | <b>70</b> |
| <b>CONCLUSIONS _____</b>  | <b>72</b> |
| <b>AGRAÏMENTS _____</b>   | <b>73</b> |
| <b>BIBLIOGRAFIA _____</b>   | <b>74</b> |
| Referències bibliogràfiques.....                                    | 74        |
| Bibliografia complementària.....                                    | 75        |
| Bibliografia de les imatges.....                                    | 76        |
| <b>APÈNDIX 1: CIRCUITS _____</b>                                    | <b>79</b> |

# 1. Prefaci

## 1.1. Origen del projecte

Ha nascut una nova competició automobilística, Fórmula E. De tots és sabut la llarga i exitosa història de la Fórmula 1, entre d'altres categories. Per aquest motiu, desperta l'interès de l'autor d'aquest projecte, amant dels vehicles de motor, que vol aprofundir en aquesta nova categoria i investigar sobre els punts d'èmfasis d'aquestes.

## 1.2. Motivació

La Formula E és un esport més on les escuderies han de mantenir els secrets dels seus monoplaces per a tenir en exclusivitat possibles millores tècniques, a més a més, la joventut d'aquesta nova categoria automobilística fa encara més difícil poder obtenir dades bibliogràficament, fent que els espectadors no tinguin coneixement sobre la matèria i creant més incertesa entre ells. En aquest projecte s'aprofundirà dintre de les simulacions, donant números i dades a la configuració de l'aleró davanter davant diferents circuits.

## 1.3. Requeriments previs

Tot i la gran quantitat d'estudis i recopil·lacions que pot haver-hi envers la competició de la Formula 1, aquests no serveixen per als estudis que es duran a terme en aquest projecte, ja que les característiques dels monoplaces i dels circuits són totalment diferents.

Prèviament a la realització del projecte són necessàries nocions bàsiques sobre el comportament dels fluids. Així doncs, és indispensable la realització de l'assignatura de Mecànica de Fluids impartida. A més, l'assignatura optativa de Dinàmica computacional de Fluids ajudarà a entendre la realització de les simulacions que es faran al llarg del projecte.

## 2. Introducció

L'estudi d'aquest projecte analitzarà la part davantera d'un monoplaça de Formula E. Farà èmfasi en el perfil alar.

### 2.1. Objectius del projecte

El projecte que es presenta té com a objectiu principal l' increment de l'eficiència aerodinàmica d'un aleró davanter de Formula E. A partir de l'estructura del perfil alar que estableix la Federació Internacional d'Automobilisme (FIA) es durà a terme una sèrie de simulacions per a determinar quina ha de ser la configuració d'aquest perfil alar per a cada circuit que engloba la competició.

### 2.2. Abast del projecte

Aquest treball es limita a estudiar i analitzar el perfil alar dels monoplaços de Formula E per a adaptar-se a diferents circuits. En concret, es realitzarà l'estudi per a dos circuits, al més lent (poques rectes i molts revolts) i al més ràpid (llargues rectes i pocs revolts). El treball no contempla la millora, modificació, optimització ni fabricació del perfil alar ja que està fixat per el reglament tècnic de la FIA. Tampoc es valorarà l' influència de les altres parts del monoplaça en el còmput global del downforce o del drag.



## 3. Aerodinàmica

### 3.1. Tipus de fluxos

Per poder entendre millor el tipus de flux d'aire que es produeix al voltant d'un cotxe de formula E, és necessari saber què és el Número de Reynolds. Aquest, és un número adimensional utilitzat en mecànica de fluids, disseny de reactors i fenòmens de transport per caracteritzar el moviment d'un fluid.

El número de Reynolds[1] es pot definir com la relació entre les forces inercials i les forces viscoses presents al fluid. Aquest, relaciona la densitat, la viscositat, la velocitat i la dimensió típica d'un flux. Aquest número o combinació de les propietats anteriorment esmentades, apareix en molts casos relacionat amb el fet de que el flux es pugui considerar laminar (número de Reynolds petit) o turbulent (número de Reynolds gran).

$$Re = \frac{\rho \cdot v_{\infty} \cdot X}{\mu} \quad (\text{eq. 3.1})$$

On  $v_{\infty}$  és la velocitat,  $X$  la distància des de la vora d'atac del flux,  $\rho$  la densitat del fluid i  $\mu$  la viscositat dinàmica del mateix.

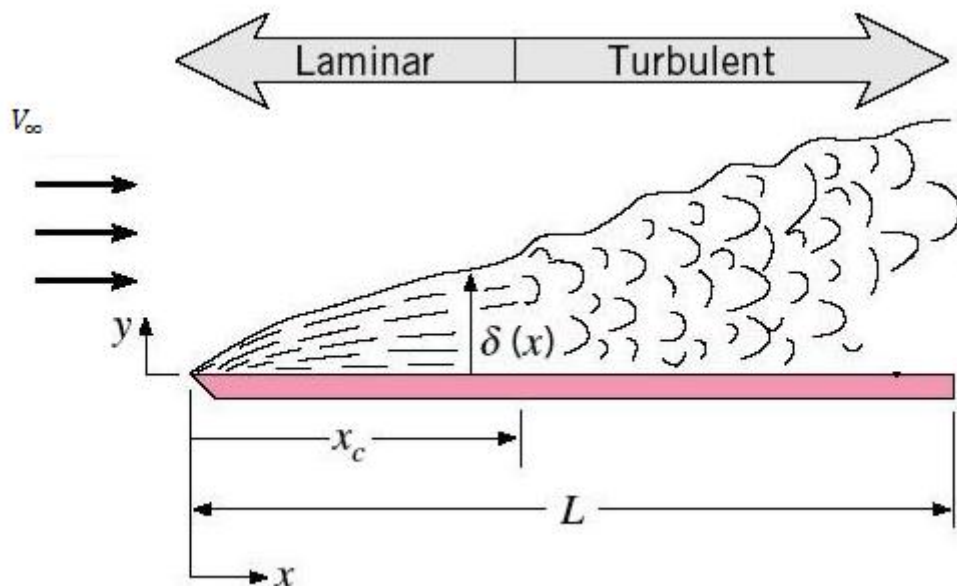


Figura 3.1. Flux Turbulent i Laminar

El flux laminar presenta línies de corrent suaus i regulars. Les partícules del flux en aquest cas es mouen en la mateixa direcció que la velocitat de l'aire incident. Qualsevol turbulència en aquest estat del flux serà eliminada per l'acció de la viscositat.

El flux turbulent dissipa més energia que un laminar i és més robust. Les seves partícules es traslladen desordenadament. Es produeixen fluctuacions i irregularitats, cosa que altera les característiques de la línia de corrent. [2]

Fenòmens que afavoreixen la transició de flux laminar a turbulent són:

- Rugositat de l'objecte
- Gradient de pressions advers. Un gradient de pressions advers afavoreix la transició de flux laminar a turbulent. En conseqüència, un gradient de pressions favorable ajuda a conservar més fàcilment el flux laminar.

## 3.2. Perfil alar

S'introdueixen breument les definicions que caracteritzen un perfil alar [3]:

- **Corda (chord):** Distància entre la vora d'entrada i la vora de sortida del perfil.
- **Extradós (upper surface):** Superfície superior del perfil.
- **Intradós (lower surface):** Superfície inferior del perfil.
- **Línia de curvatura mitjana (mean chamber line):** Conjunt de punts que es troben a la mateixa distància respecte l'extradós i l'intradós del perfil. Es pren com a referència la perpendicular a la pròpia línia de curvatura mitjana.
- **Curvatura màxima (maximum chamber):** La curvatura és la distància entre la línia de curvatura mitjana i la línia de corda, mesurada de forma perpendicular a la línia de corda. Màxim quan no hi ha una major curvatura en cap altre punt del perfil.
- **Gruix màxim (maximum thickness):** El gruix és la distància entre la superfície superior i la inferior del perfil, mesurada de forma perpendicular a la línia de corda. Màxim quan no hi ha un major en cap altre punt del perfil.
- **Radi de vora d'atac (leading edge radius):** Radi de la part anterior del perfil. La vora de sortida (trailing edge) no té cap radi ja que acostuma acabar en punta.

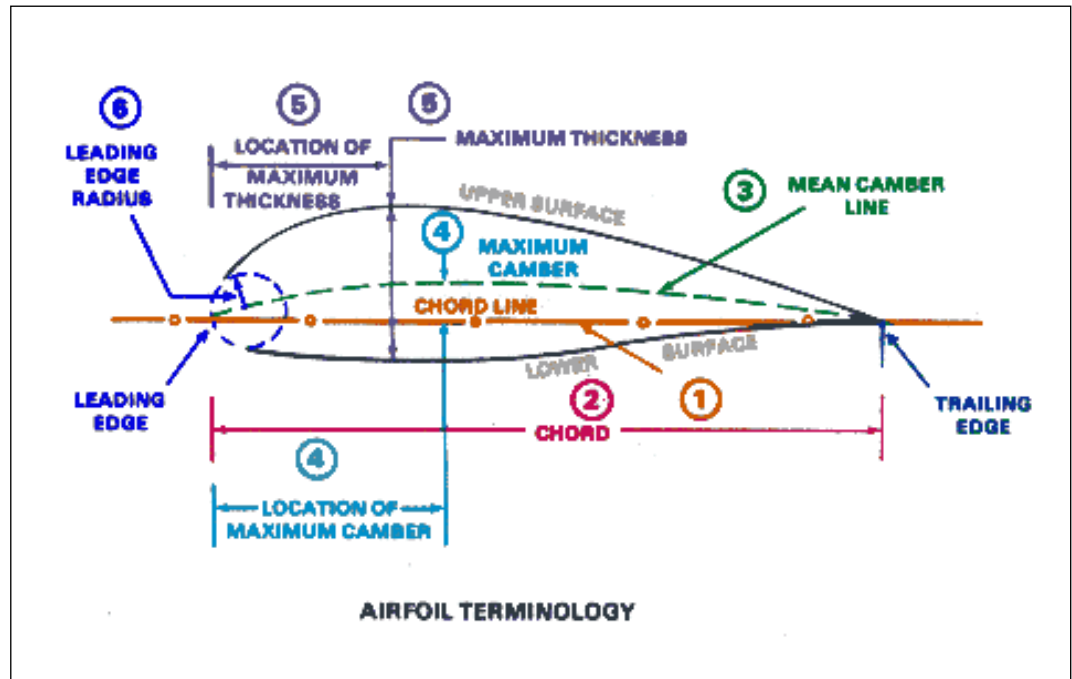


Figura 3.2. Terminologia d'un perfil alar

Com s'ha dit anteriorment, l'aleró davanter d'un Fórmula E presenta 2 elements. Un perfil alar inferior que és més gran que el superior (flap). Aquest apèndix s'ha de situar el més proper possible al perfil alar inferior; creant així una ranura molt estreta entre el contorn de fuga del perfil inferior i la vora d'atac del perfil superior. Amb aquest fet es permet la creació de més càrrega aerodinàmica, i a més, la posició relativa entre el pla principal i el flap ajuda a la generació de més càrrega mitjançant la modificació del flux d'aire al costat de la succió de l'aleró.[4]

### 3.3. Capa límit

L'aire, fluid que s'estudiarà, té un caràcter viscos. Les molècules d'aire s'atreuen unes a les altres; és a dir, quan una molècula d'aire es desplaça, arrossega a les seves veïnes amb ella. Quan un flux d'aire entra en contacte amb un sòlid, les partícules més properes al sòlid s'enganxen a ell ( $U_{ref} = 0$  m/s) mentre que les més allunyades segueixen amb la velocitat del flux, aquest fenomen s'anomena condició de no lliscament.

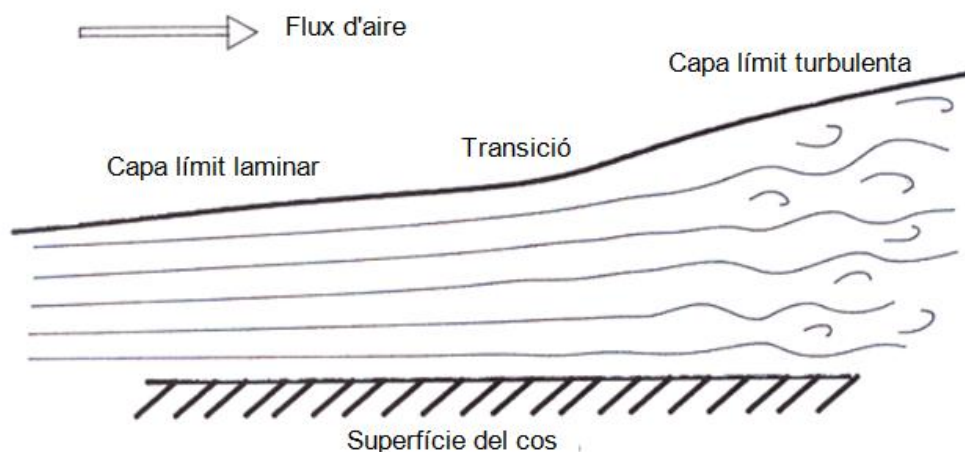


Figura 3.3. Capa límit d'un flux extern

En el cas dels monoplaques de competició, l'aire quan col·lideix amb l'aleró davanter forma una capa límit laminar i a mesura que es desplaça per tota la superfície del vehicle passa a ser una capa límit turbulenta. Per tant, el flux que sortirà al final de l'aleró serà turbulent, fent així que els següents dispositius aerodinàmics tractin amb flux turbulent i sigui més difícil el seu anàlisi.

Es crea un perfil de velocitats on existeix un punt rellevant: aquell on el perfil té una velocitat del 99% de la velocitat del flux abans de ser pertorbat. Aquesta unió s'anomena capa límit, sota la qual es troba la massa d'aire que es desplaça amb el sòlid.

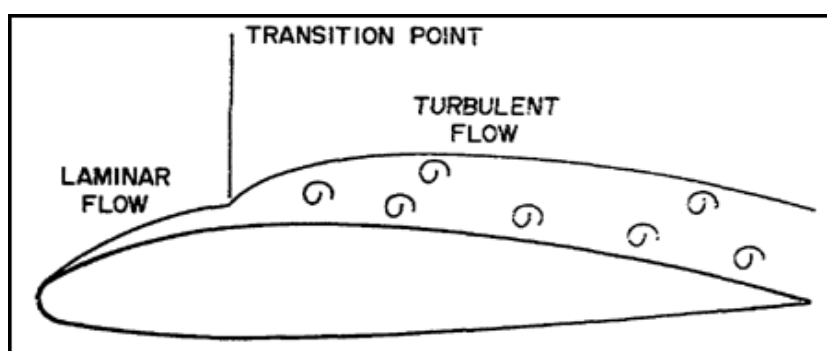


Figura 3.4. Punt de transició

Una capa límit laminar produeix una menor resistència a l'avanç que una turbulenta perquè es crea una menor superfície. Una capa límit turbulenta pot endarrerir el seu desprendiment, així generant major càrrega aerodinàmica. La regió o punt en la que es produeix el canvi de laminar a turbulenta es denomina zona o punt de transició.

### 3.4. Forces aerodinàmiques

Quan un fluid d'aire recorre un perfil aerodinàmic a diferent velocitat, per l'intradós i xtradós, genera una distribució de pressions i una distribució de tensió de cisalla, que al ser integrades en un diferencial de superfície originen les forces aerodinàmiques.

La força aerodinàmica que pateix el vehicle es subdivideix en 2 components. La resistència aerodinàmica (força que s'oposa al moviment en la direcció del fluid) o *drag* (sempre positiva) i la sustentació (pot ser positiva o negativa, és a dir, aixeca o apropa un sòlid del terra) o *lift*. La figura 3.5 mostra un exemple per a sustentació negativa.

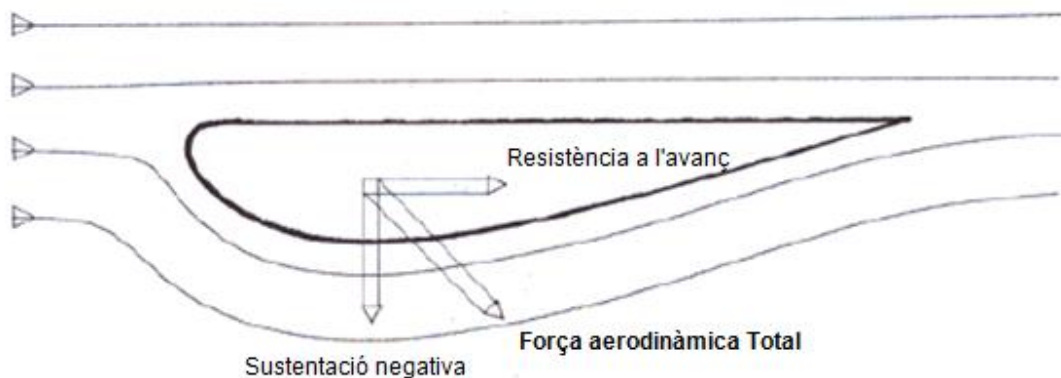


Figura 3.5. Descomposició de la força aerodinàmica

#### 3.4.1. Resistència aerodinàmica (*drag*)

La resistència aerodinàmica o drag és la força que s'oposa al moviment del cos en el fluid que l'envolta. Les partícules d'aire en contacte amb el cos en moviment s'adhereixen a ell degut a la viscositat i les més properes són frenades. Aquesta força també depèn de la forma del cos en moviment, a més secció transversal, major superfície de contacte amb l'aire que s'adhereix i el fa més lent.

Aquesta resistència aerodinàmica es divideix en tres components[5]:

- **Drag de fricció:** Component de la resistència aerodinàmica que s'origina per la fricció del flux amb la superfície del perfil. És causada per la viscositat del fluid. Actua tangencialment al cos.
- **Drag de pressió o de forma:** Component de la resistència aerodinàmica que depèn exclusivament de la forma de l'objecte sobre el qual col·lideix el flux. Són les forces de superfície que actuen perpendicularment a la superfície del cos.
- **Drag induït:** Component de la resistència aerodinàmica que prové dels vòrtexs que s'originen a la vora d'atac i vora de sortida del perfil.

El drag de pressió o de forma és menor quan la capa límit que es separa és turbulent, això és degut a que, l'estela que s'origina quan el flux turbulent es separa de la superfície de l'objecte és major que la que es forma en la separació del flux laminar. La següent figura mostra les diferents esteles que provoca la separació en ambdós casos.

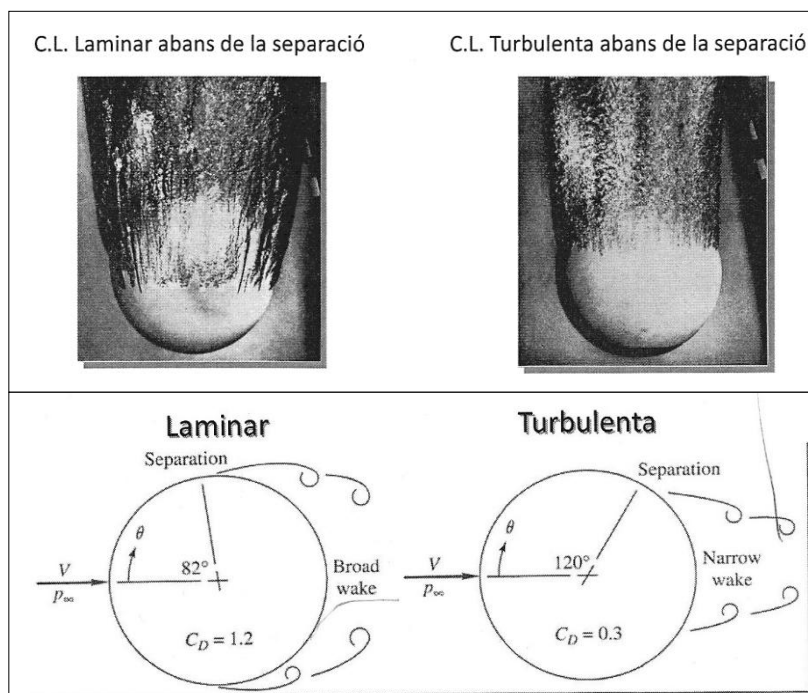













Figura 3.6. Diferència entre capa límit d'un flux laminar i turbulent

Ara caldrà estudiar les propietats de forma i grandària de l'objecte per tal de determinar quin tipus de flux permetrà reduir la resistència aerodinàmica absoluta.

| Shape   | $C_D$ based on frontal area | Shape   | $C_D$ based on frontal area | Shape   | $C_D$ based on frontal area |
|---|-----------------------------|---|-----------------------------|---|-----------------------------|
| Square cylinder:  | 2.1                         | Half-cylinder:  | 1.2                         | Plate:  | 2.0                         |
|  |                             |  |                             |  |                             |
|  | 1.6                         |  | 1.7                         | Thin plate normal to a wall:  | 1.4                         |
| Half tube:  | 1.2                         | Equilateral triangle:   | 1.6                         |  |                             |
|  |                             |  |                             | Hexagon:  | 1.0                         |
|  | 2.3                         |  | 2.0                         |  | 0.7                         |

Taula 3.1. Contribució drag pressió i fricció en diferents perfils

$C_D$  és el coeficient de resistència a l'avanç que representa l'oposició que pateix un cos a desplaçar-se en la direcció del moviment. Aquest valor no és fix en la majoria de competicions automobilístiques ja que es pot modificar depenent les característiques del circuit per a reduir aquesta resistència.

La força de resistència a l'avanç ve definida per la següent equació:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v^2 \quad (\text{eq. 3.2})$$

On  $\rho$  és la densitat del fluid, en aquest cas aire,  $v$  la velocitat a la que es desplaça el vehicle i  $A$  és l'Àrea frontal del monoplaça.

### 3.4.2. Sustentació (*lift*)

La sustentació aerodinàmica és la component de la força aerodinàmica total perpendicular a la direcció del flux incident i de sentit ascendent. Apareix quan l'aire ha de recórrer de diferent forma un perfil per la part superior i inferior com s'ha explicat anteriorment. Al ser diferent la trajectòria de la línia de corrent, la velocitat a la que recorre també és diferent, provocant així, que la pressió variï.

Aquesta sustentació està causada per les diferències de pressió i condició KUTTA-Joukowski[6], circulació de flux que es genera en sentit horari (en un perfil alar) fent que a l'extradós hi hagi més velocitat i menys pressió. Relaciona la força de sustentació amb la velocitat i densitat del fluid i evaluada al voltat d'una corba que engloba el sòlid d'estudi.

Aquesta força de sustentació també depèn de l'angle que forma la corda del perfil alar amb el flux d'aire, denominat angle d'atac.

Si aquest angle d'atac s'augmenta de forma significativa arriba un punt en el qual el perfil estarà en pèrdua originant un decreixament del lift. A partir d'un determinat angle, la capa límit es separa al principi de la part posterior del perfil generant una disminució del coeficient de sustentació. A més, es produeix un increment significatiu de la resistència aerodinàmica i s'originen remolins tant a la vora d'atac com a la vora de sortida.

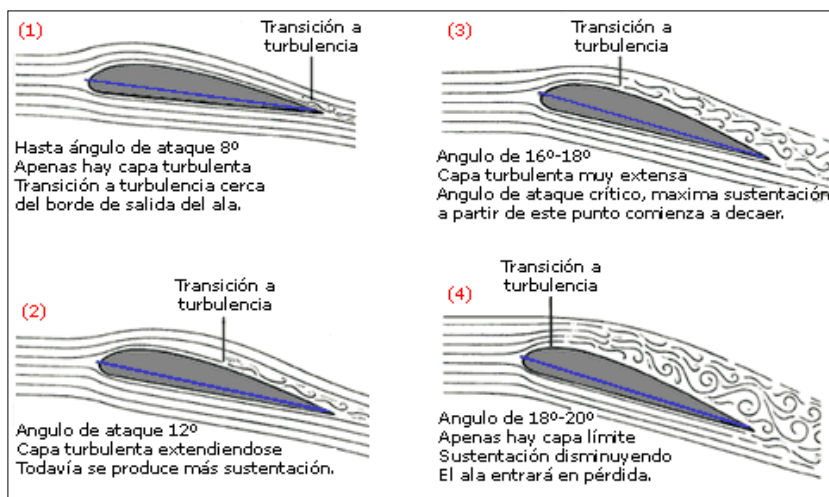


Figura 3.7. Diferents esteles per a angles d'atac diferent

Si la pressió és menor a la part superior i major a la part superior es generarà una força neta de sustentació en sentit ascendent. Si la sustentació té sentit descendent rep el nom de càrrega aerodinàmica o *downforce*. Aquest efecte és molt important per obtenir una major adherència al circuit.

Les condicions del circuit marcaran les característiques de l'aleró. En circuits amb poques corbes i llargues rectes no és tan important la càrrega aerodinàmica ja que és fonamental aconseguir la màxima velocitat punta possible. En circuits on les corbes són lentes i rectes poc significatives on no s'aconsegueix gaire velocitat punta, la càrrega aerodinàmica serà més important i determinant aconseguint així una major velocitat en el pas per corba.

$C_L$  és el coeficient de sustentació que dona una idea aproximada que té un cos per provocar aquesta força.

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot v^2 \quad (\text{eq. 3.3})$$

On aquesta equació, l'àrea a tenir en compte serà la secció en planta de l'element estudiat, es a dir, l'àrea del cos que rep aquesta força.



## 3.5. Propietats Aerodinàmiques

### 3.5.1. Rendiment aerodinàmic o eficiència aerodinàmica

La relació entre la sustentació i resistència aerodinàmica s'utilitza com a mesura de la eficiència aerodinàmica ( $C_L/C_D$  o  $C_Z/C_X$ ).

Es busca maximitzar dita eficiència. Aquest valor indicarà un major downforce i a la vegada una menor resistència a l'avanç.

### 3.5.2. Aspect Ratio

Una important propietat geomètrica en una ala finita és l' "Aspect Ratio" (AR) i es defineix segons la relació entre la envergadura amb la corda[7].

$$AR = \frac{\text{Envergadura}}{\text{Corda}} \quad (\text{eq. 3.4}).$$

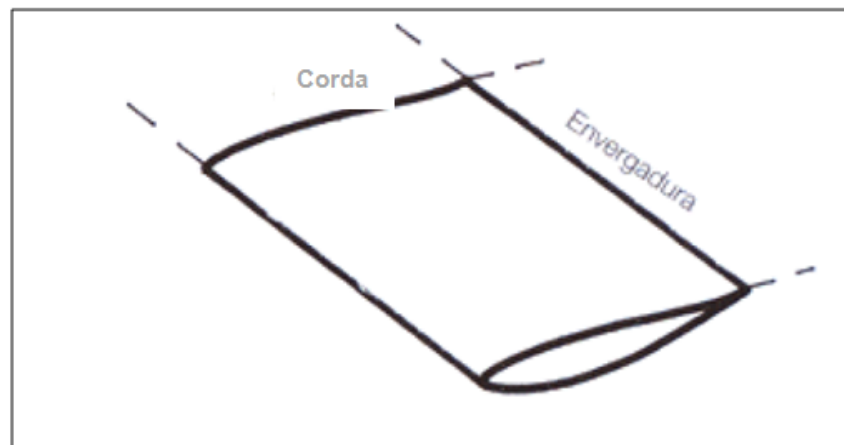


Figura 3.8. Terminologia d'un aleró

Un aspecte important del drag induït és que el  $C_D$  és inversament proporcional al "aspect ratio". Es a dir, per a reduir el drag induït es vol una ala finita amb el "aspect ratio" més gran possible.

Desafortunadament, el disseny d'una ala amb un AR gran amb una estructura suficientment resistent és difícil. Per tant, l' AR d'un aleró és un compromís entre el conflicte aerodinàmic i els requeriments estructurals.

|                             | AR    |
|-----------------------------|-------|
| Avions subsònics            | 6-8   |
| Nimbus 4 sailplane          | 100   |
| ETA sailplane               | 51.3  |
| Ales avió                   | 12-20 |
| Alerons vehicles competició | 5-8   |

*Taula 3.2. Exemple d' AR en diferents vehicles*

## 4. Fórmula E

La fórmula E és un nou campionat organitzat per la FIA amb monoplaques impulsats únicament per energia elèctrica. Aquesta competició representa una visió per al futur de l'industria del motor durant les pròximes dècades, que serveix com a aparador per a I+D en torn al vehicle elèctric. També pretén promoure la sostenibilitat energètica i ambiental.

S'està duent a terme la segona edició del campionat de la Fórmula E, la qual s'ha iniciat a Beijing al mes d'octubre de 2015, i finalitzarà el juliol de 2016 a Londres fent un total de 10 carreres, en circuits integrament urbans, en el quals, la graella de sortida compta amb 9 equips integrats per dos pilots cadascú.

Principals dimensions:

- Llargada màxima monoplaça: 5 metres.
- Amplada màxima monoplaça: 1,8 metres.
- Altura màxima monoplaça: 1,25 metres
- Pes mínim: 880 Kilograms (incloent pilot).

Especificacions tècniques:

- Potència màxima: 200 kW.
- Acceleració: 0-100 km/h en 3 segons.
- Velocitat màxima: 220 km/h

Cal destacar que la potència màxima és poc significativa comparant-la amb altres competicions automobilístiques. Aquesta potència màxima només es podrà utilitzar per les sessions d'entrenaments lliures i classificació. El dia de la carrera s'estableix un límit de potència màxim de 170 kW. Tanmateix, cal destacar que els aficionats a aquesta competició podran votar al seu pilot preferit, els tres més votats se'ls hi atorgarà el "FanBoost", en la qual, el pilot disposa durant 5 segons una energia addicional de 100 kJ.

Aquesta és la forma de puntuar per als pilots:

| Posició | 1  | 2  | 3  | 4  | 5  | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 |
|---------|----|----|----|----|----|---|---|---|---|----|
| Punts   | 25 | 18 | 15 | 12 | 10 | 8 | 6 | 4 | 2 | 1  |

*Taula 4.1. Puntuació pilot segons posició final de carrera*

A més, per aconseguir la "pole position" (ocupar el primer lloc a la graella de sortida) aconseguix 3 punts i per aconseguir la volta ràpida durant la carrera sumaria 2 punts. És a dir, durant un ePrix, un pilot pot aconseguir un total de 30 punts.

Una gran diferència amb les altres competicions són els "pit stops" (parades tècniques per a resoldre un problema), en qualsevol competició amb motors de combustió se'ls canvia les rodes i omplen de nou el dipòsit de gasolina (Formula 1 només canvien neumàtics). Pel que fa a la Formula E, durant les carreres, els conductors han de fer un "pit stop" obligatòriament per canviar de cotxe durant un mínim de temps establert per a cada cursa.[8]

## 4.1. Breu història

Com s'ha comentat en el Resum, només s'han disputat 2 temporades d'aquesta competició automobilística.

### 4.1.1. Temporada 2014-15

La temporada 2014-15 el vencedor va ser Nelson Piquet (Brasil) amb el seu NEXTEV TCR (Xina) amb un total de 144 punts després d' 11 carreres disputades.



*Il·lustració 4.1. Nelson Piquet (Dreta-Recollint trofeu com a guanyador, Esquerra- Conduint el seu monoplaça)*

L'equip guanyador de la temporada va ser e.dams-Renault (França) amb un total de 232 punts.



Il·lustració 4.2. e.Dams Renault

| ESCUDERIA           | PAÍS         | DORSAL | PILOT                  | CARRERES | CLASSIFICACIÓ PILOT | CLASSIFICACIÓ ESCUDERIA |
|---------------------|--------------|--------|------------------------|----------|---------------------|-------------------------|
| Virgin Racing       | Regne Unit   | 2      | Sam Bird               | 1 a 11   | 5                   | 5                       |
|                     |              | 3      | Jaume Alguersuari      | 1 a 9    | 13                  |                         |
|                     |              |        | Fabio Leimer           | 10 i 11  | 32                  |                         |
| Mahindra Racing     | Índia        | 5      | Karun Chandhok         | 1 a 11   | 10                  | 8                       |
|                     |              | 21     | Bruno Senna            | 1 a 11   | 17                  |                         |
| Dragon Racing       | Estats Units | 6      | Oriol Servià           | 1 a 4    | 19                  | 2                       |
|                     |              |        | Loïc Duval             | 5 a 11   | 9                   |                         |
|                     |              | 7      | Jérôme d'Ambrosio      | 1 a 11   | 4                   |                         |
| e.Dams Renault      | França       | 8      | Nicolas Prost          | 1 a 11   | 6                   | 1                       |
|                     |              | 9      | Sebastien Buemi        | 1 a 11   | 2                   |                         |
| Trulli              | Itàlia       | 10     | Jarno Trulli           | 1 a 11   | 20                  | 10                      |
|                     |              | 18     | Michaela Cerruti       | 1 a 4    | 29                  |                         |
|                     |              |        | Vitantonio Liuzzi      | 5 a 9    | 23                  |                         |
|                     |              |        | Alex fontana           | 10 i 11  | 33                  |                         |
| Audi Sport ABT      | Alemanya     | 11     | Lucas Di Grassi        | 1 a 11   | 3                   | 3                       |
|                     |              | 66     | Daniel ABT             | 1 a 11   | 11                  |                         |
| Venturi             | Mónaco       | 23     | Nick Heidfield         | 1 a 11   | 12                  | 9                       |
|                     |              | 30     | Stéphane Sarrazin      | 1 a 11   | 14                  |                         |
| Andretti            | Estats Units | 27     | Franchè Montagny       | 1 i 2    | 15                  | 6                       |
|                     |              |        | Jean-Éric Vergne       | 3 a 11   | 7                   |                         |
|                     |              | 28     | Charles Pic            | 1        | 18                  |                         |
|                     |              |        | Matthew Brabham        | 2 i 3    | 31                  |                         |
|                     |              |        | Marco Andretti         | 4        | 30                  |                         |
|                     |              |        | Scott Speed            | 5 a 8    | 16                  |                         |
|                     |              |        | Justin Wilson          | 9        | 25                  |                         |
| Simona de Silvestro | 10 i 11      | 28     |                        |          |                     |                         |
| Amlin Aguri         | Japó         | 55     | Takuma Sato            | 1        | 24                  | 7                       |
|                     |              |        | António Félix Da costa | 2 a 9    | 8                   |                         |
|                     |              |        | Sakon Yamamoto         | 10 i 11  | 35                  |                         |
|                     |              | 77     | Katherine Legge        | 1 i 2    | 34                  |                         |
|                     |              |        | Salvador Durán         | 3 a 11   | 21                  |                         |
| Newteq TCR          | Xina         | 88     | Ho-Pin Tung            | 1, 2 i 4 | 26                  | 4                       |
|                     |              |        | Antonio Garcia         | 3 i 9    | 27                  |                         |
|                     |              |        | Charles Pic            | 5 a 8    | 18                  |                         |
|                     |              |        | Oliver Turvey          | 10 i 11  | 22                  |                         |
|                     |              | 99     | Nelson Piquet Jr.      | 1 a 11   | 1                   |                         |

Taula 4.2. Distribució i Classificació dels diferents Equips i Pilots temporada 2014-15

#### 4.1.2. Temporada 2015-16

A la temporada 2015-16 el vencedor va ser Sébastien Buemi (Suïssa) amb un total de 155 punts amb el seu Renault e.Dams (França) que a l'hora va ser l'equip guanyador amb un total de 270 punts després de 10 carreres disputades.



Il·lustració 4.3. Sébastien Buemi (Dreta-Recollint trofeu com a guanyador, Esquerra- Conduint el seu monoplaça)

| ESCUADERIA       | PAÍS         | DORSAL | PILOT                  | CARRERES       | CLASSIFICACIÓ PILOT | CLASSIFICACIÓ ESCUDERIA |
|------------------|--------------|--------|------------------------|----------------|---------------------|-------------------------|
| Nextev TCR       | Xina         | 1      | Nelson Piquet Jr.      | 1 a 10         | 16                  | 9                       |
|                  |              | 88     | Oliver Turvey          | 1 a 10         | 15                  |                         |
| Renault e.Dams   | França       | 8      | Nicolas Prost          | 1 a 10         | 3                   | 1                       |
|                  |              | 9      | Sébastien Buemi        | 1 a 10         | 1                   |                         |
| Dragon Racing    | Estats Units | 6      | Löic Duval             | 1 a 10         | 8                   | 4                       |
|                  |              | 7      | Jérôme D'Ambrosio      | 1 a 10         | 5                   |                         |
| Audi Sport ABT   | Alemanya     | 11     | Lucas Di Grassi        | 1 a 10         | 2                   | 2                       |
|                  |              | 66     | Daniel ABT             | 1 a 10         | 7                   |                         |
| DS Virgin Racing | Regne Unit   | 2      | Sam Bird               | 1 a 10         | 4                   | 3                       |
|                  |              | 25     | Jean-Eric Vergne       | 1 a 10         | 9                   |                         |
| Amlin Andretti   | Estats Units | 27     | Robin Frijns           | 1 a 10         | 12                  | 7                       |
|                  |              | 28     | Simona da Silvestro    | 1 a 10         | 18                  |                         |
| Team Aguri       | Regne Unit   | 55     | António Félix Da Costa | 1 a 7, 9 i 10  | 13                  | 8                       |
|                  |              |        | René Rost              | 8              | 23                  |                         |
|                  |              | 77     | Nathanaël Berthon      | 1 a 3          | 17                  |                         |
|                  |              |        | Salvador Durán         | 4 a 6          | 22                  |                         |
| Mahindra Racing  | Índia        | 21     | Bruno Senna            | 1 a 10         | 11                  | 5                       |
|                  |              |        | Nick Heidfiels         | 1 i 2 i 4 a 10 | 10                  |                         |
|                  |              |        | Oliver Ronald          | 3              | 21                  |                         |
| Venturi          | Mónaco       | 4      | Stéphane Sarrazin      | 1 a 10         | 6                   | 6                       |
|                  |              |        | Jacques Villeneuve     | 1 a 3          | 20                  |                         |
|                  |              |        | 12                     | Mike Conway    | 4 a 10              |                         |

Taula 4.3. Distribució i Classificació dels diferents Equips i Pilots temporada 2015-16

## 4.2. Components aerodinàmics

### 4.2.1. Aleró davanter i posterior

Els alerons tenen forma alar invertida respecte a una ala d'avió, és un cos amb tal forma que l'aire passa a través d'aquest creant càrrega aerodinàmica, mentre que en el cas de l'avió crearia sustentació. Un aleró és la secció transversal que defineix la forma d'una ala tridimensional.

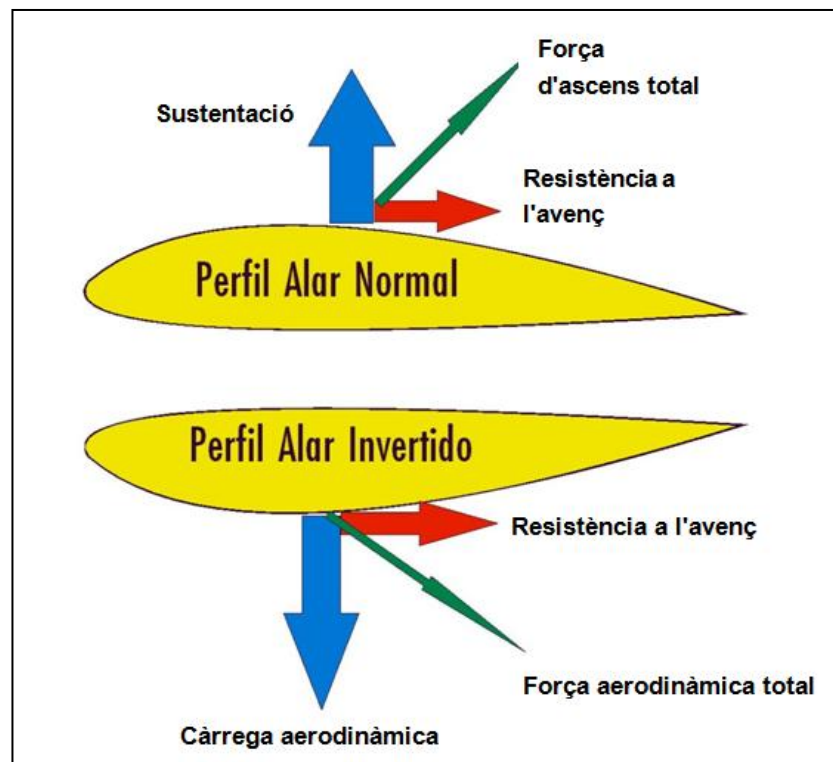
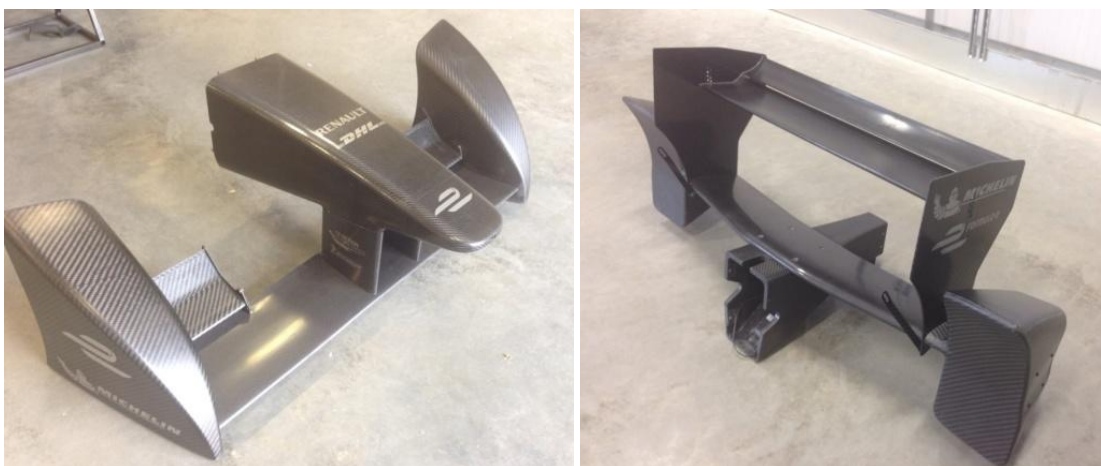


Figura 4.1. Comparació entre ala d'avió i aleró

En el cas de l'aleró davanter, no només s'encarrega de generar càrrega aerodinàmica, també s'encarrega de dirigir el flux d'aire que incideix al monoplaça de manera que s'allunyi de les rodes davanteres, element que pertorba el flux d'aire.

L'aleró posterior, a més de generar molta càrrega aerodinàmica, genera turbulències i augmenta la resistència a l'avanç del vehicle. Per això, s'ha de configurar la inclinació d'aquest per a optimitzar la càrrega aerodinàmica a canvi d'augmentar la resistència a l'avanç dependent de les característiques del circuit.

Hi ha competicions automobilístiques en el que s'ha creat el DRS (Drag Reduction System), es tracta d'un flap situat sobre el pla principal de l'aleró posterior on permet la seva modificació per part del pilot per modificar l'aerodinàmica del cotxe reduint la resistència a l'avanç sacrificant la càrrega aerodinàmica, així aconseguint un increment de velocitat punta entorn als 12-18 km/h.



*Il·lustració 4.4. Aleró davanter i del darrere d'un Formula E*



### 4.2.2. Deflectors

Els deflectors no tenen la funció principal de generar càrrega aerodinàmica. Aquest s'encarrega de redirigir els fluxos d'aire de manera apropiada.

Aquests fluxos es poden redirigir cap al fons pla, o es poden fer servir per refrigerar el monoplaça.

Secundàriament, poden accelerar el flux d'aire sobre els laterals del cotxe creant estats de pressió baixos.



*Il·lustració 4.5. Deflectors d'un Formula E*

### 4.2.3. Fons pla

És molt important estudiar la influència que té el flux d'aire que circula a través del fons del cotxe, la distància al terra resulta tant crítica com la forma del fons.

S'ha de situar aquest fons pla amb un angle d'incidència negatiu respecte l'horitzontal. És a dir, la part davantera del fons ha d'estar més baixa que la posterior provocant que el flux d'aire s'acceleri per la part inferior del monoplaça i surti per la part posterior. Si en cas contrari, la part davantera fos més alta que la posterior, l'aire s'acumularia i crearia una sustentació positiva molt perillosa. La il·lustració 4.6 mostra el fons pla d'un Formula 1, molt similar al d'un Formula E.



*Il·lustració 4.6. Fons pla d'un Formula 1*

### 4.2.4. Difusor

Un difusor es defineix en aquest context com una zona del fons del cotxe, situat a la part posterior i que incorpora un increment en l'angle de desviació en comparació amb la part davantera.

La funció principal d'aquest és extreure el flux d'aire que circula per sota del monoplaça i adaptar-lo a l'aire exterior. Així, s'accelera el flux d'aire que circula per sota del cotxe per a crear una zona de baixa pressió i així generar carrega aerodinàmica.



*Il·lustració 4.7. Difusor d'un Formula E*



*Il·lustració 4.8. Zoom difusor d'un Formula E*

## 5. Aleró davanter d'un Fórmula E

En el cas particular d'un avió, els perfils alars permeten que l'avió s'enlairi. A diferència amb l'aleró davanter d'un monoplaça de competició s'inverteix el perfil alar per crear càrrega aerodinàmica.

La zona d'altres pressions es troben en la part superior de l'ala generant una sustentació negativa downforce, mentre que a la regió de baixes pressions es troba en la regió inferior del vehicle, en el qual el flux d'aire presenta una major velocitat.

L'objectiu principal de l'aleró davanter en totes les competicions automobilístiques, incloent la Fórmula E, és maximitzar la càrrega aerodinàmica i minimitzar la resistència aerodinàmica del vehicle.

Els alerons es classifiquen segons el nombre d'elements que contenen; poden ser d'un sol element, de dos elements (Fórmula E) o de múltiples elements. S'obté major càrrega aerodinàmica, i en conseqüència, un augment de la resistència aerodinàmica amb un major nombre d'elements.

L'aleró davanter d'un monoplaça de Fórmula E consisteix en 3 parts. Un perfil alar, fairings i uns generadors de vòrtexs.

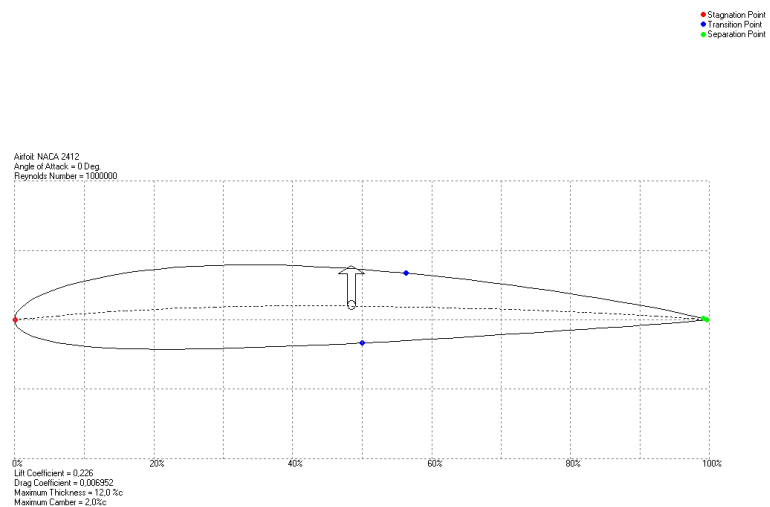


Il·lustració 5.1. Aleró d'avanter d'un Formula E

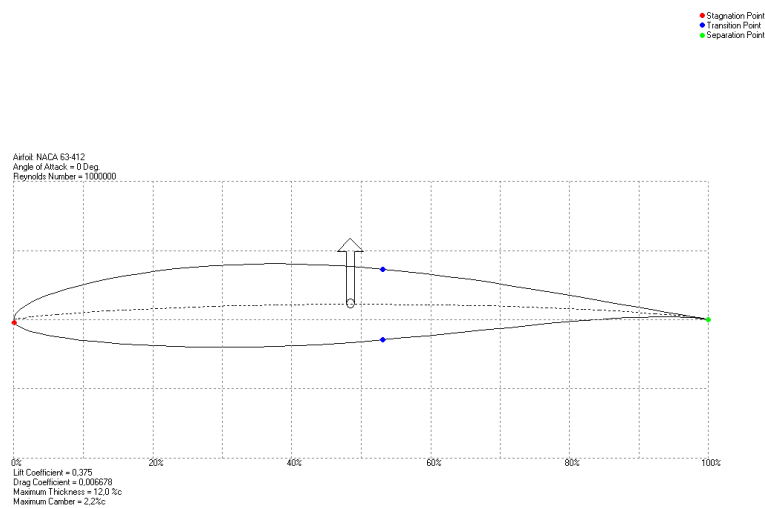
## 5.1. Perfil alar

A causa dels poc estudis i dades que es poden trobar bibliogràficament es farà una estudi sobre diferents perfils per a fer una aproximació al que s'estudiarà a l'apartat 6.

S'ha triat els perfils alars NACA 2412 i 63-412 ja que s'utilitzen en automobilisme, o són aptes per a ser utilitzats. S'ha de tenir en compte que corresponen a perfils d'ala d'avió, i que per tant, en tots els casos cal tenir en compte que la imatge que veiem està al revés de la que en realitat hauríem de veure.

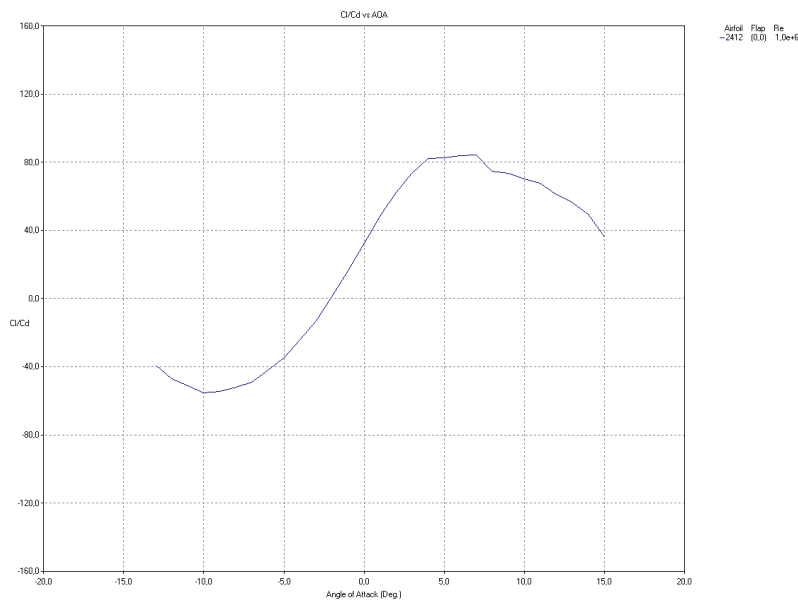


Gràfic 5.1. Perfil alar NACA 2412

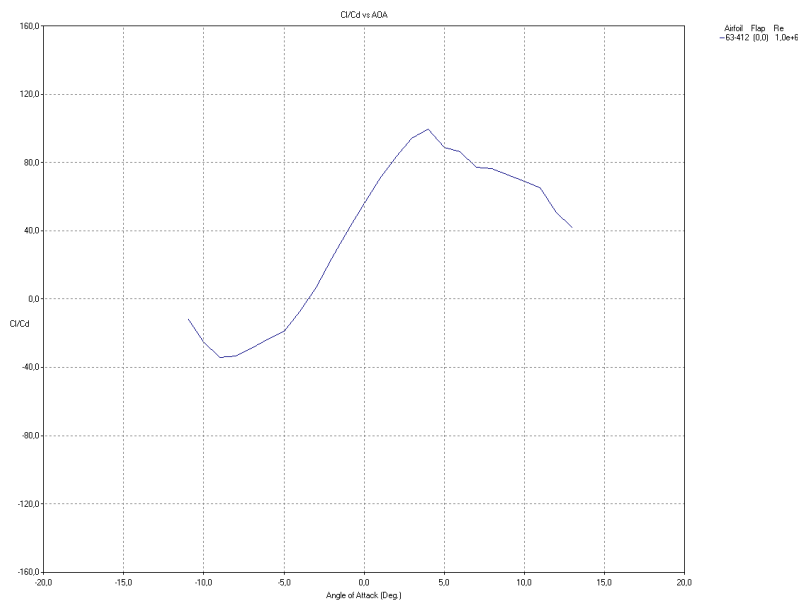


Gràfic 5.2. Perfil alar NACA 63-412

L'objectiu del perfil és maximitzar el rendiment aerodinàmic en funció de l'angle d'atac. En el gràfic 5.3 i gràfic 5.4 es mostra la relació  $C_L/C_D$  en funció de l'angle d'atac per poder triar l'angle òptim per a cada perfil.



Gràfic 5.3.  $C_L/C_D$  vs angle d'atac en NACA 2412



Gràfic 5.2.  $C_L/C_D$  vs angle d'atac en NACA 63-412

Es pot observar que el rendiment aerodinàmic per al NACA 2412 presenta el seu màxim per a un angle d'atac de 5 graus, i un valor de 91,723. I per al NACA 63-412, un angle d'atac de 4 graus, i un valor de 103,681.

## 5.2. Fairings

Les rodes del monoplaces generen una resistència aerodinàmica significativa. Els fairings de l'aleró davanter d'un Fórmula E són apèndix situats en els laterals de l'aleró davanter per evitar que l'aire entri en contacte amb les rodes. També s'inclouen fairings en les rodes posteriors.

Els fairings desvien el flux incident a les rodes davanteres cap a altres components aerodinàmics del vehicle per tal de contribuir a la optimització aerodinàmica. A més, s'aprofiten per redirigir el flux d'aire cap als pontons del monoplaça i així poder refrigerar les bateries.



*Il·lustració 5.2. Fairings d'un Formula E*

### 5.3. Generadors de vòrtexs

Els generadors de vòrtex són petites superfícies aerodinàmiques localitzades a la part superior de l'ala, generalment al front dels alerons o prop dels punts de l'ala. La turbulència creada per aquests dispositius, barreja aire de més alta energia de fora de la capa límit amb aire que forma la capa límit, produint un retard en la separació d'aquesta.

És de vital importància que els generadors de vòrtexs siguin més alts que el gruix de la capa límit per a que facin la seva funció.

Generar un vòrtex, es a dir, crear petites turbulències pot ser contraproductiu, ja que aquest converteix un flux laminar en un de turbulent fet que provoca resistència aerodinàmica. Això fa que preservi el seu efecte durant més temps.

En els alerons de Fórmula E es localitzen uns generadors de vòrtexs al costat dels flaps. Són de forma triangular i subjecten aquests elements aerodinàmics a l'hora que redistribueixen el flux incident.[9]



Il·lustració 5.3. Generadors de Vòrtexs d'un Formula E



## 6. Disseny, simulació i anàlisi de l'aleró davanter

En aquest anàlisi només es tindrà en compte el perfil alar.

### 6.1. Disseny de l'aleró

A les figures atorgades per el reglament tècnic de la Formula E podem dissenyar el perfil alar que s'estudiarà.

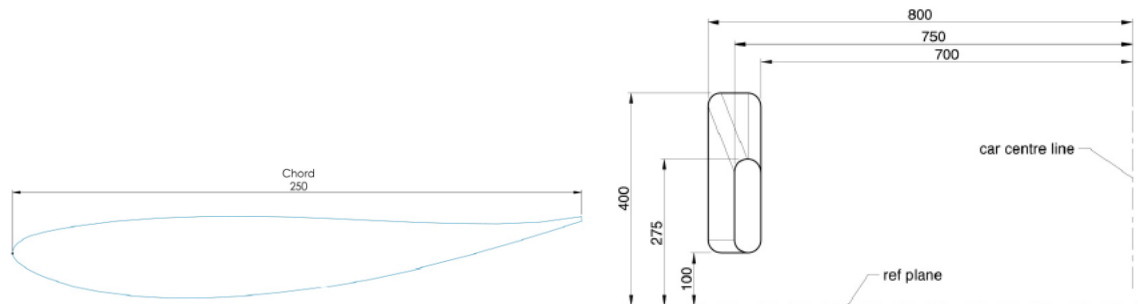


Figura 6.1. Perfil alar

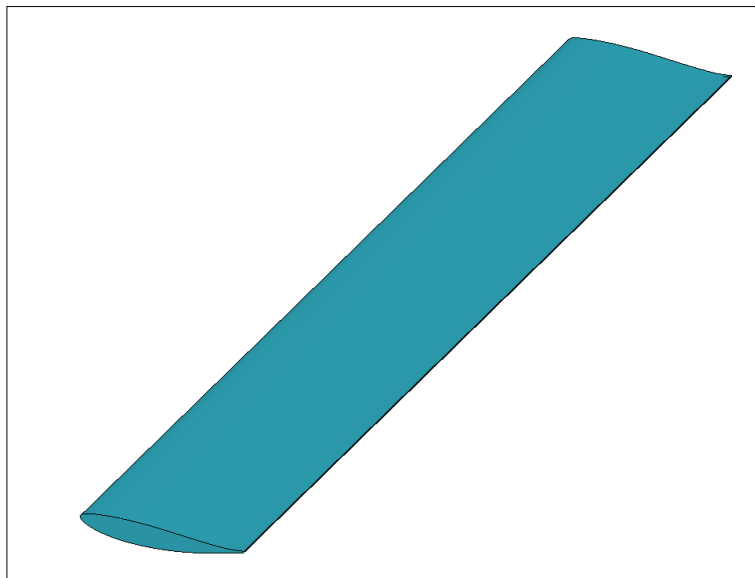
Figura 6.2. Vista frontal que indica la llargada del perfil

El reglament tècnic estableix 31 punts [10] per els quals ha de passar la corba del perfil alar. La profunditat del perfil alar és de 1400mm.

Cal destacar que la relació d'aspecte del perfil és de 5.6 (equació 3.4).

$$AR = \frac{\text{envergadura}}{\text{corda}} = \frac{1400}{250} = 5.6$$

Amb el programari Solidworks® s'ha realitzat la geometria que es presenta en la següent Il·lustració:



*Il·lustració 6.1. Perfil Alar visualitzat mitjançant Solidworks*

## 6.2. Software

Per a poder analitzar l'aleró davanter s'utilitzaran el programa Solidworks® per a poder generar el perfil alar i l' Ansys® per a poder fer la resta de l'anàlisi.

El programa d'anàlisi consta de 3 parts: Preprocessador, Solucionador i Postprocessador. Dintre del programari d'Ansys s'utilitza el programa CFX que utilitza la CFD per solucionar els diferents casos d'estudi.

El programa disponible al centre docent és una versió reduïda (ANSYS Academic Student) que només permet un total de 512000 nodes en el mallat així que la simulació es veurà limitada a aquest fet.

### 6.2.1. Preprocés de l'anàlisi aerodinàmica de l'aleró davanter

#### 6.2.1.1. Geometria del model a analitzar

Després de confeccionar el perfil alar a escala 1:1 de l'aleró que munta un Formula E, es defineix la geometria del model que posteriorment s'analitzarà amb el programari Ansys®. Com es pot comprovar, l'aleró és simètric respecte l'eix longitudinal que travessa el centre del monoplaça. Per tant, per a facilitar els càlculs es decideix estudiar la meitat de l'aleró.

Per a poder simular l'efecte de l'aire sobre l'aleró cal especificar una domini per on circularà l'aire. Aquesta domini envoltarà tot el perfil alar i permetrà extrapolar resultats que s'assimilin a les forces que generen els alerons a la realitat. S'ha escollit realitzar una domini amb mitja

circumferència per a poder simular els diferents angles d'atac per evitar problemes de falta de paral·lelisme a prop de l'objecte d'estudi. La domini serà prou gran per a utilitzar un domini pràcticament infinit.

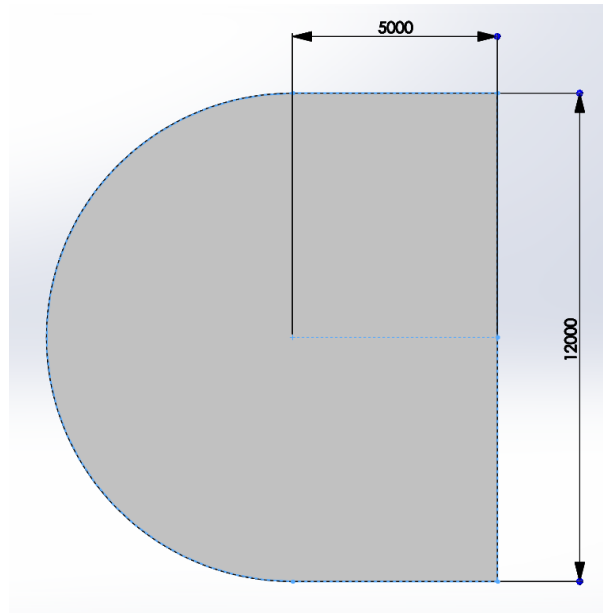


Figura 6.3. Domini d'estudi

Es decideix que la domini tingui una amplada de 900 mm. La meitat de l'aleró és de 700 mm i es deixa un marge de 200 mm per a permetre estudiar la separació de la capa límit que es produeix als extrems de l'aleró.

Un cop confeccionada la domini, es procedeix a realitzar l'objecte d'estudi. Després de definir els 31 punts que estableix la FIA es traça un "spline" per a dibuixar la corba del perfil alar.

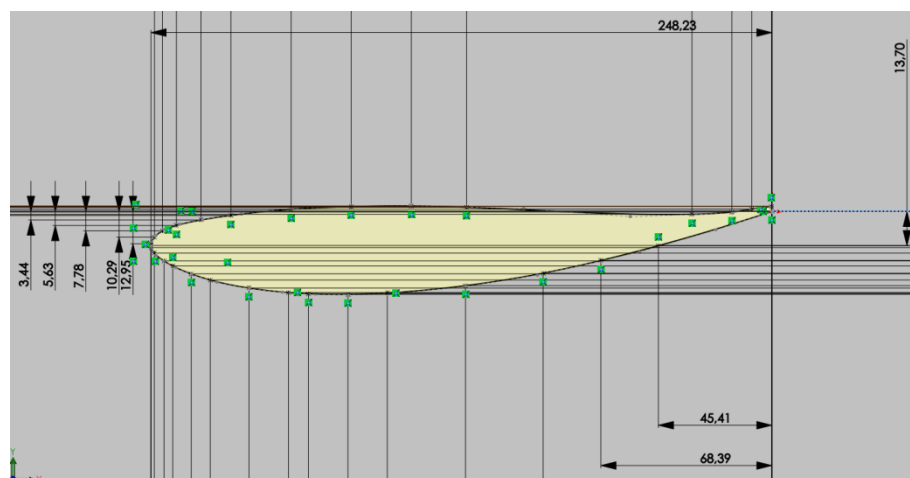


Figura 6.4. Spline amb alguns punts com a exemple

Per a realitzar la profunditat desitjada de perfil, es realitza una extrusió de 700 mm des de la superfície dreta (figura 14).

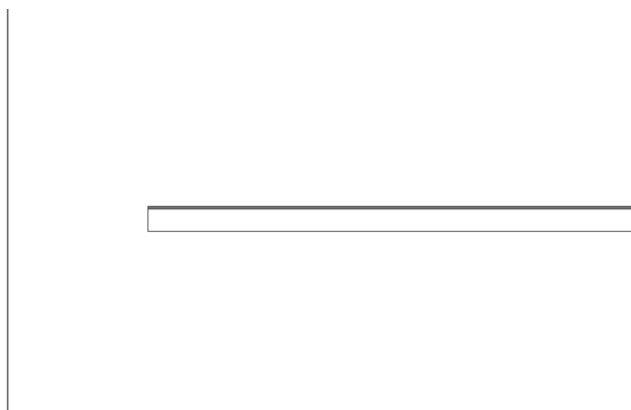


Figura 6.5. Extrusió de perfil alar

El programa ofereix diversos programes per a realitzar la simulació d'un flux (CFX i Fluent); dels quals s'escull la primera opció: Fluid Flow (CFX). La figura 15 mostra aquesta primera elecció. Es pot visualitzar les 5 etapes que s'han de seguir per obtenir els resultats.

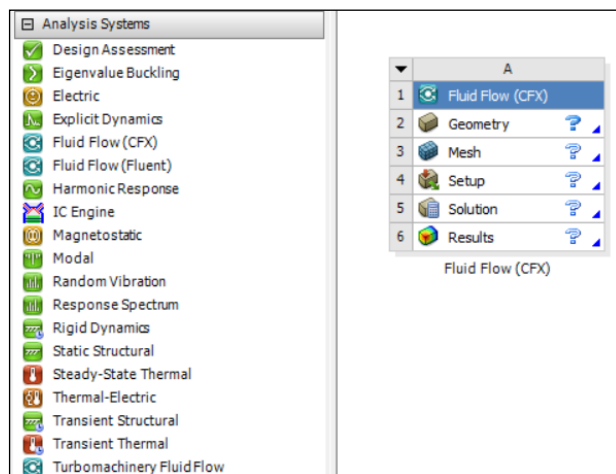


Figura 6.6. 5 etapes del Fluid Flow (CFX)

Seguidament s'ha d'introduir la geometria a analitzar. El programa permet dibuixar-la o importar-la d'arxius disponibles. Per a analitzar el perfil alar s'importarà la geometria de la figura 6.5 provinent de Solidworks®.

### 6.2.1.2. Mallat del model a analitzar

L'èxit d'una bona simulació és un mallat adequat. Fer-se una idea de què succeirà durant la simulació serà clau per saber què condicionarà al domini d'estudi i així determinar el tipus de mallat òptim.

Bàsicament, una malla és la representació discretitzada de la geometria en qüestió. Aquesta designa els elements en els que el comportament del flux es va resolent. Una bona malla es crucial ja que afecta a tres aspectes bàsics d'una simulació:

- Estimació i rapidesa en la convergència (o per lo contrari divergència).
- Cost del temps de càlcul de la CPU y memòria requerida.
- Precisió en els resultats.

En el nostre cas d'estudi s'opta per realitzar un mallat progressiu. L'amplitud dels elements va incrementant a des del perfil alar fins al contorn extern del domini. Es a dir, el número de nodes a augmentant a mesura que ens apropem al perfil alar. Això és degut a que necessitem una major precisió prop del perfil, ja que allà és on es produeixen les diferents perturbacions. Alhora, lluny de l'objecte d'estudi, el fluid es comporta d'una forma pràcticament constant ja que no es veu afectat per cap objecte en qüestió.

Per altre part, és determinant saber què succeeix en la capa límit i als seus voltants. Per tant, es decideix refinar la malla en tot el contorn del perfil alar per a obtenir una major precisió en les regions on es situa la capa límit.

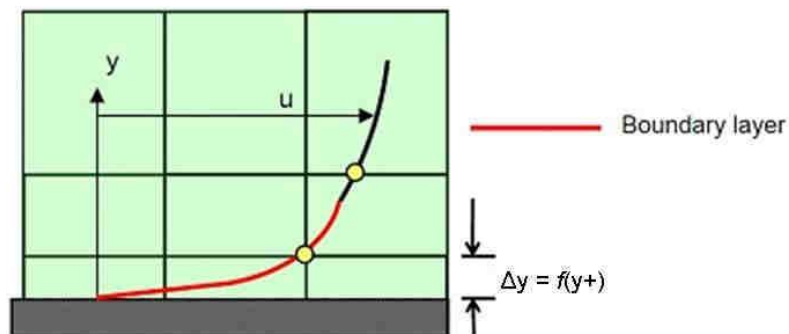


Figura 6.7 Gradient de velocitats

La figura 6.7 mostra com les capes d'elements prismàtics permeten caracteritzar acuradament el gradient de velocitats que s'origina en la superfície del perfil alar. Cadascun dels elements emprats presenta un increment progressiu, factor d'escala constant, de l'alçada que es presenta.

Hi ha moltes maneres de afrontar aquesta condició a l'hora de crear una malla. En aquest cas, el programa ofereix una opció molt assequible, anomenada "inflation", en la que es creen varies capes al voltant de la superfície designada, fet que permetrà extrapolar resultats versemblants.

### 6.2.1.2.1 Inflation

Per a saber les condicions, es fa un símil amb una placa plana com s'ha estudiat a l'assignatura de mecànica de fluids per a fer-se una idea del gruix de la capa límit ( $\delta$ ).

La placa plana serà de longitud ( $L$ ) igual a 0,25 m i d'amplada ( $A$ ) 1,4 m. Es farà servir l'equació 3.1 en funció de  $x$ .

$$Re_x = \frac{\rho \cdot V \cdot x}{\mu}$$

On  $Re$  és el número de Reynolds que ens servirà per saber si la flux és laminar o turbulent en cada punt ( $x$ ).

$\rho$  és la densitat del fluid, en aquest cas l'aire amb un valor de  $1.1839 \text{ kg/m}^3$ ,  $V$  és la velocitat del fluid que establirem un valor de  $125 \text{ km/h}$  i  $\mu$  és la viscositat dinàmica del fluid que té un valor de  $1.86 \cdot 10^{-5} \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ .

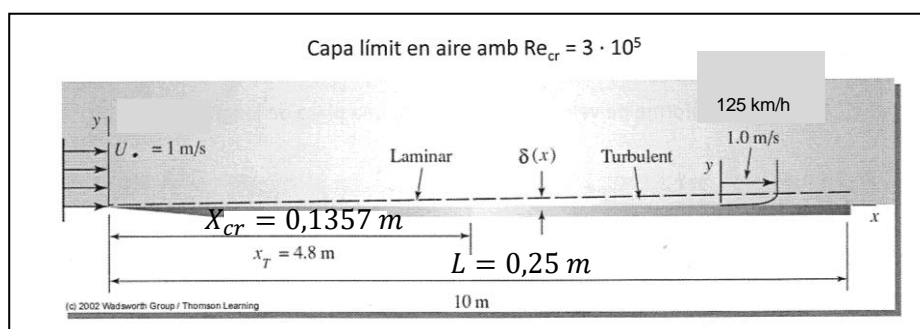


Figura 6.8. Símil per a capa plana

Per a saber si la capa límit és laminar o turbulenta primer s'ha de determinar la  $x_{crítica}$ , el punt on la capa límit passa a ser laminar a turbulent (punt de transició).

$$Re_{x_{cr}} = \frac{\rho \cdot V \cdot x_{cr}}{\mu}; \quad Re_{cr} = 3 \cdot 10^5$$

$x_{cr} = 0,1357 \text{ m}$ , així doncs es preveu tenir una capa límit turbulenta quan  $x$  igual a  $0,25 \text{ m}$  (cas on la capa límit és més gruixuda).

Per al cas on la capa límit és turbulent s'utilitza l'equació 6.1.

$$\frac{\delta}{L} = \frac{0,16}{Re_L^{1/7}} \text{ (eq. 6.1)} \quad \rightarrow \quad \delta = 0,006 \text{ m}$$

Amb aquesta condició de gruix de la capa límit, s'analitzarà diferents opcions de mallat i es triarà la millor opció segons la precisió de resultats, temps d'execució de simulacions i memòria requerida del CPU.

#### 6.2.1.2.2 Elecció mallat

Per a l'elecció del mallat òptim cal definir prèviament què és Y+. Y+ és una eina que indica de forma numèrica si la malla seleccionada és l'adequada per a la simulació realitzada. És a dir, un Y+ menor indica que el mallat és millor que un Y+ major.

| Mallat | Capas | Temps simulació | Y+      | $C_D / C_L$         | % error*    |
|--------|-------|-----------------|---------|---------------------|-------------|
| 1      | 5     | 7' 43"          | 433.907 | 0.034301 / -0.62831 | 7,78 / 2.23 |
| 2      | 12    | 14' 12"         | 281.989 | 0.035904 / -0.61545 | 3.48 / 0.18 |
| 3      | 20    | 19' 21"         | 223.559 | 0.037560 / -0.61478 | 0.97 / 0.07 |
| 4      | 50    | 39' 53"         | 198.011 | 0.037286 / -0.61433 | -           |

Taula 6.1. Comparació diferents mallats

\* Error percentual del  $C_D$  i  $C_L$  respecte Mallat 4

Observant la taula 6, el Mallat 4 és la opció més òptima degut a que el seu Y+ és el més petit, però també es valorarà el temps d'execució del programa tenint en compte els resultats obtinguts per a seleccionar el mallat ideal per a realitzar les simulacions. Cal destacar que probablement es podria augmentar el número de capas però, com s'ha comentat anteriorment, el programa limita el número de nodes.

S'ha calculat l'error que hi ha en els càlculs del  $C_D$  i  $C_L$ , i es decideix seleccionar el Mallat 3 per a realitzar les simulacions pertinents per les següents raons. L'error no supera l'1% en cap dels casos, el Y+ no és exageradament gran, i a més, el temps que triga en fer la simulació és 0.49 cops el temps que es triga amb el Mallat 4, fet que suposa un estalvi energètic.

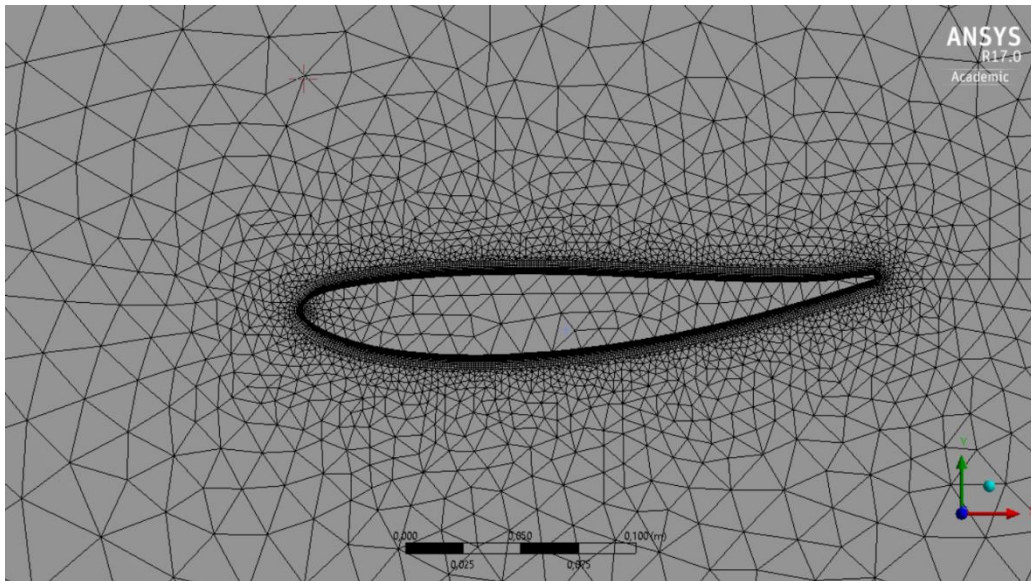


Figura 6.9. Mallat 3

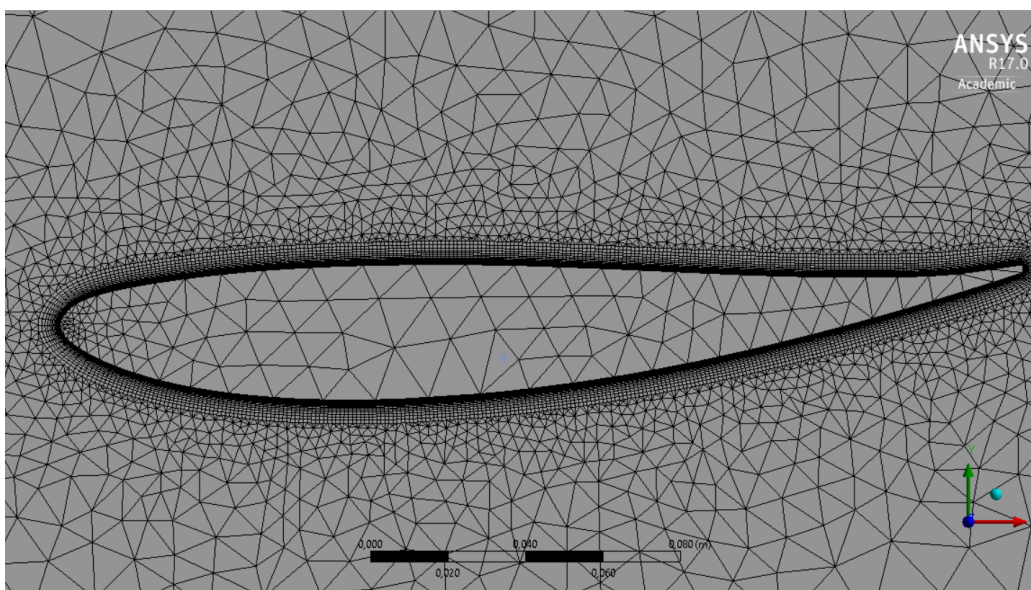


Figura 6.10. Zoom mallat3



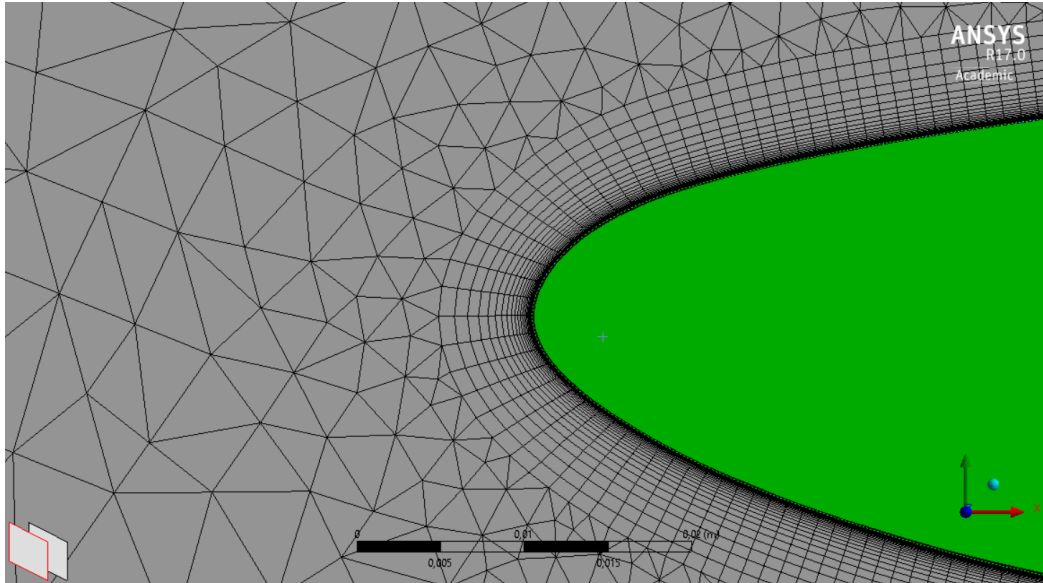


Figura 6.11. Mallat 3 en detall a la vora d'atac

La següent taula mostra les característiques definitives més rellevants del mallat:

|                     |                     |
|---------------------|---------------------|
| Edge Sizing         |                     |
| Numero de divisions | 500                 |
| Inflation           |                     |
| Número de capes     | 20                  |
| Màxim gruix         | 0,006 m             |
| Tasa de creixement  | 1,2                 |
| Sizing              |                     |
| Tamany mínim        | $5 \cdot 10^{-4}$ m |

Taula 6.2. Resum de característiques més importants del mallat

### 6.2.1.3. Setup

Les Superfícies d'aquest sòlid cal nombrar-les en funció de quin sigui el seu comportament envers el fluid que s'introduirà. Es distingiran 4 tipus d'element:

- **Element simètric (symmetry):** limita el flux a estar contingut dintre de la superfície tancada delimitada. Aquesta condició s'imposa a les dues cares frontals. Una d'elles degut a que és el pla mig de l'aleró, i l'altre per a que influeixi en l'anàlisi de la capa límit.
- **Element paret (wall):** Element sòlid al qual se li adhereix el flux. S'utilitza per representar superfícies sòlides que afecten directament al comportament del flux.
- **Element entrada (inlet):** Element que introdueix el flux, així com les condicions inicials d'aquest, per exemple la velocitat i pressió. Representa l'inici de la geometria de l'estudi i és perpendicular a la direcció del flux.
- **Element sortida (outlet):** Element que retira el flux. Limita la pressió de sortida per la possible pèrdua de càrrega dintre de l'estudi. Representa el final de la geometria de l'estudi.

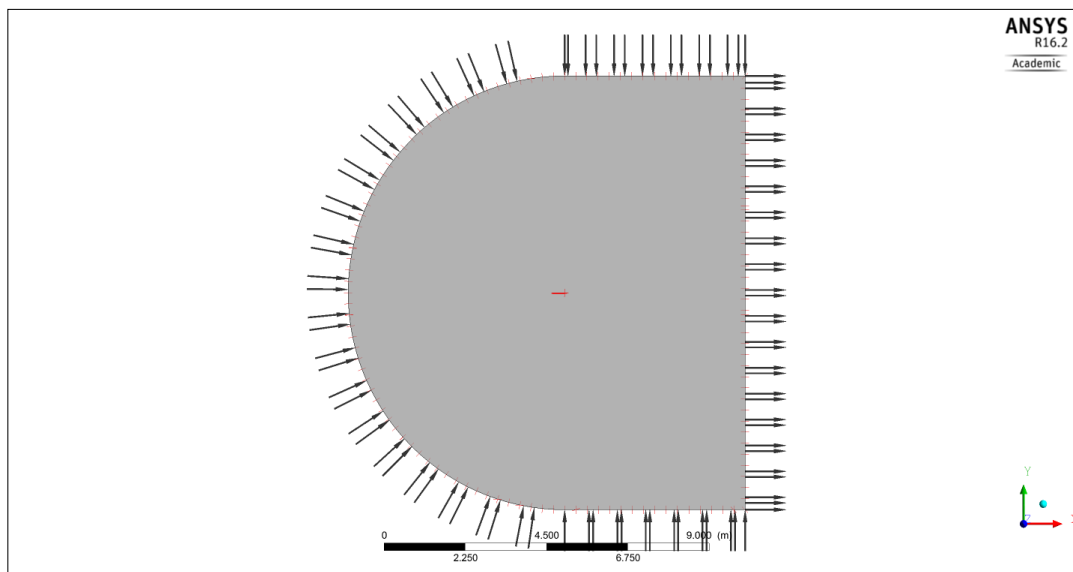


Figura 6.12. Sòlid amb els 4 elements definits

Un cop definides les geometries, el següent pas és aplicar-hi les condicions de contorn. Es defineix el model matemàtic que resoldrà el problema. Un estudi presentat a l'apartat 6.2.1.4. permetrà veure quantitativament si es pot simplificar el model.

Seguidament s'imposen les condicions de velocitat i pressió del model. Cal indicar la velocitat a l'inlet i la pressió de sortida a l'outlet.

Finalment cal configurar monitors residuals "monitor points", per a controlar la convergència de valors. Hi haurà 2 "monitor points" per a estudiar el Coeficient de fricció (Drag coefficient,  $C_D$ ) i coeficient de sustentació (Lift coefficient,  $C_L$ ).

Per al cas del càlcul en ales, l'àrea es pren la superfície de planta.[11]

Per a calcular el valor de  $C_D$ :

$$\text{force\_z\_Coord 1()@airfoil}^2/(\text{massFlowAve(Density)@inlet}*(\text{massFlowAve(Velocity)@inlet})^2*0.25[\text{m}]^*0.7[\text{m}])$$

Per a calcular el valor de  $C_L$ :

$$\text{force\_x\_Coord 1()@airfoil}^2/(\text{massFlowAve(Density)@inlet}*(\text{massFlowAve(Velocity)@inlet})^2*0.25[\text{m}]^*0.7[\text{m}])$$

Per a no canviar la geometria d'estudi per a fer l'anàlisi, cosa que complicaria l'estudi, es decideix crear un nou sistema de coordenades per a dirigir el fluid a partir dels canvis d'orientació del sistema de coordenades.

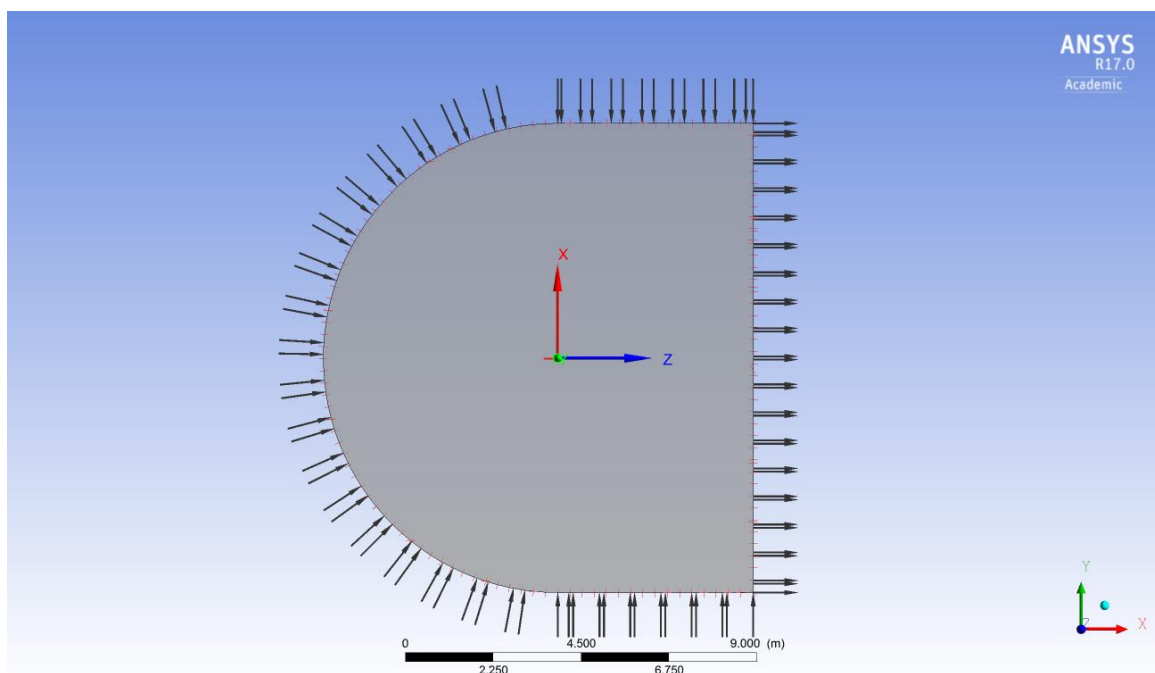


Figura 6.13. Nou sistema de coordenades

El flux es farà coincidir en la direcció Z del nou sistema de coordenades. S'anirà rotant respecte l'eix Y, perpendicular a l'eix X i Z, per a orientar el flux.

L'angle d'atac serà definit per els graus que forma el flux respecte la corda del perfil. La figura 6.14 mostra un exemple per a cada cas.

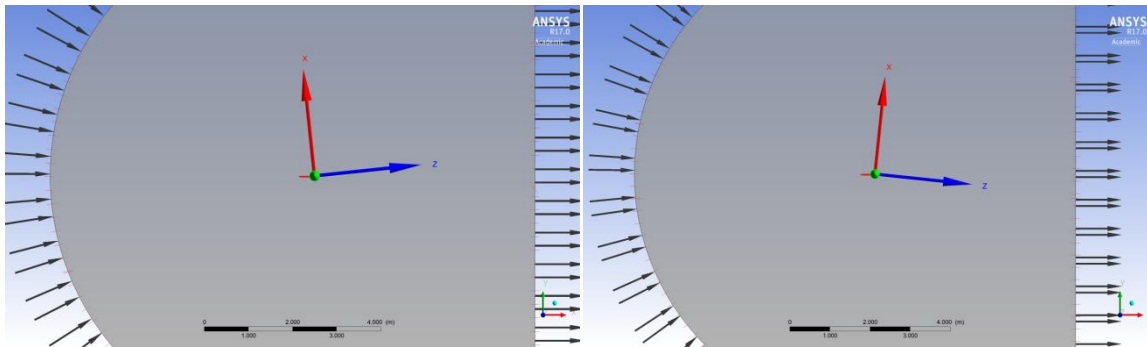


Figura 6.14. Exemple angle atac positiu i negatiu (esquerra i dreta respectivament)

#### 6.2.1.4. Models de Turbulència a CFX

Abans de fer la simulació s'ha d'escollir el model de turbulència que permet predir acuradament el comportament del flux quan es separa la capa límit i quan es generen els vòrtexs, així com les corresponents turbulències en la part posterior de l'aleró.[12]

Model K-Epsilon: Bon compromís entre esforç numèric i precisió de càlcul.

- 2 equacions
  - Flueix amb separació de la capa límit
  - Fluxos amb canvis sobtats en la velocitat de deformació mitjana
  - Flueix sobre superfícies corbes

Model K-Omega: Bon compromís entre esforç numèric i precisió de càlcul.

- 2 equacions
- Millor que el model K-Epsilon per als fluxos de la capa límit
  - Separació, transició, efectes de baix número de Reynolds...

Model Transition SST: Dissenyat per superar les deficiències en el K-Epsilon i K-Omega

- 4 equacions
- Per aprofitar les fortaleeses de cadascuna barregem entre els dos models d'acord amb la distància a la paret.
  - K-Omega prop de la paret, K-Epsilon més lluny de la paret.

Per a escollir el model a utilitzar es duu a terme una simulació amb les mateixes condicions de contorn per visualitzar la diferència quantitativa dels coeficients  $C_D$  i  $C_L$ . La taula 6.3 mostra els resultats obtinguts.

|           | $C_D$    | $C_L$    |
|-----------|----------|----------|
| K-Epsilon | 0,035233 | -0,62025 |
| K-Omega   | 0,0375   | -0,62426 |
| SST       | 0,035476 | -0,61328 |

Taula 6.3. Comparació de resultats utilitzant diferents models de turbulència

Per al cas del  $C_D$ , la diferència del K-Epsilon i K-Omega respecte SST és de 0.6% i 5.7%, respectivament. Així doncs, es pot descartar el model K-Omega.

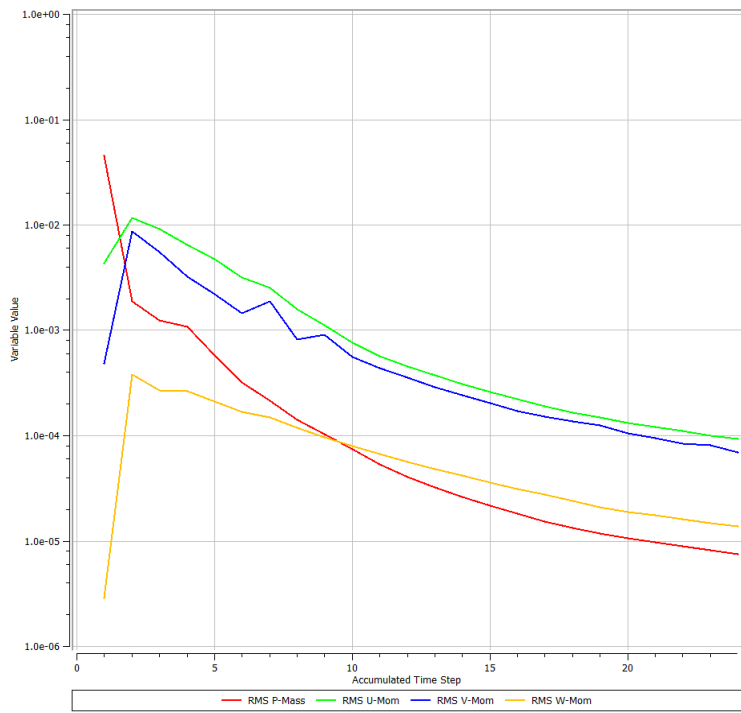
Per al cas del  $C_L$ , la diferència del K-Epsilon respecte SST és de 1,14%. A nivell de les competicions automobilístiques aquest error seria massa gran, així que es decideix utilitzar el model SST per a la simulació dels diferents casos.

### 6.2.2. Solucionador

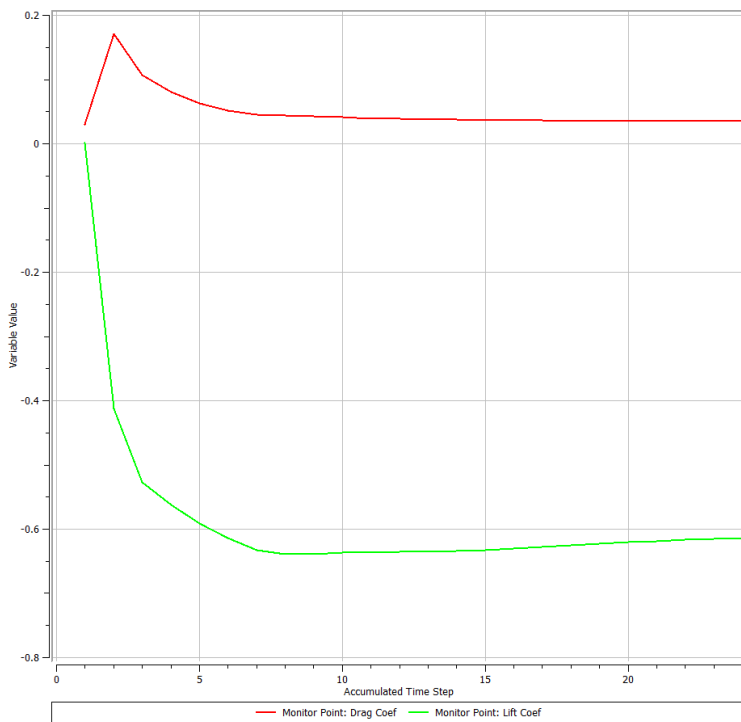
És la part encarregada dels càlculs de la simulació. Aquesta part s'encarrega de visualitzar els residus. Els residus són mesures que mostren la precisió del conjunt d'equacions que s'han resolt.

Prèviament cal introduir el número mínim i màxim d'iteracions, així com el criteri de convergència. Aquest criteri determina quan la solució es considera convergent i el solucionador s'aturarà.

- Número mínim d'iteracions: 1
- Número màxim d'iteracions: 200
  - Prou gran per a que arribi al criteri de convergència abans que al número màxim d'iteracions.
- Criteri de convergència:  $10^{-4}$



Gràfic 6.1. Criteri de convergència

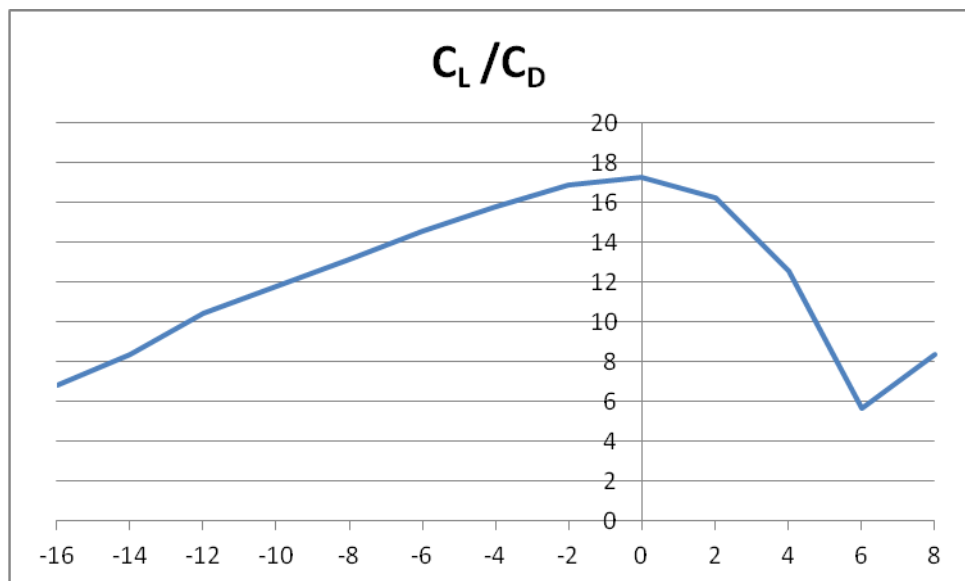


Gràfic 6.6.1. Monitor plots

La taula 9 es troben els diferents coeficients  $C_L$  i  $C_D$  per a cada angle d'atac (definit a l'apartat 6.2.1.3.).

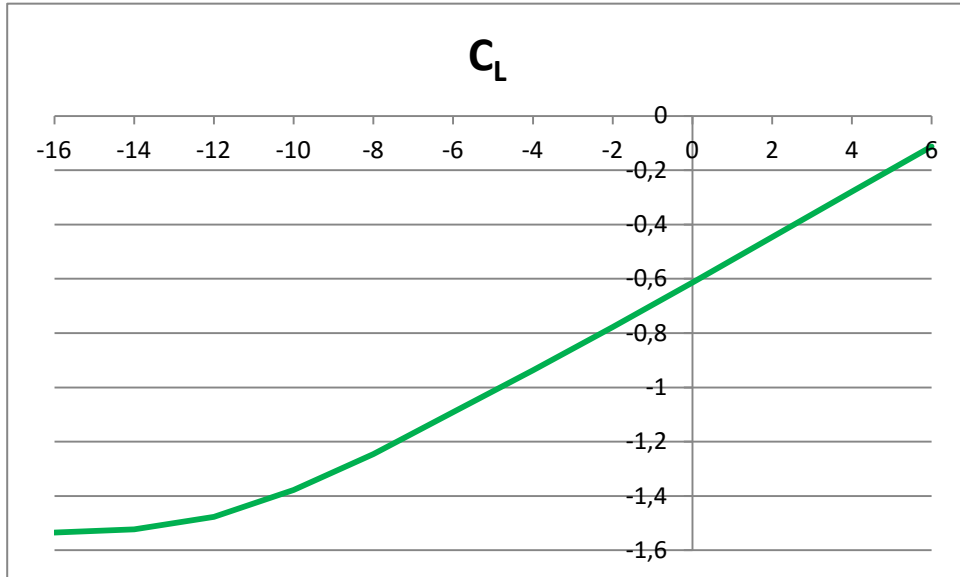
| Angle d'atac | $C_L$   | $C_D$  | $C_L/C_D$ |
|--------------|---------|--------|-----------|
| -16          | -1,5348 | 0,2252 | 6,8162    |
| -14          | -1,5232 | 0,1826 | 8,3417    |
| -12          | -1,4765 | 0,1413 | 10,4479   |
| -10          | -1,3777 | 0,1168 | 11,7964   |
| -8           | -1,2454 | 0,0947 | 13,1574   |
| -6           | -1,0909 | 0,0751 | 14,5293   |
| -4           | -0,9368 | 0,0593 | 15,8071   |
| -2           | -0,7772 | 0,0461 | 16,8612   |
| 0            | -0,6133 | 0,0355 | 17,2872   |
| 2            | -0,4463 | 0,0275 | 16,2544   |
| 4            | -0,2791 | 0,0222 | 12,5856   |
| 6            | -0,1122 | 0,0197 | 5,6833    |
| 8            | 0,1939  | 0,0231 | 8,3907    |

Taula 6.4.  $C_D$  i  $C_L$  en funció de l'angle d'atac

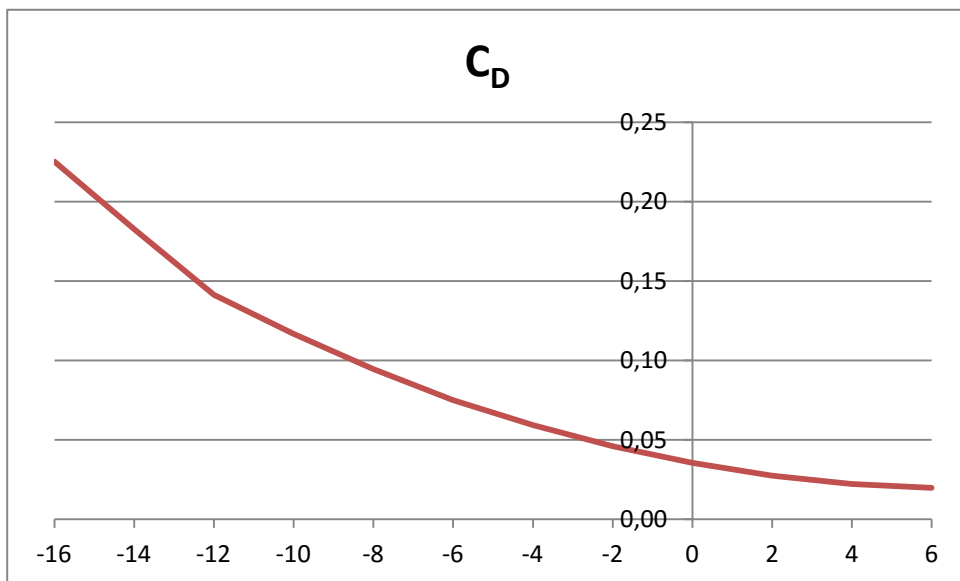


Gràfic 6.6.2.  $C_L/C_D$  en funció de l'angle d'atac

Així doncs, l'angle d'atac de 0 graus és on es troba el rendiment aerodinàmic més alt.



Gràfic 6.6.3.  $C_L$  en funció de l'angle d'atac



Gràfic 6.4.  $C_D$  en funció de l'angle d'atac



### 6.2.3. Postprocessador

Per últim, el postprocessador serveix per visualitzar els resultats de forma gràfica. S'utilitzarà la superfície (symmetry frontal) i el tipus d'element a visualitzar. Es visualitzarà la pressió i la velocitat del flux en tot el domini d'estudi utilitzant Streamlines, vector plot, countour...

Les següents imatges mostren, en forma d'exemple, les distribucions de pressions i les línies de corrent respectivament. En l'apartat 6.3 s'analitzarà les imatges amb més deteniment.

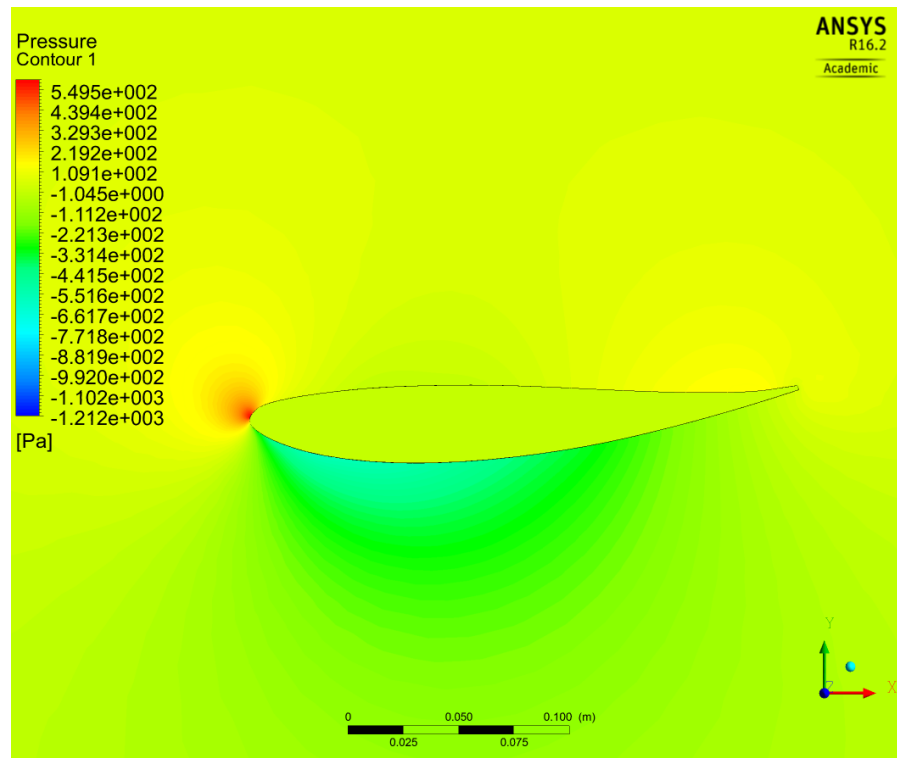


Figura 6.15. Distribució de pressió en el domini d'estudi

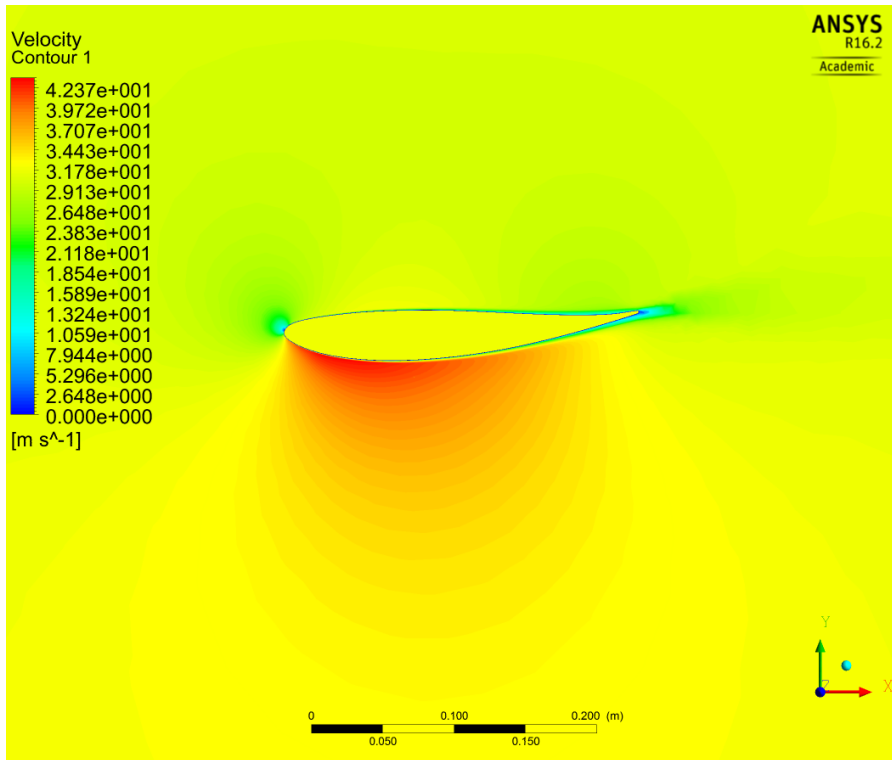


Figura 6.16. Distribució de velocitat en el domini d'estudi

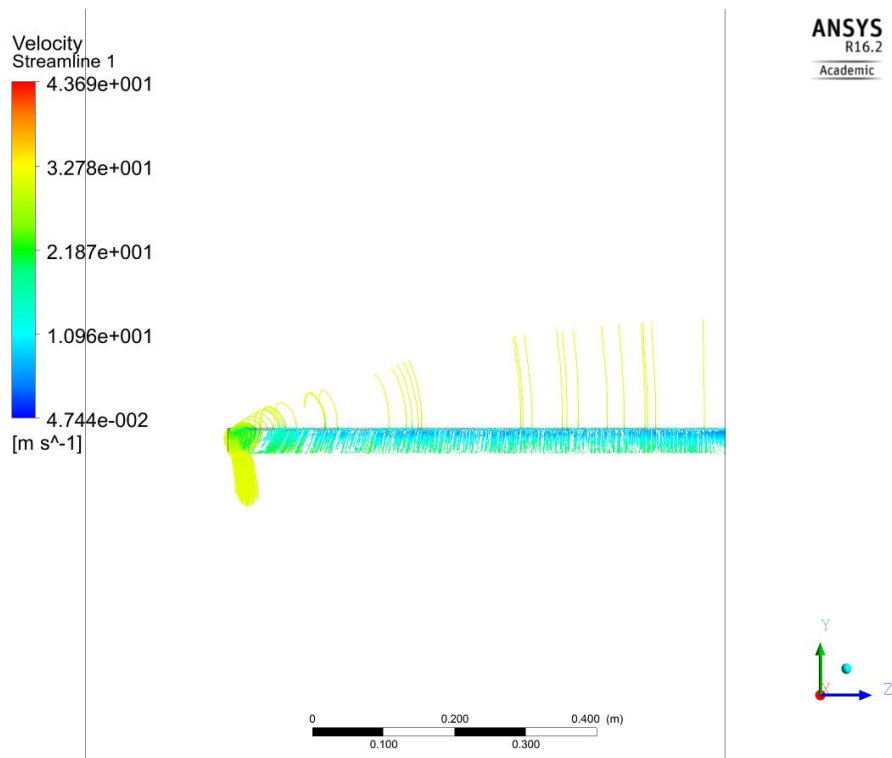


Figura 6.17. Streamline a la secció transversal del perfil alar

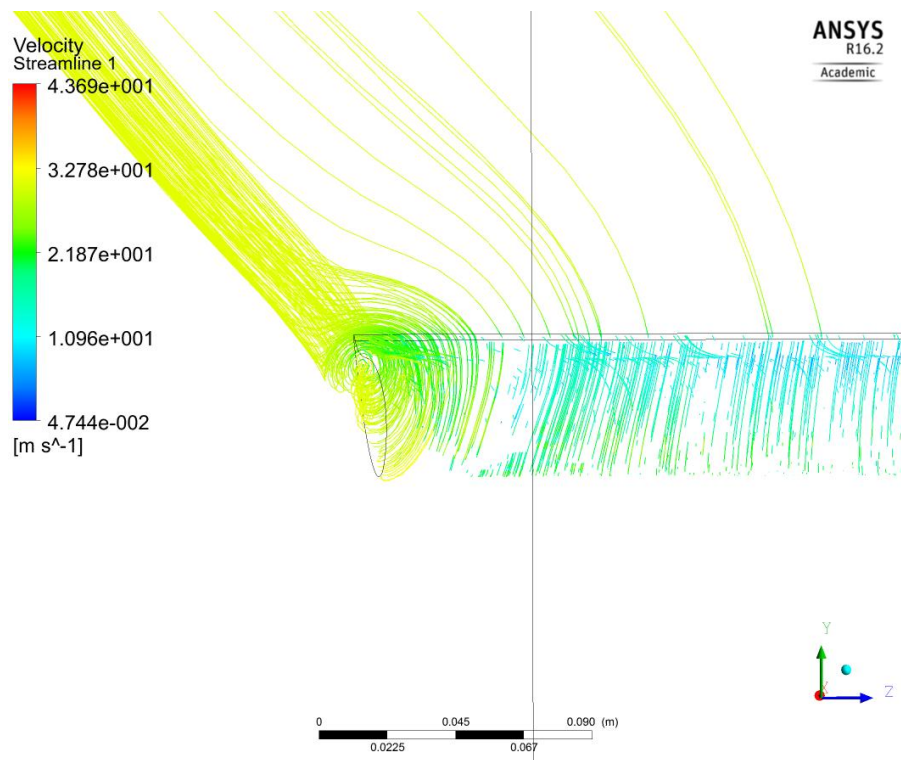


Figura 6.18. Zoom a l'extrem del perfil alar.

### 6.3. Anàlisi aerodinàmic

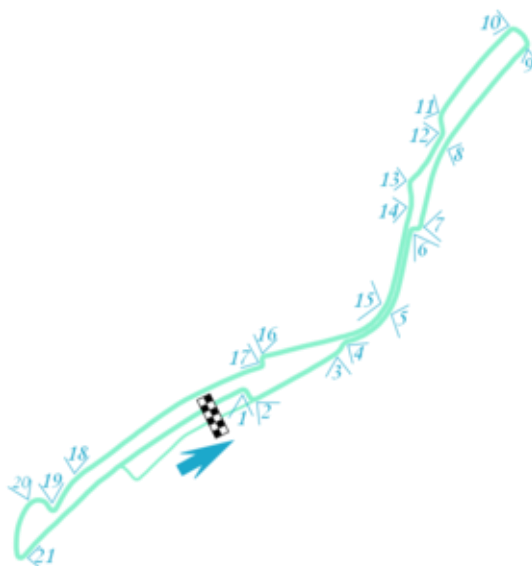
Una vegada obtinguda la simulació del perfil, cal comprovar com es comporta l'aleró en diferents circuits. Per a aconseguir-ho, s'escullen 2 circuits amb càrregues aerodinàmiques oposades (l'Apèndix 1 inclou una llista dels circuits de l'actual mundial amb les seves característiques corresponents), els quals es diferenciaran un circuit amb molt poca càrrega aerodinàmica (Long Beach, EEUU) i un que en necessiti molta càrrega aerodinàmica (Punta del Este, Uruguay).

La càrrega aerodinàmica és necessària per a mantenir el cotxe enganxat al terra i poder realitzar viratges amb una major velocitat, no obstant, com s'ha comentat anteriorment, una càrrega aerodinàmica elevada comporta una major resistència a l'avanç.

Per a poder realitzar les simulacions s'ha decidit seleccionar la velocitat mitjana màxima que qualsevol pilot va aconseguir durant qualsevol sessió del ePrix ja que ens interessa estudiar l'aleró en la totalitat del circuit i no només en les rectes (velocitats puntes) o corbes (velocitats mínimes).

#### 6.3.1. Circuit amb alta càrrega aerodinàmica

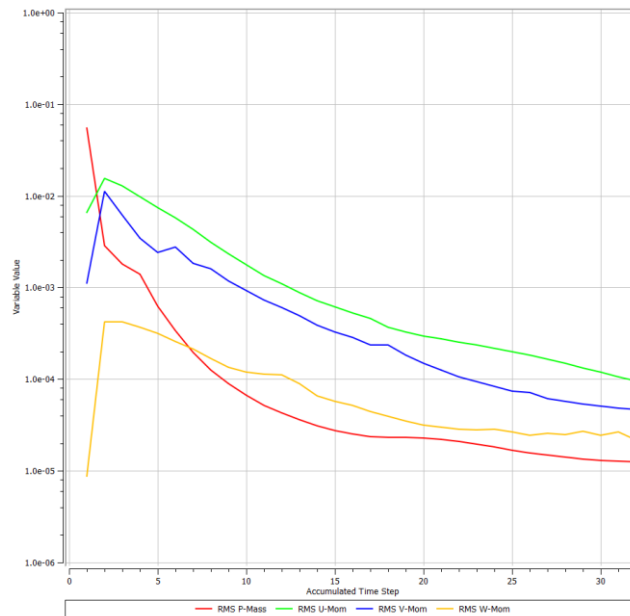
La il·lustració 6.2 mostra el circuit Formula E Punta del Este ePrix situat a Punta del Este (Uruguay). Aquest circuit té una allargada de 1.93 km i compta amb 14 revolts i la velocitat mitjana màxima obtinguda durant la present temporada és de 112 km/h



Il·lustració 6.2. Traçat circuit Punta del Este ePrix

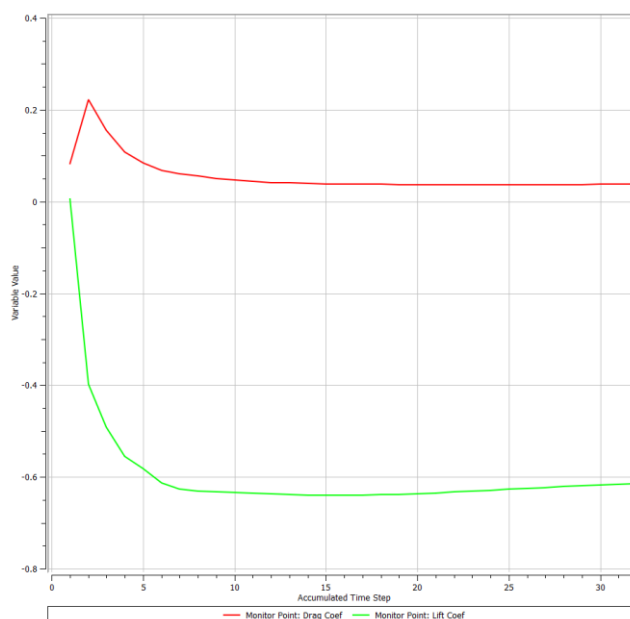
En circuits exigents amb el cotxe amb revolts ràpids i poca quantitat de trams rectes es requereix d'un aleró amb una elevada càrrega.

Es duen a terme la simulació amb el criteri establert a l'apartat 6.2.2, en el gràfic 6.5 s'aprecia l'evolució dels principals residus en les successives iteracions. S'observa com les variables que caracteritzen el model de turbulència s'estabilitzen fins aturar la simulació, criteri de convergència.



Gràfic 6.5 Convergència dels residus

Pel que fa als coeficients de resistència aerodinàmica i de sustentació aerodinàmica s'observa que també assoleix la convergència en ambdós casos (gràfic 6.6)



Gràfic 6.6. Convergència del CD i CL (vermell i verd, respectivament)

A continuació es detallen els valors obtinguts després de fer la simulació (Taula 6.5)

A partir de la eficiència màxima a 0 graus s'ha determinat la força màxima  $F_L$  que es pot assolir.

| Variable | Valor numèric |
|----------|---------------|
| $C_D$    | 0,03756       |
| $C_L$    | -0.61478      |

Taula 6.5. Paràmetres aerodinàmics per al circuit Formula E Punta del Este ePrix

Després d'obtenir els coeficients aerodinàmics, es calcula la força de resistència aerodinàmica  $F_D$  i la força de sustentació aerodinàmica negativa  $F_L$  amb les equacions 3.2 i 3.3. Cal recordar que em seleccionat la meitat del perfil alar, així doncs caldrà multiplicar per dos per a saber la força total.

$$F_D = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v^2 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,1839 \cdot 0,03756 \cdot 0,25 \cdot 0,7 \cdot 31,11^2 = 7,53 \text{ N}$$

$$F_L = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot v^2 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,1839 \cdot (-0,61478) \cdot 0,25 \cdot 0,7 \cdot 31,11^2 = -123,27 \text{ N}$$

Un cop especificats els principals paràmetres aerodinàmics es presenten les característiques del flux en diferents zones del perfil alar. L'estudi de pressions i velocitats en els diferents llocs d'aquest.

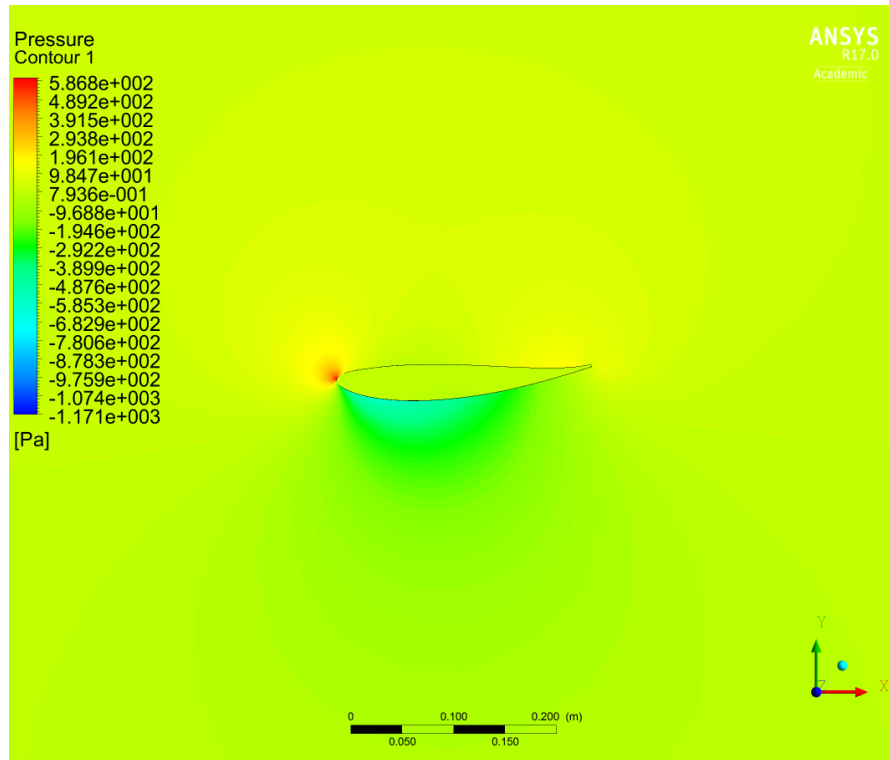


Figura 6.19. Distribució de pressió absoluta

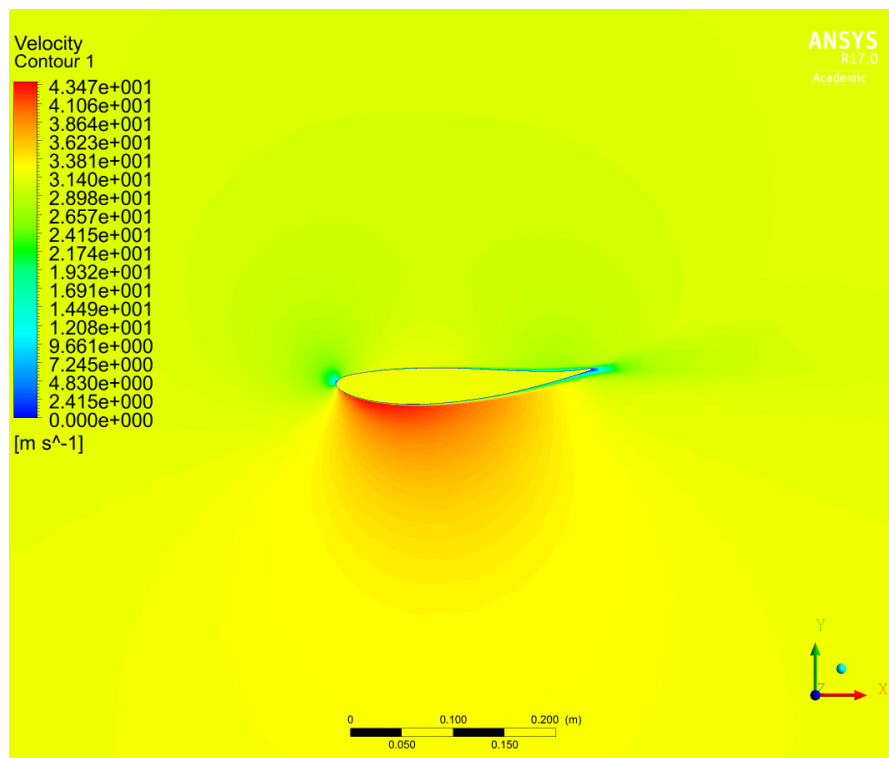


Figura 6.20. Perfil de velocitats absolutes de la paret symmetry (112 km/h)

En la figura 6.20, es pot observar el perfil de velocitats tenint en compte totes les components vectorials de la celeritat. En primera instància, es veu l'increment de velocitat que s'origina al col·lidir amb la curvatura del perfil alar. Després de superar el punt d'estancament, velocitat és igual a zero, les línies de corrent que es dirigeixen per la part inferior experimenten una acceleració donat que la pressió és més baixa en aquesta regió que en la part superior del sòlid. Per altra banda, com que la pressió és més elevada per sobre del perfil, la celeritat del flux en aquesta regió és menor. En aquest cas, la velocitat absoluta màxima assolida pel flux és de  $43,47 \frac{m}{s}$ , augmentant un factor de 1,39 respecte la velocitat no pertorbada del flux inicial.

Altrament, si s'observa el comportament del flux quan col·lideix amb el perfil, s'observa una estela (Figura 6.20). Aquesta estela, de baixes velocitats i pressions permet comprovar que la capa límit s'ha després de la superfície. Fet que origina una recirculació en la que les velocitats en el sentit d'incidència de les línies de corrent de l'aire sobre l'element és negativa.

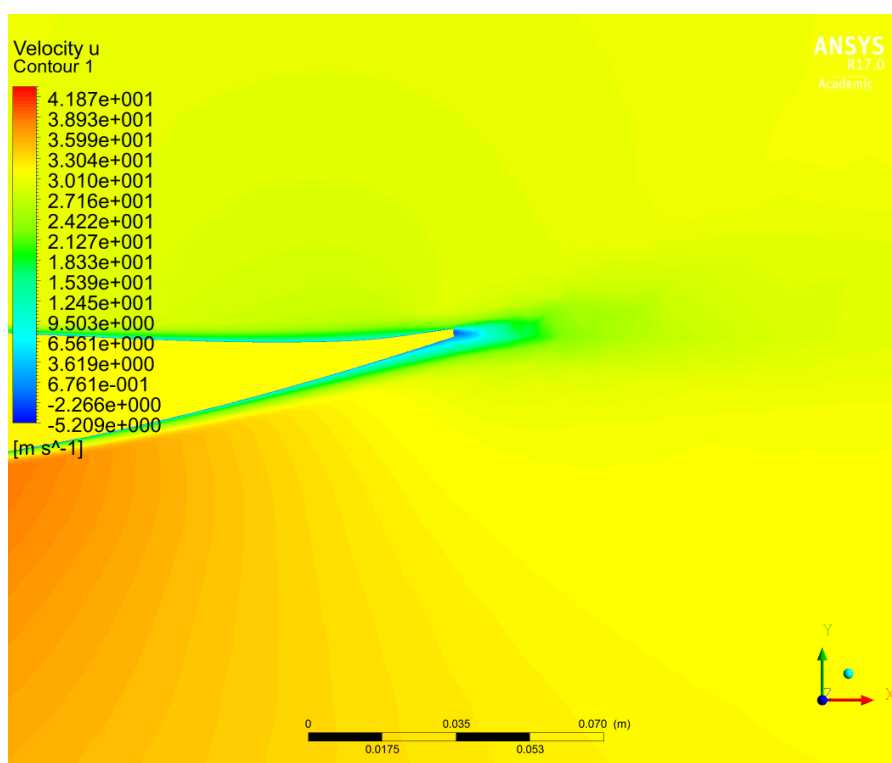


Figura 6.21. Perfil de  $V_x$  de la paret symmetry (112 km/h)

Tal i com s'ha dit en el paràgraf anterior, es pot confirmar que el flux té recirculació, ja que hi ha celeritats negatives de  $V_x$  en la figura 6.21. Conseqüentment, s'estan generant vòrtexs que roten en sentit invers com es pot observar en la figura següent.



La velocitat mínima és negativa, en concret és igual a  $-5.209 \frac{m}{s}$ , i es localitza en l'estela que genera el perfil alar. És important observar que les regions adjacents a l'estela el flux continua accelerant fins que comença a reduir la seva celeritat.

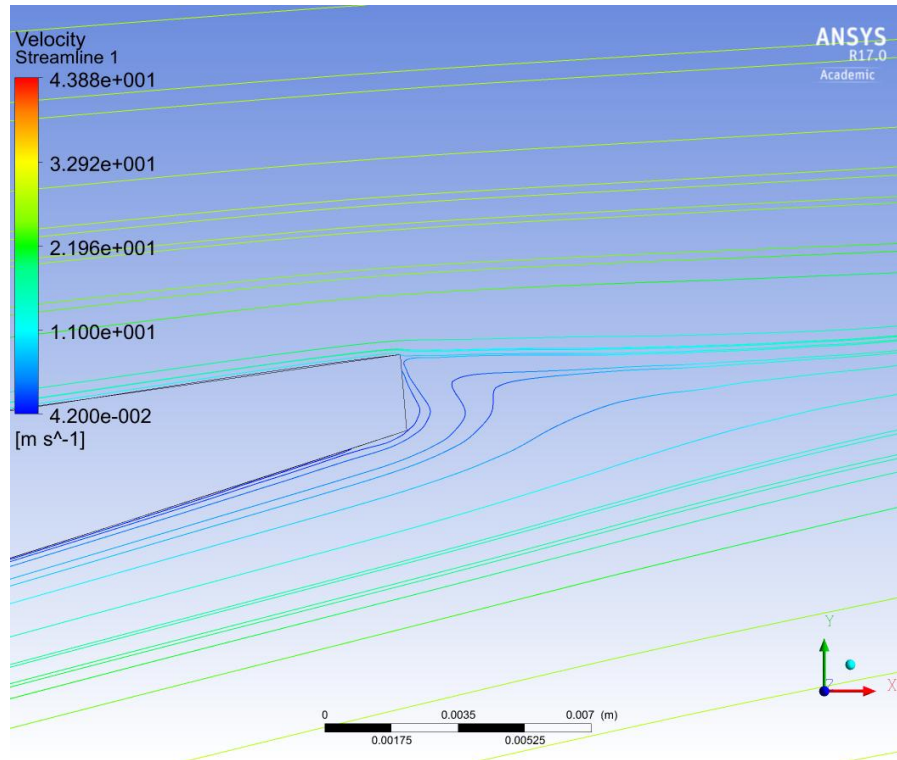


Figura 6.22. Streamline velocitats (poc detallat)

La figura 6.22. mostra la línia de corrent (línia que en un instant donat és tangent al vector velocitat en tot punt) que ens permet com en un moment determinat el flux va en direcció contrària a la definida inicialment.

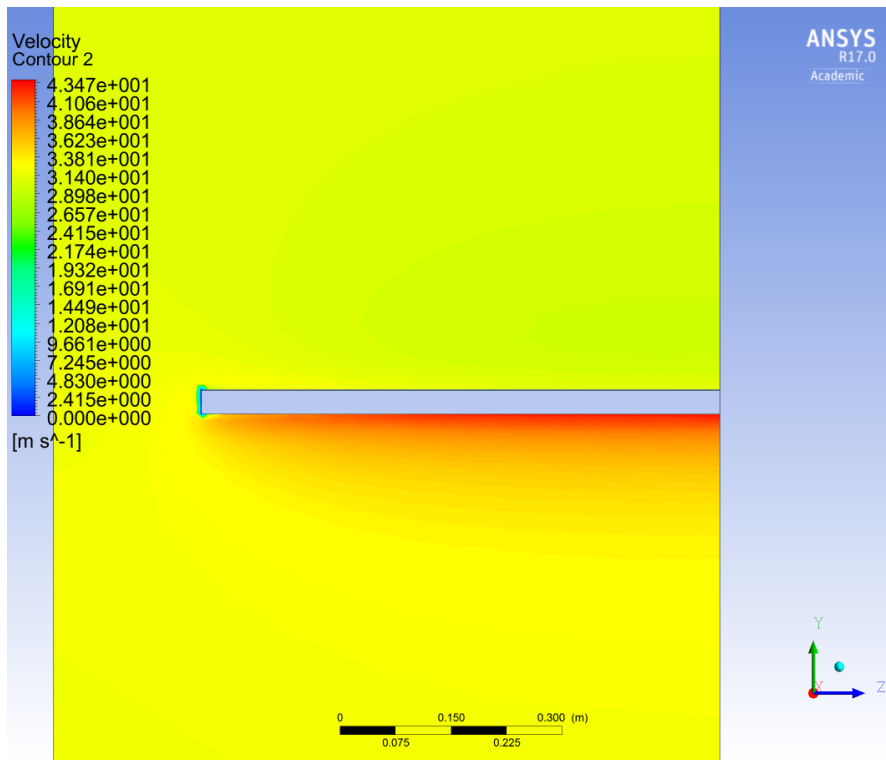


Figura 6.23. Tall frontal per veure la distribucions de velocitats

En la figura 6.23 es pot observar com la distribució de velocitats no és constant al llarg de l'envergadura del perfil alar. Això és degut que a l'extrem del perfil, la capa límit es separa de la superfície bruscament originant un sobtat decreixement de la velocitat.

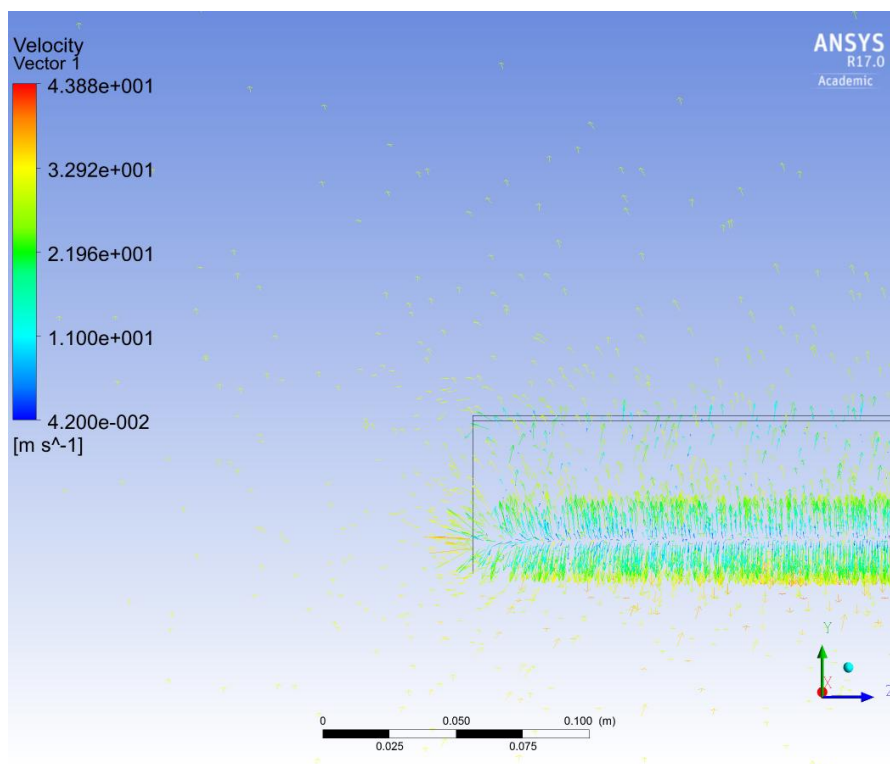
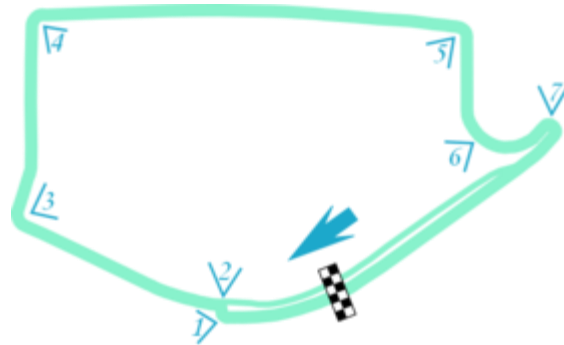


Figura 6.24. Vector plot a l'extrem del perfil

Com també es veu en la figura 6.24, els vectors de velocitats no son constants al llarg de l'eix longitudinal del perfil. Al arribar al extrem del perfil alar, aquest flux no segueix un recorregut com passaria al llarg del perfil.

### 6.3.2. Circuit amb baixa càrrega aerodinàmica

La il·lustració 6.3 mostra el circuit Faraday Future Long Beach ePrix situat a Long Beach (Estats Units). Aquest circuit té una allargada de 2.1 km i només té 7 revolts.



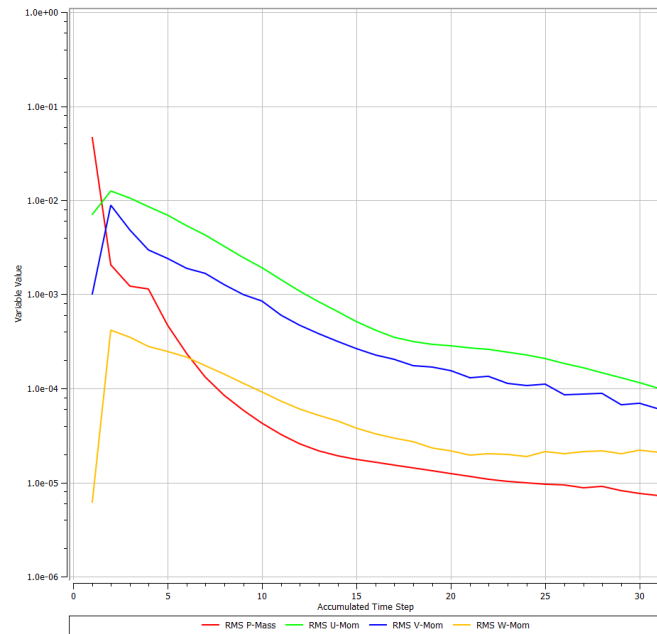
*Il·lustració 6.3. Traçat circuit Faraday Future Long Beach ePrix*

En circuits com aquest, amb gran part del circuit amb el cotxe en rectes i poques corbes es necessita d'una resistència que sigui prou baixa per a poder obtenir altes velocitats, fet que comporta una disminució de la càrrega del cotxe.

La velocitat mitjana màxima obtinguda durant la present temporada és de 135 km/h.

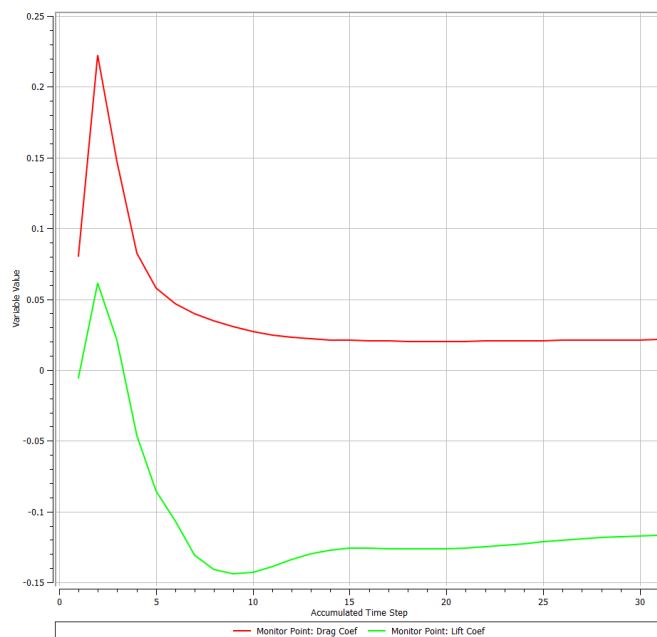
A partir del gràfic 4 on es mostra el comportament del  $C_D$  en funció de l'angle d'atac es pot seleccionar un angle d'atac de 6 graus (valor just per a que el  $C_L$  no sigui positiu, fet que tombaria el monoplaça).

Es duen a terme la simulació amb el criteri establert a l'apartat 6.2.2, en el gràfic 6.7 s'aprecia l'evolució dels principals residus en les successives iteracions. S'observa com les variables que caracteritzen el model de turbulència s'estabilitzen fins aturar la simulació, criteri de convergència.



Gràfic 6.7. Convergència de residus

Pel que fa als coeficients de resistència aerodinàmica i de sustentació aerodinàmica s'observa que també assoleix la convergència en ambdós casos (gràfic 6.8)



Gràfic 6.8. Convergència del CD i CL (vermell i verd, respectivament)

A continuació es detallen els valors obtinguts després de fer la simulació amb un angle d'atac de sis graus (Taula 6.6).

| Variable | Valor numèric |
|----------|---------------|
| $C_D$    | 0,021397      |
| $C_L$    | -0,11689      |

Taula 6.6. Paràmetres aerodinàmics per al circuit Formula E Long Beach ePrix

Després d'obtenir els coeficients aerodinàmics, es calcula la força de resistència aerodinàmica  $F_D$  i la força de sustentació aerodinàmica negativa  $F_L$  amb les equacions 3.2 i 3.3. Cal recordar que em seleccionat la meitat del perfil alar, així doncs caldrà multiplicar per dos per a saber la força total.

$$F_D = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_D \cdot A \cdot v^2 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,1839 \cdot 0,021397 \cdot 0,25 \cdot 0,7 \cdot 37,5^2 = 6,23 \text{ N}$$

$$F_L = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_L \cdot A \cdot v^2 = 2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,1839 \cdot (-0,11689) \cdot 0,25 \cdot 0,7 \cdot 37,5^2 = -34,06 \text{ N}$$

Un cop especificats els principals paràmetres aerodinàmics es presenten les característiques del flux en diferents zones del perfil alar. L'estudi de pressions i velocitats en els diferents llocs d'aquest.

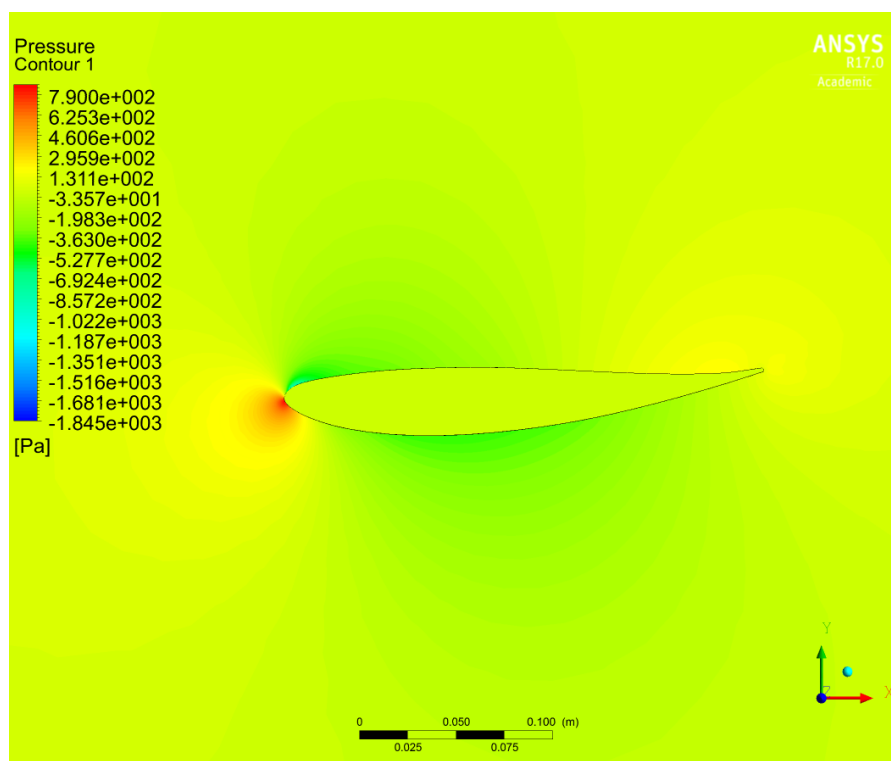


Figura 6.25. Distribució de pressió absoluta

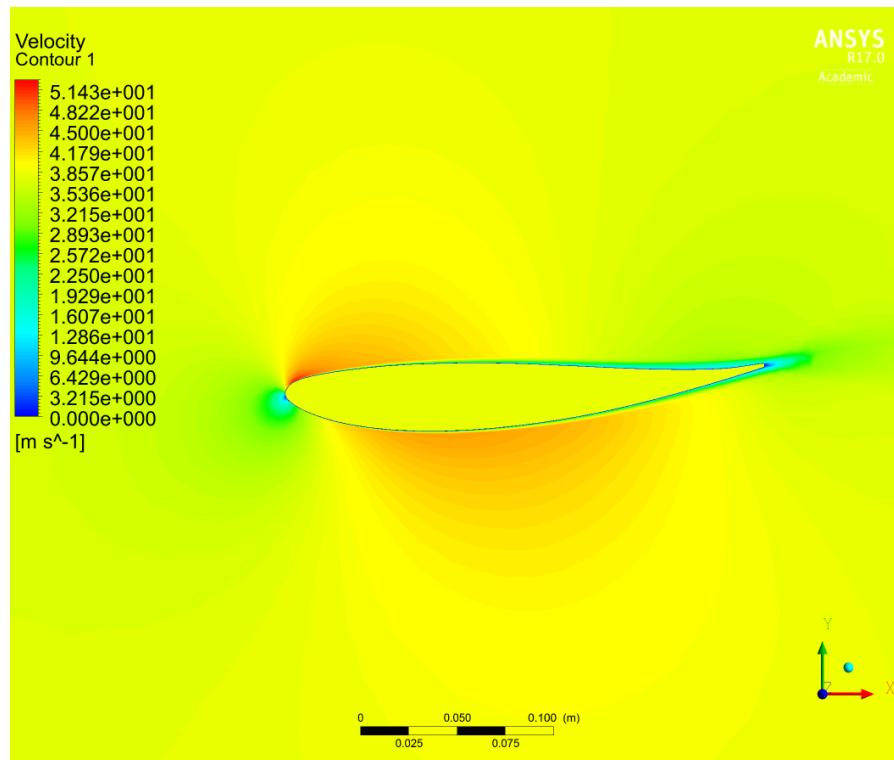


Figura 6.26. Perfil de velocitats absolutes de la paret symmetry (135 km/h)

Al igual que succeeix amb el circuit amb alta càrrega aerodinàmica, es pot observar l'increment de velocitat que s'origina al col·lidir amb la curvatura del perfil alar. Però, després de superar el punt d'estancament, primerament hi ha una distribució de velocitat més elevada en la part superior, encara que ràpidament es redueixi. Secundàriament, arribant a la cua del perfil, hi ha una distribució de velocitats més gran en la part inferior que la part superior del perfil, però aquesta és de menys intensitat.

La figura 6.25 no s'entendria sense la figura 6.26. La pressió a ambdós parts del perfil és molt similar.

En aquest cas, la velocitat absoluta màxima assolida pel flux és de  $51,43 \frac{m}{s}$ , augmentant un factor de 1,37 respecte la velocitat no pertorbada del flux inicial.

Altrament, si s'observa el comportament del flux quan col·lideix amb el perfil, s'observa una estela (Figura 6.26). Aquesta estela, de baixes velocitats i pressions permet comprovar que la capa límit s'ha després de la superfície. Fet que origina una recirculació en la que les velocitats en el sentit d'incidència de les línies de corrent de l'aire sobre l'element és negativa.

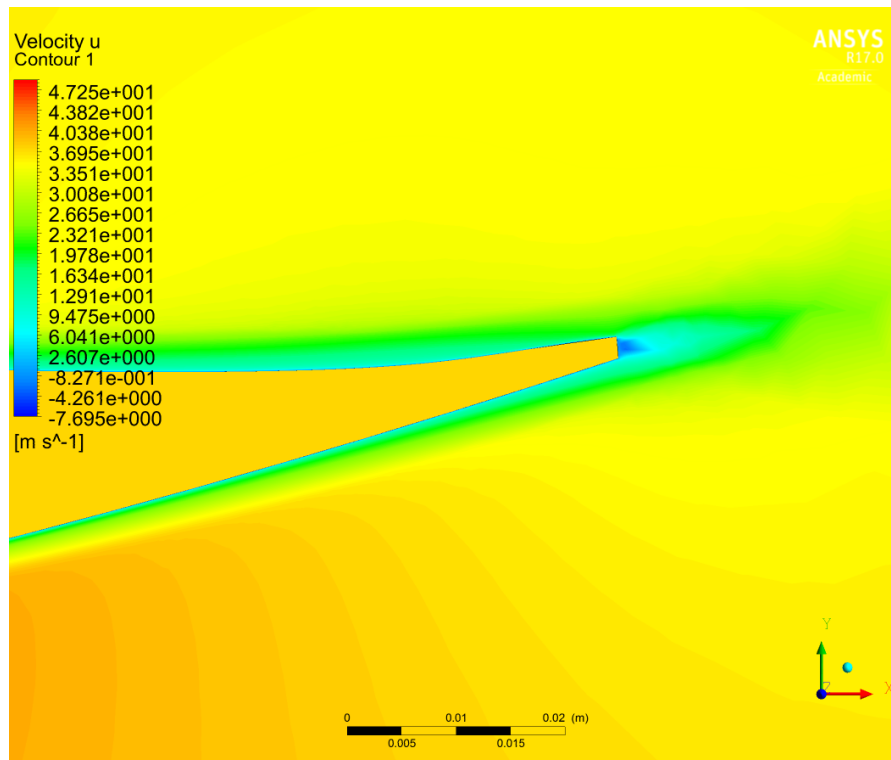


Figura 6.27. Perfil de  $V_x$  de la paret symmetry (135 km/h)

Tal i com s'ha dit en el paràgraf anterior, es pot confirmar que el flux té recirculació ja que hi ha celeritats negatives de  $V_x$  en la figura 6.27. Conseqüentment, s'estan generant vòrtexs que roten en sentit invers com es pot observar en la figura següent.

La velocitat mínima és negativa, en concret és igual a  $-7.695 \frac{m}{s}$ , i es localitza en l'estela que genera el perfil alar. És important observar que les regions adjacents a l'estela el flux continua accelerant fins que comença a reduir la seva celeritat.

En comparació amb l'estudi anterior, aquesta velocitat negativa és major en mòdul absolut. Això és degut a que la pressió absoluta en aquest punt és major.



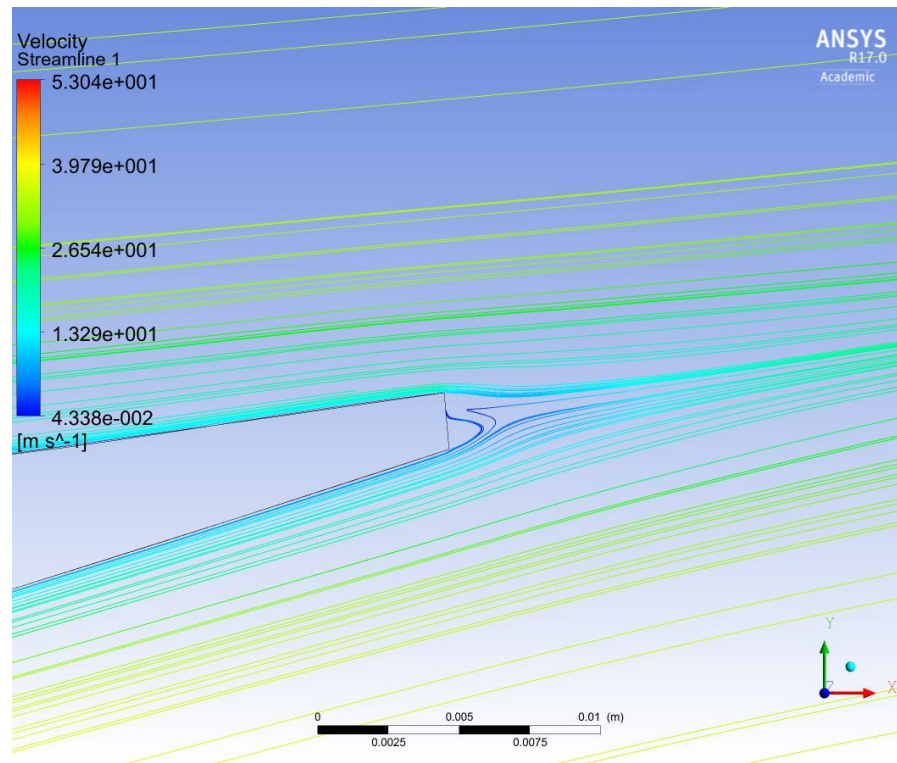


Figura 6.28. Streamline velocitats (poc detallat)

La figura 6.28 mostra la línia de corrent (línia que en un instant donat és tangent al vector velocitat en tot punt) que ens permet com en un moment determinat el flux va en direcció contrària a la definida inicialment.

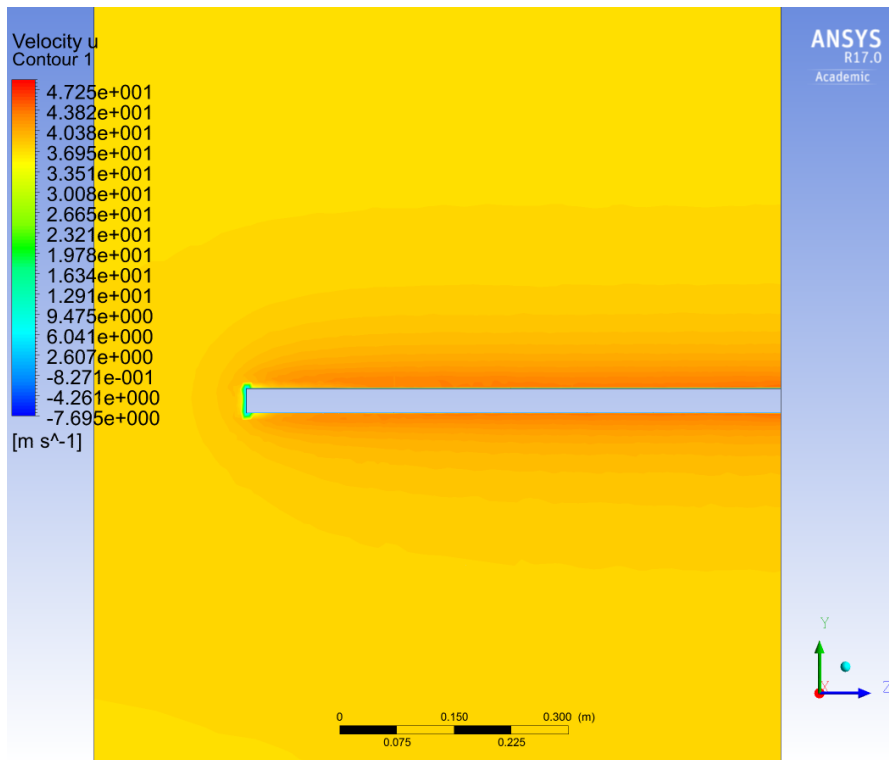


Figura 6.29. Tall frontal per veure la distribucions de velocitats

En la figura 6.29 es pot observar com la distribució de velocitats no és constant al llarg de l'envergadura del perfil alar, igual que en el circuit amb alta càrrega aerodinàmica. Això és degut que a l'extrem del perfil, la capa límit es separa de la superfície bruscament originant un sobtat decreixement de la velocitat.

La diferència amb el cas anterior és que en aquest cas la velocitat per la part superior és força major.

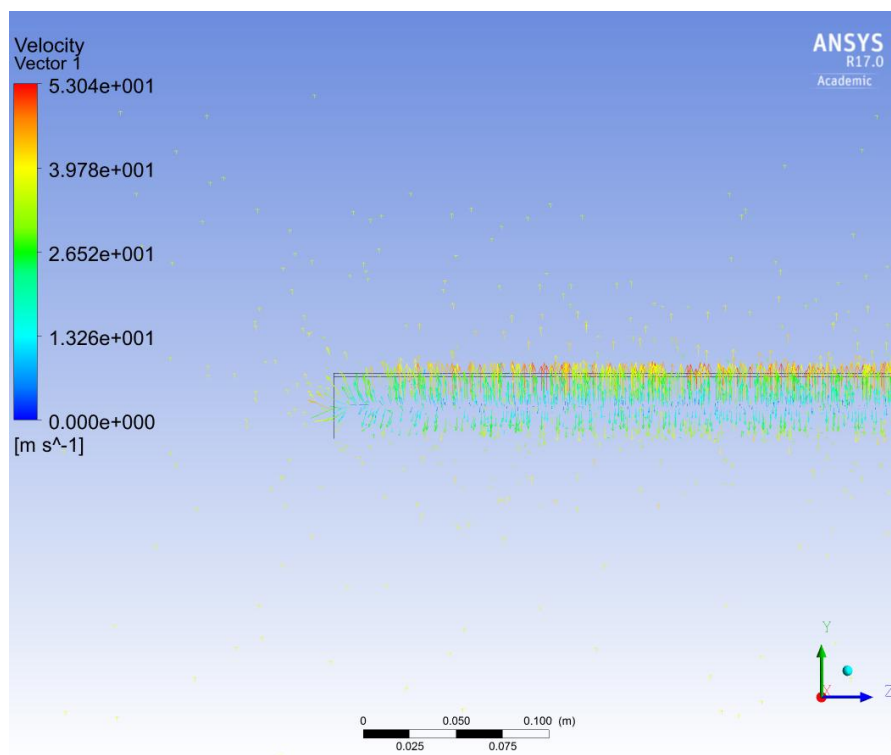


Figura 6.30. Vector plot a l'extrem del perfil

Com també es veu en la figura 6.30, els vectors de velocitats no son constants al llarg de l'eix longitudinal del perfil, al igual que l'altre cas. Al arribar al extrem del perfil alar, aquest flux no segueix un recorregut com passaria al llarg del perfil.

## 7. Cost econòmic del projecte

Per a realitzar el càlcul del cost total del projecte es tenen en compte diferents aspectes. Com es pot veure a la següent taula, la major part del pressupost l'engloba la part d'enginyeria i Hardware i Software.

La part d'enginyeria concentra la major part del cost del projecte. Es té en compte les hores de treball de l'enginyer al llarg de la duració del projecte, estimat en unes 325 hores.

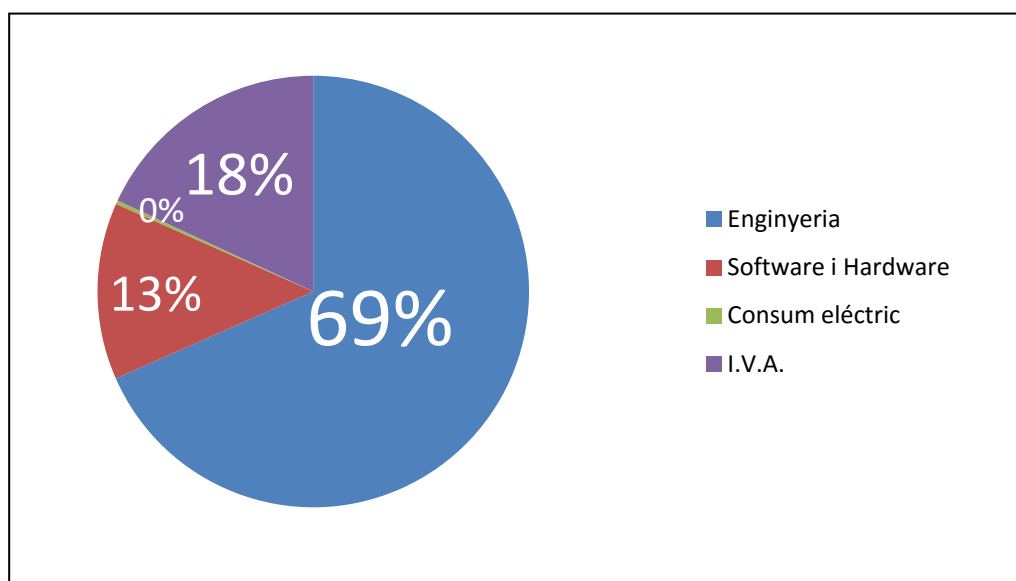
En la part de Hardware i Software es calcula l'estimació de l'amortització. el programa Solidworks tindrà una vida útil de 2 anys, Ansys 3 anys i l'ordinador personal de 4 anys, tots tres treballant a raó de 40 hores setmanals amb una saturació del 70%.

S'ha de tenir en compte el cost energètic que tindrà l'ordinador personal, es considera que la preu de la llum és de 0,15 €/kWh.

En la següent taula mostra de forma detallada totes les parts.

|                            |                                |                 |                           |                   |                    |     |
|----------------------------|--------------------------------|-----------------|---------------------------|-------------------|--------------------|-----|
| <b>Enginyeria</b>          | <b>Concepte</b>                | <b>€/hora</b>   | <b>Temps invertit (h)</b> | <b>Total</b>      |                    |     |
|                            | Documentació                   | 20,00 €         | 75                        | 1.500,00 €        |                    |     |
|                            | Modelació 3D                   | 30,00 €         | 40                        | 1.200,00 €        |                    |     |
|                            | Simulació                      | 28,00 €         | 150                       | 4.200,00 €        |                    |     |
|                            | Anàlisi resultats              | 35,00 €         | 60                        | 2.100,00 €        |                    |     |
|                            | <b>Total</b>                   |                 | <b>325</b>                | <b>9.000,00 €</b> | (1)                |     |
| <b>Hardware i Software</b> | <b>Concepte</b>                | <b>Preu</b>     | <b>Vida útil (h)</b>      | <b>Ús (h)</b>     | <b>Amortitzat</b>  |     |
|                            | Solidworks®                    | 6.000,00 €      | 2600                      | 40                | 92,31 €            |     |
|                            | Ansys®                         | 30.000,00 €     | 4000                      | 210               | 1.575,00 €         |     |
|                            | Ordinador personal             | 1.200,00 €      | 5000                      | 325               | 78,00 €            |     |
|                            | <b>Total</b>                   |                 |                           |                   | <b>1.745,31 €</b>  | (2) |
| <b>Consum elèctric</b>     | <b>Concepte</b>                | <b>Potència</b> |                           | <b>Ús (h)</b>     | <b>Total</b>       |     |
|                            | Ordinador personal             | 0,75 kW         |                           | 325               | 36,56 €            |     |
|                            |                                |                 |                           |                   |                    | (3) |
| <b>Costos Totals</b>       | <b>Concepte</b>                |                 |                           |                   | <b>Total</b>       |     |
|                            | Cost total                     | (1)+(2)+(3)     |                           |                   | 10.781,87 €        |     |
|                            | Imprevistos                    | 5% de (4)       |                           |                   | 539,09 €           |     |
|                            | I.V.A.                         | 21% de (4)+(5)  |                           |                   | 2.377,40 €         |     |
|                            | <b>Cost total del projecte</b> |                 | <b>(4)+(5)+(6)</b>        |                   | <b>13.698,37 €</b> |     |

Taula 7.1 Cost total del projecte



Gràfic 7.1. Pes econòmic de cada part del projecte

## 8. Impacte Mediambiental

Degut a la naturalesa del projecte, no es considera rellevant la realització d'un estudi d'impacte ambiental, ja que es tracta d'un procés de disseny i simulació generats íntegrament per ordinador. Només cal analitzar l'impacte que produeix les simulacions i quin impacte té comparat amb l'estudi físic dels prototips.

L'impacte mediambiental indirecte implica una major conseqüència. Si es millora l'eficiència aerodinàmica, el temps per volta de qualsevol monoplaça serà menor, així doncs, aquests podran finalitzar la cursa en un interval de temps menor i en conseqüència, el risc que les bateries es descarreguin durant el transcurs del ePrix serà menor.

Els diferents anàlisi s'han realitzat mitjançant programari informàtic, no s'ha utilitzat un túnel de vent per estudiar el perfil aerodinàmic. D'aquesta manera, es redueix la contaminació que implica haver d'utilitzar aquest dispositiu. És necessari un edifici sencer per a la seva ubicació. També porta associat un elevat consum elèctric de l'instal·lació que mou el gran ventilador amb gran potència, així com el destinat als components elèctrics i electrònics dels sistemes de mesura i el control d'altres propietats que es deuen controlar durant els assajos.

Per exemple, el túnel de vent de l'equip Ferrari Formula 1 (il·lustració 8.1) té un motor amb una potència de 2,2 MWh que una gran quantitat de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera. Les escuderies només poden utilitzar 8 setmanes el túnel amb un total de 60 hores setmanals, es a dir, una estimació d'emissió total de més de 200 mil kg de CO<sub>2</sub> per equip i temporada, depenent quin tipus de substància s'utilitzi per alimentar el motor.[13]



*Il·lustració 8.1 Túnel de vent Ferrari Formula 1*

Tot i que es consumeixen molts recursos i que el cost és molt elevat, totes les escuderies de l'àmplia majoria de competicions utilitzen els túnels de vent, bàsicament perquè no es creuen els resultats via simulació numèrica. Darrerament, la FIA ha especificat un nombre d'hores de túnel de vent que poden fer servir cada escuderia per a reduir l'impacte mediambiental.

En conclusió, l'anàlisi mitjançant CFD permet reduir i optimitzar l'ús del túnel de vent per part dels equips de competició.

## Conclusions

L'objectiu principal del present treball ha sigut investigar el comportament de la interacció fluid-perfil alar, així com fer una valoració aerodinàmica del mateix en terminis de resistència mitjançant varies simulacions numèriques CFD.

Primerament, s'ha estudiat què i com pot influir un flux sobre un aleró davanter, investigant sobre altres competicions automobilístiques i duent diferents aproximacions. Després s'ha documentat sobre la competició automobilística que se'ns ha encarregat.

En segon lloc, es defineix un domini i tipus de mallat. Un domini prou gran per a que sembli que l'aleró no té cap altre objecte al voltant, i el mallat, una elecció que optimitza el temps de simulació amb un resultat prou precisos per a l'estudi dut a terme.

S'ha d'observar com amb un angle d'atac de 0 graus obtenim el major rendiment aerodinàmic. Destacar la importància d'aquest fet, ja que cada cop es restringeix més l'ús de CFD o túnel de vent a les escuderies.

En tercer lloc, cada monoplaça s'ha d'adaptar a cada circuit. És a dir, tots els components aerodinàmics s'han de configurar segons l'ePrix que s'hagi de disputar aquell cap de setmana. A partir de les diferents simulacions que s'han dut a terme, es pot obtenir quin angle d'atac és l'idoni per a cada circuit, com per exemple en els dos casos d'estudi que s'han realitzat. Es veu com per a un circuit amb alta càrrega aerodinàmica es necessita una força de sustentació lo més gran possible en valor absolut (aquest valor sempre ha de ser negatiu). En canvi, per a un circuit amb baixa càrrega aerodinàmica es necessita una resistència d'avanç lo més petita possible però tenint en compte que la força de sustentació no pot ser positiva.

En quart lloc, destacar que és de vital importància la simulació mitjançant programari informàtic per a les escuderies. Això suposaria evitar el malbaratament de recursos com la construcció de prototips. Encara que els equips no es refiïn dels resultats obtinguts mitjançant CFD, aquest donarà una aproximació prou precisa per a poder optimitzar el prototip definitiu.

En cinquè lloc, proposar possibles projectes que es poden dur a terme. L'aleró davanter és el primer dispositiu que entra en contacte amb el vent i és l'encarregat de dirigir-lo cap a la resta del monoplaça per a que influeixi lo menys possible aerodinàmicament. Per això, caldria fer un estudi de tot el vehicle o de diferents dispositius aerodinàmics per separat, o posar en pràctica lo recollit al CPU en la pista, o si més no, assajos en un túnel de vent...



## Agraïments

Agrair al Sr. Enric Trillas Gay donar-me la idea de fer aquest projecte, m'he introduït en un esport que desconeixia, i també agrair-li la seva predisposició i ajut durant tot el projecte. També volia nomenar a un altre professor del departament, Sr. Francesc Xavier Escaler Puigoriol, gràcies a la seva ajuda en l'enteniment del software ha sigut possible aquest projecte.

També agrair als meus companys de la facultat la seva paciència per a la realització d'altres projectes acadèmics, per el material prestat per a la realització d'aquests i per tantes hores d'estudi compartides.

Especialment, vull destacar la figura dels meus pares: Miguel i Mariela, germans: Juan Miguel i Miguel i la meva parella: Aroa. Durant aquests anys m'han donat el suport, confiança i motivació per a continuar amb els meus estudis universitaris.

## Bibliografia

### Referències bibliogràfiques

- [1] ANDERSON JR., JOHN D. *Fundamentals of Aerodynamics*. Cinquena edició New York, United States of America: McGraw-Hill International, 2011, pàgina 38.
- [2] SIMON MCBEATH. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Primera edició. Sparkford, England: Ceac, 2000, pàgina 45
- [3] SIMON MCBEATH. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Primera edició. Sparkford, England: Ceac, 2000, pàgina 74
- [4] SIMON MCBEATH. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Primera edició. Sparkford, England: Ceac, 2000. pàgina 84
- [5] ANDERSON JR., JOHN D. *Fundamentals of Aerodynamics*. Cinquena edició New York, United States of America: McGraw-Hill International, 2011, pàgina 372.
- [6] ANDERSON JR., JOHN D. *Fundamentals of Aerodynamics*. Cinquena edició New York, United States of America: McGraw-Hill International, 2011, pàgina 281.
- [7] SIMON MCBEATH. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Primera edició. Sparkford, England: Ceac, 2000. pàgina 74
- [8] Formula E. Rules & Regulations [en línia]. FIA<sup>®</sup>, 17/05/2016. Disponible a <http://fiaformulae.com/en/championship/regulations/>
- [9] Verdugo Casanova, Osvaldo. *Aerodinamica para pilotos*. Primera edició. Chile, 2010 pàgina 118.
- [10] FIA<sup>®</sup>. *Guide to car. Technical Regulations* [en línia]. FIA<sup>®</sup>. 2016. Disponible a <http://www.fia.com/regulations/category/109> (24/04/2016) pàgina 46.
- [11] SIMON MCBEATH. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Primera edició. Sparkford, England: Ceac, 2000. pàgina 34
- [12] ANSYS INC. *Turbulence* [en línia]. Ansys Inc, 02/06/2016. Disponible a <http://www.ansys.com/Products/Academic/ANSYS-Student>
- [13] RENSMART. *Guidelines conversion factors*. [en línia] (30/08/2016). Disponible a

<http://www.rensmart.com/Information/Library/101006-guidelines-ghg-conversion-factors.pdf>

## Bibliografia complementària

- [14] Tutorial de Ansys: Workshop 05, Fluid Flow around the NACA 0012 airfoil
- [15] TRILLAS I GAY, ENRIC. *Aerodinàmica industrial*. Primera edició. Barcelona, Espanya: CPDA, 2007.
- [16] Pavan mehta. *Flow over an airfoil - Part 1 - Ansys Fluent 14 tutorial* [en línia]. Disponible a <https://www.youtube.com/watch?v=LAIB7qK-9pE> (28/04/2016)
- [17] Apunts de l'assignatura troncal de tercer curs de Grau en Tecnologies Industrials 'Mecànica de Fluids', Barcelona; ETSEIB-UPC 2014
- [18] Apunts de l'assignatura optativa de quart curs de Grau en Tecnologia Industrials 'Dinàmica computacional de Fluids', Barcelona; ETSEIB-UPC 2016

## Bibliografía de les imatges

- Figura 3.1 DANIEL REBOLLO. *Flujo externo* [en línia]. Universidad Nacional de San Juan. Disponible a <https://sites.google.com/site/tcmdefiunjsj/tema-7>
- Figura 3.2 PAUL CANTRELL. *Airfoil sections* [en línia]. Copters. Disponible a <http://www.copters.com/aero/airfoils.html>
- Figura 3.3 SIMON MCBEATH. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Primera edició. Sparkford, England: Ceac,2000, pàgina 46
- Figura 3.4 JUAN DE LA CUERVA. *Capa límite* [en línia]. Juan de la cuerva. Disponible a [juandelacuerva.blogspot.com.es/2008/03/capa-limite.html](http://juandelacuerva.blogspot.com.es/2008/03/capa-limite.html)
- Figura 3.5 SIMON MCBEATH. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Primera edició. Sparkford, England: Ceac,2000, pàgina 34
- Figura 3.6 Apunts de l'assignatura troncal de tercer curs de Grau en Tecnologies Industrials 'Mecànica de Fluids', Barcelona; ETSEIB-UPC 2014, tema 4
- Figura 3.7 MIGUEL ÁNGEL MUÑOZ. *Principios básicos* [en línia]. Miguel Ángel Muñoz. Disponible a <http://www.manualvuelo.com/PBV/PBV18.html>
- Figura 3.8 SIMON MCBEATH. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Primera edició. Sparkford, England: Ceac,2000, pàgina 74
- Il·lustració 4.1 FORMULA E. *Photo Galleries*. [en línia] FIA®. Disponible a <http://fiaformulae.com/en/media/photo-galleries>
- Il·lustració 4.2 FORMULA E. *Photo Galleries*. [en línia] FIA®. Disponible a <http://fiaformulae.com/en/media/photo-galleries>
- Il·lustració 4.3 FORMULA E. *Photo Galleries*. [en línia] FIA®. Disponible a <http://fiaformulae.com/en/media/photo-galleries>
- Figura 4.1 TARINGA. *El origen del efecto suelo* [en línia] Taringa. Disponible a <http://www.taringa.net/comunidades/autodeportes/7340231/0497-EI-origen-del-efecto-suelo.html>
- Il·lustració 4.4 FORMULA-E. *Formula E Technical Pix* [en línia] Formula-e.org. Disponible a <http://formula-e.org/fe-techpix.htm>

- Il·lustració 4.5 HELL MOTOR. *Jaguar reveals line-up for first Formula E campaign - Formula E*. [en línia] Hell Motor. Disponible a <http://hellmotor.com/2016/09/08/jaguar-reveals-line-up-for-first-formula-e-campaign-formula-e/>
- Il·lustració 4.6 ADRIÁN MANCEBO. *Técnica F1: ¿qué es el efecto suelo?*. [en línia] Autobild. Disponible a <http://www.autobild.es/motorsport/tecnica-f1-que-es-efecto-suelo-258303>
- Il·lustració 4.7 SUBDIVX. *Formula E: Argentina tendrá una fecha*. [en línia] Subdivx. Disponible a <http://www.subdivx.com/X12X93X171925X0X0X1X-formula-e-argentina-tendra-una-fecha.html>
- Il·lustració 4.8 CURRENT E. *All about aero* [en línia] Current E. Disponible a <http://current-e.com/features/analysis/all-about-aero/>
- Il·lustració 5.1 FORMULA E. *Photo Galleries*. [en línia] FIA<sup>®</sup>. Disponible a <http://fiaformulae.com/en/media/photo-galleries>
- Il·lustració 5.2 FORMULA E. *Photo Galleries*. [en línia] FIA<sup>®</sup>. Disponible a <http://fiaformulae.com/en/media/photo-galleries>
- Il·lustració 5.3 FORMULA E. *Photo Galleries*. [en línia] FIA<sup>®</sup>. Disponible a <http://fiaformulae.com/en/media/photo-galleries>
- Figura 6.1 Formula E. Rules & Regulations [en línia]. FIA<sup>®</sup>, 17/05/2016. Disponible a <http://fiaformulae.com/en/championship/regulations/> pàgina 46
- Figura 6.2 Formula E. Rules & Regulations [en línia]. FIA<sup>®</sup>, 17/05/2016. Disponible a <http://fiaformulae.com/en/championship/regulations/> pàgina 42
- Figura 6.7 LEAP CFD TEAM. *Tips & Tricks: Inflation Layer Meshing in ANSYS* [en línia]. Australia: Leap CFD Team, 27/07/2016. Disponible a <http://www.computationalfluidynamics.com.au/tips-tricks-inflation-layer-meshing-in-ansys/>
- Il·lustració 6.2 WIKIPEDIA. *Temporada 2015-16* [en línia]. Wikipedia, Disponible a [https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula\\_E](https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_E)
- Il·lustració 6.3 WIKIPEDIA. *Temporada 2015-16* [en línia]. Wikipedia, Disponible a [https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula\\_E](https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_E)

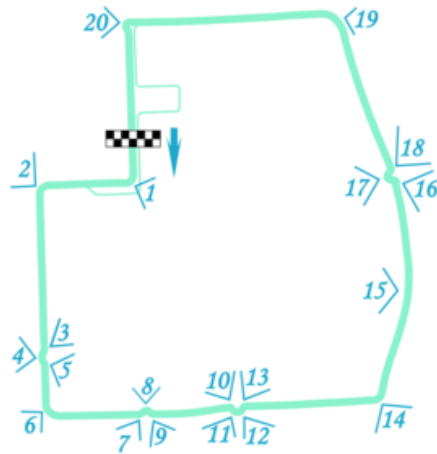
Il·lustració 8.1 JAVIER RUBIO. *¿Prohibir el túnel de viento en la Formula 1? Con la Iglesia hemos topado* [en línia]. El Confidencial Disponible a [http://www.elconfidencial.com/deportes/formula-1/2015-04-15/prohibir-el-tunel-de-viento-en-la-formula-1-con-la-iglesia-hemos-topado\\_759733/](http://www.elconfidencial.com/deportes/formula-1/2015-04-15/prohibir-el-tunel-de-viento-en-la-formula-1-con-la-iglesia-hemos-topado_759733/)

## Apèndix 1: Circuits

Tots els equips de totes les competicions han d'adaptar els seus monoplaques als diferents circuits on competiran i la Formula E no és una excepció.

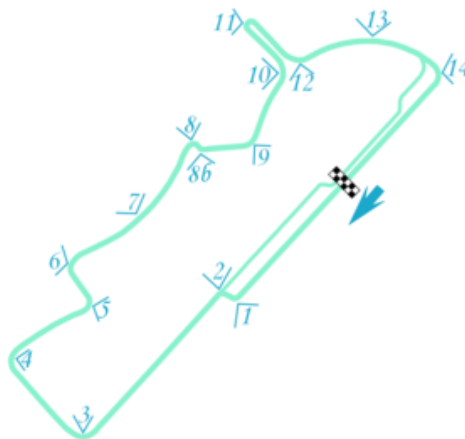
En aquest apèndix es mostrarà els circuits que hi ha dintre del mundial 2015-16.

### 1. Beijing ePrix:



Longitud: 3,44 km; Revolts: 20; Velocitat mitja: 127,3 km/h.

### 2. Putrajaya ePrix:



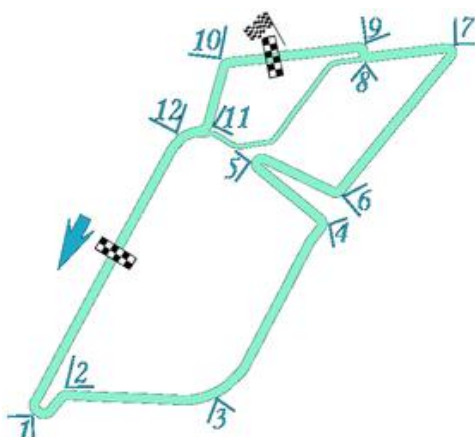
Longitud: 2,56 km; Revolts: 12; Velocitat mitja: 115,5 km/h

### 3. Punta del Este ePrix:



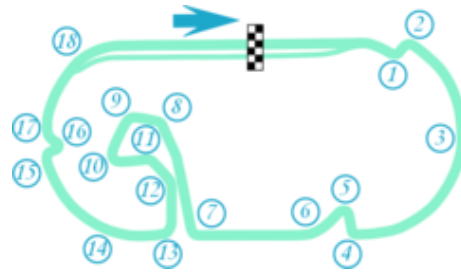
Longitud: 2,81 km; Revolts: 21; Velocitat mitja: 133,7 km/h

### 4. Buenos Aires ePrix:

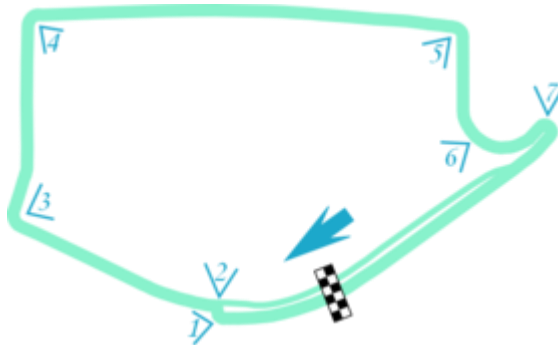


Longitud: 2,44 km; Revolts: 12; Velocitat mitja: 129,8 km/h



**5. Mexico City ePrix:**

Longitud: 2,09 km; Revolts: 18; Velocitat mitja: 118,9 km/h

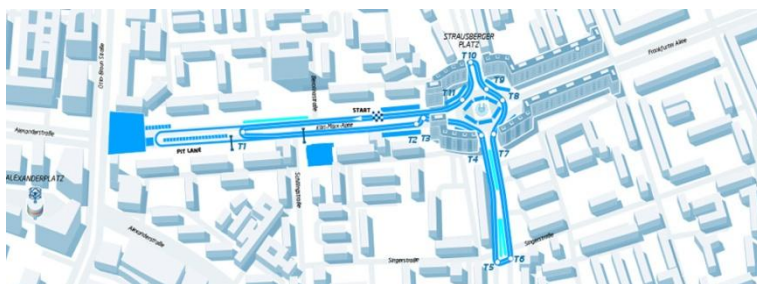
**6. Long Beach ePrix:**

Longitud: 2,10 km; Revolts: 7; Velocitat mitja: 135,1 km/h

**7. París ePrix:**

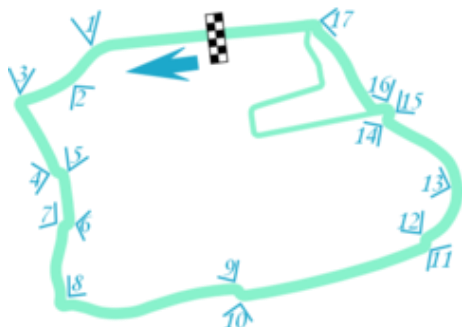
Longitud: 1,93 km; Revolts: 14; Velocitat mitja: 112,4 km/h

**8. BMW i Berlin ePrix:**



Longitud: 1,93 km; Revolts: 11; Velocitat mitja: 121,0 km/h

**9 i 10. London ePrix:**



Longitud: 2,92 km; Revolts: 17; Velocitat mitja: 128,4 km/h