

TREBALL DE FI DE CARRERA

TÍTOL DEL TFC: Estudi comparatiu de les prestacions aerodinàmiques d'un aleró d'un automòbil de competició Formula 1 (F-1)

TITULACIÓ: Enginyeria Tècnica Aeronàutica, especialitat Aeronavegació

AUTOR: Francesc Xavier Bertran Espona

DIRECTOR: Josep Ignasi Rojas Gregorio

DATA: 28 de Maig del 2009

Títol: Estudi comparatiu de les prestacions aerodinàmiques d'un aleró d'un automòbil de competició Formula 1 (F-1)

Autor: Francesc Xavier Bertran Espona

Director: Josep Ignasi Rojas Gregorio

Data: 28 de Maig del 2009

Resum

L'objectiu d'aquest projecte és estudiar com varien la sustentació, el drag, l'eficiència aerodinàmica i la distribució de pressions en un aleró d'un vehicle de Formula 1 en funció del seu acabat superficial. Partint d'aquesta base, es compara un aleró amb un acabat superficial estàndard amb un que té un acabat superficial similar al d'una pilota de golf. Es compararan les prestacions d'ambdós tipus d'alerons per mitjà dels resultats obtinguts de les simulacions en un anàlisi amb Computational Fluid Dynamics (CFD).

La idea inicial parteix d'una millora que es va introduir en les pilotes de golf: Una pilota que disposa de petites perforacions en la seva superfície assoleix majors distàncies i trajectòries més estables que una pilota la superfície de la qual és llisa.

Per poder realitzar un estudi més acurat de les variacions que experimenten les prestacions de l'aleró per la modificació de la rugositat del perfil, es variarà l'angle d'atac del perfil. Segons la denominació emprada per l'equip Jordan F1 Team, aquests angles seran, -15, 0, 15 i 25. L'últim dels valors es tracta d'un valor experimental, propi d'aquest projecte i no habitual en F1. Aquestes variacions s'obtenen a partir de la modificació de la posició relativa dels dos perfils dels que disposa l'aleró.

Per tal de realitzar el projecte s'han seguit els següents passos: mesura d'un aleró real (d'un Jordan F1 del 2002) amb un aparell de mesura tridimensional, tractament dels punts obtinguts amb programes de CAD en 3D (ProEngineer), simulació computacional per mitjà de programes CFD (Star CCM+), i una posterior comparativa entre els resultats obtinguts amb CFD.

Title: Comparative study of the aerodynamic performances from a Formula 1's car rear spoiler

Author: Francesc Xavier Bertran Espona

Director: Josep Ignasi Rojas Gregorio

Date: May, 28th 2009

Overview

The present work analyses the lift, the drag, the aerodynamics efficiency and the pressure distribution of a spoiler from a Formula 1 depending on its surface finishing. For this purpose, a comparison between a spoiler with a standard surface and a spoiler with a golf ball surface is carried on. The results of both samples are compared using simulations done by Computational Fluid Dynamics (CFD).

The main idea comes from an improvement made on the golf balls; a ball with small holes on its surface goes further and has more stable trajectories than a ball with a smooth surface.

In order to have a more accurate study of the changes suffered for the air foil depending on its rugosity, the angle of attack will be modified depending on Jordan F1 Team's denomination. Therefore, these angles will have the next measures: -15, 0, 15 and 25, where the last measure is a new value introduced in this work and not common in F1. These angle measures will be obtained by modifying the two air foils that a spoiler has.

The steps followed in this work were: tridimensional measuring of a real spoiler (used by Jordan F1 in 2002), 3D CAD analysis (ProEngineer) of the measures obtained, CFD simulation (Star CCM+) and a final analysis comparing the results from CFD.

Agraïments:

A Jose I. Rojas, director del TFC, per la seva ajuda incansable i per la seva total entrega.

A Joan Orús, en particular, i a l'equip SUNRED d'automobilisme de competició en general, per obrir les portes de les seves instal·lacions i cedir-me la sala d'ordinadors per poder fer les simulacions, i per facilitar-me els alerons del Jordan EJ12.

A Jaume Cabaní i Carles Morgado, per la seva col·laboració totalment desinteressada en la digitalització del model.

A familiars i amics, en especial a la Sara per la seva paciència en moments on els nervis han pogut més que cap altra cosa.

ÍNDEX

INTRODUCCIÓ	1
CAPÍTOL 1. CONCEPTES BÀSICS D'AERODINÀMICA.....	3
1.1 Primers passos en l'estudi de l'aerodinàmica	3
1.1.1 Teoria de la Càrrega aerodinàmica	3
1.1.2 Equació de Bernoulli.....	4
1.1.3 Equació de continuïtat	4
1.1.4 L'efecte Venturi.....	5
1.2 Perfils Alars.....	5
1.3 El perfil alar i el flux d'aire	6
1.4 Força Aerodinàmica	7
1.5 Angle d'atac del perfil i entrada en pèrdua	9
1.6 Línies de corrent.....	11
1.7 Capa Límit	11
1.8 Flux laminar, turbulent i zona de transició.....	12
1.9 Justificació aerodinàmica de la rugositat les pilotes de golf	13
CAPÍTOL 2. L'AERODINÀMICA A LA FÒRMULA 1	15
2.1 Aleró davanter i derives	16
2.2 Deflectors	17

2.3	Suspensió davantera	18
2.4	Cockpit	18
2.5	Capó motor amb apèndix.....	19
2.6	Aletes posteriors	20
2.7	Aleró posterior	21
2.8	Fons pla i difusor.....	22
CAPÍTOL 3. REPROCÉS DE LA GEOMETRIA: DIGITALITZACIÓ I MALLAT DE L'ALERÓ		25
3.1	Mesura dels punts amb màquina tridimensional.....	25
3.2	Realització de la geometria en 3D.....	28
3.3	Realització del mallat de la geometria	30
CAPÍTOL 4. DISCUSSIÓ DE RESULTATS		33
4.1	Especificació dels paràmetres escollits per a la solució.....	33
4.2	Resultats per cas 1: Inclinació -15.....	35
4.3	Resultats per cas 2: Inclinació 0°.....	39
4.4	Resultats per cas 4: Inclinació 25°.....	43
4.5	Síntesi de Resultats	46
4.5.1	Gràfiques dels resultats obtinguts.....	47
CONCLUSIONS.....		51
BIBLIOGRAFIA		53

NOMENCLATURA I ACRÒNIMS	55
ANNEX 1: TIPUS DE VEHICLES	57
1.1. Rodes cobertes	57
1.1.1. Turisme o Super turisme	57
1.1.2. Vehicles GT	57
1.1.3. Prototips, barquetes i vehicles de Le Mans	58
1.1.4. NASCAR.....	59
1.2. Rodes descobertes (Open Wheels)	59
1.2.1. Karting	59
1.2.2. Formula 3	60
1.2.3. GP2	61
ANNEX 2: SUNRED	63
ANNEX 3: MÀQUINA DE MESURA TRIDIMENSIONAL	65
ANNEX 4: INTRODUCCIÓ AL CFD	67
4.1. Què s'entén per càlcul CFD?	67
4.2. Tipus de Codis i de models	67
4.3. Quins avantatges té el CFD?	67
4.4. Quines limitacions té?	67
4.5. Quines són les fases d'un càlcul CFD?	68

INTRODUCCIÓ

El motiu pel qual es va triar aquest projecte va ser que, des de fa temps, l'autor ha sentit curiositat per comprendre quins factors influeixen en el comportament d'un vehicle de Formula 1 en relació a la seva aerodinàmica.

En la Formula 1 actual, l'aerodinàmica és una part primordial pel progrés d'un vehicle i per determinar la seva competitivitat, per tant, qualsevol millora, per petita que sigui, pot ajudar a millorar significativament el comportament en cursa del vehicle. Si s'aconsegueix disminuir la resistència s'assolirà una major velocitat punta en recta i si es millora la càrrega aerodinàmica, es millorarà el pas per corbes d'alta velocitat.

En veure un article en el que s'explicaven els principis físics que proporcionen millors prestacions a les pilotes de golf amb superfície rugosa, va sorgir la idea d'unir aquest concepte al desenvolupament de nous alerons de Formula 1.

Abans de començar directament tot el procés de simulació, en el primer capítol s'expliquen els fonaments físics que regeixen l'aerodinàmica. En el capítol dos, es pot veure, també a tall introductori, quins són els principals elements que afecten a l'aerodinàmica en un vehicle de Formula 1.

Per realitzar l'estudi s'ha partit d'un aleró posterior original d'un cotxe del 2002 de l'equip Jordan F1 Team. En concret es tracta d'un Jordan EJ12, al que se li ha realitzat un procés de mesura i digitalització per mitjà d'una màquina de mesura tridimensional.

Una vegada obtinguts tots els punts necessaris a través de la tridimensional, aquests s'han utilitzat per construir una rèplica de l'aleró per mitjà del software ProEngineer, programa de CAD que permet dibuixar superfícies a partir de punts.

Amb tot el treball de disseny ja realitzat, és el moment d'iniciar tots els passos necessaris per començar a fer el càlcul.

En el darrer capítol del treball, es pot veure què és una simulació amb CFD, els seus avantatges i inconvenients, i a continuació tota la informació obtinguda de les simulacions realitzades, així com una discussió dels resultats.

CAPÍTOL 1. CONCEPTES BÀSICS D'AERODINÀMICA

A l'automobilisme de competició, com a l'aviació, la dependència dels factors aerodinàmics és molt elevada. En ambdós casos, els principis de funcionament són els mateixos, es parteix del disseny d'unes superfícies aerodinàmiques, i es busca que aquestes proporcionin les prestacions òptimes. En el cas dels avions, per exemple, l'objectiu de disseny pot ser aconseguir una major sustentació, i en el cas automobilístic, una major downforce (o càrrega aerodinàmica), que no és res més que la sustentació negativa. S'ha de tenir en compte, però, que sobre tot element que es troba submergit en un fluid, a banda de generar-s'hi unes forces perpendiculars a la velocitat d'aquest últim, també es generen unes forces que s'oposen al moviment del cos submergit, que són el que es coneix com a resistència aerodinàmica o Drag.

Per mirar d'entendre com es poden generar totes aquestes forces, primer és necessari aclarir alguns conceptes bàsics de la dinàmica de fluids i dels principis de comportament dels perfils alars.

1.1 Primers passos en l'estudi de l'aerodinàmica

Tot i que el concepte d'aerodinàmica és recent, els efectes que es produeixen en un objecte que es troba a l'interior d'un fluid en moviment, ja s'estudiaven durant el segle 4 a.C., en concret, Aristòtil¹ va concloure que, quan un cos es movia a través de l'aire, es creava un buit que feia que el cos seguís el moviment.

Fins al cap d'uns anys però, en concret l'any 1726, no es va dur a terme un estudi més acurat sobre aquest efecte. El precursor de l'estudi fou Sir Isaac Newton que, després de molts estudis va extreure la conclusió que l'aire i l'aigua es movien com a resposta a lleis físiques similars i que aquestes forces depenien de la viscositat i de la velocitat del fluid que rodejaven l'objecte, i també de la forma i mida d'aquest. D'aquests primers conceptes va extreure una teoria anomenada Teoria de la càrrega aerodinàmica

1.1.1 Teoria de la Càrrega aerodinàmica

Segons aquesta teoria, les partícules d'aire reboten contra un cos transferint la quantitat de moviment en forma de sustentació i resistència, aquest efecte es pot observar en la Fig. 1.1. De totes maneres, aquesta teoria no tenia en compte la relació entre la pressió i el flux.

¹ Savi grec que va viure del 382 al 322 a.C. i especialista en tots els camps del coneixement

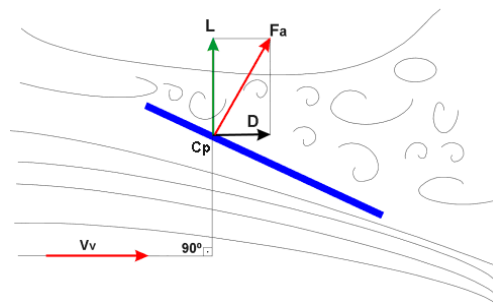


Fig. 1.1 Representació gràfica de la teoria de la càrrega aerodinàmica

1.1.2 Equació de Bernoulli

Les mancances que tenia la teoria de la càrrega aerodinàmica de Newton van portar a d'altres científics a investigar sobre aquest fet. Es diu que l'any 1738, Daniel Bernoulli, un físic italià va descobrir una relació directa entre pressió i velocitat en un llibre d'hidrodinàmica. No obstant, l'equació que dona nom a aquesta teoria, no va ser creada pel mateix Bernoulli sinó que el seu creador fou Leonhard Euler a l'any 1755.

Com es pot veure en la equació 1.1, es va poder aconseguir trobar una relació entre pressió i velocitat, per a problemes fluids que complien una sèrie de condicions o hipòtesis simplificatòries.

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = constant \quad (1.1)$$

Amb aquesta relació es pot deduir que quan la pressió augmenta, la velocitat disminueix, i a la inversa.

1.1.3 Equació de continuïtat

Una manera senzilla d'entendre el que es veu en l'equació 1.2, és que tot el flux màssic que es té a l'entrada d'un volum de control² ha de ser igual al flux màssic que s'obté a la sortida d'aquest.

$$\dot{m}_{entrada} = \dot{m}_{sortida} \quad (1.2)$$

² S'entén per volum de control aquell volum utilitzat per realitzar un estudi concret. En aquest cas es pot considerar un tub com a volum de control.

En l'anterior igualtat, \dot{m} fa referència al cabal màssic (massa que travessa una secció per unitat de temps), i alhora, que s'obté a partir de la densitat del fluid, l'àrea de la secció per on circula i la velocitat a la que ho fa. D'aquesta manera s'obté l'equació 1.3.

$$\rho A_{entrada} v_{entrada} = \rho A_{sortida} v_{sortida} \quad (1.3)$$

Si suposem que la densitat es manté constant (el fluid estudiat és incompressible), es pot eliminar de la igualtat i així s'aconsegueix relacionar de manera directa la velocitat amb la secció de pas, és a dir, sabent la velocitat d'entrada i les seccions del nostre volum de control, podem obtenir la velocitat de sortida tal i com mostra l'equació 1.4.

$$v_{sortida} = \frac{A_{entrada} v_{entrada}}{A_{sortida}} \quad (1.4)$$

1.1.4 L'efecte Venturi

L'efecte Venturi es podria considerar una combinació de l'equació de Bernoulli i de l'equació de continuïtat. El que explica aquest efecte és que, si es fa passar un fluid incompressible per l'interior d'un tub on hi ha un aprimament de secció, conforme la secció disminueix, la velocitat augmenta, (equació 1.8), i per tant, tenint en compte Bernoulli, si la velocitat augmenta, la pressió disminueix (equació 1.5).

A la Fig. 1.2 es pot veure una aplicació de l'efecte Venturi, en concret es tracta d'un carburador. El que fa aquest aparell és simple. Disposa d'un tub amb una secció menor a la meitat de la seva longitud. Al mateix temps disposa d'un orifici en aquest punt més estret que comunica amb un dipòsit de combustible. Com que la velocitat augmenta, la pressió disminueix. Aquest fet provoca un efecte de succió del combustible i aquest per efecte de la velocitat és emulsionat amb l'aire. D'aquesta manera s'obté una mescla d'aire i combustible que permet la combustió del motor. Aquesta mescla variarà depenent del diàmetre de pas del combustible.

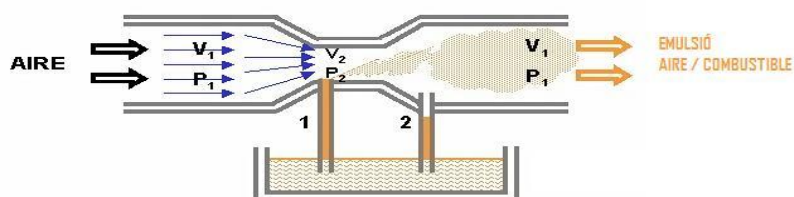


Fig. 1.2 Esquema de funcionament de l'efecte Venturi d'un carburador

1.2 Perfils Alars

Abans de començar a entendre tots els principis físics que regeixen l'aerodinàmica, es convenient definir què és un perfil alar. S'entén per perfil alar la secció d'una ala, és a dir, aquella geometria que representa el contorn d'aquesta, obtinguda per mitjà d'un tall transversal a l'envergadura. A la Fig. 1.3 es pot veure un exemple on apareixen cada una de les parts que componen un perfil.

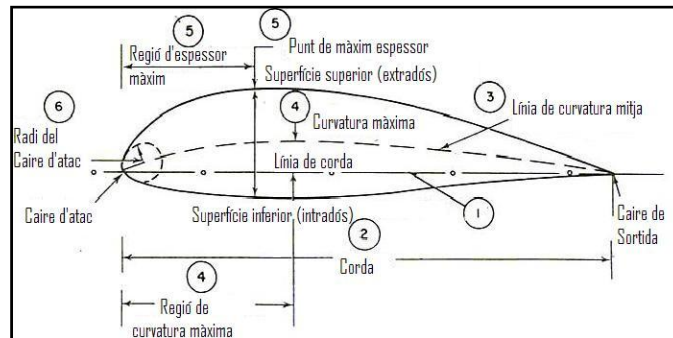


Fig. 1.3 Representació gràfica d'un perfil alar amb cada una de les seves parts

De l'anterior figura, es poden definir les parts del perfil alar com:

- **Caire d'atac:** és el caire davant de l'ala. Aquest uneix les dues superfícies de l'ala, inferior i superior, i és la primera zona de contacte del flux d'aire.
- **Caire de sortida:** és el caire posterior de l'ala. A banda de ser el punt d'unió de les dues superfícies de l'ala, és la zona on idealment el flux d'aire abandona el perfil alar. Aquest flux d'aire surt pertorbat i retorna cap al corrent lliure³.
- **Extradós:** part superior de l'ala que està compresa entre el caire d'atac i el caire de sortida.
- **Intradós:** part inferior de l'ala que està compresa entre el caire d'atac i el caire de sortida.
- **Espessor:** distància màxima entre l'intradós i l'extradós.
- **Corda:** és la línia recta imaginària que uneix el caire d'atac i el caire de sortida.
- **Línia de curvatura mitja:** és la corba que defineix el punt mig entre l'intradós i l'extradós.
- **Curvatura màxima:** és el punt on hi ha la màxima distància entre la corda i la línia de curvatura mitja.

³ S'entén per corrent lliure aquell flux d'aire que no s'ha vist pertorbat per cap element.

1.3 El perfil alar i el flux d'aire

Una vegada vistes les parts que componen un perfil alar, i els principis essencials de la mecànica de fluids, ja es pot estudiar com afecta un flux d'aire al perfil en qüestió. En moure's un flux d'aire entorn d'un perfil alar, es produeixen un conjunt de fenòmens. A la Fig. 1.4, es pot veure que aquests fenòmens fan que sobre el perfil es generin unes forces perpendiculars al corrent lliure (veure apartat 1.4), unes altres forces d'oposició al moviment, i uns moments vinculats a aquestes forces, i alhora, provoqui un seguit de perturbacions en el flux que està travessant.

Quan el perfil es troba immers a la corrent d'aire, la forma d'aquest causa una variació de la curvatura de les línies de corrent del flux. A l'extradós, les línies s'ajunten, per tant, la secció de pas del fluid es redueix. El que això provoca és un augment de la velocitat, i per tant, una disminució de la pressió de l'extradós (veure apartat 1.1.4). Per contra, a l'intradós, es produeix el fet contrari, és a dir, una disminució de la velocitat lligada a un augment de la pressió.

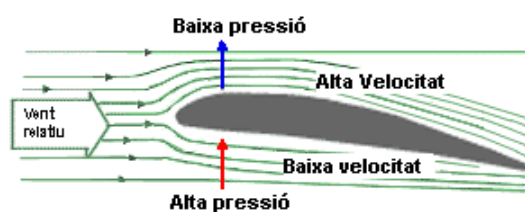


Fig. 1.4 Representació d'un perfil alar a través d'un flux d'aire

1.4 Força Aerodinàmica

La força aerodinàmica com es pot observar a la Fig. 1.5, es pot descomposar en dues components, la sustentació o Lift, que és la component perpendicular al vent relatiu, i la Resistència aerodinàmica o Drag que és paral·lela al vent relatiu, però de sentit contrari al moviment del vehicle.

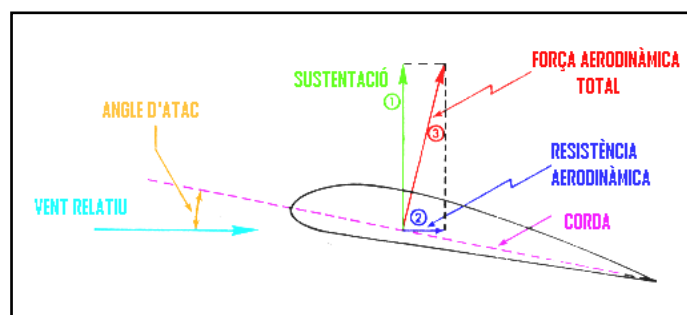


Fig. 1.5 Representació de la descomposició de la Força aerodinàmica

Aquestes forces varien segons dos paràmetres principals en un mateix perfil. Un és la velocitat, ja que a major velocitat, majors seran les reaccions generades per l'ala, i l'altre és l'angle d'atac (veure apartat 1.5). Alhora, cal tenir en compte també la densitat de l'aire, que en el cas de l'aviació és significatiu però durant el transcurs d'un gran premi de Formula 1 es pot considerar constant.

Tant per calcular el Lift com el Drag, s'ha de tenir en compte la pressió dinàmica. Aquesta es coneix com a dinàmica perquè varia en funció de la densitat i de la velocitat de manera que es pot calcular seguint l'expressió 1.5.

$$q = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \quad (1.5)$$

Al mateix temps, cal tenir en compte que les forces varien en funció del perfil. Per poder contemplar aquest fet, existeixen el que es coneix com a coeficients. Aquests, són característics de cada perfil, i per tant, seran molt útils a l'hora de dissenyar un aleró.

Tenint en compte tots els conceptes anteriors (pressió dinàmica, superfície de l'ala i coeficients del perfil), el següent model aplica pel càlcul del Lift (equació 1.6).

$$L = q \cdot S \cdot C_l = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot C_l \quad (1.6)$$

Partint de les mateixes bases que en el cas del Lift, també es pot obtenir un model pel càlcul del Drag. En aquest cas però, la Resistència es divideix en dues components, resistència paràsita i resistència induïda, i per tant, apareixen dos coeficients. La suma de les dues components ens donarà com a resultant la Resistència total .

A l'hora d'estudiar l'efecte de la resistència paràsita sobre un cos, es poden fer dues diferenciacions: la resistència de fricció i la resistència de pressió, forma o estela. Aquesta segona és molt important en l'estudi de l'aerodinàmica al sector automobilístic. En el cas dels avions, serà de gran importància la resistència de fricció. Aquesta, es deu a les components tangencials als diferencials de superfície dels esforços que el fluid exerceix sobre l'ala, i té el seu origen en la fricció entre l'ala i el flux degut a la viscositat d'aquest. Aquest factor esdevé tant important en els avions degut a l'esveltesa dels fusellatges (l'àrea frontal d'un avió és molt reduïda en relació a la seva representació en planta), i a que presenten una gran superfície mullada pel fluid.

Pel cas automobilístic, la resistència de fricció perd importància en front de la resistència de pressió. Aquesta es deu a les components normals als diferencials de superfície per la distribució de pressions sobre l'ala, i que també depèn de l'àrea frontal i del tamany de l'estela. A causa de les grans dimensions de l'area fronal envers la longitud del vehicle, la resistència que apareix degut a les pressions generades pel fluid en moure's entorn del cos són molt grans.

La resistència induïda prové dels vòrtex de punta d'ala que s'originen degut a la major pressió a l'intradós que a l'extradós. Aquesta variació de pressions fa que part del flux d'aire de l'intradós tendeixi a redirigir-se cap a l'extradós. Aquest fenomen requereix que l'avió proporcioni una energia extra al fluid, que es pot interpretar en forma d'una nova resistència.

El Drag es pot calcular a partir de l'equació 1.7.

$$D = q \cdot S \cdot C_d = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot S \cdot (C_{do} + C_{di}) \quad (1.7)$$

A la Fig. 1.6 es pot veure una comparativa de com evolucionen els coeficients de Resistència, Sustentació i l'eficiència aerodinàmica (ratio entre Sustentació i Resistència) en funció de l'angle d'atac.

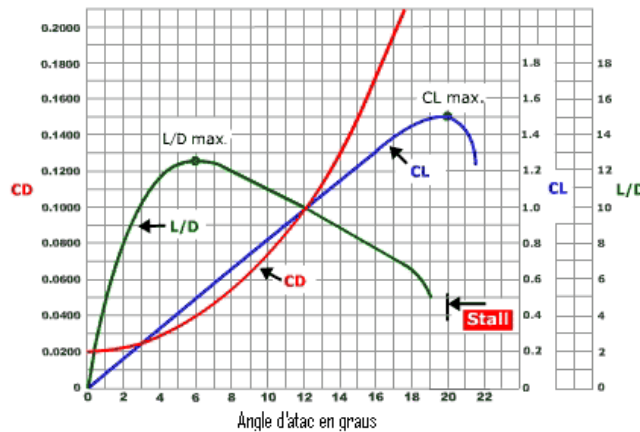


Fig. 1.6 Coeficients de sustentació i de resistència, i l'eficiència aerodinàmica (ratio entre Sustentació i Resistència) en funció de l'angle d'atac

En l'estudi d'un aleró de Formula 1, tenim dues variables que esdevenen constants en referència a una aeronau. Aquests són, com ja s'ha comentat, la densitat i l'altra és la superfície alar.

1.5 Angle d'atac del perfil i entrada en pèrdua

L'angle d'atac del perfil és l'angle que forma la corda del perfil amb el vector velocitat aerodinàmica, és a dir, l'angle entre la corda del perfil i la direcció de la corrent lliure. Es pot veure gràficament a la Fig. 1.7.

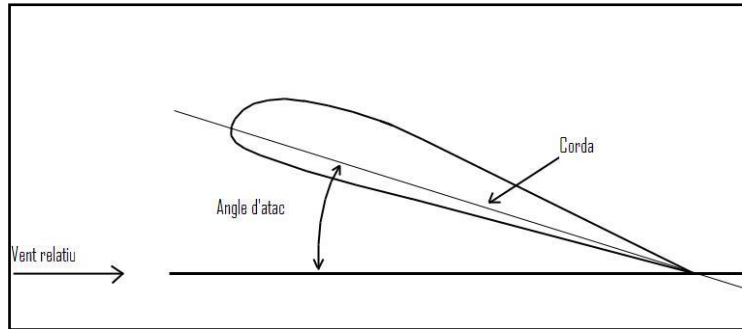


Fig. 1.7 Representació de l'angle d'atac del perfil

A mesura que l'angle d'atac augmenta, les forces generades també ho fan. Tot i que a priori aquest concepte sembla senzill cal introduir una variant a aquesta teoria. Es cert que a major angle d'atac majors reaccions però, com en tot, també existeix un límit i en aquest punt, s'anul·len els esforços.

A Fig. 1.8 es pot apreciar aquest fet en un gràfic on es veu com varia el coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac.

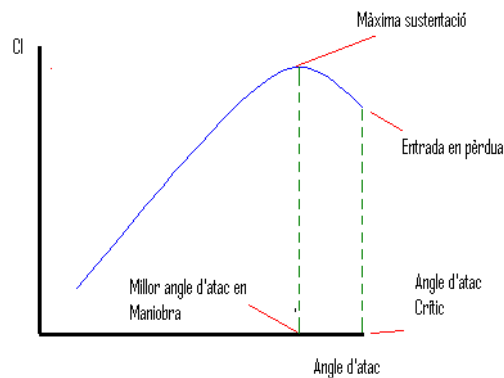


Fig. 1.8 Gràfic del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac

En un avió, l'entrada en pèrdua suposa que aquest deixa de generar sustentació, i per tant, pot suposar un perill per a la integritat dels seus ocupants.

Aquest fenomen tant important en un avió, no sembla que pugui afectar en un cotxe, però en un vehicle on les seves prestacions van estretament lligades a les càrregues aerodinàmiques, pot ser molt perillós. D'aquest efecte se'n pot veure un exemple a la Fig. 1.9 on Ernesto Viso, pilot de la GP2 va perdre l'aleró davanter degut a un impacte amb un del altres competidors.



Fig. 1.9 Imatge de l'accident d'Ernesto Viso durant la cursa disputada a Magny-Course

1.6 Línies de corrent

S'entén per línia de corrent o stream line aquella línia imaginària que a cada instant és tangent en cadascun dels seus punts al vector velocitat de la partícula fluïda que ocupa el punt corresponent.

Cal dir que la trajectòria o path simplement es tracta del camí que segueix una partícula al llarg del camp fluid.

El fluid pot ser estacionari (llavors les línies de corrent i les trajectòries coincideixen), o bé no estacionari, que significa que els paràmetres de velocitat, pressió i densitat varien en funció del temps. Això es pot produir en l'estela d'un cos. A la Fig. 1.10 es pot veure un exemple de fluid estacionari, a l'esquerra, i de fluid no estacionari, a la dreta de la imatge.



Fig. 1.10 Representació de línies de corrent. A l'esquerra línies estacionàries d'un flux laminar i a la dreta trajectòria no estacionària d'un flux turbulent

1.7 Capa Límit

En relació directa amb les línies de corrent apareix el concepte de capa límit. Dins d'aquesta petita capa és on tenen lloc una part important dels fenòmens que condueixen a la generació de les forces aerodinàmiques.

L'aire viatja a una certa velocitat i, a l'inici del moviment al voltant de l'ala, l'aire que està immediatament en contacte passa a tenir velocitat nul·la per la condició d'adherència. A mesura que ens allunyem del perfil, la velocitat del fluid va augmentant fins que a una certa distància s'assoleix la velocitat de la corrent lliure. Es considera que la frontera de la capa límit es troba on s'assoleix el 95% de la velocitat del corrent lliure. A la Fig. 1.11 es pot veure un gràfic de la capa límit.

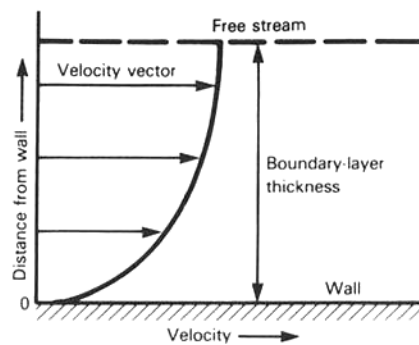


Fig. 1.11 Gràfic de la Capa Límit

1.8 Flux laminar, turbulent i zona de transició

En el procés de desprendiment de la capa límit, el flux passa de laminar a turbulent. Aquest pas no es fa de manera instantània, i per tant, entremig existeix el que es coneix com a zona de transició. A continuació a la Fig. 1.12 es pot veure una representació esquemàtica de les tres zones.

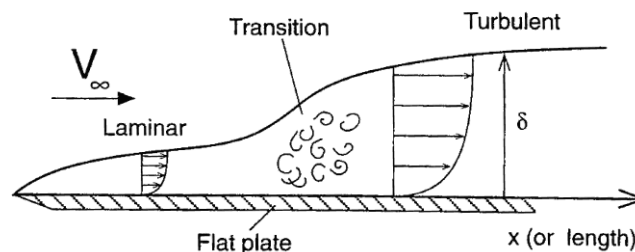


Fig. 1.12 Representació de les zones des de flux laminar a flux turbulent

Per poder esbrinar si un flux és laminar, turbulent o es troba en la zona de transició, existeix el que es coneix com el nombre de Reynolds. Aquest s'obté a partir de l'equació 1.8.

$$RN = \frac{V \cdot \rho \cdot C}{\mu} \quad (1.8)$$

En aquest cas μ representa el coeficient absolut de viscositat, V la velocitat i C la distància del caire d'atac fins al punt on volem avaluar el nombre de Reynolds.

Per tal de poder discriminar en quina zona ens trobem, existeix una relació entre RN i la zona en qüestió. Si RN és inferior a 2000, es pot considerar que es treballa amb flux laminar. Si RN està comprès entre 2000 i 10000, llavors es treballa en la zona de transició. Si RN està per sobre de 10000, el flux serà turbulent.

1.9 Justificació aerodinàmica de la rugositat les pilotes de golf

En relació amb l'apartat anterior apareix el concepte de capa límit turbulenta, que és el que permet que les pilotes de golf amb superfície rugosa arribin a distàncies més grans, i de forma més estable, que les de superfície llisa. El que s'aconsegueix a les pilotes de superfície rugosa, es forçar que la capa límit sigui turbulenta. Aquesta resisteix millor el gradient de pressió advers que la capa límit laminar, pròpia de les de superfície llisa, i llavors la corrent es desprèn més tard, com es pot apreciar a la Fig. 1.13. Així l'estela és més petita, i la resistència de pressió o d'estela, que és la dominant a les pilotes de golf, també és més petita. Per forçar que la capa límit sigui turbulenta, el que fan les cavitats, a les seves cantonades, és produir el desprendiment de la capa límit laminar, que es readhereix com a turbulenta després d'una petita recirculació del fluid, que es situa darrera de la cantonada de la cavitat.

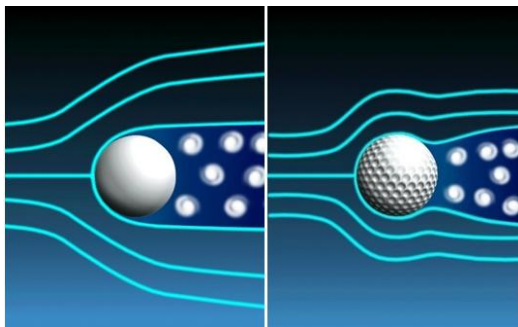


Fig. 1.13 Representació d'un fluid entorn d'una pilota llisa, a l'esquerra, i d'una de rugosa, a la dreta.

CAPÍTOL 2. L'AERODINÀMICA A LA FÒRMULA 1

A la Formula 1, totes les millores tecnològiques que s'apliquen són de vital importància, tot i així, on els equips poden millorar més les prestacions del seu vehicle és en l'apartat aerodinàmic.

Com s'ha vist en apartats anteriors, hi ha dues forces molt importants a tenir en compte, una és la càrrega aerodinàmica i l'altra la resistència. Per tant, si es vol obtenir un cotxe amb bones prestacions aerodinàmiques, el que es buscarà serà maximitzar la càrrega però al mateix temps minimitzant la resistència.

Per a què un cotxe sigui el màxim d'estable possible, s'ha d'aconseguir una distribució el màxim d'uniforme possible de les seves càrregues. A tall d'exemple, a la Fig. 2.1 es pot veure una aproximació del repartiment de càrrega aerodinàmica d'un Formula 1. Tot i que la càrrega frontal és un 5% major, s'ha de tenir en compte que aquest tipus de vehicles porten el motor a la part posterior, i per tant, la càrrega en estàtic sobre l'eix del darrera es quelcom major.

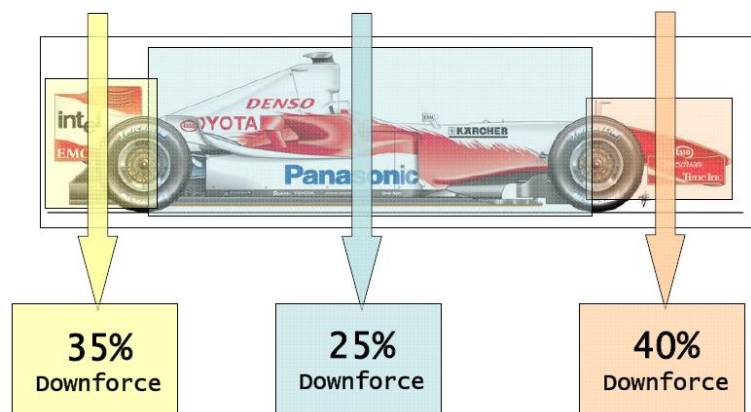


Fig. 2.1 Representació del repartiment de càrrega aerodinàmica

Aplicant aquesta teoria, a la Fig. 2.2 es pot observar quina és la càrrega sobre cada un dels quatre pneumàtics. En el cas del vehicle de l'esquerra, els valors que apareixen fan referència al repartiment del pes del vehicle en estàtic, i a la dreta, es pot veure com es reparteix la càrrega aerodinàmica. En el segon cas, no es té en compte el pes en estàtic, per tant, si es fa una suma dels valors per cada roda, es pot veure que cada pneumàtic suporta la mateixa càrrega total. Aquest fet és el que es coneix com a repartiment de pes simètric o bé 50-50, en referència a que cada eix suporta el 50% de la càrrega total.

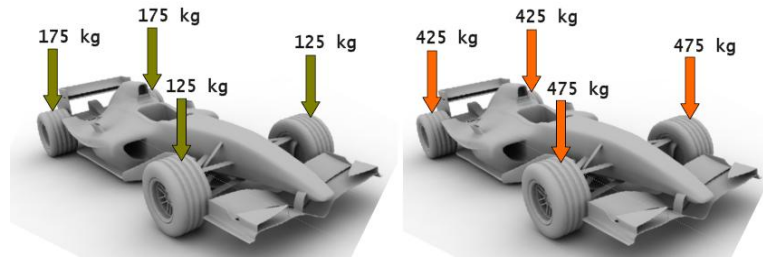


Fig. 2.2 Representació de les càrregues que suporta cada pneumàtic, a l'esquerra en estàtic, a la dreta únicament càrrega aerodinàmica

Per poder generar totes aquestes forces en cada punt concret del vehicle, existeixen un conjunt d'elements aerodinàmics repartits per tot el cotxe. Tot i que n'hi ha que poden semblar insignificants, tots tenen un grau elevat d'importància, ja sigui per generar sustentació com per redirigir el flux.

2.1 Aleró davanter i derives

De tot el vehicle, l'aleró davanter és el més sensible a les variacions del flux. Al ser la primera part del vehicle que es veu envoltada pel fluid, fa que sigui molt important el seu disseny ja que és l'encarregat de generar el 40% de la càrrega aerodinàmica total. A banda de la força generada, també és molt important dirigir bé el flux de sortida d'aquest element ja que d'aquest fet dependrà que la resta d'apèndixs aerodinàmics treballin correctament.

Per ajudar a redirigir aquest flux, apareix el concepte de derives. Si s'observa la Fig. 2.3, les derives són les plaques verticals que hi ha als extrems dels alerons. Aquestes ajuden a evitar recirculacions d'aire de d'intradós a l'extradós, i per tant, a reduir la intensitat dels vòrtexs de punta d'ala, i per tant, reduir la resistència induïda. A part d'aquests efectes, també contribueixen a la desviació del flux, per tal d'evitar que aquest incideixi directament sobre els pneumàtics, d'aquesta manera es disminueix el drag generat ja que les rodes generen pràcticament la meitat de la resistència.



Fig. 2.3 Aleró davanter del Jordan F1 2002

En l'actual campionat, es dóna llibertat al pilot per variar l'angle d'atac en 6° , tres positius i tres de negatius. Aquest fet pot ajudar a facilitar l'avançament ja que pot disminuir l'efecte de l'estela turbulenta generada pel cotxe del davant.

2.2 Deflectors

Els deflectors són els encarregats de recollir l'aire provinent de la part inferior del xassís i del morro per tal de generar una major càrrega. Al mateix temps, ajuden a redirigir l'aire cap als pontons⁴ per tal de generar major down force. També contribueixen a millorar el rendiment de l'aleró davanter ja que encaminen l'aire de baixa pressió d'aquest i així eviten la sustentació, per tant, també milloren la càrrega aerodinàmica.

Tot i les millores que aporta aquest element, s'ha d'anar en compte amb les seves dimensions. Si es dissenya un deflector massa gran, evita que el flux d'aire penetri en les entrades d'aire dels radiadors, i per tant, pot comportar greus problemes de temperatura, i fins i tot, arribar a provocar el trencament del motor.

Com es pot veure a la Fig. 2.4, a la part posterior, la secció del deflector va disminuint. Aquesta variació es duu a terme per tal d'evitar els problemes de refrigeració esmentats anteriorment.

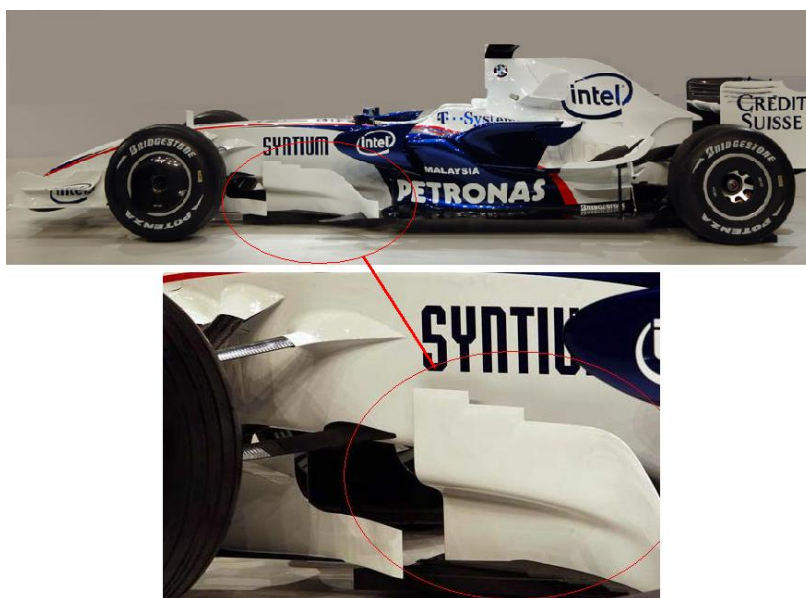


Fig. 2.4 Deflector del BMW Sauber F1.07

⁴ Els pontons són els elements que fan de canalització d'aire dels radiadors. Al mateix temps aporten càrrega aerodinàmica.

2.3 Suspensió davantera

Amb les tecnologies de fabricació actuals, els triangles de suspensió dels cotxes de Formula 1 es fabriquen amb compòsits, en concret, en fibra de carboni. Aquest fet ha permès que es tingui una major llibertat a l'hora de desenvolupar aquest elements ja que es poden reproduir gran quantitat de geometries.

Tot i que per normativa està prohibit que les suspensions generin down force, aquestes ajuden a redirigir el flux d'aire que surt de l'aleró davanter (veure Fig. 2.5). D'aquesta manera, l'aire que arriba als pontons és molt més net, i per tant, s'aconsegueix extreure'n el màxim de profit.

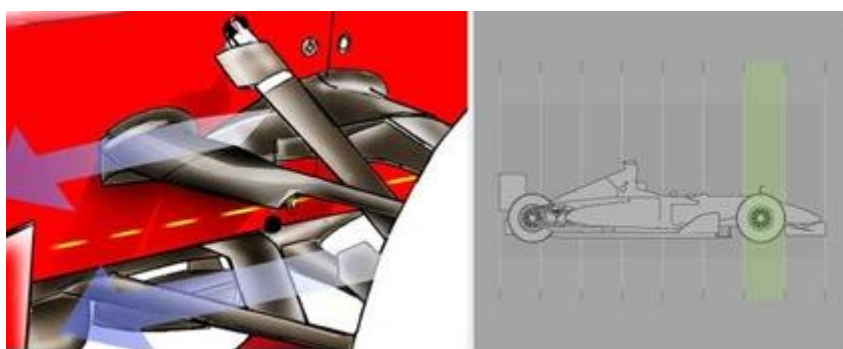


Fig. 2.5 Triangles de suspensió del Toyota TF1.07

2.4 Cockpit

El cockpit és la part del vehicle que fa d'habitable al pilot, per tant, a banda de resoldre les necessitats aerodinàmiques, també caldrà tenir en compte necessitats ergonòmiques.

Segons el punt de vista del pilot, es dissenyaria un cockpit quelcom més espaiós i sobretot, més alt. Si s'analitza això, ràpidament es pot observar que la comoditat del pilot empitjora l'aerodinàmica. A major amplada i alçada, major àrea frontal, per tant, major resistència.

Un altre aspecte important a l'hora de dissenyar el cockpit és l'alçada al terra. Aquest factor és de vital importància de cara a no comprometre la dinàmica del vehicle. A major alçada, més alt serà el centre de masses, i per tant, els moments generats en el pas per corba seran majors, és a dir, la transferència de pesos serà més lenta i el cotxe serà menys reactiu, més lent.

A la Fig. 2.6 es pot veure com és un cockpit (part esquerra de la figura) i quina és la posició del pilot en el seu interior (a la dreta). Com es pot apreciar, es busca que el pilot estigui el màxim de baix possible per tal que la seva massa sigui el màxim de propera al terra.



Fig. 2.6 A l'esquerra, cockpit del Ferrari F60, a la dreta, Giancarlo Fisichela a l'interior del cockpit del Toyota TF1.07

2.5 Capó motor amb apèndixs

El capó motor te dues funcions principals, la primera és millorar l'aerodinàmica i la segona, millorar la refrigeració del motor.

A l'hora de desenvolupar un capó, el que es busca és aconseguir que el flux d'aire que va de la meitat del cotxe cap al darrera, arribi el màxim de laminar possible a l'aleró del darrera. Per aconseguir això, s'afegeixen el que es coneix com apèndixs aerodinàmics de capó o bé ales centrals. Aquestes ales (Fig. 2.7), tal i com passa amb les suspensions, no generen càrrega però sí que ajuden i molt, en estabilitzar el flux d'aire. D'aquesta manera s'aconsegueix un flux pràcticament laminar al caire d'atac de l'aleró posterior.

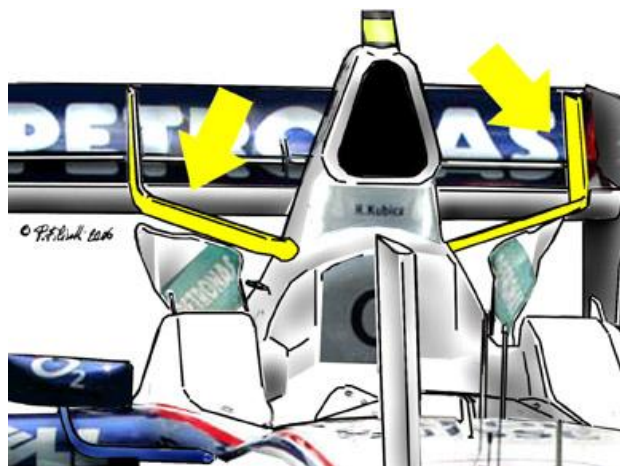


Fig. 2.7 De color groc, ales centrals del BMW F1.06

A banda del apèndixs, el capó motor també inclou les reixes de ventilació, també conegudes com a brànquies de tauró degut a la seva forma tal i com s'aprecia a la Fig. 2.8. Aquestes milloren la refrigeració dels radiadors sense comprometre l'aerodinàmica del conjunt.



Fig. 2.8 A la part inferior dreta de la imatge es poden veure les reixes de refrigeració

2.6 Aletes posteriors

Aquests elements aerodinàmics permeten generar càrrega sobre l'eix posterior, i alhora ajuden a dirigir el flux cap a l'aleró posterior evitant en gran part, la influència negativa de les rodes del darrera. A la Fig. 2.9 es pot apreciar la forma d'una d'aquestes aletes.



Fig. 2.9 Aletes posteriors del Ferrari F2004

2.7 Aleró posterior

L'aleró posterior és l'encarregat de generar la majoria de la càrrega aerodinàmica de l'eix posterior. La configuració d'aquest tipus d'alerons es coneix com a configuració multi element ja que està format per més d'una ala.

Actualment només n'hi de doble ala però anteriorment al 2004, n'hi havia de triples. El que s'aconsegueix amb aquesta configuració és que s'aconsegueixen majors combinacions d'angles d'atac, i per tant, es poden obtenir posades a punt dels cotxes molt més acurades.

Per poder configurar l'angle d'atac dels perfils, s'ha de tenir en compte com és el circuit on s'ha de rodar. Dintre de tots els traçats, es pot fer una divisió de tres grans grups:

- *Circuits amb rectes llargues i corbes de baixa velocitat:* en aquest tipus de traçat, es buscarà una càrrega aerodinàmica mínima, angles d'atac petits, ja que el que es vol és assolir velocitats elevades, per tant, es necessita disminuir la resistència. Al mateix temps, com que les corbes es fan a baixa velocitat, el pas per corba depèn únicament de les prestacions dinàmiques del vehicle i de l'adherència del pneumàtic.
- *Circuits amb corbes d'alta velocitat:* en aquests circuits serà necessari que el vehicle tingui una adherència alta en el moment de traçar el revolt. Per aconseguir això, el que es fa és donar un angle d'atac gran per assolir càrregues aerodinàmiques majors. Amb això s'aconsegueix que el cotxe tingui una major adherència perquè s'augmenta la component normal del vehicle, per tant, la força que suporta el pneumàtic abans de començar a perdre adherència serà molt major. Es poden assolir forces que quatre vegades superiors a les que generaria el vehicle si no tingués elements aerodinàmics.
- *Circuits mixtes:* aquest traçats disposen de rectes llargues i alhora corbes d'alta velocitat. En aquest cas s'haurà de buscar un compromís entre velocitat punta i velocitat de pas per corba. Normalment, dependrà de la dinàmica de cada vehicle, d'aquesta manera, es pot veure que vehicles amb configuracions aerodinàmiques similars es comporten de manera diferent en funció del sector de circuit en el que es troben.

A la Fig. 2.10 es pot observar un aleró posterior vist des del lateral. En la imatge s'aprecien un conjunt d'orificis que són els que permeten fer les variacions dels angles d'atac dels perfils.

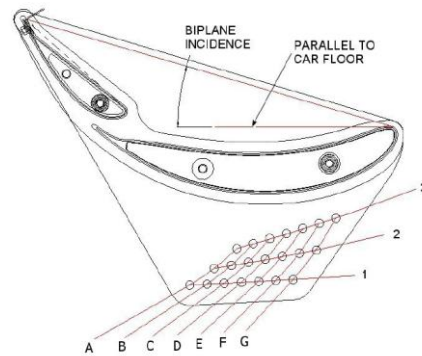


Fig. 2.10 Aleró posterior d'un vehicle de Formula 1.

2.8 Fons pla i difusor

Tot i que aquests dos elements passen desapercebuts, són els encarregats de generar al voltant del 15% de la càrrega aerodinàmica.

El fons pla ajuda a canalitzar l'aire per la part inferior del vehicle. Aquest té una inclinació entre un i dos graus respecte el terra, i a la part del darrera, part més elevada, s'uneix al difusor. El fons pla, fa que una superfície totalment irregular, es converteixi en una superfície llisa, i per tant, el flux d'aire llisca sense trobar pràcticament oposició. Tot i que s'anomena fons pla, si s'observa la Fig. 2.11 es pot apreciar que aquest, té una forma irregular, on apareix una cavitat a la part central.

El difusor, per la seva banda és una prolongació del fons pla que el que fa, és augmentar l'àrea de pas del flux provinent del fons pla. En l'actualitat n'hi ha de tres tipus, que són, el difusor simple, el doble, i recentment s'està introduint el triple difusor.

Si s'aplica la teoria que s'explica a l'Efecte Venturi (Veure apartat 1.1.4), el que provoquen els canvis de secció a causa del fons pla i el difusor, és que el flux augmenti la seva velocitat, com a conseqüència, la pressió disminueix, i per tant, es crea una força de succió a la part inferior del vehicle que contribuirà a augmentar la càrrega aerodinàmica.

A la Fig. 2.11 es pot veure un conjunt de fons pla i difusor d'un dels Red Bull F1 Team. El que es veu a la part central del vehicle, de color marró, és una làmina de fusta. La funció d'aquesta fusta és la de certificar que els vehicles respecten l'alçada mínima⁵ que marca la normativa.

⁵ Tots els vehicles han de tenir una alçada mínima segons el reglament. El que es fa amb aquesta fusta és mesurar el gruix inicial i una vegada finalitzada la cursa es torna a mesurar. Si el desgast ha estat superior a l'estipulat per normativa, el vehicle és desqualificat.



Fig. 2.11 Fons pla del Red Bull RB3

CAPÍTOL 3. REPROCÉS DE LA GEOMETRIA: DIGITALITZACIÓ I MALLAT DE L'ALERÓ

3.1 Mesura dels punts amb màquina tridimensional⁶

Per iniciar el projecte es va partir d'un aleró d'un automòbil Jordan de Formula 1 que es pot apreciar a la Fig. 3.1, cedit per SUNRED⁷ per tal de poder fer la digitalització del seu perfil.



Fig. 3.1 Imatge de l'aleró Jordan F1 del 2002

La digitalització de l'aleró es va realitzar amb una mesuradora tridimensional cedida pel Centre Tecnològic Eduard Soler que molt amablement va obrir les seves portes per col·laborar amb el projecte. Es pot veure l'aleró posicionat⁸ per iniciar el procediment de digitalització amb la tridimensional a la Fig. 3.2.

⁶ A l'ANNEX es pot veure una explicació sobre aquest aparell de mesura

⁷ A l'ANNEX es pot veure una explicació de l'escuderia SUNRED

⁸ Com s'observa a la part inferior de la imatge l'aleró frontal no va poder ser mesurat per problemes de capacitat del banc de mesura.



Fig. 3.2 Imatge de la tridimensional en el moment de realitzar una de les mesures

Es poden veure els valors obtinguts de la mesura a la Taula 3.1.

Taula 3.1 Resultats obtinguts de la mesura amb la tridimensional

Perfil Gran - Cara Superior (Intradós)			Perfil Gran - Cara Inferior (Extradós)		
1r Perfil ⁹			1r Perfil		
x	y	z	x	y	z
159,57	87,97	434,98	195,11	88,00	384,00
162,55	87,96	384,00	198,33	88,00	334,00
166,07	87,96	334,00	193,45	88,00	284,00
166,23	87,96	284,00	180,79	88,00	234,00
163,16	87,96	234,00	156,07	88,00	184,00
148,55	87,95	184,00	129,15	88,00	154,00
2n Perfil			5è Perfil		
159,58	187,97	434,98	194,95	488,00	384,00
162,57	187,97	384,00	198,13	488,00	334,00
166,08	187,97	334,00	193,33	488,00	284,00
166,22	187,98	283,00	181,49	488,00	234,00
163,41	187,98	234,00	158,65	488,00	184,00
149,42	187,98	184,00	134,72	488,00	154,00
3r Perfil					
159,57	287,97	434,98			
162,58	287,97	384,00			
166,11	287,97	334,00			
166,26	287,97	283,99			
163,58	287,97	234,00			
150,13	287,97	183,98			
4t Perfil					
159,57	387,97	434,98			
162,60	387,97	384,00			
166,13	387,97	334,00			
166,28	387,97	284,00			
163,71	387,97	234,00			
150,65	387,97	184,00			
5è Perfil					
159,57	487,97	434,98			
162,60	487,97	384,00			
166,14	487,97	334,00			
166,30	487,97	284,00			
163,76	487,97	233,99			
150,86	487,97	184,00			

⁹ Es van mesurar 5 perfils de l'aleró per tal de determinar si es tractava d'una distribució de perfils constant o hi havia alguna variació. Aquestes mesures es van fer a 88 mm i a partir d'aquest punt, cada 100 mm.

3.2 Realització de la geometria en 3D

Per realitzar la geometria es va partir dels punts obtinguts en la tridimensional. Els punts es van introduir en forma de taula en el software CAD ProEngineer, Fig. 3.3, i a partir d'aquests es va realitzar un perfil, que va ser extruït per tal d'obtenir la geometria 3D.



Fig. 3.3 Representació gràfica del núvol de punts

A partir del núvol de punts es generen els perfils corresponents tal i com es pot apreciar a la Fig. 3.4.

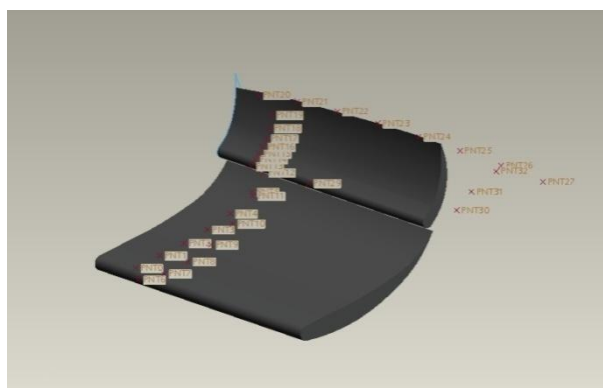


Fig. 3.4 Perfil 3D generat a partir del núvol de punts

Realitzats els perfils, es procedeix a dibuixar els laterals, realitzar la simetria i deixar l'aleró finalitzat (veure Fig. 3.5), per procedir al mallat.

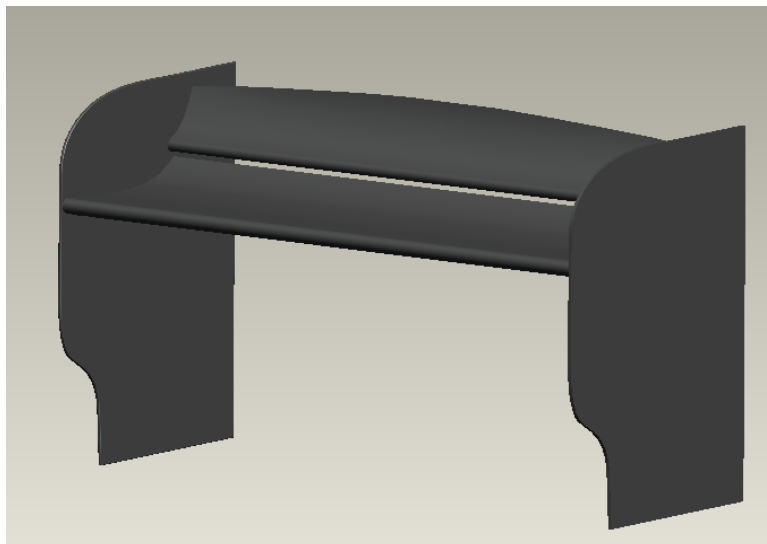


Fig. 3.5 Geometria de l'aleró original (Aleró 1) en CAD

Un cop acabat el disseny original es procedeix a realitzar una modificació en l'acabat superficial. La finalitat és la de fer un estudi comparatiu entre un aleró convencional i un que disposi d'un acabat superficial similar al d'una pilota de golf, tal i com es pot veure a la Fig. 3.6.

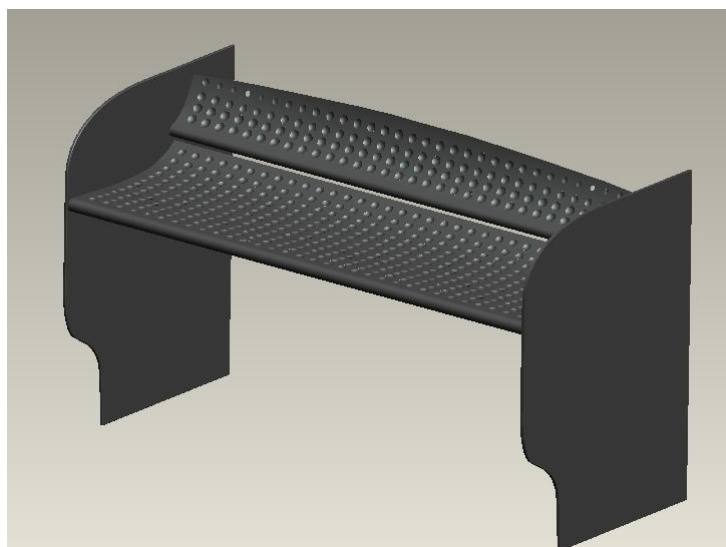


Fig. 3.6 Geometria de l'aleró amb acabat superficial modificat (Aleró 2)

3.3 Realització del mallat de la geometria

Existeixen un ampli ventall de softwares de Computational Fluid Dynamics (CFD¹⁰), però en aquest cas s'ha decidit utilitzar-ne un que permet mallar, simular i posteriorment, extreure els resultats. Aquest programa es coneix amb el nom de STAR CCM+.

Per poder realitzar l'estudi CFD, el primer pas que s'ha de dur a terme és el que es coneix com a mallat de la geometria. Aquest procés divideix la geometria en un conjunt de tetraedres¹¹ i nodes¹². Per entendre millor aquest concepte es pot observar la Fig. 3.7 que mostra la malla d'un dels alerons estudiats.

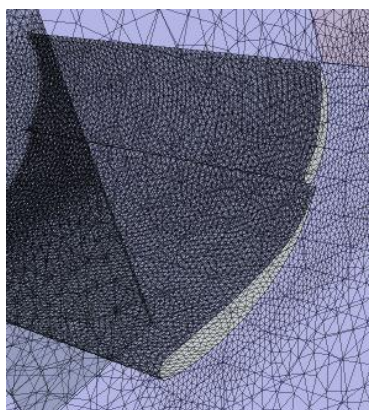


Fig. 3.7 Imatge d'un cos mallat extreta de STAR CCM+

Per aconseguir una malla amb la màxima qualitat possible, els passos a seguir són els següents:

1. Importar la geometria: per importar la geometria, aquesta ha d'estar en un format que STAR CCM+ pugui llegir. En aquest cas s'ha optat pel format IGES¹³. El que fa aquest format és exportar la geometria per cares, per tant, se li ha de dir al software que agafi cada cara com a frontera de la nostra geometria i que cada regió, és a dir, cada component, com a un sol cos (One boundary per face, one region per body)
2. Una vegada obtinguda la geometria, clicar sobre Regions a l'arbre de funcions i seleccionar el BODY que apareix. Es desplega un nou arbre on apareixen les fronteres (boundaries) i dins d'aquestes cada una de les cares que formen la frontera.
3. Per poder escollir a què pertany cada cara, s'ha de seleccionar la boundary amb el botó dret del ratolí i escollir la opció Split by patch.

¹⁰ Veure introducció a l'annex

¹¹ Figura geomètrica de quatre cares

¹² Punts que delimiten la frontera entre la geometria i l'espai que ocupa el fluid

¹³ Initial Graphics Exchange Specification

4. Una vegada seleccionada la superfície, se li dóna el nom que es vol i se li diu crear. Es crea una superfície de la qual es pot escollir posteriorment les seves propietats, per exemple la que representa la zona INLET del túnel. A la Figura 3.8 es pot apreciar com queda la geometria a estudiar després d'haver rebut aquest tractament. En concret, a la part esquerra de la figura es veu l'arbre del model on hi apareixen els noms següents:
- Inlet: zona per on entra el flux d'aire a la cambra d'assaig
 - Outlet: secció de sortida del flux d'aire.
 - Simetry plane: el programa permet calcular les prestacions de l'aleró assajant només amb la meitat de la geometria. Per poder aconseguir això, s'ha de donar la propietat de pla de simetria a la cara pertinent.
 - Walls: s'ha de tractar a les parets de la cambra d'assaig com a wall. A més a més, per evitar pèrdues per fricció en les parets, s'ha de donar la propietat de slip (lliscant)
 - A banda d'aquestes propietats, en el cas que s'estudiïn vehicles complets, el programa permet donar velocitat de rotació a les rodes i velocitat lineal a la superfície que representa el terra. D'aquesta manera s'aconsegueixen resultats més propers a la realitat.
5. Com que el què es busca és estudiar l'aleró a l'interior d'un túnel de vent, s'ha de realitzar una malla més fina (mida dels tetraedres menor) a tota la zona que envolta l'aleró, i per la resta del túnel, es realitzarà un mallat menys refinat. Al fer aquest distinció s'aconsegueix no sobrecarregar el processador i la memòria de l'ordinador, i alhora, permet afinar més els resultats. Aquesta opció el programa la denomina Volume Shape. A la Fig. 3.8 es pot apreciar un d'aquests volums.

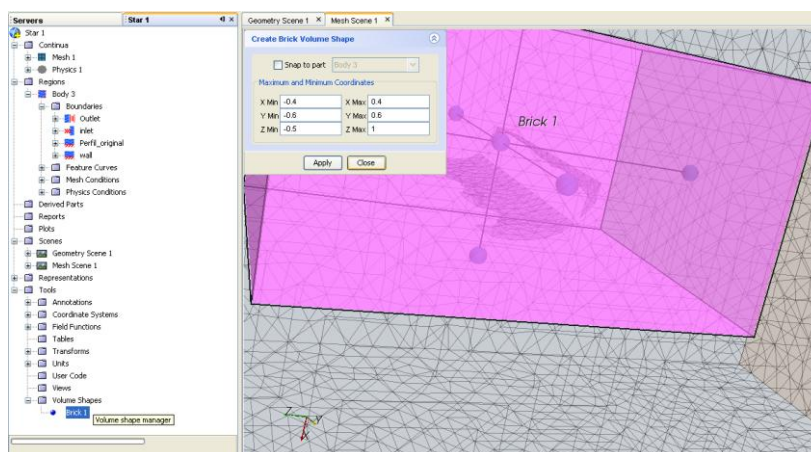


Fig. 3.8 Imatge d'un volume shape extreta de STAR CCM+

6. Una vegada es tenen totes les superfícies i volums definits, s'han de donar les propietats del mallat. En primer lloc s'han de seleccionar els models de mallat. En el cas d'aquest estudi s'han escollit les opcions

Surface Remesher¹⁴ i Tetrahedral Mesher¹⁵. Pel que fa a la mida de referència¹⁶ dels tetraedres, s'ha utilitzat un mida inicial de 0.4 m, amb una mida relativa de tetraedre del 20% i una mida relativa d'aresta del 10%. Aquest valors s'apliquen a tot el túnel, la única excepció es troba a l'interior del volum shape. En aquest volum la mida relativa serà d'un 1.8%. D'aquesta manera s'ha aconseguit reproduir a la perfecció la superfície de l'Aleró 2.

A la Fig. 3.9 s'aprecia la diferència entre una malla incorrecta, a l'esquerra, i una malla correcta, a la dreta.

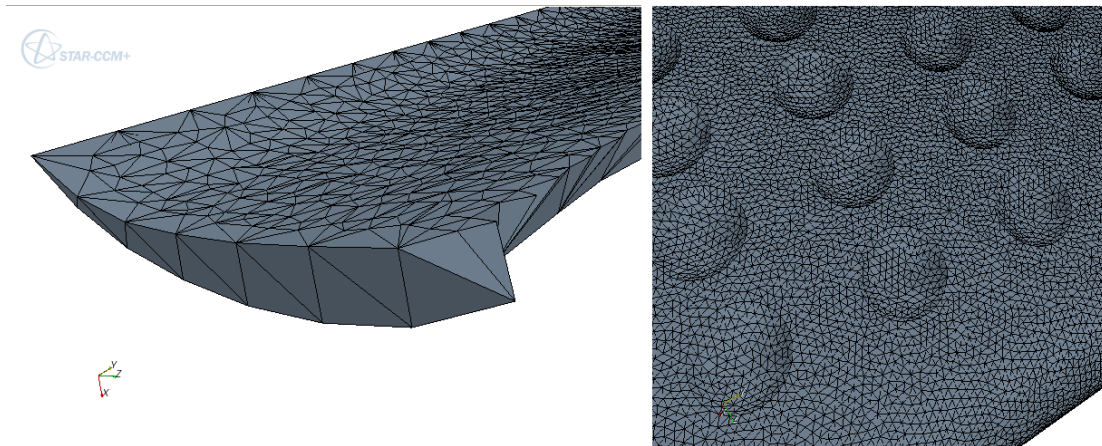


Fig. 3.9 Comparativa d'una malla incorrecta i una correcta de STAR CCM+

¹⁴ Realitza un remallat de la superfície abans d'iniciar el mallat volumètric

¹⁵ Utilitza tetraedres per realitzar el mallat geomètric.

¹⁶ La mida de referència és la que utilitza el software per determinar la mida màxima a partir de la que inicia el mallat. El mallat es realitza en sentit decreixent, inicia per mesura de referència i la redueix fins que s'aconsegueix una malla correcta.

CAPÍTOL 4. DISCUSSIÓ DE RESULTATS

4.1 Especificació dels paràmetres escollits per a la solució

En aquest capítol es presenten tots els resultats obtinguts per mitjà de les simulacions CFD amb el programa STAR CCM+.

Els paràmetres utilitzats per aquest càlcul són els següents:

- Velocitat d'entrada: 39 m/s (140,4 Km/h). S'ha escollit aquesta velocitat perquè és la que els equips d'automobilisme de competició utilitzen habitualment a les seves simulacions.
- Pressió: 101325 Pa. S'ha escollit aquesta pressió perquè és la pressió a nivell del mar per a l'International Standard Atmosphere (ISA).
- Model de resolució d'equacions Segregat: es tracta d'una resolució de les equacions de Navier-Stokes de manera seqüencial i implícita. El que fa el software és iterar les equacions fins que les solucions convergeixen.
- Fluid tridimensional: per poder estudiar el fluid en les tres components cartesianes
- Estacionari
- Densitat constant: es considera constant per dos motius. En primer lloc, el número de Mach de l'estudi és de 0,115, i per tant ens trobem en el règim subsònic baix, on el fluid es pot considerar incompressible. En segon lloc, les variacions d'alçada i de temperatura en les extensions ocupades pel circuit d'un gran premi es poden considerar inapreciables.
- Flux turbulent: es tindrà en compte que el flux pot esdevenir turbulent.
- Especificació de turbulència K-epsilon: aquest model utilitza com a base del càlcul l'energia cinètica turbulent i el ratio de dissipació turbulenta. Degut a la turbulència, hi ha un increment del transport de quantitat de moviment i del transport de calor en direccions normals a la superfície o normals a la component més gran de la velocitat del flux, respecte del cas de flux laminar. Aquest model introdueix la quantitat de moviment i transport de calor deguts a la turbulència.

A partir d'aquest criteris s'han generat els càlculs fins que s'ha observat que els residuals s'estabilitzaven per sota de 1×10^{-5} . A la Fig. 4.1 es pot observar, a tall d'exemple, un gràfic del càlcul d'iteracions on es pot apreciar la convergència de les solucions.

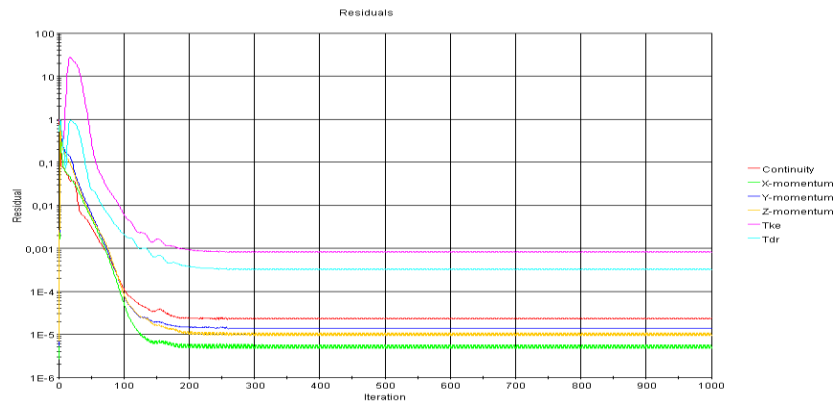


Fig. 4.1 Representació de la convergència de solucions

De tota la informació generada pel software es tindrà en compte la pressió estàtica i la velocitat en el pla de simetria de l'aleró i alhora, la sustentació i resistència aerodinàmica generades per cada aleró.

A l'hora d'escollir quin dels dos alerons és l'òptim per cada cas, els criteris de selecció han estat els següents:

- Inclinatoria -15° : s'escollirà aquell aleró que aporti una menor resistència aerodinàmica ja que, aquesta configuració està pensada per assolir la major punta de velocitat possible. En cas que els valors siguin molt similars s'estudiaran les eficiències de cada un i, si tot i així no és possible determinar quin dels dos es millor, es farà un estudi qualitatiu de l'estela generada.
- Inclinatoria 0° : per aquesta configuració, es busca un compromís entre Down Force i Drag que permeti aconseguir velocitats de pas per corba elevades. En aquest cas concret s'estudiarà quina és l'eficiència de cada un dels perfils però també tenint en compte quines són les forces generades.
- Inclinatoria 15° : al tractar-se de la configuració de càrrega màxima, es tindrà en compte quin és el Down Force generat. Al necessitar gran càrrega aerodinàmica, la resistència no és tant important, tot i així, també es tindrà en compte per fer l'elecció.
- Inclinatoria 25° : com que es tracta d'un cas que en realitat no s'utilitza en el Jordan EJ12, es farà un estudi de totes les forces generades. Teòricament, hauria de ser un perfil per a càrregues molt altes, per tant, els criteris de selecció han de ser similars als de la inclinació 15° .

4.2 Resultats per cas 1: Inclinació -15

La inclinació -15° , igual que la resta, estan referenciades a partir de la inclinació 0° . Es considera inclinació 0° a la posició de configuració estàndard on l'ala inferior, té una inclinació de 0° respecte el pla horitzontal (0° respecte del vent relatiu), i l'ala superior, està també a 0° però en aquest cas respecte del flux d'aire que evacua l'ala inferior¹⁷. Així doncs, per assolir la inclinació -15 de l'aleró del Jordan EJ12, s'ha de mantenir l'ala principal en la posició original i variar la inclinació de l'ala superior en -15° respecte la posició inicial. Per fer aquesta variació, l'aleró diposa d'un seguit d'orificis situats a les derives laterals que permete regular la inclinació, en funció de l'orifici escollit (veure Fig. 2.10). A continuació es poden veure les representacions gràfiques dels resultats obtinguts. En primer lloc, es compara la pressió estàtica en el pla de simetria pel cas de l'Aleró 1, Fig. 4.2, amb la de l'Aleró 2, Fig. 4.3.

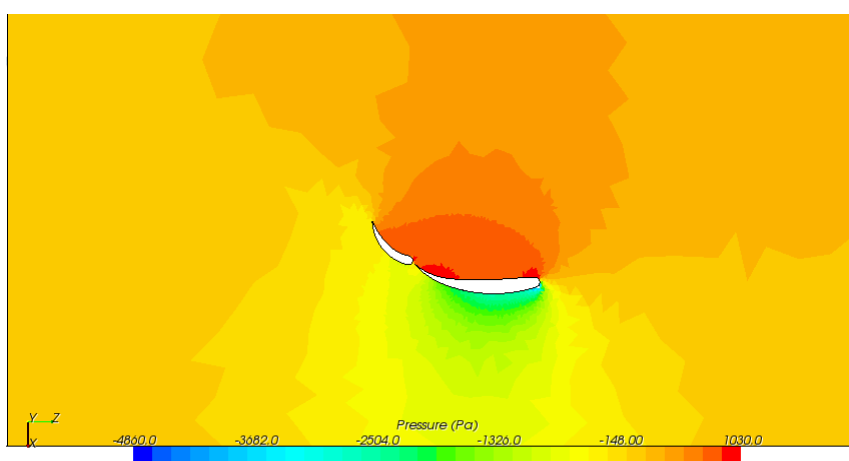


Fig. 4.2 Camp de pressió de l'Aleró 1 amb inclinació -15°

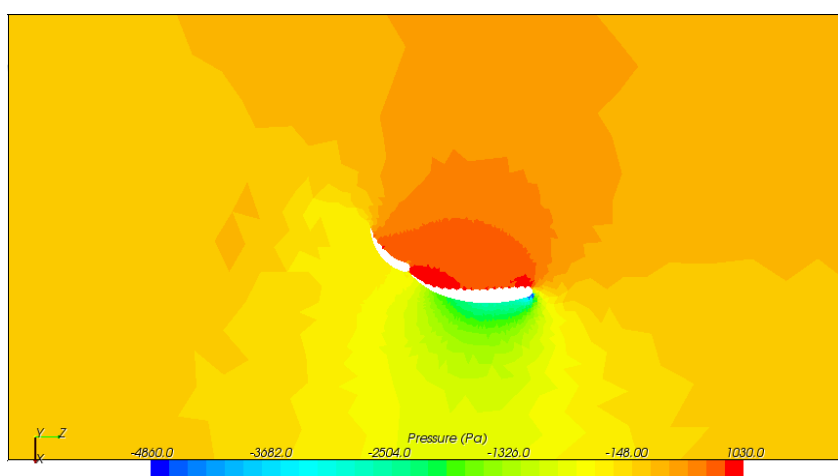


Fig. 4.3 Camp de pressió de l'Aleró 2 amb inclinació -15°

¹⁷ En tractar-se d'un aleró real, es presurosa que la inclinació 0° de l'ala superior va ser correctament determinada per l'equip Jordan de F1.

A continuació cal estudiar com es comporta la velocitat del fluid, per fer-ho cal observar quins són els resultats obtinguts a les Fig. 4.4 i Fig. 4.5.

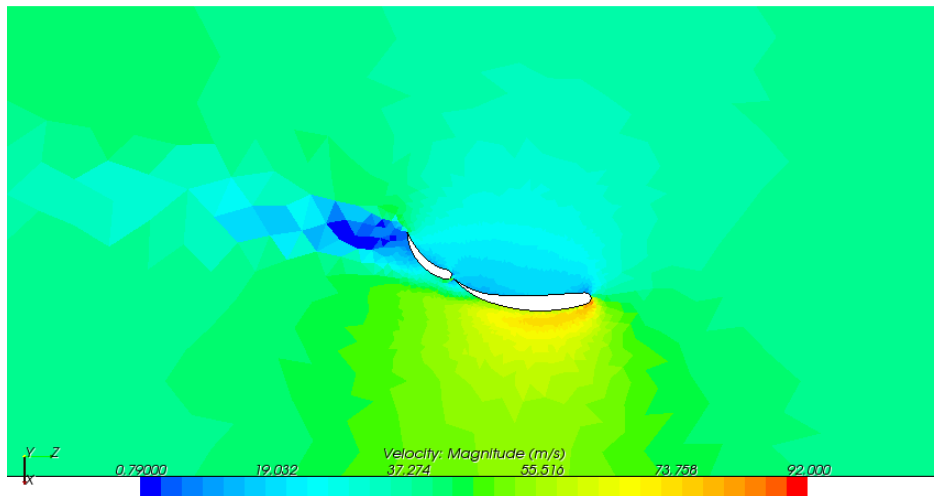


Fig. 4.4 Camp de velocitats de l'Aleró 1 amb inclinació -15°

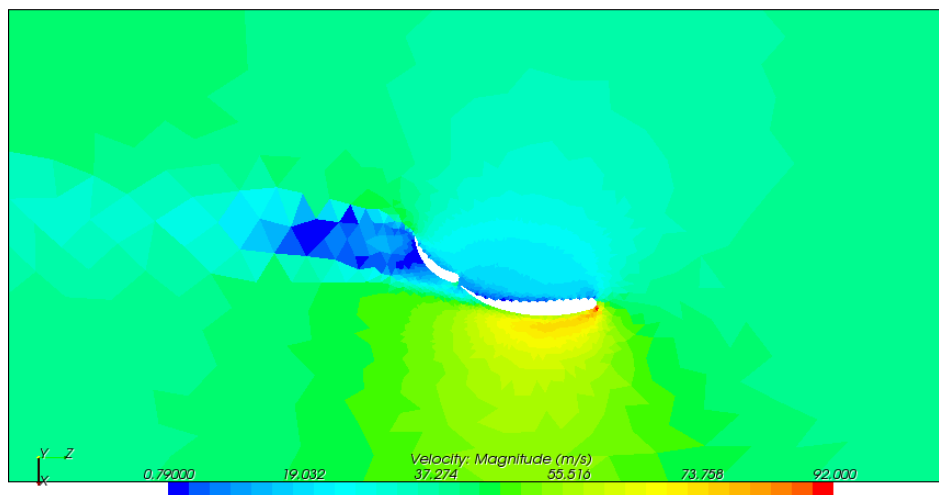


Fig. 4.5 Camp de velocitats de l'Aleró 2 amb inclinació -15°

Observant les imatges del camp de velocitats, es pot observar que l'estela de l'Aleró 2 és més gran, per tant, es podria esperar un valor de la resistència de pressió més gran. El punt de desprendiment sembla estar posicionat de forma molt similar a ambdós alerons.

Cal veure si aquestes conclusions extretes es corresponen amb els valors obtinguts de la simulació. A la Taula 4.1 es pot veure quins són els coeficients obtinguts per la inclinació -15° .

Taula 4.1 Coeficients extrets de la simulació per un angle de -15°

	C_d	C_l	Eficiència
Aleró 1	0,15	0,94	6,27
Aleró 2	0,15	0,95	6,33

La variació que hi ha entre un i altre coeficient de sustentació no és molt significativa. En aquest cas es podria optar per utilitzar l'Aleró 2 ja que amb aquesta configuració es busca la màxima velocitat, per tant, al ser més eficient, podria aportar millors prestacions.

Degut a que els resultats obtinguts són molt similars per ambdós alerons, s'ha cregut convenient fer una simulació adicional variant la velocitat, per veure si això afecta als coeficients. Com que la configuració -15° està pensada per traçats on la velocitat punta és molt important, la nova simulació s'ha realitzat amb velocitat de 90 m/s. Els resultats d'aquesta simulació es poden veure a la Taula 4.2.

Taula 4.2 Coeficients extrets de la simulació per inclinació -15 i velocitat 90 m/s

	C_d	C_l	Eficiència
Aleró 1	0,15	0,96	6,4
Aleró 2	0,15	0,96	6,4

Com es pot observar en els resultats obtinguts, la velocitat del flux no afecta al coeficient de sustentació, com era d'esperar, ja que, tot i que varien amb el nombre de Reynolds i el nombre Mach, en el rang de velocitats a què es desplaça un cotxe o un avió, la variació és quasi imperceptible. Així doncs, es continua considerant que l'Aleró 2 és el més adequat d'acord amb el criteri definit per a aquesta inclinació.

Per poder fer una elecció entre un dels dos, caldrà veure quina és l'estela generada. Al tractar-se de l'aleró posterior, les turbulències generades no afectaran a cap altre element aerodinàmic del nostre vehicle. Per tant, amb els mateixos coeficients per ambdós alerons, el que interessarà serà perjudicar a la resta de competidors que tenim al darrera. Una manera d'aconseguir-ho serà deixant una estela molt turbulenta, de forma que al vehicle perseguidor li arribi un flux molt brut. Així les seves prestacions aerodinàmiques es veuran significativament perjudicades.

Observant les imatges d'energia cinètica turbulenta per aquesta inclinació i velocitat, (Fig. 4.6 i Fig. 4.7) es pot veure que l'estela generada per l'Aleró 2 és més intensa, per tant, per aquesta configuració, es considerarà l'Aleró 2 com a òptim, d'acord amb el que s'ha explicat al paràgraf anterior.

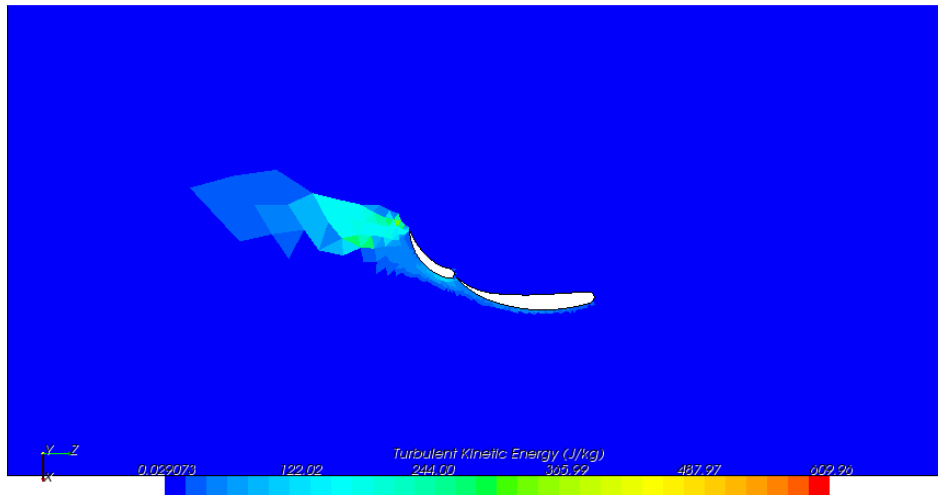


Fig. 4.6 Energia cinètica turbulenta a l'Aleró 1, inclinació -15° i velocitat 90 m/s

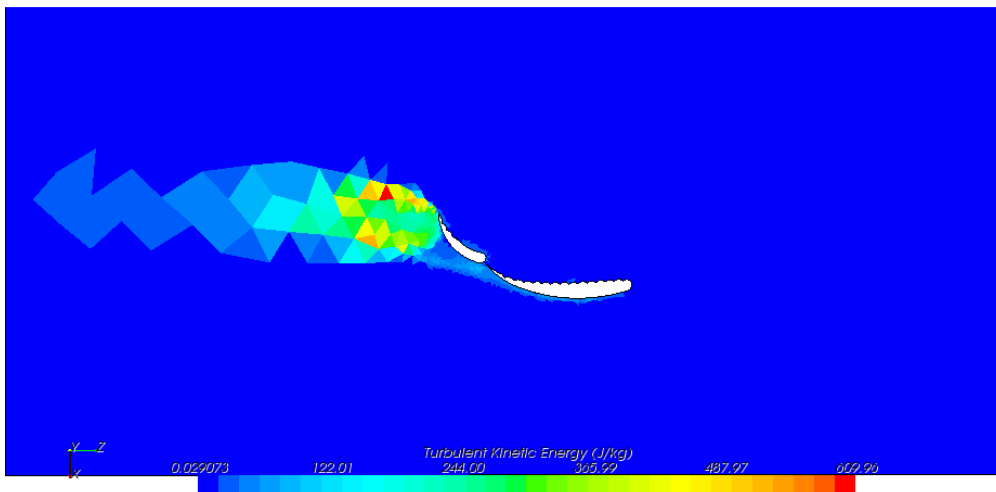


Fig. 4.7 Energia cinètica turbulenta a l'Aleró 2, inclinació -15° i velocitat 90 m/s

4.3 Resultats per cas 2: Inclinació 0°

A la Fig. 4.8 es pot observar com actua la pressió del fluid en el perfil. Com en el cas anterior (inclinació -15°) apareix una distribució d'altres pressions força constant a l'intradós, i de baixes pressions a l'extradós. La pressió estàtica a l'Aleró 2 es pot veure a la Fig. 4.9.

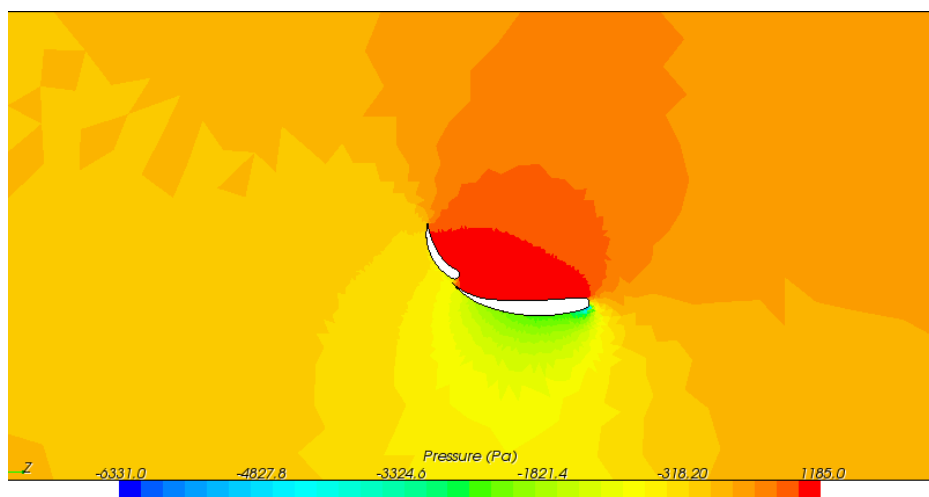


Fig. 4.8 Camp de pressió de l'Aleró 1 amb inclinació 0°

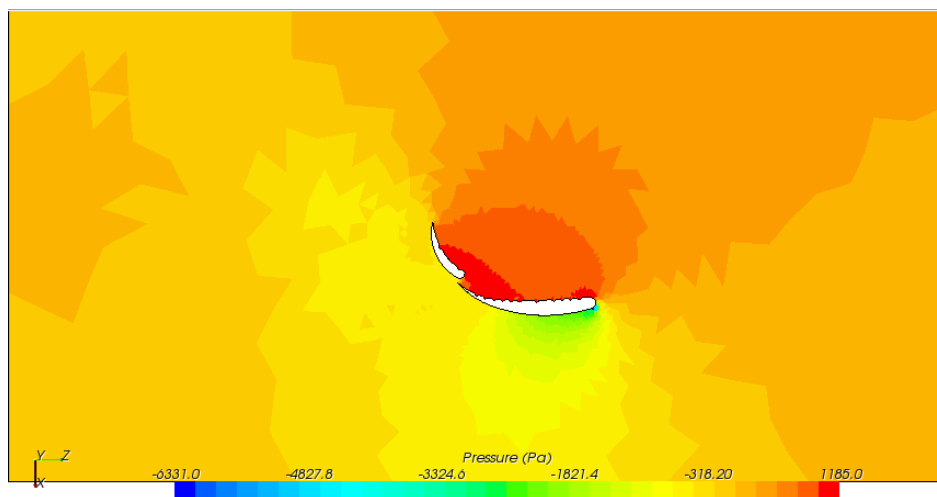


Fig. 4.9 Camp de pressió de l'Aleró 2 amb inclinació 0°

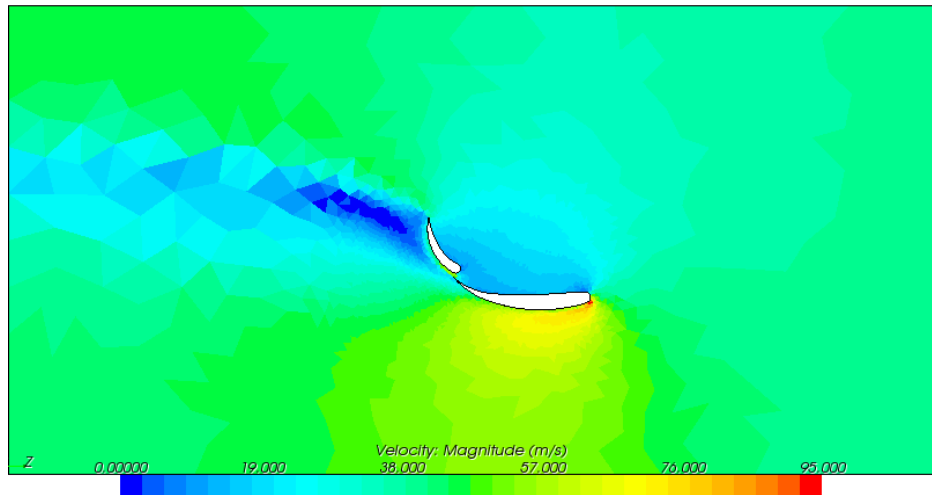


Fig. 4.10 Camp de velocitats de l'Aleró 1 amb inclinació 0°

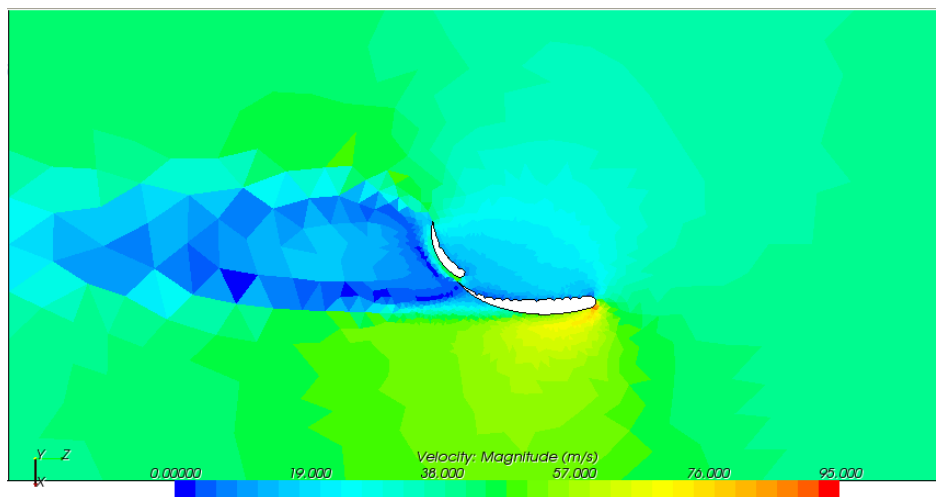


Fig. 4.11 Camp de velocitats de l'Aleró 2 amb inclinació 0°

Mirant el camp de velocitats (Fig. 4.10), es repeteixen les mides relatives en les esteles pels alerons amb inclinació -15° , però ara sembla que el punt de desprendiment s'avança a l'aleró 2, per la qual cosa es podria esperar una caiguda de la sustentació.

Si ara s'analitzen els valor obtinguts a partir de la simulació, apareixen els coeficients que es troben a la Taula 4.3.

Taula 4.3 Coeficients extrets de la simulació per un angle de 0°

	C_d	C_l	Eficiència
Aleró 1	0,21	0,97	4,61
Aleró 2	0,21	0,91	4,33

A diferència del cas anterior, amb inclinació 0° sí que es nota una variació significativa entre l'Aleró 1 i l'Aleró 2. Tot i que el coeficient de resistència es manté igual pels dos alerons, el coeficient de sustentació sí que varia. En el cas de l'Aleró 1, aquest coeficient augmenta, mentre que per l'Aleró 2, s'observa una disminució.

Així doncs, per una inclinació de 0° , l'Aleró 1 és comporta de manera més eficient, i alhora, permet obtenir una major càrrega. Per tant, és el més adequat d'acord amb el criteri definit per a aquesta inclinació

4.4 Resultats per cas 3: Inclinació 15°

Per tal d'aconseguir la configuració de 15° , es necessari variar l'angle d'atac d'ambdós perfils. Aquesta es considera la configuració de càrrega màxima per les especificacions de disseny del Jordan EJ12.

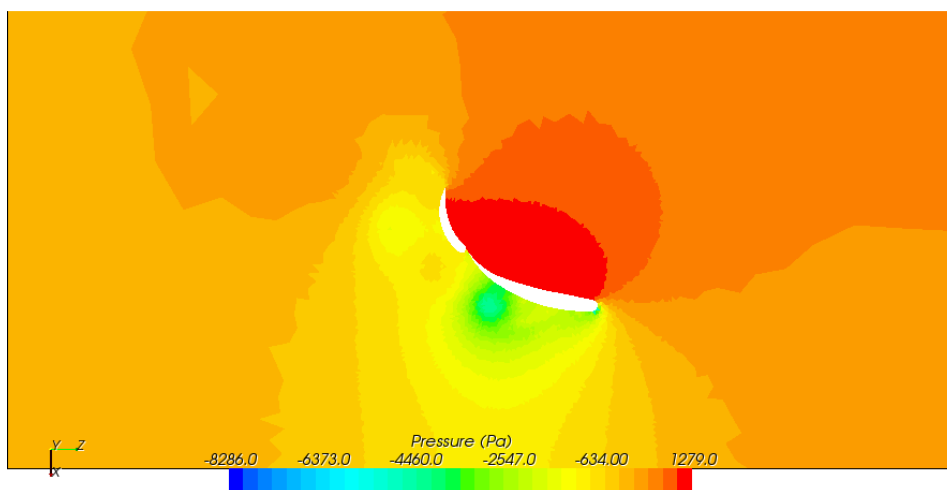


Fig. 4.12 Camp de pressió de l'Aleró 1 amb inclinació 15°

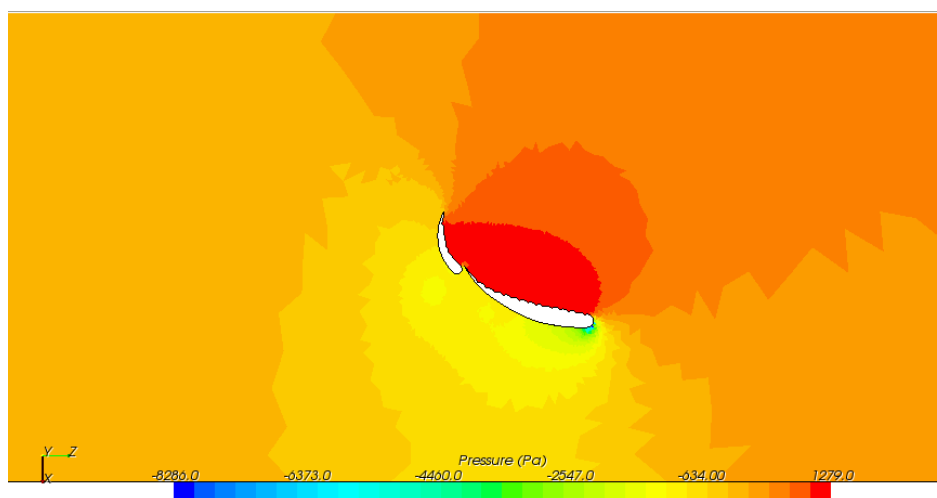


Fig. 4.13 Camp de pressió de l'Aleró 2 amb inclinació 15°

A la Fig. 4.12 es pot veure com les pressions màximes sobre el perfil són més grans que en les configuracions anteriors, per tant, es correspon amb el que s'esperava trobar, per haver augmentat l'angle d'atac del perfil.

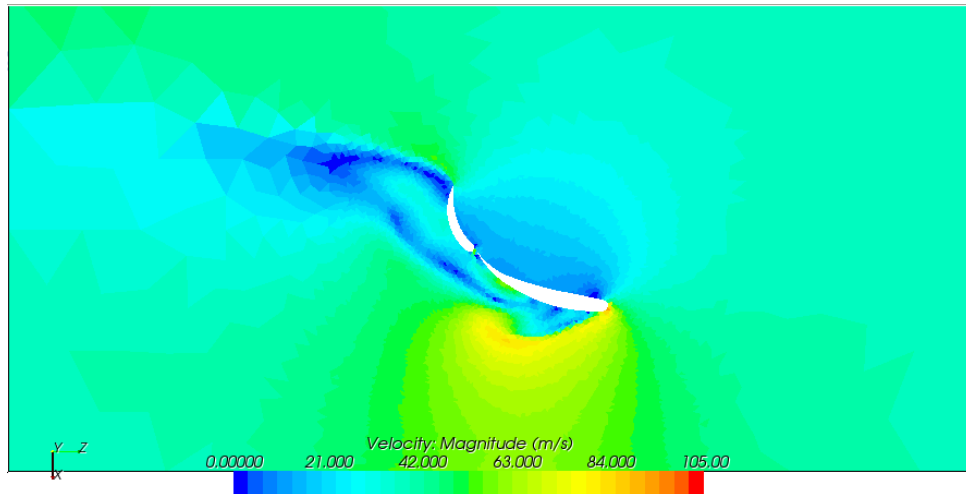


Fig. 4.14 Camp de velocitats de l'Aleró 1 amb inclinació 15°

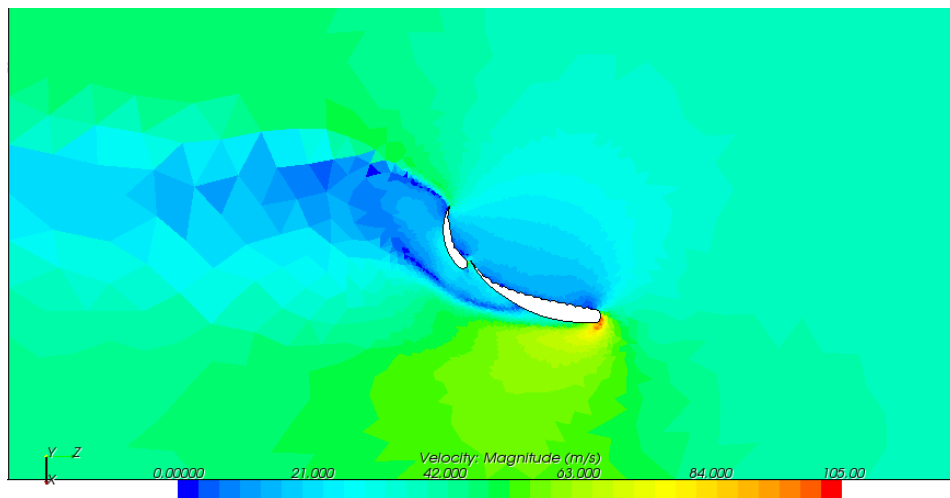


Fig. 4.15 Camp de velocitats de l'Aleró 2 amb inclinació 15°

Ara, com en els casos anteriors es durà a terme l'estudi quantitatiu dels dos alerons.

Taula 4.4 Coeficients extrets de la simulació per un angle de 15°

	C_d	C_l	Eficiència
Aleró 1	0,41	1,00	2,44
Aleró 2	0,34	0,83	2,44

En aquest cas s'observa un fet curiós. Tot i que sembla que, en l'Aleró 1, el despreniment es produeix molt abans que en l'Aleró 2, el primer té una major sustentació. Es podria considerar que ambdós alerons ja estan en pèrdua ja que sembla que el punt de despreniment ja ha sobrepassat la meitat de la corda, d'acord amb el conveni acceptat per la pèrdua.

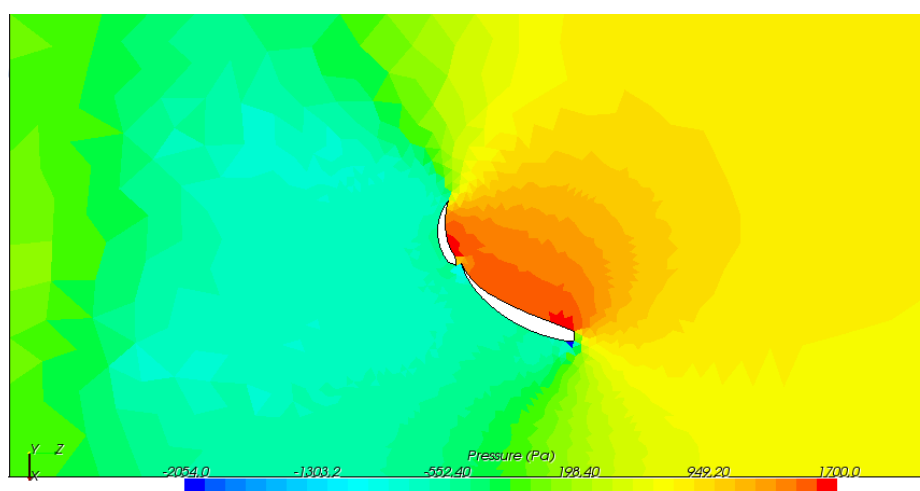
Si es comparen els valors obtinguts entre aquesta configuració i la configuració -15°, s'observa que a l'Aleró 2 continua disminuint el seu coeficient de sustentació, que es correspondria amb l'avançament del punt de despreniment i la reducció de l'àrea efectiva del perfil.

Pel que fa a l'Aleró 1, s'observa un augment del seu coeficient de sustentació. Aquest fet és lògic ja que es tracta de la configuració original de càrrega màxima, tot i que aquest fet no concorda amb el que veiem a la imatge.

Aplicant els criteris inicials de selecció, l'Aleró 1 té un coeficient de sustentació major, i per tant, aquest serà considerat l'aleró òptim per aquesta inclinació.

4.5 Resultats per cas 4: Inclinació 25°

A diferència de les configuracions anteriors, aquesta inclinació no pertany a la configuració real de l'aleró. En aquest cas es vol veure quin és l'efecte d'un angle d'atac excessiu, i per tant, veure l'entrada en pèrdua de l'aleró.

**Fig. 4.16** Camp de pressió de l'Aleró 1 amb inclinació 25°

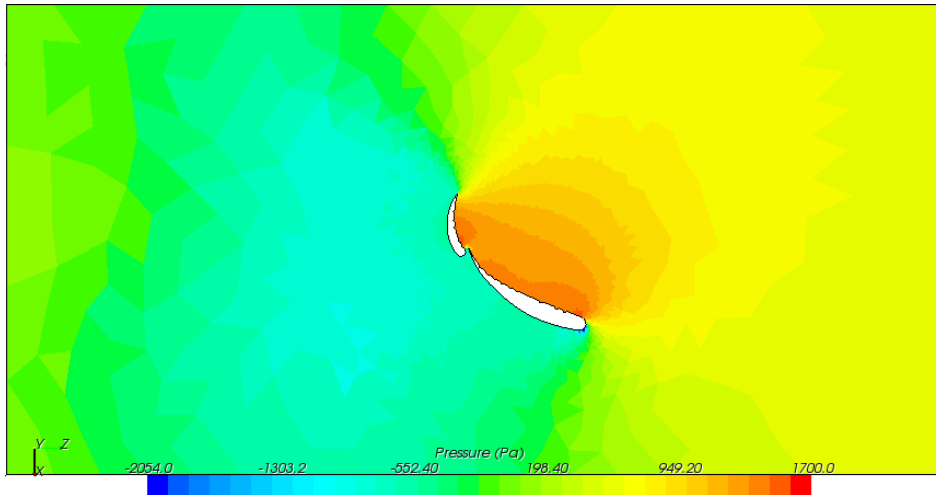


Fig. 4.17 Camp de pressió de l'Aleró 2 amb inclinació 25°

Observant les imatges referents a la velocitat (Fig. 4.18 i Fig. 4.19) es pot veure que, per ambdós alerons, l'estela generada té unes dimensions considerables, per tant, es podria esperar un augment en el coeficient de resistència d'aquests.

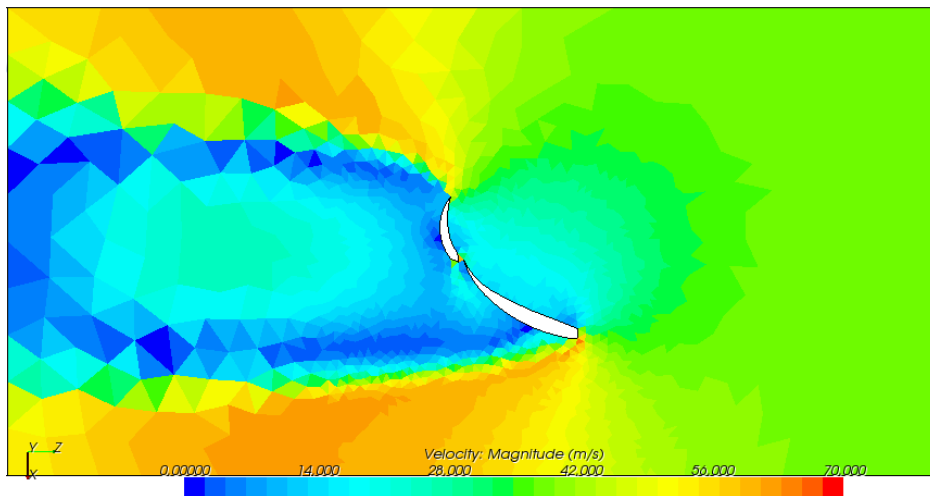


Fig. 4.18 Camp de velocitats de l'Aleró 1 amb inclinació 25°

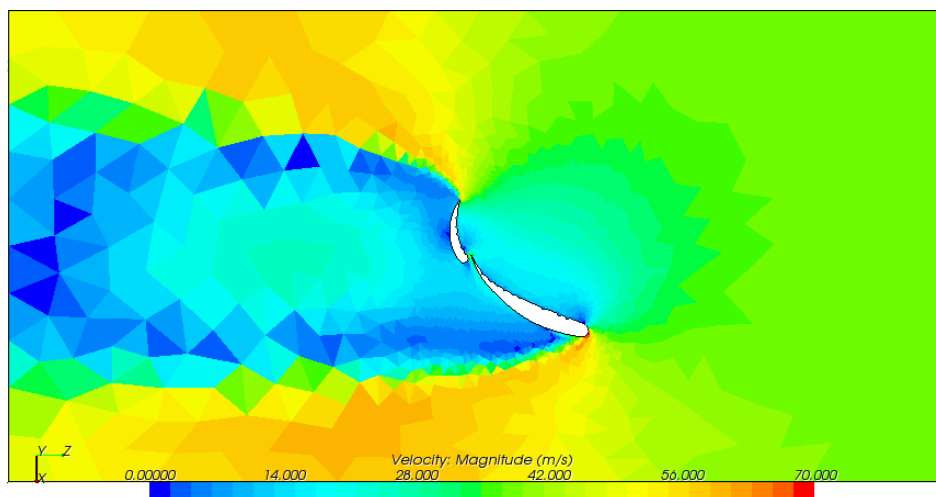


Fig. 4.19 Camp de velocitats de l'Aleró 2 amb inclinació 25°

Per poder obtenir més informació, a la Taula 4.5 es pot veure quins han estat els coeficients obtinguts per aquest cas.

Taula 4.5 Coeficients extrets de la simulació per una inclinació de 25°

	C_d	C_l	Eficiència
Aleró 1	0,55	0,54	0,98
Aleró 2	0,49	0,53	1,08

Amb angle d'atac de 25°, cap dels dos alerons és molt útil, doncs sembla que a ambdós el despreniment de la capa límit es produeix relativament aprop del caire d'entrada (estan en una situació avançada de pèrdua). En aquest cas tots dos presenten uns valors dels coeficients de sustentació i de resistència molt similars, essent l'eficiència aerodinàmica molt petita.

El que es volia veure amb aquesta disposició era quines diferències pot aportar la modificació de l'acabat superficial en el cas que l'aleró hagi entrat en pèrdua. Amb l'estudi s'ha pogut observar que tots dos estan en una fase avançada de pèrdua, i que l'Aleró 1 aportava un coeficient de sustentació més elevat, per tant, en el cas que l'aleró arribés a aquesta inclinació, ja sigui per incident de cursa, per avaria, etc. l'aleró que aportaria major seguretat, seria l'Aleró 1.

4.6 Síntesi de Resultats

En aquest apartat es poden veure a tall de resum, tots els resultats obtinguts de les simulacions.

A la Taula 4.6, es pot observar que, per l'Aleró 1, el seu coeficient de sustentació va incrementant de manera gradual. Aquesta tendència es trenca per la inclinació de 25° degut a l'entrada en pèrdua del perfil. Pel que fa al coeficient de resistència, mostra un augment més acusat i assoleix el seu màxim per la inclinació màxima.

Pel que fa a l'Aleró 2, el coeficient de sustentació mostra una tendència descendent degut a l'entrada en pèrdua prematura del perfil. Tot i entrar abans en pèrdua, mostra un millor comportament en referència a la resistència aerodinàmica, i per tant, la incorporació de les cavitats, sembla millorar les prestacions en aquest aspecte.

Taula 4.6 Taula resum de coeficients i eficiència (E)

Config.	Aleró 1			Aleró 2		
	C_l	C_d	E	C_l	C_d	E
-15°	0,94	0,15	6,27	0,95	0,15	6,33
0°	0,97	0,21	4,61	0,91	0,21	4,33
15°	1,00	0,41	2,44	0,83	0,34	2,44
25°	0,54	0,55	0,98	0,53	0,49	1,08
-15° (90 m/s)	0,96	0,15	6,40	0,96	0,15	6,40

Taula 4.7 Taula resum del Down Force (DF) i el Drag generats

Config.	Aleró 1		Aleró 2	
	DF (N)	Drag (N)	DF (N)	Drag (N)
-15°	527,11	81,53	530,44	83,35
0°	539,65	120,04	509,43	118,24
15°	556,78	230,33	463,82	189,55
25°	302,95	308,79	297,34	274,17
-15° (90 m/s)	2854,29	473,99	2872,09	447,42

4.6.1 Gràfiques dels resultats obtinguts

En aquest apartat es presenten unes gràfiques que pretenen resumir els resultats obtinguts, a les diferents simulacions, pels coeficients de sustentació i de resistència i l'eficiència aerodinàmica. D'aquesta manera es pot veure fàcilment com es comporta cada un dels alerons en funció de l'angle d'atac.

En primer lloc, a la Fig. 4.20, es compara com evoluciona el coeficient de sustentació dels perfils en funció de l'angle d'atac. Pel que s'observa, l'Aleró 1 té un millor comportament, essent més gran en la major part de la gràfica. Així doncs, si el criteri d'elecció depèn únicament de la capacitat de generar sustentació, l'Aleró 1 és el que compleix millor els requeriments.

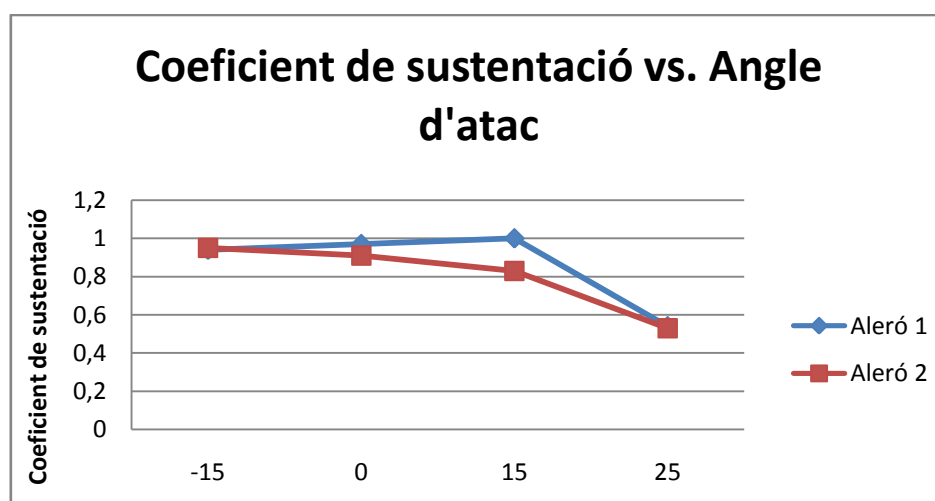


Fig. 4.20 Gràfica del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac

Pel que fa al coeficient de resistència, es pot observar l'evolució a la Fig. 4.21. Tot i que augmenta en tots dos alerons, l'Aleró 2 mostra un increment menys acusat, i per tant, seria l'elegit si es busca la mínima resistència.

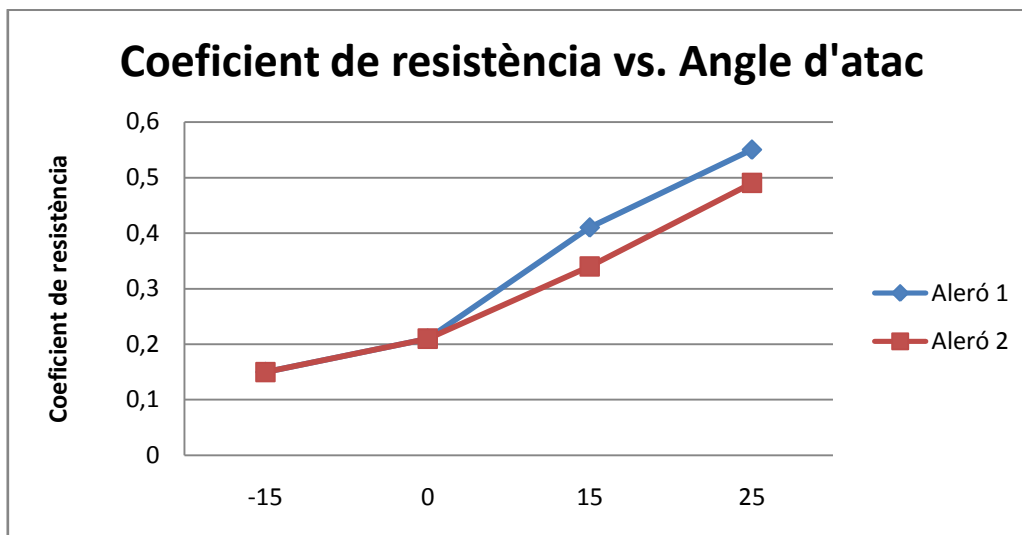


Fig. 4.21 Gràfica del coeficient de resistència en funció de l'angle d'atac

Una vegada vista l'evolució dels coeficients de sustentació i resistència, cal veure també quina és l'evolució de l'eficiència de cada un dels alerons (Fig. 4.22). En termes d'eficiència, ambdós alerons tenen un comportament molt similar, per tant, l'elecció en funció de l'eficiència és més compromesa.

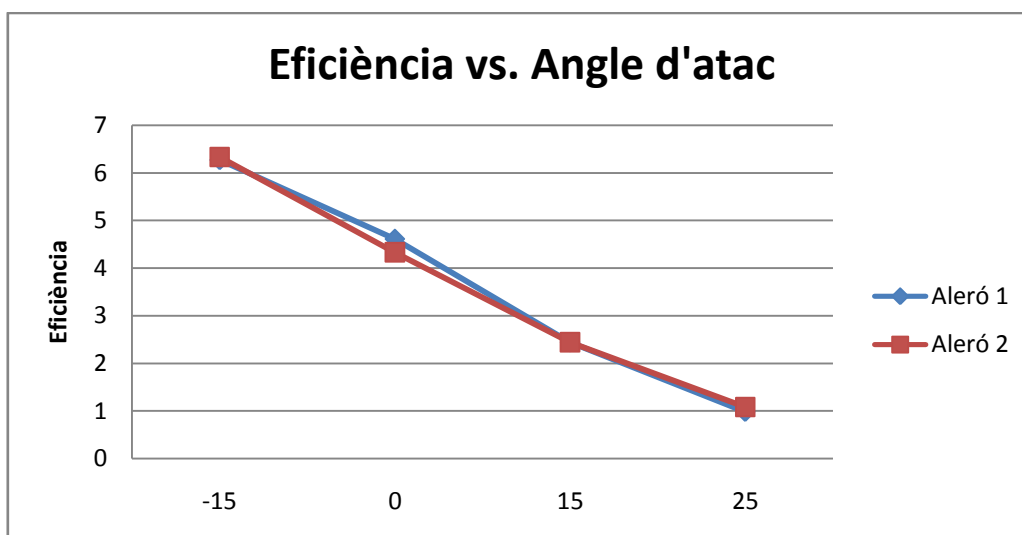


Fig. 4.22 Gràfica de l'eficiència en funció de l'angle d'atac

Cal dir però, que totes aquestes resultats s'han extret a partir de càlculs teòrics i sense la influència real de la pertorbació de flux generada per la resta del vehicle.

També cal comentar que, per la inclinació 15° , en l'estudi realitzat es mostra un despreniment que indica un inici d'entrada en pèrdua. Aquest resultat no concorda amb l'estudi realitzat per Jordan F1 Team ja que per ells, aquesta és la configuració que els aporta una major càrrega. Aquesta diferència es pot deure a que la simulació no ha tingut en compte l'efecte del difusor, i per tant, no s'ha introduït en el càlcul l'aportació d'energia que aquest element aporta. El difusor deriva aire a alta velocitat (energia cinètica) al fluid a l'extradós, endarrerint el despreniment.

CONCLUSIONS

El que buscava aquest projecte era veure si l'acabat superficial d'un aleró de Formula 1 afectava a les seves prestacions aerodinàmiques. En concret es va pensar aplicar un acabat similar a les pilotes de golf.

Cal destacar que aquest projecte ha estat enfocat com si es tractés d'un cas real d'un equip de Formula 1.

Per poder obtenir uns resultats mínimament fiables s'ha cregut oportú utilitzar un aleró original de l'equip Jordan F1 Team, aprofitant que va sorgir l'ocasió d'aconseguir-lo, i del què se n'han extret les mesures per mitjà d'una màquina de mesura tridimensional.

Una vegada realitzat tot el procés de mesura, s'ha procedit a la realització de la geometria. Aquesta s'ha elaborat amb ProEngineer mitjançant el mòdul de superfícies. D'aquesta manera, a partir dels punts obtinguts s'ha generat una rèplica exacta de l'aleró original.

Amb els primers passos ja realitzats, s'ha cregut convenient que els processos de mallat i de simulació es realitzessin amb el programa STAR CCM+. D'aquesta manera, s'eviten possibles errors de compatibilitat entre el programa de mallat i el de simulació. Aquest pas ha permès mallar, assignar les condicions de contorn, i realitzar la simulació.

Després de la simulació, s'ha pogut observar que, tot i no veure una millora molt evident, al variar l'acabat superficial, el nou aleró té un coeficient de resistència menor o igual que l'aleró original en tots els casos analitzats.

De tots els resultats obtinguts, tant gràfics com numèrics, es poden extreure un conjunt de conclusions que condueixen cap a l'elecció d'un aleró concret per cada un dels casos estudiats.

Pel cas 1, inclinació -15° , s'ha decidit que l'Aleró 2 era el que millor complia les especificacions. Tot i comportar-se igual en referència a forces generades, el nou aleró genera una estela turbulenta més gran, i per tant, fa que els cotxes que van al darrera rebin un flux d'aire més brut.

Pel que fa al cas 2, inclinació 0° , s'ha vist que l'Aleró 1 genera una càrrega major, i per tant, segons els requeriments per aquesta configuració, es millor que l'Aleró 2.

El següent cas, el cas 3, correspon al de càrrega màxima. En aquest apartat, semblaria que l'Aleró 1 està entrant en pèrdua. Aquest fet és curiós ja que, segons Jordan F1 Team, aquesta configuració és la que genera una màxima càrrega. Una possible explicació a aquest fet podria ser que la simulació s'ha dut a terme sense tenir en compte altres elements aerodinàmics del vehicle com ara el difusor.

En el cas 4, tots dos alerons estan en pèrdua i presenten uns valors dels coeficients de sustentació i de resistència molt similars. En un cas real es descartaria aquesta configuració.

Després de veure quines han estat les conclusions per cada cas particular, si s'hagués de fer una elecció per un cas general, queda clar que la millor opció seria la de l'Aleró 1, ja no només per prestacions, sinó que també per tema de costos, ja que amb un sol aleró es poden aconseguir bones prestacions en totes les configuracions, a més a més, el cost de fabricació d'un motlle amb les cavitats de l'Aleró 2, és molt elevat.

De tot l'estudi no se n'ha pogut extreure una relació directa entre l'acabat superficial i el comportament de l'aleró tot i que s'observa una lleugera millora en la resistència aerodinàmica. Es creu que seria interessant realitzar un nou estudi variant la rugositat de l'extradós, i alhora, fer un estudi en un túnel de vent.

BIBLIOGRAFIA

- Llibres:

[1]: Anderson, J.D., *Fundamentals of Aerodynamics, Fourth Edition*, Mc Graw – Hill, New York, NY (2007)

[2]: White, F.M., *Mecánica de Fluidos, Quinta Edición*, Mc Graw – Hill, Aravaca, MADRID, 2003

[3] Carmona, A.I. *Aerodinámica y actuaciones del avión*, Paraninfo, Madrid, 2004

[4] McBeath, S. *Aerodinámica del automóvil de competición*. Ediciones Ceac, 2005

[5] Katz, J. *Race Car Aerodynamics*. Bentley Publishers, Cambridge, 1995

- Revistes:

[6] Lord, Bradley. “Así son los F1 de 2008”, *F1 Racing*. 110, 28 – 37 (2008)

[7] Hucho, W.H.. “Resistencia Aerodinámica. Parece posible una reducción del coeficiente c_x a la mitad”, *Sociedad de Técnicos de Automoción*. 184, 20 – 29 (2008)

[8] Cooper, S. “Con viento fresco”, *F1 Racing*. 88, 42 – 46 (2006)

- Altres fonts:

[9] Apunts de l'assignatura *Tecnologia Aeroespacial*

[10] Apunts de l'assignatura *Aerodinàmica i mecànica de vol*

[11] Apunts del curs *Introducció al CFD*

NOMENCLATURA I ACRÒNIMS

a.C → abans de Crist

p → pressió estàtica

$q = \frac{1}{2} \rho v^2$ → pressió dinàmica

ρ → densitat de l'aire

v → velocitat del flux

C_l → coeficient de sustentació

C_d → coeficient de resistència

C_{do} → coeficient de resistència paràsita

C_{di} → coeficient de resistència induïda

ANNEX 1: TIPUS DE VEHICLES

1.1. Rodes cobertes

Aquesta categoria agrupa tots aquells vehicles que tenen les rodes protegides per la carrosseria del vehicle.

Aquest efecte fa que l'eficiència del vehicle sigui major però per contra, no permet aconseguir les prestacions dinàmiques que ofereixen els vehicles de rodes descobertes.

Dins d'aquest primer grup es pot distingir entre vehicles de turisme o Super turisme i vehicles de GT, barquetes, vehicles de LeMans Series, prototips i vehicles tipus NASCAR entre d'altres categories menys populars.

1.1.1. Turisme o Super turisme

El que tenim són vehicles derivats de vehicles de sèrie en els que les modificacions permises són mínimes, i que per tant, la seva aerodinàmica no es pot millorar de manera significativa. Un exemple serien els vehicles del mundial de turismes (WTCC), Figura 1.1.



Fig. 1.1 Seat León TDI WTCC 2008

1.1.2. Vehicles GT

Com en el cas anterior, la majoria de vehicles de GT parteixen d'un vehicle de sèrie però, en aquest cas, es tracta de vehicles d'alta gama. A diferència del cas anterior, les variacions que es permeten són majors, i per tant, les millores a realitzar són molt més extenses. En l'apartat aerodinàmic es poden trobar difusors que generen el que es coneix com efecte terra, alerons de majors dimensions, etc.

Tot i que s'ha de partir de vehicles de sèrie, s'ha permès que un dels equips participants competeixi amb un vehicle totalment artesanal, en concret es tracta del SR21 de l'equip català SUNRED que es pot veure a la Figura 1.2.



Fig. 1.2 SUNRED SR21 del Campionat GT OPEN

1.1.3. Prototips, barquetes i vehicles de Le Mans

Aquest grup engloba tots els vehicles a nivell europeu, tant de circuits com de proves de pujades en costa, que no parteixen d'un vehicle de sèrie. En els casos més senzills parteixen d'un xassís tubular i a mesura que augmenta el pressupost, la fibra de carboni cobra protagonisme. En el cas dels prototips i dels vehicles de Le Mans, l'aerodinàmica és primordial, i fins i tot, pot superar en inversió a la Formula 1. En aquest tipus de vehicles, al ser vehicles de resistència, es busca una eficiència aerodinàmica màxima, i per tant, es cuida al detall cada part de la carrosseria. A la Figura 1.3 es pot veure l'actual vehicle campió de Le Mans.



Fig. 2.3 Audi R15 de Le Mans

1.1.4. NASCAR

La NASCAR representa una de les competicions estrella del món del motor a nivell del continent americà. Es tracta de vehicles amb carrosseria coberta, de l'estil dels GT de les competicions europees, però en aquest cas l'eficiència aerodinàmica és molt elevada. La tecnologia emprada en aquestes curses està molt menys desenvolupada que en la resta de competicions. Els vehicles disposen de motors de sis cilindres en línia i canvi manual i no disposen de cap tipus d'ajuda electrònica. Si es compara amb els seus predecessors, les diferències es centrarien en la carrosseria i no en els components mecànics i electrònics. A la Figura 1.4 podem veure alguns d'aquests automòbils.



Fig. 1.4 Chevrolet de la NASCAR

1.2. Rodes descobertes (Open Wheels)

Els cotxes de rodes descobertes o open wheels es coneixen també com a cotxes de Formula. Com el seu nom indica, són vehicles amb les rodes no carenades, i per tant, això suposa un augment considerable de la resistència aerodinàmica.

Existeixen diferents campionats, i va des de la categoria més modesta, com és el Karting, fins al màxim exponent de la tecnologia automobilística, que és la Formula 1.

1.2.1. Karting

El karting és la cantera dels joves pilots. És la formula d'iniciació per als més joves i permet començar a experimentar les sensacions de velocitat i pilotatge. Són vehicles molt rudimentaris. Disposen d'un xassis d'alumini que acostuma a ser una plataforma, on es munten directament els braços de direcció, els eixos i el motor. És un vehicle molt simple però permet modificar les seves prestacions

dinàmiques amb molta facilitat. La seva càrrega aerodinàmica és pràcticament inexistent tal i com es pot apreciar a la Figura 1.5.



Fig. 1.5 Kart Robert Kubica

1.2.2. Formula 3

En el cas de la Formula 3, la complexitat del vehicle augmenta. Aquest tipus de monoplaça ja disposa de càrregues aerodinàmiques importants. Alhora, també disposa de millores tant dinàmiques com tecnològiques que els diferencien en molt als vehicles de Karting.

En l'apartat aerodinàmic, els Formula 3 ja disposen de difusor¹⁸, fons pla, i d'alerons frontal i posterior. Aquests últims es poden graduar de manera que el seu angle d'atac variï en funció de la càrrega aerodinàmica desitjada.

A la Figura 1.6 es pot apreciar un Dallara F308 de Formula 3 que disputa el campionat actual.



Fig. 1.6. Dallara F308 de Formula 3

¹⁸ Veure apartat 2.2.4. Formula 1

1.2.3. GP2

La GP2 representa el pas previ a la Formula 1. La tecnologia emprada per aquest campionat no difereix en gran mesura de la Formula 1.

A diferència de la màxima competició, la GP2 es un campionat mono marca on tots els equips disposen del mateix xassís, fabricat en fibra de carboni, i del mateix propulsor fabricat per Renault Sport.

Com es pot veure a la Figura 1.7, el vehicle disposa d'un gran nombre d'apèndix aerodinàmics i com en el cas de la Formula 3, d'un fons pla, d'un difusor i d'un aleró davanter i posterior que permeten variar el seu angle d'atac. Així doncs, les càrregues generades per tot aquest conjunt d'elements aerodinàmics són molt elevades.



Fig. 1.7. Dallara GP2

ANNEX 2: SUNRED

SUN Race Engineering Development S.L, més coneguda com a SUNRED, és una empresa situada a Martorell que es dedica al món de l'alta competició Automobilística. A banda de viure de l'explotació de recursos en curses, també es dedica a la formació, enginyeria i desenvolupament, producció i explotació.

L'empresa neix per iniciativa d'un grup de treballadors té, i des d'aleshores, ha estat en contínua expansió. El seu màxim responsable, el Sr. Joan Orús és una persona molt compromesa amb ajudar a joves enginyers a introduir-se en el món de l'automobilisme de competició, i amb gran talent pels negocis.

Actualment, SUNRED està present en diferents competicions. La més destacada, el mundial de turismes WTCC, on disposen de dos pilots fixes, i un altre que fa curses esporàdiques. El Vehicle amb el que competeixen en aquest campionat és un SEAT LEON WTTC de gasolina, i tot i tenir unes prestacions molt menors a la resta de competidors, estan aconseguint resultats sorprenents.

A banda del mundial de turismes, cal destacar el Campionat GT OPEN, on corren amb un cotxe de fabricació pròpia, el SUNRED SR21. Aquest Vehicle està basat en un xassís tubular on s'hi acoplen tots els components. Disposa d'un motor JUDD de 500 CV, potència màxima permesa per la FIA. Tot i així, és capaç de sobrepassar els 700 CV. Una altra de les peculiaritats d'aquest vehicle és que disposa d'una carrosseria molt lleugera on les portes, l'aleró, el suport d'aquest, i la part frontal contra impactes estan fabricats amb fibra de carboni. En resum, un cotxe de grans prestacions, capaç de lluitar cara a cara amb Ferrari, Porsche o Lamborghini.

A banda de la competició, actualment SUNRED té dos grans projectes, en primer lloc, una moto moguda per energia solar, i per l'altra, la joia de la corona, un Vehicle elèctric d'altres prestacions per comercialitzar a un preu més assequible que la resta dels seus competidors. A la Figura 2.1 es pot apreciar la moto solar i a la Figura 2.2, el SUNRED SR21.



Fig. 2.1 Moto solar SUNRED



Fig. 2.2 SUNRED SR21

ANNEX 3: MÀQUINA DE MESURA TRIDIMENSIONAL

Una màquina de mesura tridimensional és aquella que ens permet trobar les tres coordenades cartesianes d'un punt.

El principi de funcionament d'aquesta màquina és relativament senzill. Disposa d'una bancada de marbre (és perfectament plana i estable en front de les variacions de temperatura i humitat) on es col·loca la peça a mesurar, i d'una estructura mòbil amb un palpador que es el que realitza les mesures.

Una vegada fixada la peça, es marca el punt d'origen de les coordenades a partir del qual es volen realitzar les mesures. Per fer això, es desplaça el palpador fins el punt desitjat i es fa tocar el palpador a la superfície de la peça. En el moment que el palpador entra en contacte amb la superfície, la màquina mesura quines coordenades té el punt (segons l'origen de coordenades de la pròpia màquina). Una vegada obtingut el punt d'origen se li diu al software de l'aparell que el tracti com a nou origen de coordenades. Des d'aquest moment, el punt escollit passa a tenir coordenades (0,0,0).

Una vegada realitzats els passos previs, ja es pot iniciar la mesura. Per mesurar l'element, és tant senzill com desplaçar el palpador fins que aquest entri en contacte amb el punt de la superfície que es vol mesurar. Una vegada l'aparell detecta el contacte, extreu les tres coordenades referenciades respecte de l'origen seleccionat inicialment.

D'aquesta manera es poden aconseguir tots els punts de la peça referenciats a partir d'un punt d'aquesta.

En el cas de la peça del TFC, es va escollir un dels vèrtexs inferiors de la deriva lateral com a punt d'origen ja que era una aresta viva, i per tant, era més fàcil de referenciar.

Cal dir però, que per a peces amb radis, peces esfèriques, etc., l'aparell permet buscar un centre d'arc marcant tres punts d'aquest.

A la Figura 3.1 es pot veure un d'aquests aparells de mesura.



Fig. 3.1 Màquina de mesura tridimensional ZEISS

ANNEX 4: INTRODUCCIÓ AL CFD

4.1. Què s'entén per càlcul CFD?

Els codis CFD son eines de càlcul i disseny que permeten conèixer detalls d'un flux que, per altres mitjans, inclosos els experimentals, són molt difícils de determinar.

El seu principi de funcionament es basa en la discretització a partir de diferencials de volum, de les equacions de Navier-Stokes que governen el flux, per a un domini de càlcul.

4.2. Tipus de Codis i de models

Existeixen diferents softwares que es comercialitzen amb la finalitat de realitzar aquest tipus de càlculs, a grans trets es podrien destacar el FLUENT, STAR CCM+ (utilitzat en aquest TFC), el KIVA, ANSYS CFX i el FIRE. Tot i que el ventall és molt ampli, aquests són els mes utilitzats en el món automobilístic.

A més a més, dins de cada codi, existeixen submodels de càlcul que permeten resoldre fenòmens com l'evaporació (models de raig) , les reaccions químiques (models de combustió), la injecció (models de flux bifàsic) i models de turbulència.

4.3. Quins avantatges té el CFD?

Una de les principals avantatges és que, al ser una eina de predisseny, permet fer estudis de prototips sense necessitat de construir-los, per tant, redueix molt els costos dels assajos experimentals.

Permet resoldre problemes complexos de flux i aporta comprensió a fenòmens difícils d'observar i mesurar.

En el cas de l'alta competició Automobilística, permet la recerca de configuracions òptimes dels elements aerodinàmics, i per tant, permet un estalvi important en hores de test en pista i en túnel de vent.

4.4. Quines limitacions té?

La principal limitació que tenen aquest tipus de softwares és que requereixen de computadores d'altas prestacions en funció de la complexitat de la malla.

Els temps de mallat i de càlcul són elevats, i en relació amb la primera de les limitacions, a menor capacitat de computadora, major temps de càlcul.

Com que s'ha de fer un procés de mallat per tal de generar un cos a partir d'elements finits, es requereix d'una geometria base amb un acabat perfecte, a no ser així, ni la malla ni els resultats seran els correctes. Per tant, té una alta sensibilitat en imperfeccions del model.

4.5. Quines són les fases d'un càlcul CFD?

Pre-procés: aquesta és la fase prèvia a la simulació. En aquesta fase és on es genera la malla (convertir el volum en elements finits) , es fixen les condicions de contorn (donar les propietats que corresponen a cada superfície. Per exemple, a l'entrada, velocitat d'entrada, a les parets, la propietat de parets lliscants...), s'escull el mètode de resolució, i es fixen les condicions inicials (velocitats, pressions...).

Simulació: fer un estudi de la independència de la malla (assegurar que no existeix interferència entre cada una de les parts), realitzar la solució dels càlculs, transitoris si es fan en funció del temps, o bé, iteracions pseudotemporals, si es fa amb càlcul estacionari. Una vegada s'han fet un nombre gran d'iteracions (al voltant de 500) es comprova si les corbes que representen les solucions convergeixen, i si els resultats s'han estabilitzat. En el cas d'aquest TFC, tot i que les solucions ja eren convergents i els resultats es veien estabilitzats s'ha optat per realitzar 1000 iteracions per assegurar els resultats.

Post-procés: el post-procés consisteix l'estudi i l'anàlisi dels resultats obtinguts amb la simulació. En aquesta fase cal mirar quines són les forces generades, pressions i velocitats obtingudes... i alhora, s'ha de fer un estudi comparatiu sobre els resultats analítics i les mesures extretes. (comparar les gràfiques de pressions, velocitats... amb els resultats obtinguts de Lift i Drag)