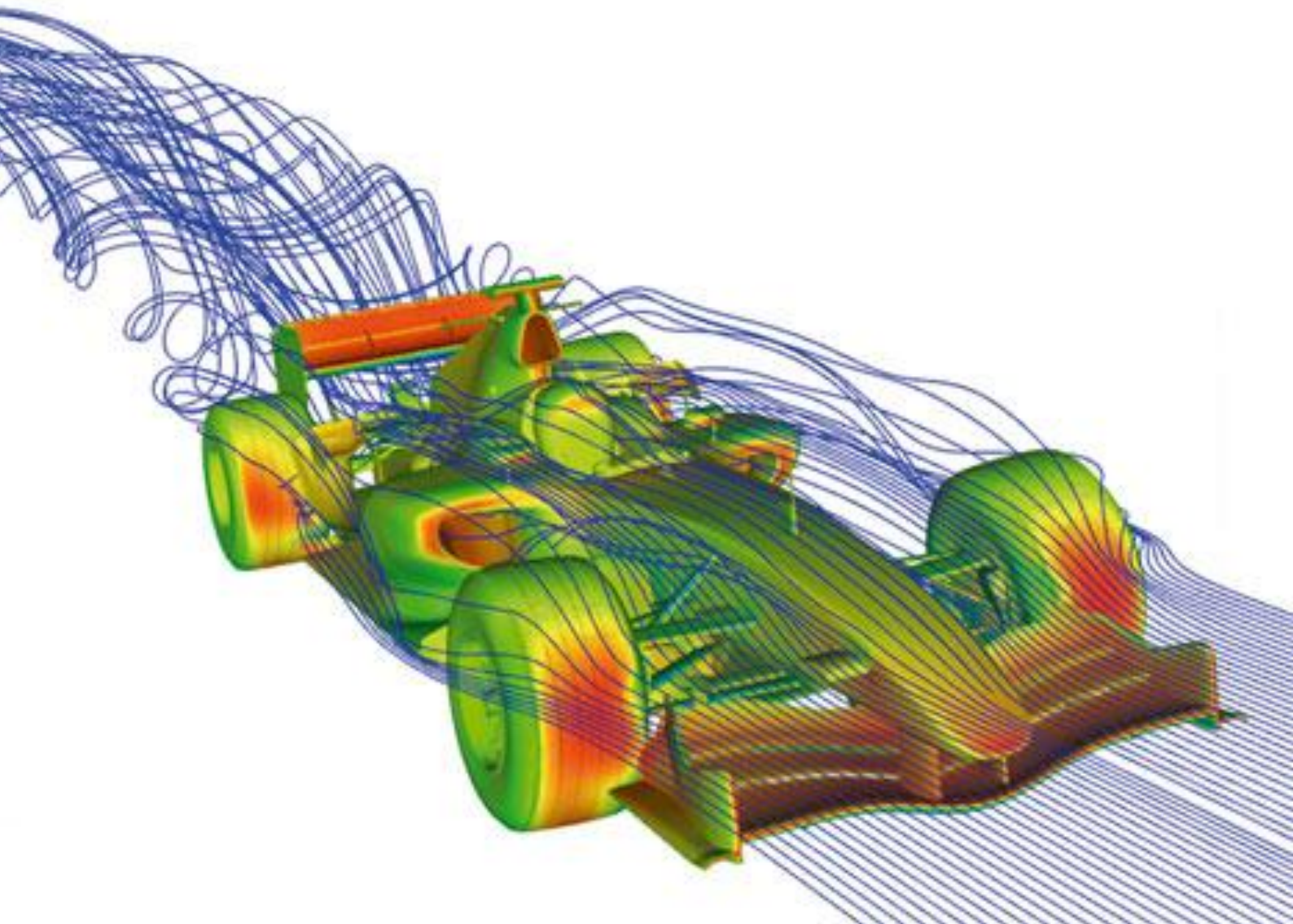


EL DISSENY AERODINÀMIC A L'AUTOMOCIÓ

Els programes de simulació i el túnel de vent.



GRUP: 2º BATXILLERAT A

CENTRE EDUCATIU: INS GALLECS

PREFACI

“Mentre investigava i escrivia aquest llibre. vaig tenir el privilegi d'escoltar moltes persones interessants provinents de diferents parts del món de l'automòbil ,i, si hi ha una cosa que vaig aprendre, és que mai saps prou. En efecte, un aerodinamicista professional, el nom mereix romandre en l'anonimat, em va dir que si els aerodinamicistes sabessin prou sobre la matèria, la majoria d'ells, inclòs ell, es quedarien sense feina. Això és el que fa que aquest tòpic sigui tan interessant: reuneix a la vegada a la enginyeria, la ciència, la tecnologia i l'art en una sola cosa. Motiu pel qual hi ha matèria perquè tant els professionals com els aficionats, la estudiïn, especulin, experimentin. i de vegades aconseguixin un descobriment, que potser no sigui de proporcions industrials, però que serà suficient per guanyar una fracció de segon. Al competitiu món de la dècada dels noranta les fraccions de segon s'han tornat molt importants.”

McBeath, SIMON, Aerodinámica del automóvil de competición.

Jo no faig més que corroborar aquestes sàvies paraules. M'he endinsat en el fascinant món de l'aerodinàmica, i he comprovat que, quan més saps més et quedas atrapat. No pots escapar del seu encant. Segur que aquest treball és una petita part de tot el que em queda per aprendre, però ha sigut el primer pas per aconseguir un somni.

AGRAÏMENTS

Hi ha molta gent que, directament o indirectament, m'ha ajudat en la realització d'aquest treball. És tan llarga la llista que espero no oblidar-me'n de ningú.

Primerament, vull agrair a un petit grup de persones tot el temps que m'han dedicat, la majoria, voluntàriament: al meu tutor Manel Merino, a qui he tret bastants hores de pati, a l'Arnau Miró, que m'ha guiat en aquesta tasca voluntàriament, gracies pels teus ànims i tot el temps que m'has dedicat, al Daniel Gratacós, enginyer en el món de l'automoció qui, viatjant pel món, ha tingut la gran amabilitat d'ajudar-me a l'Albert Fàbrega, exenginyer de formula ú i Luis Pérez Sala, expilot de formula ú, que m'han tractat molt amablement i, per últim, al Carlos Castella i Sergio Canamasas, persones les quals, sense la seva ajuda, no hagués pogut conèixer a la majoria d'aquestes persones.

Seguidament, vull agrair a l'Universitat Politècnica de Terrassa, per ser el primer estudiant que realitza el treball de recerca que utilitza el túnel de vent. Gràcies per la hospitalitat i deixar-me utilitzar les vostres instal·lacions. Més específicament, vull donar les gracies a dos membres d'aquesta universitat: l'Eulalia Griful, i en Gustavo Rausch, professor que va accedir a acompanyar-me en l'experiment del túnel de vent. També vull donar les gracies al Circuit de Barcelona-Catalunya, qui amb insistència, van accedir a donar-me un cop de mà.

Tampoc vull oblidar-me de totes aquestes persones, ja que al final lo important no és l'ajuda en si, si no l'interès i les ganes d'ajudar: Toni Cuquerella, "Zapi" (@VirutasF1), els aficionats al món del motor sabran qui és, Jacobo Vega, Arantxa Miro (Pirelli), Laura Ventura i Jordi Villà, del circuit de Montmeló, i Jordi Cruzola, del circuit de Motorland Aragon

Per últim, però no menys importants, vull agrair a tots els aficionats del món de l'automoció que m'han ajudat, i com no, a la meva família, pel seu suport i paciència.

A tots vosaltres, moltíssimes gracies.

ÍNDIX

SÍMBOLS	6
CONSTANTS FÍSQUES	8
ABREVIATURES	8
INTRODUCCIÓ	9
1. AERODINÀMICA.....	11
1.1 Que és un fluid?	11
1.2 Fonaments bàsics de l'aerodinàmica	12
1.3 Perfil Alar	18
1.4 Conceptes Bàsics	20
1.4.1 L'angle d'atac:	20
1.4.2 El número de Mach.	22
1.4.3 El nombre Reynolds.....	22
1.4.4 El flux laminar i turbulent.....	23
1.4.5 La capa límit.....	23
1.4 Forces Aerodinàmiques (<i>Drag i Lift</i>).....	24
2. L'AERODINÀMICA AL MÓN DE L'AUTOMOCIÓ	28
3. EL TÚNEL DE VENT.....	35
3.1 Parts del túnel de vent:	35
3.2 Tipus túnels de vent:	36
3.3 Túnel de vent a la F1	40
4. PROCÉS DE DISSENY I CONSTRUCCIÓ.....	49
4.1 Procés previ al túnel de vent.....	49
4.1.1 Escollir els perfils	49
4.1.2 Càlculs previs.....	50
4.1.3 Construcció dels alerons	53
4.2 Experiment al túnel de vent	56
4.3 Comparació de resultats	61
4.4 anàlisi de l'efectivitat de l'aleró al circuit de barcelona-Catalunya.....	65
4.3.1 Anàlisi reglament.....	66
4.3.2 Càlculs Montmeló.....	66
5. CONCLUSIONS	77

ANNEXOS.....	82
ANNEX A: Entrevista a l'Albert Fàbrega	83
ANNEX B: Entrevista a Daniel Gratacós.....	86
ANNEX C: Entrevista a Luis Pérez Sala.....	91
ANNEX D: Túnel de vent de Sauber.....	99
ANNEX E: Estudi d'un aleró efficient al circuit de Barcelona-Catalunya.....	100
ANNEX F: Resultats complets exemple Maserati.....	101
ANNEX G: Resultats del túnel de vent.....	104
BIBLIOGRAFÍA.....	106
WEBGRAFIA.....	106

SÍMBOLS

a_n : Acceleració normal (v^2/ r)

α : Angle (graus)

C: Chord (m)

Cd: Coeficient de Drag

Cl: Coeficient de Lift

Cx: Coeficient de Penetració

D: Drag (N)

E: Span (amplada aleró) (metre)

ρ : densitat (kg/m^3)

F: Força (N)

g: Gravetat (m/s^2)

F_f : Força de fregament (N)

L: Lift (N)

M: Número Mach (adimensional)

N: Normal (N)

μ : Mu

n: Mols

P: Pes (Newtons)

P: Potència (W)

p: Pressió (Pa)

r: Radi (m)

T: Torque (N)

T: Temperatura (K)

Re: Número Reynolds

Δp : Variació pressió dinàmica

SÍMBOLS

v: velocitat (m/s)

V_s: Velocitat del so (m/s)

V: Volum (m³)

ṁ: velocitat massa (kg/s)

CONSTANTS FÍSQUES

g: gravetat ($9,81 \text{ m/s}^2$)

ABREVIATURES

F1: Fórmula 1.

FIA: Federació Internacional d'Automobilisme

INTRODUCCIÓ

Cada vegada més la informàtica i les noves tecnologies governen el nostre dia a dia. La F1 és un esport que contribueix en gran part a això. No hi ha límit de pressupost als equips, per tant, es treballa dia i nit, mai millor dit, en la investigació de tecnologies punteres que els facin millor que la resta. No cal dir, que molts dels avenços tecnològics que es descobreixen a la F1 s'apliquen als cotxes del carrer o simplement, a objectes que fem servir en el nostre dia a dia.

Llavors, en un esport tan punter tecnològicament, com és possible que s'inverteixi tant de temps i diners en la construcció, utilització i manteniment de túnels de vent? El túnel de vent, és a gran escala, un túnel on per mitja d'un ventilador, s'obté aire en moviment. Aquí es col·loquen models, ja siguin cotxes, avions, motos etc...i s'observen com reaccionen al pas del vent. Però, en un esport tan tecnològic, a ningú se li ha passat cap crear túnels de vent virtuals? Doncs si, són els que es coneixen com programes de simulació. Aquesta disciplina anomenada CFD (Computer Fluid Dynamics) inclou programes com Fluent, Aerosim, Aerolap, Lapsim, entre els més coneguts.

Segons he pogut investigar, les dades obtingudes a aquests programes solen coincidir amb els resultats del túnel de vent i amb els resultats obtinguts a pista. De fet, segons em va dir Daniel Gratacós¹, aquests no tan sols serveixen per veure si poses o no una nova peça al túnel de vent, sinó també, per arribar amb més informació als circuits:

“Pel que fa als programes informàtics són molt utilitzats ja que ens permeten arribar a un circuit amb unes nocions de velocitat punta, càrrega aerodinàmica i relacions de canvi. Sempre que ho tinguis ben calibrat. És a dir, cal treballar abans d'anar al circuit i després per veure quant s'han acostat teus càlculs previs a la realitat i fer ajustos perquè els càlculs tinguin encara més fiabilitat.”

Per tant, les proves a pista són molt importants. En aquestes, quan hi ha possibilitat de test, es solen fer diferents mapes aerodinàmics, tal com em va explicar Albert Fàbrega²:

“Es una taula que es fa amb els valors obtinguts a les proves en les pistes de proves aerodinàmiques (rectes amb gradient pràcticament 0) dependent de les condicions de reglatge que s'han realitzat: posició de les ales, dels flaps, alçada del monoplaça i tots els condicionants que puguin influenciar en el rendiment aerodinàmic d'un monoplaça.”

¹ Daniel Gratacós és un enginyer del món de l'automoció que actualment està al Dakar. La entrevista es pot veure al annex B.

² Albert Fàbrega és un enginyer del món de l'automoció que actualment està com a comentarista tècnica TV3. La entrevista es pot veure al annex A.

A continuació, em dispenso a investigar si realment són tant importants els túnels de vent. Si realment són necessaris o es podrien eliminar del procés disseny d'una peça aerodinàmica d'un F1. El motiu de triar aquesta categoria és tot el desenvolupament aerodinàmic que es porta a terme. En categories inferiors, no es poden desenvolupar parts del cotxe. Per tant, plantejar-lo en aquestes categories on no utilitzen tant el túnel de vent, no tindria sentit.

Les proves que faci al túnel de vent les compararé amb els resultats obtinguts en programes de simulació. Tot seguit, també analitzaré com processar tota la informació obtinguda tenint en compte el cicle de disseny d'un monoplaça, intentant simular en tot el que pugui el que realitza un equip de F1. Per tant, calcularé el C_l (Coeficient de *Lift*) i C_d (Coeficient de *Drag*) que hauria de tenir un aleró perquè fos eficient al circuit de Barcelona-Catalunya.

Així, tal com ha dit Daniel Gratacós, podré veure quant s'han acostat els càlculs previs als que obtinguts al túnel de vent i si després s'acosten al que volem obtenir al circuit. Això ja serà més difícil ja que, l'aleró l'haurem d'escollir dins les limitacions del túnel de vent i no investigant quin ens donaria més eficiència. En el cas que hi hagi algun error, serà molt important investigar on l'he fet, perquè la pròxima vegada els càlculs i les proves al túnel siguin.

1. AERODINÀMICA

Aerodinàmica prové de la unió de dues paraules gregues: *Aeros* (aire) i *dynamis* (força). Per tant l'aerodinàmica és l'estudi de les forces que experimenta un objecte que travessa l'aire.

Una definició més elaborada seria: *rama de la mecànica de fluids que s'ocupa de l'estudi del moviment de l'aire y de las accions que el mateix exerceix sobre els cossos que es mouen immersos en ells.*

Es mou principalment en els àmbits de l'aviació i les competicions automobilístiques, des de la F1 fins les categories inferiors.

Un dels primers que va estudiar en aquest camp va ser Aristòtil³, qui va determinar que quan un cos es mou en contra de l'aire, es creava un buit que feia que el cos seguís en moviment. Posteriorment, Isaac Newton, inventor, matemàtic i teòleg, entre d'altres, anglès, va donar-se compte que l'aire i l'aigua es movien com a resposta a lleis físiques i que aquestes forces depenien de la viscositat⁴, de la velocitat del fluid que envoltava l'objecte, i de la forma i mida d'aquest. Al 1907, un rus anomenat Joukowski va idear fórmules i teories que s'acostaven al que avui dia sabem. Cal destacar que els germans Wright⁵ van aconseguir que el seu avió es mantingués en l'aire 259,8 metres al 1903. Aquest fet comprova que no has de saber tota la teoria per fer funcionar alguna cosa a la pràctica, frase que podem atribuir també al desenvolupament aerodinàmic als cotxes de carreres.

Per altre banda, si retrocedim de nou en el temps, es diu que al 1738 un físic anomenat Daniel Bernoulli va torbar la relació directa entre pressió i velocitat. Altres asseguren que abans va ser Leonard Euler qui ho va descobrir.

1.1 Que és un fluid?

Hem dit que l'aerodinàmica és l'estudi de les forces que experimenta un objecte que travessa l'aire. L'aire és un fluid, per tant, primer haurem d'entendre les propietats d'aquests.

Tradicionalment se'ns ensenya que hi ha tres estats fonamentals de la matèria: sòlid, líquid i gasós. Fluid engloba els dos últims, líquid i gasós, en què la matèria està formada per un conjunt de partícules lligades entre si amb menys força que en un sòlid, per tant, es deformen davant de forces externes.

³ Aristòtil (Grècia 384 aC - Grècia, 322 aC) va ser un filòsof grec. Se'l considera com un dels grans pensadors de la humanitat. El seu pensament en lògica, naturalisme i ètica dominaren en el pensament europeu fins ben entrat el segle XVI.

⁴ La viscositat d'un fluid representa la resistència que presenta aquest a fluir.

⁵ Es considera els germans nord-americans Orville (1871-1948) i Wilbur Wright (1867-1912), fabricants de bicicletes que van treballar junts en el desenvolupament de l'aeronàutica, com els inventors del primer avió pràctic que va volar. Realment la seva gran aportació al vol va ser el control de viratge mitjançant els alerons.

Les principals propietats mecàniques dels fluids són: la compressibilitat i la viscositat⁶. Els gasos, que són pràcticament incompressibles a velocitats baixes, és a dir, a velocitats menors que la de so⁷. Per tant, la viscositat o resistència que presenta aquest a fluir, pren una gran importància.

Si ens fixem en aquesta propietat podem dividir els fluids en dos grups:

- Fluids Newtonians: Un fluid newtonià és un fluid on la viscositat es pot considerar constant en el temps.
- Fluid no Newtonians: Viscositat varia amb la temperatura i amb la pressió

Cal tenir també en compte que no hi ha fluids amb viscositat zero.

A més a més d'aquestes propietats mecàniques, hi ha altres propietats que intervenen en els fluids:

- Propietats extensives (depèn de la mida, extensió, del sistema): Massa total, Volum, Quantitat total de moviment...
- Propietats intensives (independents de la massa del sistema): Temperatura, Pressió, Densitat...

1.2 Fonaments bàsics de l'aerodinàmica

Teorema de Bernoulli

Com hem pogut veure anteriorment, Bernoulli va descobrir un dels principis més bàsics de l'aerodinàmica. Va desenvolupar aquesta fórmula que relaciona la velocitat de l'aire amb la pressió d'aquest mateix.

$$p + \frac{1}{2}\rho v^2 = constant$$

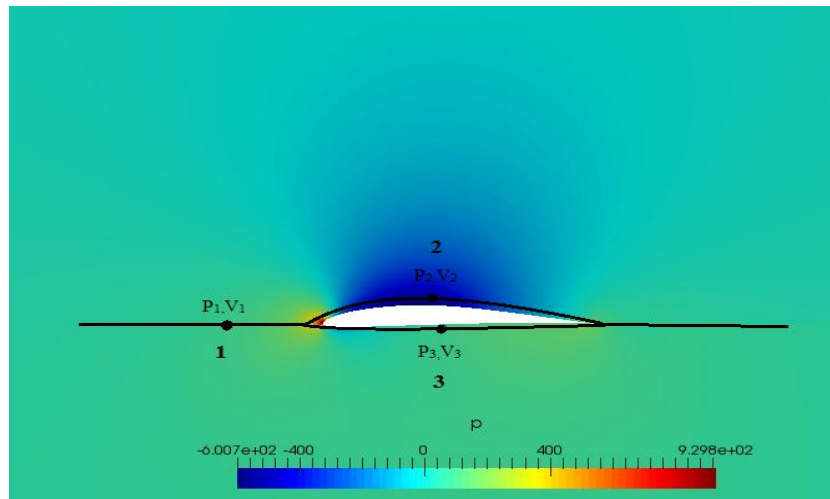
p: pressió *ρ*: densitat *v*: velocitat

⁶ Veure nota de peu número 4.

⁷ La velocitat del so és la velocitat de propagació de les ones de pressió longitudinals que constitueixen el so. A l'aire de l'atmosfera terrestre la velocitat del so és d'uns 340 m/s, però depèn de la temperatura i la pressió entre d'altres variables.

Aquesta fórmula demostra que on el flux aconsegueix la seva major velocitat, la pressió arriba al seu valor mínim. Cal ressaltar que aquesta només és vàlida per una línia de flux. És a dir, nos es poden comparar el recorregut que farien dues partícules d'un fluid per diferents camins.

Per tant, amb aquesta simulació informàtica (imatge 1.1) podem comprovar com serien les pressions al voltant d'un ala. Com acabo de dir, la fórmula de Bernoulli només es valida per una línia de flux. El que ens indica que em de comprar el punt 1 amb el 2 y l'1 amb el 3, ja que quan l'aire interacciona amb la part frontal de l'ala, es divideix el flux, i no podem comprar-ne dos de diferents. És a dir, la fórmula no ens permet comparar 2 i 3 directament.



Imatge 1.1: Variació de pressió en un perfil.

P: pressió - V: velocitat

Com podem veure en la imatge, la pressió en el punt 1 és major que en 2. En el punt 3 la pressió és semblant que en 1. Per tant podem afirmar que, com el flux ha hagut de recórrer més espai per la part superior de l'ala, aquest s'ha accelerat i ha causat una baixada de pressió. Tot això plegat causa una força de sustentació⁸.

També podem veure de color vermell la part davantera del perfil. Això es causa de l'aire que xoca frontalment en aquesta part.

Si recuperem la fórmula, comprovarem la teoria que acabo de mencionar:

$$p + \frac{1}{2} \rho v^2 = constant$$

⁸ A aquesta força de sustentació també li podem anomenar Lift.

Per tant:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = \text{constant}$$

$$P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 = \text{constant}$$

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V^2$$

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2} \times (V_2^2 - V_1^2)$$

$$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_X \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_Y$$

- Si $V_2 > V_1 \rightarrow Y > 0 \rightarrow X > 0 \rightarrow P_1 > P_2$
- Si $P_2 < P_1 \rightarrow Y > 0 \rightarrow X > 0 \rightarrow V_2 > V_1$

Si comparem el punt 1 amb el punt 3:

$$P_3 - P_1 = \frac{\rho}{2} \times (V_3^2 - V_1^2)$$

$$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_X \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_Y$$

- Si $V_3 < V_1 \rightarrow Y < 0 \rightarrow X < 0 \rightarrow P_1 < P_3$
- Si $P_3 \approx P_1 \rightarrow Y \approx 0 \rightarrow X \approx 0 \rightarrow V_3 \approx V_1$

Ara comprovarem com no podem comparar línies de flux diferents:

$$P_2 - P_3 = \frac{\rho}{2} \times (V_2^2 - V_3^2)$$

$$\underbrace{\hspace{1.5cm}}_{>0} \quad \underbrace{\hspace{1.5cm}}_{>0}$$

$P_2 > P_3 \rightarrow$ FALS!

També podem definir el *Lift*⁹ com una pressió exercida en un àrea, que en definitiva és la definició de força:

$$P_{SUP} < P_{DOWN}$$

$$-(P_{SUP} - P_{DOWN}) \times A < 0 \rightarrow \text{Creació de força de sustentació}$$

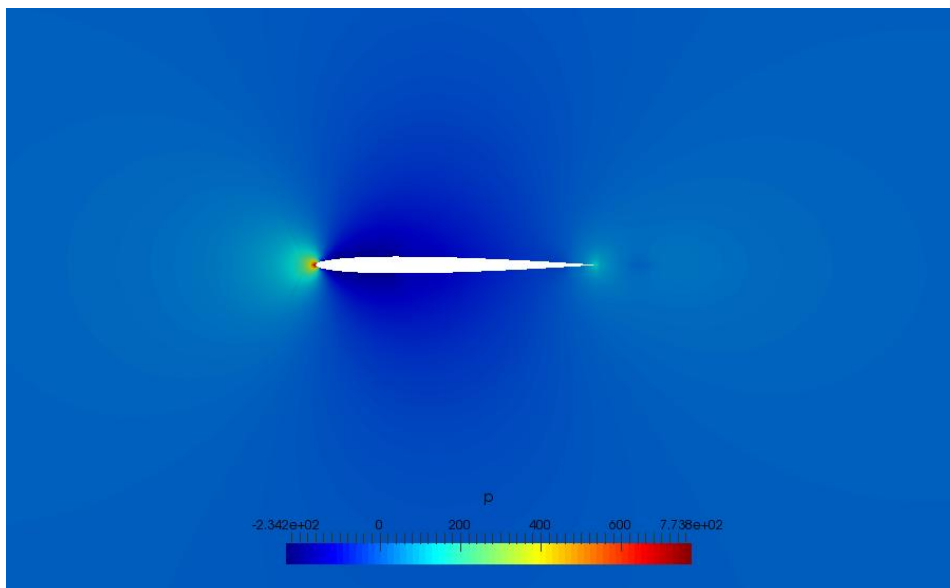
En el cas dels automòbils, interessa que aquesta sustentació sigui en sentit contrari. Posant l'ala al revés, provoquen que el *lift*, es converteixi en *downforce*¹⁰. Això permet que el cotxe es mantingui pegat a terra amb més força.

En aquest cas la pressió de la part superior de l'ala és major que la pressió de la part inferior:

$$P_{SUP} > P_{DOWN}$$

$$-(P_{SUP} - P_{DOWN}) \times A > 0 \rightarrow \text{Creació de } \textit{Downforce}$$

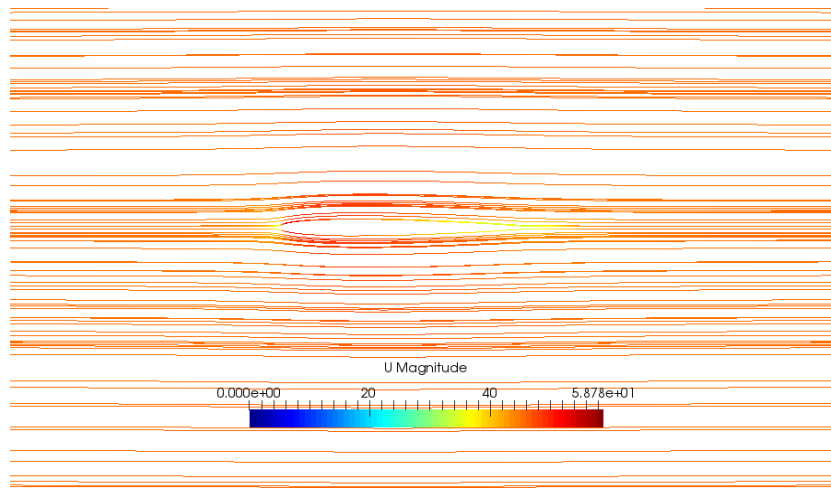
Quan un ala és simètrica, no hi ha variació de pressió ni de velocitats en la part superior i inferior, per tant, no hi haurà ni força de sustentació ni *Downforce*.



Imatge 1.2 : Variació de pressió en un perfil simètric

⁹ A partir d'ara quan parlem de Lift ens referirem a la força de sustentació

¹⁰ A partir d'ara denominarem *Downforce* la força cap avall, o el que és el mateix, el lift en sentit contrari.

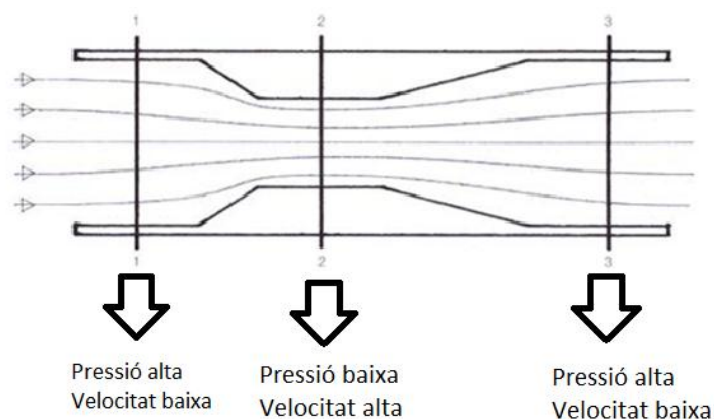


Imatge 1.3: Variació de la velocitat en un perfil simètric

Com podem observar, en un ala simètrica, l'aire recorre el mateix espai per la part superior i inferior. Com a conseqüència no hi ha variació de velocitat ni de pressió, per tant, no es genera *lift*. També podem observar de nou que, a la part davantera del perfil, hi ha una gran pressió i menys velocitat (color groguenc). Això es deu l'aire que impacta i es para en aquesta zona.

Efecte Venturi

L'efecte venturi va ser descobert pel físic Giovanni Venturi¹¹ i no és altra cosa que un cas particular de teorema de Bernoulli: Un fluid en moviment dins d'un conducte tancat disminueix la seva pressió quan augmenta la velocitat en passar per una zona de secció menor.

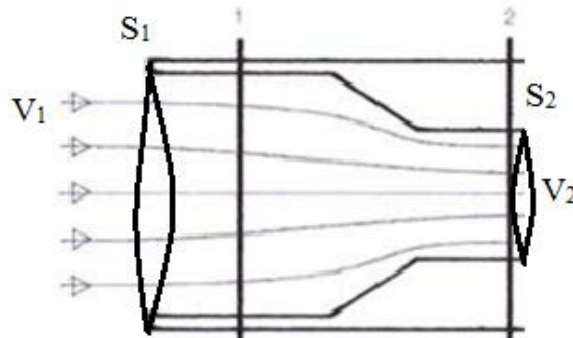


Imatge 1.4: Efecte Venturi

¹¹ Giovanni Battista Venturi (1746 - 1822) fou un físic italià. Va descobrir l'efecte Venturi del qual pren el seu epònim. Va ser l'epònim també de la trompa d'aigua bomba aspiradora suau, i el tub Venturi.

L'efecte venturi té múltiples aplicacions. Una d'elles, per exemple, és fer funcionar un carburador¹². L'aire entra pel tub. La velocitat del flux al punt 2 és accelerada a causa de la reducció de l'àrea del venturi. Per tant, en aquest punt, hi ha una reducció de pressió i es aquesta pressió xucla l'aire.

Així que, comprovem que a l'Efecte Venturi es compleix el teorema de Bernoulli: A més velocitat (creada per la reducció del diàmetre), menys pressió.



Imatge 1.5: Velocitats i seccions en un venturi

Ara comprovarem matemàticament aquest efecte. Tot el que entra ha de sortir, per tant:

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$$

$$\dot{m} = \rho v A = \left[\frac{kg}{s} \right] = vel. massa$$

$$\rho_1 v_1 A_1 = \rho_2 v_2 A_2$$

$$\rho_1 \neq \rho_2$$

$$v_1 A_1 = v_2 A_2$$

$$V_1 \frac{A_1}{A_2} = v_2$$

Per tant, com més petita sigui A_2 , és a dir, com més es contregui, més ràpid anirà el fluid.

Aquest efecte també s'utilitza als túnels de vent per accelerar l'aire a la zona

¹² El carburador és el dispositiu que fa la barreja d'aire- combustible en els motors de benzina.

1. 3 Perfil Alar

Ales i Perfils alars

És molt important diferenciar una Ala o aleró d'un perfil alar. El perfil alar és la secció transversal de l'aleró. És com si el talléssim en llesques i o miréssim transversalment.

Parts de l'ala

Leading Edge (LE): Part davantera del perfil alar. És la primera que entra en contacte amb l'aire i que provoca que el flux es divideixi i travessi el perfil alar per la part superior i inferior de l'ala.

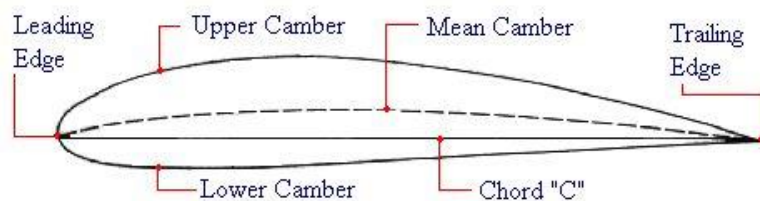
Trailing Edge (TE): Punt on, el flux de l'aire que travessa la part superior i la part inferior de l'ala, coincideixen i deixen el perfil.

Chord: Línia imaginària que uneix el *Leading Edge* amb el *Trailing Edge*. És la línia de referència que determina l'angle geomètric d'atac i que permet calcular l'àrea de l'ala.

$$A_{\text{Aleró}} = \text{Span} \cdot \text{Chord}$$

Span: Longitud de l'aleró.

Chamber Line: Curvatura que equidista de la part superior i inferior. És la línia de referència per mesurar la simetria de l'ala.



Imatge 1.6: Parts d'un perfil alar.

- **Ala asimètrica:** Ala amb la *chamber line* molt corbada, també es denominen **High chambered wing**.
- **Ala simètrica:** No té *chamber line*, ja que la línia seria recta, sense corba.

Aspect ratio: La relació d'aspecte, és la proporció entre la seva amplada i la seva altura o llargada. Es calcula dividint l'amplada per l'alçada (o llargada) de la imatge visible en pantalla, i s'expressa normalment com «X: Y».

En el cas dels alerons és¹³:

$$AR = \frac{E}{c}$$

E: Amplada - c (corda): llargada

Abans de dissenyar l'ala s'ha de escollir una *wing section* o perfil alar. Recordem que el perfil alar és el tall de l'ala vist transversalment.

Les característiques del tipus de perfil que escollim afectaran a:

- *Lift*, per tant, l'angle d'atac
- *Drag*
- *Stall characteristics* (quan arribarà a pèrdua)
- Flux de l'aire a través de l'ala
- Quantitat de combustible i estructures internes

Incidència del ala

A continuació veurem diferents aspectes de l'ala o del perfil alar, que afecten al comportament de l'ala a través de l'aire.

- **Posició de les ales respecte a el vent relatiu¹⁴:**
En el cas dels avions, com més alineat estigui el fuselatge amb el vent relatiu, menys *Drag* experimentarà.
- **Densitat de l'ala:**
Un ala molt gruixuda pot produir una gran estela i per tant un alt *parasite Drag*. En el cas contrari, si l'ala és prima, requereix reforços.

¹³ Les més apropiades són 3:1 o 4:1.

¹⁴ El vent relatiu en el vent que va en direcció de l'ala.

- **Leading Edge:**
El radi de curvatura del *Leading Edge* també afecta en com d'abrupte entra l'ala en pèrdues.
- LE afilat: Entrada en pèrdua més abruptament.
- LE contundent: Entrada en pèrdua menys abruptament.

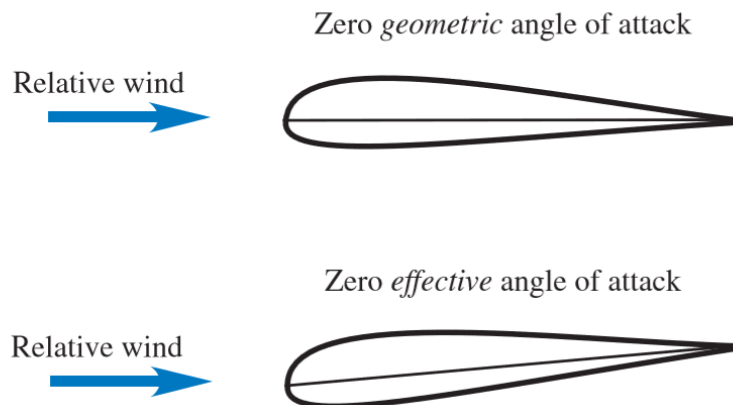
- **Chamber:**
A major *chamber* més *lift* es podrà produir abans que l'ala entri en pèrdua.

1.4 Conceptes Bàsics

1.4.1 L'angle d'atac:

En el camp de l'aerodinàmica podem referir-nos a dos angles d'atacs diferents: el geomètric i l'efectiu.

- **Angle d'atac geomètric:** Es l'angle entre la *mean chord* i la velocitat relativa de l'aire.
- **Angle d'atac efectiu:** Angle que es mesura des de el punt d'orientació on el *lift* de l'ala es nul.



Imatge 1.7: Efectivitat nul·la dels diferents angles d'atac

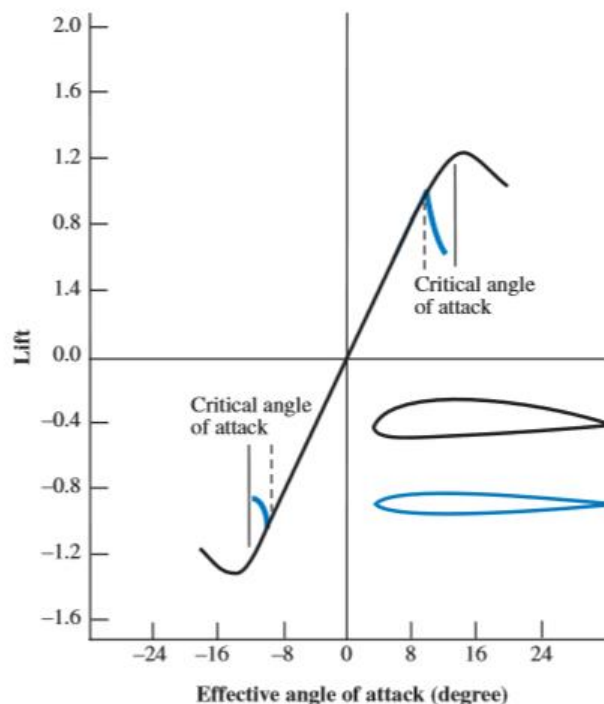
Evidentment, l'efectivitat nul·la dels dos angles serà diferent:

- Efectivitat nul·la de l'angle geomètric: No hi ha inclinació de l'ala. La *mean chord* es paral·lela a les línies que representen la velocitat relativa de l'aire. Per tant pot ser que hi hagi *lift*.
- Efectivitat nul·la de l'angle efectiu: Es dona en una posició on l'ala no experimenta *lift*.

L'angle d'atac efectiu ens dona una referència d'on trobem el *lift* zero, a partir d'aquí augmentarem o disminuïrem l'angle segons qui ens convingui. Per aquest motiu, cal tenir en compte que el *lift* és directament proporcional a l'angle d'atac efectiu.

- Ala inclinada cap a dalt: Més *lift*.
- Ala inclinada cap avall: Menys *lift*¹⁵

Però cal anar amb compte. Quan s'arriba a un angle d'atac notablement gran podem arribar a *stall*¹⁶. Arribats a aquest punt amb un angle d'atac denominat crític, l'aire es comença a separar del *trailing edge* de l'ala i el flux no segueix la silueta del perfil. Com a conseqüència de la separació de l'aire respecte l'ala, disminueix en *lift* i augmenta el *Drag*.



Gràfica 1.1: Lift-Angle d'atac

¹⁵ Això sempre considerant Lift com a força de sustentació.

¹⁶ L'aleró entra en pèrdues.

En aquesta gràfica podem comparar la variació del *lift* a mesura que variem l'angle d'atac efectiu.

Podem observar com l'ala simètrica arriba abans y més abruptament a pèrdua que l'ala asimètrica, tot i que per angles petits experimenten el mateix *lift*.

1.4.2 El número de Mach.

El número de Mach va ser proposat per Ernst Mach¹⁷, per expressar la velocitat d'un objecte respecte a la velocitat del so. Observant la fórmula, podem dir que aquest número és el quocient entre la velocitat d'un objecte i la velocitat del so en la que es mou aquest.

$$M = \frac{V}{V_s}$$

V: velocitat objecte *V_s*: Velocitat so

Aquest número es realment important en el món l'aviació. Els pilots han de saber la seva velocitat respecte a la velocitat del so, ja que quan s'acosten a aquesta velocitat, el comportament de l'aire varia¹⁸.

Dins el món de l'automoció i l'aerodinàmica és important per classificar els tipus de fluids o els tipus de túnels de vent.

1.4.3 El nombre Reynolds

El nombre de Reynolds (Re) és un nombre adimensional¹⁹ utilitzat en mecànica de fluids, disseny de reactors i fenòmens de transport per caracteritzar el moviment d'un fluid.

El nombre de Reynolds relaciona la densitat, viscositat, velocitat i dimensió típica d'un flux.

Per exemple, un flux amb un nombre de Reynolds al voltant de 100.000 (típic en el moviment d'una aeronau petita) expressa que les forces viscoses són 100.000 vegades menors que les forces convectives, i per tant aquelles poden ser ignorades.

¹⁷ Ernst Mach (Brno, 1838 - Munic, 1916) fou un físic i filòsof austríac. Va realitzar importants descobriments en els camps de l'òptica, l'acústica i la termodinàmica.

¹⁸ Quan un avió augmenta la seva velocitat fins a la velocitat del so, aleshores les ones es comencen a apilonar al davant de l'avió i es comprimeixen, formant el que anomenem ones de xoc

¹⁹ Un nombre adimensional és un nombre que no té unitats físiques que el defineixin i, per tant, és un nombre pur. Són un exemple el nombre d'Arquímedes, en nombre d'Abbe o el nombre de Marangoni.

Aquest nombre apareix en molts casos relacionat amb el fet que el flux pugui considerar laminar (nombre de Reynolds petit) o turbulent (nombre de Reynolds gran).

1.4.4 El flux laminar i turbulent

Flux laminar

Les partícules es desplacen seguint trajectòries paral·leles, formant així en conjunt capes o làmines. El fluid es mou sense que hi hagi barreja significativa de partícules de fluid veïnes. En aquest flux predomina la viscositat i la seva acció amorteix qualsevol tendència a ser turbulent.

Flux turbulent

Les partícules es mouen de forma caòtica, desordenadament i les trajectòries es troben formant petits remolins. A causa d'això, la trajectòria d'una partícula es pot predir fins a una certa escala, a partir de la qual la trajectòria de la mateixa és impredecible, més precisament, caòtica.

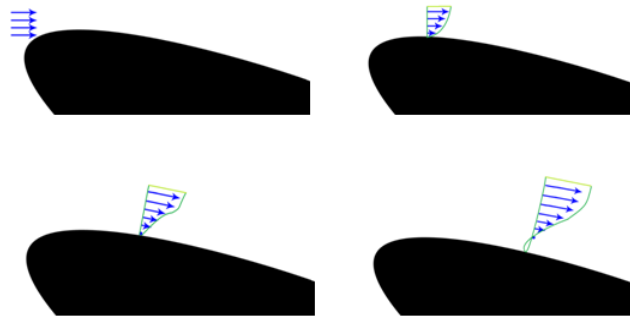
1.4.5 La capa límit

La capa límit és la zona on el moviment del flux del fluid és pertorbat per un sòlid amb el qual es troba en contacte. En aquesta zona la velocitat del fluid va disminuint a mesura que ens apropem al sòlid.

L'espessor²⁰ d'aquesta capa dependrà de la resistència aerodinàmica del objecte. Com menys hi hagi, menys espessa serà.²¹

²⁰ Densitat o condensació d'un fluid.

²¹ A més Drag (Resistència Aerodinàmica), més densa és la capa límit.



Imatge 1.8: Variació de la capa límit

La capa límit pot ser laminar o turbulenta. Aquesta es sol utilitzar en l'aeronàutica comercial ja que aquest tipus de capa és manté adherida al perfil amb majors angles d'atac i per tant, evita que el perfil entri en pèrdues. Degut a aquesta característica, també es sol utilitzar en el món de l'automoció, on es busca la major eficiència aerodinàmica. En resum, una capa límit turbulenta produeix increment del *drag* però no fa entrar a perduda. El despreniment de la capa límit sí fa entrar

1.4 Forces Aerodinàmiques (*Drag i Lift*)

Hi ha forces que, intuïtivament, observem i comprovem el seu funcionament. Un exemple pot ser quan anem en cotxe i traiem la mà per la finestra. Si la obrim i la col·loquem verticalment comprovarem que actua una força en contra de la direcció del vent que disminueix si posem la mà horitzontalment.

Els dos components de la força aerodinàmica són la resistència (*Drag*) i sustentació (*Lift*). Aquestes dues forces es combinen com a vectors per donar la força aerodinàmica total resultant. Com anteriorment hem pogut veure, aquesta força resultant es causada per diferències de pressió.

Per tant, començarem a definir les forces que actuen degut a l'aire, ja sigui aquest o l'objecte el que estigui en moviment.

$$p = C_p \times \rho v s^2$$

Per convertir una pressió en una força, és necessari multiplicar-la per l'àrea sobre la que la pressió està actuant:

$$\text{Pressió} = \frac{\text{Força}}{\text{Àrea}}$$

De l'equació de la pressió podem treure formules per la resistència i la sustentació:

$$\text{Lift o sustentació} = C_l \times \frac{1}{2} \times \rho v^2 \times A$$

$$\text{Drag o resistència} = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho v^2 \times A$$

El *lift* (o força de sustentació) és la principal força que permet que una aeronau pugui volar, ja que es més gran que el seu pes total. De fet un F1 amb la suficient velocitat, podria rodar de cap per vall. Es crea degut a una diferencia de pressions entre la part superior i la inferior de l'ala.²²

A més, la sustentació, com em vist anteriorment, depèn de l'angle d'atac. A mesura que augmenta el angle d'atac, també ho fa el C_l (Coeficient de *Lift*)²³ fins arribar a un punt crític. En arribar a aquest punt, el flux d'aire no aconsegueix recórrer tota la superfície del perfil aerodinàmic donant lloc a l'entrada en pèrdua (*stall*). La solució consisteix en incorporar *flaps* o *slats* (dispositius d'hipersustentació) per continuar amb la diferència de pressions i per tant amb la sustentació.²⁴

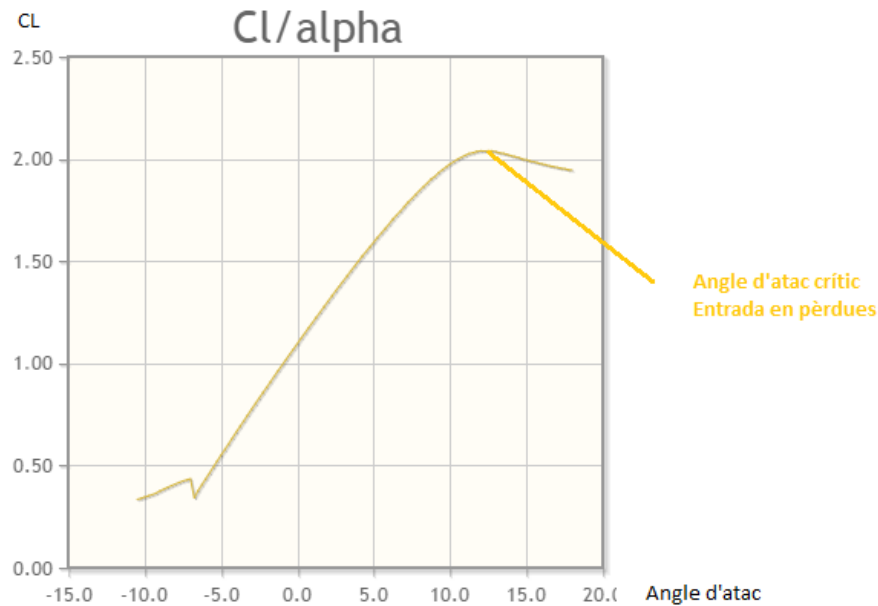
Si aquesta ala que produeix una força de sustentació la girem, podem comprovar que, aleshores, el *lift* es converteix en *Downforce* (Força cap avall). Aquest *Downforce* es aprofitat a les competicions automobilístiques per augmentar la velocitat per corba, ja que augmenta la força amb la que el cotxe s'enganxa a terra, i reduir la distancia de frenada.²⁵

²² Si la superior es menor que la inferior es crea *lift*. En el cas contrari es crea *lift* negatiu, o el que és el mateix, *Downforce*.

²³ A partir d'ara farem servir C_l com Coeficient de Lift, o coeficient de la força de sustentació.

²⁴ Quan l'aire no arriba de manera horitzontal ens podem permetre posar angles notablement alts.

²⁵ Per crear *downforce* es necessiten alerons, aquests oposen resistència, per tant, es tarda menys en frenar.



Gràfica 1.2: Arribada a pèrdua (stall) del perfil Eppler 423 (Airfol tools)

El *Drag* o resistència aerodinàmica, com el seu propi nom indica, és la força, en direcció contrària a la velocitat, que pateix un cos quan es mou a través de l'aire:

$$F_x = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_x \cdot V^2$$

F_x: Força de resistència - *ρ*: Densitat - *S*: Superfície - *C_x*: Coeficient de penetració - *V*: Velocitat

Amb aquesta fórmula, podem calcular la força de la resistència aerodinàmica. Aquesta depèn de factors com: La densitat, la superfície, velocitat i el coeficient de penetració

També ho podem trobar amb la següent fórmula:

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot C_d \cdot V^2$$

D: Drag²⁶ - *ρ*: Densitat - *S*: Superfície - *C_d*: Coeficient de drag²⁷ - *V*: Velocitat

²⁶ *F_x* i *D* són el mateix: força de resistència.

²⁷ El *C_x* (coeficient de penetració) i *C_d* (coeficient de Drag) són el mateix. La diferència es que el primer s'utilitza més en el món de l'automoció i el segon és internacional. Podem definir als dos com coeficients de la resistència aerodinàmica.

La densitat disminueix amb l'altitud. Per tant, a més altura, menys densitat hi haurà i menor serà la resistència aerodinàmica. Per exemple, al circuit de Interlagos²⁸, situat a 800 metres sobre el nivell del mar, els cotxes experimentaran menys *Drag* que al circuit de Mònaco²⁹, situat a nivell del mar. Amb aquesta observació podem determinar que, per part de la densitat, experimentarà més *Drag* un Formula 1 que un avió volant a kilòmetres d'altura.

Si augmentem la superfície, la resistència augmentarà. Això ho podem comprovar fàcilment. Si agafem dos fulls de paper i un d'ells l'arruguem, li estem disminuint la superfície. Per tant, si seguidament els deixem caure els dos alhora des d'una altura determinada, comprovarem que, el full arrugat, arribarà abans a terra que l'altre, ja que té un millor coeficient de penetració i una menor superfície. És per aquest motiu, que en el cas dels Fórmula 1, quan arriben a una certa velocitat, al voltant del 300 km/h, no són capaços d'augmentar la seva velocitat, gràcies a que tots els alerons, rodes, etc... sumen aquesta superfície. A més a més, amb l'augment de velocitat, augmenta el *Drag*, llavors no poden accelerar més. En el cas contrari trobem una MotoGP, que degut a la menor superfície que exposa a l'aire, per molt que augmenti la velocitat, no s'estancarà a una velocitat tan d'hora.

En resum, intuïtivament podem comprovar com una gota oferirà menys resistència que una placa col·locada verticalment. Si observem el MP4-22 (McLaren de la temporada 2007 de F1) detectarem una gran quantitat d'alerons i apèndix aerodinàmics que oferiran més resistència aerodinàmica que el 2014 Audi R18 e-Tron quattro de Le Mans 2014, on la manca d'alerons, les rodes cobertes, faran que hi hagi menys *Drag*. En el mateix cas passa entre una moto, on no hi ha alerons, i un F1.



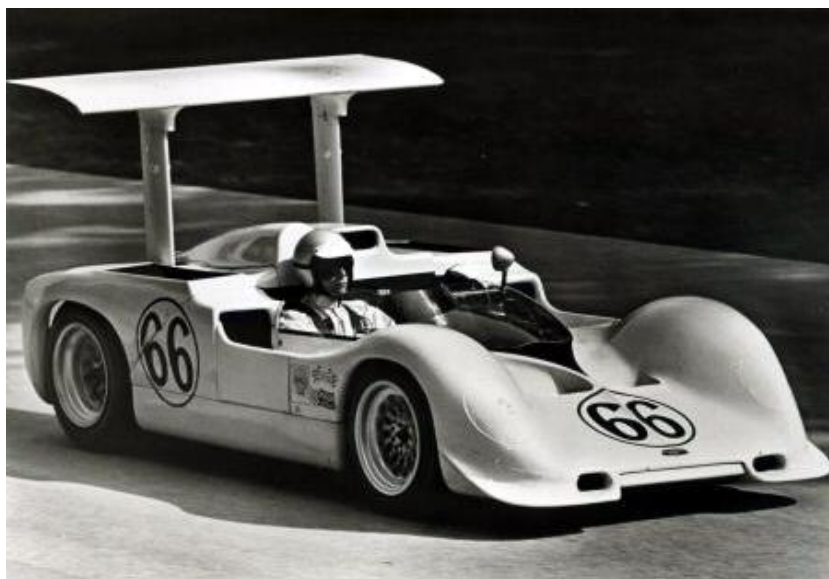
Imatge 1.10: Comparació de l'aerodinàmica de diferents models

²⁸ Al Circuit Carlos Pace de Interlagos, situat a Sao Paulo (Brasil), s'hi celebren el Gran Premi de Brasil de Fórmula 1 i GP2.

²⁹ Al Circuit de Montecarlo, situat a Mònaco, s'hi celebra el Gran Premi de Mònaco de Fórmula 1 i el de GP2. És un circuit famós pel seu traçat urbà, amb unes vies molt estretes on té més importància l'habilitat del pilot que la potència de la màquina.

2.L'AERODINÀMICA AL MÓN DE L'AUTOMOCIÓ

L' aerodinàmica, ha tingut una gran influència en els automòbils de competició. Ja sigui en la màxima categoria, la Fórmula 1, o altres com la Fórmula 3, Karts, Turismes, Wolrd Series by Renault, GT Open etc. El suport aerodinàmic ha jugat un paper crucial per millorar les prestacions, sobretot, en la velocitat del pas per corba i en la reducció de la distància de frenada.



Imatge 2.1: Chaparral 2E

Sobre els anys 60 es tendia a fer els cotxes el més afilats possible, reduint així, la resistència. També era normal fer els cotxes els més baixos possibles i així reduir l'àrea frontal. Tot això plegat, va permetre una velocitat punta molt punta elevada en recta, però que únicament permetia millorar el temps per volta, si s'aconseguia mantenir el rendiment a la corba. Això va propiciar que apareguessin els *spoilers* o alerons, ja que el fet de fer el cotxe tan baix, provocava que es crees una força de sustentació, és a dir, tot el contrari que el que es necessita a les corbes.

Com tots sabem, els avions porten ales que creen una força de sustentació superior al seu pes. Jim Hall va ser el primer a córrer amb alerons al seu cotxe, al seu Chaparral 2E, a Brighapton, Nova York, l'any 1956. Va ser el primer que va utilitzar aquestes ales dels avions, però invertides, i provocar *Downforce*

Automàticament es va adoptar aquesta idea a la F1. Va començar una gran revolució que es va anar instaurant en totes les categories automobilístiques.

El següent gran pas va ser a l'última part dels anys 70, quan un altre enginyer, Peter Wright, que treballava a l'equip Lotus de F1³⁰, va introduir "l'efecte terra" a la F1. Aquest concepte no era nou. No van ser els primers a descobrir aquest efecte. Primerament es van utilitzar turbines mogudes per motors auxiliars que succionessin l'aire de la part inferior del cotxe, utilitzant "faldones" per tapar els laterals i crear baixes pressions sota el vehicle. Però a la F1 no es podien utilitzar apèndix aerodinàmics mòbils, per això, el mèrit de Peter Wright va ser crear aquest efecte utilitzant únicament la velocitat del cotxe i donant una forma especial al fons pla del cotxe. En resum, va convertir la part central del cotxe en un ala invertida que creava baixes pressions. Això va provocar uns nivells de suport aerodinàmic no coneguts fins al moment i, per tant, unes superiors velocitats en el pas per corba i reducció de l'espai de frenada. És aquí on es comença a emprar el concepte de "cotxe ala"



Imatge 2.2: Mario Andretti, Lotus-Cosworth, Zolder, 1978.

Tots aquests invents revolucionaris es van anar traspasant a les categories automobilístiques inferiors, fins que, les autoritats esportives van prohibir la utilització d'aquests efectes obligant a utilitzar un fons pla entre les línies de l'eix davanter i posterior.

Va ser en aquest punt, on es van començar a utilitzar motors més potents. Comença el que es coneix com "l'era turbo". Això va incitar la col·locació d'apèndix aerodinàmics en la part posterior del cotxe perquè fos possible transmetre tota la potència dels motors a terra, que en alguns casos, van sobrepassar el 1000CV. Tots aquests apèndixs van propiciar, alhora, una gran resistència aerodinàmica.

³⁰ Ens estem referint a l'escuderia que va competir en el mundial de Fórmula 1 entre el 1954 i el 1994. No s'ha de confondre amb l'equip Lotus que competeix actualment a la F1.

Quan van tornar els motors aspirats de 3,5 litres amb potències més modestes, aquest “suport contra la resistència” va ser reconsiderat i els dissenyadors van començar a mirar al fons pla del cotxe. Van comprovar que era vital la forma que l'aire sortia per la part posterior d'aquest. Amb aquesta funció apareixen els difusors. Ocult en el final del fons pla, en la part posterior del cotxe, el difusor és l'element aerodinàmic més important. Crea baixa pressió sota el cotxe, proporcionant al voltant del 50% del suport, i de forma molt més eficient, gairebé sense crear resistència.



Imatge 2.3: Part posterior del Ferrari F2012

També es va detectar que la distància d'aquest respecte el terra era de gran importància. Per tant, en totes les categories es començaren a produir cotxes amb molt poca distància respecte el terra i amb amortidors durs per mantenir aquesta distància constant. Volent controlar aquesta distància, apareix la suspensió activa, ja que permetia controlar aquesta distància d'una manera més eficaç. Com anteriorment comentàvem, els apèndixs aerodinàmics mòbils estaven prohibits a la F1, i aquesta suspensió amb una funció aerodinàmica va ser prohibida. Un altre fet destacable és l'acció de veure els alerons en tres dimensions. Així es comencen a desenvolupar alerons amb formes més complexes que proporcionaven per suport aerodinàmic.

Després del terrible cap de setmana a Imola, l'any 1994, on Roland Ratzenberger i Ayrton Senna van perdre la vida, la FIA³¹ va reduir de manera significativa el suport aerodinàmic (Downforce) per reduir les grans velocitats per corba a les que s'estaven arribant. Una de les seves mesures va ser l'obligació d'utilitzar fons plans escalonats.

Per altra banda, els neumàtics, han anat avançant paral·lelament als avenços aerodinàmics. Es un aspecte important, ja que són els encarregats de transferir aquesta càrrega aerodinàmica.

³¹ FIA: La Federació Internacional de l'Automòbil és una Organització sense ànim de lucre amb seu a la Plaça de la Concòrdia de París, França, i Que INCLOU un més de 200 Organitzacions automobilístiques de 125 Països

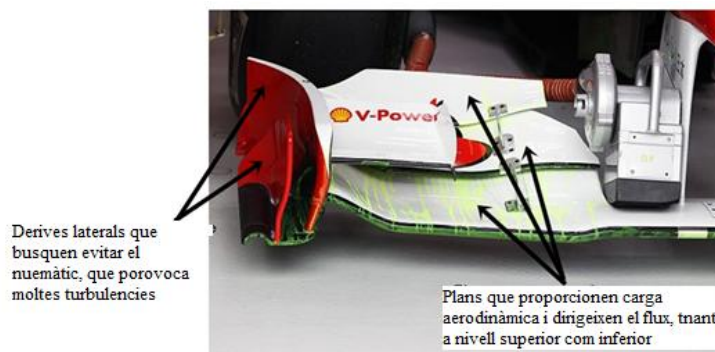
Es sol culpar a l'aerodinàmica de la falta d'avançaments, i en definitiva, d'espectacle. Quan un cotxe s'apropa a un altre a la corba, per intentar avançar-lo més endavant, aquest perd tanta carga aerodinàmica a la part davantera que es fa difícil poder avançar-lo.

Avui dia el concepte de "cotxe ala" esta molt interioritzat. Gairebé tot aficionat a aquest món, sap que si agafem un ala i l'invertim obtindrem *Downforce*. Aquesta força enganxa el cotxe a terra i permet augmentar la velocitat per corba. Això es fa utilitzant alerons, flaps, apèndix aerodinàmics...cosa que causa una gran resistència aerodinàmica, i per tant, molt poca velocitat en recta. Aquí trobem el nostre problema, tal com diu Daniel Gratacós³² a l'entrevista que vaig realitzar-li:

"Hi ha un problema, i és que no es pot separar la velocitat de pas per corba amb la velocitat punta. És a dir, si tens molta càrrega aerodinàmica, no tindràs velocitat punta, si tens poca càrrega aerodinàmica, tindràs molta velocitat punta. Perquè el Drag i el Downforce estan relacionats d'una manera directa. S'intenta minimitzar el Drag i augmentar la càrrega (és el que s'anomena l'eficiència aerodinàmica), però no poden separar-se, un comporta l'altra."

Clar esta que tot no serà igual per tots els circuits, i que, per a cadascun haurem de buscar aquesta eficiència d'acord les seves característiques. Per exemple, a Monza³³, un circuit amb moltes rectes necessitarem menys *Downforce* que a Mònaco, un circuit urbà amb molta corba.

Per altra banda, avui dia, si observem un cotxe un F1, trobarem molt poques línies rectes. A part de les restriccions en el reglament, s'intenten minimitzar les zones rectes per reduir les turbulències i mantenir l'aire pegat a la superfície, ja que l'aire, tendeix a seguir la forma de l'objecte que es troba. També es juga amb l'aire. Es col·loquen alerons per intentar que l'aire passi per on tu has previst que passi. Per aquesta raó, l'aleró davanter, té una gran importància. És la zona del cotxe que primer contacte amb l'aire i és l'únic encarregat en aquesta zona de proporcionar suport aerodinàmic.



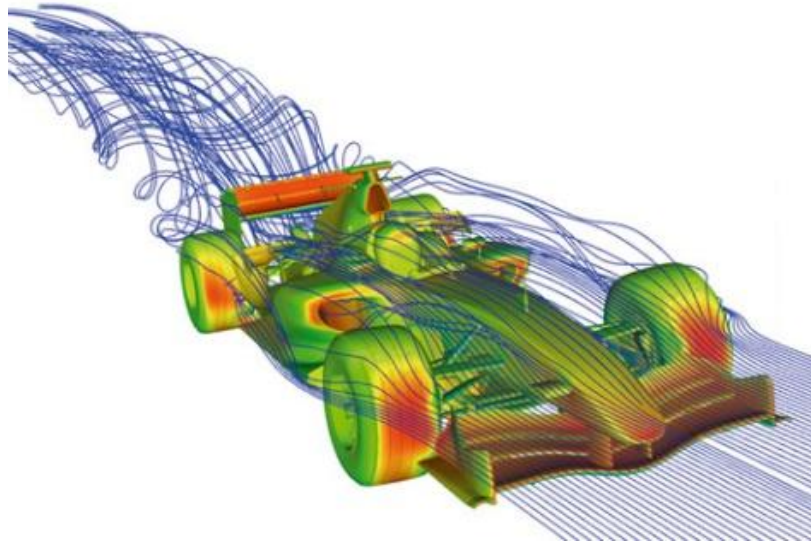
Imatge 2.4: Aleró davanter del Ferrari F2012

³² Veure nota de peu número 1.

³³ Al Circuit de Monza, situat a Monza (Itàlia), s'hi celebren el Gran Premi d'Itàlia de Fórmula 1 i GP2.

El circuit té una extensió de 5.793 m de pista destacant les seves llargues rectes i extremes xicanes. La corba anomenada Parabòlica, just abans de l'entrada a la línia de final de cursa és el revolt més ràpid del campionat de Fórmula 1.

Darrere de l'aleró davanter trobem 2 dels 4 noemàtics que porta un F1. Aquests és un dels grans mal de caps dels enginyers. Part de l'aire que arriba a aquests es para. D'altre continua però ja ha sigut alterat pel neumàtic, cosa que provocà que es converteixi en flux turbulent. (Ho podem observar clarament a la imatge 2.4) Això no passa en categories on es permet cobrir les rodes, com la recent Formula E³⁴ o la ja centenària Le Mans³⁵.



Imatge 2.5: Recorregut del flux i pressió que causa en F1

Abans s'utilitzaven alerons laterals (winglets) per incrementar la carga aerodinàmica. Actualment estan prohibits.

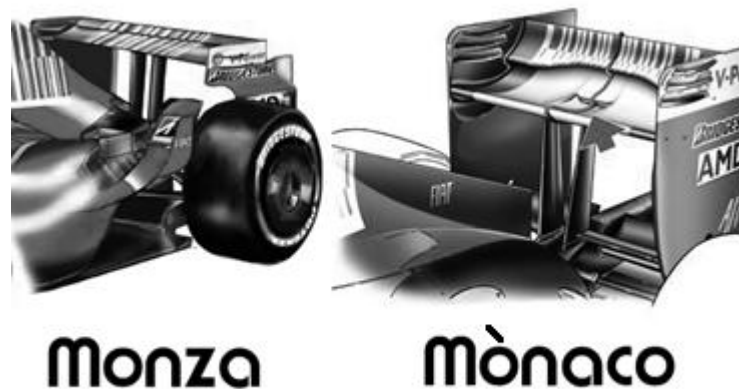
³⁴ La Fórmula E és una categoria de competició de monoplaques elèctrics organitzada per la Federació Internacional de l'Automòbil (FIA), creada amb la intenció de servir com a laboratori d'investigació i desenvolupament de vehicles elèctrics

³⁵ Un Prototip de Le Mans o l'anglès és la designació que se li dona a un tipus de cotxes per a una categoria d'esport prototips que es corre principalment a les 24 hores de Le Mans.



Imatge 2.6: Winglet del Renault de F1 (2008)

Els cotxes de Fórmula 1 tenen alerons posteriors des dels anys 60. Aquests produeixen suport aerodinàmic en les rodes del darrere per a un millor pas per corba, tracció i frenada. L'aleró posterior només produeix la meitat del suport que les rodes del darrere suporten, a causa de que l'altra meitat ho crea el difusor. Daniel Gratacós³⁶ m'ha afirmat que l'aire no sol arribar "horitzontal" a aquest aleró, i per tant es poden utilitzar angles d'atac més grans (Recordem que a més angle, més *lift*, però també més resistència). És de gran importància ajustar-lo a les característiques de cada circuit. No veurem el mateix aleró posterior a Mònaco, on necessitem molt suport aerodinàmic, que a Monza, on es tracta d'eliminar tota la càrrega aerodinàmica possible.



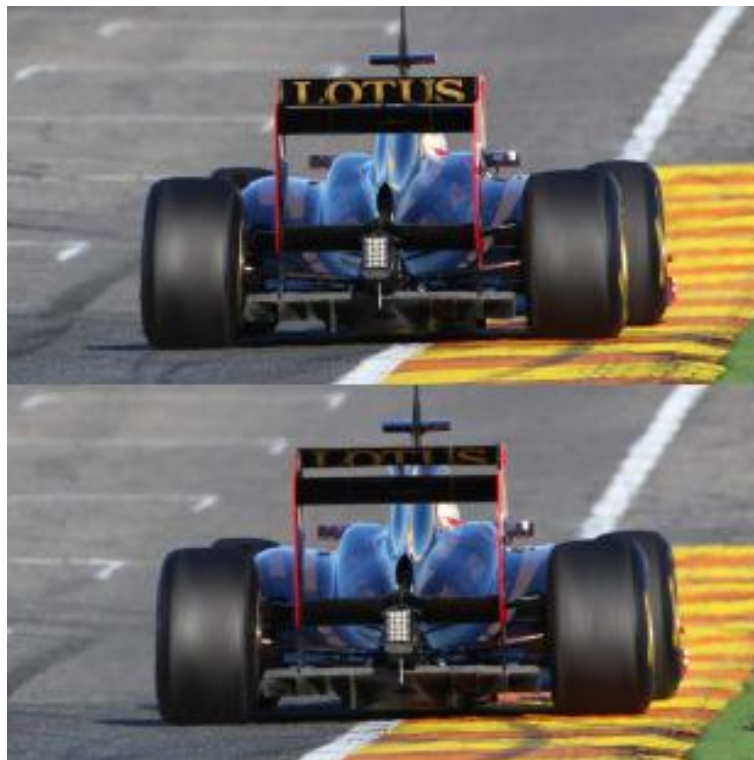
Imatge 2.7: Diferència entre alerons segons el circuit

³⁶ Veure nota de peu número 1.

Amb el propòsit de poder reduir la resistència aerodinàmica en les rectes va aparèixer l'aleró posterior mòbil, comunament conegut com DRS³⁷. És un dispositiu introduït en la temporada 2011 amb el propòsit de reduir la càrrega aerodinàmica del monoplaça i així augmentar la seva velocitat per facilitar els avançaments. Aquest sistema s'activa amb les mans encara que en el cas dels monoplaços de Ferrari es realitza amb els peus en un pedal situat al costat del fré.

Les condicions per utilitzar el sistema DRS en carrera són:

- Estar a menys d'un segon del cotxe que es trobi davant (poden ser doblegats) quan tots dos passin per la zona de detecció.
- Si plou, el director de cursa ha d'haver donat el seu consentiment per ser utilitzat.
- Han d'haver passat dues voltes des de l'inici de la cursa.



Imatge 2.8: Utilització del DRS

³⁷ DRS: Drag Reduction System

3. EL TÚNEL DE VENT

Un túnel de vent És una instal·lació on s'obté, un corrent d'aire rectilini, en una càmera d'assajos. Aquí es col·loca un model, generalment maquetes d'un objecte, ja sigui un F1, un camió,... En aquest *test section* es mesura l'efecte que l'aire té sobre el model.

A més a més, permet provar parts individuals d'aquest o tots a la vegada, cosa que ajuda a comprendre millor el comportament de l'aire sobre el model. Per tant, ens dóna resultats fiables, es clar sempre, dins d'un marge d'error que depèn dels avenços tecnològics aplicats, de la seva eficiència i de la grandesa i exactitud de la maqueta, ja que com més gran sigui, més s'acosta a la realitat.

Els primers túnels del vent van estar dissenyats per estudiar els moviments del fluid fonamental. El primer va ser construït per Gustav Eiffel³⁸. Posteriorment els germans Wright van ser els primers en utilitzar el túnel de vent per estudiar el comportament de l'aire a través de diferents superfícies. Aquest invent ha anat prenent més importància dia a dia, i actualment s'utilitza molt en camps com l'Aeronàutica o la indústria de l'automòbil.

Ha estat un gran invent, ja que permet estudiar com actua l'aire al interaccionar amb un cos en moviment, i gràcies al túnel de vent, podem estudiar-ho amb el model en repòs i l'aire en moviment.

3.1 Parts del túnel de vent:

Con d'acceleració: Part on es comença a accelerar l'aire gràcies a la contracció del túnel.

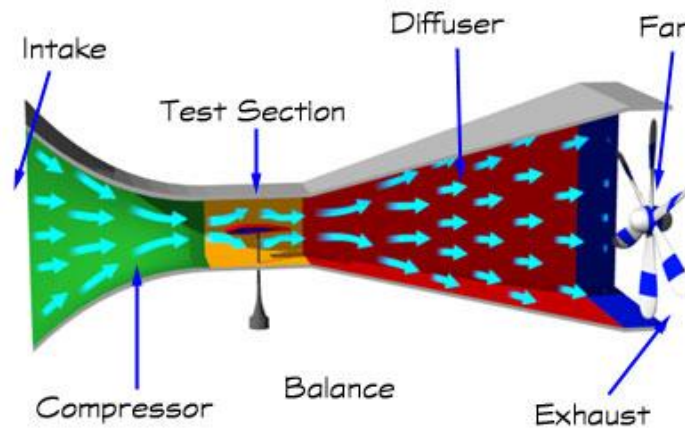
Camara d'assajos: Es pot considerar la part més important del túnel, ja que, és on col·locarem l'objecte i farem les mesures pertinents. És molt important que el flux d'aire que travessi aquesta càmera sigui el més uniforme possible.

Difusor: Quan l'aire surt de la càmera d'assajos, el difusor és l'encarregat de reduir la velocitat del flux.

Ventilador: És l'encarregat de crear el flux d'aire a una velocitat determinada, que amb l'ajuda de diversos aparells electrònics, es pot variar.

Sòl: Parts on el cotxe es sosté, per tant, és de vital importància. En l'actualitat aquests són rodants

³⁸ Alexandre Gustave Eiffel (1832 - 1923) fou un enginyer i arquitecte francès, especialista en estructures metàl·liques, com la Torre Eiffel.



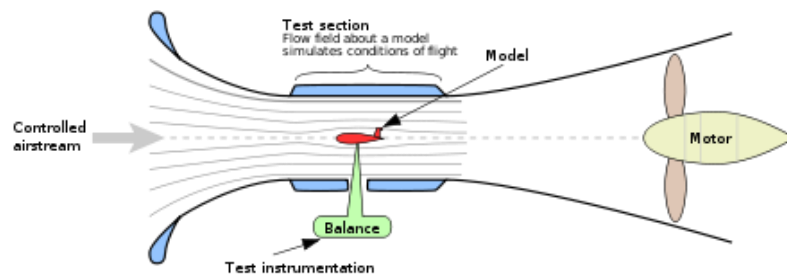
Imatge 3.1: Parts principals d'un túnel de vent

3.2 Tipus túnels de vent:

Els túnels de vent es poden classificar segons diferents criteris:

Segons la circulació d'aire al seu interior:

- **Oberts:** Es pren l'aire directament de l'atmosfera i després de fer-ho passar per la càmera d'assaig es retorna novament a ella.
 - Menor cost de construcció i manteniment.
 - Menys espai requerit
 - El refredament i la purga³⁹ del corrent d'aire no és necessari.
 - El flux és de mala qualitat. Remolins i turbulències elevats.
 - Consum de molta energia.
 - Alt nivell de soroll



Imatge 3.2: Túnel de vent obert

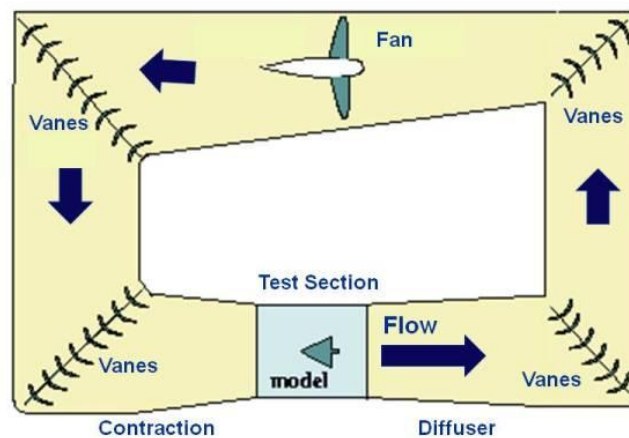
³⁹ Evacuar, extreure el fluid que pot dificultar el funcionament d'una màquina, d'un dispositiu, etc., o que pot dificultar o impedir la circulació d'un altre fluid per una canalització, etc

- **Tancats:** L'aire circula per un circuit tancat. Per tant, l'aire circula diverses vegades per la càmera, recuperant per mitjà d'un difusor seva energia fluida, abans d'arribar de nou a la zona on es troba instal·lat el difusor.
 - Alt rendiment
 - Baix nivell de turbulències
 - Col·locació de pantalles a les cantonades perquè l'aire giri
 - Es pot recuperar l'energia
 - Ocupa més espai, i per tant, més costos.

National Aeronautics and Space Administration



Closed Return Wind Tunnel



www.nasa.gov

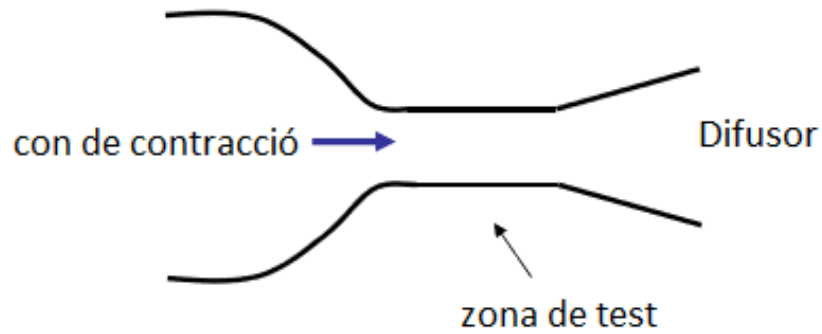
Imatge 3.3: Túnel de vent tancat

En aquest tipus de túnel, quan l'aire passa per la zona de test, només és necessari que el ventilador afegeixi l'energia perduda pel *Drag* (fricció de l'aire amb el model) i de la fricció amb les parets. És una manera de reutilitzar l'aire i una forma més eficient d'utilitzar l'electricitat que utilitzem per conduir l'aire al llarg de tot el túnel de vent.

Aquesta fricció amb les parets, repeteixo un altra vegada, s'ha de tenir molt en compte perquè pot provocar calor i danyar les parets. En els túnels més sofisticats això es soluciona col·locant paletes de refrigeració perquè la temperatura es mantingui constant.

Segons el tipus de *test section*:

- **Zona de test tancada:**
 - Més uniformitat i estabilitat del corrent.
 - Sistemes de suport menys sofisticats.
 - Requereix més correccions a causa dels efectes de frontera.
 - Els efectes de bloqueigs són més crítics



Imatge 3.4: Zona de test tancada

- **Zona de test oberta:**
 - Permet provar models més grans.
 - Reducció dels efectes de la capa límit
 - Més inestabilitat del flux
 - Menor longitud de la zona de test
 - Requereix més energia.



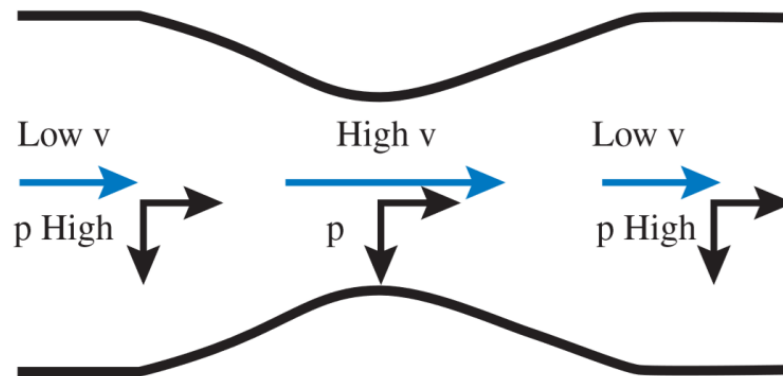
Imatge 3.5: Zona de test oberta

Segons la velocitat de l'aire al seu interior

- **Hipersònic:** Número de Mach entre 5 i 10.
- **Supersònic:** Número de Mach entre 1,2 i 5.
- **Transsonic:** Número de Mach entre 0,8 i 1,2
- **Túnel de vent Subsònic:** Número Mach menor a 0,8.

Estudiarem amb més detall aquest tipus de túnel, ja que és el més utilitzat. És l'emprat a la F1 i el que jo utilitzaré a l'universitat Politècnica de Terrassa.

Aquest tipus de túnel treballa com un venturi, és a dir, es basa en el principi de Bernoulli: hi ha una relació entre la velocitat i la pressió quan no s'afegeix energia al flux.



Imatge 3.6: Variació de pressions i velocitat en un túnel de vent subsònic.

L'aire entra per la part anomenada **cross section**. A continuació l'aire en la zona de **test section** on es pot observar com el radi i l'àrea de la secció transversal⁴⁰ disminueix. Això causa que la velocitat del fluid augmenti i que la pressió disminueixi (són inversament proporcionals). La velocitat en aquesta zona és aproximadament 5 vegades la velocitat del ventilador. Quan l'aire travessa aquesta zona, torna a l'estat inicial, és a dir, es redueix la velocitat.

Cal tenir molt en compte que no podem contraure i expandir l'aire arbitràriament, ja que l'aire s'ha de contraure sense problemes per evitar l'efecte de les parets. Si no tenim en compte aquesta observació, ens podem trobar dos casos:

- Contracció molt ràpida: Les parets actuarien com murs quan l'aire intenta contraure's.

⁴⁰ Secció transversal: Àrea que es crea quan un pla talla perpendicularment a un sòlid

- Expansió molt ràpida: L'aire no és capaç de seguir les parets per tant, aquest es separaria i causaria acumulació de pressió, que reduiria l'efectivitat del túnel considerablement.

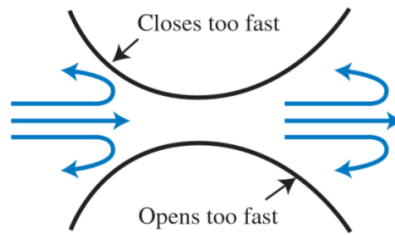


FIGURE 7.4 A venturi that contracts and expands too quickly.

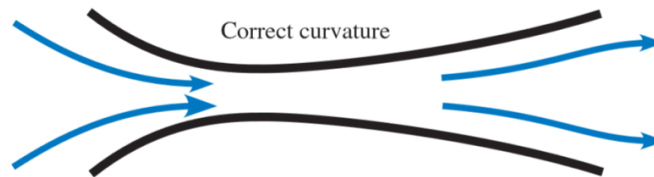


FIGURE 7.5 How a venturi wind tunnel should work.

Imatge 3.7: Com ha de funcionar un túnel de vent

El gran problema d'aquest tipus de túnels de vent és que l'energia, per dir-ho d'alguna manera, posada a l'aire per mitjà del ventilador no es pot reutilitzar. Això crea una ineficiència, ja que hem de considerar que l'ús d'aquests aparells és bastant car.

3.3 Túnel de vent a la F1

Per explicar aquest punt, agafaré com a referència el túnel del vent de l'equip Sauber⁴¹ de F1. És un dels pocs equips que ha explicat i ha donat dades del seu túnel de vent. Em de tenir en compte que es una eina clau actualment a la F1 i per tant tot aquest tema està rodejat de molt secretisme.

A l'equip Sauber tenen col·locat el ventilador enfront de la zona d'assajos. Aquest ventilador proporciona 3 MW (3.000.000W) d'energia, pot generar un impuls de fins 5 tones a màxima

⁴¹Sauber és un equip de Fórmula 1 amb seu a Hinwil, Suïssa. El nom Sauber ve del propietari i director de l'escuderia Peter Sauber. En aquest cas ens referim al equip Sauber després de la recompra (a BMW) al 2010

càrrega i pot moure fins a 1,2 milions de litres d'aire. Tot això permet moure l'aire a uns 80m/s uns 270km/h.

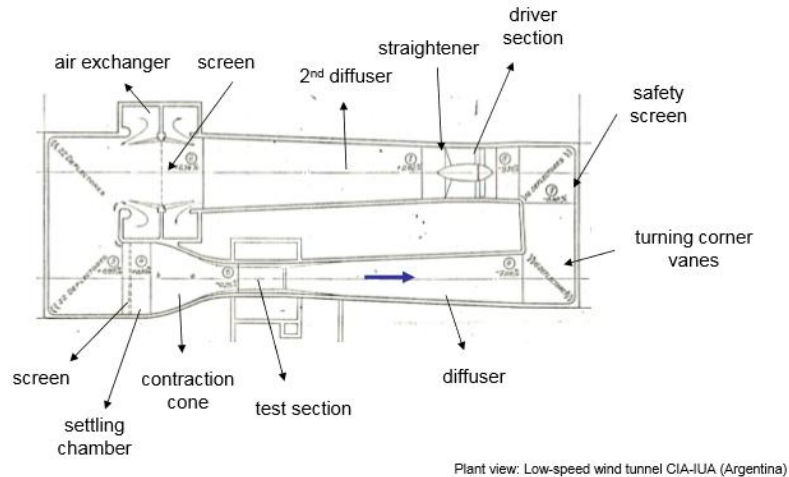


Driver section: low-speed wind tunnel CIA-IUA (Argentina)

Imatge 3.8: Ventilador d'un túnel de vent

El ventilador està situat en una gran massa de formigó, ja que degut a la seva gran potència, arriba a causar vibracions en l'estructura del túnel. A més a més, es col·loquen molles i amortidors. Tot hi això, mai estarà perfectament equilibrat. Per aquesta causa- la base del ventilador és independent de la resta de túnel del vent, per evitar que aquestes vibracions es transmetin a la resta del túnel i que inclòs, puguin moure el model amb que s'està treballant.

Començant amb la part més aerodinàmica, el que volem que hi hagi un flux d'aire que vagi en una direcció. El ventilador crea aquest flux, però degut a les seves aspes, aquest crea un aire turbulent que tendeix a girar. Per aquest motiu, just després del ventilador es col·loquen paletes anti-rotació.



Imatge 3.9: Parts d'un túnel de vent

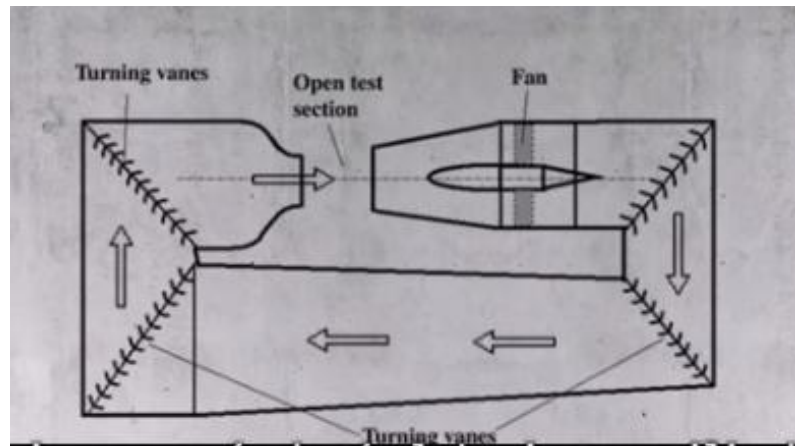
A continuació, el flux d'aire s'expandeix fins que arriba a la zona de test, on es contrau i després es torna a expandir. A més velocitat més incrementa el fregament de l'aire amb les parets, és a dir, hi ha més capa límit. Però d'altra banda interessa que, a la zona de test, l'aire vagi a una gran velocitat, ja que les forces aerodinàmiques augmenten al quadrat de la velocitat, això proporciona millors resultats. Si mantinguéssim tot el circuit del túnel amb l'amplitud de la zona de test, hi hauria una major concentració de capa límit, per això, quan l'aire travessa la zona de test, el circuit s'expandeix, ja que quan més ample sigui, menys capa límit i fregament hi haurà. Això es un dels paràmetres que te molta importància en la construcció en el túnel de vent i que contribueix en gran mesura al seu encariment.

Degut a la gran potencia del ventilador, l'aire es mou a una gran velocitat, les molècules friccionen entre si i es converteix en calor. Per tal de no perdre aquesta energia s'utilitzen grans **radiadors**.

Altre factor a tenir en comte es que l'aire ha de passar per les corbes del circuit del túnel. Per això es col·loquen **paletes giratòries** que ajuden a l'aire a girar. Sense això es perdria una gran quantitat d'energia.

Abans de arribar a la zona de test, trobem la **zona de sedimentació**. Aquí l'aire s'expandeix considerablement ràpid, i generalment es troba amb un bloquejador, en aquest cas, el radiador. A continuació l'aire passa per un *panal*, una sèrie de tubs molt fins i llargs, on s'eliminen gairebé qualsevol remoli d'aire que perduri al flux de l'aire. Just després d'aquests tubs, es col·loquen unes mosquiteres, per evitar que entri qualsevol insecte. En conclusió, tenim els *panals* que divideixen les turbulències i després les malles (mosquiteres) que les divideixen encara més, en turbulències més petites. A continuació, l'aire es contrau per entrar en la zona de test. Aquesta contracció permet disminuir encara més les turbulències. Per tant tota aquesta sèrie de trucs, permeten controlar les turbulències al túnel de vent.

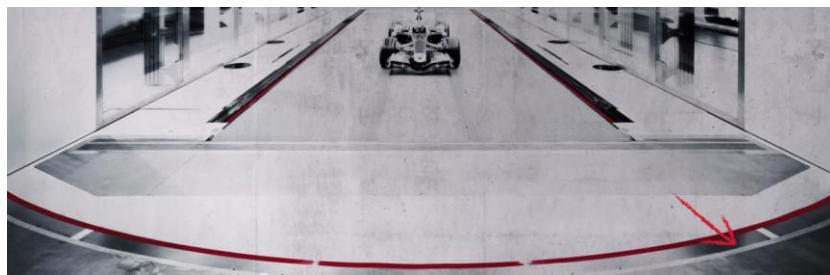
S'acostuma a treballar amb la zona de test totalment tancada. En algunes ocasions s'obren un parell de campanes en la zona posterior o inclòs es pot convertir un jet obert de $\frac{3}{4}$.



Imatge 3.10: jet obert de 3/4.

En aquest tipus de túnel el final de la zona de test s'obre. L'aire troba el seu propi camí fins arribar a una campana al final de la zona de test. Quan aquesta està tancada l'aire que passa per sobre del cotxe s'accelera una mica més del que ho faria en realitat. Quan més oberta estigui, més semblant serà aquesta acceleració a la real. La conseqüència d'obrir aquesta zona, serà l'incrementació de vibracions i de turbulències. Per tant, cada equip tenint en compte aquests factors, tria una opció.

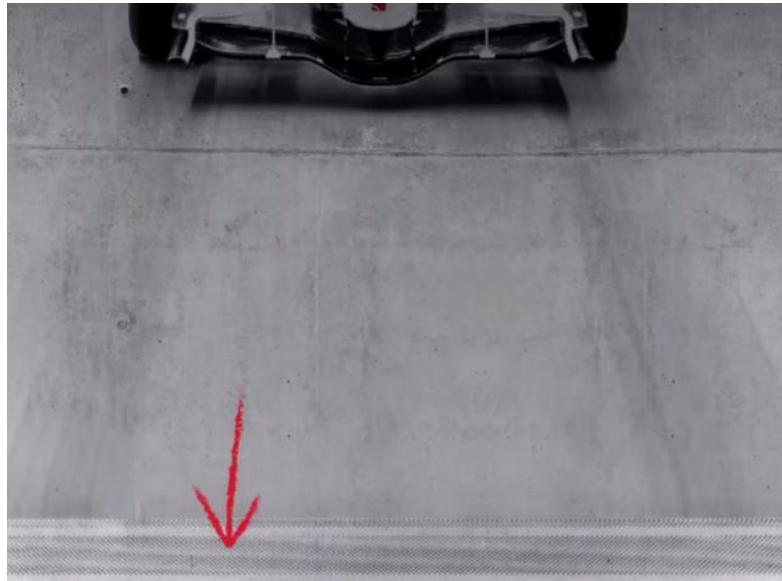
Un altre gran tecnologia que es pot observar a la zona de test és la paret contornejada. És com donar-li la forma al túnel de vent iguala a la que l'aire formaria si el model de prova fos permanent o amb canvis molt petits. Per això si vols rotar o moure el cotxe, has de canviar aquesta paret. Aquesta és una tecnologia que s'ha desenvolupat al món de l'automoció i s'ha traslladat al de l'aviació. Un altre cas són les tecnologies per reduir la capa límit. Com hem pogut veure anteriorment, quan l'aire travessa una superfície, va augmentant la capa límit degut a la fricció de l'aire amb la superfície. Això succeeix al sol del túnel de vent però no a la realitat, ja que quan el cotxe es a pista, és aquest el que es mou, no l'aire⁴². Una forma de eliminar-la al túnel de vent és creant un pas just abans de la zona de test perquè absorbeixi l'aire que, degut a la fricció amb el terra, va més lent.



Imatge 3.11: Pas que absorbeix aire

⁴² No succeeix a la pista, perquè és el cotxe el que va en moviment. Per tant, cal destacar, que tant al túnel com a la pista, és crea una capa límit sobre la superfície del cotxe.

També es pot col·locar una mena de forats que absorbeix aire cap avall i augmenta la velocitat d'aquest a la superfície.



Imatge 3.12: forats que absorbeixen aire cap avall

Just a continuació trobem la pista mòbil, que es mou a una velocitat sincronitzada amb la velocitat del aire. Per tant, en aquest punt ja no hi haurà creixement de capa límit.

Sobre aquesta pista mòbil es troba el model. Aquest model s'ha de subjectar, i el propòsit es que la subjecció, provoqui la menor interferència aerodinàmica possible. La subjecció que menys interferència aerodinàmica provoca en el flux del voltant del cotxe és una subjecció vertical, des de el sostre del túnel, fins a un punt mig del model.



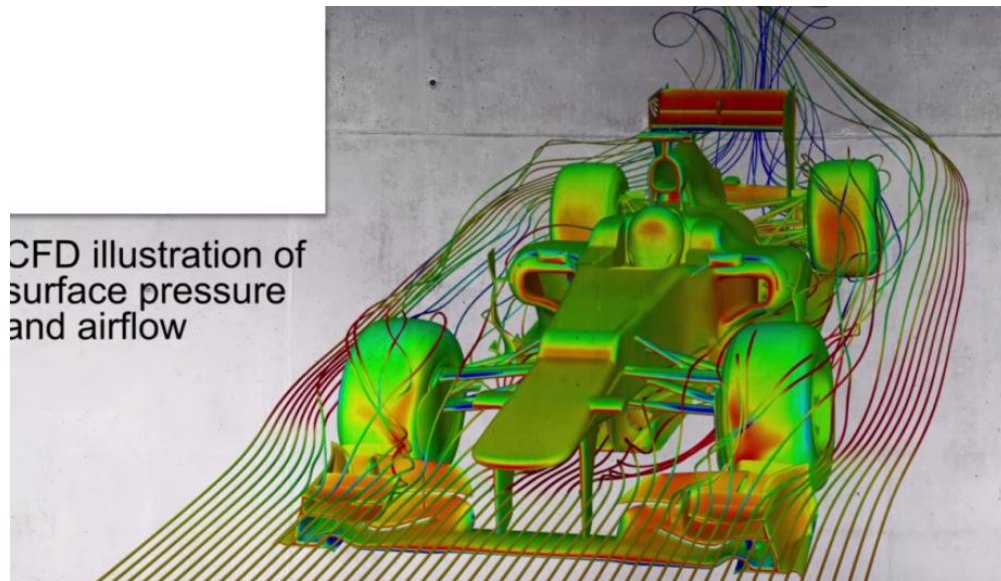
Imatge 3.13: Subjecció del model

Aquest model també s'ha de ser suportat per el terra. El sistema que el suporti ha de ser capaç de moure-ho de dalt a baix i de dreta a esquerra i esquerra a dreta. S'ha de anar amb compte de no moure-ho bruscament.

Sobre aquest suport inferior es troba una cinta giratòria que fa que les rodes es moguin. Els neumàtics be poden anar muntats en el model o incorporar-los amb barres. La qüestió es provar les dos opcions i triar la que menys problemes doni. Aquests neumàtics son aprovionats per Pirelli i tenen la seva pròpia tecnologia. Tenen una diferencia de durabilitat amb els reals, el que suposa, un problema per comparar resultats.

Tornant a la cinta giratòria, podem dir que ha sigut punt de moltes investigacions. Primerament funcionava pràcticament com una cinta transportadora, només que amb la cinta ben tensionada i un motor més potent. Amb aquest sistema, la cinta ara succionada (xuclada) cap a dalt sobretot per l'aleró davanter fins que aquesta pràcticament s'enganxava a aquest i es perdia el rendiment aerodinàmic. La solució, per tant, era, succionar la cinta cap avall. Es quan es comencen a utilitzar les cintes sintètiques. El problema de succionar la cinta cap avall es que aquesta frega amb el terra. Degut a això, la seva durabilitat decreix, es necessita un motor més potent i en alguns casos, la cinta s'arribava a fondre. Per aquest motiu van haver de proporcionar refrigeració a la cinta. Tot seguit una empresa americana va revolucionar aquest món i va introduir una nova tecnologia. Van fer una cinta d'acer molt polida suportada per rodets d'aire. La fricció disminueix notablement i per tant, també, els cavalls necessaris per moure la cinta. Tota aquesta tecnologia s'ha anat incorporant al món aeroespacial on serveix per fer proves d'enlairament i aterratge.

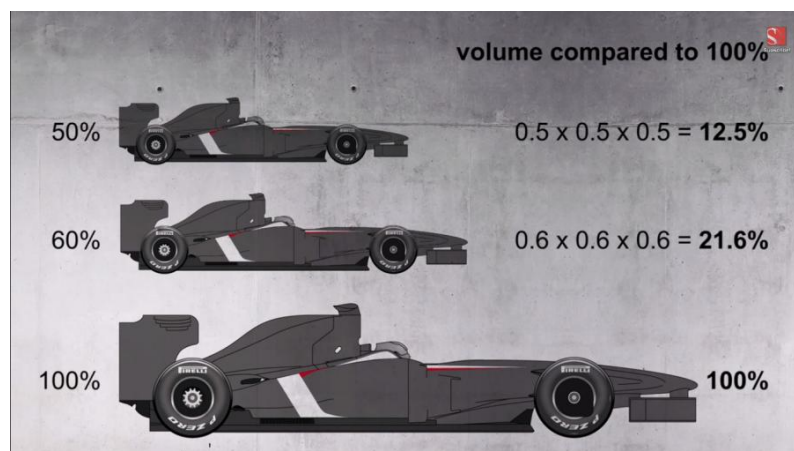
Per mesurar les forces aerodinàmiques s'utilitzen tot una sèrie de sensors i sistemes. Un d'ells és la cel·la de càrrega. Son simplement balances repartides per diferents parts del cotxe. Així podem mesurar, per exemple, la força que rep del lateral, de la part posterior o dels neumàtics. Dins el model també podem trobar múltiples sensors de medició, ja siguin sensors de posició, de pressió... També hi ha sistemes de medició per el moviment del aire, ja que detecta la direcció, velocitat i el nivell de turbulència de la partícula d'aire. Tot això permet entendre millor el comportament del flux al voltant del model.



Imatge 3.14: Simulació en CFD

Una vegada l'aire ha passat pel la secció de test, el difusor és l'encarregat de recuperar part de l'energia cinètica (un 90%). Es necessita una recuperació eficient per reduir la potencia del ventilador i així reduir costos. S'utilitzen seccions transversals circulars ja que les rectangulars tendeixen a incrementar la capa límit. D'altra banda, la longitud ha de mantenir tan petit com sigui possible per reduir les pèrdues per fricció. Cal tenir en compte que tots aquests elements que apareixen al túnel de vent d'un equip de F1 també estaran a la resta de túnels de vent del món de l'aeronàutica. (Això si, sempre que siguin subsònics)

Les proves en pista son les més realistes però hi ha diversos inconvenients com poden ser el clima o el comportament constant del conductor i totes les situacions canviants. Tot això fa que costi més que altres mètodes de investigació. Provar amb models de prova es menys costos, principalment, perquè son més petits. Són al voltant d'un 60% de la mida real, llavors el material per fabricar-los es redueix notablement.



Imatge 3.15: Comparació de Volum

Les noves regulacions han prohibit molts dels mètodes de investigació que els equips de F1 solien utilitzar:

- Test aerodinàmic en línia recta
- Test al túnel de vent amb model a escala 1:1

La principal raó d'aquestes prohibicions és el cost que comportaven. Hi ha equips que no s'ho podien permetre i per tant, els que si podien, partien amb avantatge.

Per traduir les forces del model a les forces reals del cotxe s'ha de multiplicar per el quadrat de la diferencia d'escala. Es a dir:

De 60% a 100%: $0,6^2 = 36\%$ de les forces reals.

De 100% a 60% haurem de fer la inversa:

$$\frac{1}{0,36} = 2,7778 \times \text{Foerçes del model al 60\%}$$

En resum, la investigació aerodinàmica avui dia es redueix al programa de simulació CFD i al túnel de vent. Amb el CFD només es pot fer servir una quantitat determinada de "computos" mentre s'estan fent els càlculs. O el que es el mateix, "hores vent", es a dir, la quantitat de temps que el model esta en el túnel amb el vent el marxa. Entre el CFD i el túnel han de sumar un límit de 30 unitats. Com podem veure tot això esta limitat per la FIA, ja que abans d'això hi havia equips que en una setmana arribaven a simular el que serien 300 carreres.

Altres limitacions impostes són:

- Test en pista
- Prohibició dels tests en línia recta i a escala 1:1 al túnel
- Màxima mida del model: 60%
- Velocitat màxima: 50m/s
- Carreres màximes per setmana: 80
- Hores màximes al túnel: 60 hores per setmana
-

Donades aquestes limitacions els equips solen gastar 15h de túnel i 15 "teraflops" o "computos" al CFD el que sumen el límit de 30 unitats diàries. Cal dir que aquestes 30 Unitats s'han vist reduïdes a 25 al 2015. També les 80 carreres per setmana a 65. Com s'ho reparteixin també dependrà molt dels recursos de cada equip i de on es sentin més forts.

Aquestes limitacions el que pretenen es igualar als equips més modestos amb túnels més modestos amb els equips amb túnels més desenvolupats i amb més pressupost. El que els perjudica és que tenen túnels per provar a velocitats, nombre de Reynolds i Mach, majors, i no ho poden fer.

4. PROCÉS DE DISSENY I CONSTRUCCIÓ

Els equips gasten milions de diners en la investigació de túnels de vent. Però, com es pot entendre això amb la gran coneixement dels perfils alars avui dia y amb la gran quantitat de programes de simulació o pàgines web (a nivell més baix) que hi ha? Doncs amb tota la teoria apresada emprenc l'inici de la recerca a aquesta pregunta.

El procés de disseny consta bàsicament de tres parts: Primerament es dissenya i busca un l'aleró que ofereixi una millora al que ja es té. Si els programes de simulació ho corroboren, és reuneixen els caps del equip per discutir si ho porten al túnel de vent. Si es porta, es fan les construeix i és fan les proves pertinent al túnel, que donarà el veredict final. Si els resultats són positius, tal hi com ho expressaven els programes de simulació, es porta a pista.

En el meu cas, començarem el procés de disseny dels alerons, fixant-nos en les limitacions del túnel de vent. Calcularem el C_l i C_d a una velocitat màxima y una velocitat mínima per veure si l'aleró està dins les limitacions del túnel. Seguidament comprovarem si obtenim els mateixos resultats al túnel de vent que, als càlculs i als programes informàtics. Per últim calcularem el C_l i C_d necessaris per al circuit de Catalunya i comprovarem si algun dels resultats s'acosta, cosa difícil tenint en compte les limitacions del túnel.

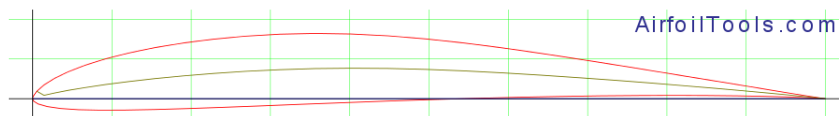
4.1 Procés previ al túnel de vent

4.1.1 Escollir els perfils

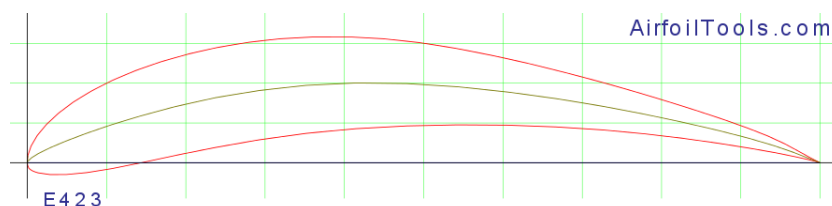
Amb l'ajuda de professionals en la matèria escollim dos perfils diferents dins les limitacions del túnel de vent de l'UPC de Terrassa. La cel·la de càrrega admet com a mínim 1N i com a màxim 10N. La velocitat màxima és de 30m/s.

Escollim els dos perfils següents:

- Eppler 174



- Eppler 423



4.1.2 Càlculs previs

L'amplada i la llargada de l'aleró estan regits per una proporció anomenada relació d'aspecte.

Recordem que la relació d'aspecte, és la proporció entre la seva amplada i la seva altura o llargada. Es calcula dividint l'amplada per l'alçada (o llargada) de la imatge visible en pantalla, i s'expressa normalment com «X: Y».

En el cas dels alerons és:

$$AR = \frac{E}{c}$$

E: Amplada de l'aleró - c: corda

Agafem una E que no sigui massa petita. Amb l'E posem una relació d'aspecte i obtenim la corda. Posteriorment haurem d'anar canviant a aquest valors si per un aleró molt petit ens dona un lift massa gran, ja que a l'hora de tallar-lo serà més complicat.

Mesurarem les forces aerodinàmiques a una velocitat màxima i una velocitat mínima, el que ens donarà un Reynolds màxim i mínim.

$$Re = \frac{\rho \cdot c \cdot v^2}{\text{viscositat}}$$

p: densitat de l'aire - c:corda - v: velocitat - viscositat: viscositat de l'aire

Escollim les especificacions del perfil amb el número Reynolds corresponent i agafem el Cl que s'acosti al màxim que pot per la cel·la de carrega (10 Newtons). Amb aquest Cl, bé amb l'ajuda de la gràfica o amb la taula de dades que proporciona la web, agafem el Cd corresponent a aquest Cl.

XFOIL		Version 6.96					
Calculated polar for: E174 (Dicke 8.92%)							
1 1 Reynolds number fixed			Mach number fixed				
xtrf =	1.000 (top)			1.000 (bottom)			
Mach =	0.000	Re =	0.100 e 6	Ncrit = 9.000			
alpha	CL	CD	CDp	CM	Top_Xtr	Bot_Xtr	
-8.250	-0.3385	0.09758	0.09291	-0.0306	1.0000	0.0787	
-8.000	-0.3479	0.09620	0.09167	-0.0343	1.0000	0.0799	
-7.750	-0.3606	0.09473	0.09035	-0.0398	1.0000	0.0805	
-7.500	-0.3311	0.08834	0.08390	-0.0324	1.0000	0.0847	

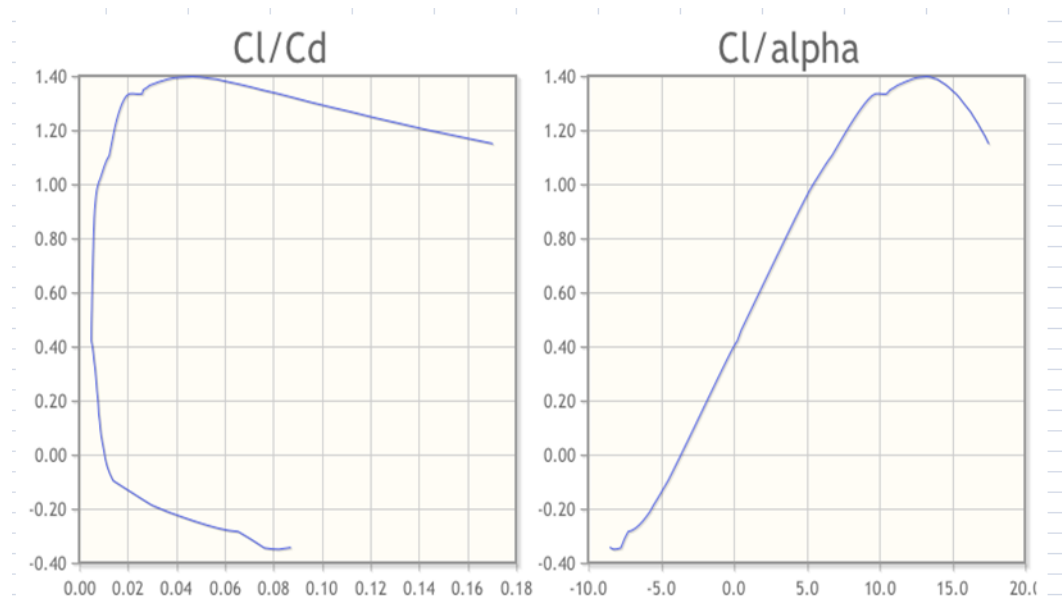
Imatge 4.1 Exemple de la taula de dades (Aquesta taula continua a la web)

Amb totes aquestes dades podem calcular per a una velocitat màxima (Reynolds màxim) el C_l màxim i un C_l qualsevol i a una velocitat mínima (Reynolds mínim) un C_l màxim i un C_l qualsevol.

Eppler 174:

Densitat aire	1,225 kg/m ³	Eppler 174			
viscositat	1,85E-05 Pa s	C_{lmax}	1,4	C_{dmax}	0,06
v.max (Tunel)	25 m/s	C_{lavg}	0,4	C_{davg}	0,01
v.min(Tunel)	10 m/s				
E	0,195 m	V_{max}			
Corda	0,065 m	L_{max}	D_{max}	L_{avg}	D_{avg}
Area	0,012675 m ²	6,7930078	0,2911289	1,9408594	0,0485215
AR	3				
Re Max	2,70E+06	V_{min}			
Re Min	4,31E+05	L_{max}	D_{max}	L_{avg}	D_{avg}
		1,0868813	0,0465806	0,3105375	0,0077634
Eppler 174	Re = 1e6				

Taula 4.1: Càlculs l'Eppler 127



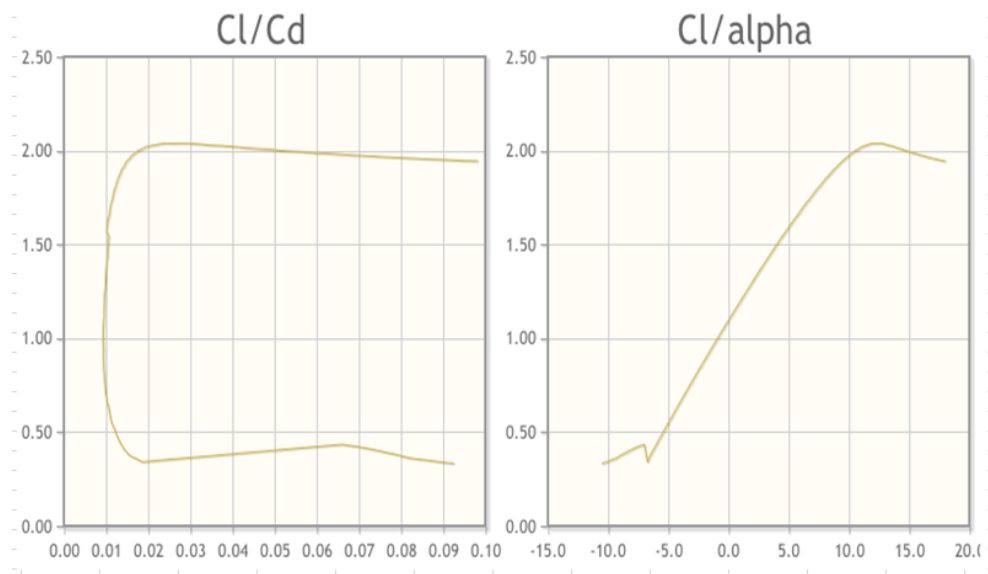
Gràfica 4.1: Gràfiques C_l/C_d i C_l/α de l'Eppler174

Posteriorment també farem aquest perfil més gran per poder-ho tallar millor. Incrementarem la seva densitat relativa un 60%. L'Eppler 423 també ho farem així pel mateix motiu.

Eppler 423:

Densitat aire	1,225	kg/m ³	Eppler 174			
viscositat	1,85E-05	Pa s	Clmax	2	Cdmax	0,05
v.max (Tune	25	m/s	Clavg	1	Cdavg	0,01
v.min(Tunel	10	m/s				
E	0,195	m	Vmax			
Corda	0,065	m	Lmax	Dmax	Lavg	Davg
Area	0,012675	m ²	9,70429688	0,24260742	4,85214844	0,04852148
AR	3					
Re Max	2,70E+06		Vmin			
Re Min	4,31E+05		Lmax	Dmax	Lavg	Davg
			1,5526875	0,03881719	0,77634375	0,00776344
Eppler 423	Re = 1e6					

Taula 4.2: Càlculs l'Eppler 423



Gràfica 4.2: Gràfiques Cl/Cd i Cl/Alpha de l'Eppler 423

4.1.3 Construcció dels alerons

Material:

- Poliespan dur
- Cartró Ploma
- PVC

Eines:

- Font D'alimentació
- Fil de Níquel Crom
- Broca
- Peu de rei
- Punxó
- Tisores
- Cúter
- Xinxetes

Procés:

1º- Crear plantilles:

Imprimim els perfils. A continuació els posem sobre el cartró ploma⁴³ i resseguim la silueta. Per últim en tallem dos amb l'ajuda del cúter o tisores. Cal recalcar que les plantilles s'han de fer, si no amb cartró ploma, amb un material que permeti clavar posteriorment, xinxetes.



Imatge 4.2: Plantilles col·locades al poliespan

⁴³ No es necessari que sigui cartró ploma. És pot fer servir cartró normal o alguna cosa per l'estil que serveixi per fer les plantilles.

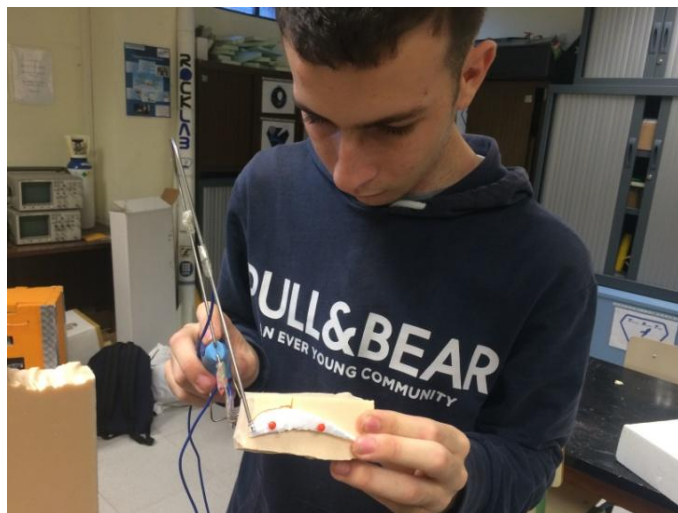
2º- Tallar el perfil:

Agafem la placa de poliespan i col·loquem a cada cara, amb xinxetes (clavades ben rectes)⁴⁴ i de manera que coincideixin, les dos plantilles. Connectem la font a la pistola amb el fil de níquel crom que, amb el corrent de la font es calenta, i talla el poliespan. Podem anar variant la intensitat de la font si talla massa lent o veiem que es comença a cremar una mica el fil.



Imatge 4.3: Procés de tallar els alerons

Primerament tallem un quadrat petit que contingui a cada cara les plantilles. Això ens permetrà apurar i equilibrar amb més precisió les plantilles a cada cara. Es una feina molt delicada, per que comporta gran concentració , precisió i molta practica.



Imatge 4.4: Procés de tallar els alerons

⁴⁴ Si no les clavem rectes podem tenir problemes quan passem el fil calent, ja que aquest s'encallarà,

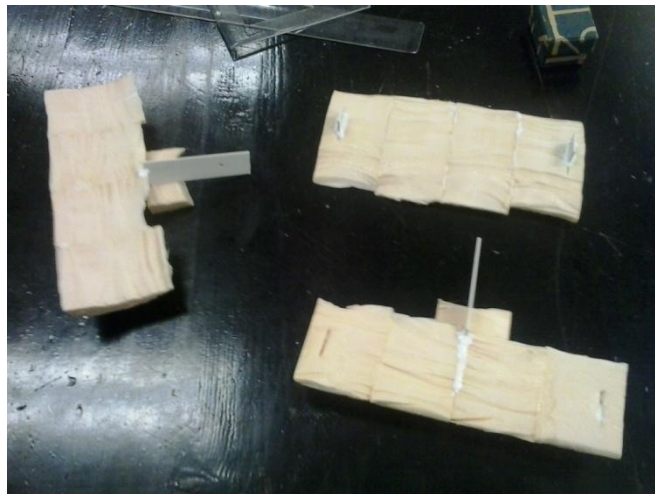
3º- Llimar els Perfils:

Per acabar de perfeccionar la forma dels alerons millor fer-ho amb la llima, però, amb molta cura de no menjar-se l'aleró.

4º- Creació de les subjeccions:

Em de crear tres subjeccions per subjectar el perfil en el túnel de vent. Dos a cada extrem i una en mig tal hi com mostra la imatge. Les 2 subjeccions laterals aniran separades per una distancia de 18cm (9cm respecte el centre cada una). Una vegada mesurada aquesta distancia les col·loquem al mig de l'amplada. Com a material escollim tires de PVC⁴⁵ ja que es un material que és fàcil de tallar i de treballar. A continuació, amb les tisores tallem dos tires d'aproximadament 2cm. Seguidament amb el cúter fem una incisió al poliespan. Aquí inserim cola blanca⁴⁶ i a continuació les dues subjeccions.

Seguidament mesurem la meitat del perfil, tant de llargada com alçada. Des d'aquest punt, ha de mesurar 10 centímetres fins el forat de la subjecció del mig. Per tant, mesurem que ha de fer la subjecció per arribar a aquesta mesura el forat. Quan la tinguem mesurada la tallem i fem el forat amb una broca, la menys gruixa possible, on faci 10cm des de el centre de l'aleró. Per fer el forat amb la broca bé podem utilitzar un peu de rei o posar baix la tira de PVC fusta. És aconsellable fer-la més prima perquè així sigui menys molesta. No seria gens interessant que pertorbés molt d'aire ja que llavors no sortirien valors molt fiables. Per evitar això podem fer-la més prima amb les tisores. Per últim la col·loquem amb cola blanca i ho deixem assecar.



Imatge 4.5: Procés de pegar les subjeccions

⁴⁵ No es necessari que siguin de PVC. És més fàcil de tallar però es recomanable un material més fi, si hi ha la possibilitat.

⁴⁶ Cal anar amb compte, perquè segons quin tipus de producte utilitzen, pot corrompre el poliespan.

5° Cobrir l'aleró amb paper de plata:

Quan totes les subjeccions estiguin ben pegades és hora de posar el paper de plata. Això ens permetrà tenir una superfície més llisa i així poder eliminar, o millor dit, dissimular, les disconformitats que hagin quedat al tallar-lo amb el fil calent. Em de anar amb cura de estirar molt bé el paper de plata per tal de que no quedin bosses d'aire. L'ideal és que quedi tot ben llis. Si és necessari, llimem la vora de sortida i col·loquem un cartolina perquè quedi tot igual i prim, tal i com mostra la imatge.



Imatge 4.6: Cobrir amb paper de plata i posar la cartolina

4.2 Experiment al túnel de vent

En l'hora de comprovar si els resultats del túnel de vent son els mateixos que les gràfiques de la pagina web Airfoil Tools i que els programes informàtics.

La pretensió era, per a cada perfil, veure el comportament a diferents angles d'atac. Així poder fer la gràfica Cl-angle, i poder-ho comportar directament amb les gràfiques i resultats. Però el professor que m'havia d'acompanyar al túnel de vent de la Universitat Politècnica de Terrassa tenia presa i vaig haver d'acceptar fer l'experiment que ell va proposar (el que es tardava menys). Per tant, vaig haver de col·locar el perfil de túnel, amb un angle ja donat i que no vaig poder canviar, a diferents velocitats.

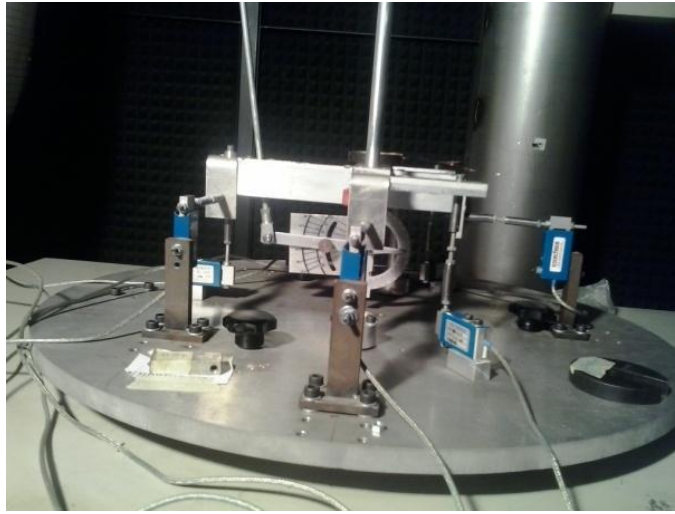
El túnel del laboratori té la secció d'assajos oberta, la seva velocitat màxima es d 30m/s i assoleix una força màxima de 10N i una mínima d'1N.

El primer que farem només entrar al laboratori serà mesurar:

- Temperatura: 11 graus⁴⁷
- Pressió (aproximadament a 300m)= 1,22Pa

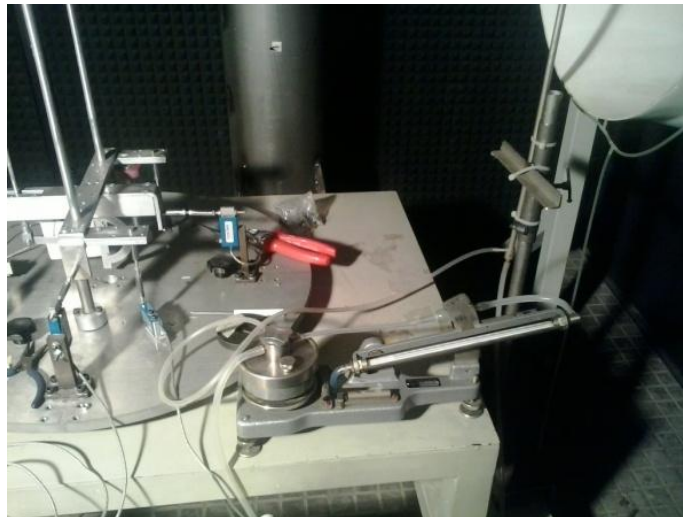
⁴⁷ Posteriorment l'hauem de passar a Kelvins, ja que es la unitat del sistema internacional

En segon lloc alliberem la balança i col·loquem el perfil. Com que les subjeccions de PVC són massa gruixes caldrà llimar-les prèviament. Cal destacar que el professor de la UPC de Terrassa no va voler calibrar la balança perquè portava massa temps (unes 4h) i tenia presa.



Imatge 4.7: Balança del túnel de vent de l'UPC de Terrassa

En tercer lloc engegarem el sistema. Amb el comandament podrem anar variant la velocitat. Aquesta velocitat, com hem vist anteriorment, la podrem calcular, per això es de vital importància fixar-nos en els mm que marca l'alcohol del manòmetre⁴⁸ cada vegada que augmentem la velocitat. Així podrem calcular la variació de la pressió dinàmica i, posteriorment, la velocitat.



Imatge 4.8: Manòmetre

⁴⁸ El manòmetre és un aparell de mesura de la pressió d'un fluid. Es distingeixen dos tipus de manòmetres, segons s'utilitzin per a mesurar la pressió de líquids o de gasos.

A mesurar que augmentem la velocitat, l'ordinador del túnel de vent anirà recopilant dades. Les que ens interessa són el *Lift*, que serà negatiu⁴⁹ perquè em invertit l'ala, i el *Drag*.

Per arribar als coeficients de *Lift* i *Drag* serà necessari calcular prèviament diferents dades, ja que, com he explicat, aquests depenen de velocitat, densitat i l'àrea de l'ala.

El primer que farem serà calcular les diferents velocitat a les que hem posat el vent:

$$v = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho}}$$

ΔP : Variació de a pressió dinàmica – ρ : densitat de l'aire del laboratori

- ΔP : Variació de a pressió dinàmica: és calcula mitjançant el manòmetre

$$\Delta P = \rho_{ALCOHOL} \times g \times \Delta l \times \sin\varphi$$

$$^{50}\sin\varphi = \frac{1}{5}$$

Per mesurar la densitat del alcohol hem de xuclar l'alcohol amb una xeringa. A continuació, mesurem la diferència de pes entre la xeringa plena i buida, així obtindrem el pes del alcohol. Quan omplim la xeringa em de observar el mil·lilitres que l'hem omplert. Aquets mil·lilitres els hem de passar a volum ja que:

$$\frac{m}{V} = \rho = \text{densitat}$$

- En aquest cas:

$$\text{Xeringa amb alcohol} - \text{Xeringa buida} = 20,3 - 12,9 = 7,5g = 7,4 \times 10^{-3} \text{ kg.}$$

- Mesura en mil·lilitres = 10ml
- A continuació hem de passar aquesta mesura a volum. Com sabem que:

$$10ml \times \frac{1L}{1000ml} \times \frac{1dm^3}{1L} \times \frac{1m^3}{1000dm^3} = 1 \times 10^{-5}m^3$$

$$\text{densitat}(\rho) = \frac{m}{V} = \frac{7,5 \times 10^{-3} \text{ kg.}}{1 \times 10^{-5}m^3} = 740 \frac{\text{kg}}{m^3}$$

⁴⁹ Si el *Lift* és negatiu obtindrem *Downforce*, com prèviament he explicat.

⁵⁰ Aquest valor me l'ha proporcionat el professor que em va acompanyar a l'experiment del túnel de vent.

Ja només falta calcular la densitat del aire al laboratori per poder calcular la velocitat del aire en cada moment. Per aquest càlcul farem servir l'equació d'estat del gas ideal, un gas hipotètic format per partícules puntuals, sense atracció ni repulsió entre elles i els xocs són perfectament elàstics (conservació de moment i energia cinètica).

$$P \times V = n \times R \times T$$

$P =$ Pressió absoluta - $V =$ Volum - $n =$ Mols - $R =$ Constant - $T =$ Temperatura

$$P \times V = n \times R \times T$$

$$n = \frac{m}{M}$$

$$P \times V = \frac{m}{M} \times R \times T$$

$$\frac{R}{M} = r = \text{constant} = 287$$

$$P \times V = m \times r \times T$$

Si passem el volum al altre costat obtenim:

$$\frac{m}{V} = \rho = \text{densitat}$$

$$P = \rho \times r \times T$$

El que busquem es la densitat, llavors:

$$\rho = \frac{P}{rT}$$

$P =$ Pressió laboratori (altura lab. = 300m) - $r =$ constant = 287 - $T =$ Temp. Laboratori

La temperatura l'hem mesurat, r es una constant, per tant, hem de calcular la pressió al laboratori, tenint en comte que estem a uns 300metres respecte el nivell del mar.

$$\text{Pressió aire} = \text{EXP} \left(\frac{-h}{8731,4} \right)$$

$h:$ Altura respecte el nivell del mar

Si estem aproximadament a uns 300m d'altura:

$$\text{Pressió aire al laboratori} = \text{EXP} \left(\frac{-300}{8731,4} \right) = 1,18663E - 05 \text{ atm.}$$

Ho passem al sistema internacional, es a dir, a Pascals:

$$1atm = 101324,9966Pa$$

$$1,18663E - 05atm \times \frac{101324,9966Pa}{1atm} = 1,202356266Pa$$

Ja podem calcular la velocitat, les forces del *Drag* i *Lift* les hem obtingut al ordinador del túnel de vent, ja només ens falta calcular l'àrea de l'aleró per poder calcular els respectius coeficients.

Recordem que per calcular l'àrea em de multiplicar la amplada per la *chord*:

$$A = Chord \times E$$

E:Amplada

En aquest cas:

$$A = Chord \times E = 0,205 \times 0,72 = 0,1476m^2$$

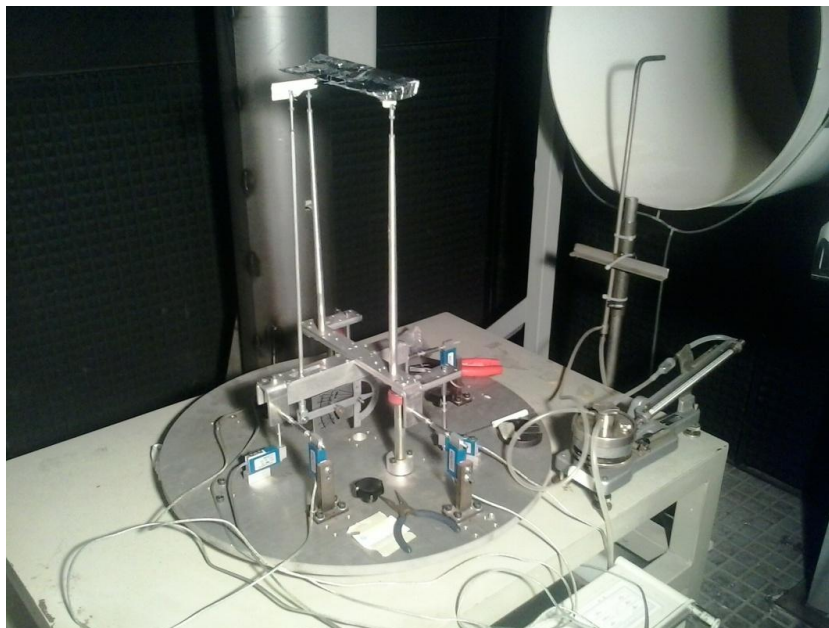
Ja tenim totes les dades necessàries per calcular el coeficient de *Drag* i *Lift* dels dos intents

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A \quad C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

$$D = \frac{1}{2} C_D \rho V^2 A \quad C_D = \frac{D}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

Experiment:

- Eppler 174 (1): Trencat → Possiblement el excessiu Drag ha fet que les subjeccions cedeixin.
- Eppler 174 (2): No fet → Degut a que el professor que havia d'estar amb mi contava amb molt poc temps.
- Eppler 423(3): Resultats i gràfiques al annex E



Imatge 4.9: L'Aleró Eppler 423 al túnel de vent de l'UPC de Terrassa

4.3 Comparació de resultats

En la observació dels resultats podem observar molt poc *downforce* (lift negatiu) i molta resistència (*Drag*). Per tant, toca analitzar els resultats per esbrinar que ha passat i si els resultats obtinguts tenen correlació a les gràfiques de la pagina web airfoil tools⁵¹ i els programes informàtics.

Per poder comparar els resultats haurem de fer diferents passos, ja que tal com pretenia, no he pogut obtenir amb el túnel la corba C_l -Alpha⁵², si no que he tingut que provar el perfil a diferents velocitats sempre en el mateix angle. Tal hi com vaig explicar anteriorment això es deu a ordres del professor.

Primer de tot haurem de calcular el numero reynolds a cada velocitat que em obtingut un coeficient de *lift* i de *drag*, en cada un dels dos intents. Tal com indica la seva formula, el número Reynolds varia segons la velocitat de l'aire, entre d'altres factors. Quan obtenim els números Reynolds ens fixem en els exponents. Tots són de entre 10^6 i 10^7 .

⁵¹ Les gràfiques de la comparació estan a l'annex 5

⁵² Coeficient de lift a cada angle d'atac

A continuació anem a observar les gràfiques de la pàgina web *airfol tools* i trobem que el numero Reynolds màxim es 10^6 .

Polars for E423 (e423-il)

Plot	Airfoil	Reynolds #	Ncrit	Max Cl/Cd	Description	Source
<input checked="" type="checkbox"/>	e423-il	50,000	9	6 at $\alpha=7^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
<input type="checkbox"/>	e423-il	50,000	5	13.9 at $\alpha=2.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details
<input checked="" type="checkbox"/>	e423-il	100,000	9	12.5 at $\alpha=0.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
<input type="checkbox"/>	e423-il	100,000	5	51.9 at $\alpha=4.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details
<input checked="" type="checkbox"/>	e423-il	200,000	9	73.7 at $\alpha=9.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
<input type="checkbox"/>	e423-il	200,000	5	84.3 at $\alpha=4.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details
<input checked="" type="checkbox"/>	e423-il	500,000	9	123.4 at $\alpha=5.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
<input type="checkbox"/>	e423-il	500,000	5	120.6 at $\alpha=5.5^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details
<input checked="" type="checkbox"/>	e423-il	1,000,000	9	156.5 at $\alpha=5.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=9	Xfoil prediction Details
<input type="checkbox"/>	e423-il	1,000,000	5	145.2 at $\alpha=6.25^\circ$	Mach=0 Ncrit=5	Xfoil prediction Details

Update plots [Reynolds number calculator](#)

Imatge 4.10: Perfil E423 en diferents números Reynolds

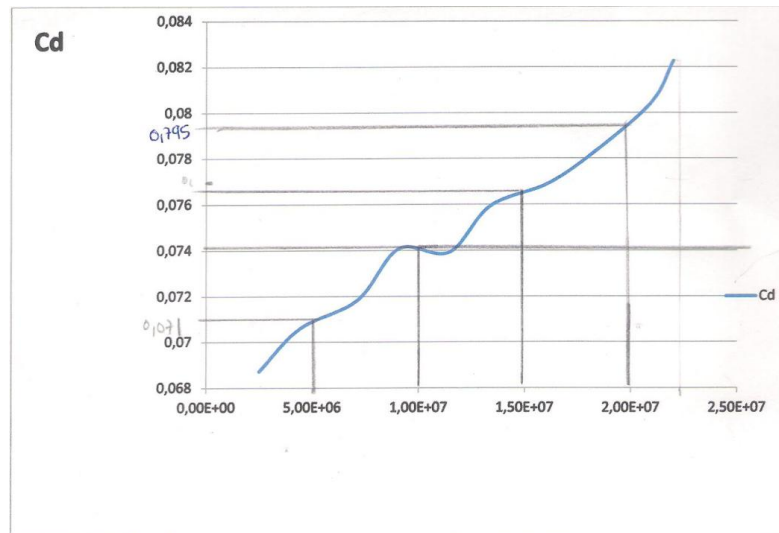
La diferencia entre un Reynolds 10^6 i 10^7 es mínima, per tant les gràfiques pràcticament no variaran.

El següent pas és per diferents nombres Reynolds, observar a les gràfiques que em obtingut ,quin cl i quin cd donen. Quan haguem obtingut aquets valors, anirem a la gràfica cl-alpha i cd-alpha de airfoil tools, i tots aquests valors tindran que coincidir en un mateix angle d'atac, ja que, no el vam variar.

En el cas de Cl, como anteriorment em observat, son massa petits i si mirem les gràfiques d'airfoil tools no hi ha gràfica per cl tant petits. Si ho comprovem amb els cd obtinguts, coincideixen tots en una mica més de 15 graus en els 2 intents

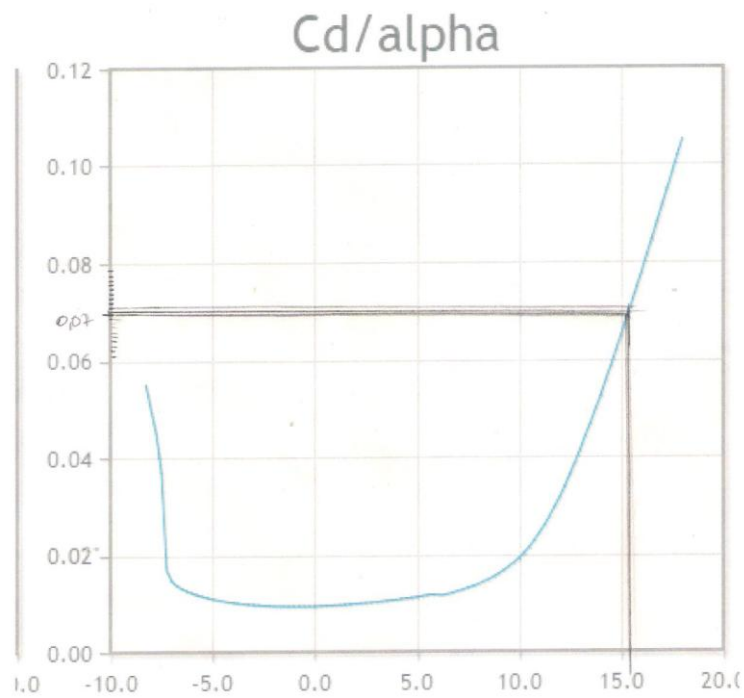
Gràfica obtinguda al primer intent⁵³:

⁵³ Resultats dels que s'ha obtingut aquesta gràfica a l'annex 5



Gràfica 4.3: Resultat (Cd-Re) primer intent Eppler 423

Mirem si els Cd coincideixen tots en el mateix angle (ja que no el vam variar):



Gràfica 4.4: Comprovació resultats Eppler 423

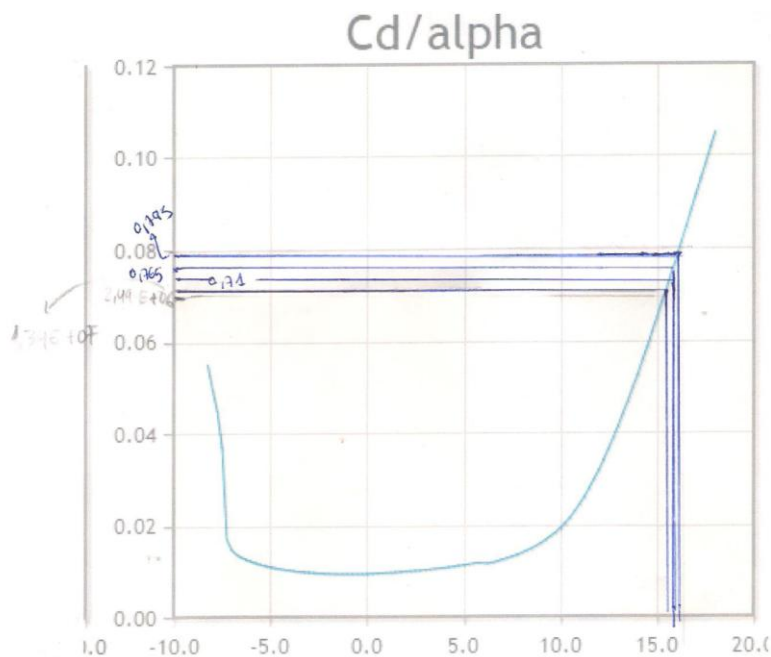
Al segon intent, fem el mateix:

Gràfica obtinguda al segon intent⁵⁴:



Gràfica 4.5: Resultat (Cd-Re) segon intent Eppler 423

Mirem si els Cd coincideixen tots en el mateix angle (ja que no el vam variar):



Gràfica 4.6: Comprovació resultats Eppler 423

⁵⁴ Resultats dels que s'ha obtingut aquesta gràfica a l'annex 5

Tot indica a que l'ala estava en pèrdua. Això passa quan hi ha un angle d'atac molt gran i l'aire no es capaç de seguir la silueta del perfil. Les conseqüències són molt poc *lift* (en aquest cas *downforce*) i molta resistència aerodinàmica (Drag). Com podem comprovar això encaixa amb els resultats obtinguts.

4.4 anàlisi de l'efectivitat de l'aleró al circuit de barcelona-Catalunya

El següent pas és comparar els resultats obtinguts al túnel del vent amb els resultats que hauria de donar un aleró davant d'un F1 que fos eficient al circuit de Barcelona-Catalunya. Així podem veure si els resultats s'acosten. Això ja de per si era difícil ja que hem tingut que escollir els perfils dins les limitacions del túnel. En aquest cas al donar pèrdua l'aleró no els podem comparar. D'aquesta manera completaré el procés de disseny d'un aleró simulant el que fan aels equips de F1.

4.3.1 Anàlisi circuit

Per proximitat escollim el circuit de Barcelona-Catalunya, un dels circuits més complets que hi ha. Daniel Gratacós em va explicar els punts principal de perquè d'aquest motiu:

- “a) El seu clima, que és poc plujós i amb temperatures "decents" tot l'any*
- b) El seu asfalt que és bastant abrasiu i fa treballar el pneumàtic de forma important (fins i tot massa)*
- c) Que té zones ràpides (sector 1 i 2) i un sector 3 bastant revirat, amb el que pots buscar un bon equilibri entre totes dues, o treballar en qualsevol dels 2 aspectes”*

Per aquest motiu es un dels circuits preferits per realitzar test, tal com explicava Albert Fàbrega:

“Montmeló és un dels circuits preferits dels equips de F1 per realitzar entrenaments. No solament per el clima (molt més moderat que els circuits del Nord d'Europa p.ex) durant l'hivern, sinó també per ser un traçat amb diferents tipus de viratge: alta, mitja i baixa

velocitat i una recta suficientment llarga. Això fa que els equips obtinguin dades prou rellevants del comportament del monoplaça en diferents condicions.”

Per tant, per poder calcular el coeficients de *lift* i *drag* d'un aleró davanter que fos efectiu en aquest circuit necessito dades sobre el traçat. Després de molt d'esforços i d'insistir molt, el circuit de Barcelona-Catalunya m'ha proporcionat un mapa en Autocad on puc mesurar les dades necessàries per quantificar el Cl (Coeficient de lift) i Cd (Coeficient de Drag) que necessitarà el meu aleró per ser eficient a aquest circuit.

4.3.1 Anàlisi reglament

Per a la construcció del perfil agafarem com a referència el reglament de la temporada de F1 2014. Els articles referents a les mesures del perfil, que posaríem a la part davantera del cotxe, ens diuen que:

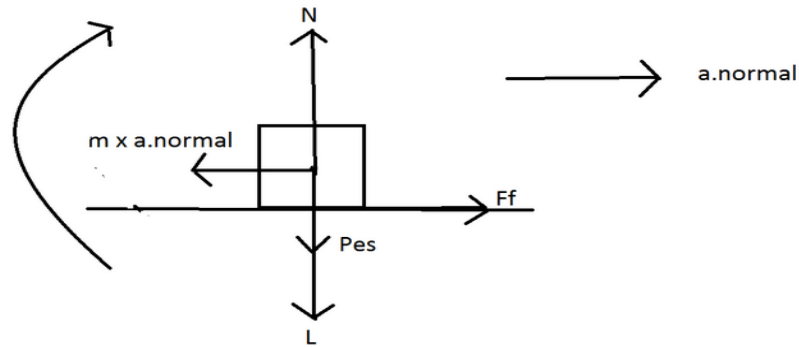
- La amplada de l'aleró ha de ser de 1,65m
- Davant la falta de precisió en la mesura que hauria de tenir l'aleró i que en realitat en aquest s'utilitza més d'un perfil, aquesta dada ho deixem a conveni del dissenyador.⁵⁵

4.3.2 Càlculs Montmeló

A continuació em dispo a calcular el coeficient de *lift* i de *drag* d'un aleró que sigui efectiu pel circuit de Barcelona-Catalunya. Posteriorment compararem els resultats amb el túnel de vent. Es difícil que coincideixin, primer de tot, perquè l'aleró ha sigut escollit com a conseqüència de les limitacions del túnel de vent.

Primerament estudiarem els coeficients de *lift* i *drag* en corba. Fem la descomposició de forces i obtenim el següent esquema:

⁵⁵ Cal tenir en compte que a la F1 no fan servir alerons més complexos, no tan simples fabricats a partir d'un perfil.



Imatge 4.11: Representació de les forces que actuen en el cotxe

A la suma de forces de l'eix X obtenim:

$$\sum F_X = m \times a_n$$

Si incloem la acceleració de dins cap a fora:

$$F_f - (m \times a_n) = 0$$

$$F_f = \mu \times N$$

$$a_n = \frac{V^2}{R}$$

$$(\mu \times N) - \left(m \times \frac{V^2}{R} \right) = 0$$

A la suma de forces de l'eix Y obtenim:

$$\sum F_Y = 0$$

$$N = (m \times g) + L$$

A la formula que havíem obtingut a l'eix X, substituïm N per $(m \times g) + L$ ja que :

$$N = (m \times g) + L$$

$$(\mu \times N) - \left(m \times \frac{V^2}{R} \right) = 0$$

$$m \times \frac{V^2}{R} = \text{Força centípetra}$$

$$(\mu \times ((m \times g) + L)) - \left(m \times \frac{V^2}{R} \right) = 0$$

$$\mu m g + \mu L - \left(m \times \frac{V^2}{R} \right) = 0$$

Ens interessa aïllar la força *Lift* (L) per posteriorment trobar el Cl, llavors:

$$\mu L = 0 + \left(m \times \frac{V^2}{R} \right) - \mu m g$$

$$L = \frac{\left(m \times \frac{V^2}{R} \right) - \mu m g}{\mu}$$

Aquest serà el *Lift* que produirà el cotxe. Nosaltres busquem el que produirà l'aleró davanter. Sabem que aquest produeix el 30% del total del *lift* per tant:

$$L_{\text{ALERÓ DAVANTER}} = L_{\text{TOTAL}} \times 0,3$$

$$L_{\text{ALERÓ POSTERIOR}} = L_{\text{TOTAL}} \times 0,3$$

$$L_{\text{XASSÍS}}^{56} = L_{\text{TOTAL}} \times 0,4$$

Per últim hem de trobar el Cl (Coeficient de Lift):

$$L = \frac{1}{2} C_L \rho V^2 A$$

$$C_L = \frac{L}{\frac{1}{2} \rho V^2 A}$$

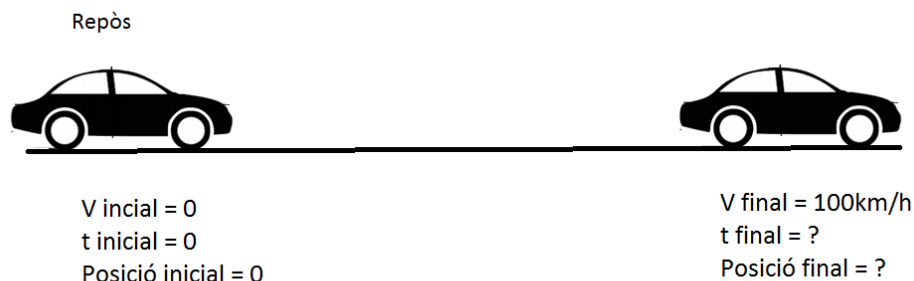
⁵⁶ El xassís és l'estructura que sosté, aporta rigidesa i forma a un vehicle o objecte portable. Per exemple, en un automòbil, el xassís és l'equivalent a l'esquelet en un ésser humà, sostenint el pes, aportant rigidesa al conjunt, i condicionant la forma i la seva dinàmica final.

Consideracions:

- El vehicle traça les corbes a una velocitat, calculada fent la mitja entre la velocitat de entrada i de sortida. Aquestes velocitats han sigut obtingudes d'un d'una volta on board⁵⁷ del *Mercedes W05 Hybrid*⁵⁸.
- El radi de la corba és la mitjana aritmètica entre el radi exterior de la corba i l'interior.

Acabem de estudiar el comportament del F1 a la corba. Tot seguit estudiaré el comportament d'un cotxe normal en recta, en aquest cas, un Maserati⁵⁹. Amb el propòsit d'aprendre com el faria a un F1, he arribat a un resultat que quadren amb els que la marca italiana proporciona. Al intentar-ho fer-lo amb un F1 ens em trobat amb varies limitacions. La principal ha sigut el secretisme que envolta aquesta categoria automobilística i la impossibilitat d'aconseguir les dades necessàries per fer aquesta tasca. He preguntat a moltes persones com Toni Cuquerella, Luis Pérez Sala, Joan Villadelprat, Carlos Castellà, Boja Ortiz, Johnny Ceccoto, Daniel Gratacós, Arantxa Ciac..etc. Algunes no m'han respost, altres m'han dit que era confidencial i d'altres que no desponien d'aquestes dades. Abans d'inventar-me la majoria de dades i que surti un resultat irreal, deixo l'exemple del Maserati per com s'hauria de fer per un F1 o qualsevol cotxe.

En primer lloc, plantejem un esquema del que farem. Intentarem treure l'acceleració i el temps que tarda en accelerar fins als 100km/h.



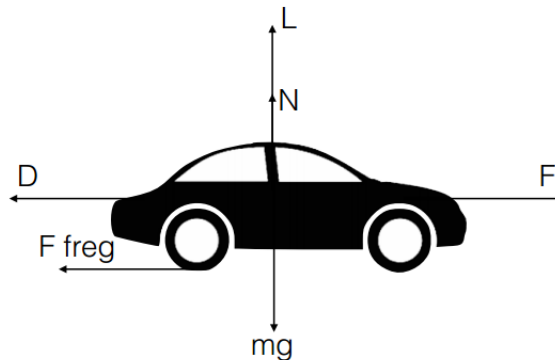
Imatge 4.12: Esquema dels posteriors càlculs

⁵⁷ La volta *on board* es aquella que es veu des de el punt de vista del pilot i on, a la pantalla, solen marcar les velocitats, rpm, forces G..etc.

⁵⁸ Cotxe campió del pon aquesta temporada 2014-2015. Disposa d'un motor V6 Turbo i de 8 marxes.

⁵⁹ Maserati és un fabricant italià d'automòbils de luxe fundat per Alfieri Maserati el 14 de desembre de 1914 a Bolonya, Itàlia. Aquesta empresa automobilística té la seva seu central a Modena, igual que Ferrari, amb la que havia estat associada.

Si descomponem les forces que actuen obtindrem:



Imatge 4.13: Representació de les forces del cotxe a la recta

Ens interessa trobar F(Driving Force)⁶⁰ per posteriorment poder trobar la acceleració i el temps que tarda en passar de 0 a 100km/h, per poder-ho comparar amb el valor que indica el catàleg. A més a més aquest es un valor que ens permetrà jutjar ràpidament la coherència del nostre resultat.

Aquesta força de tracció que un motor realitza sobre les rodeses calcula a partir de la tracció o *torque*⁶¹ aplicat a les rodes.

$$P = T \times w$$

T: Torque w: Velocitat rodes

Si desenvolupem la formula:

$$P = \frac{2\pi \text{rpm}}{60} T$$

Com tots sabem, la Força es igual al quocient entre potencia i velocitat. Per tant d'aquí traurem la F(Driving Force) en els dos casos que he explicat: *Torque* màxim i potencia màxima.

$$F = \frac{P}{v}$$

P: Potencia - F: Driving Force - +V: velocitat

⁶⁰ Driving Force: Força amb la que avança el cotxe

⁶¹ El parell motor o torque és el moment de força que exerceix un motor sobre l'eix de transmissió de potència. La potència desenvolupada pel parell motor és proporcional a la velocitat angular de l'eix de transmissió,

- 1º cas: Torque màxim.

Torque màxim=650Nm

En aquest punt de la gràfica el motor va 4000rpm. Per tant posem aquests valors a la fórmula de la potència. Aquest valor ho dividim entre la velocitat i obtenim la Força.

$$P = \frac{2\pi \text{ rpm}}{60} T = \frac{2\pi \times 4000}{60} \times 650 = 2772271,36W$$

$$F = \frac{P}{v} = \frac{2772271,36}{27,78} = \mathbf{9804,51N}$$

- 2ºcas: Potència màxima

Observem la gràfica i veiem que quan el motor proporciona la potència màxima aquest va a 6500-6800rpm. També em de fixar-nos en el *torque*, en aquest punt es de 530Nm.

$$P = \frac{2\pi \text{ rpm}}{60} T = \frac{2\pi \times 6350}{60} \times 530 = 389976,37W$$

$$F = \frac{P}{v} = \frac{389976,37}{27,78} = \mathbf{14043N}$$

Com podeu veure obtenim més *Driving Force* en el segon cas.

A continuació procedirem al sumatori de forces per trobar la acceleració i el temps que tardarà en accelerar a 100km/h en el segon cas, que es el que millors resultats ens donarà.

$$\sum F_x = m \times a$$

$$F - D - F_f = m \times a$$

F_f : Força de Fregament - D : Drag (Resistència aerodinàmica)

Tenim la F (Driving Force), ens falten els valors del *Drag* i de la força de fregament per poder trobar l'acceleració. En aquest punt apareixeran les forces aerodinàmiques. El *Drag* directament i el *Lift* per trobar la força de fregament.

$$\text{Drag o resistència} = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho v^2 \times A$$

Per altre banda la Força de fregament es el producte de μ per la Normal.

$$F_f = \mu \times N$$

Fent el sumatori de forces de l'eix d'ordenades trobem que:

$$N = mg - L$$

Llavors la Ff en queda igual a:

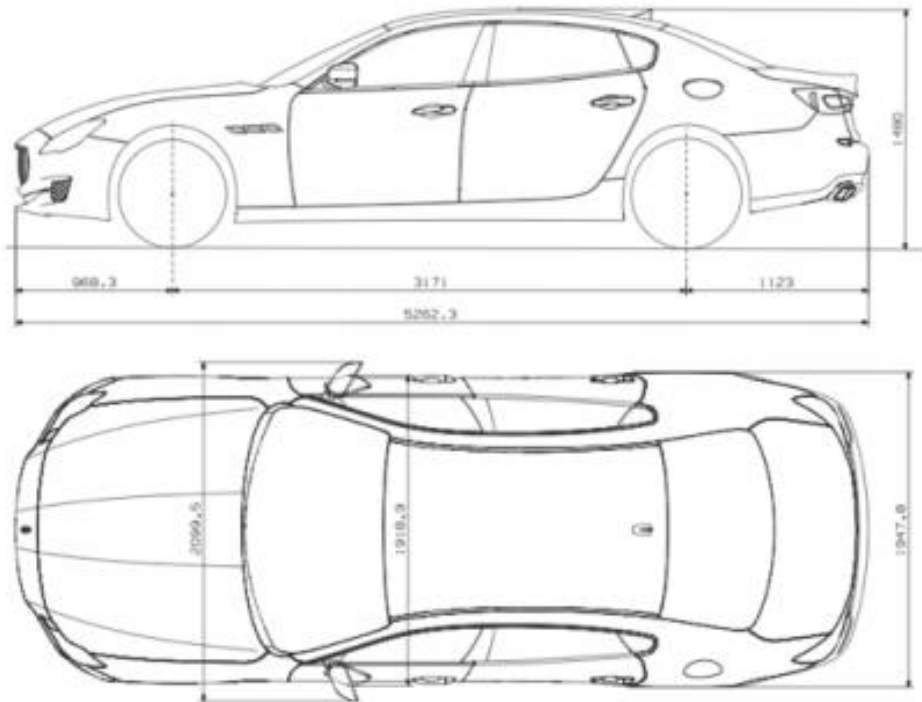
$$F_f = \mu \times mg - L$$

$\mu=0,45$. Aquest valor és el coeficient de "agarre". He demanat informació a Pirelli i m'han respost que aquest valor és confidencial, per tant el considerarem.

Aquí ens apareix la segona força aerodinàmica, el Lift.

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

La densitat de l'aire a nivell del mar és de $1,22\text{kg/m}^3$, per tant únicament ens queda saber el valor de A (Area mullada) que per al Drag serà la frontal i pel lift la de planta. Amb les especificacions del catàleg les podem calcular:



Imatge 4.14: Mesures del Maserati

$$A_{FRONTAL} = 5,2623 \times 1,9478 = 10,25 \text{ m}^2$$

$$A_{PLANTA} = 1,9189 \times 1,480 = 2,84 \text{ m}^2$$

Amb aquests 2 valors ja podem calcular la Força de Fregament

$$L = 0,1 \times \frac{1}{2} \times 1,223 \times 27,78^2 \times 10,25 = 483,71$$

$$F_f = \mu \times mg - L = 0,45 \times ((1800 \times 9,81) - 483,71) = 8586,4 \text{ N}$$

Amb tots els valors calculem l'acceleració i el temps de 0-100:

$$F - D - F_f = m \times a$$

$$14355,82 - 590,56 - 8586,4 = 1800 \times a$$

$$a = 2,8 \text{ m/s}$$

$$a = \frac{v \text{ final} - v \text{ inicial}}{t \text{ final} - t \text{ inicial}}$$

$$2,8 = \frac{27,78}{t}$$

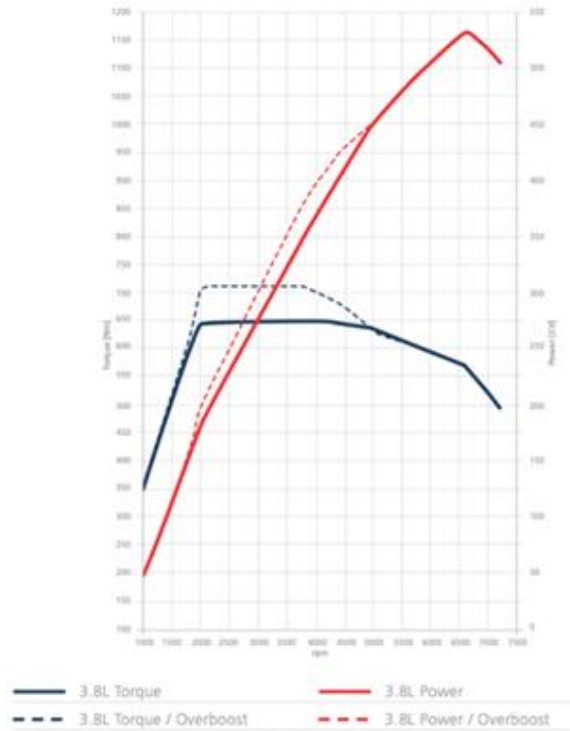
$$t = 9,6 \text{ s}$$

Dona un valor que no s'apropa gens als de les especificacions. També la teoria ens diu que accelerarem més ràpid a més *torque*. El motiu d'aquesta errada es que no em considerat les marxes. A més *torque*, menys revolucions tindrà el motor, però més força hi ha. En el cas contrari, a menys *torque*, menys revolucions té el motor però mes velocitat aconseguirem. Per tant comprovem que per buscar l'acceleració màxima necessitem calcular-ho en el cas de màxim *torque*, ja que la força serà major i per tant l'acceleració també.

A continuació buscarem aquesta acceleració 0-100 buscant el *torque* que dona cada marxa, posteriorment la *driving force* i per últim l'acceleració. Considerem que el cotxe fa la recta en una marxa, per tant buscarem aquella que doni més acceleració.

Els valors de potencia i rpm venen donats per la següent gràfica ⁶²:

⁶² A les taules de l'Annex E aquests valors estan de color groc. Els resultats complets estan allà.



Gràfica 4.7: Variació torque, rpm i potencia del Maserati

Com em vist prèviament:

$$P = \frac{2\pi \text{ rpm}}{60} T$$

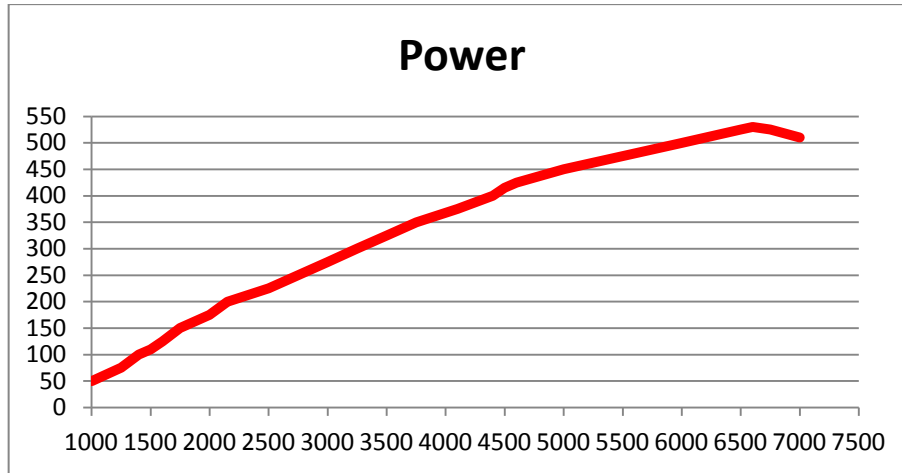
Hem de aïllar el *torque* per posteriorment torbar el *torque* màxim en cada marxa, que es en el cas en que estem treballant.

$$T = \frac{\frac{2\pi \text{ rpm}}{60}}{P} = \frac{\pi \text{ rpm}}{30P}$$

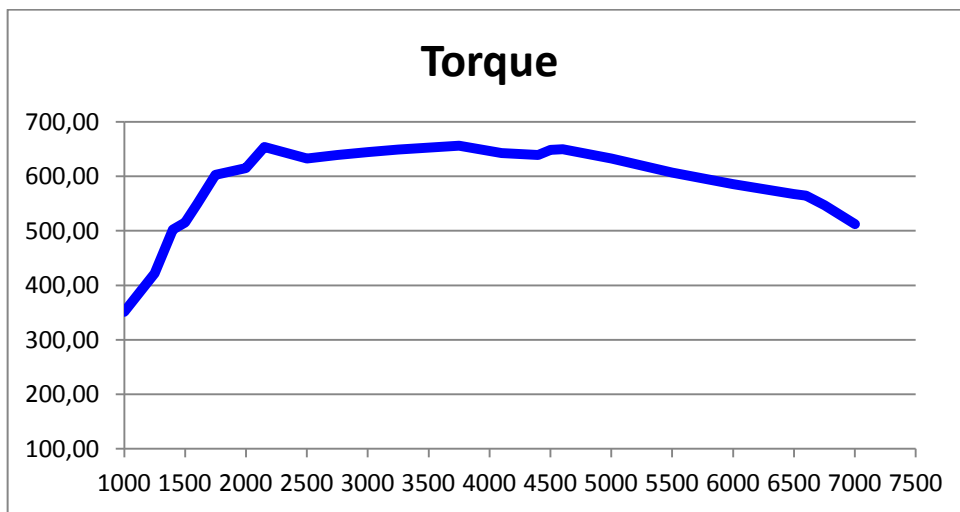
També podem calcular les rpm a cada marxa (tot hi que no es necessari) per observar com varia. El podem calcular dividint rpm *engine* entre el *gear ratio*. Es una simple regal de tres.

$$RMP(\text{a cada marxa varia segons rpm engine}) = \frac{\text{rpm engine}}{\text{gear ratio (número en groc)}}$$

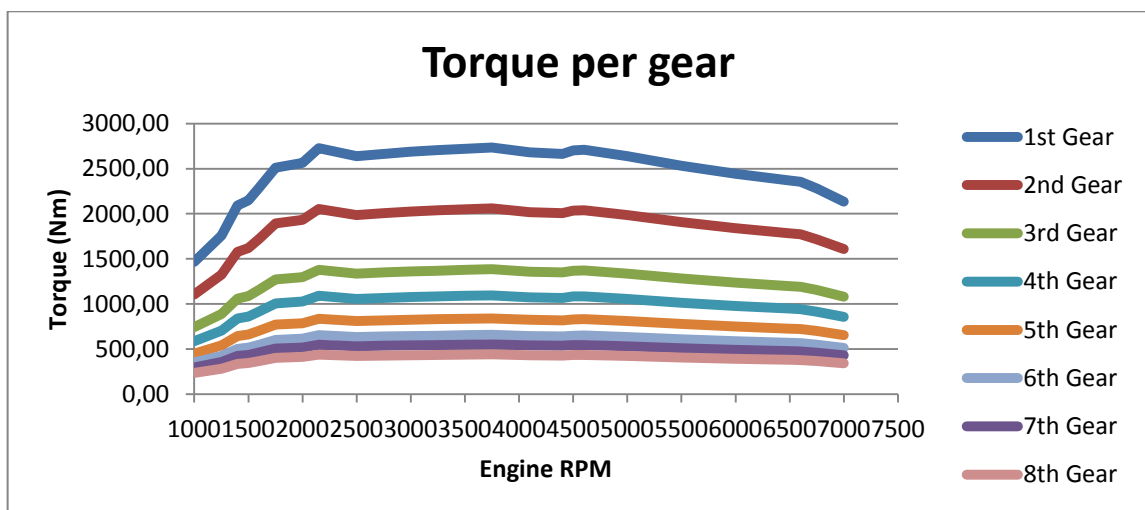
Obtenim els resultats visibles a l'Annex F. Amb aquestes taules podem obtenir les gràfiques següents:



Gràfica 4.8: Resultats Maserati



Gràfica 4.9: Resultats Maserati



Gràfica 4.10: Resultats Maserati

Amb això i les següents dades ja podem comprovar en quina marxa obtenim major acceleració i si algun s'acosta al valor de les especificacions.

Radi roda	0,352	m
Cl	0,44	
Cd	0,44	
mu	0,9	
massa	1800	kg
vel	27,78	m/s
A Cl	10,25	m2
A Cd	2,84	m2

Amb dades que havíem calculat prèviament i calculant aquests valors de nou, trobem la F (Driving Force) a cada marxa

$$\text{Drag o resistència} = C_D \times \frac{1}{2} \times \rho v^2 \times A$$

$$F_f = \mu \times mg - L$$

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

	Engine	1st Gear	2nd Gear	3rd Gear	4th Gear	5th Gear	6th gear	7th Gear	8th Gaer
Driving force	1863,56	7771,04	5851,58	3932,110961	3112,14469	2385,35641	1863,5597	1565,39015	1248,585
T DF	7454,24	31084,18	23406,31	15728,44385	12448,5788	9541,42565	7454,23879	6261,56058	4994,33999
L	2131,46219								
D	590,570988								
Ff	13973,884								
a (m/s2)	-3,95	9,18	4,91	0,65	-1,18	-2,79	-3,95	-4,61	-5,32
0-100 a (sec)	-7,03	3,03	5,65	42,96	-23,63	-9,95	-7,03	-6,02	-5,22

Fem el mateix que abans, amb totes les forces calculades aïllem l'acceleració.

$$F - D - F_f = m \times a$$

Cal tenir en compte que per obtenir la F total em de multiplicar la F obtinguda per 4, ja que el cotxe te 4 rodes. Però abans per trobar la força, agafem el màxim *Torque* entre el radi de la roda. Aquesta força com he dit, la multipliquem per 4.

5.CONCLUSIONS

Amb el pressupost i les grans limitacions em puc comparar amb un equip modest de F1, ja sigui el desaparegut HRT, Marussia o Caterham, per posar algun exemple. Però aquestes limitacions importants al túnel i de coneixement de la matèria he sabut superar-les finalment.

Com he pogut comprovar en les diverses entrevistes que he realitzat, en categories inferiors a la F1, hi ha molt poca possibilitat de desenvolupar la part aerodinàmica, tal com deia Daniel Gratacós:

" El problema de les categories inferiors (o avantatge) és que no podem desenvolupar parts del vehicle (en alguns campionats F3 sí que és possible). Així que el material que rebem del constructor és el que farem servir durant tota la temporada sense possibilitat de desenvolupar peces. L'únic que podem fer és ajustar el millor possible la càrrega aerodinàmica al circuit que competirem. "

Però a la Formula 1 això no passa. Els equips inverteixen molts diners i molt temps, cada vegada més, en aerodinàmica. Tal com deia Albert Fàbrega a la entrevista que vaig realitzar-li, el departament aerodinàmic és el més important:

"El departament d'aero té una importància vital en el disseny del cotxes d'avui en dia. En els últims anys s'ha convertit en el departament més important y que més recursos necessita perquè el cotxe sigui competitiu."

Per tant a la F1 aquest departament es encarregat de millorar el comportament del cotxe mitjançant l'aerodinàmica. Quan es troba una possible millora, com per exemple, un nou aleró, es reuneixen els caps de l'equip i decideixen, amb els resultats dels programes de simulació, si aquets aleró donarà una millora acceptable. Si és així es prova en el túnel de vent.

Evidentment en equips modestos, aquesta millora a de ser bastant considerable per a que es porti al túnel de vent. No els convé millorar 1 dècima (suposadament) i provar-ho en el túnel de vent, amb totes les despeses que això pertoca. Ells tenen més marge per millorar. No es el mateix 1 dècima per un equip davanter, que per un equip modest.

En una categoria sense límit de pressupost, esta clar, que els equips amb més limitacions es veuen afectats. Per estalviar diners, no fabricaran un aleró a no ser que la millora sigui considerable. No es poden permetre gastar milers de diners per millorar una dècima.

Parlant des de la meva experiència en el treball, he trobat grans limitacions. En primer lloc, he tingut que escollir alerons en base a les limitacions del túnel i no buscant aquell que donés més eficiència aerodinàmica. En segon lloc, no vaig poder fer l'anàlisi que jo volia i la balança del túnel no estava calibrada. Amb tot això vaig tirar endavant. En el món del Motorsport no es tot un camí de roses. Jo, a la meva manera, m'he enfrontat a molts problemes i els he hagut de solucionar.

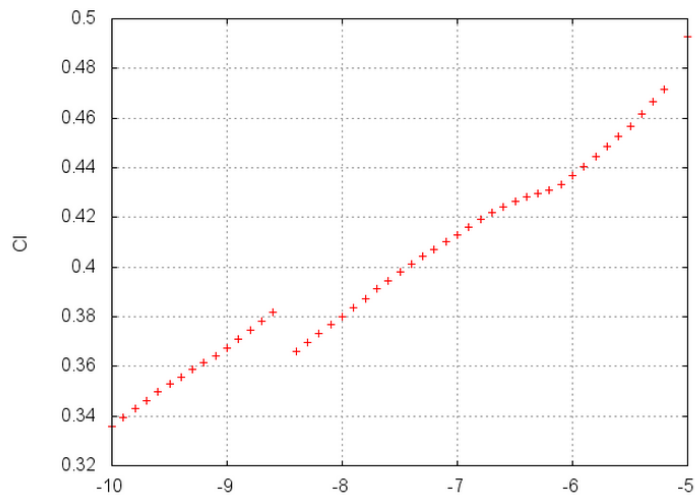
Vam trobar que el nostre aleró oferia molt poc *downforce* i molta resistència aerodinàmica. Amb tota la teoria apresada en aquest treball i consultant a especialistes en el tema, vam concloure que es podria deure a diverses raons:

CONCLUSIONS

- Un aleró quan arriba a cert angle d'atac entra en pèrdua, ja que arribat aquest punt el fluid no pot seguir la seva silueta. Les conseqüències son les mateixes que vam obtenir al túnel: Poc *downforce* i molt *drag*. La solució és reduir l'angle d'atac. En aquest cas no vam poder variar-ho (ordres del professor de l'UPC) i aquest va ser el nostre handicap.
- L'espessor relatiu de l'aleró que mostra la gràfica es 1. Jo vaig tenir que augmentar-la un 60% perquè fos possible tallar l'aleró, ja que si no era massa petit. També em de recordar que com més gran sigui el perfil més s'apropa al que seria en realitat, es a dir, col·locat en el cotxe. La forma del aleró causa el *lift*, la densitat el *drag*. Això podria explicar l'excés de *drag* en els resultats.

Per corroborar aquestes conclusions recorrim als programes de simulació, gracies a la ajuda de l'Arnau Miró, que em va proporcionar les següents gràfiques:

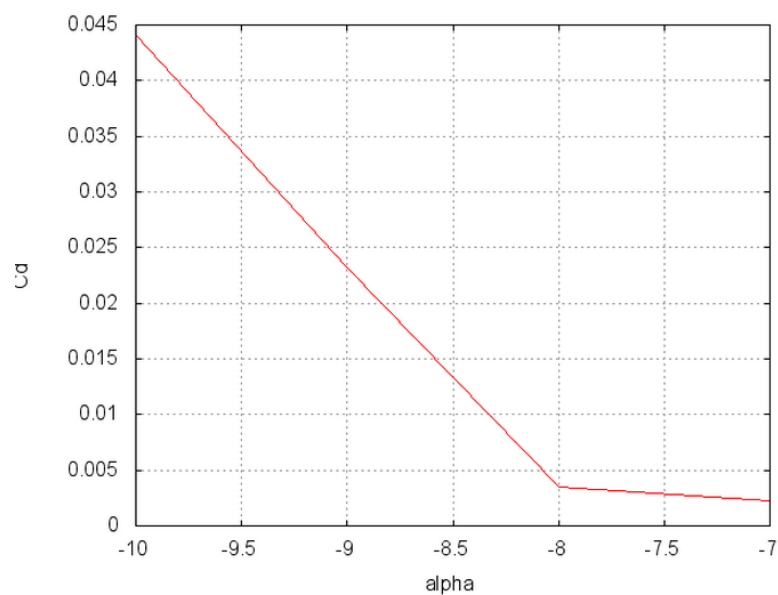
El X-Foil no considera la separació de flux, ja que dona Cl grans. Això no succeeix quan l'aleró entra en pèrdua. El programes informàtics el que fan el resolre equacions. Com hem vist durant el treball el *lift* es conseqüència de una variació de pressió. El programa resol les equacions. A la part superior es desprèn el flux, hi ha una pressió molt petita. Això crea una diferencia de pressions gran, per tant, el programa dona com a resultat *lift* i no pèrdua.



Imatge 5.14: Gràfica obtinguda al X-Foil

CONCLUSIONS

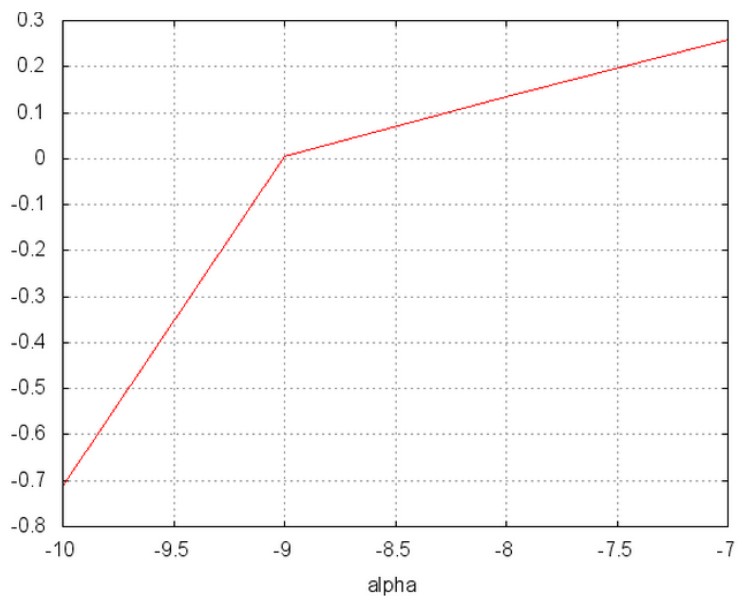
Amb un altre programa (OpenFOAM) obtenim el següent:



Imatge 5.15: Gràfica obtinguda al OpenFOAM

Observem com a mesura que l'angle d'atac augmenta, el C_d també, però no ho fa de manera tan radical com en els resultats del túnel de vent.

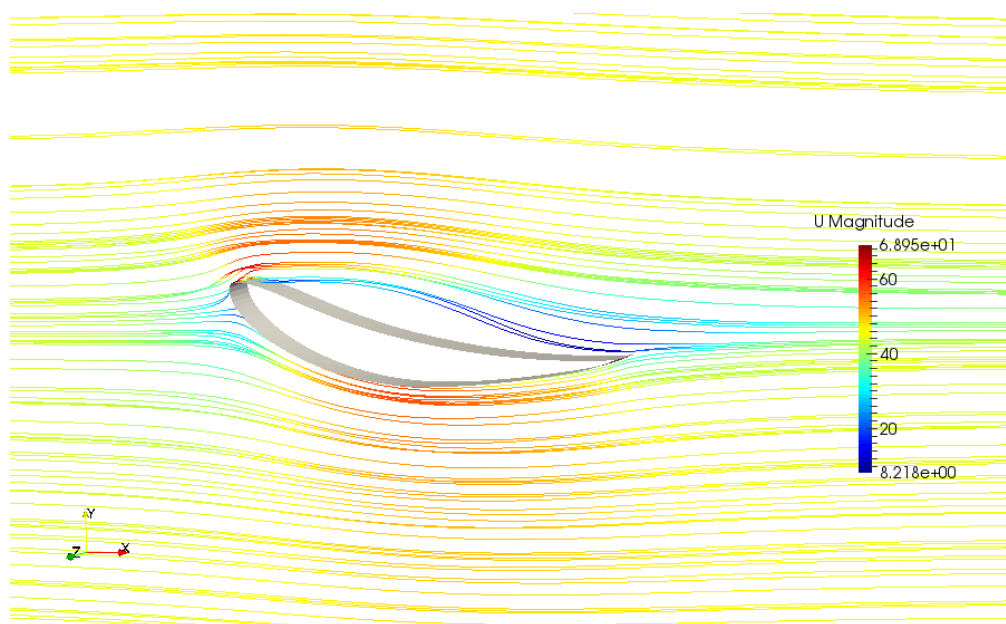
En aquesta segona gràfica d'aquest programa veiem com hi ha gràfica per C_l petits. Això no passava en la gràfica que disponiem de la pàgina web *aifoil tools*. A més a més també comprovem com per angles radicals no detecta pèrdua i dona valors de C_l bastant més alts que els obtinguts.



Imatge 5.16: Gràfica obtinguda al OpenFOAM

CONCLUSIONS

Finalment, amb aquest mateix programa obtenim la següent simulació:



Imatge 5.17: Simulació obtinguda al OpenFOAM

Això no fa més que corroborar el que havíem dit. A la imatge es pot veure clarament com el flux que passa per la part superior no segueix la silueta del aleró. Podem observar com aquí dona pèrdua i a la gràfica no. La resposta és que el programa resol les equacions, per tant, com a la part superior es desprèn el flux, hi ha una pressió molt petita. Això crea una diferència de pressions grans, per tant, el programa dona com a resultat *Lift* i no pèrdua.

Per estar totalment segur, demano ajuda a Daniel Gratacós, enginyer que havia entrevistat, i aquestes van ser les seves paraules:

“L'ala ha entrat en pèrdua, el flux no segueix el perfil. És perquè l'angle d'atac és massa gran. Has de fer-ho amb angles més petits. Entrant en pèrdua només crees drag i no downforce. [...]El tema és que l'aire que li arriba a l'ala posterior de l'F1 no és exactament "horitzontal" i per això tenen angles d'atac més radicals...”

Amb això aprenem que cal tenir molta cura segons quin programa de simulació facis servir. Com bé diu la dita, no hi ha mal que per bé no vingui. Gràcies a que l'aleró va entrar en pèrdua he pogut comprovar les limitacions de diversos programes de simulació. Per tant podem comprovar de primera mà un dels motius del perquè s'utilitzen els túnels de vent. El programes no són perfectes.

També vaig poder comprovar-ho quan vaig preguntar-li al Daniel Gratacós si hi ha correlació entre els programes i el túnel:

“Més que haver correlació, es busca que n'hi hagi. És a dir, quan es dissenya una peça, es passa per CFD i si els resultats són els esperats es fabrica. Després es passa pel túnel de vent i es comparen resultats. Si la peça dona una millora del 1,5% es munta. L'1% és el marge d'error del mesurament / sensors. El problema és que els simuladors no són fiables perquè el flux turbulent és totalment

CONCLUSIONS

aleatori i no es pot "simular". Després tens tota la interacció entre peces i després la resposta a diferents velocitats."

Tal com ha dit el flux turbulent és aleatori, per tant, no es pot simular. Hi ha sistemes que amb molt de temps, per mitjà de la estadística o aconsegueixen, però no crec pas que un equip s'espera 4 anys per produir un aleró. De fet es uns dels problemes en el que més s'ha d'investigar per solucionar-ho.

Tenint molt en compte aquestes paraules d'en Daniel Gratacós, i parlant des de la meua experiència, puc concloure que, en un món tan perfeccionista la F1, i en general el *MotorSport*, el túnel de vent és el que t'acosta més a la realitat. Aquí es miren amb lupa els errors més minúsculs, on no es conformen amb una balança amb un 0,02% d'error, on es busca millorar dècimes i centèsimes, un petit marge d'error en els programes no deixa tranquil a ningú. El túnel per tant, ajuda a comparar resultats amb pista, però també, amb els programes, i permet millorar-los perquè cada vegada siguin més i més perfectes.

Tal com va dir-me Luis Pérez Sala, el túnel de vent és el que marca la diferencia. Cada vegada hi ha més limitacions a les proves amb la pretensió d'igualar els equips. Però, al fi i al cap, un equip modest segurament hi dediqui més unitats als programes de simulació que al túnel. Per tant a major pressupost, més perfecció s'aconsegueix. Tot hi que no tot son els diners, també és perfeccionant aprenent dels errors.

Per tant amb tot el que aprés em refio més dels resultats al túnel del vent. He pogut comprovar que és el que s'acosta més a la realitat, això sí, si està ben equipat tecnològicament. A continuació deixo proposició per el futur: si algun dia, donat que vull estudiar aeronàutica, puc reprendre aquest projecte per perfeccionar-lo, res em faria més satisfacció. He après dels errors per poder millorar-los. Tal com deia Thomas Alva Edison:

"No vaig fracassar, només vaig descobrir 999 maneres de com no fer una bombeta"

"Que alguna cosa no funcioni com tu esperaves no vol dir que sigui inútil"

Per últim, i deixant de banda tota la part d'aprenentatge teòric sobre el tema, he aprés moltíssimes coses gracies a aquest treball. Realment he passat molt estrés amb tots els problemes que m'he trobat, però finalment amb esforç i confiant en mi, els he superat. Crec que la principal avantatge que he tingut es que he sabut moure'm i he posat realment moltes ganes. M'porto una experiència increïble amb persones que no coneixia i que ara agreixo el seu cop de mà i interns. Si hagués de tornar a fer el treball ho faria de nou. Realment he gaudit fent-lo i el més important, gracies a això, he descobert el que vull estudiar.

ANNEXOS

ANNEX A: Entrevista a l'Albert Fàbrega

L'Albert Fàbrega es actualment analista tècnic Fórmula 1 en diferents mitjans de comunicació: TV, ràdio, premsa escrita, internet, 2.0 , Coach i Manager de pilots.

Agraixo la seu interès ja que ha sigut de gran ajuda observant tota la seva experiència Coordinador de l'equip HRT F1 TEAM, Coordinador projecte Epsilon F1. 24 Hores Le Mans, Manager Epsilon. FR3.5, Mecànic de equip Honda F1 i cap de mecànics Gabord Competició. Saleen S7R entre d'altres

Amb l'exemple de RedBull guanyant 4 mundials amb molta velocitat per corba, es més comú avui dia deixar la velocitat en recta en un segon pla y centrar-se en la velocitat per corba en el disseny del cotxe? Es sol prioritzar el pas per corba ràpida o corba lenta?

La aerodinàmica afecta al comportament del monoplaça a partir d'una certa velocitat, per tant en els viratges lents el seu treball no es nota en el rendiment del monoplaça. La aerodinàmica tan afecta al rendiment en els viratges com en les rectes. L'eficiència d'un monoplaça vé determinada per la capacitat de generar càrrega aerodinàmica (downforce) que tingui la mínima resistència a l'aire (Drag).

Diuen que Montmeló es un dels circuits més complets. Que en destacaries?

Montmeló es un dels circuits preferits dels equips de F1 per realitzar entrenaments. No solament per el clima (molt més moderat que els circuits del Nord d'Europa p.ex) durant l'hivern, sinó també per ser un traçat amb diferents tipus de viratge: alta, mitja i baixa velocitat i una recta suficientment llarga. Això fa que els equips obtinguin dades prou rellevants del comportament del monoplaça en diferents condicions.

Actualment la aerodinàmica es clau a moltes competicions d'automoció. Es això cert? Quin percentatge donaries d'importància a:

- Aerodinàmica/Motor: 75%
- Cotxe/Pilot : 80%

En quina mesura els pilots participen en el desenvolupament aerodinàmic del cotxe?

Cada vegada més, les sensacions del pilot passen a un segon pla, sense voler dir que no siguin valorades. Es molt important tenir un pilot que transmeti sensacions reals que ajudin als enginyers a treballar en la bona direcció, però també es molt important que siguin capaços d'adaptar-se als diferents comportaments del vehicle i que siguin capaços de enviar el seu estil si és necessari. Els monoplaçes estan equipats amb centenars de sensors que fan q els enginyers disposin de moltes dades i puguin comparar-les amb els comentaris dels pilots. Tot suma i ajuda.

Parlant des de a teva experiència, varia molt l'aerodinàmica d'un pilot a un altre segons el seu estil de conducció? Com? Hi ha alguns que prefereixin més sobreviratge o subviratge, o d'altres que necessitin més downforce? La diferent trajectòria que facin a les corbes també ho pot variar l'aerodinàmica? Com? (Si pots posar exemples)

Cada pilot té el seu estil de conducció. Alguns pilots són extremadament ràpids en algunes condicions o tipus de monoplaques, però després no son capaços de treure rendiment de monoplaques quan no es troben a gust amb el comportament del monoplaça. Es treballa del pilot en adaptar-se, però també de l'equip en modificar el comportament del monoplaça per adaptar-lo al tipus de pilotatge del pilot, sense que deixi de ser efectiu. Un fet determinant són els pneumàtics, que fa que h alguns pilots no siguin capaços de treure'n bon rendiment, depenent de la temporada. Els bons pilots son els que són capaços d'adaptar-se a les diferents condicions sense perdre la velocitat.

Com es dissenya un aleró? Quins serien els passos principals? Com s'aconsegueix fer un aleró que tingui a la vegada relació amb el motor y que no 'l'empitjori' i en definitiva amb tot el cotxe en general?

Es segueixen molts processos que estan tots lligats a una estructura y calendari molt ben definit. Un cop el concepte ha estat definit, es comencen a fer proves en programes de simulació i CFD (Computational fluid dynamics) on es fa una primera valoració del seu rendiment, més a nivell qualitatiu que quantitatiu, i dels resultats s'en escullen les opcions que són millors. Després es fa un model a escala que es prova al túnel de vent. Totes les dades es valoren s'examinen i es produeixen a escala real i per provar al cotxe les que millors valors aporten al comportament del cotxe. Després es monten al cotxe i es comparen les dades que es treuen a pista amb les que tenien al túnel. Si s'obté el resultat esperat o és millor del que hi havia, es manté. Sino, es descarta i s'analitza en quin punt del procés hi ha hagut l'error per corregir-lo.

Quin efecte provoca el menor pressupost econòmic en categories inferiors a la F1 com la GP2, GP3 o World Series(o altres)? Els reglaments en aquestes categories són molt limitats i per tant l'evolució està limitada. Tots tenen el mateix cotxe i les mateixes opcions.

Es possible utilitzar túnels de vent amb tants pocs diners respecte la F1? S'han fet algunes proves, però els pressupostos limitats i les restriccions reglamentaries, no ho permeten. De totes maneres es solen fer m"mapes aerodinàmics" en pistes preparades.

En cas afirmatiu:

- **Son propis o "alquilats" d'altres equips o institucions? Llogats**
- **Com afecten els problemes correlació de resultats amb la realitat? La divergència de resultats provoca molts problemes. S'ha de trobar el problema abans de seguir.**
- **Quin percentatge del pressupost d'un equip d'aquestes categories es dedica a proves en els túnels de vent? Ara, zero.**
- **Doneu més validesa als programes informàtics? Els de simulació dinàmica, més que no pas cap altre.**
- **En definitiva, com estalvieu utilitzant els túnel de vent.**

Sol haver correlació de dades entre les dades que calculeu als programes de simulació i el túnel de vent? Si es així, perquè es gasta tant temps i diners en construir-los i utilitzar-los? Y entre el túnel de vent i la pista? Quins son els principals problemes que trobeu? Ja contestada.

Aquest menor pressupost suposa un increment de creativitat per part dels enginyers per obtenir els millors resultats amb ‘pocs’ diners o suposa més una gran pressió perquè si falles en la part aerodinàmica, no ho podràs recuperar a mig termini (1 temporada)?

Abans es produïen centenars de peces que mai acabaven arribant a les curses. La simulació ha fet que molts no s’acabin produint,, però tot i així, encara es descarten peces per no ser tan efectives com es preveïen o per errors en algun dels processos.

Quins serien els aspectes basics per coordinar bé un equip?

Te incidència en la qualitat del cotxe? Com es coordina tota la part aerodinàmica? El departament d’aero té una importància vital en el disseny del cotxes d’avui en dia en els últims anys s’ha convertit en el departament més important y que més recursos necessita perquè el cotxe sigui competitiu.

Per últim, una pregunta més personal, que has estudiat per arribar on has arribat? Per quines categories automobilístiques has passat? Quins son els teus objectius ara que has arribat on probablement volies treballar fa uns quants anys?

Pràcticament he estat involucrat en gairebé totes les especialitats de l’automobilisme. Des dels rallys fins a la F1, passant per Le Mans, turismes... i en varies funcions. L’automobilisme de competició et planteja desafiaments cada dia i cada moment, per tant, cada projecte és una nova aventura i un desafiament professional nou.

Gracies i sort.

Albert

ANNEX B: Entrevista a Daniel Gratacós

He tingut el plaer de poder entrevistar a Daniel Gratacós, enginyer que ha passat per múltiples categories automobilístiques com Formula Renault 2.0, F3, GP3, A1GP, World Series, GP2 i categories no tan menors com el DTM amb Mercedes. Actualment està al projecte de Peugeot al Dakar. Agraïxo molt la seva ajuda, ja que he pogut comprovar del poc temps que desponia

Que opina de la mítica frase d'Enzo Ferrari: "La aerodinàmica es per fracassats, que no saben fer motors."?

Igual en l'època en què es va originar aquesta frase sí. En aquella època el reglament era molt obert per no dir lliure i l'aerodinàmica no estava tan evolucionada. Així que fer un bon motor era més important que fer un cotxe aerodinàmicament eficient. Un exemple clar és el d'aquest any en què en obrir el reglament de motors, ha estat campió el que ha fet el millor motor, i no el cotxe amb millor aerodinàmica. Fins avui dia els motors eren molt "similars" a prestacions i per tant l'aerodinàmica tenia major importància:

Amb l'exemple de RedBull guanyant 4 mundials amb molta velocitat per corba, es més comú avui dia deixar la velocitat en recta en un segon pla y centrar-se en la velocitat per corba en el disseny del cotxe? Es sol prioritzar el pas per corba ràpida o corba lenta?

Hi ha un problema, i és que no es pot separar la velocitat de pas per corba amb la velocitat punta. És a dir, si tens molta càrrega aerodinàmica, no tindràs velocitat punta, i si tens poca càrrega aerodinàmica, tindràs molta velocitat punta. Perquè el drag i el downforce estan relacionats d'una manera directa. S'intenta minimitzar el drag i augmentar la càrrega (és el que s'anomena l'eficiència aerodinàmica), però no poden separar-se, un comporta l'altra.

Jugues amb aquests valors depenent del circuit. De tots és sabut que Monza és un circuit en el qual es busca velocitat punta, donades les seves llargues rectes, i que Monaco és un circuit sense llargues rectes en el qual preval la càrrega aerodinàmica.

Quant a prioritzar amb corba ràpida o lenta, no hi ha diferència. L'aerodinàmica treballa igual de eficientment en altes o baixes velocitats. És a dir que si tens gran càrrega en baixa velocitat també la tindràs en alta velocitat (amb una altra escala òbviament). De nou és un terme que no pots desassociar. Per simplificar, si tens 5 de càrrega aerodinàmica a 100km / h tindràs 5 de càrrega aerodinàmica a 200km/h. No pots tenir 5 en baixes velocitats i 3 en altes velocitats en no ser que tinguis elements mòbils (ales flexibles, DRS, etc.).

Diuen que Montmeló es un dels circuits més complerts. Que en destacaries?

a) El seu clima, que és poc plujós i amb temperatures "decents" tot l'any

b) La seva asfalt que és bastant abrasiu i fa treballar el pneumàtic de forma important (fins i tot massa)

c) Que té zones ràpides (sector 1 i 2) i un sector 3 bastant revirat, amb el que pots buscar un bon equilibri entre totes dues, o treballar en qualsevol dels 2 aspectes

Actualment la aerodinàmica es clau a moltes competicions d'automoció. Es això cert? Quin percentatge donaries d'importància a:

- **Aerodinàmica/Motor**
- **Cotxe/Pilot**

És complicat dir quin pes té cada part en un conjunt. És un equip i un conjunt d'elements. Si alguna cosa no funciona per descomptat que no es poden guanyar carreres. Mai veuràs un cotxe que guanyi perquè té el millor motor (i si no perquè no han guanyat els Williams aquest any?), O perquè tenen el millor pilot (Alonso no ha guanyat ni una carrera aquest any i és dels millors pilots). No puc donar xifres, ni crec que ningú les pugui donar.

En quina mesura els pilots participen en el desenvolupament aerodinàmic del cotxe?

En el desenvolupament aerodinàmic del cotxe els pilots no tenen res a veure. A aerodinàmica es busca sempre tenir la major càrrega possible. Es tracta d'obtenir els millors resultats possibles, i al poder quantificar aquests resultats mitjançant mesuraments, no és necessària l'aportació humana.

Parlant des de a teva experiència, varia molt l'aerodinàmica d'un pilot a un altre segons el seu estil de conducció? Com? Hi ha alguns que prefereixin més sobreviratge o subviratge, o d'altres que necessitin més downforce? La diferent trajectòria que facin a les corbes també ho pot variar l'aerodinàmica? Com? (Si pots posar exemples)

No Sempre estem dins d'uns paràmetres determinats, sobretot de càrrega total i de balanç aerodinàmic davanter vs posterior. Sí que és veritat que hi ha alguns pilots que per la seva forma de conduir, necessiten més o menys càrrega aerodinàmica davantera, però sol haver poca diferència. Sí que hi ha uns pilots que suporten millor el subviratge o el sobreviratge i amb el balanç aerodinàmic els pots ajudar a això. Sol necessitar més downforce els pilots que no saben treure tot el partit a grip mecànic i per tant s'han de recolzar més en el grip aerodinàmic, el que els resta velocitat punta. També l'aerodinàmica ajuda en la frenada, així que més aerodinàmica, més efectiu en la frenada.

La trajectòria en corba pot dependre de l'aerodinàmica, però depèn més del tipus de cotxe que del pilot. És a dir que si el cotxe no té molta aerodinàmica, caldrà evitar portar velocitat de pas per corba.

Como es dissenya un aleró? Quins serien els pasos principals? Com s'aconsegueix fer un alero que tingui a la vegada relació amb el motor y que no 'l'empitjori'' i en definitiva amb tot el cotxe en general?

Doncs bàsicament el primer és seguir una reglamentació. És la que ens limités les mesures / nombre d'elements / formes, etc. Com més gran, més càrrega podrem treure. A partir d'aquí, les formes dependran de quants elements pugui tenir el nostre aleró. I després també haurem de dependre de les velocitats de treball, angles, si ens interessa tenir més drag o menys, que no entri en pèrdua, etc.

I de nou tornem al mateix punt que abans i és que com més càrrega puguem generar, millor. Després ja ho adaptarem a les necessitats del circuit baixant el Angle d'atac o posant o traient elements, però busquem sempre màxima càrrega possible.

Quin efecte provoca menor pressupost econòmic en categories inferiors a la F1 com la GP2, GP3 o World Series?

El problema de les categories inferiors (o avantatge) és que no podem desenvolupar parts del vehicle (en alguns campionats F3 sí que és possible). Així que el material que rebem del constructor és el que farem servir durant tota la temporada sense possibilitat de desenvolupar peces. L'únic que podem fer és ajustar el millor possible la càrrega aerodinàmica al circuit que competirem.

Es posible utilizar tunels de vent amb tants pocs diners respecte la F1?

En cas afirmatiu:

- **Son propis o "alquilats" d'altres equips o institucions?**
- **Com afecten els problemes correlació de resultats amb la realitat?**
- **Quin percentatge del pressupost d'un equip d'aquestes categories es dedica a proves en els tunels de vent?**
- **Doneu més validesa als programes informàtics? Quins programes feu servir?**
- **En definitiva, com estalvieu utilitzant els túnel de vent.**

Sí que és possible normalment utilitzar túnels de vent. Se solen llogar a entitats tipus MIRA a Anglaterra o Toyota Motorsport Alemanya entre d'altres. Són bastant cars (8.000 per dia aprox) i ens serveix bàsicament per:

- A) Correlació de dades amb les dades que ens ofereix el fabricant
- B) Extrapolació amb les altures que no estiguin en el manual
- C) Optimització d'elements com les preses de refrigeració de frens i motor

A vegades la realitat i les dades del fabricant no es corresponen al 100% ja que el fabricant de vegades usa una maqueta per treure el seu mapa aerodinàmic, o perquè hi ha hagut modificacions en el cotxe final. I per això també és útil anar al túnel de vent. El pressupost destinat a això és igual d'una sessió per any, no més. Sempre que parlem de categories tipus F3, GP2 o World Series, és a dir, categories amb pressupostos superiors als 600.000 euros per temporada.

Pel que fa als programes informàtics són molt utilitzats ja que ens permeten arribar a un circuit amb unes nocions de velocitat punta, càrrega aerodinàmica i relacions de canvi. Sempre que ho tinguis ben calibrat. És a dir, cal treballar abans d'anar al circuit i després per veure quant s'han acostat teus càlculs previs a la realitat i fer ajustos perquè els càlculs tinguin encara més fiabilitat. Programes utilitzats: aerosim, aerolap, lapsim, entre els més coneguts.

El túnel de vent no és en si un estalvi, simplement és una eina que ens permet afinar més en la posada a punt i perdre menys temps en aquest aspecte, però per a res, un estalvi, és una inversió

Aquest menor pressupost suposa un increment de creativitat per part dels enginyers per obtenir els millors resultats amb 'pocs' diners o suposa més una gran pressió perquè si falles en la part aerodinàmica, no ho podràs recuperar a mig termini (1 temporada)?

Un menor pressupost en la part d'aerodinàmica no suposa que hàgim de tenir més imaginació, sinó que li haguem de dedicar més temps a l'anàlisi de factors per trobar el set up aerodinàmic just o adequat. Si falles en la part aerodinàmica, perdràs una sessió com a molt, no més, no dissenyem peces, per això el nostre "error" aerodinàmic implica molt poques conseqüències.

Hi ha correlació de dades entre el simulador (programes de simulació) i túnel de vent? Perquè es gasta tant en construirlos i en utilitzar-los?

Mas d'haver correlació, es busca que n'hi hagi. És Deir, quan es dissenya una peça, es passa per cfd i si els resultats són els esperats es fabrica. Després es passa pel túnel de vent i es comparen resultats. Si la peça dóna una millora del 1,5% es munta. L'1% és el marge d'error del mesurament / sensors. El problema és que els simuldores Qun no són fiables perquè el flux turbulent és totalment aleatori i no es pot "simular". Després tens tota la interacció entre peces i després la resposta a diferents velocitats.

Per últim, una pregunta més personal, que has estudiat per arribar on has arribat? Per quines categories automobilístiques has passat? Quins son els teus objectius ara que has arribat on probablement volies treballar fa uns quants anys?.

Jo he estudiat enginyeria industrial, però sobretot li he dedicat hores i molta feina a una passió que és la meva feina. He passat per totes les categories menors del Motorsport (Formula Renault 2.0, F3, GP3, A1GP, World Series, GP2) i categories no tan menors com el DTM amb Mercedes. No he anat a F1 perquè quan em presento l'oportunitat no va ser el moment adequat, però podria haver anat. Avui dia estic en el projecte Dakar de Peugeot per canviar de disciplina i per treballar una altra vegada en un equip oficial on hi ha més recursos i no depens de la part econòmica, i sobretot perquè m'ho va oferir / demanar Carlos Sainz, ja que ens vam conèixer quan vaig fer d'enginyer del seu fill el 2011. no sé on vull estar en el futur, no tinc cap objectiu ja que he complert amb el que volia fer dins del motorsport. Déu dirà. I tu vols dedicar-te a això? Aquestes segur? És un món molt bonic des de fora, però molt dur i poc agraït des de dins.

ANNEX C: Entrevista a Luis Pérez Sala

Amb l'exemple de Red Bull, guanyant quatre mundials amb molta velocitat per corba, és més comú avui en dia deixar la velocitat en recta a un segon pla i centrar-se en la velocitat per corba al disseny del cotxe? O se sol prioritzar?

Sempre hi ha un equilibri, el que passa que mantenir la velocitat en recta per a les carreres és un inconvenient molt gran, perquè els avançaments són complicats. Llavors, te la jugues haver qui han de sortir primer i controlar la cursa ... és molt difícil guanyar posicions i és fàcil perdre-les en un moment... És molt difícil diguem guanyar posicions i és molt difícil defensar dels atacs d'altres rivals

Saps si es prioritza el pas per a corba ràpida o corba lenta, o és igual?

Luís: Bé és que són diferents. Una s'aconsegueix més amb la aerodinàmica i l'altra més amb la mecànica, saps? Sempre cal buscar un equilibri total en les coses. El màxim d'equilibri. És més àgil per al pilot un cotxe ràpid en les rectes. És més fàcil en cursa

Això explicaria com Vettel no ha guanyat per darrere de la quarta posició, no?

Efectivament, és a dir, li costa, si estàs darrere costa molt remuntar. Costa molt avançar als rivals encara que siguis més ràpid per volta si tens un cotxe que és més ràpid en les rectes et costa molt passar.

Diuen que Montmeló és un dels circuits més complets. Que destacaries?

Bé, Montmeló el que té són unes corbes, una gran recta; i corbes de suport que fa que treballi la aerodinàmica molt i et dona moltes indicacions de cara als desenvolupaments aerodinàmics. Als tècnics els agrada molt, perquè te corbes d'unes velocitats bastant bones per als estudis aerodinàmics.

Actualment la aerodinàmica és clau en moltes competicions d'automoció. És això cert?

La aerodinàmica pensa que és igual que el neumàtic, el neumàtic és bàsic, el que passa és que al tenir tots els mateixos pneumàtics la aerodinàmica és el que et dona la diferència de que bàsicament un cotxe tingui més o menys adherència, i més o menys velocitat, llavors allà és l'equilibri clau en els cotxes de competició. I el que ha quedat amb menys evolució és la part

mecànica, la suspensió, la geometria; passa a ser més estàndard perquè tens menys que guanyar

Però en categories inferiors com a la *World Series by Renault* que aerodinàmicament són gairebé tots els cotxes iguals ¿segueix sent tan clau com a la fórmula 1, per exemple?

És igual de clau el que passa és que la diferència és que en la World Series tu no pots desenvolupar aerodinàmica, tens que córrer amb la que et marca el reglament i la que et dona el promotor i en canvi la fórmula 1 és lliure amb uns reglaments que et marquen unes distàncies. Llavors cadascun en el seu equip desenvolupa una aerodinàmica que sigui el major possible mentre que en la World Series no tens a enginyers ni cap equip que et desenvolupi això perquè el paquet tal i com t'ho donen és com tens que córrer; no el pots modificar. L'únic que pots fer és regular-ho

Pots regular l'altura del cotxe amb la qual cosa canvies la aerodinàmica, regles la inclinació de les ales, ... però no pots canviar el perfil de l'ala, no pots canviar la mida, la precisió.

Que percentatge donaries d'importància entre aerodinàmica i motor?

Luis: A veure, aquesta pregunta està feta amb trampa, a veure, sinó tens motor no pots arrencar ni córrer. És bàsic, però si que és veritat, que el desenvolupament del motor excepte aquesta temporada, que ha entrat un reglament nou, diguem que està més optimitzat i la secció de la aerodinàmica era la que marcava més la diferència, excepte aquesta temporada que diguem que les dues coses han marcat la diferència. Pot ser si m'haguessis preguntat l'any passat t'hagués dit 60 per aerodinàmica 40 per motor, i ara et diria 60 per a motor i 40 per aerodinàmica

Sol haver correlació quan es fa la part de aerodinàmica se sol fer en funció del motor, o al revés el motor en funció de la aerodinàmica?

Luis: Normalment es fan les dues coses. O sigui el motor es desenvolupa per tenir la potencia que tu vols i s'intenten fer curts, estrets. Busquen fer que el motor s'adapti a l'aerodinàmica que l'enginyer vol, això normalment en grans amb els motoristes. Després de vegades quan tens motors que estan molt desenvolupats, que vénen ja determinats i que estan ja creats, llavors si q no pots estar canviant el motor cada any. Tens que anar millorant l'aerodinàmica perquè s'adapti al motor. L' ideal és crear en paper el blanc, el disseny del cotxe que jo vull i veure si puc adaptar el motor a aquest espai. Les dues coses van unides. El que passa que arriba un moment que tu tens un motor i fas el cotxe a raó del motor.

Jo el que he escoltat per la televisió és que a Ferrari per exemple entre els departaments de aerodinàmica i motor, no s'havien posat d'acord . Havien fet d'una banda l 'aleró i per una altra el motor i, per això hagi sortit el cotxe tan malament. Quanta importància te aquesta coordinació?

Jo crec que no és això. A vegades hi ha menys acord. El que et demana el aerodinàmic ja que el motorista et diu que no t'ho pot donar .Doncs clar tens unes limitacions. O sigui sempre és un compromís. I quan les coses surten malament es tiren las culpes els uns als altres.

I entre cotxe i pilot que percentatge d'importància donaries?

El cotxe és bàsic, l'equip és bàsic i el pilot es quan posa la guinda. Si a tu no et donen un cotxe guanyador el únic que pots fer és treure el màxim partit d'aquest cotxe; però no podria guanyar. Podries posar-li un 70 - 30. Jo sempre els comparo amb un equip de futbol. Tu si poses a Ronaldo al Madrid ja és un jugador q marca diferències; si ho poses al Albacete també marca diferències, però clar no jugessin la copa d'Europa, ni la lliga ni res, o sigui ... Fica gols ... És un esport equip. La fórmula 1 és un esport d'equip, i el pilot és un goleador al finals quan li dones tot és el que té que posar la màxima responsabilitat, ficar gol, fer la victòria, no fallar, no trencar, no tenir un accident.

En que mesura els pilots participen en el desenvolupament aerodinàmic del cotxe? Participaven més abans o ara?

Luis: Potser abans es participava més perquè els equips eren més petits. Ara un equip de 400 persones el pilot no pot estar tan pendent de tot. Però ara tens molta informàtica, moltes dades que analitzar. El pilot dóna adreces que si les dóna bé s'escurça molt camí i dóna molts diners i si les dóna malament doncs allarga el camí i costa molts diners, i complica la situació. El pilot sempre és una part important del desenvolupament; però abans possiblement era tot de més sensibilitat, havia menys informàtica, els comentaris del pilot, els punts d informació era la telemetria. El que deia el pilot era la telemetria d'ara. Si el pilot era mes correcte, els enginyers tenien més possibilitats de saber per on anaven les coses, de com interpretar; però clar si l'enginyer interpretava malament la informació tampoc havia res que fer. Ara tothom té la informació però hi ha qui la analitza millor que altres.

Parlant des del teu experiència, varia molt la aerodinàmica d'un pilot a un altre segons el seu estil de conducció? Com? Hi ha alguns q prefereixen subviratge altres q necessiten més sobreviratge?

Luis: Si, varia una mica, el que passa que en la fórmula 1 al final és molt, magnitud són pocs, i clar sempre hi ha algun pilot que li agrada un cotxe més subvirador, ... varia una mica, la posada a punt de cada un.

La diferent trajectòria q faci en les corbes, també pot fer que variï?

Luis: si una micaet varia una mica la posta a punt.

Com es dissenya un aleró? Quins serien els passos principals?

L' aleró és cosa d'aerodinàmica. Primer fas la simulació a l'ordinador, poses un programa que s'anomena CFD..És un programa en el que tu vas desenvolupant una mica el que vols, busques la major eficiència, i un cop que ho tens aquí decideixes si això pot ser una alternativa viable, i ho fas. Ho fas en maqueta: 1/6 0 1/5. La maqueta petita la poses al túnel del vent també al cotxe per anar provant. Si veus que funciona bé i penses q té una avantatges de punt de suport i aerodinàmica, llavors fas escala 1/1 i fas el producte autèntic i ho proves al cotxe. I comproves si és veritat el que has anat processant en el desenvolupament del aleró, si en el 1/1 és veritat. A vegades la diferència és molt poca, a favor; altres no hi ha diferència, i de vegades fins i tot les dades que has tingut a la maqueta i al túnel del vent no es relacionen amb les dades que tens a la realitat .Y llavors tens un problema, és clar. Per això és molt important que tinguin relació tot el que desenvolupes en túnel amb maqueta ja 1/1 per que puguis comptar amb això. I quan ho reflecteixis al cotxe saps que has fet un treball eficient.

A la teva estància a la fórmula 1 pilotant per Minardi en 1988-89, donàveu tanta importància a la aerodinàmica com ara?

Si, se li donava molta importància. Però clar no tenia l'adquisició de dades que té ara. L'estudi no estava tan desenvolupat.

Disposàveu del túnel del vent?

Luis: Nosaltres de tant en tant provaven al túnel del vent però era de tant en tant

El llogaves d'altres equips o els deixaven provar?

Luis: Si, però molt poc, potser quan anaves abans de fer el cotxe. El túnel del vent era estàtic, no tenies la cinta que rodava, era tot més senzill i després no tenies les TCD, era molt diferent.

Llavors es pot dir que s'ha evolucionat molt en aquests anys des de que s'utilitza el túnel del vent?

Si, s'ha evolucionat molt. A la electrònica, a la informació de dades i al túnel del vent.

Quin efecte provoca el menor pressupost econòmic a categories inferiors de fórmula 1 com GP2, GP3 o World Series o altres o simplement en equips menors?

Luis: Com són equips menors no et deixen fer Desenvolupaments, només posada a punt pràcticament. Però clar un equip de GP2 te exactament el doble d'equip que la formula3, saps? són 25 persones, 20, de vegades menys. Però no necessiten a més gent perquè tens un reglament molt limitat, no pots fer coses, no pots desenvolupar, l'únic q pots fer és una posada a punt i entrenar per ser molt precís, i saber quin és el mètode de treball que tens que fer durant el cap de setmana, com plantejar la cursa, les inclemències, canvis d temperatura, com varia l'equilibri, tot això. Però no pots fer alerons, no pots construir res.

Llavors en aquests equips amb menys pressupost és possible o es sol utilitzar el túnel del vent?

Luis: Bé els pots utilitzar per Tenir dades d com funciona el cotxe, ja que amb la inclinació, amb l'altura tal, és a dir, la gent ho fa per tenir les dades i després en el circuit és més segur; però no et poses en el túnel del vent per desenvolupar coses sinó per provar el que tens en diferents configuracions.

I en aquest cas també són llogats a altres equips?

Luis: Si, van un cop l'any, i comproven, de vegades tornen però si no amb això es suficient, o per corroborar coses, o durant l'any he vist coses que no em quadraven

Quins solen ser els principals problemes de correlació amb la realitat?

Luis: Doncs això et té que donar tants punts de downforce i no te'ls dóna, o et frena molt en la recta, bàsicament teu el q busques és suport i poc fre aerodinàmic al final. Es el q intentes tenir. A alta velocitat, a baixa, llavors clar, veus q no et quadra, que guanyis velocitat i no tens suport,; llavors qual es l'equilibri que et dóna al cotxe, per que clar si et desequilibres completament el cotxe ... Llavors tens que intentar que aquest suport que et deixa equilibrat en el cotxe, perquè si t'ho dóna d davant i enrere no doncs llavors tens el vibrador , estaràs més lent en les corbes encara que tinguis més suport .Tens que anar sempre buscant l'equilibri

Que percentatge de pressupost en un equip d'aquestes categories li dedica al túnel del vent més o menys?

Anem a veure, com més alt és l'equip més pressupost. El percentatge ...?

O dada?

Un percentatge alt, no t'ho es a dir

Llavors en aquests equips li donen més validesa als programes informàtics?

Luis: No, no. El teu pensa que la gent q està desenvolupant, primer fan amb l'ordinador el TCD de lo q vols amb la reglamentació que tens i quan veus que tens unes avantatges, el portes a maqueta i de maqueta a la realitat. És clar si tu no tens un bon equip o desenvolupament del TCD en ordinador llavors clar el estàs penalitzant tot, tota l' estructura. Por això també és veritat que va tot unit.

Val ara passem a parlar en general, en el món automoció ¿Sol haver correlació de dades entre les dades que calcula els programes de simulació i al túnel del vent? I si és així, ¿Per que es gasten tants diners i temps en fer-ho i construir-lo i utilitzar-lo?

No t'entenc, però em parles de la fórmula 1 ...?

Si, si, de la fórmula 1. Si els programes informàtics estan tan avançats i pràcticament coincideixen amb el que dona el túnel del vent; per qué es gasta tant de temps al túnel de vent?

Anem a veure quan tu, hi ha molta igualtat, això és el que fa gastar. Entens?

Si tens q fer una casa i no hi ha ningú més; doncs encara que facis una casa q les ventanes tanquin malament, q aquest mal feta doncs la teva al final dius la venc per 10, i arriben i te la compren ... ara quan hi ha competència, com no facis una casa que sigui bé aïllada, i sobre que sigui mes barata que la de l'altre. .això és el que fa la competència, que les coses siguin millors. També quan tens que guanyar a la competència que és major, tens que dedicar més hores, i clar per guanyar no és el mateix el que costa guanyar una dècima quan tot és boníssim que guanyar una dècima amb un altre cotxe més inferior.

El menor pressupost d'un equip no suposa un increment de creativitat per part dels enginyers per Obtenir millors resultats amb pocs diners o suposa més pressió perquè la part aerodinàmica no la pots recuperar a curt termini?

Bàsicament jo crec que és bonic treballar en un lloc com en un altre. És diferent, depèn, de l'ambient que tinguis, els objectius, l'harmonia que hi hagi entre la gent. Pots estar a Ferrari i Tenir un ambient que sigui un desastre ... Però si que és veritat, que la gran diferència està per exemple, que en un equip petit que una cosa té un avantatge molt petita o d'una dècima, pots dir sinó vaig a Tenir un avantatge de tres dècimes no la vaig a construir Un equip gran, creu que pot tenir un avantatge d'una dècima i la construeix, que després no la tenen doncs la tira. La diferència està en el pressupost Però la dècima li està dient si va a guanyar el campionat del món o no. Un equip petit gestiona la seva economia diferent.

Tenint en compte que un equip petit com HRT, un bon equip de aerodinamicistes pot ser clau per a la millora del cotxe?

Si clar, té molt més marge de millora un equip com HRT perquè l'equip de dinàmica és molt més petit, i pots desenvolupar alguna cosa que et de més avantatge, és molt difícil lluitar contra els millors

I en aquests casos, en els equips petits es sol copiar més dels equips rivals?

Sempre en tot quan tens gent superior, còpies per avançar i a part fas les teves coses .Però còpies i rumies. Tu quan veus a algú que fa, que cuina una carn, i tu no saps cuinar, primer mires i després la carn la cuinaràs malament, menys feta i tal però has vist com l'ha fet. I entre els equips grans es copien entre ells. A vegades copien alguna cosa dels petits, de algun enginyer original

Com team principal del desaparegut equip de fórmula 1 HRT. Quin serien els aspectes bàsics per coordinar un equip? Tenen incidència en la qualitat del cotxe? Com es coordina tota la part de aerodinàmica?

Per coordinar un equip les accions humanes són molt importants. Que cada equip tingui la seva direcció, amb gent que sigui valorada. Té que haver respecte; i això entre els diferents departaments: el aerodinàmic, el de relacions humanes, és una mica la coordinació humana a gestionar un equip d'unes 120 persones, que conviuen junts que tenen les seves Reunions de grup per poder coordinar millor i no malgastar forces. funcionen com un equip gran però la coordinació és molt més fàcil. Com menys gent tens més fàcil és la gestió

Llavors es pot dir que te força incidència en la creativitat del cotxe, en com coordines l'equip?

Luis: Si home com coordines l'equip si Però si tu al final no tens mitjans ... perquè pots Tenir un bon enginyer però aquest no pot contractar a l'equip que vol .Moltes vegades tens que prendre Decisions condicionades. I per descomptat també passa en equips grans. És més important la coordinació en equips grans que en petits, que tens que coordinar per ser el més eficient possible, perquè no pots malgastar el temps, perquè hi ha poc personal no pots malgastar el temps. En un grup gran pots malgastar una mica el temps

I per últim, la pregunta més personal. Com vas començar tu en el món de l'automoció?

Doncs perquè m'agradava de petit. Em vaig construir un kart, dels cars i d'aquí vaig passar als cotxes. Després vaig guanyar 1 copa amb Renault, després el trofeu .. la fórmula 3, i finalment vaig arribar a la F1.

I com a enginyer, com es pot arribar a treballar en un circuit, perquè clar a mi m'agradaria fer això però no se com fer-ho?

Primer tens que saber si vols treballar de mecànic de motors, d'aerodinàmica,...Pots fer màsters. Hi ha gent que ha anat a fer-ho a Anglaterra, perquè hi ha dues universitats que estan ben preparades en aquest tema

Jo vull fer aeronàutica en la UPC de Terrassa i després si puc un màster en automoció, però veig molt difícil poder arribar a treballar en un circuit

Primer quan hi ha entrenaments, per exemple en Montmeló, jo hi tinc enginyers meus que estan treballant i que et poden dir com fer-ho, que màster necessites, on anar, etc

Que tinguis sort Victor.

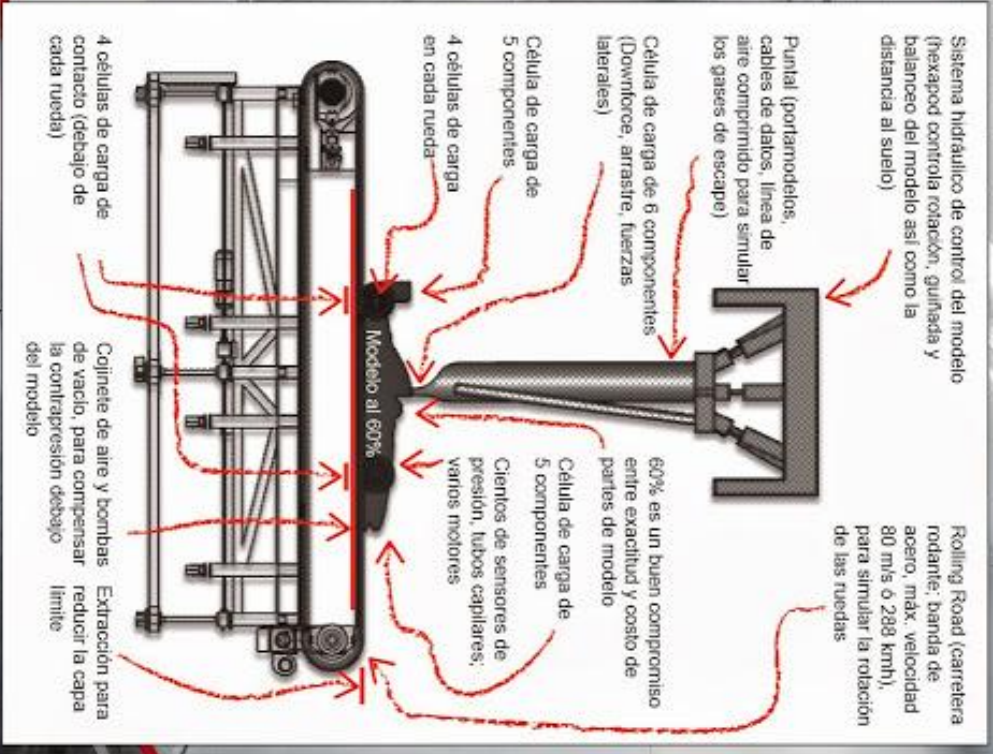
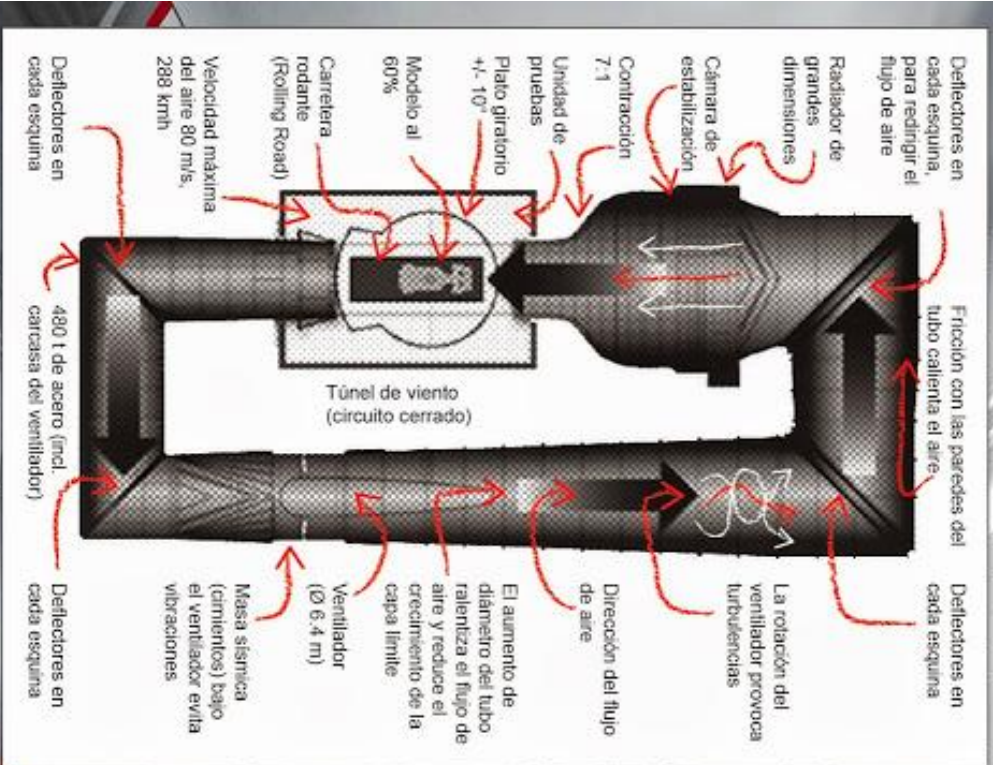
ANNEX D: Túnel de vent de Sauber



Sauber F1 Team

Más información en youtube.com/sauberf1team

Túnel de viento Formula 1®
Infografía



- Claro
- TELWINX
- NEC
- ortikon
- MEGACALDER
- EXTRA
- VALVULAS
- SANTANA
- PAQUET
- Muller

ANNEX E: Estudi d'un aleró efficient al circuit de Barcelona-Catalunya

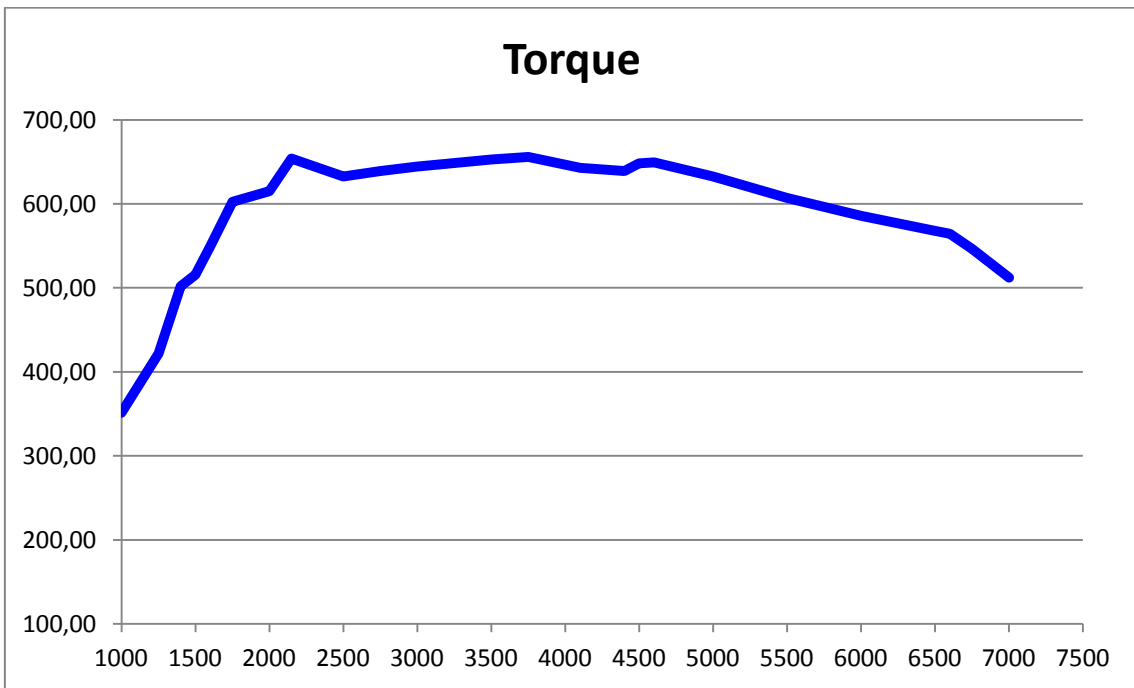
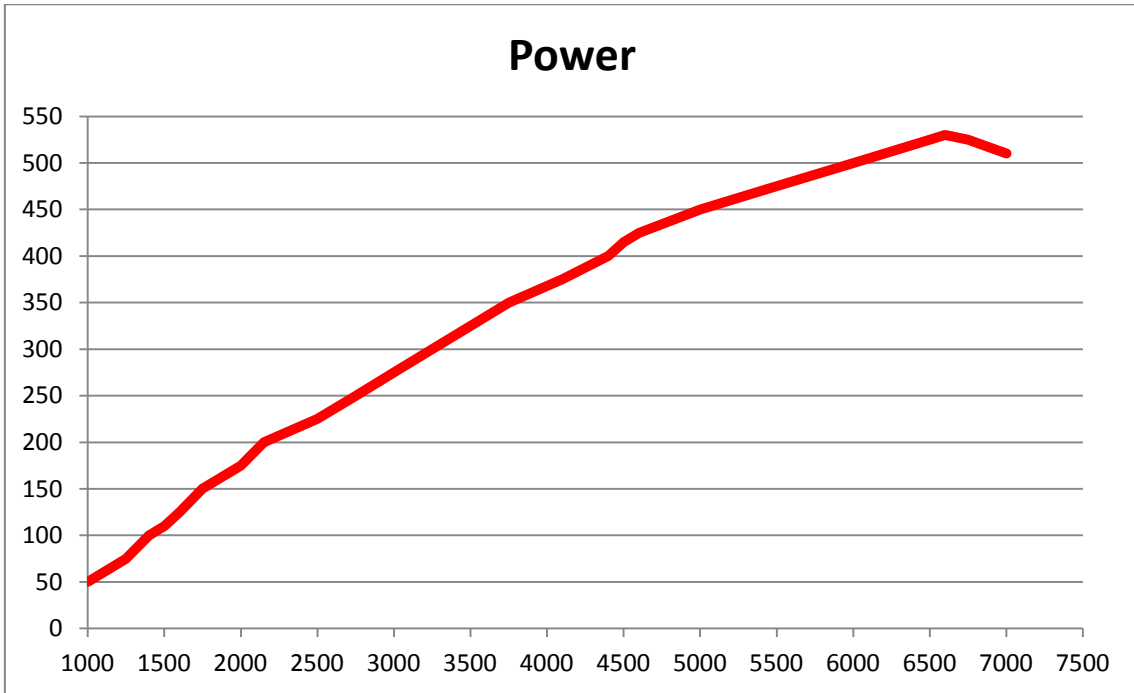
m cotxe	790 kg						
μ pneumatic	0,95	Corba	Radi (m)	V ENTRADA	V SORTIDA	n Vel. Mitja	TEMPS
dens aire	1,225 kg/m ³		1	41,00	46,67	36,39	41,53
A mullada	0,88 m ²		2	60,00	41,11	44,44	42,78
% L Fus	0,4		3	163,33	55,00	70,00	62,50
% L Davant	0,3		4	84,32	57,78	59,17	58,47
% L Darrere	0,3		5	35,00	41,11	31,67	36,39
			6	230,00	64,44	72,50	68,47
Mitja CL Davant	13,05		7	40,00	49,17	37,78	43,47
Mitja L	9762,464085		8	100,00	41,11	54,17	47,64
			9	93,88	70,56	59,44	65,00
			10	20,20	30,28	25,00	27,64
			11	34,60	45,00	48,61	46,81
			12	57,00	51,94	38,89	45,42
			13	25,00	43,89	33,89	38,89
			14	11,00	28,61	23,33	25,97
			15	10,00	25,28	25,56	25,42
			16	91,00	47,22	64,17	55,69

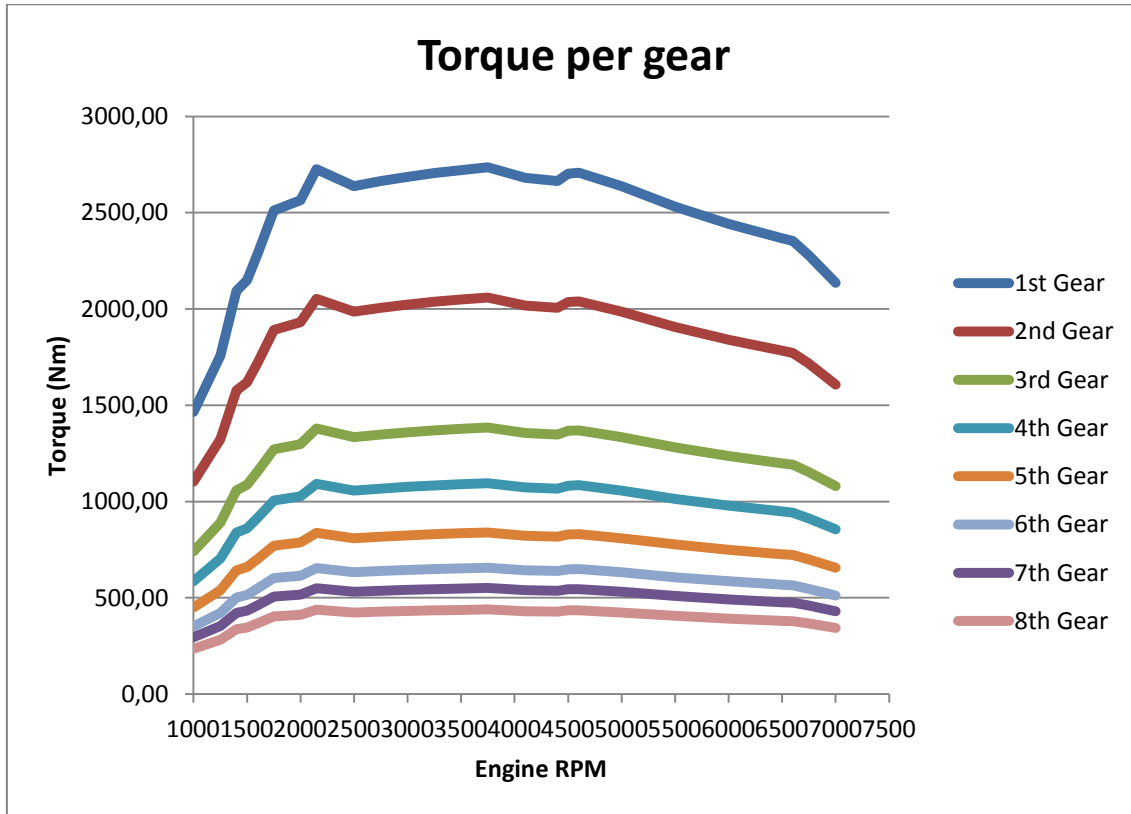
a (fora-dins)	F.Cent.	Pes (N)	L tot. (N)	L Fus (N)	L Dav (N)	L dar (N)	CL
3,95	130,25	7749,90	137,11	54,84	41,13	41,13	0,04
-2,01	24094,19	7749,90	25362,30	10144,92	7608,69	7608,69	7,71
-2,18	18893,88	7749,90	19888,30	7955,32	5966,49	5966,49	2,83
-0,25	32032,86	7749,90	33718,80	13487,52	10115,64	10115,64	5,49
2,84	29887,99	7749,90	31461,04	12584,41	9438,31	9438,31	13,22
-5,37	16103,79	7749,90	16951,36	6780,54	5085,41	5085,41	2,01
5,99	37324,22	7749,90	39288,66	15715,46	11786,60	11786,60	11,57
-9,97	17928,76	7749,90	18872,38	7548,95	5661,71	5661,71	4,63
4,81	35553,37	7749,90	37424,60	14969,84	11227,38	11227,38	4,93
1,50	29875,62	7749,90	31448,02	12579,21	9434,41	9434,41	22,91
-4,35	50020,24	7749,90	52652,89	21061,16	15795,87	15795,87	13,38
2,80	28587,93	7749,90	30092,56	12037,02	9027,77	9027,77	8,12
5,18	47790,12	7749,90	50305,39	20122,16	15091,62	15091,62	18,51
4,40	48445,41	7749,90	50995,17	20398,07	15298,55	15298,55	42,08
-0,25	51034,55	7749,90	53720,58	21488,23	16116,17	16116,17	46,28
-7,84	26928,33	7749,90	28345,61	11338,25	8503,68	8503,68	5,09

ANNEX F: Resultats complets exemple Maserati

			Power	T engine	RPM engine	RPM 1st	T 1st	RPM 2nd	T 2nd
4,17	:	1	50	351,41	1000	239,81	1465,40	318,47	1103,44
3,14	:	1	75	421,70	1250	299,76	1758,48	398,09	1324,13
2,11	:	1	100	502,02	1400	335,73	2093,42	445,86	1576,34
1,67	:	1	110	515,41	1500	359,71	2149,25	477,71	1618,38
1,28	:	1	125	549,08	1600	383,69	2289,68	509,55	1724,13
1	:	1	150	602,42	1750	419,66	2512,11	557,32	1891,61
0,84	:	1	175	614,97	2000	479,62	2564,44	636,94	1931,02
0,67	:	1	200	653,79	2150	515,59	2726,32	684,71	2052,91
			225	632,55	2500	599,52	2637,71	796,18	1986,19
			250	638,93	2750	659,47	2664,36	875,80	2006,26
ipedia.org/wiki/Gear_ratio			275	644,26	3000	719,42	2686,56	955,41	2022,97
			300	648,76	3250	779,38	2705,35	1035,03	2037,12
entat, perque en te 8			325	652,63	3500	839,33	2721,45	1114,65	2049,25
			350	655,97	3750	899,28	2735,41	1194,27	2059,76
			375	642,83	4100	983,21	2680,60	1305,73	2018,49
			400	638,93	4400	1055,16	2664,36	1401,27	2006,26
			415	648,16	4500	1079,14	2702,84	1433,12	2035,23
			425	649,35	4600	1103,12	2707,80	1464,97	2038,97
			450	632,55	5000	1199,04	2637,71	1592,36	1986,19
			475	606,99	5500	1318,94	2531,14	1751,59	1905,94
			500	585,69	6000	1438,85	2442,33	1910,83	1839,07
			525	567,67	6500	1558,75	2367,18	2070,06	1782,48
			530	564,39	6600	1582,73	2353,52	2101,91	1772,19
			525	546,64	6750	1618,71	2279,51	2149,68	1716,46
			510	512,06	7000	1678,66	2135,29	2229,30	1607,87

T 3rd	T 4th	T 5th	T 6th	T 7th	T 8th
741,48	586,86	449,81	351,41	295,19	235,45
889,78	704,23	539,77	421,70	354,23	282,54
1059,26	838,37	642,59	502,02	421,70	336,35
1087,51	860,73	659,72	515,41	432,94	345,32
1158,57	916,97	702,83	549,08	461,23	367,89
1271,12	1006,05	771,10	602,42	506,04	403,62
1297,60	1027,01	787,17	614,97	516,58	412,03
1379,50	1091,84	836,86	653,79	549,19	438,04
1334,67	1056,35	809,66	632,55	531,34	423,81
1348,15	1067,02	817,84	638,93	536,71	428,09
1359,39	1075,91	824,65	644,26	541,18	431,65
1368,89	1083,44	830,42	648,76	544,96	434,67
1377,04	1089,89	835,36	652,63	548,21	437,26
1384,10	1095,47	839,65	655,97	551,02	439,50
1356,37	1073,53	822,82	642,83	539,98	430,70
1348,15	1067,02	817,84	638,93	536,71	428,09
1367,63	1082,43	829,65	648,16	544,46	434,27
1370,13	1084,42	831,17	649,35	545,46	435,07
1334,67	1056,35	809,66	632,55	531,34	423,81
1280,74	1013,67	776,94	606,99	509,87	406,68
1235,81	978,10	749,68	585,69	491,98	392,41
1197,78	948,01	726,62	567,67	476,84	380,34
1190,87	942,54	722,42	564,39	474,09	378,14
1153,42	912,90	699,70	546,64	459,18	366,25
1080,45	855,14	655,44	512,06	430,13	343,08





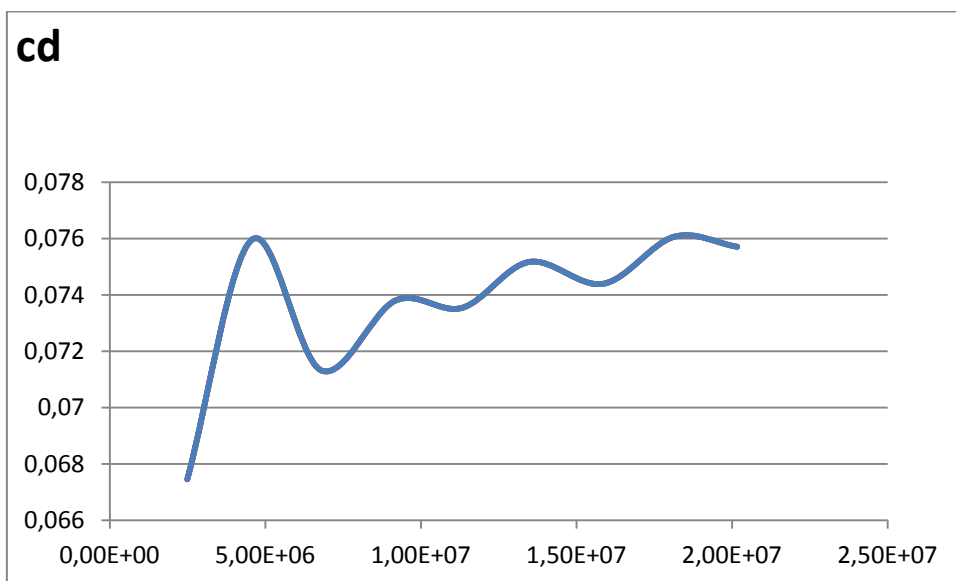
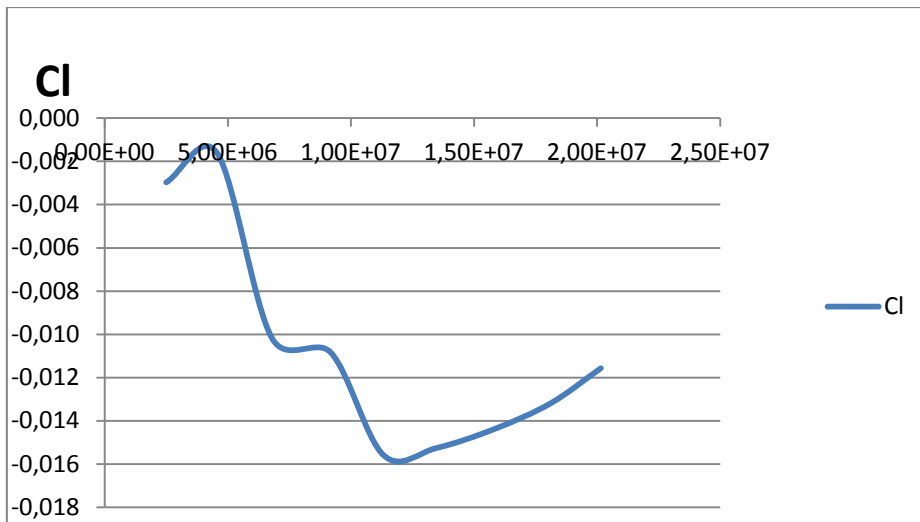
	Engine	1st Gear	2nd Gear	3rd Gear	
Driving force	1863,56	7771,04	5851,58	3932,11	0961
T DF	7454,24	31084,18	23406,31	15728,44	385
L	2131,46				
D	590,57				
Ff	13973,884				
a (m/s²)	-3,95	9,18	4,91	0,65	
0-100 a (sec)	-7,03	3,03	5,65		
			Radi roda	0,352 m	
			Cl	0,44	
			Cd	0,44	
			mu	0,9	
			massa	1800 kg	
			vel	27,78	m/s
			A Cl	10,25	m ²
			A Cd	2,84	m ²

ANNEX G: Resultats del túnel de vent

Eppler 423

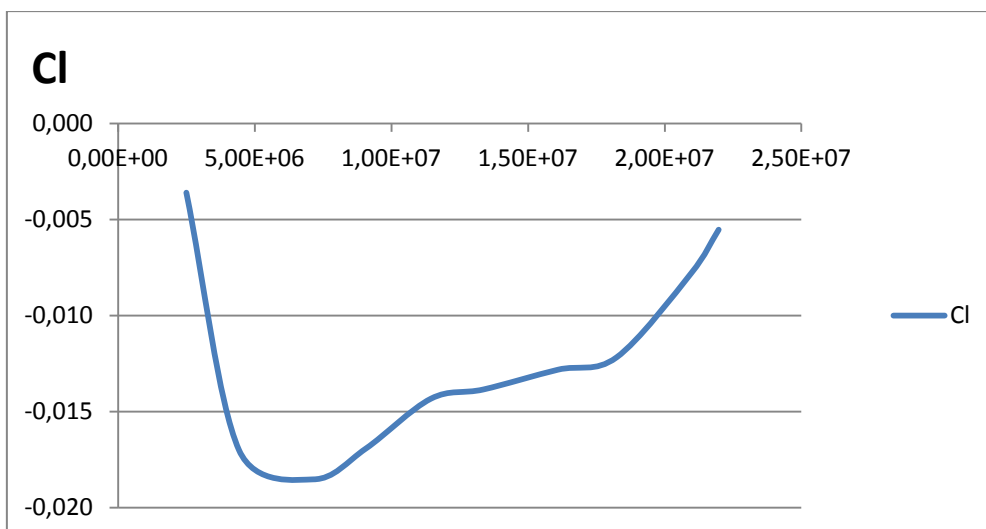
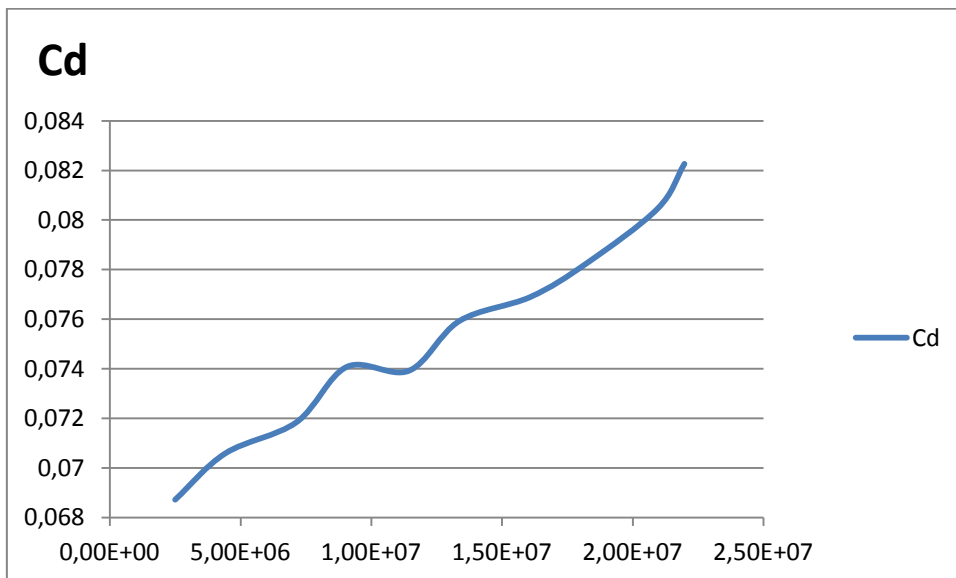
1º intent

Viscositat aire	1,85E-05 Pa s	1º INTENT								
densitat alcohol	740 kg/m ³	Increment Alcohol (m)	Increment P	Velocitat	Re	L	Cl	D	Cd	
Temperatura Laboratori	284,15 K	0,022	31,941	7,289	2,49E+06	-0,014	-0,003	0,318	0,06745084	
Pressió Laboratori	0,964798218	0,040	58,511	9,865	4,56E+06	-0,131	-0,002	0,656	0,07595943	
Altura (Terrassa)	300 m	0,060	87,113	12,038	6,80E+06	-0,188	-0,010	0,917	0,0713183	
Densitat aire laboratori	1,202356266	0,081	117,602	13,986	9,17E+06	-0,334	-0,011	1,281	0,07379841	
Chord	0,72	0,100	145,188	15,540	1,13E+07	-0,389	-0,016	1,576	0,07354263	
E	0,205	0,119	172,774	16,953	1,35E+07	-0,431	-0,015	1,917	0,07517234	
Area	0,1476	0,140	203,263	18,388	1,59E+07	-0,452	-0,014	2,232	0,07439591	
		0,160	232,301	19,657	1,81E+07	-0,452	-0,013	2,608	0,07606249	
		0,178	258,435	20,734	2,02E+07	-0,441	-0,012	2,888	0,0757112	



2º intent

2º INTENT							
Increment A	Increment P	Velocitat	Re	L	Cl	D	Cd
0,022	31,941	7,289	2,49E+06	-0,017	-0,004	0,324	0,0687235
0,039	56,623	9,705	4,42E+06	-0,142	-0,017	0,59	0,07059441
0,063	91,468	12,335	7,14E+06	-0,250	-0,019	0,97	0,0718479
0,080	116,150	13,900	9,06E+06	-0,290	-0,017	1,27	0,07407926
0,101	146,640	15,618	1,14E+07	-0,310	-0,014	1,6	0,07392333
0,118	171,322	16,881	1,34E+07	-0,350	-0,014	1,92	0,07592803
0,142	206,167	18,519	1,61E+07	-0,390	-0,013	2,34	0,07689718
0,161	233,753	19,719	1,82E+07	-0,420	-0,012	2,7	0,07825657
0,185	268,598	21,137	2,10E+07	-0,310	-0,008	3,19	0,08046405
0,194	281,665	21,645	2,20E+07	-0,230	-0,006	3,42	0,08226352



BIBLIOGRAFÍA

AHMED,Syed and Flegl ,Helmut, Aerodynamics of Road Vehicles Wolf-Heinrich Hucho, 1990

F. Anderson, DAVID and Eberhardt ,SCOTT , Understanding Flight,Mc Graw Hill, 2010

Katz, JOSEPH, Race Car Aerodynamics:Designing for Speed, Bentley Publishers,1995

MCBEATH ,Simon , Aerodinamica del automovil de competición,Casa del libro,2005

WEBGRAFIA

<https://www.albrodpulf1.wordpress.com/> (de Juny 2014 – Gener 2015)

www.aviacionulm.com (de Juny 2014 – Gener 2015)

<http://www.carandriverthef1.com/> (de Juny 2014 – Gener 2015)

www.lanasa.net (de Juny 2014 – Gener 2015)

www.manualvuelo.com (de Juny 2014 – Gener 2015)

<http://tecnicaf1.com> (de Juny 2014 – Gener 2015)

<http://tecnicadevuelo.com> (de Juny 2014 – Gener 2015)

<http://tecnicaf1raulmolina.com/> (de Juny 2014 – Gener 2015)

<http://thebestf1.com> (de Juny 2014 – Gener 2015)