

# TREBALL DE RECERCA

## AERODINÀMICA DE L'AUTOMÒBIL



## ÍNDIX

1 INTRODUCCIÓ.....	Pàgina 5
2 ANTECEDENTS HISTÒRICS.....	Pàgina 6
3 DEFINICIÓ I ORIGEN.....	Pàgina 9
4 FORCES AERODINÀMIQUES.....	Pàgina 10
4.1 Equacions inicials.....	Pàgina 10
4.1.1 Equació de continuïtat.....	Pàgina 10
4.1.2 Equació de Bernoulli.....	Pàgina 10
4.1.3 Efecte Venturi.....	Pàgina 11
4.2 Forces implicades.....	Pàgina 12
4.2.1 Força de sustentació i <i>downforce</i> .....	Pàgina 12
4.2.2 Força lateral aerodinàmica.....	Pàgina 14
4.2.3 Força de resistència a l'avanç.....	Pàgina 14
4.3 Coeficients aerodinàmics.....	Pàgina 14
4.4 Nombre de Réynolds.....	Pàgina 15
4.4.1 Règim laminar.....	Pàgina 16
4.4.2 Règim turbulent.....	Pàgina 16
4.4.3 Règim transitori.....	Pàgina 17
4.5 Capa límit.....	Pàgina 17
5 APORTACIÓ DE L'AERODINÀMICA ALS AUTOMÒBILS.....	Pàgina 20
5.1 Disseny d'automòbils de carrer.....	Pàgina 20
5.1.1 Factors a tenir en compte.....	Pàgina 20
5.1.2 Entrades d'aire.....	Pàgina 21
5.1.3 Retrovisors.....	Pàgina 21
5.1.4 Secció posterior de l'automòbil.....	Pàgina 22
5.1.5 Para-xocs.....	Pàgina 22
5.2 Disseny d'automòbils de competició.....	Pàgina 23
5.2.1 Alerons davanters.....	Pàgina 23
5.2.2 Alerons posteriors i DRS.....	Pàgina 24
5.2.3 Deflectors laterals.....	Pàgina 25
5.2.4 Difusors i fons pla.....	Pàgina 25
5.2.5 Anàlisi de diferents disciplines.....	Pàgina 26
5.2.5.1 DTM.....	Pàgina 27
5.2.5.2 WEC.....	Pàgina 28
6 EFECTE DEL DISSENY AERODINÀMIC AL CONSUM DE COMBUSTIBLE.....	Pàgina 29

## Aerodinàmica de l'automòbil

7 TÚNELS DE VENT.....	Pàgina 31
7.1 Exemple de túnels de vent: Williams F1.....	Pàgina 32
8 SIMULADORS INFORMÀTICS (CFD).....	Pàgina 33
9 PART PRÀCTICA.....	Pàgina 35
10 CONCLUSIONS.....	Pàgina 37
11 BIBLIOGRAFIA.....	Pàgina 39
11.1 Fonts utilitzades per extreure fotografies.....	Pàgina 39
11.2 Fonts utilitzades per extreure informació.....	Pàgina 40
12 ANNEX 1: ENTREVISTA A JOSEP ROCA.....	Pàgina 44

## **AGRAÏMENTS**

La realització d'aquest treball de recerca no hauria sigut possible sense la gran ajuda que m'ha donat durant tot aquest període el meu tutor, en Josep Canamasas i Güell, ja que sempre m'ha donat suport i m'ha donat moltes idees per donar-li un millor acabat al treball.

També se li ha de donar les gràcies a la Teresa Obradors per facilitar-nos al Josep Canamasas i a mi la comunicació i, lògicament, també donar-li totes les gràcies a en Josep Roca per haver destinat una part del poc temps que pot passar aquí a Artés responnent la meva entrevista i , i no menys important, donant-me moltes idees en apartats teòrics i per com construir la meva part pràctica.

I per últim, agrair a la meva família tot el suport que m'han donat durant tot el període de feina que m'ha donat aquest treball i també l'ajut que m'han donat en la realització de la part pràctica.

A tots ells: gràcies.

## 1 INTRODUCCIÓ

L'aerodinàmica és la branca de la física -tot i que també es pot considerar principalment una branca de la mecànica- que estudia la interacció entre l'aire com a fluid i l'objecte que executa el moviment. Tot i que en qualsevol tipus de moviment de qualsevol objecte hi intervé la resistència aerodinàmica provocada per l'aire, en els dos camps que s'utilitza més és en l'aviació i en l'automobilisme.

A l'hora de triar la temàtica del treball de recerca, jo volia triar un tema que, primer de tot, estigués relacionat amb el tipus de batxillerat que estic emprant: el tecnològic; a més, vaig intentar que la temàtica anés relacionada amb el tipus d'enginyeria que triaria després de cursar batxillerat, i finalment, volia que fos un tema del meu gust i que captés la meua atenció.

Com que a l'hora de triar la temàtica del treball de recerca encara no tenia clar l'enginyeria a emprar després de batxillerat, em vaig centrar en un tema de caire tecnològic, que fos del meu gust i que m'interessés a l'hora de fer-ne recerca.

Per això vaig triar l'aerodinàmica dels automòbils, ja que és un tema relacionat amb la tecnologia, sobretot amb la mecànica; és un treball que també em pot servir d'ajut dins l'assignatura de mecànica de segon de batxillerat i dins alguna de les possibles enginyeries que pugui estudiar i és un tema que m'interessa moltíssim, ja que des de petit sóc un aficionat a la Fórmula 1 i sempre n'havia sentit parlar sobre aquest tema i sempre m'havia interessat.

Com a objectius a assolir dins d'aquest treball es poden presentar els següents:

- Aconseguir entendre i poder operar amb la part més matemàtica i més operacional del treball.
- Veure si té una importància tant rellevant en un cotxe de carrer com en un cotxe de competició.
- Veure la relació entre els coeficients aerodinàmics i el consum de combustible, i veure si l'aerodinàmica realment té un pes específic important en aquest camp.
- Comprendre la innovació d'aquest camp a partir de l'evolució que ha patit al llarg del temps.
- Poder elaborar una part pràctica que reflecteixi la part teòrica anteriorment feta.
- Aconseguir parlar amb casos personals que estiguin involucrats en el món de l'aerodinàmica dels automòbils de competició.

## 2 ANTECEDENTS HISTÒRICS

En un tema com l'aerodinàmica dels automòbils, és summament complicat determinar qui va ser el primer -o els primers- en dissenyar un automòbil eficient en quant al seu coeficient aerodinàmic. Tot i ser tan complicat, molt experts coincideixen que un dels pioners en aquest complicat tema va ser Amédée Bollée, que va modificar el disseny del seu Torpilleur arrodonint-lo tant del davant com del darrere per aconseguir una major velocitat punta en la cursa París-Amsterdam de 1898.

En aquella època es va començar a intentar perfeccionar el disseny aerodinàmic dels automòbils, principalment, per aconseguir la major velocitat punta possible. L'any 1899, el belga Camille Jenatzy va aconseguir arribar més lluny. Per tal d'aconseguir superar al seu rival, el comte Chasseloup-Laubat, amb el seu automòbil Jeantaud, Jenatzy va arrodonir la part frontal del seu automòbil -conegut amb el nom de Jamais Contente- donant-li una forma més semblant a una bala o a un cigarret que a un automòbil de competició.



Figura 1: Jamais Contente, 1899

Gràcies a aquest innovador disseny, Camille Jenatzy va ser el primer a sobrepassar la barrera dels 100 km/h.

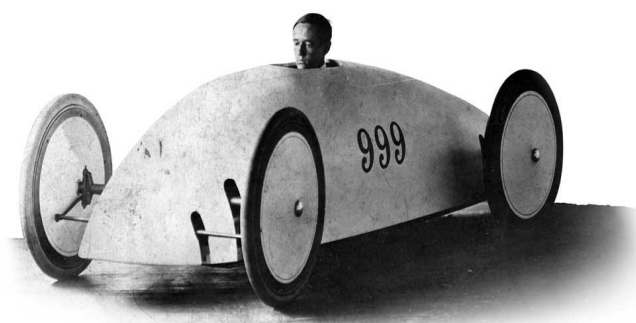


Figura 2: Electric Baker Torpedo, 1902

Walker va introduir un disseny menys allargat que el Jamais Contente de Jenatzy i més punxegut. Tot i portar cabina interior pels pilots i per assegurar la seva seguretat, poc després de ser presa aquesta imatge, el cotxe va patir un accident i no va tornar a circular.

## Aerodinàmica de l'automòbil



Figura 3: Rumpler Tropfenwagen, 1921

amb un arrodoniment, tant en la part davantera com en la posterior. Gràcies a això, aquest automòbil va aconseguir tenir un millor coeficient aerodinàmic que alguns cotxes dissenyats posteriorment, quan el van provar en un túnel de vent el 1979. A partir d'aquest model, es va dissenyar el Benz Tropfenwagen, que va tenir molta importància en l'automobilisme de competició.

Un dels dissenyadors més importants durant el segle XX va ser l'austríac Hans Ledwinka. Després de ser contractat per la marca Tatra el 1921, va dissenyar el Tatra v570 1933. Com es pot veure en la imatge, és un cotxe amb pocs plans verticals, cosa que ja va afavorir molt a la traçada de l'aire i al rendiment de l'automòbil. A més, en la part posterior, s'acaba en una forma arrodonida i d'una sola peça (no com el Rumpler Tropfenwagen, que tenia dues parts clarament diferenciades).



Figura 4: Tatra v570, 1933

A partir d'aquell moment, la majoria de cotxes al mercat van intentar imitar el disseny del Tatra v570, ja que, fins aquell moment, va suposar la millor combinació entre elegància i aerodinàmica, és a dir, velocitat. Un d'aquests intents de perfeccionar el disseny que va introduir Tatra, va ser el Tjaarda de 1934. Va ser un disseny pràcticament idèntic, però amb l'única diferència que la part davantera del cotxe era més allargada i amb un acabat més arrodonit.

En l'aerodinàmica dels automòbils, l'era que va de 1920 a 1970 s'anomena l'era d'adaptació a l'aviació, ja que en els dissenys es van començar a incorporar formes introduïdes per l'aviació anys abans. Els dissenys van començar



Figura 5: Formes a partir de l'aviació

## Aerodinàmica de l'automòbil

a tendir cap a formes més allargades com el Studebaker de Citroen de l'any 1953.

Els perfils dels cotxes del carrer van començar a canviar quan, entre 1964 i 1965, es va dissenyar l'automòbil competitiu denominat Chaparral 2B. Era un disseny amb una part davantera molt plana que ascendia fins el cop-pit del pilot i una part posterior molt allargada



Figura 6: Chaparral 2B, 1964

on hi havia els tubs d'escapament i uns grans deflectors que, a part de refrigerar tant el motor com els frens, millorava la seva eficiència aerodinàmica. Dos anys després, al mateix vehicle hi van afegir un aleró posterior per tal d'augmentar la seva velocitat punta i el van anomenar Chaparral 2E. L'últim dels dos vehicles va tenir una gran trajectòria dins l'automobilisme de competició -sobretot dins els Estats Units-

fins el 1970 i va influenciar tots els vehicles de carreres, sobretot la NASCAR.

Per tant, l'automobilisme de competició -sobretot de la Fórmula 1, que ara mateix és l'excel·lència en quant a eficiència aerodinàmica i perfecció dels dissenys- va influenciar en gran manera dins l'aerodinàmica dels automòbils de carrer i d'això n'és un bon exemple la marca Porsche. L'any 1972 la marca alemanya va llençar al mercat el Porsche Carrera RS que, com es



Figura 7: Porsche Carrera RS, 1972



Figura 8: Mercedes Bionic

pot observar, no és gaire diferent als vehicles d'aquesta marca que podem veure avui en dia circulant pels carrers. En els següents anys, s'ha anat perfeccionant l'acabament de les formes per tal de millorar al màxim els coeficients aerodinàmics dels vehicles que actualment utilitza la població. Això, fins i tot ha portat a veure dissenys pràcticament futuristes de marques com Mercedes.



### 3 DEFINICIÓ I ORIGEN

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que s'encarrega de la interacció entre un mòbil en moviment i un fluid: que en aquest cas serà aire (si fos un líquid s'estudiaria en la hidrodinàmica). L'aerodinàmica estudia les variacions que apareixen en el fluid quan aquest mòbil hi circula amb una velocitat.

Com hem vist en l'apartat anterior, la influència de l'aerodinàmica en els automòbils ha estat present des de finals del segle XIX, però el seu estudi data de molt més abans. L'origen de l'estudi d'aquest terme va començar a la cultura Antiga, pels voltants del 300 a.C. quan Aristòtil va concloure que quan un mòbil circula per l'aire, es crea un buit darrere seu que fa que segueixi en moviment.

L'any 1726, Isaac Newton va arribar a unes conclusions més acurades, ja que va observar que les forces de resistència aerodinàmica eren degudes a partícules d'aire que rebotaven contra el mòbil en moviment. També va dir que l'aire i l'aigua obeïen a lleis físiques similars i que les seves forces depenien de la seva viscositat, la velocitat del fluid que rodejava l'objecte i la mida del propi objecte. L'únic inconvenient que Newton va tenir fou l'error en els càlculs de les forces de sustentació i de resistència a l'avanç -o de fricció-.

No va ser fins el 1907, quan el rus Joukowski va visualitzar de manera correcta les traçades de fluid en el desplaçament del mòbil. Una de les aportacions principals de Joukowski va ser la consideració de la viscositat dels fluids en relació a les seves forces resultants.

Però, retrocedint en el temps una altra vegada, trobarem un dels més importants observadors i investigadors per a la història de l'aerodinàmica. Aquest investigador és el físic i matemàtic suís Daniel Bernoulli. Bernoulli va treballar la major part de la seva vida amb el matemàtic, també suís, Leonhard Euler -de fet Bernoulli també és considerat matemàtic-. Daniel Bernoulli va deduir un principi (principi de Bernoulli) que ha estat



Figura 9: Daniel Bernoulli (1700-1782)

aplicat des de la seva creació en la mecànica de fluids. L'equació de Bernoulli va ser exposada pel físic suís en el tractat *Hydrodynamica* i molts científics l'atribueixen a Euler, però mai s'ha qüestionat seriosament. La teoria de Bernoulli la veurem al llarg del treball i ens servirà com a explicació de les forces de resistència aerodinàmica.

## 4 FORCES AERODINÀMIQUES

Per poder entendre les forces implicades en el moviment d'un mòbil en un fluid, primer de tot analitzarem les equacions més importants de la mecànica de fluids, ja que l'aerodinàmica en deriva d'ella.

Per calcular les forces implicades en la mecànica de fluids, s'utilitza un fluid ideal, és a dir, un fluid no viscos, que la seva fricció interna es reparteix per tot el fluid; estacionari, que la seva velocitat en un punt es manté constant amb el temps; incompressible, la densitat del qual es manté constant en el temps; i que no presenta remolins, és a dir, que no presenta moment angular en cap punt.

Primer de tot, analitzarem les equacions principals de la mecànica de fluids per tal de poder entendre les equacions de les forces de resistència aerodinàmica, ja que aquestes últimes ja són un pèl més complexes.

### 4.1 Equacions inicials

#### 4.1.1 Equació de continuïtat

Si tenim un fluid en un recipient de secció  $S_1$  i aquest fluid es desplaça cap a  $S_2$ , l'espai que haurà recorregut en un interval de temps  $\Delta t$  serà:  $\Delta x_1 = v_1 \Delta t$ . D'aquesta fórmula també en podem treure que la massa de fluid desplaçat serà igual a:  $\Delta m_1 = \rho \cdot S_1 \cdot \Delta x_1 = \rho \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t$ . (On  $\rho$  és la densitat del fluid)

Al mateix temps, el fluid també es desplaçarà per la part de la canonada de secció  $S_2$  en el

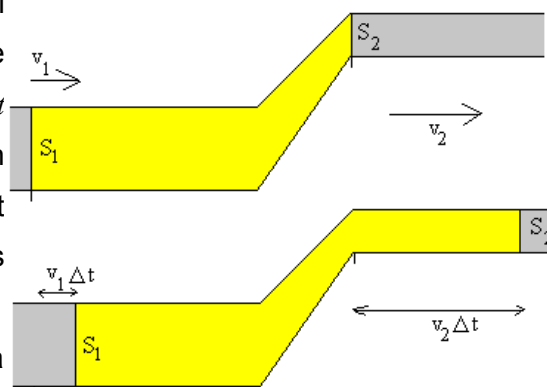


Figura 10: equació de continuïtat

mateix interval de temps  $\Delta t$ . L'equació de l'espai recorregut en aquesta part de la canonada serà:  $\Delta x_2 = v_2 \cdot \Delta t$  i la quantitat de massa desplaçada serà:  $\Delta m_2 = \rho \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t$ .

Com que estem treballant amb un fluid estacionari, la quantitat de massa  $\Delta m_1$  i la quantitat de massa  $\Delta m_2$  han de ser iguals, per tant, podem obtenir la següent equació:  $v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$ , on la velocitat i la secció són inversament proporcionals. Aquesta equació s'anomena equació de continuïtat.

#### 4.1.2 Equació de Bernoulli

Si tenim un fluid en un recipient i apliquem forces oposades en els seus extrems, el fluid es desplaçarà  $v_1 \cdot \Delta t$  cap a la dreta en la part inferior i  $v_2 \cdot \Delta t$  cap a la dreta en la part superior.

## Aerodinàmica de l'automòbil

La massa del fluid es pot expressar com:  $\Delta m = \rho \cdot S_2 \cdot v_2 \cdot \Delta t = \rho \cdot S_1 \cdot v_1 \cdot \Delta t = \rho \cdot \Delta V$ , on  $\rho$  és la densitat del fluid.

Primer de tot, analitzarem la variació d'energia potencial en el sistema indicat, que serà:  $\Delta E_p = \Delta m \cdot g \cdot y_2 - \Delta m \cdot g \cdot y_1 = \rho \cdot \Delta V \cdot (y_2 - y_1) \cdot g$

Seguidament, analitzarem la variació d'energia cinètica:

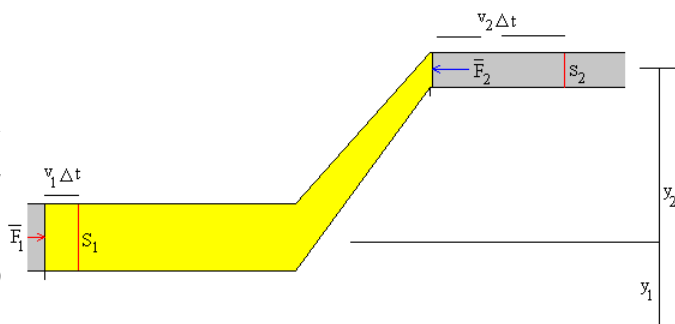


Figura 11: equació de Bernoulli

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v_2^2 - \frac{1}{2} \cdot \Delta m \cdot v_1^2 = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot \Delta V \cdot (v_2^2 - v_1^2)$$

I per acabar analitzarem el treball de les forces exteriors:  $W_{ext} = F_1 \cdot \Delta x_1 - F_2 \cdot \Delta x_2 = (p_1 - p_2) \cdot \Delta V$ , on  $p_1$  i  $p_2$  són les diferents pressions.

El teorema de treball-energia ens diu que el treball de les forces exteriors que actuen sobre un sistema modifica l'energia del sistema de partícules, que és la suma de les variacions d'energia cinètica i energia potencial.

Per tant, obtenim:  $W_{ext} = E_f - E_i = (E_k + E_p)_f - (E_k + E_p)_i = \Delta E_k + \Delta E_p$

Si simplifiquem la variable  $\Delta V$ , obtindrem l'equació de Bernoulli:

$$p_1 + \rho \cdot g \cdot y_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \rho \cdot g \cdot y_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2$$

El nom del científic suís Daniel Bernoulli (1700-1782) el seguirem veient, ja que la seva teoria l'aplicarem en les forces relacionades a la resistència aerodinàmica, especialment en la força de sustentació.

### 4.1.3 Efecte Venturi

En l'efecte Venturi (ideat pel físic italià Giovanni Battista Venturi, 1746-1822) agafem com a referència una canonada horitzontal anomenada *tub de Venturi* i, per tant, el desnivell de  $y=0 \rightarrow y_1=y_2$ . En el tub de Venturi també hi col·locarem un manòmetre que mesurarà la diferència de pressió entre les dues branques de la canonada.

Tenint el tub de Venturi com a referència, aplicarem les equacions de continuïtat i de Bernoulli. Primer de tot, apliquem l'equació de continuïtat:  $v_1 \cdot S_1 = v_2 \cdot S_2$ . Com que veiem que  $S_1 > S_2$ , podem concloure que  $v_1 < v_2$ .

Seguidament aplicarem l'equació de Bernoulli, que hem trobat més amunt, tenint en compte que  $y_1 = y_2$ , per tant,  $g \cdot y_1 = g \cdot y_2$ , marxaran de l'equació i obtindrem la següent equació:  $p_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2$

Com que sabem que  $v_1 < v_2$ , podem arribar a la conclusió que  $p_1 > p_2$ .

També podrem obtenir els valors de les velocitats  $v_1$  i  $v_2$  a través de la lectura dels valors de les pressions en el manòmetre:

$$v_2 = S_1 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\rho \cdot (S_1^2 - S_2^2)}}$$

L'efecte Venturi és emprat en varis camps com:

- Aeronàutica: pot explicar part de l'efecte de sustentació.
- Motors: el carburador aspira el carburant per efecte Venturi.
- Aquariofília: a les preses de bombes d'aigua, l'efecte Venturi s'utilitza per la injecció d'aire.

## 4.2 Forces implicades

Quan analitzem les forces aerodinàmiques que provoca el desplaçament d'un mòbil dins un fluid, aquestes dependran de la forma de l'automòbil, de les característiques del fluid (que, com hem dit abans considerarem ideal) i de la velocitat d'aquest mòbil.

Però independentment d'aquests paràmetres, sempre podrem analitzar la força de sustentació i la força de resistència a l'avanç que, sumades vectorialment, provoquen les forces de resistència aerodinàmica total.

Moltes vegades, la força aerodinàmica total es redueix a la fórmula de la força de resistència a l'avanç -o força de fricció- ja que en els vehicles de carrer la força de sustentació no tindrà tanta importància com la que podrà tenir en els vehicles de competició. Aquestes diferències i l'aprofitament de les diferents forces que es donen les veurem a l'apartat 5.2 on veurem el disseny dels automòbils de carreres.

### 4.2.1 Força de sustentació o downforce

La força de sustentació és la força generada en un automòbil que circula a una certa velocitat perpendicular a aquesta velocitat. És una força que es pot generar en tres casos:

- Esferes o cilindres que giren (efecte Magnus)
- Canalització de fluids (principi de Venturi)
- Cossos de perfils asimètrics (principi de Bernoulli)

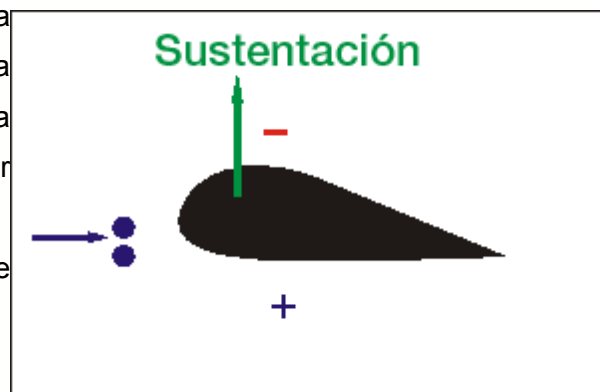


Figura 12: força de sustentació

En el nostre cas, la força de sustentació es genera a causa dels perfils asimètrics, per tant, ens concentrarem en aquests casos.

La manera més fàcil d'entendre la força de sustentació és a través d'exemples pràctics

## Aerodinàmica de l'automòbil

com per exemple quan traiem la mà per la finestra del cotxe. Ràpidament podem notar una força que ens empeny la mà cap amunt: aquesta és la força de sustentació.

Ara que ja hem entès a nivell pràctic la força de sustentació, anem a veure com es produeix i com la podem calcular.

La força de sustentació es produeix en perfils asimètrics com el de l'exemple perquè les partícules circulen de la zona de pressió més baixa (-) a la zona de pressió més alta (+). Aquesta força es pot explicar a través de l'equació de Bernoulli perquè la seva equació relaciona l'augment de la velocitat amb la disminució de la pressió, i viceversa; per tant, d'aquesta equació en podem extreure que quan un mòbil de part superior corbada i de part inferior plana com la de la figura, les partícules d'aire adoptaran dos recorreguts: per dalt o per baix. Les partícules d'aire s'acabaran retrobant al final del mòbil, per tant, les partícules que adopten el recorregut superior, hauran de recórrer una distància  $S_1$  superior a  $S_2$  i la velocitat  $v_1$  serà superior a  $v_2$ . Si tenim que  $v_1 > v_2$  i no tenim en compte  $\Delta y$  ja que la diferència de  $y$  és mínima, obtindrem l'equació de Venturi que hem vist més amunt.

Finalment, obtindrem una diferència de pressió  $\Delta p$  entre la part superior (-) i la part inferior (+). La baixa pressió de la part superior provocarà una força de sustentació que, per exemple, farà que un avió pugui volar.

La força de sustentació es pot calcular a través de la següent fórmula:

$$F_z = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_z \quad F_z = \text{força de sustentació}$$

$\rho$  = densitat

$v$  = velocitat

$A$  = àrea de «perfil alar»<sup>1</sup>

$C_z$  = coeficient de sustentació (que analitzarem més tard)

La força de sustentació s'utilitza en sentit negatiu en els automòbils de competició per tal d'obtenir una major adherència, cosa que significa un aspecte clau que més tard analitzarem.

En disciplines automobilístiques de competició com la Fórmula 1, on els vehicles aconseguixen velocitats de fins a 340km/h, podria arribar a existir el perill que els pilots perdessin el control del vehicle o que fins i tot s'aixequés el cotxe degut a la força de sustentació. Per això, en moltes disciplines automobilístiques s'aprofita el *downforce* -o força de sustentació negativa-.

El *downforce*, a part d'evitar que el cotxe es pugui enlairar -cosa

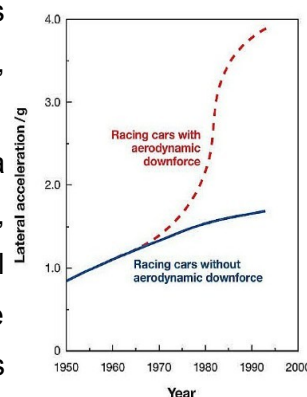


Figura 13: Downforce i

força lateral en les corbes

<sup>1</sup> La superfície alar consisteix en tota la superfície de l'element que talla amb l'aire. En el cas dels avions consisteix en calcular l'àrea de les ales. En un vehicle consisteix en calcular la superfície horitzontal.

que seria extremadament perillosa-, augmenta l'adherència dels monoplaques. Aquest augment de l'adherència pot augmentar el límit de velocitat que tingui un cotxe en passar per corba, cosa que disminuirà en gran mesura el temps per volta.

### 4.2.2 Força lateral aerodinàmica

És la força de resistència aerodinàmica menys utilitzada de les tres, ja que és la més feble de les tres.

$$F_y = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_y$$

Aquesta força es calcula a través de la següent fórmula:

En aquest cas també tenim un altre coeficient aerodinàmic ( $C_y$ ) que analitzarem més tard i la  $A$  s'utilitza l'àrea frontal del vehicle, com en el cas de la força de fricció.

### 4.2.3 Força de resistència a l'avanç

La força de resistència a l'avanç -o força de fricció- és la força que es produeix a causa de la interacció entre un mòbil i un fluid i que té direcció horitzontal i el seu sentit és oposat a la velocitat a la que circula aquest mòbil.

La força de resistència a l'avanç depèn, com la força de sustentació, de la velocitat, de la densitat del fluid, de la superfície que en aquest cas serà frontal i del coeficient aerodinàmic.

Aquesta força és la que pren més importància a l'hora del disseny aerodinàmic dels vehicles de carrer, ja que en aquests la força de sustentació no serà tan important com ho pot arribar a ser en els cotxes de competició.

La força de resistència a l'avanç es calcula a través de la següent equació:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot C_x$$

$F_x$ = força de resistència a l'avanç

$\rho$ = densitat del fluid

$v$ = velocitat

$A$ = superfície frontal<sup>2</sup>

$C_x$ = coeficient aerodinàmic x

## 4.3 Coeficients aerodinàmics

Ara que ja hem vist els principis de la mecànica de fluids i les forces implicades en el desplaçament d'un automòbil en un fluid, ja podem començar a introduir-nos en els coeficients aerodinàmics, ja que tenen una gran importància a l'hora de determinar les forces que actuen sobre el mòbil.

Els coeficients aerodinàmics són nombres sense unitat que són decisius a l'hora de calcular les forces resultants sobre un cos que circula a una certa velocitat a través d'un fluid.

<sup>2</sup> En l'equació de la força de resistència a l'avanç, la  $A$  es refereix a la superfície frontal. Mentre a la força de sustentació era l'àrea superior del cos, en aquest cas serà l'àrea que xoca directament amb el flux del fluid.

## Aerodinàmica de l'automòbil

En l'aerodinàmica de vehicles, podem trobar tres coeficients:

- $C_x$
- $C_z$
- $C_y$

Com ja hem dit en l'apartat anterior, la força que adquireix més importància en l'aerodinàmica de vehicles de carrer és la força de resistència a l'avanç ( $F_x$ ) Per tant, igual que passa amb les forces, quan ens referim a coeficients aerodinàmics els més importants i els més utilitzats són els coeficients de força de resistència a l'avanç ( $C_x$ )

La majoria dels coeficients aerodinàmics dels vehicles que utilitzem diàriament se situen entre 0,25 i 0,40, mentre que alguns prototips han arribat a aconseguir un coeficient de 0,2.

Si observem una taula amb els coeficients aerodinàmics més destacats, veurem que els cotxes de competició no han de ser obligatòriament els punters, ja que, per exemple, un Fòrmula 1 a Monza utilitza un coeficient de 0,7 a causa de la gran rapidesa que té el circuit italià.

Per altra banda, hi ha automòbils que pràcticament només són prototips que aconseguen coeficients molt baixos comparats amb els que acabem de veure. Podem veure un exemple en la marca Volkswagen. La marca alemanya va dissenyar l'any 2011 i va exposar l'any 2013 el Volkswagen XL1, que és un vehicle amb unes línies aerodinàmiques envejables, ja que ha aconseguir un coeficient aerodinàmic de 0,189.



Figura 14: Volkswagen XL1

Com hem pogut veure en l'entrevista amb en Josep Roca, en l'automobilisme de competició no sempre interessarà obtenir el mínim coeficient possible, sinó que en cada cursa haurem de trobar el coeficient ideal que estableixi el millor equilibri possible entre la força de resistència aerodinàmica a l'avanç -*drag*- i la força de sustentació negativa -*downforce*-. Si, per exemple, estem tractant d'un circuit format majoritàriament per rectes, interessarà obtenir un coeficient molt baix per tal d'obtenir les màximes velocitats possibles i, en aquest cas, no donarem tanta importància al *downforce*.

### 4.4 Nombre de Réynolds

El nombre de Réynolds és un nombre adimensional que relaciona les forces d'inèrcia ( $F_i$ ) i les forces de viscositat ( $F_\mu$ )

El nombre de Réynolds es regeix per la següent equació:

$$R = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{v \cdot L}{\nu}$$

$R$ = nombre de Réynolds

$\rho$ = densitat del fluid

$v$ = velocitat del cotxe

$L$ = longitud del cotxe

$\mu$ = viscositat del fluid<sup>3</sup>

$\nu$ = viscositat cinemàtica<sup>4</sup>

Aquest nombre serveix per determinar si en interaccionar un mòbil i el fluid, el fluid al voltant del mòbil actuarà de forma laminar, de forma turbulenta o de forma transitòria.

#### 4.4.1 Règim laminar

Si calculem el nombre de Réynolds en la trajectòria d'un mòbil i aquest ens dona inferior a 2000, direm que el fluid es comportarà en règim laminar.

Un fluid es comporta en règim laminar si les partícules d'aquest fluid es mouen sempre al llarg de trajectòries uniformes, en capes o làmines, en el mateix sentit, direcció i magnitud.

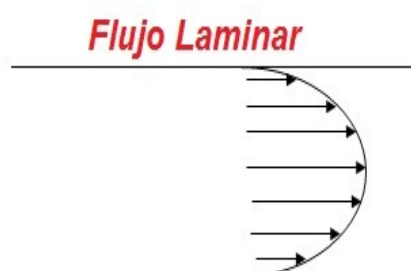


Figura 15: flux laminar

Aquest tipus de comportament se sol donar en fluids de gran viscositat com olis, en canonades d'un diàmetre molt petit o a baixes velocitats. També pot ser que el fluid es comporti així degut a les altes temperatures, ja que la viscositat augmenta juntament amb la temperatura. En totes aquestes condicions, si ho calculem a través del nombre de Réynolds, veurem que les forces de viscositat seran superiors a les forces d'inèrcia.

$$F_i < F_\mu$$

#### 4.4.2 Règim turbulent

Quan calculem el nombre de Réynolds en qualsevol cas i ens dona superior a 4000, direm que el fluid es comportarà en règim turbulent.

Un fluid en règim turbulent es comporta seguint trajectòries erràtiques i desordenades i formant remolins. Quan la velocitat augmenta i, per tant, també ho fa el nombre de

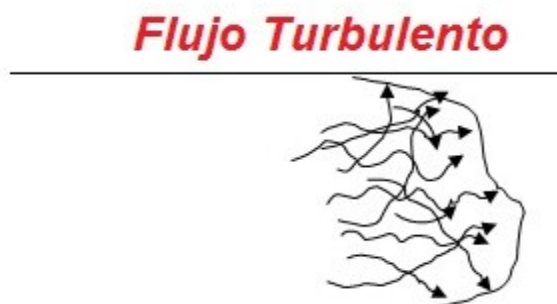


Figura 16: flux turbulent

<sup>3</sup> Les unitats de la viscositat d'un fluid són: Pa·s o en N·s/m<sup>2</sup>  $\mu$  de l'aire a 50°C=1,95·10<sup>-5</sup> Pa·s

<sup>4</sup> La viscositat cinemàtica d'un fluid es dona en m<sup>2</sup>/s  $\nu$  de l'aire a 50°C=1,79·10<sup>-5</sup> m<sup>2</sup>/s

\* Tant la viscositat com la viscositat cinemàtica d'un fluid varien depenent de la temperatura.



Réynolds, la tendència al desordre creix i el fluid es comença a comportar desordenadament.

Aquest comportament dels fluids es dona a altes velocitats, en fluids d'una viscositat molt baixa o en temperatures baixes, ja que produeix un descens de la viscositat.

En aquest comportament, les forces d'inèrcia seran clarament superiors a les forces de viscositat.  $F_i > F_\mu$

#### 4.4.3 Règim transitori

Acabem de veure que si el nombre de Réynolds dona inferior a 2000, el fluid tindrà un comportament laminar, mentre que si dona superior a 4000, el comportament del fluid serà turbulent.

Però hi ha una regió entre aquests dos règims, que anomenarem règim transitori. Aquest règim va des dels valors 2000 a 4000 del càlcul del nombre de Réynolds i en els casos que es dona, és pràcticament impossible preveure com es comportarà el fluid utilitzat.

Aquest tipus de comportament apareix quan s'està treballant amb un fluid en règim laminar i se'l força perquè adquireixi una major velocitat. En fer això, es comencen a produir remolins, fins que acaba actuant en règim turbulent.

El pas d'un fluid entre actuar en règim laminar i actuar en règim turbulent, ve donat pel nombre de Réynolds crític. Aquest nombre sempre està entre 2000 i 4000. D'aquest nombre també en podem treure la velocitat crítica. Aquesta velocitat l'expressarem a través de la següent equació:

$$v_c = R_c \cdot \frac{\nu}{L}$$

$v_c$ =velocitat crítica

$R_c$ =nombre de Réynolds crític

$\nu$ =viscositat cinemàtica

$L$ = longitud de l'automòbil

La velocitat crítica ( $v_c$ ) no serà mai una propietat inherent al fluid, ja que dependrà en cada cas de, per exemple de la longitud de l'automòbil o de la temperatura, ja que en variarà la viscositat cinemàtica.

#### 4.5 Capa límit

La capa límit d'un fluid és la zona on el moviment d'aquest fluid es veu pertorbat per la presència d'un mòbil amb el qual està en contacte.

### Flujo de Transición

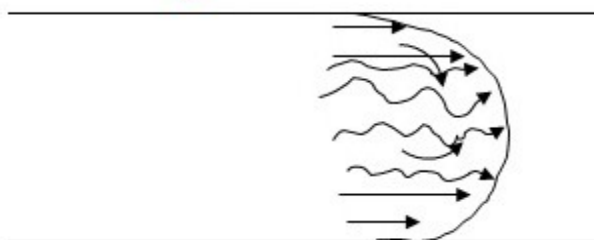


Figura 17: flux de transició

Quan un vehicle es desplaça amb una velocitat dins la zona d'influència de l'aire, ja hem vist que es creen diferents forces de resistència aerodinàmica i que podem calcular aproximadament el comportament que adoptarà aquest fluid, però també hi ha una capa d'aire que es queda adherida al mòbil que actua diferent que tota la resta del fluid.

Aquesta capa experimenta una transició de comportament i de velocitat. Normalment, la capa límit es defineix com aquella capa del fluid que passa del 0 al 99% de  $v$ .

En els alts nombres de Réynolds, en ser les forces d'inèrcia degudes a la velocitat majors que les forces degudes a la viscositat, la viscositat pròpia del fluid es pot ignorar en tot el camp, però hi haurà la capa límit en què la diferència de velocitat entre aquesta mateixa i la resta del camp serà deguda a les forces degudes a la viscositat.

La resolució de la capa límit en tots els mòbils sempre ha sigut un problema, ja que està definida per les equacions de Navier-Stokes, que es tracta d'un conjunt d'equacions en derivades que, com es pot veure en l'imatge, tenen una gran complexa resolució.

Aquestes equacions eren de tan complexa resolució que pràcticament ningú les utilitzava, fins que finalment l'enginyer alemany Ludwig Prandtl va dividir la superfície del fluid en dues zones: una zona que no experimentava canvis de velocitats ni canvis de comportament; i una altra que experimentava canvis de velocitat, de comportament i que tenia influència en la seva viscositat.

Navier-Stokes Equations

*3 - dimensional - unsteady*

---

Coordinates: (x,y,z)    Time: t    Density:  $\rho$     Pressure: p    Reynolds Number: Re  
 Velocity Components: (u,v,w)    Stress:  $\tau$     Heat Flux: q    Prandtl Number: Pr

**Continuity:** 
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0$$

**X - Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u^2)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} \right]$$

**Y - Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v^2)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} \right]$$

**Z - Momentum:** 
$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w^2)}{\partial z} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right]$$

**Total Energy - Et:** 
$$\frac{\partial(E_T)}{\partial t} + \frac{\partial(uE_T)}{\partial x} + \frac{\partial(vE_T)}{\partial y} + \frac{\partial(wE_T)}{\partial z} = -\frac{\partial(uP)}{\partial x} - \frac{\partial(vP)}{\partial y} - \frac{\partial(wP)}{\partial z} + \frac{1}{Re_r} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (u \tau_{xx} + v \tau_{xy} + w \tau_{xz}) + \frac{\partial}{\partial y} (u \tau_{xy} + v \tau_{yy} + w \tau_{yz}) + \frac{\partial}{\partial z} (u \tau_{xz} + v \tau_{yz} + w \tau_{zz}) \right] - \frac{1}{Re_r Pr_r} \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right]$$

Figura 18: equacions de Navier-Stokes

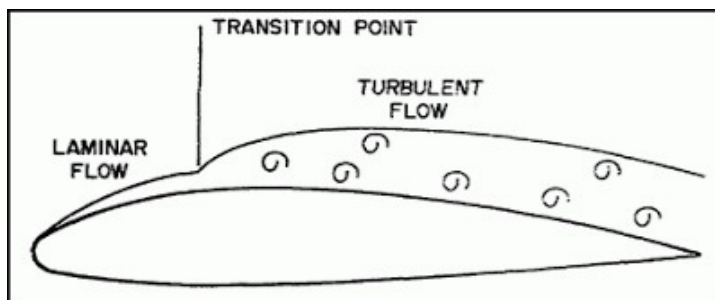


Figura 19: fases de la capa límit

La capa de fluid que s'adhereix al mòbil experimenta una transició com es pot observar en la imatge. La capa adherida passa de comportar-se de forma laminar (velocitat nul·la o pràcticament nul·la) a tenir un comportament turbulent (velocitat pròpia del fluid) i, finalment, desprendre's del vehicle en moviment. És a dir, que la velocitat passa de ser zero fins adquirir la velocitat  $v$  comuna en la resta del camp del fluid i després el fluid es desprèn. Explicat això, existeixen dos tipus de capes límit: les capes límit laminars i les capes límit turbulentes.

## Aerodinàmica de l'automòbil

Les capes límit turbulentes són més gruixudes, el fluid adquireix una major velocitat i, en tenir un comportament turbulent, el fluid es mou en totes direccions i, per tant, l'energia dissipada és major i produeix un augment de la força de fricció. En veure això, podríem pensar que sempre seria millor tenir una capa límit laminar, per tal de tenir la mínima força de fricció possible, però realment no és així.

En una capa límit laminar, el flux va perdent velocitat al llarg de la capa límit i el desprendiment de la capa límit es produeix més d'hora que en les capes límit turbulentes. Per exemple: si en una ala d'avió es produeix una capa límit laminar, la força de sustentació que produeix el vol de l'avió disminuirà dràsticament, ja que depèn que el fluid estigui en contacte amb les ales.

La capa límit també depèn de la forma del cotxe. Per exemple, si tenim un Volkswagen Golf com el de la imatge, el cotxe ens perdrà el control més ràpidament. Això passarà perquè la capa límit del darrere es despendrà de cop, ja que no té cap tipus de morro i, per tant, la quantitat de flux turbulent que deixarem darrere nostre serà molt més gran que si haguéssim tingut un cotxe amb morro.



*Figura 20: Volkswagen Golf*

## 5 APORTACIÓ DE L'AERODINÀMICA ALS AUTOMÒBILS

En aquest apartat destacarem els aspectes més importants que es tenen en compte en el disseny aerodinàmic d'un cotxe de carrer com el que podem utilitzar nosaltres, però també destacarem els aspectes que es tenen en compte en el disseny aerodinàmic dels vehicles de competició, ja que en assolir velocitats molt més altes, els petits detalls en el disseny marquen grandíssimes diferències. Per tant, dividirem aquest apartat en dos punts per tal de diferenciar més clarament els dos tipus de dissenys.

### 5.1 Disseny d'automòbils de carrer

El disseny aerodinàmic dels cotxes que circulen per carrers i autovies influeix en l'impacte visual que pot comportar en el possible comprador, però no només influeix en convertir un automòbil bell o no, sinó que l'aerodinàmica també té un paper molt important en el comportament de l'automòbil en sí.

Quan un vehicle circula a una certa velocitat, interacciona amb l'aire i provoca dos tipus de fluxos: un flux creat a causa del pas de l'aire pel voltant del vehicle i un altre flux creat per l'aire que circula pels circuits interns de l'automòbil.

El flux extern origina tres forces que influeixen en l'avanç del propi vehicle: una força de resistència a l'avanç, en sentit longitudinal, que provocaria una disminució de la velocitat; una força vertical de sustentació i cap a amunt; i una força lateral, que no es dona gaires vegades, deguda a la velocitat del vent.

A l'hora del disseny aerodinàmic d'un automòbil hem de tenir en compte de quin automòbil estem parlant. En el cas dels vehicles de carrer, si estem tractant d'un turisme haurem de posar més rellevància en la reducció de la resistència a l'avanç, mentre que si parlem d'una furgoneta o d'un vehicle similar, s'ha de posar més èmfasi en el comportament del mòbil davant de l'efecte del vent lateral.

Primer de tot analitzarem els factors que hem de tenir en compte a l'hora del disseny aerodinàmic del vehicle i després parlarem sobre el disseny que haurien de tenir les parts més important del monoplaça.

#### 5.1.1 Factors a tenir en compte

Per tal d'intentar reduir al màxim la força de resistència aerodinàmica, hi ha molts factors que alteren aquestes forces i, en conseqüència, el comportament de l'automòbil:

- La forma de la part davantera del vehicle.
- L'allisat de la superfície de les diferents parts on l'aire colpeja directament.
- Elements externs que puguin pertorbar el pas de l'aire com retrovisors, manetes de les portes o parabrises.
- La secció posterior de l'automòbil.

## Aerodinàmica de l'automòbil

- L'aire de règim turbulent provinent d'altres cotxes.
- Les entrades d'aire de refrigeració del motor i de climatització del vehicle.
- Estabilitat i control del vehicle que pugui tenir el conductor -sobretot a altes velocitats-.
- Proporcionar visibilitat als passatgers i al conductor intentant reduir al màxim el nivell de brutícia acumulada.

Avui en dia, a l'hora de dissenyar un vehicle, es tenen en compte totes les parts que porta un cotxe i s'intenta optimitzar al màxim cada part per tal de reduir en gran mesura la resistència aerodinàmica. Per això, s'ha estat millorant en la majoria de parts per tal d'obtenir un coeficient aerodinàmic menor.

Ara que ja hem estudiat les premisses que hem de tenir en compte a l'hora del disseny, ja podem començar a analitzar la importància que té cada part del vehicle en les forces de resistència aerodinàmica.

### 5.1.2 Entrades d'aire

Les entrades d'aire s'utilitzen per obtenir una refrigeració ràpida del motor, ja que aquest arriba a obtenir temperatures extremadament altes. També es pot utilitzar per refrigerar altres peces com els frens o el canvi de marxes.

A part, també s'ha hagut de millorar els sistemes de flux intern a causa dels requisits que, cada vegada més, exigeix el sistema de climatització

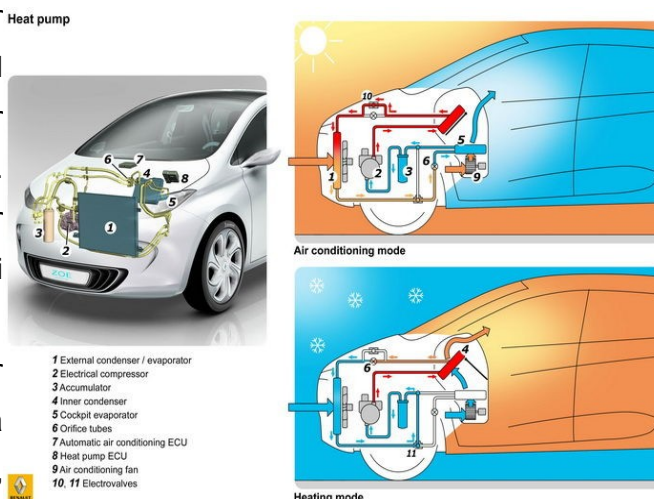


Figura 21: sistema de refrigeració (Renault)

interna.

Aquests sistemes s'han intentat millorar al màxim per tal que alterin en la mínima mesura possible el disseny exterior, ja que si no hi hauria el risc que encara creés més resistència aerodinàmica.



Figura 22: entrades d'aire

### 5.1.3 Retrovisors

Els retrovisors comporten una altre element exterior que no està comprès dins la superfície de l'automòbil i comportarà encara més alteració del flux de l'aire.

En els últims anys s'ha intentat reduir al màxim els retrovisors quadrats, ja que creaven una resistència aerodinàmica excessivament alta per la superfície que ocupaven. Amb

els anys s'han anat arrodonint els seus cantons fins a obtenir retrovisors com el que observem a la imatge.

Aquest retrovisor, per exemple, té una forma molt arrodonida que afavoreix l'addició de l'aire en la seva superfície, ja que no presenta cap cantell que provoqui una separació de la capa límit i un pas de l'aire a règim turbulent. Aquest tipus de disseny té molt poc *drag*<sup>5</sup>, amb la qual cosa altera en poca mesura el flux de l'aire.



Figura 23: retrovisor amb poc drag

### 5.1.4 Secció posterior de l'automòbil

La part posterior de l'automòbil necessita reduir al màxim els cantons punxeguts, ja que podria arribar a produir una pèrdua de control de la part posterior i podria arribar a provocar un accident si es circula a altes velocitats. Per això sempre s'intenta que la part baixa del darrere tingui un acabament arrodonit, ja que d'aquesta manera condueix l'aire cap amunt.

Seguint aquest principi, alguns turismes han adaptat als seus vehicles els difusors que havien sigut emprats a la Fórmula 1. Aquests elements donen un acabat arrodonit a la part posterior del vehicle. Els difusors proporcionen una major adherència del vehicle, ja que condueix l'aire que circula per sota el vehicle perquè es trobi amb l'aire turbulent de darrere el vehicle.



Figura 24: difusor

### 5.1.5 Para-xocs

A part de jugar un paper molt important en casos de col·lisió, els para-xocs també juguen un paper molt important a l'hora de veure quina resistència aerodinàmica tindrà el vehicle que estem analitzant.

El para-xocs acabarà influint en quina mesura la capa límit s'adaptarà a la forma del cotxe i també en la quantitat de flux que circularà per sota el vehicle.

Per exemple, hi ha turismes o, fins i tot, automòbils de disciplines esportives que utilitzen l'anomenat *splitter*<sup>6</sup>. Aquest element, que podem veure en l'imatge, provoca que tot l'aire que vagi cap a sota el cotxe quedi ordenat, ja que en la part davantera del cotxe no tindrà cap altra direcció cap on anar. Per altra banda, l'aire que vagi cap amunt, el



Figura 25: exemple de splitter

<sup>5</sup> Drag: paraula utilitzada en anglès per referir-se a la resistència aerodinàmica.

<sup>6</sup> Podríem traduir la paraula *splitter* al català com a *divisor*.

conduirà cap al sistema de refrigeració, que està just a sobre.

### 5.2 Disseny d'automòbils de competició

El disseny aerodinàmic en els cotxes de competició pren molta més importància, ja que en assolir velocitats molt més altes que els cotxes que circulen per pobles i ciutats, les forces de resistència aerodinàmica augmentaran i els dissenys aerodinàmica prendran molta més importància.

En l'apartat de força de sustentació ja hem comentat que en l'automobilisme de competició s'aprofita la força de sustentació que els avions utilitzen per enlairar-se, però en sentit negatiu -també denominada *downforce*-, ja que d'aquesta manera el vehicle tindrà una major adherència i augmentarà la velocitat màxima de pas per corba.

Com hem vist amb en Josep Roca, en els cotxes que competeixen en altes disciplines esportives no sempre es tracta d'obtenir el disseny més aerodinàmic possible -mínim coeficient-, sinó que, segons les característiques de cada circuit, s'ha de trobar el balanç més adequat entre *drag* i *downforce*.

Tenint en compte això, en aquest apartat analitzarem els principals element aerodinàmics que solen portar incorporats la majoria dels automòbils de carreres per analitzar quines són les seves funcions i per veure quina varietat d'aplicacions poden tenir.

Per altra banda, veurem dues competicions automobilístiques -DTM i WEC-, ja que me les va recomanar en Josep Roca perquè tenen característiques que no se solen veure reflectides en altres competicions més populars com la Fórmula 1.

#### 5.2.1 Alerons davanters

Els alerons davanters prenen molta importància en disciplines on el cotxe no té un morro que tingui unes dimensions suficients per tapar les rodes.

Aquests alerons estan formats per dos plans amb diferents deflactors que es poden regular fàcilment.

Els alerons davanters són els responsables d'entre el 25 i el 40% del *downforce* que té el monoplaça. També s'encarreguen de desviar l'aire perquè no vagi cap a les rodes, ja que en estar en constant rotació, el pas de l'aire per la seva superfície provocaria grans turbulències d'aire al seu voltant.

Els *front wings*, com es denominen en anglès, també tenen una gran labor de refrigeració, ja que la seva forma condueix l'aire cap als radiadors, cosa que produeix una gran millora dl sistema de refrigeració del monoplaça.



Figura 26: aleró davanter

Com hem vist en l'entrevista amb en Josep Roca, el disseny de les diferents peces que prenen un paper important en la determinació de les forces aerodinàmiques varia en les diferents curses depenent sempre de les característiques de cada circuit. Doncs bé, els alerons davanters són els que admeten més canvis, ja que són relativament fàcils de muntar i desmuntar i es poden regular dins la cursa. De fet, per exemple en Fórmula 1 podem veure que un monoplaça utilitza més d'un aleró davanter en els tests lliures del divendres per fer una comparació de rendiment i veure quin s'ha d'utilitzar a la classificació i a la cursa.

### 5.2.2 Alerons posteriors i DRS

Els alerons posteriors són elements aerodinàmics que es col·loquen just al darrere del vehicle. Com també passa amb els alerons davanters, els alerons posteriors es poden ajustar depenent de les característiques del circuit on hagi de circular. Els alerons posteriors es fabriquen de fibra de carboni perquè han d'aguantar forces molt altes durant cada cursa i cada entrenament.

Els alerons posteriors són els encarregats de generar un terç de la força de sustentació negativa que necessita el cotxe.

Aquests alerons són capaços de generar fins a uns 6000 N de *downforce*, però això depèn del seu *setup* -o ajustament-. Si el circuit demana una gran velocitat punta en les rectes, l'aleró posterior es baixarà al màxim per tal d'obtenir el mínim *drag* possible. D'aquesta manera el coeficient serà molt baix i, tot i que no tindrem gaire *downforce*, la velocitat en recta serà molt gran i hi sortirem guanyant.



Figura 27: aleró posterior d'un turisme

Els alerons posteriors també pateixen molts canvis

al llarg d'una temporada, ja que els monoplaços corren en circumstàncies molt diferents. Tot i això, no es canvien en la mateixa assiduitat que els alerons davanters perquè són de més complexitat en el recanvi.

El DRS -*Drag Reduction System*- és un sistema incorporat en l'aleró posterior que, com indica el seu nom, té la funció de reduir la força de resistència aerodinàmica o *drag*. Aquest element és una mesura imposada per la FIA -*Fédération Internationale de l'Automobile*- en la Fórmula 1 per tal d'augmentar el nombre d'avançaments en les carreres.

El DRS només es pot activar en un cert tram del circuit, que sempre ha de ser recte, i



quan el pilot està a menys d'un segon del monoplaça del davant. Aquest dispositiu consisteix en un aleró mòbil que puja, si està activat, deixant passar l'aire per reduir la resistència aerodinàmica i, així, augmentar la velocitat en recta.

Com ha explicat en Josep Roca, la introducció del DRS va implicar grans canvis en els departaments encarregats de l'aerodinàmica en les diferents escuderries, ja que la seva utilització comporta el disseny de dos monoplaços: un monoplaça si el DRS està activat i un altre quan aquest està desactivat, ja que la seva activació comporta una major velocitat a final de recta i, per tant, pot arribar a comportar canvis en els frens del monoplaça.



Figura 28: DRS activat en un Red Bull

### 5.2.3 Deflectors laterals



Figura 29: deflectors laterals

Els deflectors laterals són uns apèndixs que es col·loquen a la part inferior de les parets laterals del monoplaça i que tenen la funció de distribuir el flux d'aire que els arriba. Aquests elements són els primers que veiem que no s'encarreguen de crear *downforce*.

Dins la funció de conduir l'aire cap a zones desitjades, té dues funcions. La primera és conduir l'aire que li arriba cap als radiadors laterals que tenen els monoplaços de Fórmula

1. La segona funció és dirigir el flux d'aire cap a sota el monoplaça. Després aquest aire aniria cap al difusor de darrera el monoplaça i aquest generaria més *downforce*.

Per tant, aquest elements s'ocupen, simplement, de conduir l'aire cap a dues direccions: els radiadors laterals -funció de refrigeració- i cap a sota el monoplaça -funció de generació de *downforce*-.

### 5.2.4 Difusors i fons pla

Els difusors són apèndixs aerodinàmics col·locats a la part baixa del darrere del monoplaça que té la principal funció de donar direcció al flux d'aire que arriba des del fons del cotxe.

## Aerodinàmica de l'automòbil

Aquest dispositiu disminueix la zona d'influència de la separació de la capa límit a darrere el monoplaça i, per tant, augmenta el control que té sobre la part posterior del monoplaça el pilot.

Els difusors creen l'anomenat *efecte terra*. Els difusors extreuen el flux que circula pel fons pla del monoplaça i crea una zona de baixa pressió a la part posterior del monoplaça que augmenta en gran mesura l'adherència i, en conseqüència, la velocitat de pas per corba.



Figura 30: difusor d'un McLaren

Com ens ha explicat Josep Roca en l'entrevista, els difusors estan estrictament regulats per la FIA, ja que al llarg de les temporades hi ha hagut moltíssima polèmica i pràcticament tots els equips que han sigut molt superiors a la resta han creat polèmica per aquest tema.

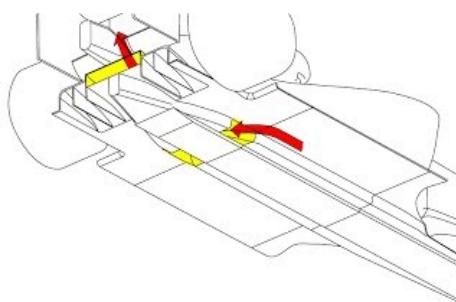


Figura 31: Double Deck Diffusor

considerat el millor difusor de la història en la Fórmula 1. Com podem veure en la imatge, aquest element incorporava dues entrades d'aire en el fons pla que agafaven aire del flux que circulava pel fons i, després el feia sortir pel centre del difusor.

Per exemple, l'any 2009, la Fórmula 1 va ser governada per l'escuderia britànica Brawn GP. L'escuderia liderada per Ross Brawn només va tenir un any d'existència, però va dominar durant tot aquell any i va guanyar pràcticament totes les curses. Una de les claus del seu èxit va ser el difusor utilitzat: el *Double Deck Diffuser* o *doble difusor amb final en V*. Aquest difusor és

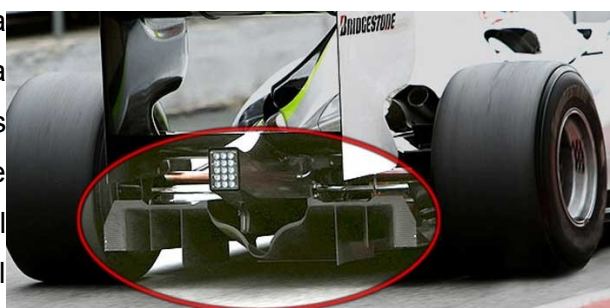


Figura 32: difusor de Brawn GP (2009)

Quan va començar el campionat de l'any 2009, Brawn GP era l'única escuderia que va utilitzar aquest difusor, cosa que li va proporcionar un avantatge de mig segon com a mínim per volta.

### 5.2.5 Anàlisi de diferents disciplines

En aquest apartat analitzarem les principals característiques aerodinàmiques de dues

disciplines diferents a la Fórmula 1 com són el DTM i els WEC.

Analitzarem aquests dos campionats automobilístics perquè tenen característiques que encara no hem vist en els apartats anteriors.

### 5.2.5.1 DTM

El DTM -*Deutsche Tourenwagen Masters*- és una de les disciplines automobilístiques de turismes més importants de tot el món. Aquesta discipline es disputa principalment a Alemanya, però en els seus anys d'història -fou creada l'any 2000- ha arribat a córrer en circuits d'arreu d'Europa com el circuit de Montmeló a Catalunya o el circuit de Brno a la República Txeca.



Figura 33: Audi DTM de Kristiansen (2008)

En aquesta disciplina hi participen turismes de les tres multinacionals alemanyes més importants: BMW, Mercedes i Audi; i cadascuna d'elles es pot dividir en diferents escuderies.

Com podem veure en la imatge, a diferència dels monoplaques de Fórmula 1, els vehicles de DTM tenen molta més semblança amb els cotxes que podem veure circular pels carrers de pobles i ciutats. Aquests vehicles poden arribar a una velocitat màxima de 300km/h i això és en bona part gràcies als elements aerodinàmics que analitzem a continuació:

- *Splitter* davanter: com hem explicat abans, els *splitters* són uns apèndixs aerodinàmics que incorporen molts turismes avui en dia i que tenen la funció de separar l'aire que arriba a la part inferior del monoplaça. D'aquesta manera una part del flux es dirigeix als radiadors i la resta es dirigeix cap al fons pla del vehicle.
- Rodes tapades: els DTM, com els turismes convencionals, porten les rodes tapades. Això dóna un gran avantatge en comparació als Fórmula 1 o a la GP3, ja que els monoplaques d'aquestes dues disciplines porten les rodes descobertes i això provoca grans turbulències en el flux que entra en contacte amb aquests elements.
- Deflectors laterals: els DTM incorporen deflectors laterals per tal de crear l'*Efecte Buit* a la part posterior del vehicle i augmentar al màxim l'adherència per obtenir un millor pas per corba.
- DRS: com passa en la Fórmula 1, els DTM incorporen DRS en l'aleró del darrere. En

aquest cas, l'aleró baixa si s'activa el DRS i, per tant, no ofereix tanta resistència -disminueix el *drag*- com ofereix el mateix aleró quan està pujat.

### 5.2.5.2 WEC

El WEC -*World Endurance Championship*- és una disciplina automobilística de resistència que està formada per proves històriques com les 24 hores de Le Mans o les 24 hores de Daytona.

En aquest campionat hi participen dos tipus de vehicles: els prototips (LMP1) o els turismes (GT). Com que



Figura 34: LMP1: Audi R18 (2014)

en l'apartat anterior ja hem analitzat els DTM que són turismes, ara analitzarem els LMP1, que també són els monoplaques que la gent sol relacionar a aquestes proves:

- Part davantera: en la part davantera els LMP1 incorporen deflectors que condueixen l'aire cap als costats perquè s'enganxi als costats del monoplaça. Els LMP1 també incorporen *splitters* per tal de conduir part del flux cap al fons pla del vehicle.
- Estructura de la part superior: en la part superior incorporen una entrada d'aire que després expulsen pel darrere en una espècie de difusor que incorporen. Per altra banda, a la part posterior del *cockpit*<sup>7</sup>, s'utilitza aquesta estructura d'ala que li proporciona un descens del *drag*.

<sup>7</sup> *Cockpit*: part del vehicle on el pilot condueix.

## 6 EFECTE DEL DISSENY AERODINÀMIC AL CONSUM DE COMBUSTIBLE

Fins ara hem vist com un bon disseny aerodinàmic d'un automòbil pot augmentar la velocitat en les rectes o, si apliquem un altre tipus de disseny, podrem obtenir una major velocitat de pas per corba.

Però, a part d'això, el disseny aerodinàmic també influeix en el consum de combustible de cada cotxe.

Si fem circular un vehicle per una pujada notarem que per circular a una certa velocitat haurem d'aportar molta més potència, és a dir, molta més energia que si haguéssim de circular a aquesta velocitat  $v$  en un carrer completament recte. Doncs això mateix passa amb l'aerodinàmica: si el coeficient aerodinàmic d'un vehicle és més gran, l'energia que haurà de donar el vehicle serà més gran i, per tant, el seu consum pujarà. Contràriament, si un automòbil té un coeficient molt baix, haurà de donar menys energia i el consum patirà un descens.

Aquesta diferència en el consum fa que en els vehicles que tenen un coeficient més elevat es busquin solucions ràpides per tal de disminuir el consum en la màxima mesura possible.

D'això en són exemple els camions. Aquests vehicle tenen dos inconvenients: han de suportar el pes de grans càrregues i el seu coeficient aerodinàmic és molt elevat. La suma d'aquests dos factors produeix un gran augment del consum i, com que a més han de recórrer grans distàncies, aquest consum elevat es fa molt més evident. A més, aquest consum tan elevat produeix un gran augment de les emissions de  $CO_2$  i, per tant, provoca un augment de la contaminació atmosfèrica.

Per això, en els últims anys s'han buscat solucions per a aquest sector.

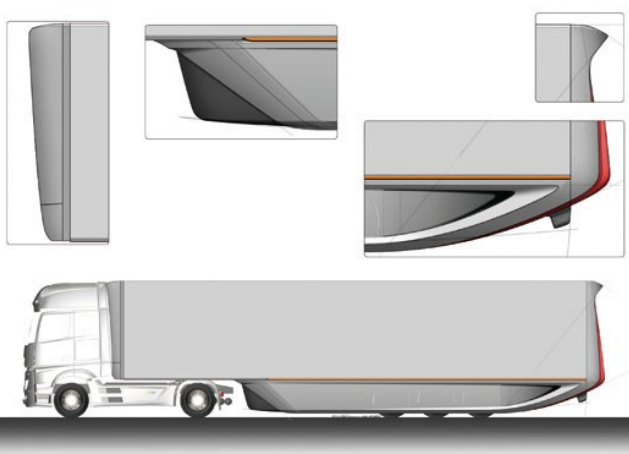


Figura 35: Millores aerodinàmiques en els camions

Seguidament veiem les principals millores que s'han dut a terme en aquests vehicles:

- Cabina: en la part superior de la cabina s'ha col·locat una placa arrodonida que ajuda a que l'aire circuli per sobre el remolc. Això produeix que la capa límit no se separi fins el final de tot i comporta un destacable descens del *drag*.
- Part inferior: al final de la part inferior es dóna un acabat arrodonit com el de la cabina per tal de conduir l'aire que circula per sota cap amunt.
- Part posterior: a la part de dalt del final es col·loca un petit aleró per controlar les

## Aerodinàmica de l'automòbil

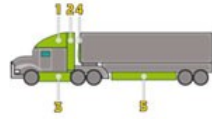
turbulències que es creen quan se separa la capa límit del vehicle.

Aquests elements, juntament amb d'altres que es poden aplicar a sota la cabina, produeixen una gran ajuda en quant al descens del consum de combustible.

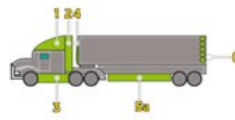
Molts camions porten diferents *paquets aerodinàmics* i cada un comporta una ajuda en el consum diferent com podem veure en la imatge.



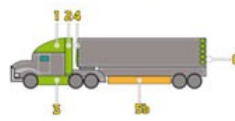
**KIT Aerodinámico Estándar**  
% Ahorro = **11,96%** / % Mejora = 13,59%



**KIT Aerodinámico Intermedio**  
% Ahorro = **13,64%** / % Mejora = 15,79%



**KIT Aerodinámico Completo (a)**  
% Ahorro = **13,64%** / % Mejora = 15,80%



**KIT Aerodinámico Completo (b)**  
% Ahorro = **15,39%** / % Mejora = 18,19%

Figura 36: Estalvi de combustible en camions

## 7 TÚNELS DE VENT

Un dels sistemes més utilitzat per comprovar l'eficiència d'un disseny aerodinàmic són els famosos túnels de vent.

Quan els enginyers volen poder optimitzar al màxim l'aerodinàmica d'un automòbil tenen tres formes principals de fer-ho: proves en circuit, simuladors informàtics o túnels de vent.

A l'hora de fer aquestes proves es tenen en compte tres factors que s'han d'estudiar:

- Balanç entre les diferents forces aerodinàmiques que es puguin crear.
- Distribució de les pressions al llarg de la superfície del vehicle.
- Visualització de les línies del flux al llarg del vehicle per veure els punts de separació del flux.

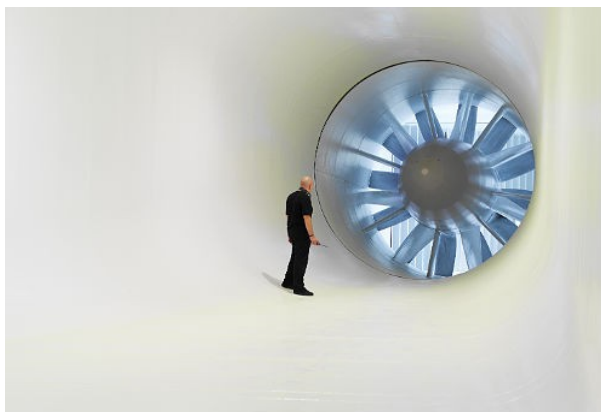


Figura 37: exemple de túnel de vent

Normalment pel disseny aerodinàmic no s'utilitza només un sistema, sinó que s'extreu a partir de la col·laboració de les diferents eines. Com ha explicat en Josep Roca, amb els simuladors informàtics s'extreu una primera línia de treball que enfoca cap a quina banda hauràs de tirar i després amb els túnels de vent acabaràs de perfeccionar el disseny.

El túnel de vent consisteix en una càmera tancada en què l'objecte que està disposat a

l'estudi resta sota la influència d'un flux al qual se li donen les característiques òptimes per l'estudi, com poden ser la velocitat, viscositat, etc.

Els túnels de vent es componen de:

- Càmera tancada: en aquest habitacle es col·loca el model a estudiar. Sempre s'intenta que no hi hagi cap escapatòria d'aire, ja que només es vol que entri el flux controlat que es tregui gràcies a la turbina.
- Turbina: les turbines en els túnels de vent s'encarreguen d'extreure el flux que arriba per l'altra banda. La velocitat de rotació de l'hèlice es controla per tal de regular la velocitat a què s'estudia el model a seguir.
- Sala de control: des d'aquesta sala es controla tots els factors importants a l'hora de l'estudi com poden ser la velocitat del flux, les seva viscositat o la posició del model a estudiar.

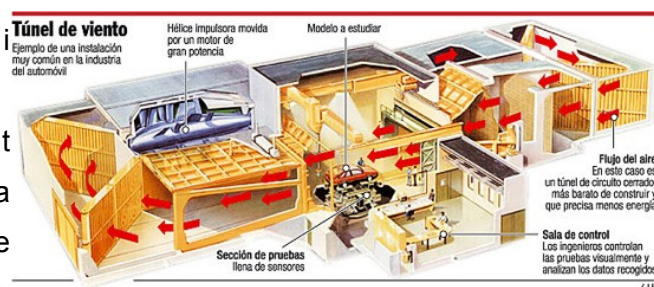


Figura 38: estructura d'un túnel de vent

- Sensors: els sensors són els encarregats de recollir les dades de l'estudi. Aquestes sensors van directament lligats amb la sala de control i des d'allà s'analitzen els resultats obtinguts.

En els túnels de vent es poden analitzar models a escala real o també es poden analitzar a escala més reduïda i després, tenint ja els valors, passar-los a escala real.

Per exemple, en la Fórmula 1, fa uns anys que només es poden fer proves en els túnels a escala del 60%. Veiem-ne un exemple.

### 7.1 Exemple de túnels de vent: Williams F1

Per introduir-nos, Williams F1 és una escuderia de Fórmula 1 fundada l'any 1969 per Frank Williams i és una de les escuderies amb més història que segueix competint en la Fórmula 1. L'escuderia britànica compta amb nou mundials de constructors guanyats, set mundials de pilots, cent-tretze victòries en grans premis i dotze *pole-positions*<sup>8</sup>.

Com ens va explicar en Josep Roca, Williams es divideix en Williams F1, que és l'escuderia en sí que va a cada gran premi i viatja a tot el món; i en Williams Advanced Engineering, que és la part que s'ocupa dels projectes a diferents clients.



Figura 39: seu de Williams F1 a Grove

La seu de l'escuderia Williams es troba a Grove, al sud-oest d'Anglaterra i allà es troben

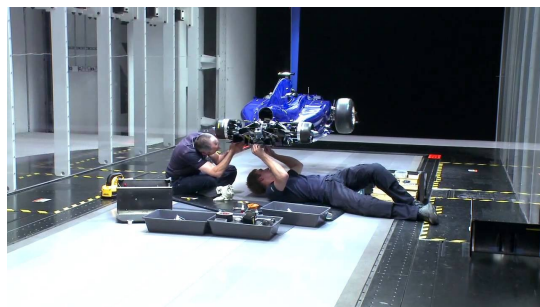


Figura 40: túnel de vent de Williams F1

els seus dos túnels de vent. Segons en Josep Roca a l'entrevista, Williams té dos túnels de vent a la mateixa seu. La principal raó per la qual Williams té dos túnels de vent és perquè el vell té la capacitat per experimentar amb models a escala del 100%. Com que fa uns anys a la Fórmula 1 es va prohibir fer assajos en túnels a escala del cent per cent, Williams va fabricar un nou túnel que només pot fer assajos al 60%, que és el límit que es va establir. Amb la construcció d'aquest nou túnel, Williams va guanyar precisió en els seus càlculs.

<sup>8</sup> *Pole-position*: primer lloc en la sessió de qualificació en un gran premi.



## 8 SIMULADORS INFORMÀTICS (CFD)

Ara que ja hem vist els túnels de vent, ens disposem a estudiar l'altre principal sistema d'estudi de perfils aerodinàmics: els simuladors informàtics.

Un simulador informàtic té com a finalitat fer una representació amb la màxima precisió possible de la realitat per veure com reaccionaria el vehicle.

Els simuladors informàtics que s'utilitzen en aerodinàmica s'anomenen CFD -*Computational Fluid Dynamics*-. Els CFD són una branca de la mecànica de fluids que utilitza mètodes numèrics i logarítmics per resoldre i analitzar els problemes que provoquen els fluids amb la seva interacció en cossos en moviment.

Donada la gran complexitat que tenen totes les equacions en l'espai que es poden aplicar, les escuderies de Fórmula 1 i també els fabricants de vehicles utilitzen aquests simuladors per fer els càlculs corresponents i obtenir una línia en la que s'ha de seguir posteriorment. Per fer aquests càlculs correctament i obtenir un baix percentatge d'error -s'intenta reduir per sota del 10%- s'utilitzen supercomputadors. Els supercomputadors que s'utilitzen a la Fórmula 1 tenen una capacitat per resoldre trenta-vuit bilions d'operacions per segon per tal de poder calcular totes les reaccions amb el mínim temps possible i, per tant, amb la màxima precisió.

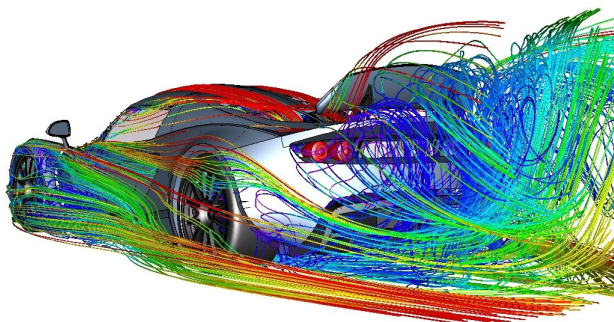


Figura 41: exemple de CFD

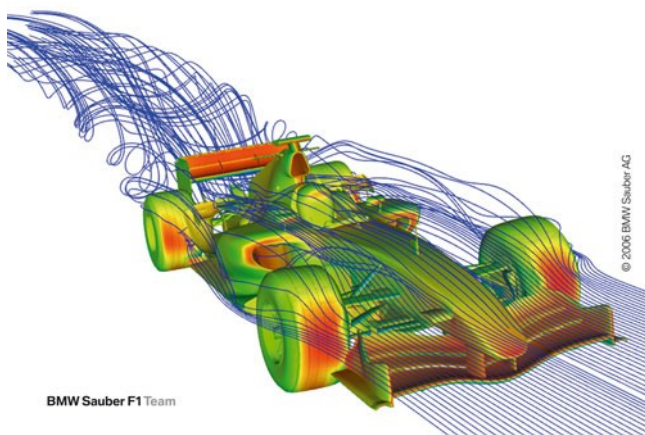


Figura 42: CFD en la Fórmula 1

En aquesta imatge podem observar com els CFD ajuden a veure la reacció que tindria el flux que entra en contacte amb el monoplaça. A la part inferior de la imatge podem veure com arriben les línies de flux en règim laminar, però quan entren en contacte amb els alerons del monoplaça el flux crea turbulències en la part posterior del monoplaça. Fins i tot, com hem explicat abans, podem arribar a observar com els

alerons davanters condueixen el flux que els arriba per tal que no col·lisi amb les rodes i no pugui crear més turbulències, cosa que implicaria un augment del *drag*.

En la Fórmula 1, com ens va explicar en Josep Roca, els CFD cada vegada tenen més importància, ja que primer de tot els túnels de vent es van veure limitats a models del 60% i

## Aerodinàmica de l'automòbil

després també es van veure limitades les hores que s'hi poden fer proves.

Els CFD s'utilitzen simultàniament amb els túnels de vent. És a dir, primer de tot s'utilitzen els simuladors per obtenir la línia de treball sobre la qual es vol operar i, quan ja s'ha obtingut, es fabrica el prototip al 60% per fer les proves en els túnels de vent.

A més, els CFD tenen un avantatge sobre els túnels de vent. Els túnels de vent impliquen temps i diners per a la fabricació de les peces i els simuladors també comporten temps i diners perquè realitzin tots els càlculs. Però la principal diferència entre els dos principals sistemes de simulació és que amb els CFD és molt més fàcil i econòmic si es vol canviar una simple peça i això ajuda molt en els petits canvis que es poden anar realitzant durant tota la temporada.

## 9 PART PRÀCTICA

La part pràctica del treball va consistir en la reproducció d'un túnel de vent per a vehicles d'escala 1:32 com els de la famosa marca Scalextric.

El túnel de vent, com es pot veure en la imatge, consisteix en quatre plaques de plàstic fluorescent que constitueixen el darrere i el fons del túnel i el davant i el darrere. Això està fet així perquè es pugui veure des del davant i des de dalt, ja que s'ha construït amb dues plaques de vidre.

Aquest projecte consistia en introduir fum al túnel i extreure'l per tal que es marquessin les línies aerodinàmiques dels diferents vehicles que s'hi introduïssin.



*Figura 1: maqueta del túnel de vent*

## Aerodinàmica de l'automòbil



*Figura II: porta lateral per canviar de vehicle*



*Figura III: exemple de sortida de fum*

## 10 CONCLUSIONS

Aquest treball de recerca m'ha servit per ampliar el meus coneixements en l'àrea de l'aerodinàmica i, en relació a això, en el camp de la mecànica de fluids.

Tenint en compte els objectius que m'havia marcat al principi del treball, he arribat a las següents conclusions:

- L'aerodinàmica és una disciplina que s'ha tingut en compte en el disseny d'automòbils des de fa molts anys, ja sigui per poder aconseguir una major velocitat punta o, contràriament, per augmentar l'estabilitat del vehicle.
- El càlcul de les forces de resistència aerodinàmica consta d'una gran dificultat a causa del gran nombre de variables que s'han de tenir en compte i per això les empreses automobilístiques ho fan a través de simuladors informàtics amb una gran capacitat de resolució per tal d'obtenir resultants amb un baix percentatge d'error.
- El disseny aerodinàmic pot fer-te estalviar molts diners a finals d'any a causa de l'efecte que produeix sobre el consum de combustible. Aquest efecte de descens del consum s'accentua en els vehicles que han de suportar més pes o que han d'efectuar viatges de molts quilòmetres com els camions.
- Tant els túnels de vent com els simuladors informàtics adopten un paper molt important en el disseny dels monoplaques de competició a causa de les restriccions que s'han imposat a l'ús dels túnels de vent i a causa de la major facilitat d'efectuar canvis en els simuladors informàtics quan ja es té un primer disseny fet.

A part de les conclusions sobre els objectius marcats des del principi del treball, també hem arribat a les següents conclusions:

- Alguns automòbils no es dissenyen amb el coeficient aerodinàmic més eficaç a causa de la gran velocitat que poden assolir, ja que podria arribar a ser perillós.
- En l'aerodinàmica sempre s'ha de tenir en compte el balanç entre *drag* i *downforce* perquè el vehicle no vagi massa lent ni assoleixi grans velocitats però sigui massa inestable en el pas per corba.
- El disseny aerodinàmic en els vehicles de competició ha arribat a uns nivells de precisió tan alts que pràcticament en cada carrera es canvia el disseny de certes parts del monoplaça per tal d'adaptar-lo perfectament a les característiques de cada circuit.
- L'efecte de la capa límit adquireix una gran influència en els automòbils, ja que determina les turbulències que el cotxe generarà en la seva part posterior i la seva separació avançada pot produir una pèrdua del control d'aquesta part posterior del vehicle.

## Aerodinàmica de l'automòbil

- En la Fórmula 1, durant els anys s'ha anat canviant la reglamentació en l'apartat aerodinàmic a causa de la perillositat que produïen dissenys que havien adoptat monoplaques del passat.
- Els monoplaques de Fórmula 1 no tenen el millor coeficient aerodinàmic, ja que s'han d'adaptar a aquesta relació entre *drag* i *downforce* que varia circuit rere circuit. A part, són vehicles que necessiten una gran adherència i sempre s'ha de prestar atenció al paper del *downforce*.

## 11 BIBLIOGRAFIA

### 11.1 Fonts utilitzades per extreure fotografies

Figura 1 extreta de <http://www.conceptcarz.com/vehicle/z17970/La-Jamais-Contente.aspx>

Figura 2 extreta de <http://deansgarage.com/2011/electric-baker-torpedo-racers/>

Figura 3 extreta de <http://www.designmagazin.cz/technika/36605-rumpler-tropfenwagen-je-aerodynamicka-legenda.html>

Figura 4 extreta de <http://www.thetruthaboutcars.com/2010/02/an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-in-three-parts/tatra-v570-1933/>

Figura 5 extreta de <http://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-2-1940-1959/>

Figures 6, 7 i 8 extretes de <http://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-3-1960-present/>

Figura 9: imatge extreta de <http://www.famous-mathematicians.com/daniel-bernoulli/>

Figures 10 i 11 extretes de

[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/bernoulli/bernoulli.htm#Fluidos\\_ideales](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/bernoulli/bernoulli.htm#Fluidos_ideales)

Figura 12 extreta de <http://www.kitemaniak.es/cosas%20del%20kite/aerodinamica%20kitesurf/aerodinamica%20kitesurf.htm>

Figura 13 extreta de <http://www.rapid-racer.com/aerodynamics.php>

Figura 14 extreta de [http://es.wikipedia.org/wiki/Volkswagen\\_XL1](http://es.wikipedia.org/wiki/Volkswagen_XL1)

Figures 15, 16 i 17 extretes de <http://achijj.blogspot.com.es/2012/05/regimen-de-flujo-hidraulico-en-los.html>

Figura 18 extreta de <http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/nseqs.html>

Figura 19 extreta de [http://reflexionesenboxes.blogspot.com.es/2013\\_02\\_01\\_archive.html](http://reflexionesenboxes.blogspot.com.es/2013_02_01_archive.html)

Figura 20 extreta de <http://www.tecmovia.com/2012/09/04/volkswagen-golf-vii-2013-un-repaso-a-su-tecnologia/volkswagen-golf-2013-02/>

Figura 21 extreta de <http://myrenaultzoe.com/index.php/zoe-description/>

Figures 22, 23 i 24 extretes de *Estudio aerodinámico aplicado al campo de la automoción, de José Olivares de Jodar*

Figura 25 extreta de <http://www.vividracing.com/catalog/apr-carbon-fiber-front-splitter-bmw-e46-m3-0105-pi-49507.html?image=5>

Figures 26 i 29 extretes de <http://tecnicaf1.wordpress.com/2011/12/08/elementos-aerodinamicos-de-un-formula-1/>

Figura 27 extreta de <http://www.6speedonline.com/forums/997-turbo-gt2/133348-rear-wing-ideas-2.html>

Figura 28 extreta de <http://www.f1enestadopuro.com/previo-formula-1-gp-de-japon->

*drs.html/drs-formula-11*

Figura 30 extreta de [http://www.lamaximablog.com.ar/lamaxima\\_blog/?tag=doble-difusor](http://www.lamaximablog.com.ar/lamaxima_blog/?tag=doble-difusor)

Figura 31 extreta de <https://sites.google.com/site/arandaformula1/home/coche-de-f1/aerodinamica-elementos-aerodinamicos>

Figura 32 extreta de <http://f1a300.blogspot.com.es/2009/04/que-esta-pasando-en-la-f1.html>

Figura 33 extreta de

[http://en.wikipedia.org/wiki/2008\\_Deutsche\\_Tourenwagen\\_Masters\\_season](http://en.wikipedia.org/wiki/2008_Deutsche_Tourenwagen_Masters_season)

Figura 34 extreta de <http://paultan.org/2013/12/16/audi-r18-etron-imp1-2014/>

Figura 35 extreta de <http://www.camionactualidad.es/noticias-industria-auxiliar-camiones/noticias-de-semirremolques-y-carroceros/item/537-vehiculos-industriales-mas-aerodinamicos-e-intermodales.html>

Figura 36 extreta de [http://www.webpicking.com/contenidos/julio-villalobos-contreras-transporte-comercio\\_exterior-supply\\_chain.htm](http://www.webpicking.com/contenidos/julio-villalobos-contreras-transporte-comercio_exterior-supply_chain.htm)

Figura 37 extreta de <http://blogs.20minutos.es/formula-1-alonso/2011/04/19/el-tunel-de-viento-de-toyota-puede-rescatar-a-ferrari/>

Figura 38 extreta de <http://www.que-formula1.com/index.php/articulos-tecnicos/tunel-de-viento-aerodinamica-y-formula-1-2/>

Figura 39 extreta de

[http://en.wikipedia.org/wiki/Williams\\_Grand\\_Prix\\_Engineering#Williams\\_Advanced\\_Engineering](http://en.wikipedia.org/wiki/Williams_Grand_Prix_Engineering#Williams_Advanced_Engineering)

Figura 40 extreta de [https://www.youtube.com/watch?v=cCUQoi\\_Rzxl](https://www.youtube.com/watch?v=cCUQoi_Rzxl)

Figura 41 extreta de <http://www.autoblog.com/photos/hennessey-venom-gt-cfd-renderings/>

Figura 42 extreta de <http://www.speedtrab.com.br/>

## **11.2 Fonts utilitzades per extreure informació**

**1:** Aguado Jodar, X. «La Fuerza de Sustentación» Trobat a:

<<http://www.uclm.es/profesorado/xaguado/ASIGNATURAS/BTD/4-Apunte/06.pdf>>

**2:** Camocardi, M. E. «Coeficiente aerodinámico» (2012) Trobat a:

<[http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente\\_aerodin%C3%A1mico](http://es.wikipedia.org/wiki/Coeficiente_aerodin%C3%A1mico)>

**3:** De La Cuerva, J. «Capa Límite» (Març 2008) Trobat a:

<<http://juandelacuerva.blogspot.com.es/2008/03/capa-lmite.html>>

**4:** Farraons, R. «¿Qué es el CFD?» (Octubre 2010) Trobat a:

<<http://www.gadgets.com/noticias/que-es-cfd/>>

**5:** García Álvarez, J. A. «Así Funciona El Avión» Trobat a:



## Aerodinàmica de l'automòbil

[http://www.asifunciona.com/aviacion/af\\_avion/af\\_avion6.htm](http://www.asifunciona.com/aviacion/af_avion/af_avion6.htm)

**6:** Fernández, J. A. «Elementos aerodinámicos de un Fórmula 1» (Desembre 2011) Trobat a: <http://tecnicaf1.wordpress.com/2011/12/08/elementos-aerodinamicos-de-un-formula-1/>

**7:** George, P. E. «How Aerodynamics Work» Trobat a: <http://auto.howstuffworks.com/fuel-efficiency/fuel-economy/aerodynamics.htm>

**8:** González, Ó. «Un siglo de récords de velocidad» (Juny 2013) Trobat a: <http://cochesclasicosdehoy.com/2013/06/27/un-siglo-de-records-de-velocidad/>

**9:** Ingenierías Industriales, E. de. «Aerodinámica Exterior» Trobat a: [https://alojamientos.uva.es/guia\\_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento5.pdf](https://alojamientos.uva.es/guia_docente/uploads/2012/389/51453/1/Documento5.pdf)

**10:** Kuzmin, D. «Introduction to Computational Fluid Dynamics» Trobat a: <http://www.mathematik.uni-dortmund.de/~kuzmin/cfdintro/lecture1.pdf>

**11:** Marca TV. «Túnel de Viento de Epsilon Euskadi (Joan Villadelprat)» Trobat a: <https://www.youtube.com/watch?v=VhsJqp-9iNE>

**12:** Medrano, D. «Mecánica de fluidos. Teoría de la capa límite. Sustentación y arrastre» Trobat a: <http://www.monografias.com/trabajos82/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre/teoria-capa-limite-sustentacion-arrastre2.shtml>

**13:** Méndez, A. «DTM y Fórmula 1, cruce de caminos» (Maig 2013) Trobat a: <http://www.caranddriverthef1.com/formula1/articulos/2013/05/03/73447-dtm-y-formula-1-dos-caminos-destinados-cruzarse>

**14:** Mercedes F1. «How does the aerodynamics (downforce) on a F1 car work?» (2013) Trobat a: [https://www.youtube.com/watch?v=q\\_Eht0vDoDg](https://www.youtube.com/watch?v=q_Eht0vDoDg)

**15:** Niedermeyer, P. «Automotive History: An Illustrated History Of Automotive Aerodynamics (1899-2010)» (2012) Trobat a: <http://www.curbsideclassic.com/automotive-histories/automotive-history-an-illustrated-history-of-automotive-aerodynamics-part-1-1899-1939/>

**16:** Olivares de Jodar, J. «Estudio aerodinámico aplicado en el campo de la automoción» (2011)

**17:** Ortego, L. M. «La aerodinámica y la eficiencia: un vistazo a la historia» (2013) Trobat a: <http://www.tecmovia.com/2013/03/31/aerodinamica-y-eficiencia/>

**18:** Pino, Á. «La capa límite y los flujos laminar y turbulento en un Fórmula 1» (Agost

## Aerodinàmica de l'automòbil

2012) Trobat a: <<http://www.f1aldia.com/16286/capa-limite-flujos-laminar-turbulento-formula-1/>>

**19:** Prada Nogueira, I. «El papel de la aerodinámica en el diseño de los automóviles convencionales» (2008)

**20:** Ramos, P. «Capa Límit Superficial» Trobat a:  
<[http://www2.uah.es/gifadocumentos/FA/Transparencias\\_FA/tema6\\_fa.pdf](http://www2.uah.es/gifadocumentos/FA/Transparencias_FA/tema6_fa.pdf)>

**21:** Rodríguez, A. «Análisis Técnico – Carga aerodinámica – Downforce» (Juliol 2014)  
Trobat a: <<https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/07/24/analisis-carga-aerodinamica-downforce/>>

**22:** Rowe, R. «What Makes a Car Aerodynamic?» Trobat a:  
<[http://www.ehow.com/facts\\_5715368\\_car-aerodynamic\\_.html](http://www.ehow.com/facts_5715368_car-aerodynamic_.html)>

**23:** Salas, A. F. «Tutorial 5: régimen laminar i régimen turbulento» Trobat a:  
<[http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema 1.Principios de Hidraulica/tutorial\\_05.htm](http://ocwus.us.es/ingenieria-agroforestal/hidraulica-y-riegos/temario/Tema%201.Principios%20de%20Hidraulica/tutorial_05.htm)>

**24:** Villalobos Contreras, J. «El uso de dispositivos aerodinámicos para aumentar la eficiencia energética en el transporte» (Juny 2013) Trobat a:  
<[http://www.webpicking.com/contenidos/julio-villalobos-contreras-transporte-comercio\\_exterior-supply\\_chain.htm](http://www.webpicking.com/contenidos/julio-villalobos-contreras-transporte-comercio_exterior-supply_chain.htm)>

**25:** «Aerodinámica/Elementos aerodinámicos» Trobat a:  
<<https://sites.google.com/site/arandaformula1/home/coche-de-f1/aerodinamica-elementos-aerodinamicos>>

**26:** «Aerodynamics Features of the F1 Vehicle» Trobat a: <<http://www.f1-country.com/f1-engineer/aerodynamics/f1-aerodynamics.html>>

**27:** «Dinámica de fluidos» Trobat a:  
<[http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/bernoulli/bernoulli.htm#Fluidos ideales](http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica/fluidos/dinamica/bernoulli/bernoulli.htm#Fluidos_ideales)>

**28:** «Efecte Venturi - Viquipèdia, l'enciclopèdia lliure» Trobat a:  
<[http://ca.wikipedia.org/wiki/Efecte\\_Venturi](http://ca.wikipedia.org/wiki/Efecte_Venturi)>

**29:** «Influencia del ángulo de ataque» Trobat a:  
<<http://rabfis15.uco.es/lvct/tutorial/41/tema10/tema10-8.htm>>

**30:** «La influencia de la aerodinámica en el consumo de un vehículo» (Agost 2012) Trobat a: <<http://www.tumecanicoopina.com/component/content/article/35-articulos->

## Aerodinàmica de l'automòbil

*coches/reportajes/137-la-influencia-de-la-aerodinamica-en-el-consumo-de-un-vehiculo>*

**31:** «Technical Courses: Estudio de la Aerodinámica de un Vehículo» Trobat a:  
<[http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog\\_entrada.php?entrada\\_id=89](http://www.technicalcourses.net/portal/es/blog/blog_entrada.php?entrada_id=89)>

**32:** «Técnica F1: Deflectores Laterales» Trobat a:  
<<http://pasoporcurva.wordpress.com/2008/01/20/tecnica-f1-deflectores-laterales/>>

**33:** «Túnel de viento, aerodinámica y Formula 1» (Febrer 2013) Trobat a: <<http://www.que-formula1.com/index.php/articulos-tecnicos/tunel-de-viento-aerodinamica-y-formula-1-2/>>

## **12 ANNEX 1: ENTREVISTA A JOSEP ROCA**

L'entrevista a Josep Roca es va realitzar el dissabte 27 de desembre de 2014. L'entrevista va durar aproximadament quaranta minuts, però s'ha de destacar que els l'entrevistador i l'entrevistat van estar parlant de manera més informal tres quarts d'hora més.

S'ha d'agrair a en Josep Roca per haver mostrat moltes ganes d'ajudar-me en tota l'entrevista, però també per donar-me idees pel treball i per la part pràctica.

### **1.) És dur treballar en una disciplina que exigeix viatges de tants quilòmetres? I amb quina assiduitat pots passar uns dies a Artés?**

*Bé, Williams es divideix en dues branques: Williams F1 i Williams Advanced Engineering. Jo treballo a Williams Advanced Engineering, que és la branca que s'ocupa dels projectes externs. Williams F1 és la branca que s'ocupa de dissenyar i construir el cotxe i d'anar a les diferents curses del campionat. Per tant, a mi no m'exigeix viatges de molts quilòmetres.*

*En la part de tornar a Artés, jo estic establert a Anglaterra i treballo allà i normalment torno un parell de cops de cops l'any. Abans vivia a Qatar treballant del mateix i costava més poder tornar, però per estratègia d'empresa es va decidir tancar l'oficina d'allà i traslladar-nos a Anglaterra.*

### **2.) Quin grau vas estudiar i on per tal d'aconseguir arribar a aquesta altura?**

*Jo vaig estudiar Enginyeria Tècnica Industrial en Mecànica i després vaig cursar un Màster en Tecnologia de l'Automòbil de Competició. Però he arribat al lloc actual principalment per trajectòria professional, que no pas pels estudis. En acabar el màster vaig entrar a un equip de carreres a Martorell i això va permetre que es fixessin en mi.*

### **3.) Sents pressió pel fet de treballar en una gran escuderia com Williams?**

*Tant a Williams com a qualsevol empresa puntera sents pressió perquè estàs treballant amb gent molt bona en els seus camps, amb projectes molt interessants i si vals bé, però si no fora. Sempre tens la sensació que has de donar el millor de tu mateix. Has de defensar el teu lloc i mirar que surin els resultats, però si no volgués aquesta pressió suposo que estaria fent una altra cosa. També és aquesta pressió la que et tiba sempre a donar el millor de tu mateix.*

### **4.) Quin és el teu paper específic dins l'escuderia?**

*El meu paper és de Project Engineer o Enginyer de Projectes dins de Williams Advanced Engineering. Tinc força experiència en disseny mecànic, és a dir, dibuixar en 3D, fer plànols i buscar com fabricar els projectes; i cada cop més faig gestió de projectes que no pas*

*disseny.*

*Ara mateix el que faig en alguns projectes és de Technical Lead. Per entendre'ns, en projectes relativament grans, normalment hi ha un Program Manager que és qui s'ocupa de la part del tractament amb els clients i gestió de diners, temps i recursos del projecte; mentre que el Technical Lead s'ocupa de la part més tècnica, de coordinar l'equip de disseny i de portar el projecte cap a una direcció o una altra en funció dels objectius.*

*El que m'agrada de la forma de treballar dintre Williams és que es fomenta molt la comunicació a tots els nivells, cosa que em dóna fàcil accés als diferents caps de departament.*

**5.)En la teva funció dins l'escuderia, treballes amb el disseny aerodinàmic del monoplaça?**

*En l'aerodinàmica del monoplaça de Fórmula 1 no hi treballo gens, ja que hi ha un departament de 60 persones que només es dediquen a això i l'accés al seu departament és absolutament restringit, és a dir, jo no puc entrar-hi si és que no tinc cap reunió amb algun dels treballadors del departament.*

**6.)En la preparació de la càrrega aerodinàmica, treballeu principalment amb túnels de vent o amb simuladors informàtics?**

*Jo no et sé dir exactament la proporció d'hores dels dos sistemes, però amb el canvi de normativa d'aquest any passat, es va limitar molt l'ús del túnel de vent i pel 2015 s'han començat a restringir molt les hores de simulació també.*

*Mirant-ho objectivament, els testos en túnel de vent comporten el disseny, fabricació i construcció d'un model de cotxe complet per cada prova, fet que implica temps i diners. En canvi, els simuladors informàtics permeten començar a obtenir resultats només amb el disseny virtual de les peces. Un cop tens un model de simulació corrent és molt més fàcil i barat fer petits canvis. El procés habitual es comença amb simulació per obtenir les geometries i la direcció de disseny i quan obtens un model del que n'estàs convençut, es construeix un model real i el fas córrer al túnel de vent.*

*El canvi de normativa implica que es limiten les hores de túnel i les hores de simulació i aquest control està monitoritzat, és a dir que no te'n pots escapar.*

*A Williams tenim dos túnels de vent, un amb capacitat per fer proves amb cotxes a escala real i el segon per models a escala reduïda. Hi va haver un canvi de normativa fa uns anys que obliga a fer els tests en túnels amb models del 60% com a màxim.*

**7.)L'aerodinàmica del monoplaça és comuna durant tot el campionat, o contràriament, cada cursa es canvia pràcticament per complet?**

*Per cada circuit es fa simulació i tenim diferents paquets aerodinàmics, per exemple a Monza -circuit que és majoritàriament recte- s'utilitza un paquet amb el mínim drag possible i molt poc downforce.*

*L'aerodinàmica es tracta de trobar el millor balanç possible entre drag i downforce adient per a cada cursa. L'eficiència aerodinàmica consisteix en maximitzar el downforce i minimitzar el drag.*

**8.)En la Fórmula 1 també teniu en compte l'efecte de capa límit tal com es fa en l'aviació?**

*Com t'he comentat l'aerodinàmica no és la meua especialitat, però sí que sé que bàsicament s'apliquen els mateixos principis en l'aviació per fer volar un avió que per generar downforce en un cotxe de competició, amb la diferència de signe de les forces generades. En l'aviació la sustentació és positiva i en l'automobilística és negativa.*

*En Fórmula 1 s'utilitzaven els difusors bufats, que utilitzaven l'efecte de la capa límit per aprofitar el flux d'aire que passava per sota el monoplaça i poder crear molt downforce. Anys enrere els cotxes generaven "Efecte Terra". Es col·locava un difusor al darrere i un altre al davant per tal de crear downforce a l'eix del davant i al del darrere. Aquests elements es van prohibir perquè si es volia que fossin eficients s'havia de crear un monoplaça que anés molt arran de terra i va provocar que els monoplaços fossin perillosos. Ara mateix està regulat i tots els escapaments que busquen provocar aquest efecte han d'estar a una distància vertical reglamentària del centre de la roda.*

**9.)Quin és el coeficient aerodinàmic d'un monoplaça de Fórmula 1?**

*No ho sé perquè és confidencial l'accés al departament aerodinàmic de l'escuderia.*

**10.)Aquest coeficient és comú a totes les escuderies, o bé varia d'unes a altres? També varia en funció de les característiques del circuit?**

*Cada escuderia té els seus motius i en cada escuderia pot variar, però només ho sap qui treballa dins el departament aerodinàmic de cada escuderia.*

*El coeficient sí que varia d'un circuit a un altre, ja que en cada cas s'ha de buscar el millor balanç entre downforce i drag. També varia en cada cas el balanç de downforce entre la part davantera i la part posterior del monoplaça segons les característiques de les corbes.*

**11.)El coeficient aerodinàmic va directament lligat a l'adherència que tindrà el monoplaça?**

*Hi juga un paper important, ja que varia el balanç entre drag i downforce. Normalment com més downforce, és a dir, més adherència a l'asfalt del circuit, més drag tindrem, és a dir més alt serà el coeficient. A les corbes d'alta velocitat aquest downforce t'afavorirà perquè podràs passar a una velocitat més alta sense que el vehicle marxi de la traçada.*

**12.)Interessa obtenir el mínim coeficient aerodinàmic o és més important un coeficient que no sigui mínim per tal d'obtenir altres característiques?**

*Cada circuit té unes característiques diferents i això provoca que en cada circuit es busqui amb la major precisió possible el coeficient aerodinàmic idoni per tal d'obtenir el millor balanç entre drag i downforce.*

*Per exemple, quan treballava amb turismes -amb un Seat León- el vehicle tenia un aleró posterior que es podia regular -pujar i baixar-. Si es pujava s'obtenia més drag, però provocava downforce a la part posterior del cotxe, amb la qual cosa augmentava l'adherència; i si es baixava l'aleró mòbil, disminuïa el drag, però també ho feia l'adherència. El que fèiem en circuits com Monza, on la majoria del circuit és recte i el pilot es passa el 90% de la volta accelerant, l'aleró el baixàvem al màxim -disminuïa el coeficient- per tal d'obtenir el mínim drag i la màxima velocitat punta.*

**13.)Noteu en gran mesura els canvis de reglament que es produeixen cada any?**

*Sí, perquè estàs treballant per optimitzar al màxim cada part del vehicle perquè sigui el més eficient possible, però l'any següent hi ha un petit canvi en la normativa i s'ha de tornar a començar des de zero.*

*El departament d'aerodinàmica es divideix per cada part del vehicle i cada secció s'optimitza al màxim. Tots els canvis en el reglament produeixen tornar a començar amb el disseny de cada peça del monoplaça.*

**14.)La introducció recent del DRS ha canviat molt la manera d'enfocar la càrrega aerodinàmica dels monoplaços?**

*Sí, ja que com a concepte tens dos monoplaços amb dos drags diferents: un drag quan el DRS està tancat i un drag inferior quan s'ha activat el DRS. Això provoca que la velocitat punta en arribar a la corba és diferent segons l'activació o desactivació d'aquest element i provoca un canvi en el funcionament dels frens, suspensions, etc...*

*En els últims anys un dels aspectes que més importància ha tingut en les diferents*

*escuderies és la transició entre velocitats altes i velocitats baixes, ja que si una corba exigeix un canvi brusc de velocitat, s'ha de tenir molt ben controlat el comportament del monoplaça en aquesta transició.*

**15.)Quines expectatives tens per la temporada vinent? Quant temps porteu treballant amb el monoplaça del 2015?**

*No t'ho sabria dir amb exactitud. Sempre hi ha un equip que està treballant amb el cotxe de l'any següent i, normalment, s'hi comença a treballar mig any abans del començament de la temporada.*

*El temps de construcció del monoplaça de cada temporada també va regulada per normativa. Es treballa per tenir totes les peces del cotxe a punt per muntatge pel dia d'inici definit per la FIA, per començar a fer les proves corresponents segons permet el calendari oficial i la normativa.*



