

Aerodinàmica a la Fórmula 1



***José Ramírez Santaella
Batxillerat 201
Tecnologia
Jamie Morcillo
IES Puig Castellar
14-01-2022***

Resumen

Durante los últimos años, la Fórmula 1 no ha sido seguida por un amplio público debido al dominio aplastante de una de las escuderías. La competición presenta cada vez más retos a los ingenieros para conseguir el mejor monoplaza de la parrilla, y este afán ha tapado el lado deportivo de las carreras: las luchas entre pilotos para conseguir adelantamientos. Este trabajo tiene como objetivo el diseño de un prototipo de Fórmula 1 para propiciar los adelantamientos en pista, modificando la aerodinámica del vehículo. Dicho diseño se llevó a cabo a partir de varias ideas del pasado, que gracias a los avances en la seguridad de los monoplazas se pueden implementar actualmente; y también gracias al estudio del comportamiento del aire en diferentes sólidos y en el prototipo, además de las fuerzas que actúan sobre estos, para tener una guía durante el diseño. Como resultado del proyecto, se ha conseguido un prototipo que permitiría los adelantamientos en pista si se implementara en la competición, y es más pequeño que los Fórmula 1 actuales. Por otra parte, sería más lento y requeriría una conducción muy fina (no se ha conseguido la carga aerodinámica suficiente para la resistencia aerodinámica que crea). Finalmente, para mejorar el prototipo en un futuro, se podría acortar el alerón delantero, o en su defecto poner más perfiles alares en el mismo, además de cubrir las ruedas y hacer el fondo plano más cerca del suelo para conseguir aún más carga aerodinámica y mejor paso por curva.

Abstract

For the last few years, Formula 1 has not been followed by a wide range of audience due to the dominance of one of the teams. The competition presents more and more challenges to the engineers who try to create the best car on the grid, and that desire and need for speed has made it impossible for the drivers to overtake each other when racing. The aim of this research work is to design a Formula 1 prototype to increase overtaking during the races, modifying the aerodynamics. The design was made from some past ideas, which now can be implemented because of the single-seaters' safety. Moreover, the analysis of aerodynamics in different objects and in the prototype, but also the study of the forces acting on these helped during the 3D model. And then, a prototype has been achieved as a result of the project. On the one hand, the new single-seater would increase overtaking on track if it were introduced in the competition and it's smaller than the current cars. On the other hand, it would be slower and the drivers would have to drive smoothly (the downforce has not been sufficient compared to the drag created). Finally, to improve downforce on future designs, the front wing needs to be shortened or divided in flaps, as well as covering the wheels and making the cars' floor closer to the asphalt to increase downforce and cornering speed.

Índex

1. INTRODUCCIÓ	1
1.1 Objectiu	1
1.2 Motivació	1
2. HIPÒTESI	2
3. DESENVOLUPAMENT DEL TEMA	3
3.1 Què és la Fórmula 1?	3
3.2 Aerodinàmica a la Fórmula 1	3
3.2.1 Què és l'aerodinàmica?	3
3.2.2 Downforce	4
3.2.3 Drag	5
3.2.4 Càlcul del drag i downforce	5
3.3 Adaptació del cotxe	7
3.4 Estudi de l'aerodinàmica	9
3.5 Dinàmica de l'aire	11
3.5.1 Flux laminar i turbulent	11
3.5.2 Principi de Bernoulli	13
3.5.3 Efecte Venturi	14
3.5.4 Efecte Coanda	16
3.5.5 Capa límit	17
3.6 Nombres adimensionals	24
3.6.1 Coeficients aerodinàmics	24
3.6.2 Nombre de Reynolds	26
3.7 Elements i dispositius aerodinàmics	27
3.7.1 Alerons	28
3.7.2 DRS	31
3.7.3 Fons pla	32

4. PART PRÀCTICA	34
4.1 SolidWorks	34
4.2 Disseny	34
4.3 Anàlisi CFD	36
4.3.1 El meu prototip	36
4.3.2 F1 2021	43
4.3.3 F1 2022	47
5. CONCLUSIONS	53
5.1 Conclusions de la hipòtesi	53
5.2 Conclusions generals	53
6. AGRAÏMENTS	55
7. WEBGRAFIA I BIBLIOGRAFIA	56
8. ANNEX	58

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Objectiu

Realitzaré una recerca per saber com ha millorat l'aerodinàmica dels cotxes de Fórmula 1 amb el pas del temps. Buscaré quines idees van tenir èxit i quines es van deixar d'utilitzar.

Per aconseguir-ho, faré una recerca teòrica sobre l'aerodinàmica, així sabré com es comporta l'aire al xocar amb un monoplaça de Fórmula 1. Dissenyaré un prototip de Fórmula 1, i després de realitzar els dissenys els compararé amb un programa que es diu SolidWorks¹. Amb una simulació virtual de fluids, veuré si el meu disseny podria millorar les curses. Per últim faré la impressió dels models en 3D per poder tenir-los a mà i perquè sigui més visual, no només darrere d'una pantalla.

L'objectiu principal és dissenyar un prototip de F1 per propiciar els avançaments, ja que durant aquests anys les curses no han tingut molt seguiment, en gran part, degut al domini absolut d'una de les escuderies.

1.2 Motivació

De petit m'agradava la Fórmula 1 i veia algunes curses amb el meu pare, però ara les veig totes i sento una veritable passió pels esports de quatre rodes en general. Fins i tot, llegeixo la revista *Motorsport Monday*, a la qual hi ha un resum de les curses de cada diumenge i un anàlisi tècnic de les millores que els equips de Fórmula 1 han implementat aquell cap de setmana.

Abans de començar el Treball de Recerca de 4t de la ESO, ja tenia pensat dos temes: la seguretat i l'aerodinàmica a la Fórmula 1. Vaig decidir fer el de seguretat aquell any. Ara tinc més coneixements de física, tecnologia i de F1 en general que puc aplicar a aquest treball d'aerodinàmica, a més dels que aniré aprenent mentre el redacto.

¹ Solidworks: *software* de disseny CAD (disseny assistit per computadora) per modelar peces en 3D o plànols en 2D.



2. HIPÒTESI

Per poder començar amb la recerca del treball, m'he plantejat la següent hipòtesi:

Serà possible dissenyar un monoplaça de Fórmula 1 canviant l'aerodinàmica per a propiciar els avançaments?

Cercaré informació i faré un disseny per veure si ho puc aconseguir.

A més, m'han sorgit altres preguntes durant la redacció del treball:

- El meu prototip de Fórmula 1 aniria més ràpid que un F1 actual?
- Realment el nou prototip de Fórmula 1 per al 2022 és tan bo com diu la FIA?

3. DESENVOLUPAMENT DEL TEMA

3.1 Què és la Fórmula 1?

El Campionat Mundial de Fórmula 1 de la FIA (Federació Internacional de l'Automobilisme) és la màxima competició automobilística internacional i també la més popular. Es fan curses d'uns 305 km, dues hores com a màxim.

La FIA imposa ordre i seguretat a les curses, regula els motors que es canvien, caixes de canvis, l'aerodinàmica...

Un Fórmula 1 és un monoplaça de curses que roda a circuits tancats o urbans d'asfalt amb l'ajuda d'un motor. No només hi ha un cotxe i un pilot, també hi ha tot un equip amb centenars de persones que fan possible que el vehicle i el pilot rodin a aquesta categoria.

Aquesta competició es va fundar al 1950, quan només hi havia set curses i 3 escuderies: Ferrari, Maserati i Alfa Romeo. Ara mateix hi ha un total de 20 pilots, 10 escuderíes i 23 Grans Premis (curses).

Des dels seus inicis, la F1 ha anat evolucionant aspectes com el motor, l'aerodinàmica o la seguretat, quasi sempre a partir de canvis exitosos que van fer alguns equips i els altres els van copiar.

Principalment la F1 roda a Europa, on es va originar, i va començar a expandir-se ràpidament pel món als seus inicis gràcies a la seva popularitat.

3.2 Aerodinàmica a la Fórmula 1

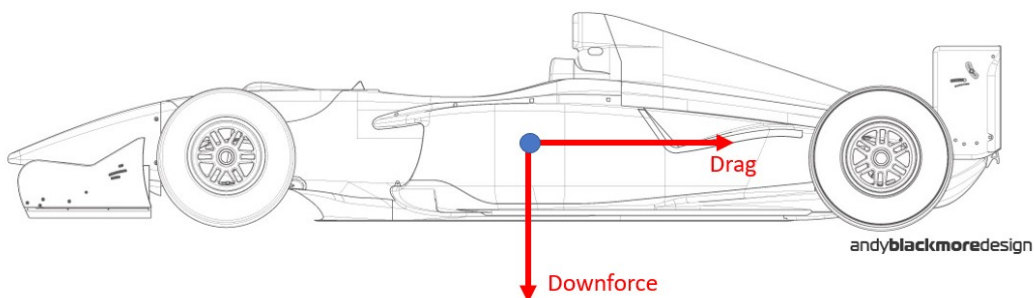
3.2.1 Què és l'aerodinàmica?

Un cotxe modern de Fórmula 1 té quasi tant en comú amb un avió que amb un cotxe ordinari. L'aerodinàmica s'ha convertit en la clau de l'èxit d'aquest esport i els equips gasten milions d'euros en la recerca i el desenvolupament d'aquesta per poder millorar el rendiment del cotxe cada any.

L'aerodinàmica és una branca de la dinàmica que se centra en l'estudi del moviment de l'aire, especialment quan interacciona amb un objecte en moviment. És un subcamp de la dinàmica de fluids i de gasos. Està molt relacionada amb aquesta última, amb la diferència que la ja mencionada s'aplica a tot tipus de gasos.

L'aerodinamicista i el dissenyador del xassís tenen quatre objectius principals:

- 1) Crear *downforce*² (càrrega aerodinàmica) al cotxe, per ajudar a impulsar les rodes d'aquest cap avall de forma equilibrada a la frenada, gir i acceleració.
- 2) Minimitzar el *drag*³ produït per les turbulències, el qual actua per frenar el cotxe.
- 3) Assegurar-se de l'adherència dels pneumàtics al sòl d'una manera uniforme i consistent a totes les fases del revolt.
- 4) Fer que el cotxe sigui el més lleuger possible.



Imatge 1: forces que actuen en un monoplaça.
Imatge extreta de: <https://www.aerodinamicaf1.com>.

3.2.2 Downforce

Al contrari que els avions, que utilitzen les ales per volar, els monoplaques tenen elements que utilitzen per enganxar-se al sòl. Per donar a terme aquesta tasca, s'utilitzen alerons, el difusor, la carrosseria i el sòl del cotxe per generar càrrega aerodinàmica. Aquesta càrrega es genera per la diferència de pressions entre la part inferior (pressió menor) i superior del monoplaça (pressió major). El terme en anglès per denominar a aquesta càrrega aerodinàmica és el *downforce*, que és la força vertical descendent que carrega pes sobre el monoplaça.

2 *Downforce*: càrrega aerodinàmica d'un cotxe, és la força que actua cap avall.

3 *Drag*: resistència aerodinàmica d'un cotxe amb l'aire.

El treball dels enginyers és generar càrrega aerodinàmica amb els mínims efectes negatius possibles (com la necessitat d'un augment de la potència i l'empitjorament del maneig del vehicle).

En canvi, permet un major *grip*⁴ o adherència de pas pels revolts (augmentant la velocitat a aquests) i minimitzant el lliscament i la degradació del pneumàtic.

3.2.3 Drag

El *drag* és la resistència a l'avanç creada per tots els elements del vehicle (alerons, pneumàtics...) que construeixen una barrera contra l'aire. Aquesta força s'oposa a l'avanç del vehicle a través del fregament amb l'aire i amb l'asfalt, fent que el motor hagi de compensar aquesta força contrària. A menys *drag*, més velocitat punta, però menys *downforce* tindrà el cotxe. Distingim tres tipus de *drag* amb l'aire:

- 1) *Drag* degut a la fricció del fluid: com que l'aire és viscos, genera forces que s'oposen a l'avanç del monoplaça.
- 2) *Drag* degut a la distribució de pressions (*drag* de forma): sorgeix perquè la pressió de l'aire és major a la part frontal del vehicle que a la posterior i això genera una força en sentit contrari al desplaçament del vehicle.
- 3) *Drag* degut al *downforce* (*drag* induït): apareix als elements que generen càrrega aerodinàmica, per exemple als alerons.

3.2.4 Càlcul del *drag* i *downforce*

Estimar totes dues forces és molt important per saber com es comporta el cotxe. Per exemple, es pot saber si el pneumàtic aguantarà una determinada força cap avall o si aquest té risc de lliscar a una velocitat determinada. Les equacions per calcular aquestes forces són molt semblants:

4 *Grip*: adherència del pneumàtic amb l'asfalt.

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

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

Fórmula 1: càlcul de forces.

Fórmula extreta de: <https://www.aerodinamicaf1.com>.

A les equacions, D és el *drag* i L és el *lift* (el valor de L és negatiu quan parlem de *downforce*). Com són forces, la seva unitat és el Newton [(kg · m)/s²].

ρ és la densitat de l'aire (en kg/m³). Aquest paràmetre és molt important, ja que varia depenent de l'altura i la temperatura de l'aire. Si l'altitud a la que es condueix incrementa, la densitat de l'aire disminueix i, per tant, també disminueix el *drag* i el *downforce*.

A és l'àrea frontal del vehicle (en m²). Si el monoplaça té menys àrea frontal, es redueix el *drag* i el *downforce*. Un exemple molt clar de com influeix l'àrea el trobem al DRS⁵ (Drag Reduction System) en els F1 actuals, explicat amb profunditat més endavant.

El C_L i C_D són dos coeficients que depenen de la geometria del monoplaça i de les condicions del flux d'aire, explicat més endavant. Quan parlem de *downforce*, la magnitud de C_L serà negativa.

Per últim, la velocitat relativa (en m/s) és el paràmetre que més influència té, ja que a mesura que aquesta augmenta, el *downforce* i el *drag* creixen exponencialment si les altres variables resten iguals. Aquesta velocitat relativa no és la velocitat a la que va el cotxe, sinó a la que el fluid impacta amb el cotxe en moviment. Es mesura amb uns tubs Pitot que té el monoplaça, per mitjà de les pressions i l'equació de Bernoulli, explicada més endavant.

5 DRS: sistema ubicat a l'aleró posterior que permet el pas d'aire quan està obert.



Imatge 2: tub Pitot d'un F1. Imatge extreta de: <https://twitter.com>.

3.3 Adaptació del cotxe

L'aerodinàmica d'un monoplaça de Fórmula 1 varia depenent del circuit, del pilot i del clima, adaptant-se a les condicions i a l'estil d'aquests.

Els reglatges o *set up* en anglès, són les modificacions que es fan a un cotxe de carreres ja al propi circuit. Per exemple, canviar les pressions dels pneumàtics, la duresa de la suspensió, l'angle dels alerons, la caiguda de les rodes i la seva convergència o divergència...

Depenent del circuit (si té moltes rectes o molts revolts) i de l'estil de conducció del pilot, es posa a punt el cotxe (es fan reglatges) amb l'ajuda dels enginyers i mecànics, modificant l'angle dels alerons per exemple, per a que hi hagi més o menys *downforce* i *drag*. Aquest canvis es poden fer fàcilment i en poc temps.



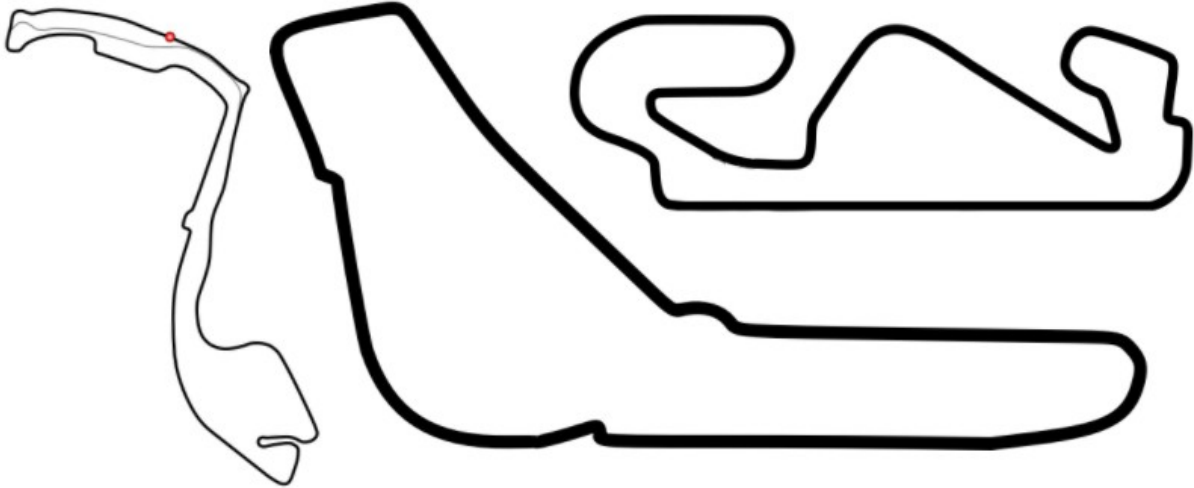
Imatge 3: aleró posterior amb diferents configuracions.
Imatge extreta de: <https://secretosf1.wordpress.com>.

Els enginyers intenten ajustar el *drag* i el *downforce* al gust del pilot quan creen el xassís abans que comenci la temporada. Aquests canvis són definitius o de llarga durada, ja que els hauran de mantenir durant moltes curses, depenent del pressupost de l'equip per a fer més xassís amb diferents modificacions.

Com que els canvis de xassís són poc habituals, els equips fan paquets aerodinàmics que implementen al cotxe durant la temporada. Aquests canvis duren entre una i tres curses, depenent de les prestacions dels circuits. Poden ser petites modificacions a la part darrera del sòl del cotxe, als *bargeboards*⁶ o als alerons.

A tots aquests canvis, els enginyers han de buscar un compromís entre *downforce* i *drag*. A més *downforce*, més *drag*; o el que és el mateix, a més adherència, menys velocitat punta. Si els F1 roden a Monza, un circuit amb grans rectes (n'hi ha tres que fan més d'1 km), fa falta un cotxe amb poc *drag* i poc *downforce*, ja que els pilots van el 70% de la volta amb l'accelerador a fons; si estan a Mònaco, en fa falta un amb molt *downforce*, perquè és un circuit molt estret i sense rectes molt grans (la més llarga fa 520 metres). Però, si estan a Montmeló, els fa falta un cotxe equilibrat, ja que hi ha revolts enllaçats, molt llargs i ràpids, però també una recta de més d'1 quilòmetre.

⁶ *Bargeboards*: plaques verticals de fibra de carboni que serveixen per redirigir l'aire brut que creen els pneumàtics. Estan ubicats darrere d'aquests



Imatges 4, 5 i 6: d'esquerra a dreta, circuit de Mònaco, Monza i Montmeló (a escala). Imatges extretes de: <https://www.vectorstock.com>, <https://www.seekpng.com> i <https://www.circuitcatexperience.com>.

3.4 Estudi de l'aerodinàmica

Per poder modificar l'aerodinàmica del cotxe, ja sigui amb paquets o al xassís, fa falta una gran inversió. Construir aquests elements té un cost molt gran de temps i de diners, per tant s'utilitzen dos mètodes per estudiar-los abans de construir-los i provar-los al cotxe definitiu.

- 1) Al primer mètode es dissenya un model a una escala menor (un 60% de les mides reals com a màxim) i s'estudia el seu comportament al túnel de vent⁷. Un corrent d'aire que va a 50 m/s (180 km/h) com a màxim incideix en el cotxe, que gràcies a un fum o vapor es pot visualitzar l'aire que l'envolta i es recullen dades amb uns sensors.
- 2) L'altre mètode menys costós és el de fer simulacions numèriques a partir de models 3D (CFD, Computational Fluid Dynamics). Es creen models del cotxe o de peces i es fa una simulació de fluids per veure com es comporta l'aire al seu voltant. Els programes més utilitzats a l'automobilisme són Catia, Siemens NX i SolidWorks.

⁷ Túnel de vent: eina d'investigació que permet reproduir el comportament aerodinàmic d'objectes sòlids.



Imatge 7: SolidWorks patrocina a Alpine al Campionat de Resistència.
Imatge extreta de: <https://abiznews.net>.

L'aerodinàmica estudia les forces que apareixen al monoplaça quan aquest es desplaça. Utilitzar CFD és més ràpid i menys costós que fer la maqueta, però té un petit error degut a les complexitats de les equacions que es realitzen, per la qual cosa a la Fórmula 1 s'utilitza més per guiar el desenvolupament de la nova peça que per a estudiar el model definitiu. Tot i així, els deu equips empren aquesta tecnologia, i quan ja tenen un model 3D, construeixen la maqueta per portar-la al túnel de vent.

Per saber si les dades del túnel de vent són correctes, els equips porten les peces a escala al següent Gran Premi i les posen al cotxe al primer entrenament lliure. També posen sensors o parafina⁸ al cotxe i fan que el pilot vagi a velocitat constant per veure si les dades recollides a pista s'assemblen a les del túnel de vent.



⁸ Parafina: fluid viscos de poca densitat i d'un color vistós per poder visualitzar el flux d'aire a través de l'F1.



Imatges 8 i 9: un F1 amb sensors i un amb parafina.
Imatges extretes de: <https://www.aerodinamicaf1.com>.

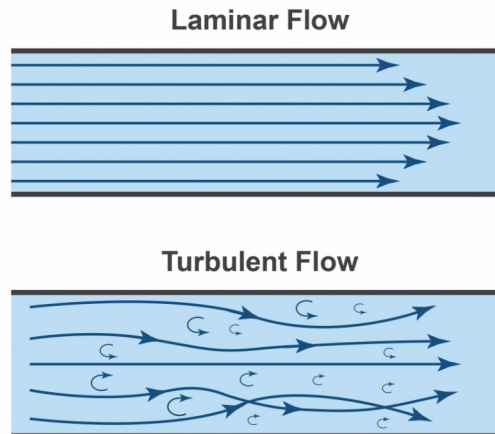
3.5 Dinàmica de l'aire

3.5.1 Flux laminar i turbulent

Els cotxes de F1 estan fets per avançar per l'aire en condicions normals i sense alteracions (flux laminar). Aquest és l'aire net, caracteritzat per moure's en làmines paral·leles. El flux laminar és propi dels fluids que van a baixa velocitat i dels que tenen una alta viscositat⁹.

Per la seva part, l'aire brut és aquell amb turbulències generades per les peces del monoplaça (flux turbulent). Es caracteritza per la mescla de les capes del fluid y per l'aparició de vòrtex o remolins. És més fàcil que el flux esdevingui turbulent a mesura que la velocitat del fluid augmenta.

⁹ Viscositat: és la resistència que presenta un fluid (líquid o gas) a fluir.



Imatge 10: flux laminar (aire net) i flux turbulent (aire brut).
Imatge extreta de: <https://www.aerodinamicaf1.com>.

Aquest aire brut té menys pressió que el net i crea una estela de depressió darrere de cada monoplaça d'una llargària de 100 metres. Si un cotxe de F1 va darrere d'un altre a una distància menor a aquesta, el cotxe del darrere tindrà subviratge¹⁰ o sobreviratge¹¹, major desgast dels seus pneumàtics (per un escalfament excessiu d'aquests i dels frens), menor refrigeració del motor (ja que l'aire va a més temperatura perquè s'escalfa amb el motor del cotxe perseguit) i una pèrdua exponencial de *downforce* dependent de la distància entre els monoplaços.



Imatge 11: il·lustració que mostra el *downforce* total a un cotxe en aire net i aire brut (anterior a 2022).
Imatge extreta de: <https://lat.motorsport.com>.

10 Subviratge: el cotxe gira menys del que teòricament hauria de girar. Llisen les rodes del davant.
11 Sobreviratge: el cotxe gira més, les rodes del darrere llisquen cap a l'exterior del revolt intentant avançar a les del davant.

Per culpa de tot això, el cotxe en aire brut no podrà fer els revolts a la mateixa velocitat que l'altre que va en aire net.

El flux turbulent es crea per les turbulències que generen els alerons i, sobretot, les rodes del monoplaça, ja que giren a gran velocitat. Per tant, les peces posteriors de un F1 també rebran aire brut, cosa que els enginyers de disseny han d'intentar solucionar.

D'altra banda, l'aire brut a les rectes no es tan negatiu. El cotxe que va darrere pot tenir un escalfament excessiu del motor, però també té rebuf¹² que li proporciona el monoplaça de davant, ja que l'aire brut va a menys pressió i fa que augmenti la seva velocitat punta a les rectes. A més, el flux turbulent refrigera els elements interns del monoplaça de manera més eficient.

3.5.2 Principi de Bernoulli

El principi de Bernoulli presenta la base en la qual es fonamenta el comportament aerodinàmic de qualsevol vehicle terrestre. A la teoria, aquest principi només es pot aplicar a fluids ideals, és a dir, sense viscositat ni fregament. Tanmateix, a la pràctica es pot aplicar a fluids incompressibles (de densitat constant) amb cabal constant (flux laminar) que sí presenten una petita viscositat, com és el cas de l'aire que envolta a un F1.

El 1738, Daniel Bernoulli va demostrar que els fluids ideals, quan circulen per un conducte tancat, l'energia que posseeixen aquests es manté constant durant tot el recorregut (principi de conservació de l'energia). L'energia mencionada la podem dividir en tres components:

- 1) Energia cinètica (pressió dinàmica): energia que posseeix el fluid degut al seu moviment.
- 2) Energia que posseeix el fluid degut a la pressió estàtica.
- 3) Energia potencial: energia que posseeix el fluid degut a la seva posició vertical (altura).

¹² Rebuf: es genera quan un o més cotxes es posen darrere d'un altre i es crea un tub de succió aerodinàmic que crea el que va davant, fent que els cotxes posteriors aconseguixin una millor velocitat punta per la poca resistència a l'aire.

L'equació de Bernoulli és:

$$\frac{V^2 \rho}{2} + P + \rho g z = \text{constante}$$

Fórmula 2: equació de Bernoulli.

Fórmula extreta de: <https://es.wikipedia.org>

V és la velocitat del fluid, ρ la seva densitat, P la seva pressió estàtica (p a la fórmula de més avall), g és l'acceleració gravitatòria i z l'altura vertical.

En el cas de la Fórmula 1 es podria considerar que les propietats de l'aire no varien amb l'altura i que no n'hi ha pèrdues, ja que no es mou per una canonada. Per tant, arribem a la conclusió que:

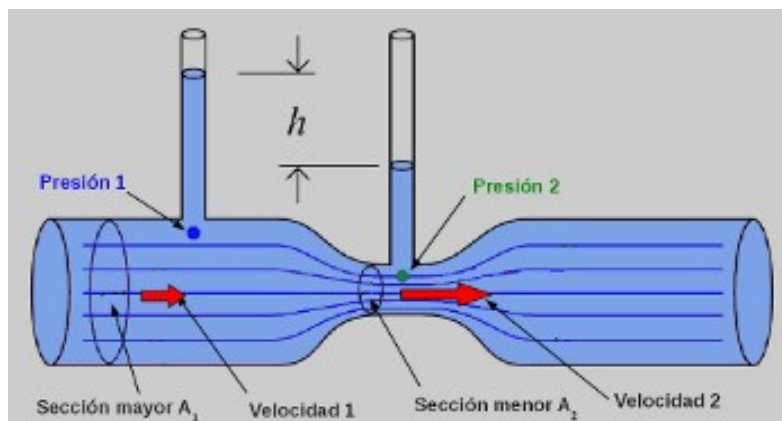
$$\frac{\rho V^2}{2} + p = cte$$

Fórmula 3: equació de Bernoulli per a un F1.

Fórmula extreta de: <https://www.aerodinamicaf1.com>.

3.5.3 Efecte Venturi

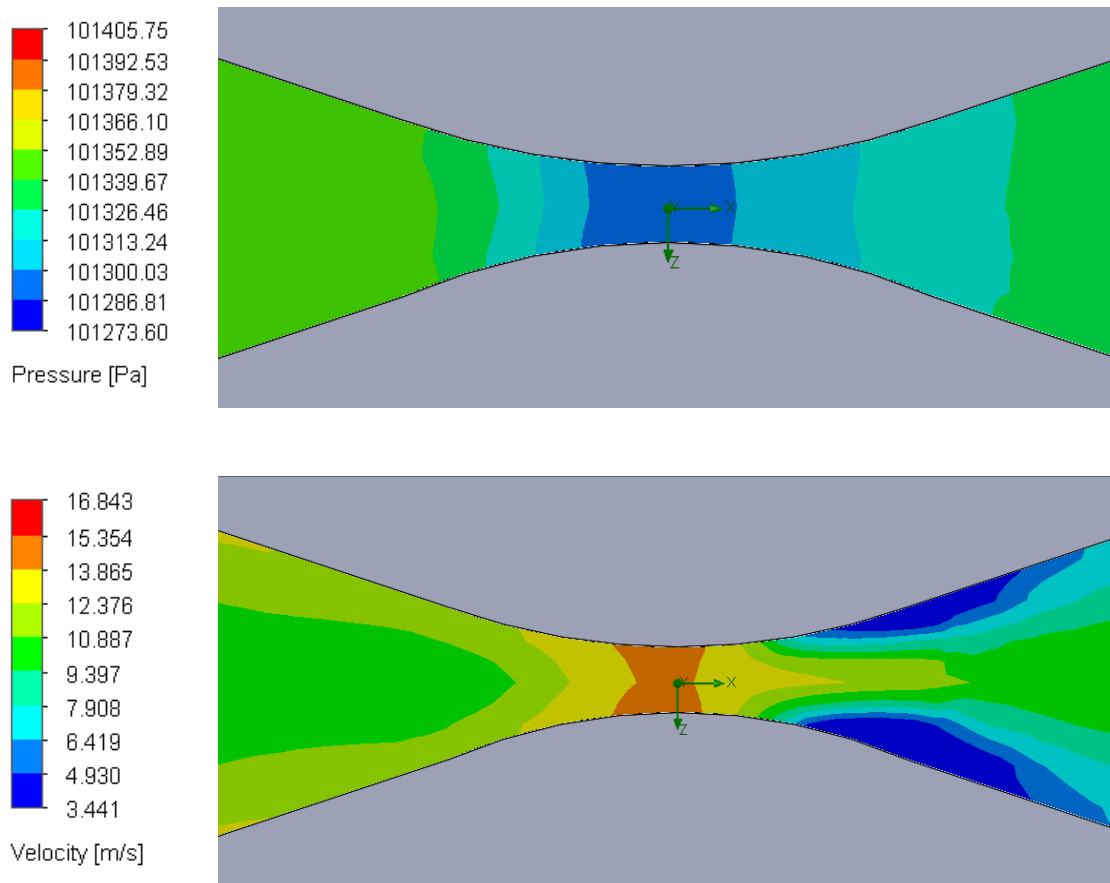
L'efecte Venturi s'explica mitjançant el principi de Bernoulli i el principi de continuïtat de massa. A un conducte tancat, si el cabal d'un fluid és constant però la secció disminueix, necessàriament augmenta la velocitat. Si la velocitat augmenta, la pressió disminueix.



Imatge 12: esquema de l'efecte Venturi. Imatge extreta de: <https://makinandovelez.wordpress.com>.

A la imatge veiem un tub de Venturi, on $V_2 > V_1$ i $P_2 < P_1$, sent V la velocitat i P la pressió.

Ara mostraré unes imatges creades per simulació CFD a SolidWorks (Dinàmica de Fluids Computacional) per observar la pressió i la velocitat de l'aire a un tub de Venturi creat per mi. El fluid circula d'esquerra a dreta.



Imatge 13 i 14: pressions i velocitats a un tub de Venturi. Imatges pròpies.

A la primera imatge podem observar com la pressió és menor a la part més estreta (marcada amb un blau fosc) i major a la part més ampla. Tot seguit, a la següent imatge veiem que a la part estreta la velocitat és major (marcada amb vermell) i menor a la resta del tub.

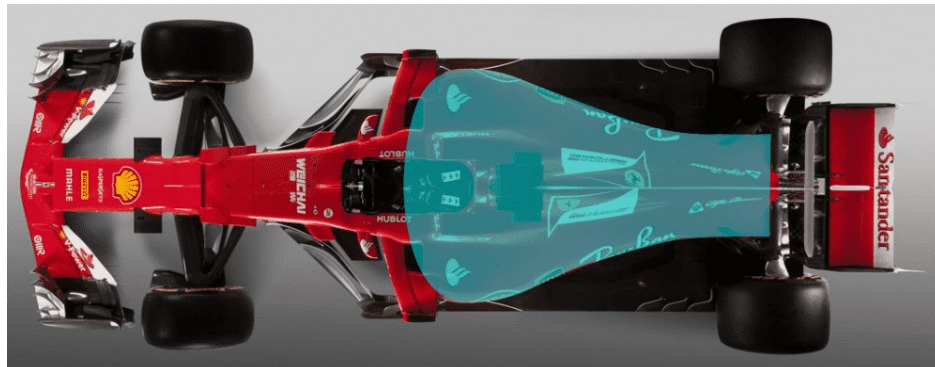
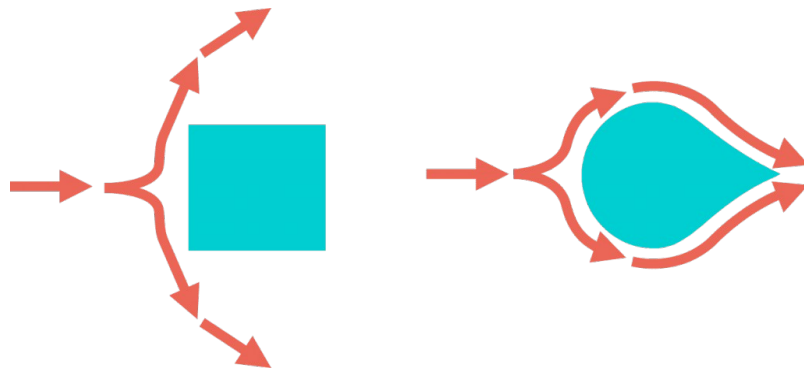
Hi ha ocasions que, quan l'augment de velocitat és molt gran, la pressió disminueix molt i provoca succió, fet que és molt utilitzat a la Fórmula 1 per generar *downforce* al fons pla¹³ (el sòl del monoplaça) amb l'efecte sòl (a partir d'ara *ground effect*¹⁴).

13 Fons pla: part inferior del monoplaça que s'empra per crear càrrega aerodinàmica.

14 *Ground effect*: succeeix quan un cos està molt a prop de la superfície terrestre i provoca alteracions en el flux d'aire.

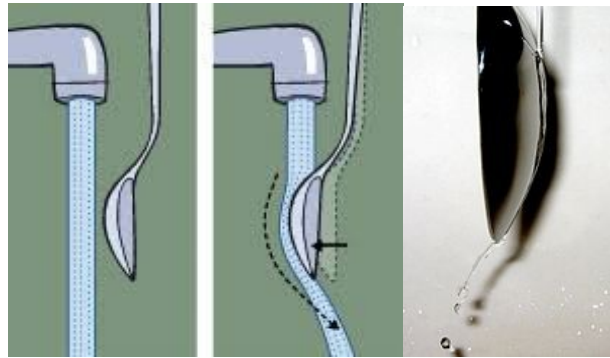
3.5.4 Efecte Coanda

Per a optimitzar l'aerodinàmica d'un F1, interessa que l'aire es quedi "enganxat" el màxim possible a la carrosseria del monoplaça. Quan un fluid contacta amb un sòlid, aquest tendeix a adherir-se a la seva superfície i a seguir el seu contorn; només se separa si hi ha un canvi brusca a la superfície del cos, el qual crearia *drag* de forma. Per aquesta raó els monoplaques de F1 tenen una forma de gota.



Imatge 15, 16 i 17: Com afecta l'aire a dos cossos i formes de gota a l'F1.
Imatges extretes de: <https://lebalap.academy/f1> i <https://albrodpulf1.wordpress.com>.

L'efecte Coanda es pot demostrar, per exemple, posant una cullera sota l'aixeta. L'aigua "s'enganxaria" a la cullera continuant la seva forma. Això és degut a la viscositat del fluid.

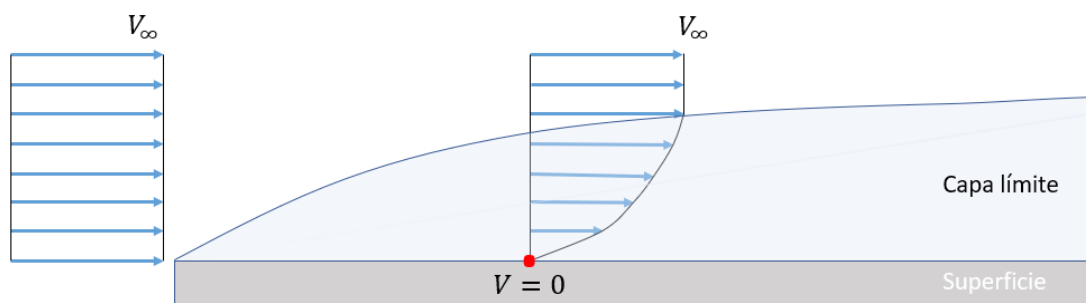


Imatges 18 i 19: demostració de l'efecte Coanda.
Imatges extretes de: <https://twitter.com>, <https://es.wikipedia.org>.

3.5.5 Capa límit

Quan un fluid es mou lliurement sense obstacles al seu pas, la seva velocitat és igual a tots els punts. Però, quan aquest entra en contacte amb un sòlid (el monoplaça), la velocitat de l'aire es veu afectada i apareix la capa límit.

Com que l'aire posseeix viscositat, genera forces de fregament quan entra en contacte amb el monoplaça, provocant que la velocitat relativa entre el fluid i el vehicle sigui nul·la a la superfície, és a dir, fa que el fluid vagi a la mateixa velocitat que el monoplaça (només a la superfície). A una certa distància de la carrosseria, l'aire circula a la mateixa velocitat que portava abans d'entrar en contacte amb el monoplaça (l'anomenarem V_{∞}). Aquesta zona de transició a la qual la velocitat del fluid va augmentant de 0 a V_{∞} , és la capa límit. Ho veurem clarament amb un perfil de velocitats.

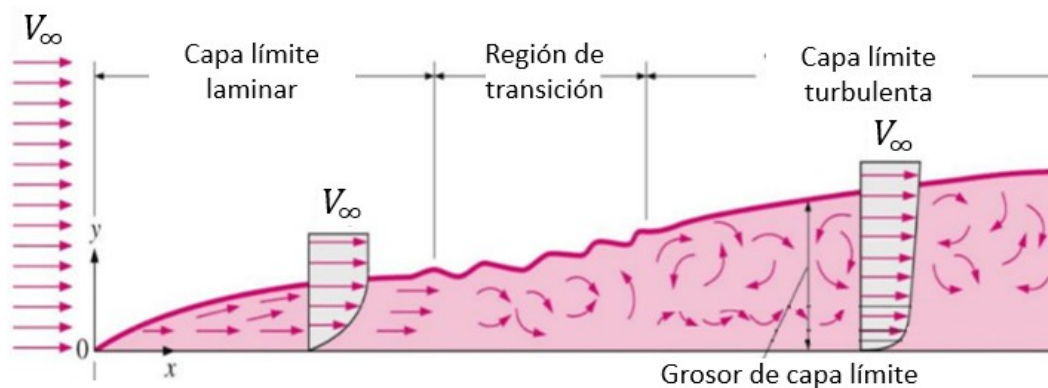


Imatge 20: diagrama que mostra la capa límit.
Imatge extreta de: <https://www.aerodinamicaf1.com>.

Vull remarcar que la velocitat relativa entre l'aire i el monoplaça és 0 a la superfície d'aquest, no pas la velocitat del fluid.

La capa límit pot ser laminar o turbulenta. Una capa límit laminar presenta un flux ordenat i constant, el qual generarà poca fricció entre el fluid i la superfície, per tant, menys *drag*. D'altra banda, el flux d'una capa límit turbulenta presenta un comportament caòtic i genera vòrtex o remolins que incrementen la fricció entre el fluid i la carrosseria. Entre aquests tipus de capa límit apareix una zona de transició on la capa passa de ser laminar a turbulenta i té propietats d'ambdós models.

Per poder saber si la capa límit o un flux determinat és turbulent o laminar, hem de calcular el nombre de Reynolds¹⁵, explicat més endavant.



Imatge 21: diagrama que mostra els tipus de capes límit.

Imatge extreta de: <https://www.nuclear-power.com>.

Com podem veure a la imatge, el grossor de la capa límit augmenta amb la distància recorreguda per aquesta.

Si la turbulència augmenta molt, la capa límit tendirà a desprendre's de la carrosseria i es generarà una zona de baixa pressió i *drag*. Tot i així, la turbulència no sempre és dolenta, ja que té una major capacitat de mantenir-se enganxat a la superfície quan aquesta presenta curvatures o canvis de forma. Per aquesta raó els enginyers dissenyen generadors de vòrtex, ja que augmenten la càrrega aerodinàmica fent que la capa límit no sigui enterament laminar, perquè aquest tendeix a separar-se més fàcilment del sòlid.

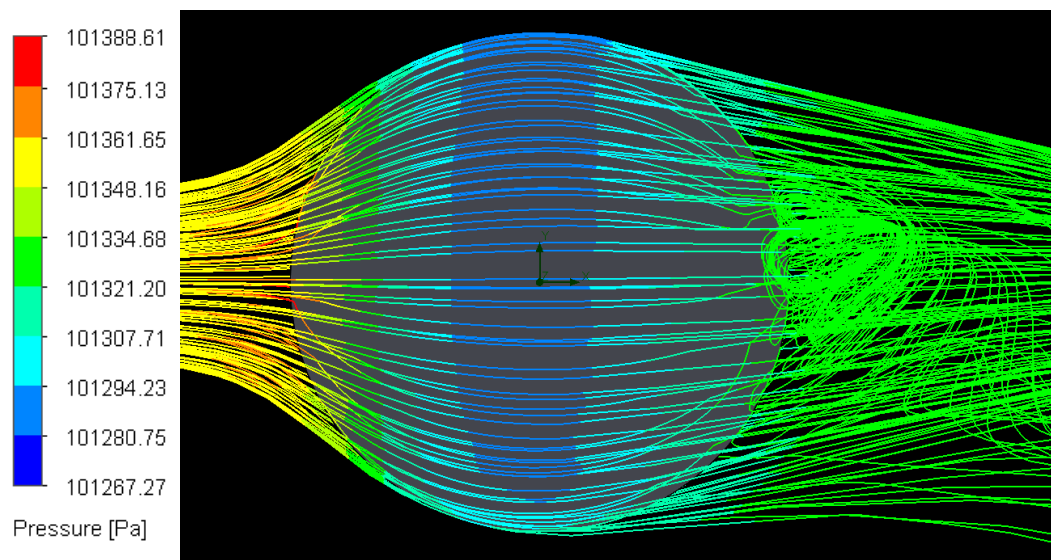
¹⁵ Nombre de Reynolds: utilitzat per saber si el flux de la capa límit d'un aleró és laminar o turbulenta. S'utilitzen dues fórmules.

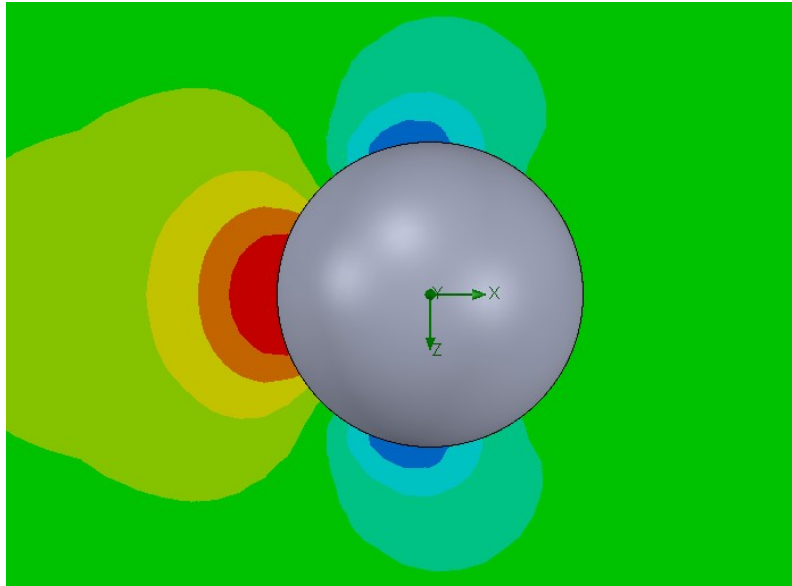


Imatge 22: generadors de vòrtex marcats en vermell.

Imatge extreta de: <https://www.carthrottle.com>.

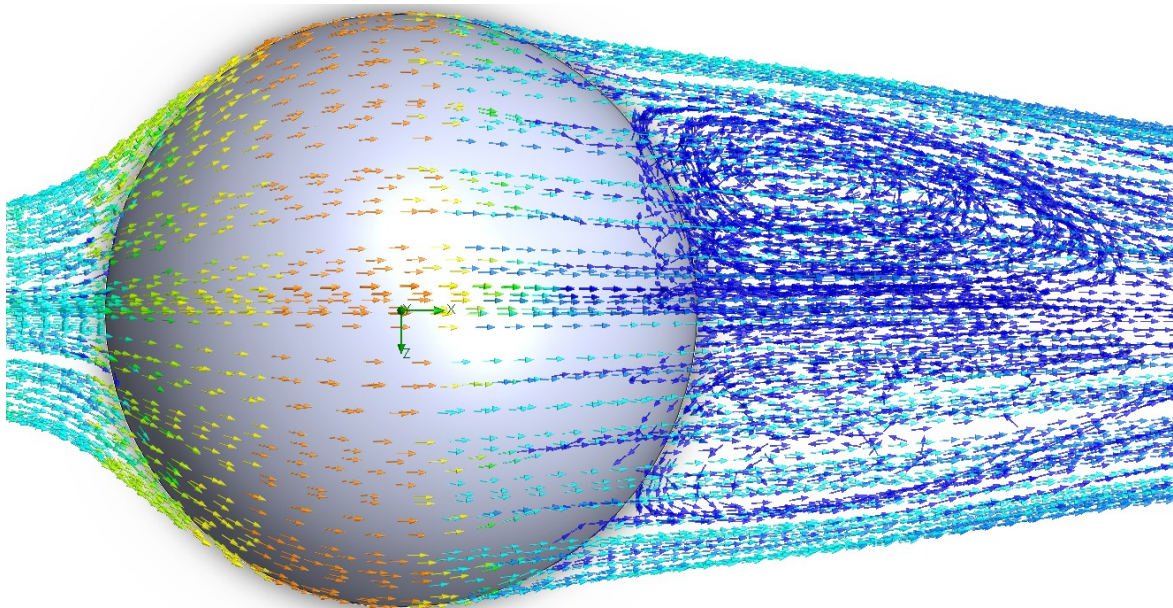
Ara mostraré unes imatges creades per simulació CFD a SolidWorks (Dinàmica de Fluids Computacional), i així poder observar l'efecte Coanda i la capa límit a tres cossos. L'aire circula a una velocitat de 10 m/s (36 km/h) d'esquerra a dreta.

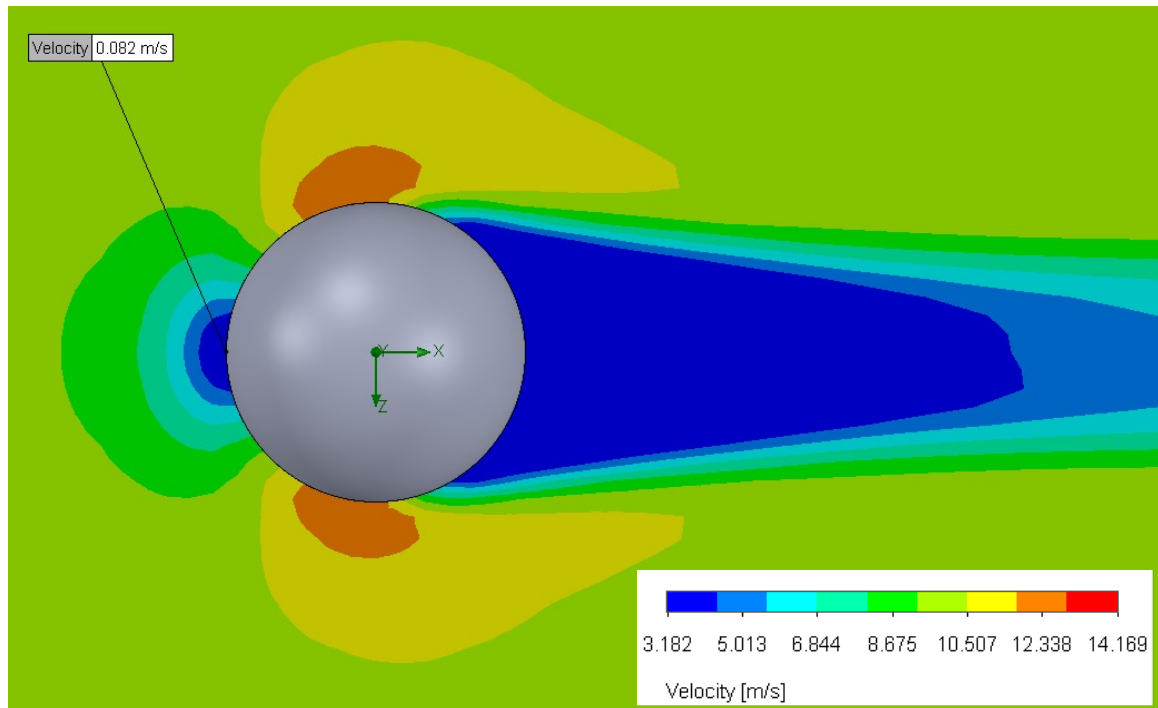




Imatges 23 i 24: vista lateral d'una esfera amb les pressions colorejades i un gràfic. Imatges pròpies.

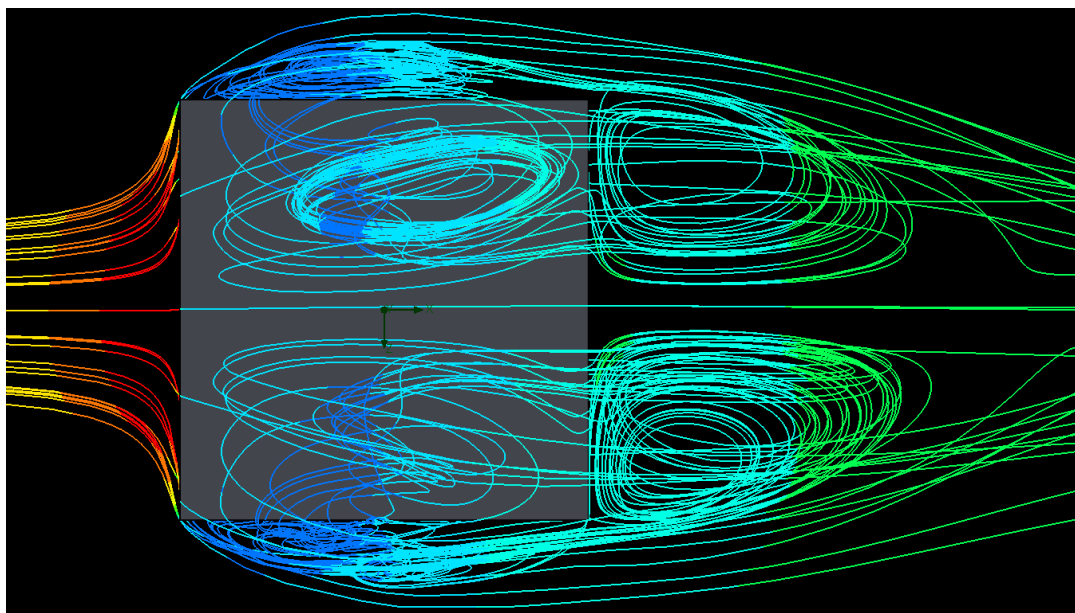
A la primera imatge podem observar com l'aire "s'enganxa" a la primera meitat de l'esfera (efecte Coanda), però justament als punts mitjans de l'esfera es desprèn el fluid del sòlid i es crea una zona de baixa pressió (marcada amb un blau intens). A la segona imatge podem veure com la pressió és major davant de l'esfera i menor darrere seu, fet que crea *drag* de forma. També es pot observar clarament la depressió que crea la capa límit al desprendre's de l'esfera. Ara mostraré unes imatges per veure la velocitat del fluid:



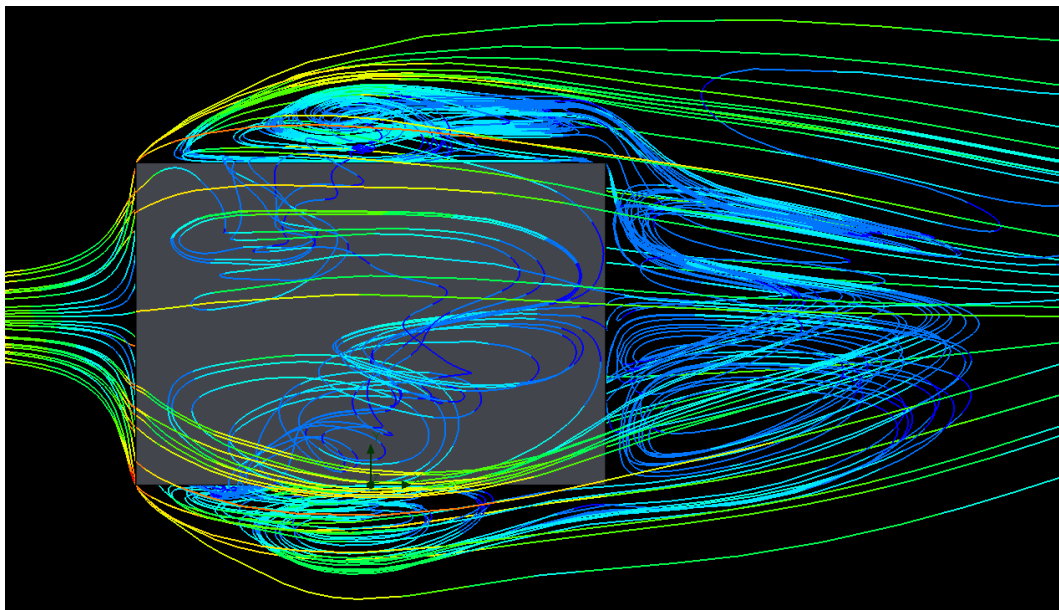


Imatges 25 i 26: planta d'una esfera i un gràfic amb les velocitats del fluid colorejades. Imatges pròpies.

A les imatges podem observar com el fluid es desaccelera i inverteix el seu sentit just darrere de l'esfera, creant una estela de velocitat reduïda respecte de la resta de fluid. També podem veure que, inicialment, la velocitat del fluid tendeix a 0 a mesura que s'aproxima a la superfície de l'esfera, degut a la viscositat de l'aire. Ara veurem com actua l'aire a un quadrat (la llegenda de colors és la mateixa que a l'esfera):

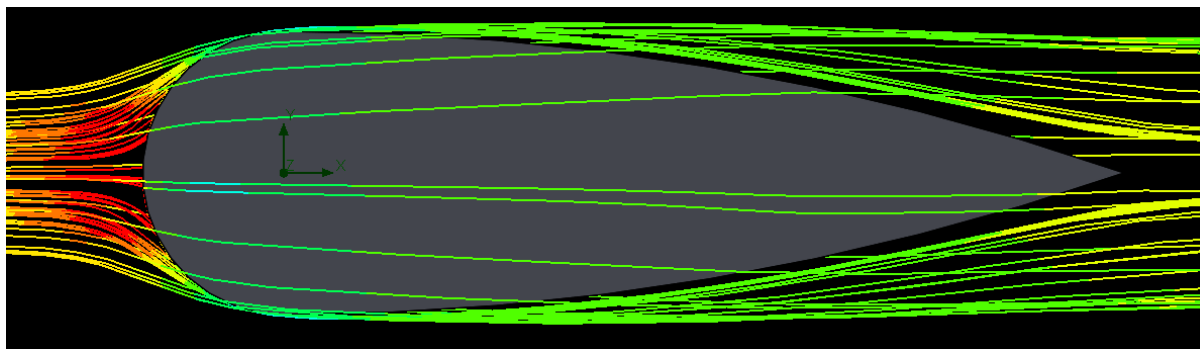


Imatge 27: planta d'un quadrat amb les pressions colorejades. Imatge pròpia.

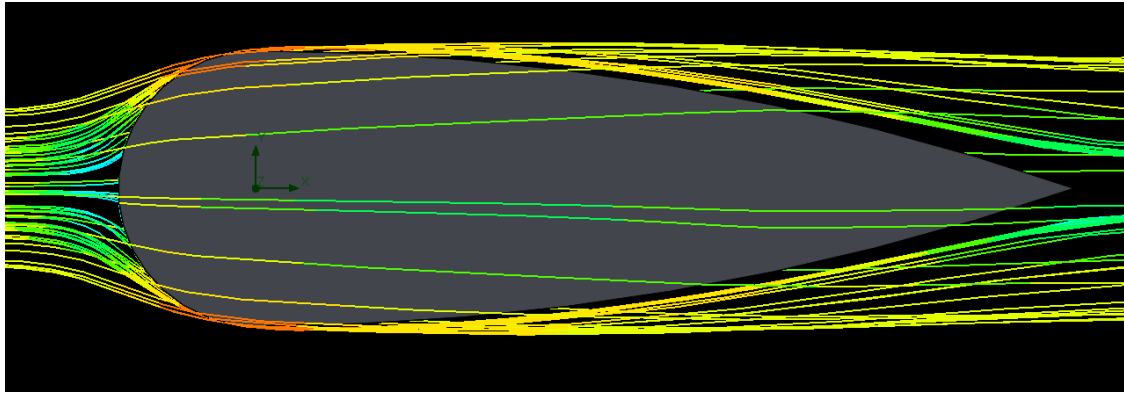


Imatge 28: vista lateral d'un quadrat amb les velocitats colorejades. Imatge pròpia.

A les imatges podem veure que el fluid no s'adhereix a la superfície del quadrat perquè aquesta fa un canvi brusc, no com l'esfera. Es pot veure la capa límit, primerament laminar i després turbulenta. Aquesta part turbulenta (línies blaves) té menys velocitat que la resta de fluid laminat per sobre d'aquesta (línies verdes). Ara veurem com actua l'aire a un perfil alar:



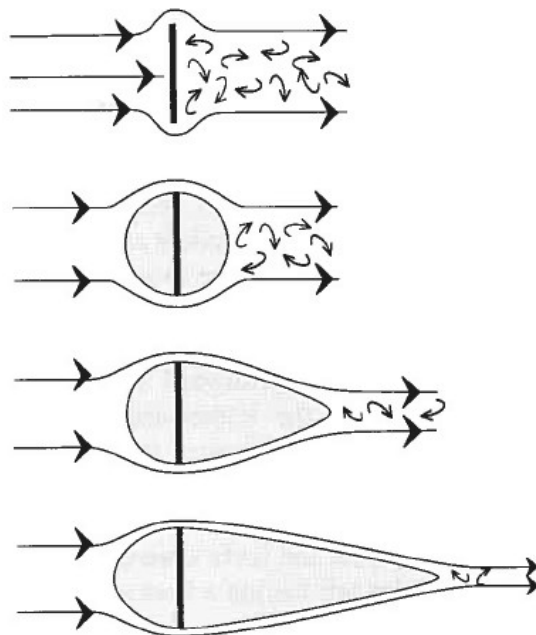
Imatge 29: vista lateral d'un perfil alar amb les pressions colorejades. Imatge pròpia.



Imatge 30: vista lateral d'un perfil alar amb les velocitats colorejades. Imatge pròpia.

Observem que bàsicament no hi ha turbulència. La capa límit es desprèn de l'ala justament quan aquesta té el grossor màxim. A aquesta zona també podem veure que el fluid circula a major velocitat i té menys pressió.

Per últim, veurem com és el flux darrere de diferents cossos on, amb menys canvis bruscos pateixi la superfície, menys es desprèn la capa límit i menys *drag* de forma apareix:



Imatge 31: com actua l'aire a diferents cossos.
Imatge extreta de: <https://www.quora.com>.

3.6 Nombres adimensionals

3.6.1 Coeficients aerodinàmics

El coeficient aerodinàmic és una magnitud adimensional utilitzada per a l'estudi aerodinàmic d'un cos en moviment en el si de l'aire. Indica com afecta la forma del monoplaça a les forces que sofreix. Els més utilitzats a l'automobilisme són el coeficient d'arrossegament o resistència (C_D o C_x , *drag coefficient*) i el coeficient de sustentació (C_L o C_z , *lift coefficient*). Aquests coeficients s'utilitzen per calcular el *downforce* i el *drag* del monoplaça, amb les mateixes fórmules:

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

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

Fórmula 4: fórmules per calcular el *downforce* i el *drag*.

Fórmula extreta de: <https://www.aerodinamicaf1.com>.

Resumint, D és el *drag* i L és el *lift* (o *downforce* en negatiu), A és l'àrea frontal del vehicle, V la velocitat relativa entre el fluid i el monoplaça, ρ és la densitat de l'aire i C_D i C_L són els dos coeficients aerodinàmics.

Els equips de Fórmula 1 poden saber el valor dels coeficients mitjançant el túnel de vent o una simulació CFD. Si utilitzen el túnel de vent, obtenen el *drag* total del vehicle a una certa velocitat a partir d'uns sensors. Com que la resta de paràmetres ja els saben, poden calcular els coeficients. En el cas de la simulació CFD, una vegada realitzats els càlculs computacionals, el propi *software* proporciona els valors de les forces i dels coeficients.

A la Fórmula 1 interessa que el coeficient d'arrossegament sigui el més petit possible, perquè això voldrà dir que menys força actuarà en sentit contrari al desplaçament del monoplaça (per tant, menys *drag*). Amb el coeficient aerodinàmic de *downforce* passarà el contrari, perquè volem generar la màxima càrrega aerodinàmica possible.

L'avantatge principal de treballar amb els coeficients és que són independents de la velocitat. Si comparéssim dues configuracions del monoplaça amb les forces, hauríem d'indicar també la velocitat relativa, mentre que si les comparéssim amb els coeficients, no ens faria falta cap altra dada.

Normalment el C_D d'un cotxe utilitari oscil·la entre 0,25 i 0,45; entre 0,6 i 0,7 per a un camió i entre 1 i 1,18 per a un Fórmula 1, depenent de la configuració del monoplaça. Això passa perquè se sacrifica C_D per aconseguir C_L , ja que quan els enginyers volen tenir més *downforce*, també aconseguen més àrea frontal perquè incrementen l'angle d'atac dels alerons.

Shape	Drag Coefficient
Sphere	0.47
Half-sphere	0.42
Cone	0.50
Cube	1.05
Angled Cube	0.80
Long Cylinder	0.82
Short Cylinder	1.15
Streamlined Body	0.04
Streamlined Half-body	0.09

Measured Drag Coefficients

Imatge 32: C_D a diferents cossos. El flux d'aire és laminar.
Imatge extreta de: <https://hmong.es>.

La taula mostra el C_D per a diferents cossos, així podem tenir una idea de com varia el coeficient d'arrossegament segons la forma de diferents sòlids.

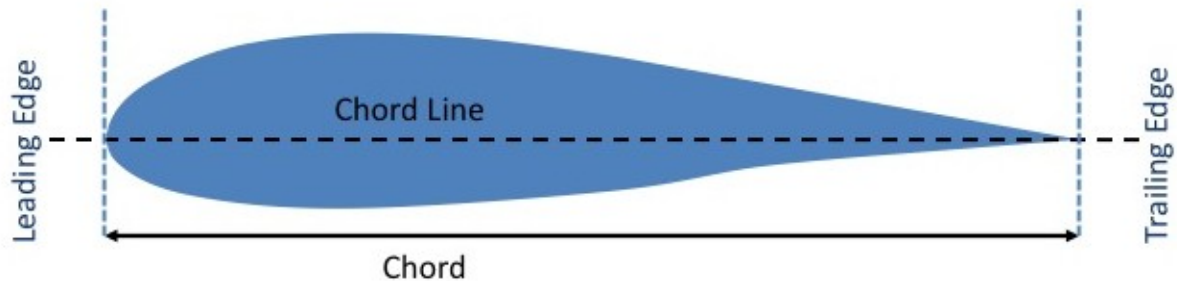
3.6.2 Nombre de Reynolds

El nombre de Reynolds (Re) és molt utilitzat a mecànica de fluids per caracteritzar el moviment d'un fluid, en el nostre cas, a un aleró o a la capa límit. El seu valor indica si el flux és laminar o turbulent. Podem calcular Reynolds amb diferents fórmules (depenent si el fluid és lliure o es troba a una canonada), però jo utilitzaré dues:

$$Re = \frac{uL}{\nu} = \frac{\rho uL}{\mu}$$

Fórmula 5: com calcular el nombre de Reynolds.
Imatge extreta de: <https://en.wikipedia.org>.

u és la velocitat relativa, ρ és la densitat de l'aire, ν és la viscositat cinemàtica, μ la viscositat dinàmica, i L la longitud característica. Podriem substituir L per la llargada de la capa límit o per la corda d'un aleró, que és la distància entre el caire d'atac (*leading edge*) i el caire de sortida (*trailing edge*) o *chord* a la imatge següent:



Imatge 33: corda d'un aleró. Imatge extreta de: <https://skybrary.aero>.

Quan calculem el nombre de Reynolds, si $Re \leq 5 \cdot 10^5$ podem dir que el flux és laminar; si $Re \geq 10^7$, el flux és turbulent; per tant, si $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$, el flux es troba a la etapa de transició. Aquests valors són aproximats i depenen de la rugositat de la superfície, de la turbulència del flux d'aire i de la distribució de pressions. A més, Re és proporcional a l'escala del model: per exemple, si calculem Re d'un cotxe que és $\frac{1}{4}$ l'escala real del monoplaça, Re també serà $\frac{1}{4}$ del nombre calculat al monoplaça real.

3.7 Elements i dispositius aerodinàmics

No tots els elements aerodinàmics d'un monoplaça de Fórmula 1 generen càrrega aerodinàmica, també fan altres funcions necessàries, com redirigir l'aire brut per intentar crear el màxim *downforce* i el mínim *drag* possible.



Imatge 34: distribució de downforce a un F1 del 2017. Imatge extreta de: <https://lat.motorsport.com/f1/photos>.

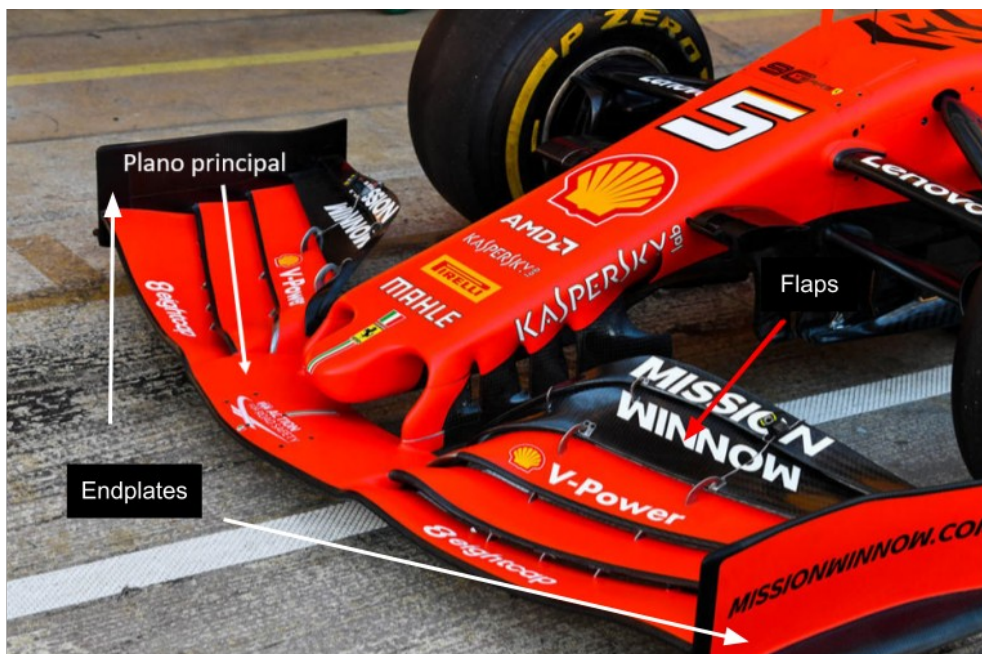
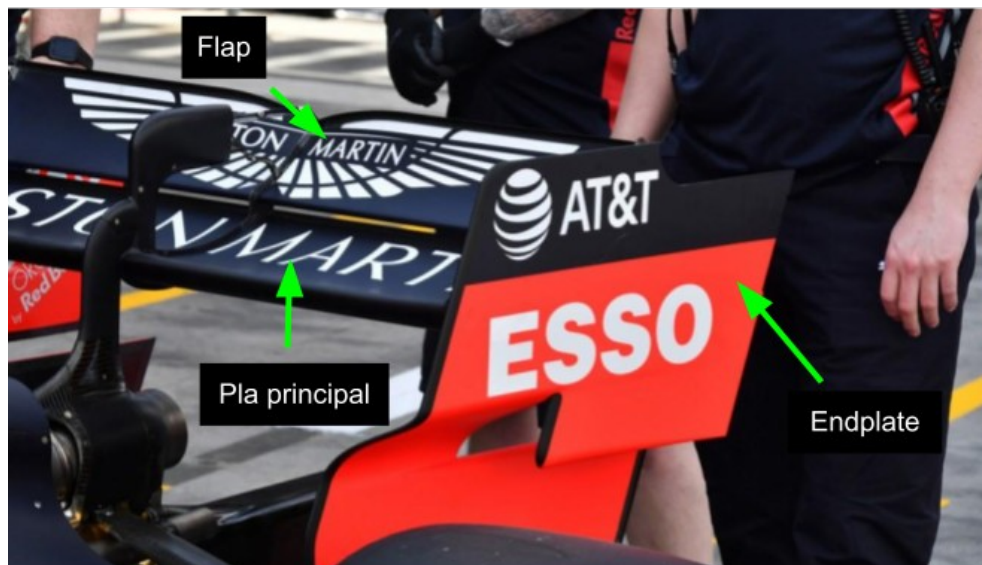
Els alerons davanter i posterior, el sòl i el difusor són els elements que generen més càrrega aerodinàmica. Aquest dos últims són els més importants, ja que generen molt *downforce* i molt poc *drag*. Els percentatges de la imatge són orientatius, oferts per la FIA, ja que varien depepent de l'equip, del circuit i de la temporada. A més, són dades que els equips no volen revelar per no donar pistes als altres.

3.7.1 Alerons

L'aleró davanter i posterior funcionen de la mateixa manera. Són parts molt restringides per la FIA, ja que el mínim canvi a algun d'aquests dos elements pot ser clau per guanyar o perdre dècimes de temps per volta. Generalitzant, estan constituïts per diferents plans i dos *endplates*¹⁶.

¹⁶ *Endplates*: plaques verticals que delimiten el final del perfil alar.

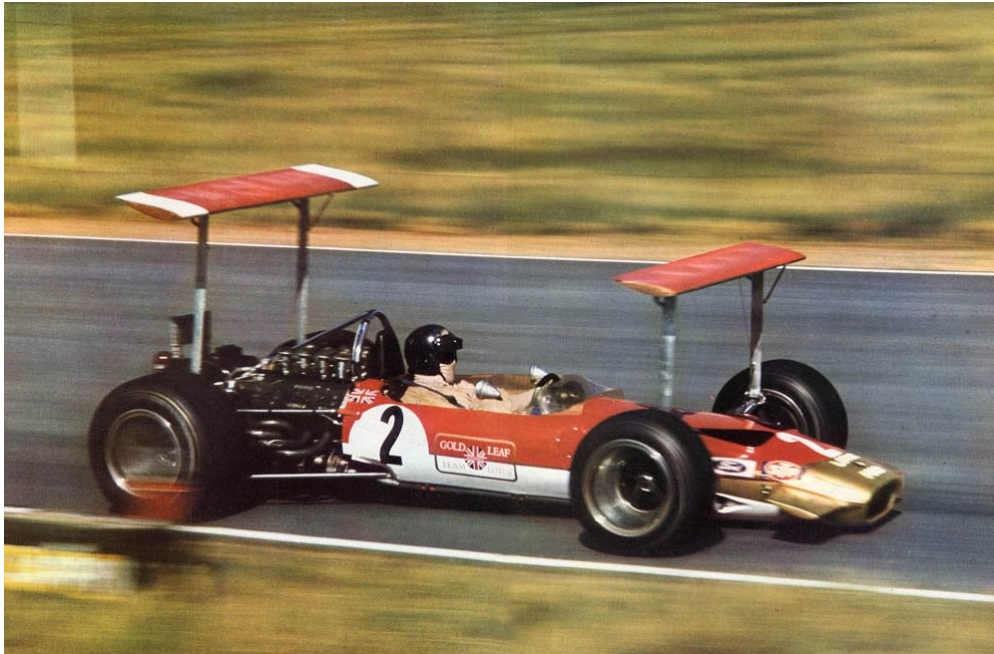
- 1) El pla principal és el més important, perquè redirigeix l'aire a la resta de plans (*flaps*). Pot ser pla (com el de l'aleró davanter) o tenir forma de cullera (com a l'aleró posterior).
- 2) Com que l'aire tendeix a circular de les zones d'alta pressió a les de baixa pressió, el flux que es troba als extrems de l'aleró intenta passar de la zona superior a la inferior, i això genera *drag* i turbulència. Els *endplates* serveixen per minimitzar aquest efecte i, per tant, la creació de *drag* induït. A més, uneixen l'aleró posterior amb la resta de la carrosseria.



Imatges 35 i 36: plans i endplates dels alerons.

Imatges extretes de: <https://soymotor.com> i <https://www.aerodinamicaf1.com>.

Els *endplates* van ser introduïts a la F1 per l'enginyer Colin Chapman¹⁷ a la dècada dels 70. Els va implementar als cotxes del seu equip *Team Lotus*, i després la resta d'equips els van copiar.



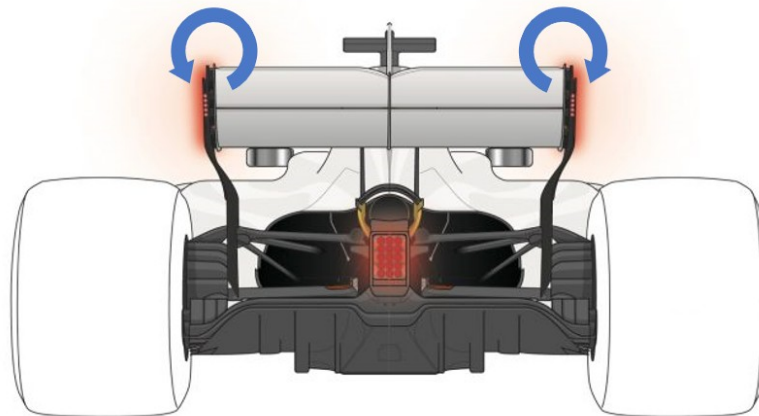
Imatge 37: Lotus 49B del 1969, sense endplates, pilotat per Jochen Rindt.
Imatge extreta de: <https://twitter.com>.



Imatge 38: Lotus 78 del 1977, amb endplates, pilotat per Mario Andretti.
Imatge extreta de: <https://www.pinterest.es>.

Com a curiositat, durant els dies més humits es poden veure els vòrtex que genera l'aleró posterior.

¹⁷ Colin Chapman: enginyer anglès que va fundar *Lotus Cars* i va aportar grans avenços a la F1, com el *ground effect* o nous tipus de suspensions que encara s'utilitzen a monoplaques.

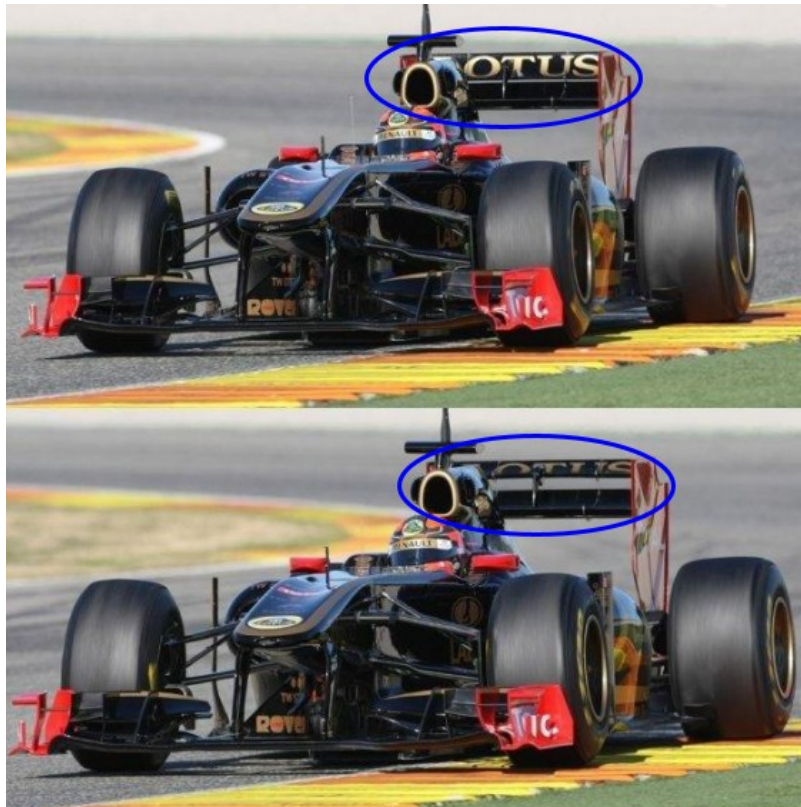


Imatges 39 i 40: vòrtex generats a l'aleró posterior.

Imatges extretes de: <https://www.formulaf1.es> i <https://www.aerodinamicaf1.com>.

3.7.2 DRS

El DRS (*Drag Reduction System*) és un sistema implementat el 2011 per propiciar els avançaments. Està col·locat al flap superior de l'aleró posterior i funciona mitjançant un sistema hidràulic. Quan s'obre, deixa passar l'aire i disminueix l'àrea frontal del vehicle, per tant disminueix el *drag*, però també el *downforce*. Degut a això, només es pot obrir a les zones marcades per la FIA quan un monoplaça persegueix a un altre a menys d'un segon en la cursa.



Imatge 41: DRS tancat i obert. Imatge extreta de: <https://eslaf1.wordpress.com>.

3.7.3 Fons pla

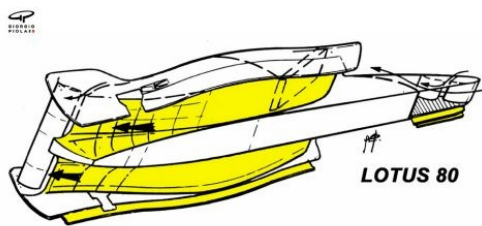
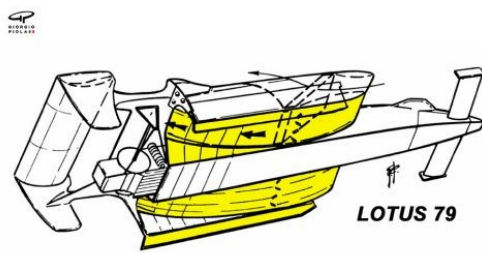
Els vehicles de competició presenten un espai lliure entre el xassís i l'asfalt. Aquesta part inferior del xassís és plana, no queden els elements del motor descoberts com als cotxes utilitaris. Degut al poc espai lliure entre el sòl del cotxe i l'asfalt, podem afirmar gràcies al principi de Bernoulli i a l'efecte Venturi, que l'aire que passa s'accelera i crea una zona de baixa pressió sota el cotxe. Com que el flux d'aire sobre el cotxe té una pressió major que el de sota, es genera una força vertical que empenya el monoplaça cap avall (crea molt *downforce* sense crear gaire *drag*). Això és el *ground effect*.

Pràcticament tots els F1 des dels 70 fins ara han tingut fons pla. Però, en 1982 el *ground effect* va ser prohibit per la seva perillositat i van regular-se les mesures dels difusors per fer-los més petits.

Per a aquest 2022, la FIA ha tornat a implementar el *ground effect* a la competició, deixant que el difusor pugui ser més gran per intentar crear el mínim *drag* i el màxim *downforce*.



Imatge 42: fons pla i difusor d'un Ferrari de 2011. Imatge extreta de: <http://descubre1a1.blogspot.com>.



Imatge 43: fons pla i difusor dels Lotus de 1979. Imatge extreta de: <https://www.targasport.com>.

4. PART PRÀCTICA

4.1 SolidWorks

SolidWorks és un software CAD (disseny assistit per computadora) per a modelat mecànic en 2D o 3D desenvolupat per Dassault Systèmes. Aquest software s'assembla més a programes utilitzats a la Fórmula 1 que no pas a l'SketchUp, el qual es queda molt enrere.

He escollit SolidWorks perquè em fa possible fer CFDs per poder saber, d'una manera aproximada, com es comportarà el meu disseny amb el pas de l'aire. A més, em dona els valors de la força, la pressió i la velocitat del fluid per allà on passa. És com un túnel de vent digital.

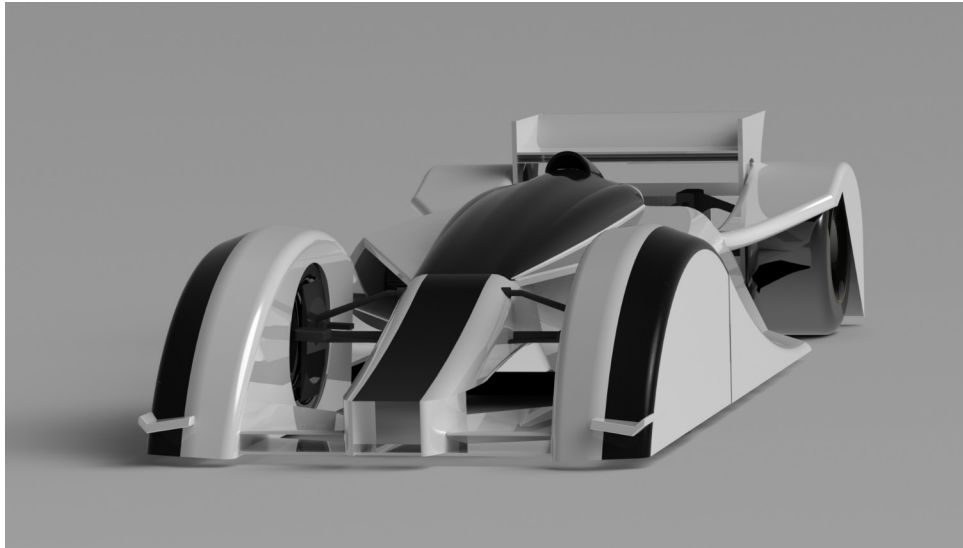
4.2 Disseny

Primerament, vaig fer uns esbossos per tenir una idea de com volia fer el prototip de Fórmula 1. També vaig posar les cotes per guiar-me mentre el dissenyava. Tots els plànols es poden trobar a l'annex.

Vaig seguir dissenyant el prototip amb els plànols. Com que el vaig dissenyar per parts a diferents arxius (aleró davanter, posterior i cèl·lula de supervivència), em va costar unir-les totes al monoplaça final.

Finalment ho vaig aconseguir, però tot just quan vaig provar la simulació CFD, SolidWorks em donava problemes amb els acoblaments del carenat i l'*aeroscreen*¹⁸. Ho vaig intentar arreglar, però no vaig poder. Com que el carenat està situat just a les rodes davanteres, vaig començar a dissenyar un altre monoplaça amb un avantatge: ja coneixia el programa. Vaig trigar molt menys a dissenyar aquest segon monoplaça. Primer vaig fer els laterals de la cèl·lula de supervivència i el sòl del cotxe. Després vaig fer l'aleró davanter i les suspensions, i finalment vaig fer l'aleró posterior i el difusor. Tot i les dificultats, m'ha quedat un bon disseny.

¹⁸ *Aeroscreen*: parabrisa fet d'òpticor (material transparent) i titani que protegeix el pilot en cas d'accidents o d'objectes externs.



Imatge 44: el primer prototip. Imatge pròpia.



Imatge 45 i 46: el segon prototip. Imatges pròpies.

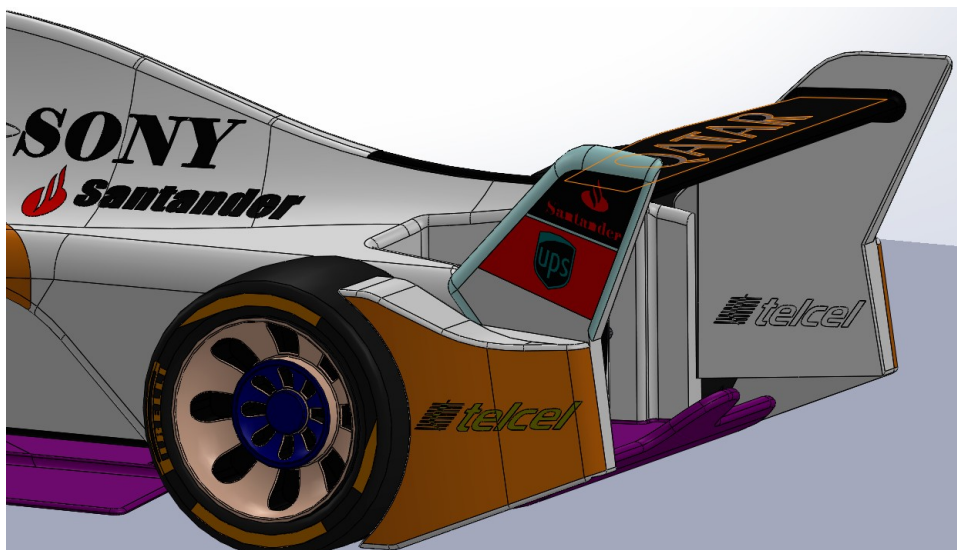
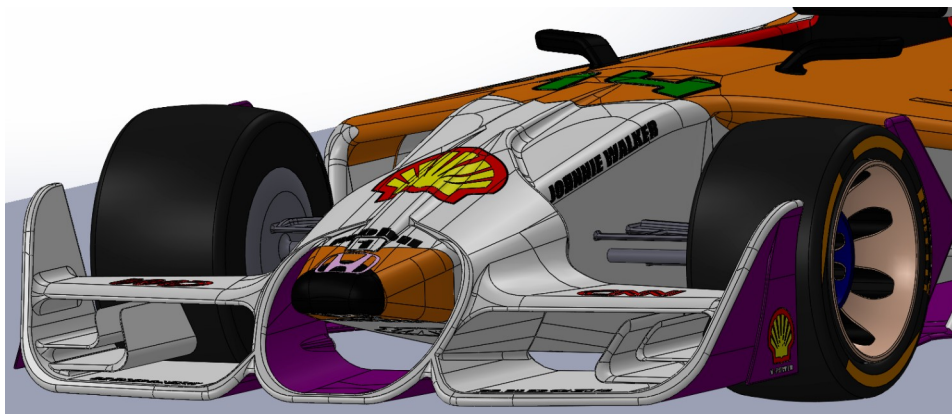
El primer que vaig fer quan vaig acabar el monoplaça va ser provar-lo a la simulació CFD. Aquest cop si que anava, i vaig passar a analitzar el meu prototip i altres monoplaçes per comparar-los.

4.3 Anàlisi CFD

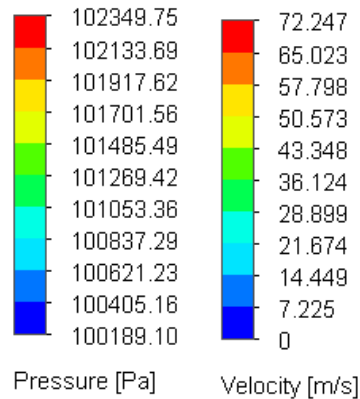
4.3.1 El meu prototip

Primerament, faré una simulació CFD del meu monoplaça. L'aire circula a 70 m/s (252 km/h), que és la velocitat que imposa la FIA als equips de Fórmula 1 per als test al túnel de vent.

El prototip té una configuració de baixa càrrega aerodinàmica. Els alerons són pràcticament plans. El sòl del cotxe és el que ha de generar la major part de *downforce*.

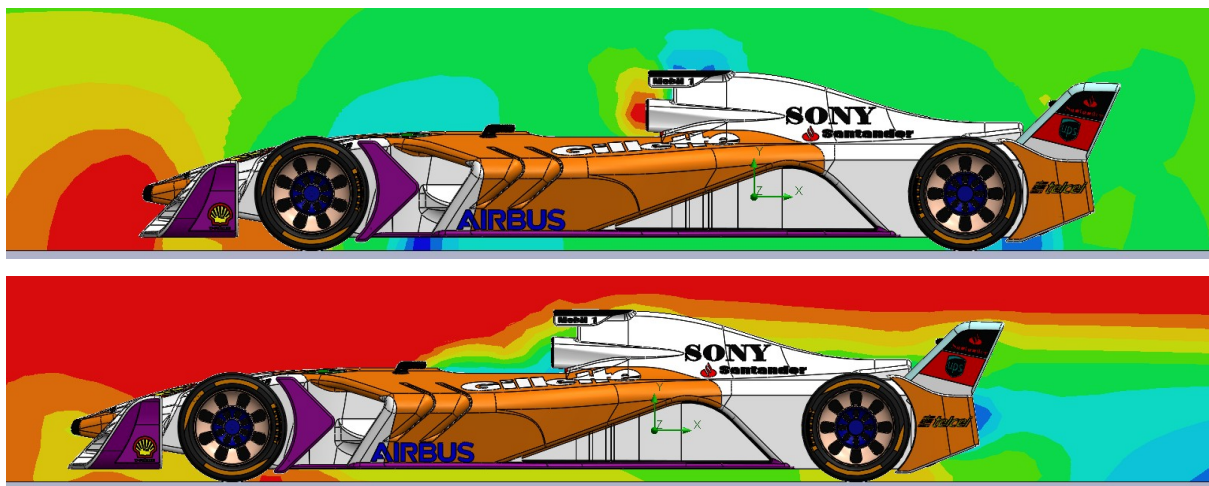


Imatges 47 i 48: alerons del prototip. Imatges pròpies.



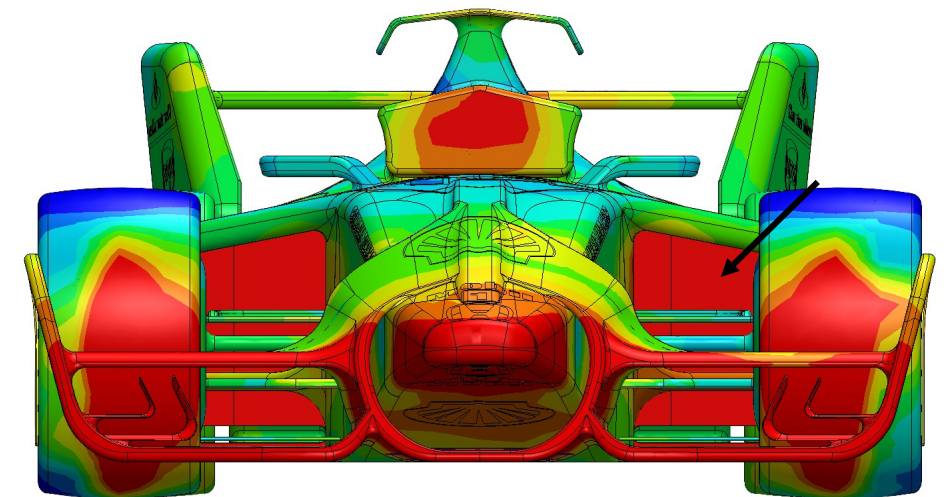
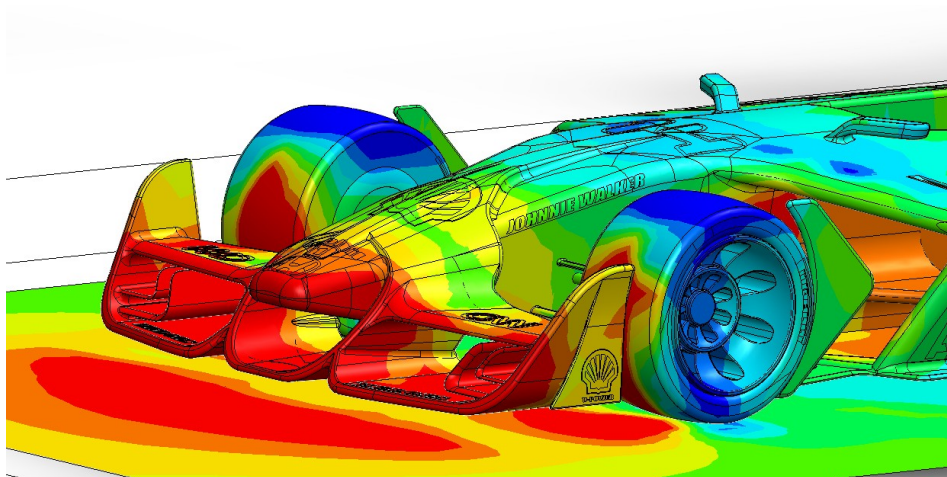
Imatge 49: llegenda dels colors. Imatge pròpia.

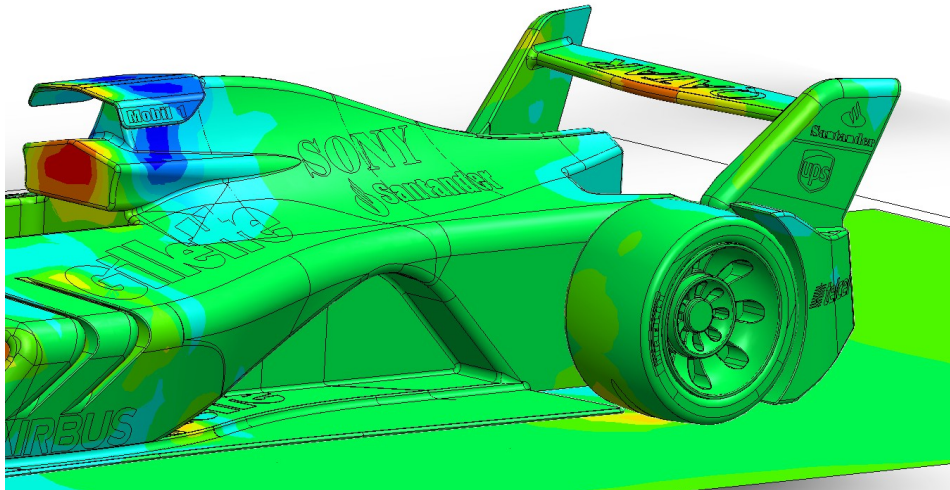
Primer veurem un gràfic de la pressió i la velocitat al punt mig del monoplaça.



Imatge 50 i 51: velocitats i pressions colorejades respectivament. Imatges pròpies.

Com podem observar a la primera imatge, és normal que davant del cotxe hi hagi una zona d'alta pressió, i darrere una zona de menor pressió. He aconseguit generar una zona de baixa pressió a sota del monoplaça (zona blava), gràcies al fons pla. Però, no ha generat tan poca pressió com jo m'esperava. A més, al difusor tampoc es genera una zona d'alta pressió, degut molt probablement a que aquest és molt estret i no té massa altura: és molt petit. Parlant de la velocitat, si que he aconseguit accelerar l'aire que passa per sota de l'aleró davanter, però no tant al fons pla. Ara veurem les pressions a les superfícies i a l'aleró posterior.





Imatge 52, 53, 54 i 55: pressions a la superfície del prototip. Imatges pròpies.

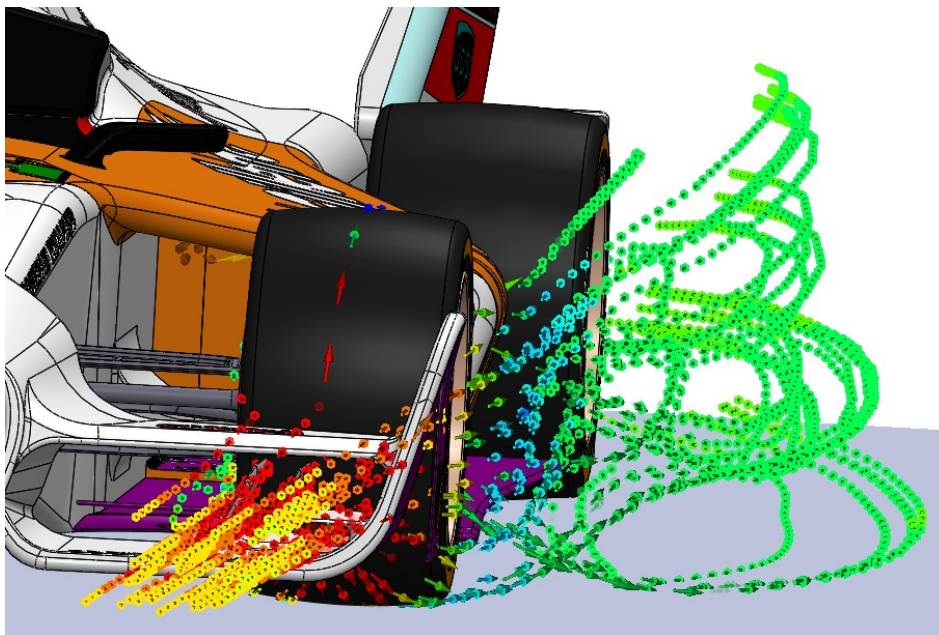
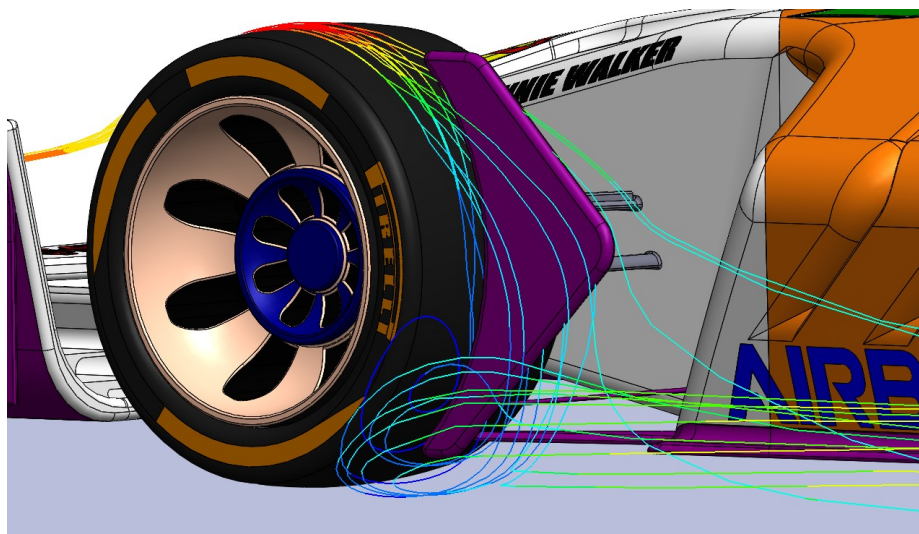
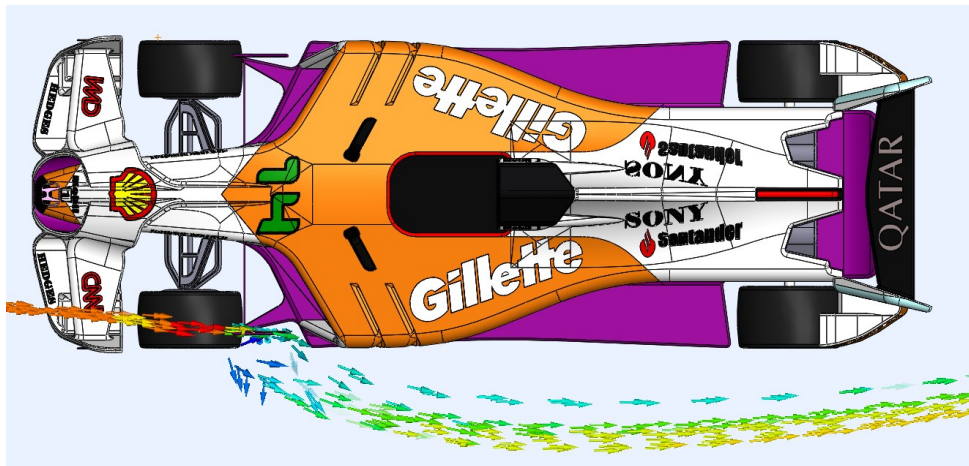
A la primera imatge observem que la pressió és menor sota l'aleró posterior. Això vol dir que crea *downforce* gràcies a la forma del perfil, no per la seva inclinació.

A les següents dues imatges, veiem que la pressió és major a tota la part frontal, sobretot a les rodes, que són les causants de la major part de *drag*. La zona blava sobre l'aleró (on està el número 14, a la segona imatge) no em preocupa, ja que es crea per culpa dels retrovisors.

Tota la part vermella indicada amb una fletxa negra hauria d'estar obert. No em preocupa aquesta alta pressió, perquè és per on haurien d'estar els conductes per refrigerar el motor. Jo m'he dedicat a dissenyar l'aerodinàmica del prototip, no el motor. Haurem de tenir en compte tota aquesta zona per al càlcul del *drag* (sabem que l'aire hauria de seguir fluint pels conductes que no he fet).

A l'última imatge, podem veure que a les rodes posteriors no hi ha una zona d'alta pressió com a les davanteres. Aquest fet m'ha sorprès, però és bo, perquè vol dir que la capa límit de la carrosseria del monoplaça no se separa.

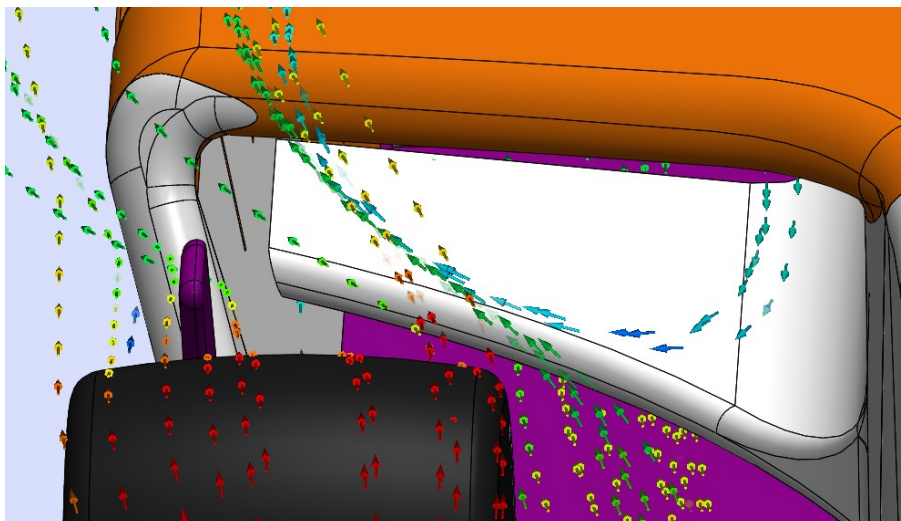
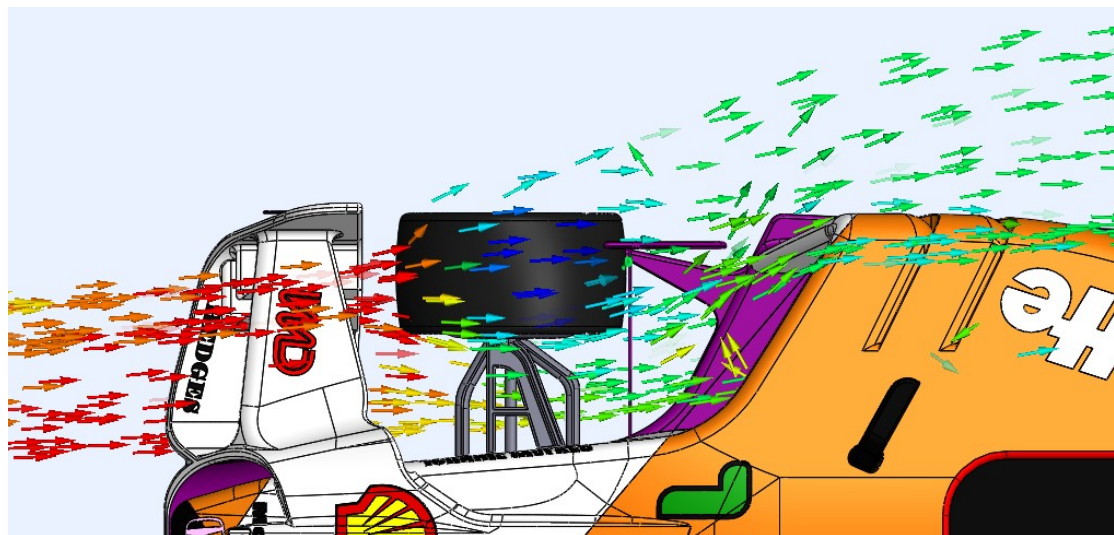
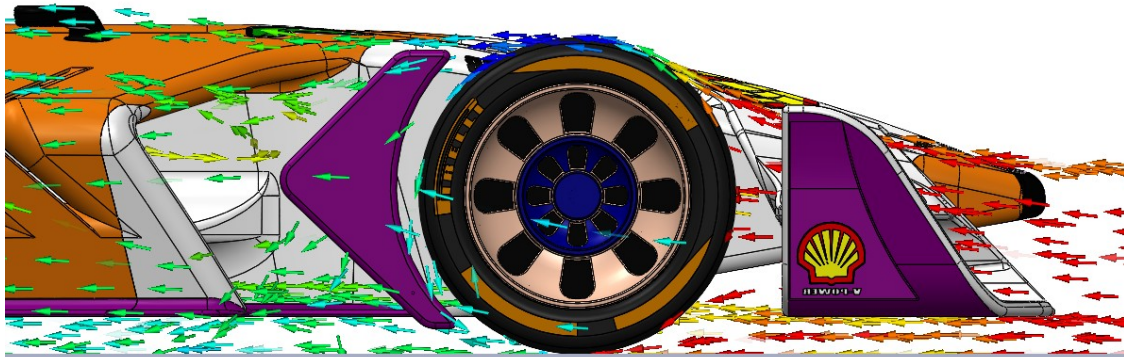
Ara veurem com circula l'aire:



Imatges 56, 57 i 58: pressions a la roda i a l'aleró davanter. Imatges pròpies.

A aquestes imatges observem com circula l'aire quan xoca amb la roda. Podem veure que al costat de la placa vertical o *bargeboard* (a la segona imatge), es crea

turbulència (per tant, una menor pressió, la zona blava), i després l'aire deixa d'estar afectat pel cotxe.



Imatges 59, 60 i 61: com circula l'aire quan entra en contacte amb les rodes. Imatges pròpies.

Els vectors de les dues primeres imatges indiquen la pressió, mentre que la tercera indica la velocitat. Veiem que hi ha una zona de depressió a la part superior de les rodes, perquè la capa límit es desprèn d'aquestes. A la tercera imatge veiem que hi

ha uns vectors els quals primerament van en sentit contrari a la resta de flux. Això passa perquè no estan fets els conductes de refrigeració del motor, com he dit abans. L'aire no es comportaria d'aquesta manera si els hagués fet.

Ara veurem una taula amb les forces totals que ha sofrit el monoplaça i els coeficients calculats:

Goal Name	Unit	Averaged Value		$C_f = 2 \cdot F / (\rho \cdot A \cdot v^2)$	
GG Total Force (X)	[N]	5760,8		A [m ²]	4,13
GG Total Force (Y)	[N]	-3284,8		ρ [kg/m ³]	1,225
				v [m/s]	70
			D (X)	Cd	0,4647619585
			DOWNFORCE (Y)	Cl	-0,2650066104

Imatge 62: taula amb les forces i els coeficients. Imatge pròpia.

Observem que el *drag* és major que el *downforce*. Això és completament normal, ja que els F1 sacrifiquen *drag* per obtenir *downforce*. També veiem que el C_D és molt bo, i el C_L no molt. En els F1 actuals el C_L (en valor absolut) sol ser una mica menys de la meitat del C_D i en el meu monoplaça és una mica més de la meitat, que és positiu.

Per acabar veurem com és el flux d'aire als alerons amb el nombre de Reynolds.

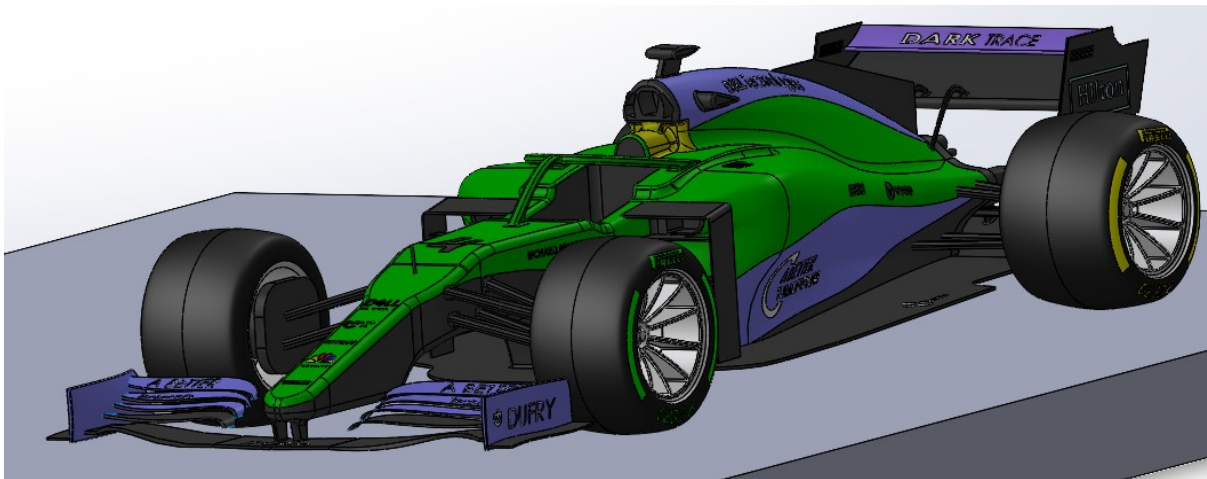
REYNOLDS	Aleró davanter	Aleró posterior
u [m/s]	70	70
L [m]	0,34	0,21
v [m ² /s] a CN	$1,56 \cdot 10^{(-5)}$	$1,56 \cdot 10^{(-5)}$
Re= $u \cdot L / v$	1523687,58	941101,1524

Imatge 63: taula amb el nombre de Reynolds calculat. Imatge pròpia.

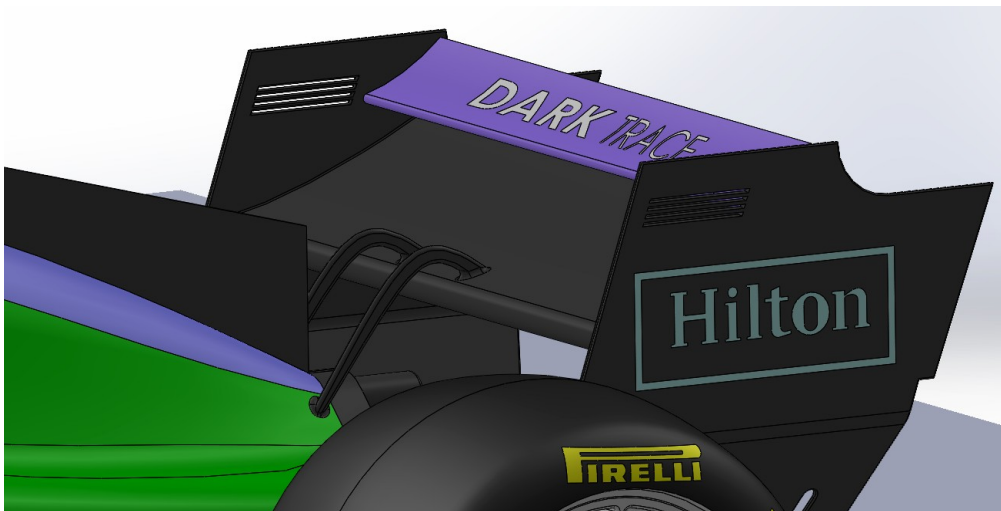
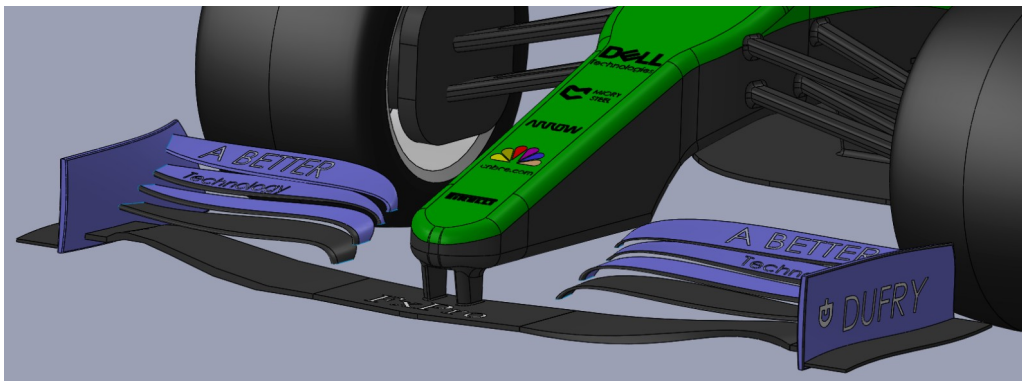
El flux d'aire, tant a l'aleró davanter com al posterior, es troba a la etapa de transició, el que vol dir que no és completament turbulent. Recordem que el flux es troba a l'etapa de transició si $5 \cdot 10^5 < Re < 10^7$.

4.3.2 F1 2021

Ara faré una simulació CFD d'un McLaren del 2021. La llegenda per a la velocitat i la pressió del fluid és la mateixa que abans. L'aire circula a una velocitat de 252 km/h (70 m/s).

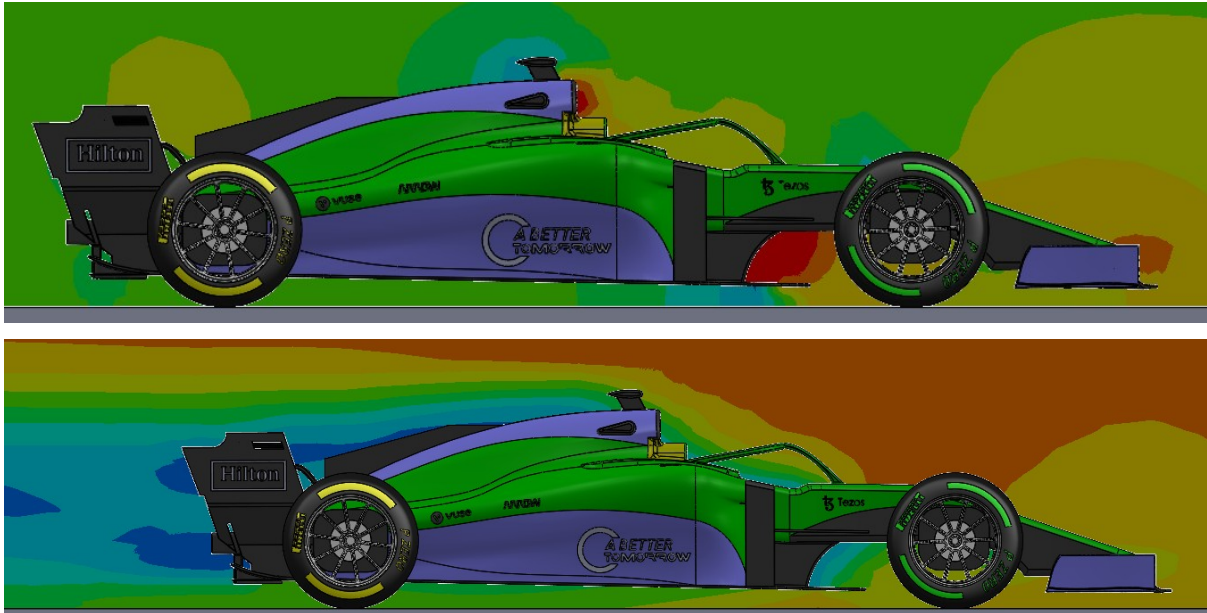


Imatge 64: McLaren de 2021. Imatge pròpia.



Imatges 65 i 66: pla detall dels alerons. Imatges pròpies

Ara sí, comencem amb l'estudi.

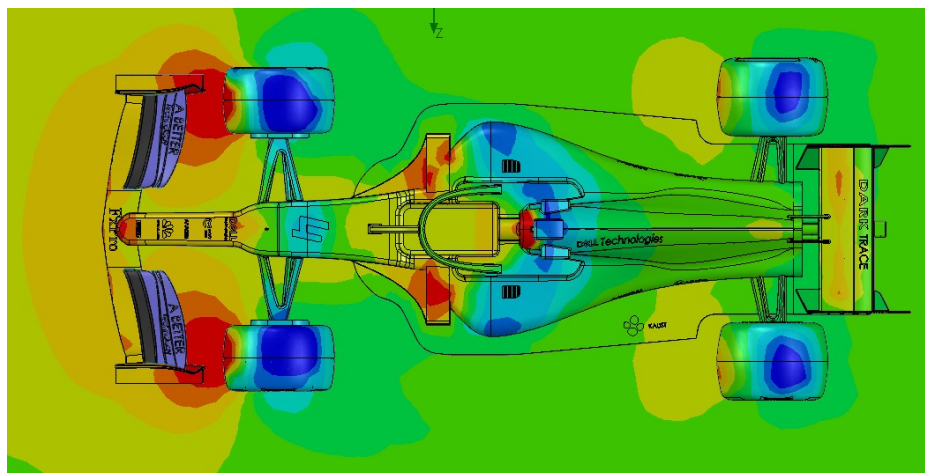


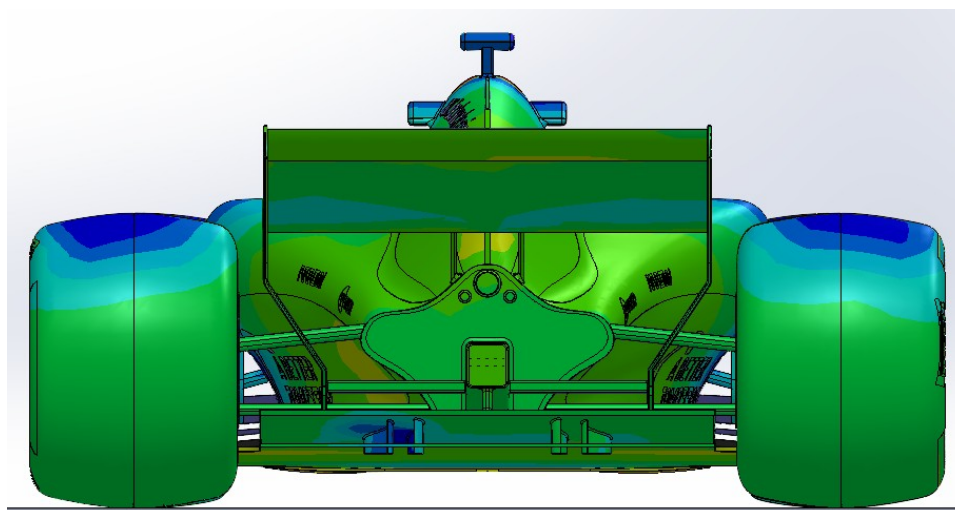
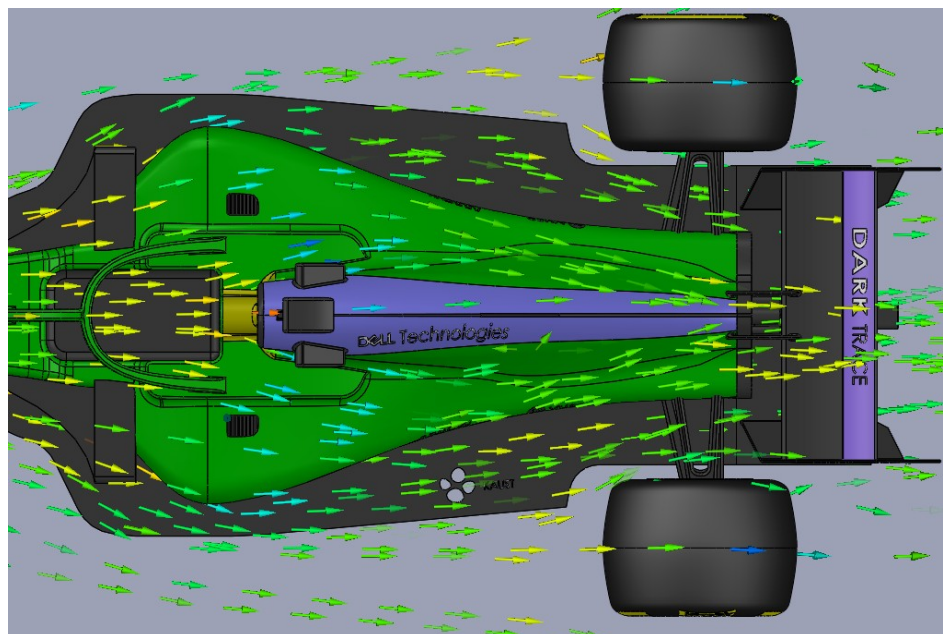
Imatges 67 i 68: velocitats i pressions colorejades respectivament. Imatges pròpies.

A la primera imatge veiem que la pressió a la part frontal del cotxe no és molt gran. Tot i així, si que s'aconsegueix una menor pressió a l'inici del fons pla, però hauria de ser encara més baixa per a que no s'igualés amb la pressió superior a la zona del difusor.

Observant la segona imatge, podem deduir que l'aire que circula darrere del monoplaça és turbulent, perquè es formen zones ovalades de baixa velocitat degut als vortex (marcades amb el blau més fosc).

Ara veurem les pressions a la superfície del monoplaça.





Imatges 69, 70 i 71: pressions al McLaren. Imatges pròpies.

A les dues primeres imatges, veiem una zona marcada amb diferents blaus just al mig del cotxe. Això passa per un despreniment de la capa límit, com es pot apreciar a la segona imatge. D'igual manera, també hi ha un despreniment de la capa límit a la part superior de les rodes.

També podem observar que la part superior de l'aleró posterior està marcada amb tons groguencs (major pressió), mentre que la part inferior amb tons verdosos i blaus (menor pressió), com veiem a la tercera imatge. Això és completament normal.

Finalment veurem com és el flux d'aire.

REYNOLDS	Aleró davanter		Aleró posterior	
	Pla principal	Flap superior	Pla principal	Flap
u [m/s]	70	70	70	70
L [m]	0,196	0,09	0,334	0,12
v [m ² /s] a CN	1,56*10 ⁽⁻⁵⁾	1,56*10 ⁽⁻⁵⁾	1,56*10 ⁽⁻⁵⁾	1,56*10 ⁽⁻⁵⁾
Re=u*L/v	878361,0755	403329,0653	1496798,976	537772,0871

Imatge 72: càlcul del nombre de Reynolds als alerons. Imatge pròpia.

Pel pla principal i el flap de l'aleró posterior, observem que el flux es troba en transició, com al pla principal de l'aleró davanter, degut a la seva llargada.

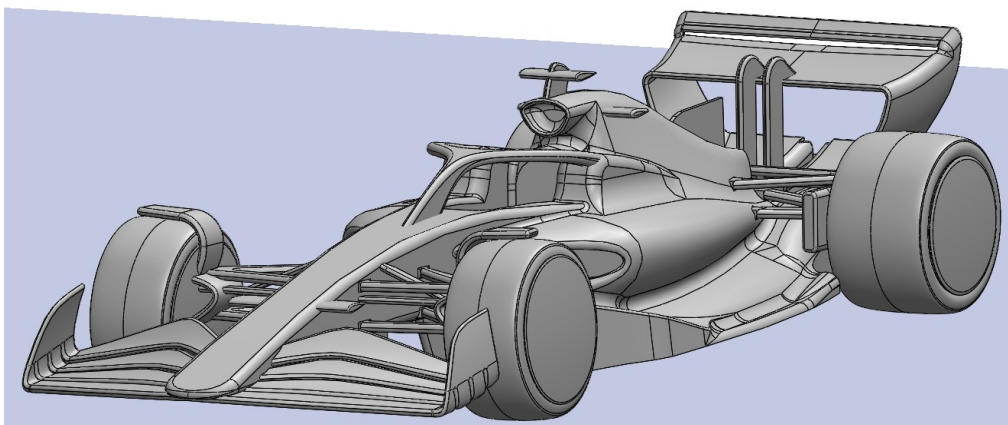
D'altra banda, el flux és laminar al flap superior de l'aleró davanter, degut a que és més petit. Per això els enginyer divideixen els alerons en diferents plans, per no crear turbulència i que el flux sigui laminar.

4.3.3 F1 2022

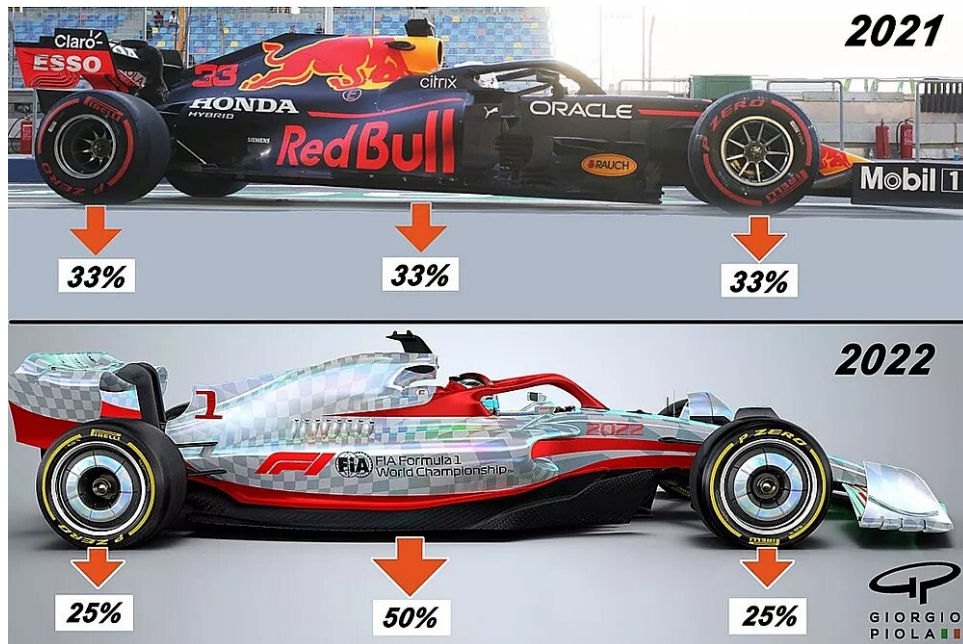
Degut a que el reglament tècnic del Campionat de Fórmula 1 de 2022 no està disponible per al públic, les mesures del monoplaça són aproximades. Per tant, no calcularé els coeficients ni Reynolds, ja que estan directament relacionats amb les mesures del vehicle.

Faré la simulació del cotxe de Fórmula 1 del 2022 que la FIA va proporcionar al Juliol de 2021. El model dels monoplaques de cada equip poden variar fins a la versió definitiva que es presentarà al Març de 2022.

Les llegendes dels colors són les mateixes que abans. L'aire circula a 70 m/s.

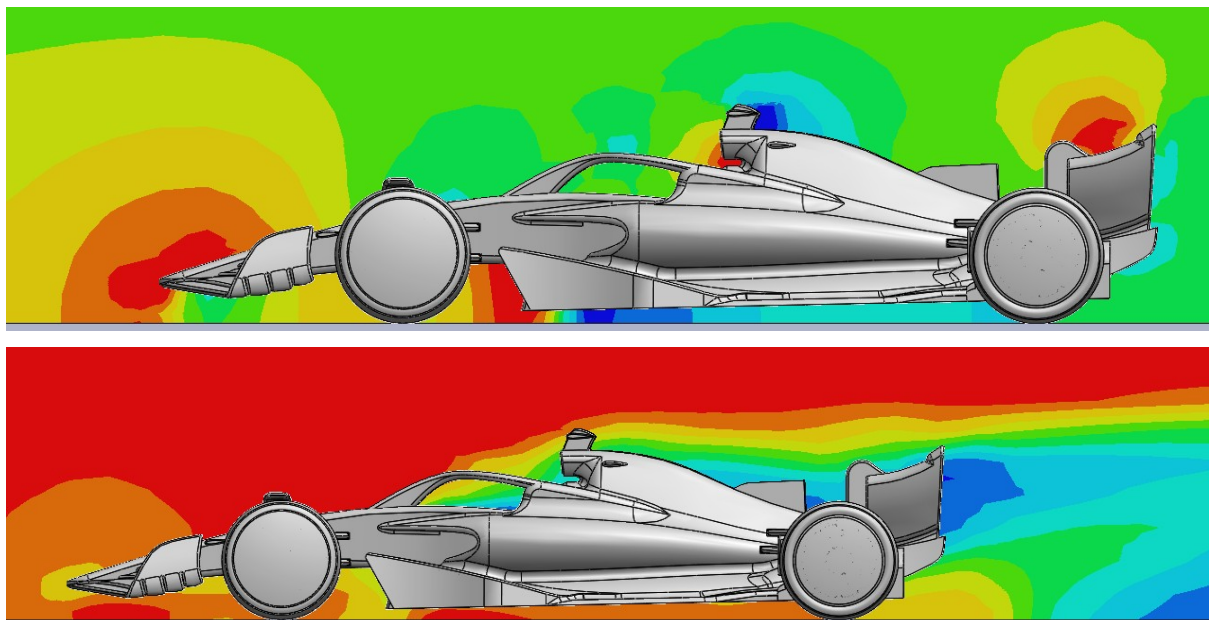


Imatge 73: F1 2022 proposat per la FIA. Imatge pròpia.



Imatge 74: comparació del downforce a diferents parts dels dos monoplaques.
Imatge extreta de: <https://es.motorsport.com>.

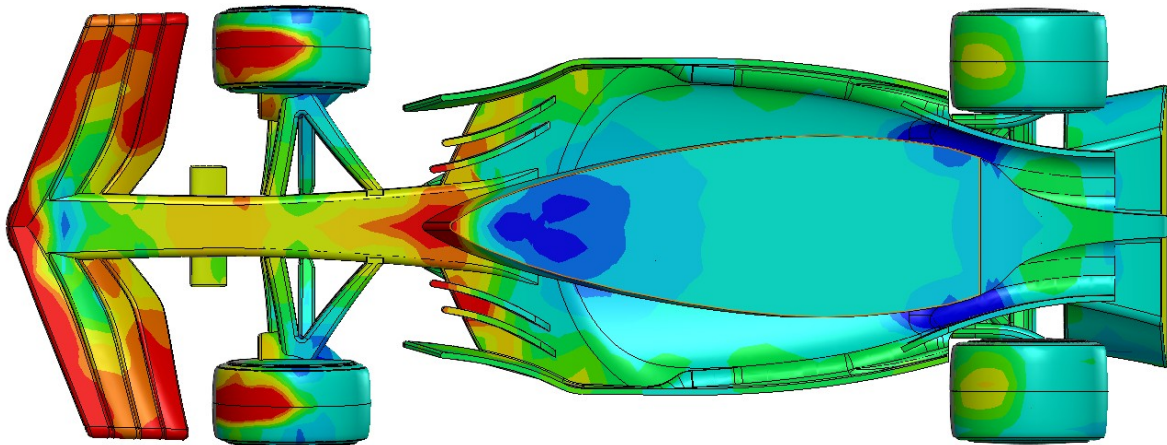
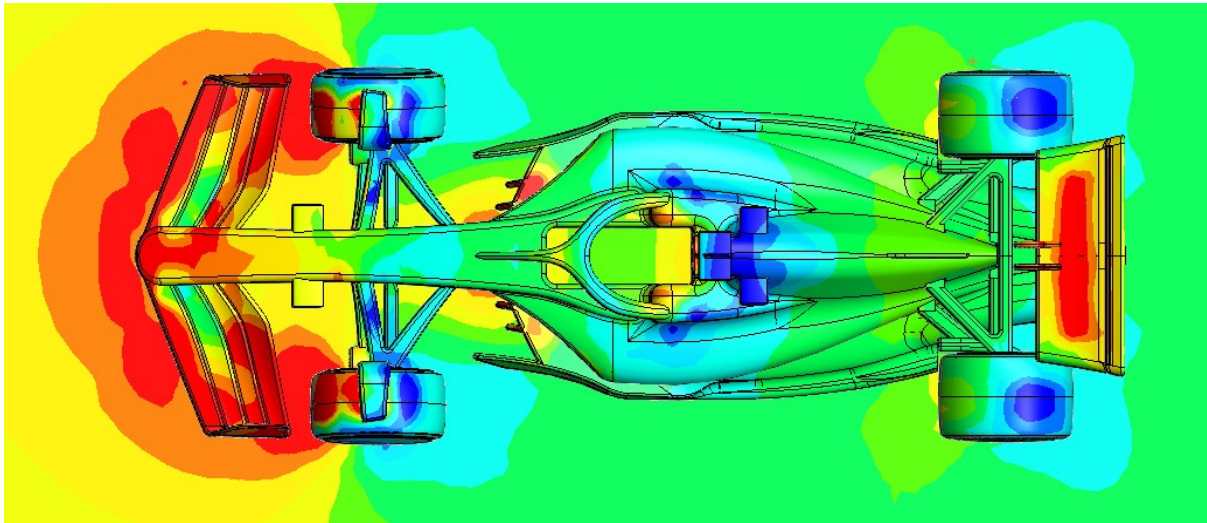
A aquesta última imatge veiem que el downforce al monoplaça de 2022 hauria de ser major al fons pla, però menor als alerons.



Imatges 75 i 76: velocitats i pressions colorejades respectivament. Imatges pròpies.

Només veient aquestes imatges, el resultant és sorprenent. Es genera moltíssima pressió a sobre dels dos alerons, i molt poca a sota dels mateixos. I per si no fos suficient, es genera una depressió grandíssima a tot el fons pla, fet que accelera la velocitat de l'aire a aquesta zona, com es pot veure a la segona imatge.

Ara veurem les pressions a la superfície del monoplaça.

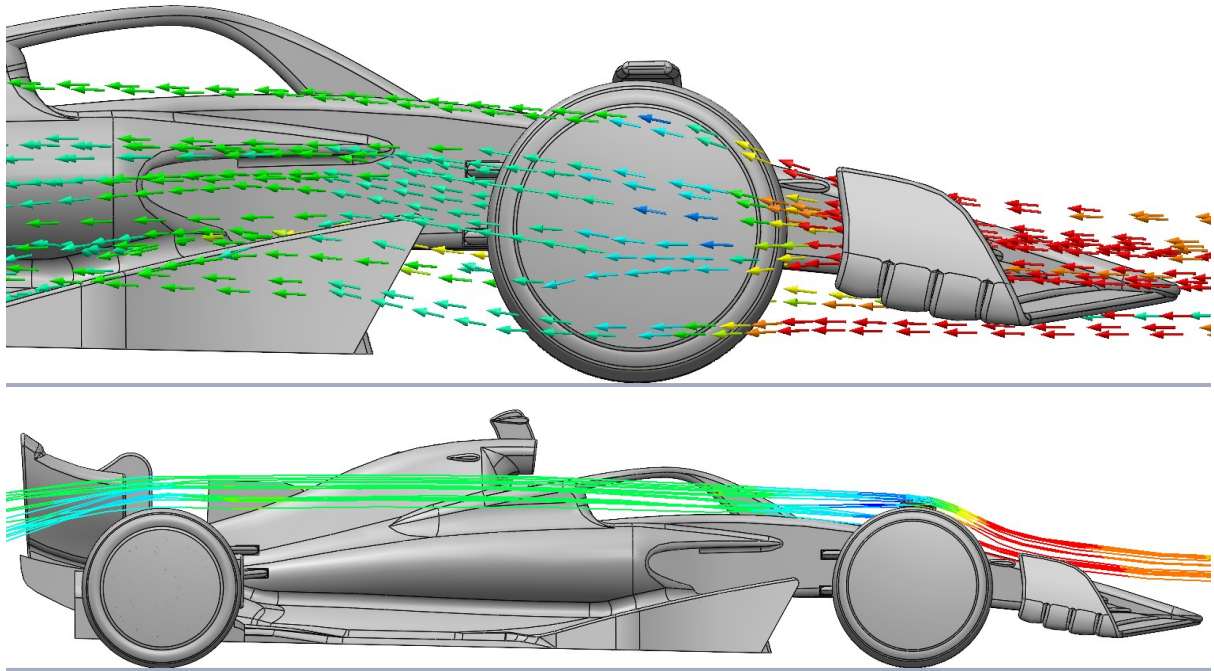


Imatges 77 i 78: pressions a la superfície del F1 de 2022. Imatge pròpia.

A la primera imatge podem observar que a les rodes davanteres es genera molt poca depressió, comparat amb els altres dos monoplaços analitzats anteriorment. Això es deu als deflectors¹⁹ col·locats just a sobre de les rodes, els quals analitzarem més endavant, juntament amb les rodes.

Si mirem l'aleró davanter a la segona imatge, veurem que hi ha una zona d'alta pressió a sota d'aquest. A aquest prototip, l'aleró davanter està col·locat a més altura que els alerons dels anteriors cotxes analitzats, per a que l'aire circuli el més laminar possible cap al fons pla, on la pressió és molt baixa.

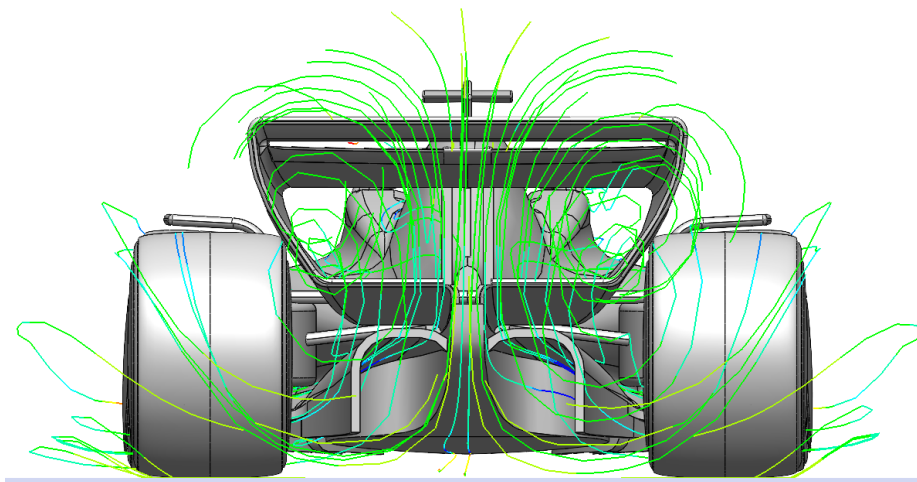
¹⁹ Deflectors: element aerodinàmic utilitzat per variar la direcció de l'aire i distribuir el flux laminar a les zones desitjades. No generen gaire *drag* ni *downforce*.

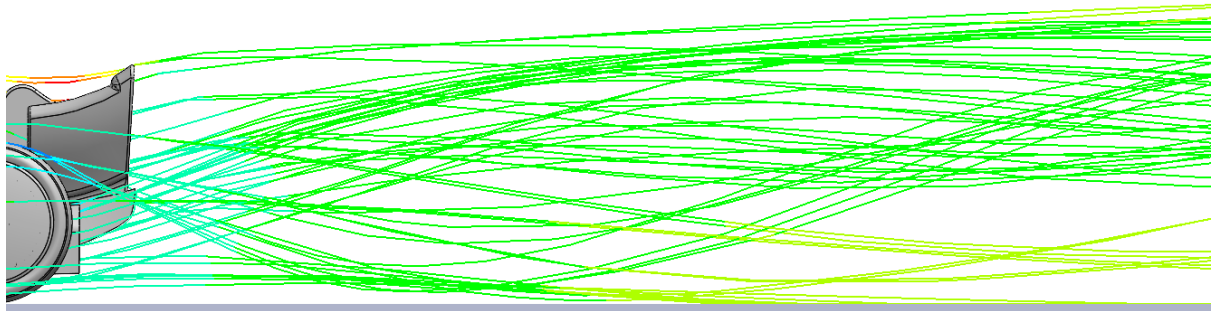


Imatges 79 i 80: pressions a les rodes

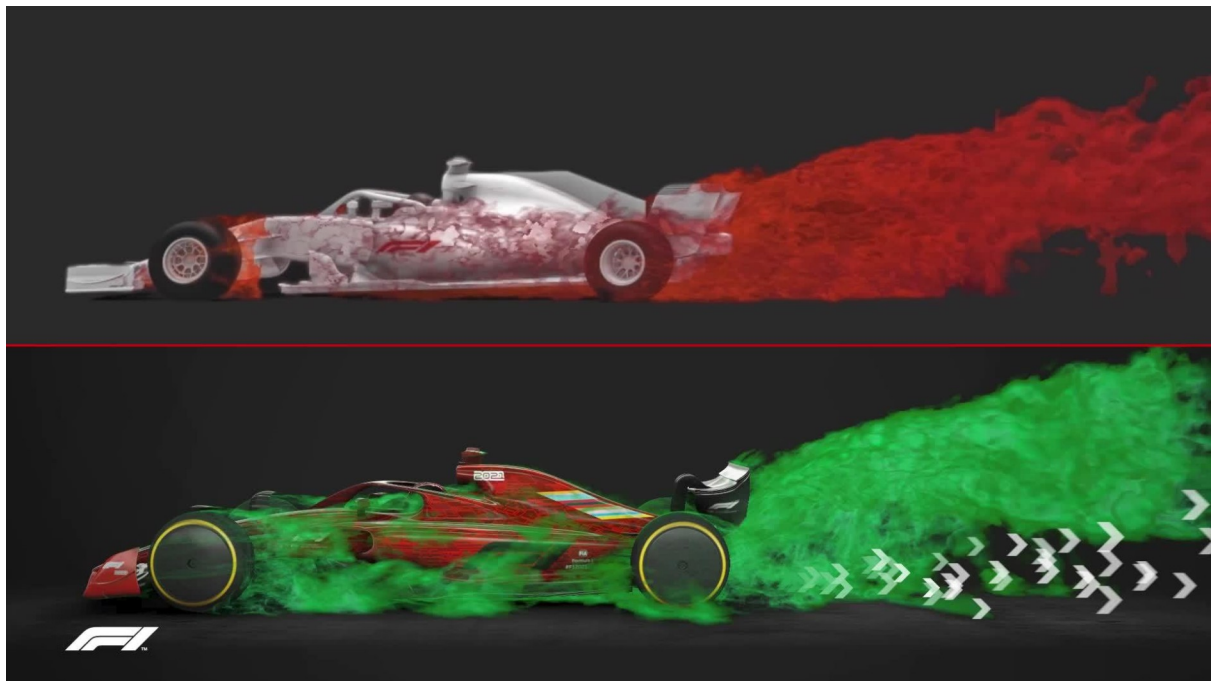
A la primera imatge, podem veure que es genera poca pressió a la zona de la llanta, però no es manté gaire, com als altres cotxes (per això és bo tapar les llantes). A la segona imatge observem que l'aire xoca per la part superior de la roda, i gràcies a l'efecte Coanda, arriba amb un flux laminar al deflector, el qual fa que l'aire es desprengui de la roda i continuï sense esdevenir turbulent ni perjudicial per a la carrosseria del cotxe.

Per últim, veurem l'estela que deixa el prototip al seu pas.





Imatges 81 i 82: estela del monoplaça. Imatges pròpies.



Imatge 83: comparativa d'esteles del monoplaça de 2021 i 2022.
Imatge extreta de: <https://tererenelpaddock.wordpress.com>.

A les dues primeres imatges veiem que el prototip de 2022 deixa una estela turbulenta tot just després de l'aleró, ja que és impossible fer que el flux sigui completament laminar. Tot i així, la turbulència es concentra per sobre de l'alçada del difusor i deixa flux en transició a la part inferior, com es pot apreciar amb les fletxes blanques de la tercera imatge (el flux marcat en verd i el vermell són turbulents). Això passa perquè l'aire que surt del difusor va cap amunt (gràcies a l'efecte Coanda) i a molta velocitat, generada al fons pla; fet que redirigeix l'aire turbulent de l'aleró cap amunt.

La FIA afirma que si un cotxe de 2022 persegueix a un altre, el monoplaça de darrera només perdrà un 15% del *downforce* total, no un 45% com els monoplaça actuals.

5. CONCLUSIONS

5.1 Conclusions de la hipòtesi

El primer disseny que vaig fer, el qual no vaig poder analitzar, hauria sigut el millor. Abans de començar-ho a dissenyar, ja sabia que volia tapar completament les rodes, ja que aquestes són la principal font de *drag*. També volia implementar l'*aeroscreen*, ja que el vaig dissenyar al TR de l'any passat i és un molt bon dispositiu que augmenta la seguretat del pilot.

Respecte a la hipòtesi sobre el meu disseny final, efectivament he aconseguit un monoplaça que genera poca turbulència i que permetria lluitar a les curses actuals. No obstant, no genera suficient *downforce* per al *drag* que crea, per tant seria un cotxe ràpid en recta, però molt lent als revolts. Això fa que el meu prototip sigui més lent que els cotxes actuals a una volta. Tot i així, el meu prototip no seria legal perquè no he dissenyat l'*halo*. Totes les mesures de la carrosseria compleixen les mesures de seguretat imposades per la FIA, ja que vaig fer el disseny tenint present el reglament tècnic, però no vaig implementar l'*halo*.

Havent vist els meus errors al disseny, proposo escurçar l'aleró davanter o dividir-ho en diferents *flaps*, per a que l'aire no esdevingui turbulent amb tanta facilitat. També faria falta apropar el fons pla a l'asfalt i fer més gran l'entrada a aquest, a més d'augmentar les mides del difusor.

Respecte a l'altra pregunta que em va sorgir mentre feia aquest treball, sobre els Fórmula 1 de 2022, sí que són tan bons com diu la FIA. Només amb la primera simulació que vaig fer del prototip, ja es veu com d'innovador és el monoplaça.

Segons les estimacions de la FIA, el cotxe més lent estarà a 1,5 segons del més ràpid.

5.2 Conclusions generals

La realització d'aquest treball ha estat molt útil per a mi, sobretot perquè he après conceptes nous que no coneixia, com la capa límit o el nombre de Reynolds, a més d'altres no explicats a aquest treball com el nombre Mach o les equacions de Navier-Stokes. Estic segur que molts dels conceptes que he après són bàsics per als estudis que m'agradaria cursar l'any que ve. També he après a utilitzar SolidWorks, que segurament em serà necessari en uns anys.

El que més m'ha agradat ha estat fer els anàlisi CFD dels cotxes a SolidWorks, sobretot perquè m'ha semblat increïble que només veient les pressions i les velocitats colorejades, ja sàpiga com circula l'aire per una zona determinada del cotxe. Tot i que no han sigut molts, també m'ha agradat fer els càlculs de Reynolds i dels coeficients.

En qualsevol cas, després d'haver realitzat aquest treball em porto una experiència molt bona per motivar-me a millorar en futurs projectes, que segur que continuo amb la temàtica de Fórmula 1.



6. AGRAÏMENTS

En primer lloc, vull agrair al meu tutor del Treball de Recerca, Jaime Morcillo, per la seva orientació i l'ajuda tècnica en la realització de les làmines dels monoplaçes, a més dels intents de crear la maqueta 3D del meu prototip.

També agraeixo la col·laboració d'un gran amic, Andreu Guardia Corral, estudiant de 2n de Batxillerat, que m'ha guiat en el disseny i el modelatge 3D del prototip.

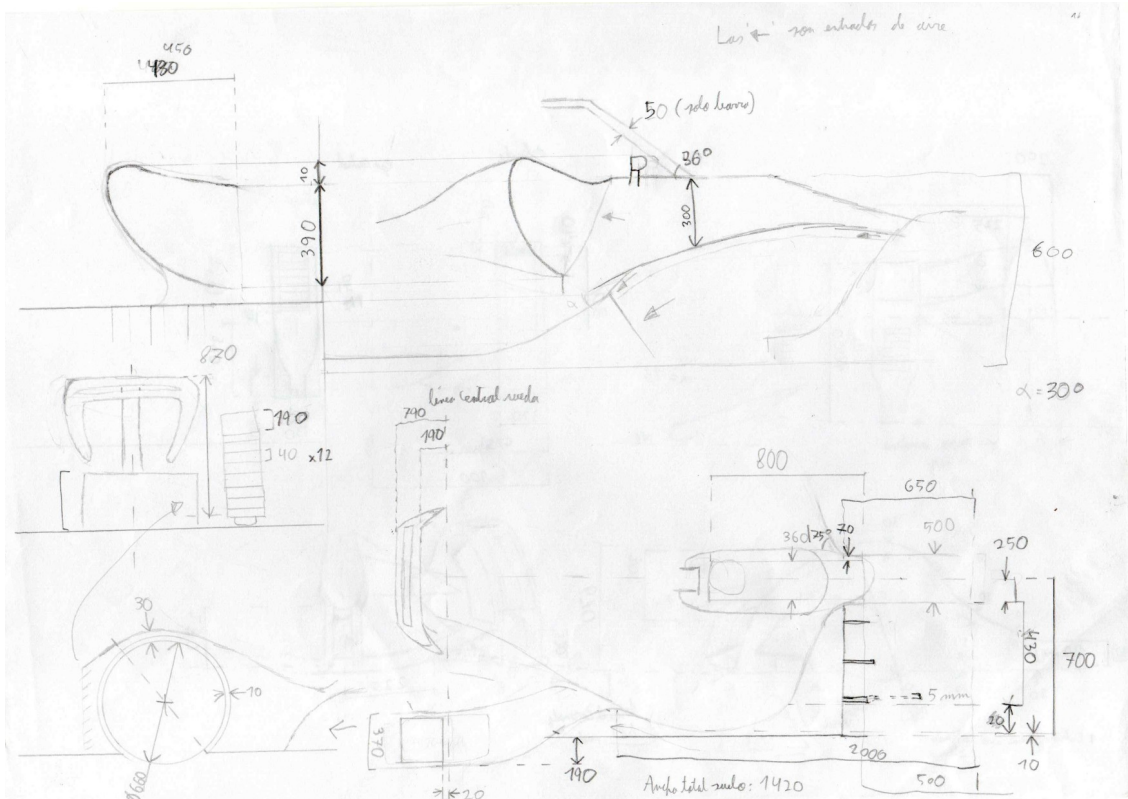
7. WEBGRAFIA I BIBLIOGRAFIA

- Katz, Joseph (1995). *Race Car Aerodynamics: Designing for Speed*. Boston: Bentley Publishers.
- Newey, Adrian (2018). *How to Build a Car*. Londres: HarperCollins Publishers Ltd.
- Fernández Osma, Mario. El túnel de viento en la Fórmula 1 [en línia]. Madrid: Aerodinàmica F1, 14 de novembre de 2019 [Consultat: 20 de maig de 2021]. Disponible a:
<<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/el-tunel-de-viento-en-la-formula-1/>>
- Plaza, David. Downforce y drag: qué son y cómo se combinan [en línia]. Madrid: motor.es, 27 de diciembre de 2019 [Consultat: 4 de juliol de 2021]. Disponible a:
<<https://www.motor.es/formula-1/downforce-drag-que-es-201963589.html>>
- Pendás, Álvaro. Carga aerodinàmica, cómo se cuantifica y cuál es su importancia [en línia]. Madrid: motor.es, 29 de Abril de 2020 [Consultat: 7 de juliol de 2021]. Disponible a:
<<https://www.motor.es/noticias/carga-aerodinamica-202066977.html>>
- Fernández Osma, Mario. Flujo laminar y turbulento [en línia]. Madrid: Aerodinàmica F1, 7 de octubre de 2019 [Consultat: 12 de setembre de 2021]. Disponible a:
<<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>>
- Plaza, David. Aerodinàmica: capa límite, flujo laminar y turbulento [en línia]. Madrid: motor.es, 2 de gener de 2020 [Consultat: 12 de setembre de 2021]. Disponible a:

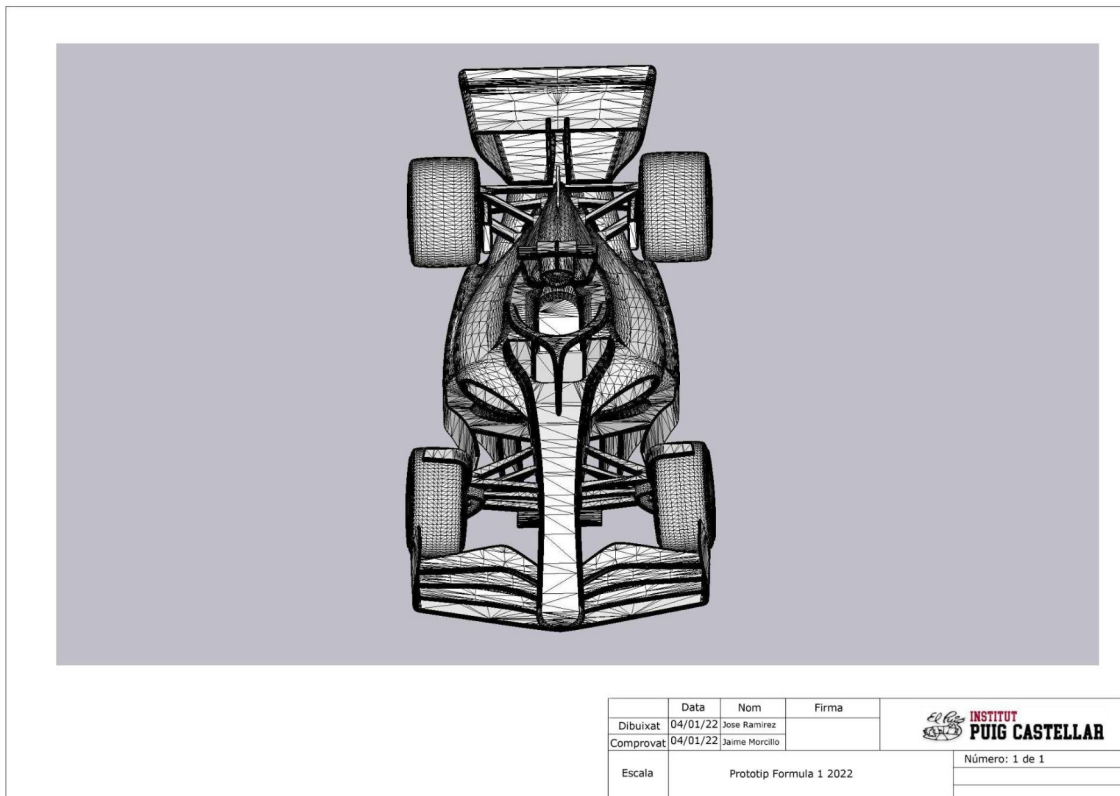


<<https://www.motor.es/formula-1/aerodinamica-capa-limite-flujo-laminar-turbulento-202063700.html>>

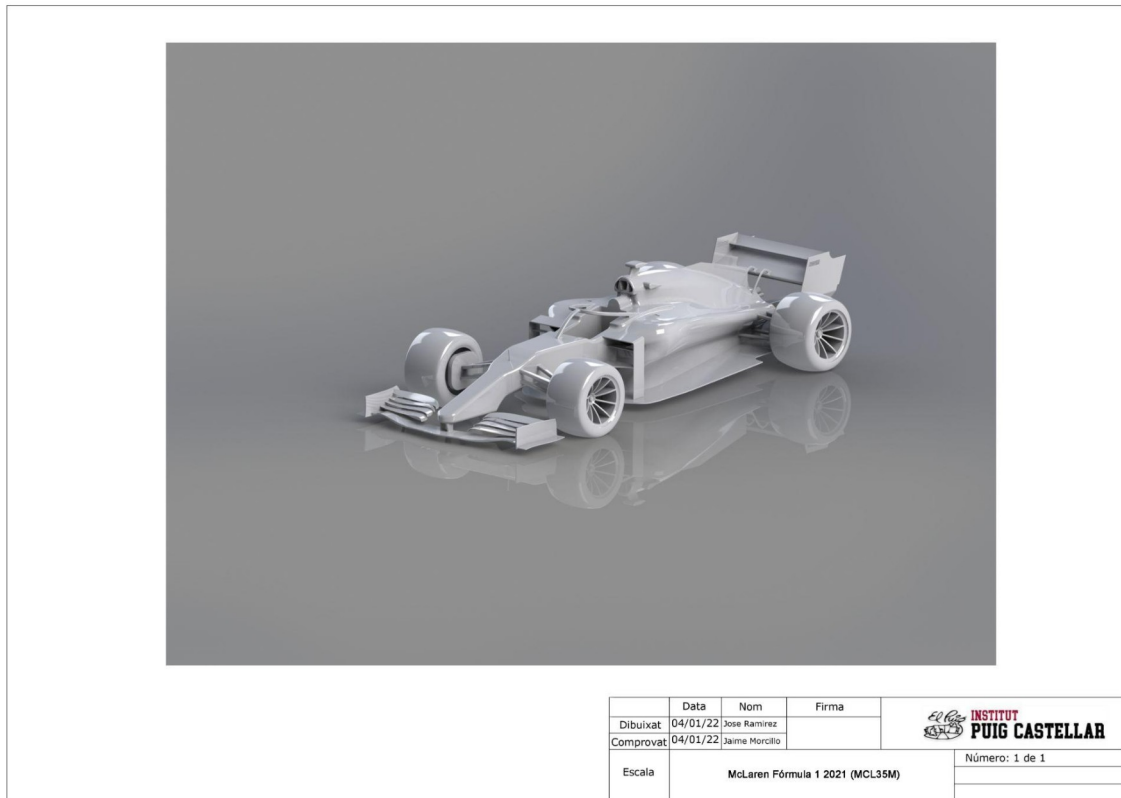
- Oriol. El Efecto Venturi en la Fórmula 1 [en línia]. Madrid: RacingAtmosphere, 10 d'agost de 2018 [Consultat: 10 octubre de 2021]. Disponible a: <<https://www.racingatmosphere.com/aerodinamica/efecto-venturi/>>
- Rodríguez, Roberto. Así funcionan las cuatro partes que componen la aerodinámica de un coche de Fórmula 1 [en línia]. Madrid: motorpasión, 16 d'agost de 2019 [Consultat: 17 de novembre de 2021]. Disponible a: <<https://www.motorpasion.com/formula1/asi-funcionan-cuatro-partes-que-componen-aerodinamica-coche-formula-1>>
- Sebastià Cañadas, Mario. Normativa F1 2022 [en línia]. Madrid:Aerodinàmica F1, 22 de juliol de 2021 [Consultat: 4 de gener de 2022]. Disponible a: <<https://www.aerodinamicaf1.com/2021/07/normativa-f1-2022/>>



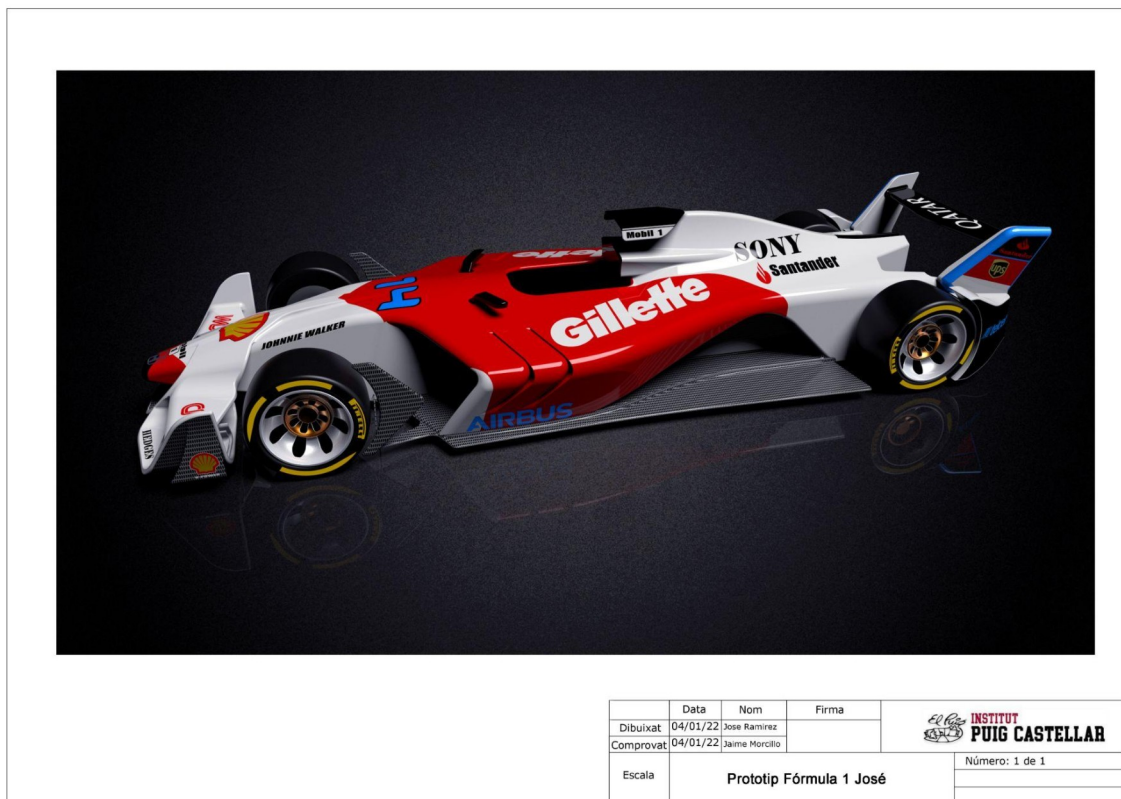
Imatge 2. Annex: croquis primer prototip. Imatge pròpia.



Imatge 3. Annex: prototip FIA, Fórmula 1 2022. Imatge pròpia.



Imatge 4. Annex: McLaren MCL35M 2021. Imatge pròpia.



Imatge 5. Annex: prototip de Fórmula 1 de José Ramírez. Imatge pròpia

