

Treball de Fi de Grau
Grau en Enginyeria de l'Automoció
Curs 2020-21

Estudi aerodinàmic sobre l'evolució d'un aleró davanter de Fórmula 1 entre les temporades 2018 i 2019

MEMÒRIA

Autor: Albert Saiz i Casals

Director/s: Jordi Vives Costa

Convocatòria: Juny 2021



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa



Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Manresa



Abstract

The objective of this project is to study, from an aerodynamic point of view, two Formula 1 front wings. One of the 2018 season, and the other, its successor, the one of the 2019 season.

First of all, the fundamental concepts of aerodynamics are explained: the boundary layer, Reynolds number, viscosity, etc. Later, the most important aerodynamic concepts focused on a Formula 1 single-seater are explained. It is also shown why a front wing is so important in this type of vehicles.

Then, several simulations are made with one and another wing applying different cases, from the simplest case to a more complex case, that is to say, it starts with just the wing, and ends up incorporating the front wheel in motion.

Finally, the results obtained in the cases studied are analyzed in order to draw conclusions regarding the evolution of their performance, such as downforce and drag, as well as comparative analysis of the development of phenomena associated with turbulence, such as the creation of vortex and the generation of rough air zones.

Índex

1. Glossari.....	4
2. Preàmbul.....	6
2.1. Motivació i origen del projecte	6
3. Introducció a l'aerodinàmica	7
3.1. Introducció a l'aerodinàmica al món de la competició.....	7
3.2. Forces aerodinàmiques i terminologia.....	14
3.3. La influència de l'aerodinàmica sobre la dinàmica vehicular	22
4. Anàlisi de l'aleró davanter d'un Fórmula 1	26
4.1. Funcions principals i parts principals d'un aleró davanter	26
4.2. Comparació entre aleró davanter de 2018 i 2019	29
5. Estudi fluidodinàmic dels alerons	30
5.1. Disseny i geometria dels alerons	31
5.2. Mallat dels alerons i roda.....	34
5.3. Procés de simulació de les diferents geometries i condicions de contorn	39
5.4. Post-processat i presentació i anàlisi dels resultats.....	43
5.4.1. Aleró davanter de la temporada 2018.....	43
5.4.2. Aleró davanter de la temporada 2018 amb roda.....	46
5.4.3. Aleró davanter de la temporada 2019.....	49
5.4.4. Aleró davanter de la temporada 2019 amb roda.....	51
6. Conclusions	54
7. Bibliografia.....	56
8. Índex de figures	57
9. Índex de taules	61
10. Índex d'equacions.....	61

1. Glossari

Aerodinàmica: branca de la mecànica de fluid que estudia el comportament de l'aire i altres fluids gasosos i les forces que generen quan aquests interactuen amb altres elements sòlids.

Downforce: força de succió contra el terra que un objecte exposat a un flux d'aire és capaç de crear degut a la seva forma o geometria. El terme oposat és *lift* o força de sustentació.

Efecte terra: efecte provocat per la proximitat d'un cos exposat a un flux d'aire i el terra, degut a la reducció de la secció entre l'objecte i el terra, l'aire s'accelera i genera al seu pas una zona de baixa pressió, actuant doncs com a ventosa.

Aleró: element complex situat davant i darrere del vehicle conformat per una sèrie de petites ales posades en filera que tenen com a objectiu generar càrrega aerodinàmica i millorar el comportament general del monoplaça.

Capa límit: zona del fluid on la qual, aquest està pertorbat per l'element sòlid amb el qual interactua. Molt important en l'aerodinàmica ja que és aquí on es concentren totes les forces, gradients de velocitat, pressions, etc que interessa estudiar per millorar l'aerodinàmica del cotxe

Viscositat: resistència que presenta un fluid a un esforç tallant per part d'una força exterior o per ell mateix

Número de Reynolds: número adimensional que serveix per caracteritzar l'estat d'un fluid, és a dir, sobretot es fa servir per saber si un fluid com pot ser l'aire es troba en règim laminar o en règim turbulent

Endplates: placa vertical situada als extrems de l'aleró davanter i posterior amb la funció d'evitar que el flux d'aire d'alta pressió i el de baixa pressió s'ajuntin creant doncs un vòrtex.

Vòrtex: pertorbació de l'aire creada de forma controlada i estudiada de manera que desenvolupi una funció determinada.

Coefficient de lift, C_L : número adimensional proporcional a la força aerodinàmica vertical que indica si un objecte genera *downforce* o per el contrari sustentació.

Sobreviratge: moment en el qual, mentre es traça una corba, l'eix davanter sobrepassa la traçada i tendeix a marxar cap el vèrtex de la corba mentre que l'eix posterior derrapa.

Subviratge: moment en el qual, mentre es traça una corba, l'eix davanter tendeix a no girar tot el que voldria, de manera que enlloc de traçar la corba tendeix a seguir recte

Centre de pressions: punt d'un cos sòlid en el qual cal aplicar la resultant de totes les forces exercides pel camp de pressió sobre aquest cos, de manera que la resultant prengui el mateix valor que el conjunt d'efectes de les pressions.

Inwash: efecte en el qual, part del flux d'aire que arriba a l'aleró davanter es desvia cap als laterals exteriors de les rodes davanteres amb l'objectiu d'evitar que l'aire hi impacti directament.

Outwash: efecte en el qual, part del flux d'aire que arriba a l'aleró davanter es desvia cap als laterals interiors de les rodes davanteres amb l'objectiu d'evitar hi impacti directament.

2. Preàmbul

El projecte es basa en l'explicació dels conceptes teòrics més importants sobre l'aerodinàmica en general i també aplicada al món de la competició automobilística i l'estudi comparatiu d'un aleró davanter de Fórmula 1 entre la temporada 2018 i 2019.

2.1. Motivació i origen del projecte

Des del 2009 fins a l'actualitat, els monoplaques de Formula 1 han anat evolucionant i millorant any rere any, això ha fet que cada cop siguin més complexos sobretot pel que fa a l'aerodinàmica i la carrosseria. Això ha provocat algunes conseqüències en quant a l'espectacle, la més important i clara és que als monoplaques actuals els costa molt seguir-se de prop un amb l'altra, cosa que dificulta veure lluites cos a cos i en última instància avançaments. És per això que la FIA i la Fórmula 1 ha aplicat diversos canvis de reglament especialment a nivell aerodinàmic per millorar i solventar aquest problema. Un d'aquests canvis va ser la simplificació dels alerons davanters. Per aquests motius, s'estudiarà dos alerons, un abans i l'altre després del canvi de reglament per veure quins efectes reals es deriven d'aquest canvi i si veure si realment generen menys aire turbulent.

3. Introducció a l'aerodinàmica

3.1. Introducció a l'aerodinàmica al món de la competició

Començarem amb un viatge en el temps, un viatge a un passat una mica llunyà, però també al passat més pròxim. Compararem breument a nivell aerodinàmic uns dels primers cotxes de Fórmula 1, ara fa més de 60 anys, amb un monoplaça actual. Concretament compararem el cotxe que va guanyar per primera vegada el campionat de la Fórmula 1 l'any 1950, l'Alfa Romeo de l'italià Giuseppe Farina amb el monoplaça de l'últim guanyador del campionat, el Mercedes de Lewis Hamilton.



Fig. 3.1 Giuseppe Farina amb el seu Alfa Romeo a la temporada 1950 Font: www.motorpasion.com (2021)



Fig. 3.2 Lewis Hamilton amb el seu Mercedes a la temporada 2020 al Gran Premi de Monza Font: www.eurosport.com (2021)

Tots dos cotxes buscant ser els millors i guanyar el campionat, però com es pot veure són totalment diferents, és un clar exemple del pas del temps. Però com pot ser que siguin tots dos tant diferents si volen aconseguir el mateix?

Bé, la resposta a aquesta pregunta és senzilla però molt complexa a la vegada. El cotxe de Farina és molt senzill a nivell aerodinàmic, en canvi el cotxe de Lewis Hamilton és increïblement complex i altament treballat i estudiat. Això és degut al pas del temps i a descobriments que s'han anat fent, han anat apareixent softwares capaços de simular el flux d'aire al voltant d'un cos, noves evidències científiques, més coneixement, etc. Està clar que als anys 50 no hi havia aquest tipus de programes, i els enginyers tampoc tenien cap tipus de coneixement sobre el *downforce*, l'efecte terra o res similar. Tot i això, sí que es pot apreciar, com en l'Alfa Romeo ja tenien en compte en certa manera la resistència generada per l'aire, és a dir el *drag*. Ja que podem veure formes molt suaus, i sobretot es veu que el final del vehicle s'estreta de forma progressiva.

Per tant, podem dir que les prioritats han canviat respecte fa 60 anys (com és obvi per altra banda, sinó fos així alguna cosa estaria anant malament), si ara es busca que el flux d'aire circuli exactament com ens interessa al voltant del cotxe (resseguint la seva forma o generant una turbulència controlada, etc), abans la prioritat primera era la reducció de la resistència provocada per l'aire.

Bé, resposta la primera pregunta, anem a respondre una altre que ens ajudarà a començar a entendre com funciona aerodinàmicament un aleró d'un Fòrmula 1 o de qualsevol competició automobilística, la qüestió és: per què vola un avió? Doncs bé, aquí un esquema que ajudarà a comprendre-ho:

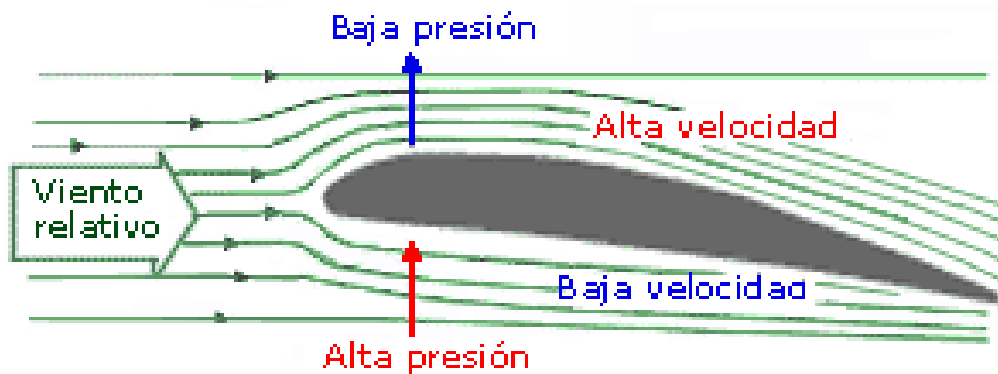


Fig. 3.3 Flux d'aire al voltant d'un perfil alar sustentador Font: www.fuelwasters.com (2021)

Veient aquest esquema, podem extreure un apunt molt important, i és que, com es pot veure perfectament, el perfil no és simètric, és a dir, la part superior té una longitud major que la part inferior. A més a més, l'aire recorre la part superior i la part inferior en el mateix temps, això significa que per força, el flux d'aire de la part superior ha d'anar més ràpid que el flux d'aire de la part inferior, ja que ha de recorre més distància en el mateix temps. Aquesta diferència de velocitats provoca a la vegada una diferència de pressions entre les dues bandes, concretament tal i com es veu en la imatge, en la part inferior la pressió és més alta que la pressió superior, això fa que aparegui una força de sustentació que elevi el perfil alar, o en aquest cas tot l'avió i aquest voli.

Bàsicament, en el món de l'aerodinàmica existeixen tres forces bàsiques, acompanyada cadascuna d'un moment de rotació, però en els moments de rotació hi entrarem més endavant, ara ens centrarem en les forces només. Aquestes són: *lift*, *drag* i la força lateral.

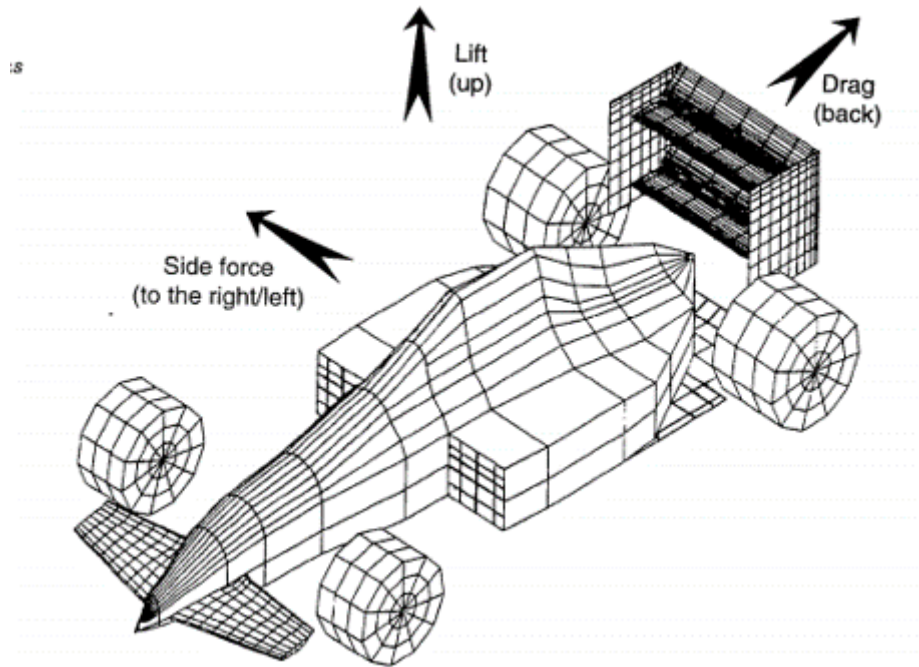


Fig. 3.4 Diagrama de les forces aerodinàmiques en un vehicle Font: *Race Car Aerodynamics* de Joseph Kratz

Destacar aquí com a aclariment, que quan en la fotografia el *lift* està dibuixat cap amunt, per tant seria sustentació (la força que genera una avió). Si volem parlar de *downforce* també podem parlar de *lift* negatiu, és a dir, la força apuntaria contra el terra.

En la Fórmula 1 actual, la generació de *downforce* és la prioritat primordial, a nivell aerodinàmic dins un equip. Ja que en el pas per volta, on es marca la diferència és a les corbes, és allà on es guanya o perd temps, i com més *downforce*, més ràpid es poden traçar les corbes, i per tant en menys temps es completa una volta. El *drag* en aquest cas passa a un pla més secundari, ja que per compensar-lo simplement necessitem augmentar la potència del motor del monoplaça. Un altre aspecte positiu a comentar sobre el *downforce*, és que aquest no genera més inèrcia en les corbes, és a dir, no té una component lateral o radial a l'hora de traçar una corba, només té una component vertical que fa enganxar el cotxe contra el terra, i això és una avantatge molt important.



Fig. 3.5 Lewis Hamilton durant els entrenaments de pretemporada al Circuit de Barcelona-Catalunya
Font: www.motorsportmagazine.com (2021)

Ara ja sabem que és de vital importància generar *downforce* per poder traçar ràpidament les voltes, però com es fa això? Bé, a nivell general hi ha diverses opcions, però bàsicament es tractaria de col·locar estratègicament diferents perfils alars com els dels avions però invertits en el monoplaça, és el que es coneix com a aleró. En el cas de la Fórmula 1 tenim l'aleró davanter o més conegut com a *front wing* en anglès i l'aleró posterior o *rear wing*. De totes formes, no es tracta només d'això, sinó que també és importantíssim que aquests dos elements estiguin ben connectats, és a dir, necessitem que el flux d'aire que impacte en l'aleró davanter generant *downforce*, es desplaci després per tota la carrosseria del monoplaça de la manera més suau i controlada possible fins a l'aleró posterior, és a dir, es tracta de fer treballar al màxim cada peça, cada aleró, cada *flap*, per a que junts conformin la millor aerodinàmica possible.

Pel que fa al *front wing*, aquest és un cas especial, ja que és de vital importància pel comportament aerodinàmic del vehicle, per dos motius:

1. Efecte terra: al estar molt a prop del terra, augmenta la generació de *downforce*, ja que s'estreta la secció entre el perfil alar i el terra, i per tant l'aire s'accelera encara més, generant una diferència de pressions encara més exagerada
2. Primer element: és el primer element del monoplaça que toca l'aire, amb la qual cosa és de vital importància que el *front wing* sigui capaç de repartir com es vol el flux d'aire a la resta del cotxe

Aquest efecte terra es va intentar copiar en tot el fons dels monoplaços durant els anys 70, i efectivament va funcionar, els cotxes generaven una adherència mai abans vista, però tenia un gran problema. I és que quan el monoplaça passava per algun piano o imperfecció en l'asfalt que fes que el cotxe s'aixequés del terra, tot aquest efecte es perdia, i feia que el cotxe fos incontrolable durant uns segons, al final per tant es va prohibir per aquest motiu. Aquí podem veure un exemple de com eren els cotxes dels equips que van provar aquest sistema, aquest és el Lotus 79 Mk.IV vist des d'abaix:

JPS Lotus 79 Mk.IV (Visto desde abajo)

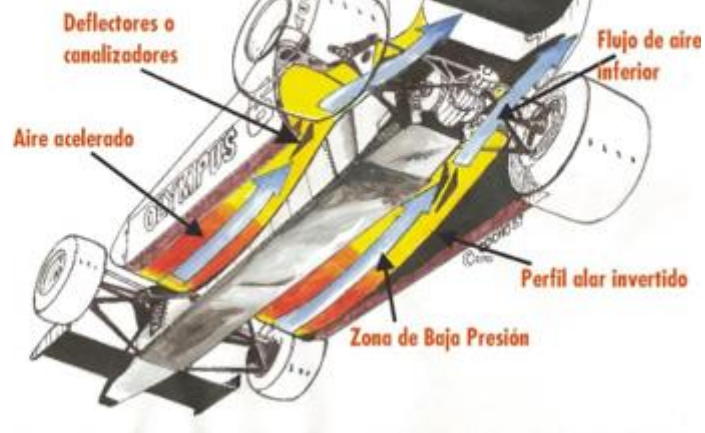


Fig. 3.6 Lotus 79 Mk.IV vist des de sota Font: www.forocoches.com (2021)

A continuació compararem quatre cotxes tipus (a nivell aerodinàmic) de quatre competicions esportives totalment diferents, amb l'objectiu d'aconseguir una visió molt ample i global d'aquest camp al món de la competició automobilística, són les següents:

- Ford Falcon
- NASCAR
- 24h Le Mans
- Fórmula 1



Fig. 3.7 Ford Falcon Font: *Race Car Aerodynamics* de Joseph Kratz

En aquest cas, veiem que es tracta d'un cotxe de carrer adaptat per la competició, factor important, ja que això el limita en certes coses, per exemple, la forma que té de per si fa que el cotxe generi *lift* positiu (sustentació), per tant es busquen elements que redueixin aquest *lift*, com ara un *spoiler* davanter, faldilles laterals i un aleró posterior. A més, al ser originalment un cotxe de carrer, els baixos estan al descobert, fent que el flux inferior sigui d'una qualitat molt baixa.



Fig. 3.8 Ryan Blaney i Erik Jones competint a la NASCAR Font: www.deadline.com (2021)

Pel que fa a la NASCAR, és una competició on són molt important els rebufls, i per tant es busca una alta velocitat punta, per això és una aerodinàmica centrada en reduir el *drag* o resistència aerodinàmica. Es poden destacar alguns elements aerodinàmics com ara: un *spoiler* davanter, faldilles laterals i un *spoiler* lateral.



Fig. 3.9 El Toyota número 7 corrent a les 24h de Le Mans Font: www.motorsport.com (2021)

Aquest sí que es tracta d'un vehicle especialment dissenyat i construït per a la competició (un prototip), per tant té molts més detalls a analitzar que només veurem molt per sobre. En aquest cas, es busca generar *downforce* i reduir el *drag*, totes dues coses, sobretot es busca una bona eficiència aerodinàmica, és a dir la millor relació *downforce/drag* possible. També podem veure que té una carrosseria molt treballada i es busca generar efecte terra amb el fons del vehicle.



Fig. 3.10 Lando Norris al Circuit de Barcelona-Catalunya als test de pretemporada de 2020 Font: www.motorsport.com (2021)

Finalment tenim aquí la categoria reina de l'automobilisme per excel·lència. Ja es veu a simple vista que és el més treballat, podríem fer moltíssims estudis llarguíssims per poder explicar tota l'aerodinàmica d'un sol cotxe de Fórmula 1, però en aquest apartat de moment la veurem molt per sobre, després hi entrarem més a fons. Bé, doncs en aquest cas es busca adaptar el monoplaça al màxim al circuit on corre. És a dir, si estem corrent en el GP de Mònaco, el *drag* on importa gaire, sinó que es busca el màxim *downforce* possible, ja que és un circuit urbà, per tant, lent i molt revirat. En canvi, si ens trobem en el GP de Monza, el *downforce* deixa de cobrar importància, i de cop i volta es torna de vital importància generar el mínim *drag* possible, per això els equips porten alerons molt plans en aquest GP. Podem destacar elements molt diferents i amb funcions molt variades i complexes, com ara: alerons davanter i posterior, fons pla i difusor, *bargeboards*, carrosseria, etc.

Per altra banda, en aquests monoplaços es generen alguns efectes (que més tard veurem) com ara l'efecte Coanda, l'efecte Venturi, diferents classes de vorticitats, efecte Magnus, etc.

3.2. Forces aerodinàmiques i terminologia

Les *streamlines* són les línies associades al moviment del fluid, aquestes poden resseguir l'objecte o bé separar-se d'ell. En aquest segon cas, això podria causar la pèrdua de *downforce* i també l'increment del *drag*. En resum, es perd eficiència aerodinàmica. Aquí podem veure un exemple:

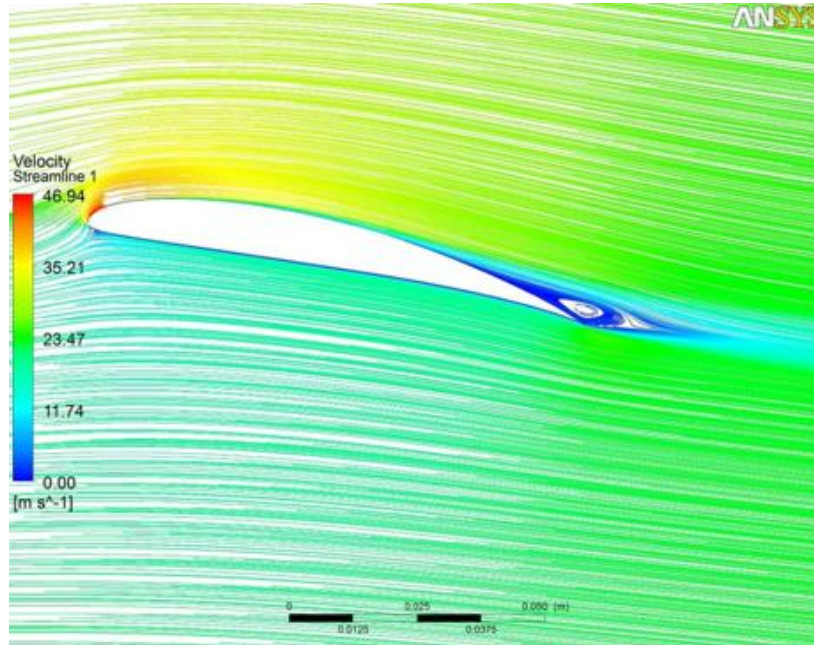


Fig. 3.11 Streamlines al voltant d'un perfil alar sustentador Font: www.researchgate.net (2021)

Això és un fenomen conegut com a salt de la capa límit, però què és aquesta capa límit? Doncs és el que es veu representat en la següent imatge:

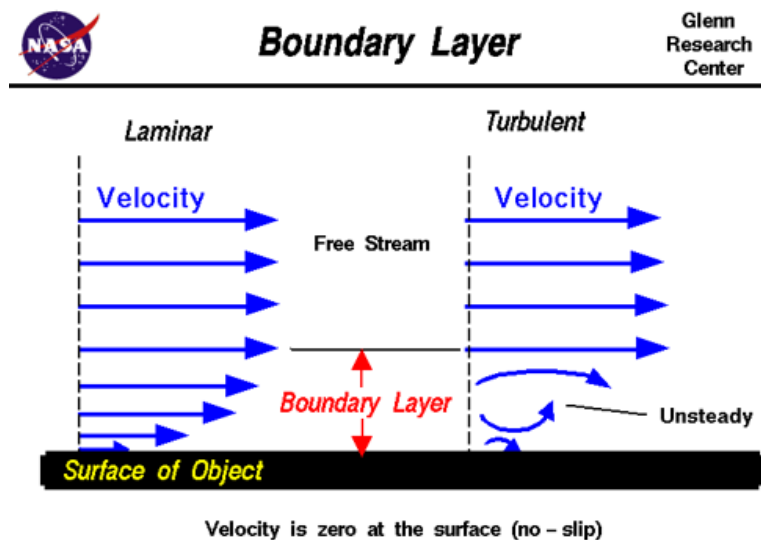


Fig. 3.12 Representació de la capa límit sobre una superfície plana Font: www.grc.nasa.com (2021)

Com es pot veure, quan el flux d'aire és estable (és a dir laminar), aquest es disposa en làmines, representades en l'esquema anterior per les fletxes blaves. Com es pot veure, la làmina més propera a la superfície de l'objecte al voltant del qual circula, té la mateixa velocitat que la de l'objecte. És a dir, la capa d'aire més propera a l'asfalt d'un circuit té una velocitat de 0 km/h, ja que el traçat d'un circuit està totalment quiet. També es pot observar, que gradualment a mesura que l'aire s'allunya de la superfície amb la que està en contacte, la velocitat augmenta fins a ser la mateixa que en l'espai obert. Doncs la zona d'aire compresa entre el 0 i el 99% de velocitat és la capa límit.

En general ens interessa que el flux d'aire sigui estable, és a dir, laminar. Ja que aquest es caracteritza per tenir unes *streamlines* paral·leles i ordenades, i a més és previsible i per tant fàcilment controlable. Per altra costat, tenim el flux turbulent, que és el que apareix quan la capa límit salta, és a dir, se separa de la superfície per on transcorre l'aire. Aquest és caòtic i desordenat i es perden propietats aerodinàmiques. Tot i això, en certs casos que tractarem amb molta profunditat més endavant un flux d'aire turbulent pot arribar a ser molt interessant i beneficiós. Aquí una comparació entre els dos fluxos:

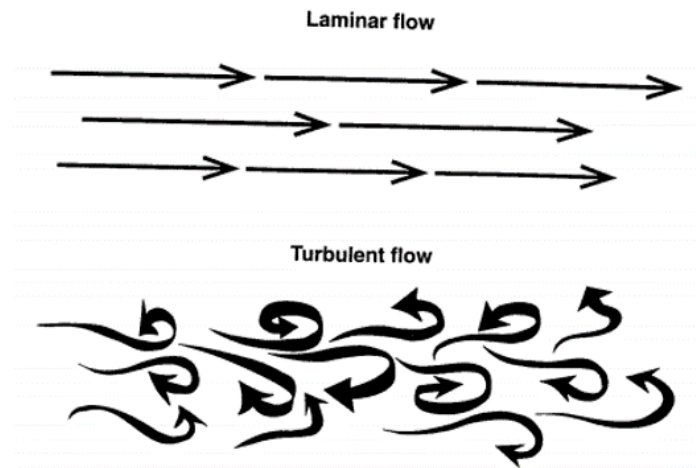


Fig. 3.13 Comparativa entre flux laminar i turbulent Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz

Aquí també entren en joc les propietats del propi fluid, com pot ser: densitat, velocitat, pressió, temperatura, viscositat, etc. Sobretot ens centrarem en la viscositat, ja que és el més interessant i que més influència té en el comportament del flux d'un fluid. La viscositat és bàsicament la resistència d'un fluid al seu propi moviment, i es mesura en cm^2/s o *Poise*. És a dir, podem dir que com més viscos sigui el fluid, més força hauré de fer-li per a que es mogui a la mateixa velocitat, i efectivament, així ho podem comprovar en la següent equació que relaciona força, velocitat i viscositat del fluid:

$$\frac{F}{A} = \mu \frac{V_{\infty}}{h}$$

Equació 3.1 Relació entre força, velocitat i viscositat d'un fluid Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz

Per exemple, està clar que l'aigua i la mel són dos fluids, però tenen comportaments molt diferents, i això és degut a que les seves viscositats són totalment diferents. Amb el següent exemple es pot entendre perfectament:



Fig. 3.14 Diferència de viscositat entre l'aigua i la mel Font: www.cocinadelirante.com (2021)

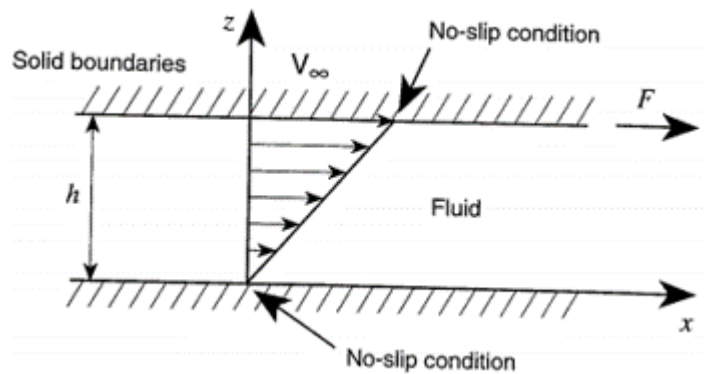


Fig. 3.15 Diagrama de flux d'un fluid entre una paret fixa i l'altre mòbil Font: *Race Car Aerodynamics* de Joseph Kratz (2021)

Suposarem que en la figura 3.15 tenim un fluid entremig de dues plaques planes (i el fluid està en contacte amb ambdues plaques). La placa inferior és fixa i per tant no es mou en cap moment, en canvi la placa superior sí que es pot moure i pot lliscar en sentit horitzontal. En el primer cas, el fluid es tracta d'aigua i volem moure la placa superior a una velocitat de 5 m/s per exemple, per la qual cosa necessitarem una determinada força (segurament relativament baixa ja que es tracta d'aigua).

En canvi, ara suposarem que el fluid ja no és aigua sinó que és mel, i fem la mateixa operació, movem la placa superior a 5 m/s, ara per això podrem notar que la força que cal fer és major i ens costarà una mica més ja que es tracta de mel i no aigua. Doncs això és la viscositat.

Vist això, tornem als fluxos turbulents i laminars, ara la pregunta que sorgeix és: es pot calcular si un flux és turbulent o laminar? La resposta és que sí. Es pot saber gràcies al número de Reynolds, es tracta d'un número adimensional i que si és menor a $5 \cdot 10^5$ es tracta d'un flux laminar, i si és major al número previ es tracta d'un flux turbulent, aquí hi ha la seva fórmula per a que es vegi més clar:

$$Re = \frac{\rho V L}{\mu}$$

Equació 3.2 Definició del nombre de Reynolds

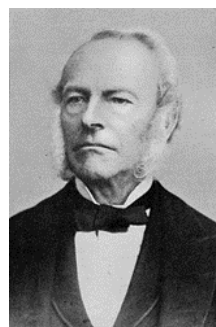


Fig. 3.16 George Gabriel Stokes Font: www.wikipedia.org (2021)

De fet, si tinguéssim una xapa plana que la veiem de perfil i li injectem aire en el seu eix longitudinal, podríem calcular el número de Reynolds a cada punt que volguéssim de la xapa, i veuríem que la capa límit al principi és molt fina i tenim un flux laminar però progressivament es va fent més gruixuda fins que esdevé un flux turbulent i caòtic, i de fet com més gruixuda és la capa límit més forces viscoses té i per tant amb més fàcil es desenganxarà. Aquí ho podem veure en el següent esquema:

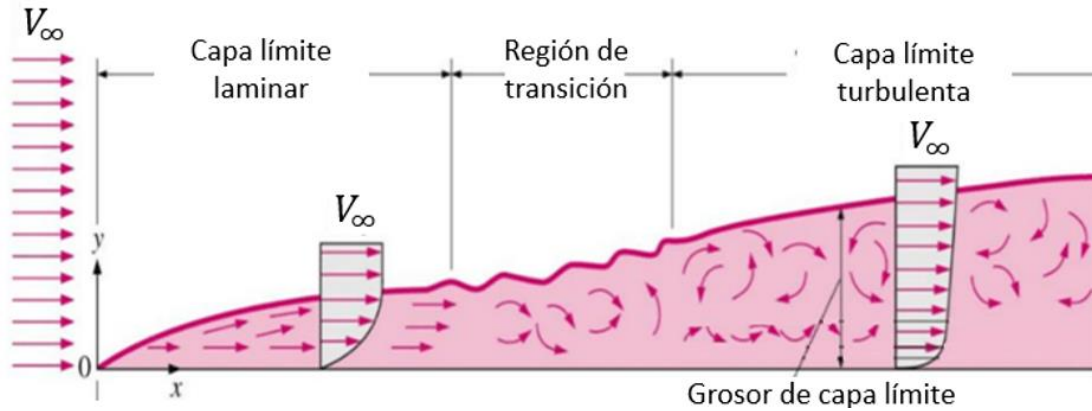


Fig. 3.17 Desenvolupament de la capa límit sobre una xapa plana Font: www.thermal-engineering.org (2021)

Ara fem el mateix supòsit, però enlloc d'injectar aire a una xapa plana ho fem a un cotxe (molt simple) que es troba sobre el terra, com el de la següent imatge:

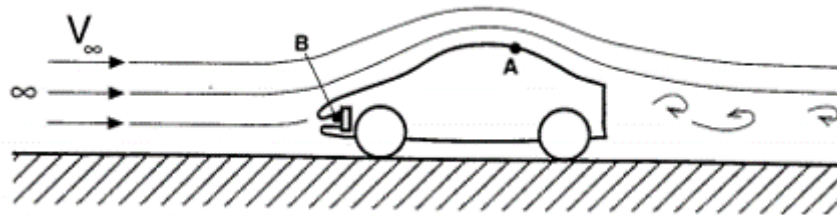


Fig. 3.18 Representació del flux d'aire al voltant d'un cotxe de carrer Font: *Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz*

En aquest cas es creen dues forces molt importants: la força de tall i la pressió. La primera és tangent a la superfície per on l'aire es desplaça i genera sobretot *drag*. La segona és perpendicular a la superfície i crea *lift* o *downforce* i també *drag*, per això diem que és impossible crear només *downforce*. En fi, les equacions de *Bernoulli* són les que expliquen aquestes forces que apareixen i les que dicten que quan incrementa la pressió, la velocitat per força ha de disminuir i a l'inrevés.

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

Equació 3.3 Equació de Bernoulli que defineix la relació entre la velocitat i la pressió d'un fluid Font: *Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz*

A partir d'aquestes equacions i d'aquests conceptes bàsics es poden explicar infinitat d'altres fenòmens aerodinàmics, però nosaltres ens centrarem només en els 3 més importants: l'efecte Venturi, Coanda i Magnus.

Efecte Venturi

L'efecte Venturi juga amb les seccions transversals per canviar la velocitat de l'aire i per tant generar una depressió. Es tracta d'unir per les seves parts més estretes una tubera i un difusor, on normalment la tubera sol canviar de secció més ràpidament que el difusor, que ho fa d'una forma més progressiva per evitar que salti la capa límit abans d'hora. D'aquesta manera l'aire entra per la tubera i com que es va estretint, la velocitat del flux augmenta, disminuint així la pressió fins a arribar a un punt on hi ha la màxima velocitat i la mínima pressió, aquest punt sempre es troba just a l'inici del difusor. Aquí un esquema per a que s'entengui millor:

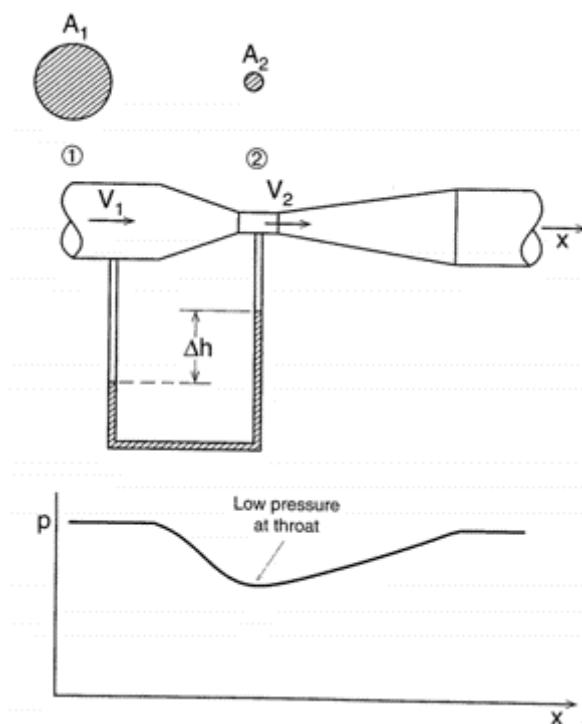


Fig. 3.19 Representació de l'efecte Venturi Font: *Race Car Aerodynamics* de Joseph Kratz

De fet, aquest és l'efecte que pretén generar un fons pla junt amb el difusor d'un cotxe de Fórmula 1, gràcies a aquest efecte en aquesta zona del vehicle es genera un succió molt forta, que pot arribar a significar el 40% del *downforce* de tot el vehicle, per tant no és cap tonteria.

Efecte Coanda

Aquest és un efecte molt important també i molt utilitzat en el món de la competició. Aquest ens diu que si a una superfície corba li llancem un fluid (ja sigui líquid o gasós) s'adherirà al seu contorn gràcies a les forces de viscositat que hem comentat anteriorment. Si utilitzem aigua, aquest efecte és més exagerat, i és capaç de resseguir superfícies més agressives que no pas l'aire, per això en un monoplaça de Fórmula 1 les formes de la seva carrosseria fa canvis molt suaus i molt poc pronunciats, ja que l'aire al

tenir una viscositat tant i tant baixa, es podria desenganxar fàcilment i perdre eficàcia aerodinàmica. Aquest efecte es pot comprovar de forma casolana si agafem una cullera i la posem en vertical just sota una aixeta i obrim el pas d'aigua, el raig seguirà el tot el contorn de la cullera, aquí podem veure una representació gràfica d'això:

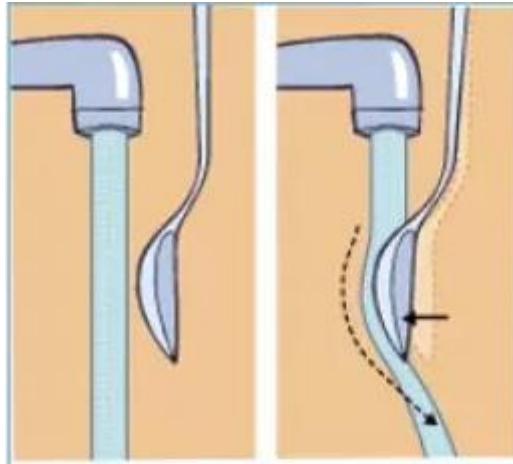


Fig. 3.20 Experiment sobre l'efecte Coanda Font: www.mallacoanda.com (2021)

Bé, al principi d'aquest apartat hem comentat que quan la capa límit se separa de la superfície del sòlid (és a dir, es deixa de produir l'efecte *Coanda*) es generen unes turbulències que no interessen i fan perdre càrrega aerodinàmica i inclòs poden fer guanyar també resistència, però hi ha a vegades que podem utilitzar aquest fenomen al nostre favor, és el cas dels vòrtex.

Es tracta d'una turbulències controlades que són molt difícils d'aconseguir perfectament, però si s'aconsegueix l'efecte positiu és molt bo. Posarem el cas d'un aleró de Fórmula 1 per explicar-ho. Quan en qualsevol perfil alar li arriba aire, es crea una diferència de pressions (i per tant també de velocitats) entre la part superior i inferior d'aquest. En el cas d'un monoplaça de Fórmula 1, a la part superior hi tindrem una pressió molt superior que a la part inferior, és per això que a les bandes més externes de l'aleró davanter hi trobem unes tapes laterals anomenades *endplates*, la funció dels quals és evitar que aquests dos fluxos de diferent pressió es barregin, ja que això crearia una turbulències molt grans i l'aleró perdria tot el sentit que té.

En canvi, a les part més properes al morro no hi trobem cap *endplate*, això és així expressament, ja que és aquí on es generen els vòrtex o turbulències controlades. L'aire d'alta pressió es barreja amb l'aire de baixa pressió, això crea uns vòrtexs controlats, que en aquest cas concret de fet tenen nom, s'anomena vòrtex Y250. Aquí un exemple gràfic per entendre-ho millor:

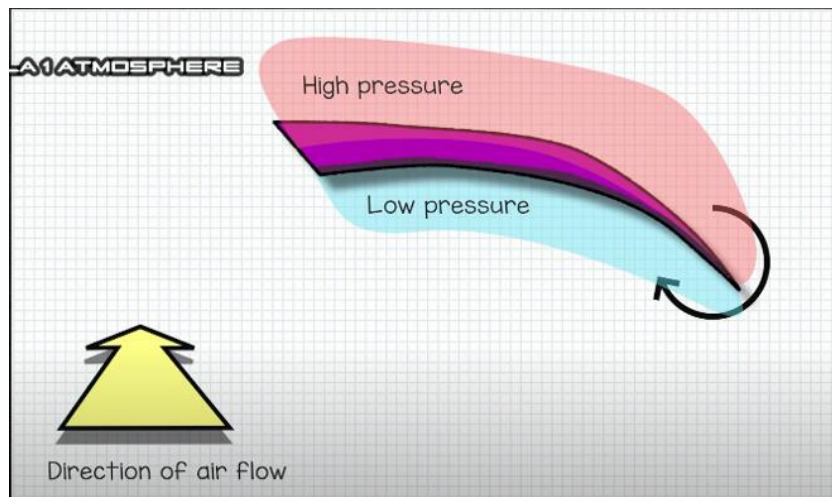


Fig. 3.21 Representació de la creació d'un vortex Font: www.youtube.com (2021)

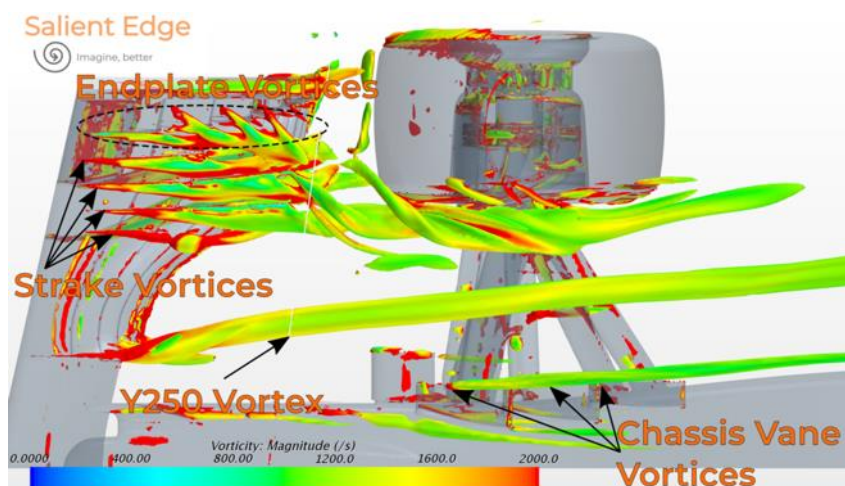


Fig. 3.22 Simulació del flux d'aire a un aleró davanter d'un monoplaça de F1 Font: www.tianyizf1.wordpress.com (2021)

El vòrtex Y250, com hem comentat es genera a la part interior d'un aleró davanter i es dirigeix als laterals del vehicle passant entre la roda i la carrosseria. La seva funció principal, és la de fer de barrera entre l'aire exterior i el flux d'aire que circula per sota el vehicle, d'aquesta manera l'efecte del fons pla, és a dir, l'efecte Venturi s'accentua. I per tant, en última instància fa que el cotxe guanyi *downforce* i sigui més estable en qualsevol circumstància.

El següent efecte és el de Magnus, aquest efecte explica bàsicament com un sòlid circular que gira sobre si mateix afecta a la trajectòria de l'aire al seu voltant. Suposem doncs que tenim un cilindre, i li llancem una corrent d'aire que quan arriba a ell es separa per evitar-lo i degut a l'efecte coanda durant una mica s'enganxa a ell però al final s'acab separant i segueix el seu recorregut. Ara suposem que fem girar aquest cilindre sobre si mateix, a una banda d'aquest, l'aire circularà en el mateix sentit que el cilindre i per tant augmentarà la seva velocitat, en canvi per l'altra costat el cilindre es mourà a contra corrent, per tant l'aire tendirà a frenar-se. Per tant, tenim aquí una diferència de velocitats, per tant a la vegada també tenim una diferència de pressions a banda i banda, cosa que es tradueix en una força de lift (positiu o negatiu) cap al costat

on l'aire circula més ràpidament, ja que l'altra banda l'estarà empentant degut a la seva pressió més elevada. És a dir, podríem dir que estem recreant en part l'efecte d'un perfil alar amb un cilindre que gira sobre si mateix.

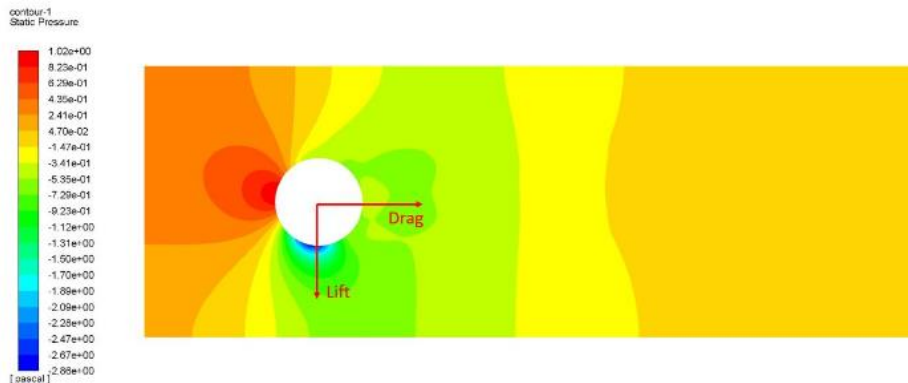


Fig. 3.23 Efecte Magnus generat per un cilindre girant sobre ell mateix Font: www.aerodinamicafl.com (2021)

Per últim en aquest apartat, parlarem de l'efecte que provoca la roda sobre la resta del monoplaça. Aquí es s'hi troben varis efectes tots relacionats d'una forma o altre amb els anteriorment explicats.

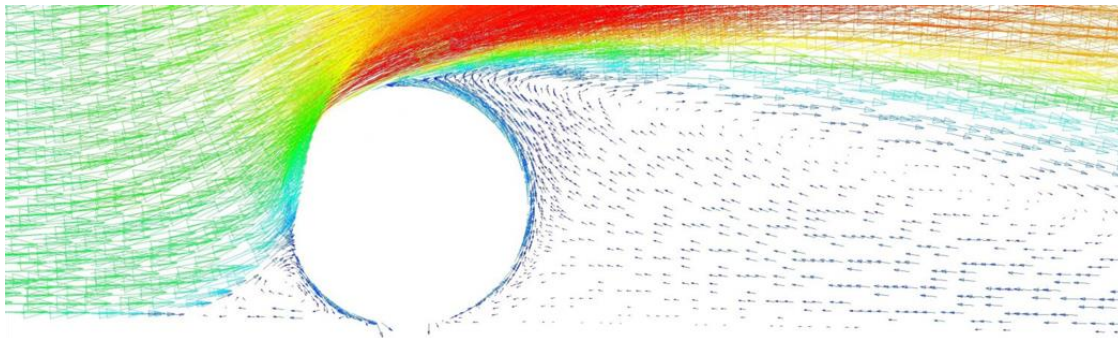


Fig. 3.24 Efecte Magnus generat per un cilindre girant sobre ell mateix Font: www.aerodinamicafl.com (2021)

En aquesta imatge veiem que un dels primers efectes que crea és una estela d'aire al seu darrere, cosa normal, qualsevol objecte que es mou travessant un flux d'aire deixa una estela al seu pas. En aquest cas es genera degut a que com podem observar en la part superior de la roda, aquesta gira en sentit oposat a la direcció de l'aire, i per tant el fluid es desenganxa ràpidament, per tant no tenim un efecte Coanda gaire pronunciat. A més, també es genera un aro tancat a la part superior de l'estela.

Per altra banda, com que la roda gira (tenint en compte la imatge) en sentit anti-horari, en la seva part davantera inferior, en un primer moment l'aire que hi arriba s'estanca, però com que el pneumàtic està totalment en contacte amb l'asfalt, l'única escapatòria que l'aire hi troba és pels laterals, per tant això és el que s'acaba produint: una bombolla de recirculació. L'aire s'escapa pels laterals formant un parella de vòrtexs (un a cada lateral de la roda) però és un vòrtex suau, i per tant tendeix a desaparèixer quan es troba amb l'estela primera.

Finalment, un altre aspecte que juga el seu paper també, és la llanta, els radis de la qual actuen com les aspes d'un ventilador, atorgant a l'aire una major energia de rotació.

3.3. La influència de l'aerodinàmica sobre la dinàmica vehicular

En aquest apartat s'explica la relació tant important que hi ha entre la dinàmica vehicular i l'aerodinàmica d'un cotxe. Per començar a introduir el tema, començarem fent un petit experiment que anomenarem l'experiment de la goma. Suposem que tenim una goma d'esborrar recolzada a sobre una taula en la posició següent:

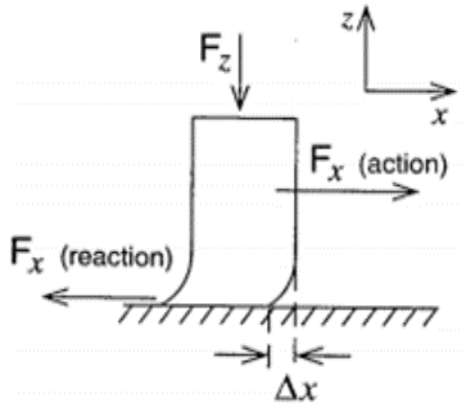


Fig. 3.25 Representació de l'experiment de la goma Font: Race Car Aerodynamcis de Joseph Kratz

Ara, tal i com indica l'esquema, li apliquem una força vertical contra la taula i alhora la desplaçem lateralment. El que ocorre és que la goma es deforma degut al coeficient de fregament amb la taula, és a dir, com que li estem aplicant una força cap a la dreta, degut al fregament, apareix una força en sentit oposat que fa que la part de la goma que està en contacte amb la taula no es desplaci i es deformi la resta, donant com a resultat el que veiem en la figura 28. No obstant, si augmentem la força lateral podem aconseguir superar el fregament i aconseguir que la goma mantingui la deformació però comenci a lliscar per sobre la taula. És a dir, obtindríem uns resultats com els següents:

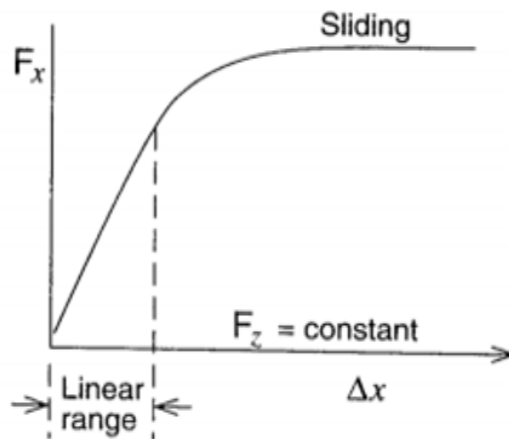


Fig. 3.26 Gràfica de la força de fricció de la goma respecte el seu desplaçament Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz

Veiem que existeix un coeficient de fregament màxim, la goma en aquest cas, comença a lliscar. Aquest és el principi fonamental, ja que en un vehicle el funcionament és més complex, però en definitiva és aquest. Però quins altres coeficients cal tenir en compte? Doncs bàsicament són tres: coeficient de frenada, coeficient d'acceleració i el coeficient de *cornering*.

Abans d'entra en detall en cadascun d'aquests tres fenòmens, cal explicar-ne un altre, que és el *slip*. El *slip*, bàsicament és un coeficient que defineix la relació entre dues velocitats lineals, dues velocitats angulars, dos angles, etc... Per exemple, quan un pilot arriba a una corba, el primer que ha de fer és reduir la seva velocitat, per tant en un moment donat les rodes del cotxe hauran d'anar més lentes del que va la pista, d'aquesta manera si es conserva aquesta diferència, la velocitat del vehicle s'anirà reduint fins a arribar a l'òptima per traçar la corba. Aquest és el cas del *braking slip*, si tenim un 0% de *braking slip* la roda estarà girant sense cap fricció, en canvi si tenim el 100% significarà que la roda està totalment quieta i no pot girar, és el que li pot passar a vegades a un cotxe de competició quan frena massa tard a l'arribar en una corba i al voler girar bloqueja la roda interior.



Fig. 3.27 Alex Albon blocant la roda interior en el moment de la frenada Font: www.motorlat.com (2021)

Per altra banda, també tenim l'*accelerating slip*, el cas contrari a l'anterior, en aquest cas quan és del 0% la roda i l'asfalt tenen la mateixa velocitat per tant ni s'accelera ni es frena, en canvi si és del 100% la roda gira sobre si mateixa però no aconsegueix avançar, és a dir, que patina. Això pot ocórrer per exemple durant la sortida d'un Gran Premi, si acceleres massa ràpid pots patinar i perdre molt temps i inclòs algunes posicions.

I per últim tenim el *cornering slip* que és la diferència d'angle entre la direcció on apunta el cotxe i la direcció on apunten les rodes, és el que es necessita quan un cop has accelerat a la recta i has frenat a l'arribar a una corba i vols traçar-la. Per girar cal donar més angle a les rodes per a que el cotxe comenci a encarar la corba, i si aquesta diferència d'angle es manté el cotxe girarà més fins a tocar el vèrtex de la corba.

Sabent tot això, quin paper hi juga l'aerodinàmica aquí? Bé, doncs hi té algunes coses a dir, per exemple: és molt important el *downforce* en un cotxe és molt important en el moment de la frenada, ja que com més *downforce* més força de frenada i més rendiment se li poden treure els frena, és per això que un pilot de Formula 1 quan frena, ho fa molt

fort en primer instància però va deixar anant al fre progressivament a mesura que s'acosta al vèrtex de la corba i perd velocitat, ja que al perdre velocitat també perd eficiència aerodinàmica. Per altra banda tenim el *drag* que si bé en el moment d'accelerar no és gens bo, en el moment de frenar tot el contrari, com més *drag* més frenarà el cotxe, per tant el pilot podrà frenar més tard i guanyar unes centèsimes.

Però sens dubte, el lloc el moment on la càrrega aerodinàmica és on cobra més importància, és en el moment de traçar les diferents corbes que té un circuit, ja que és allà on perd o guanya més temps en el conjunt de la volta sencera, per tant és aquí on es marca la diferència. Per tant, tenir més *downforce* significa tenir una força vertical major a les rodes i per tant una major velocitat de gir abans de que el cotxe comenci a deslligar. Aquest fenomen es pot copsar de manera molt visual en el següent gràfic:

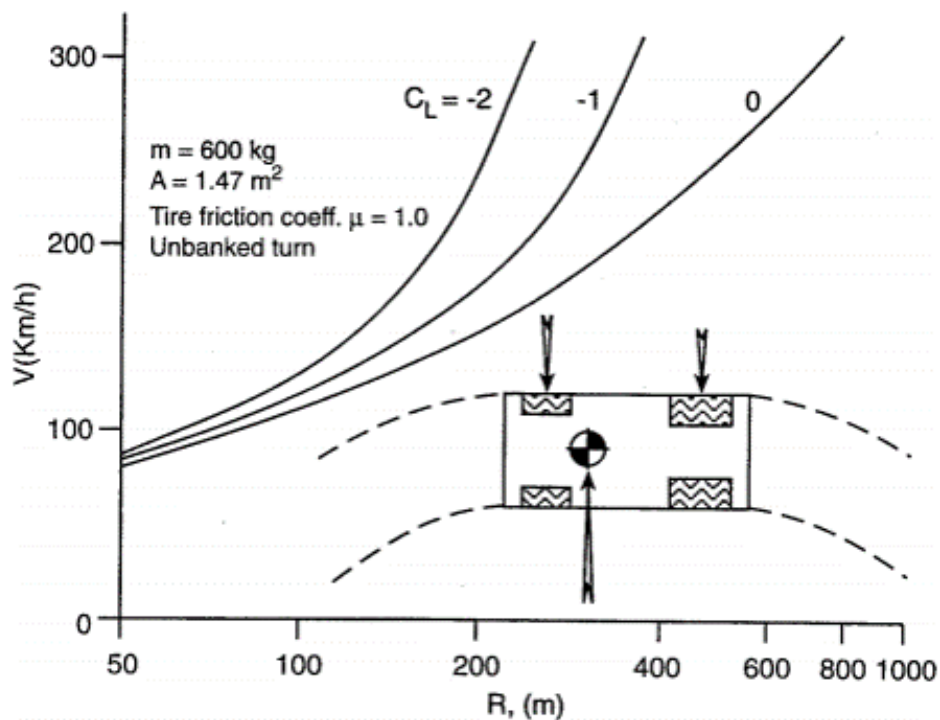


Fig. 3.28 Relació entre el coeficient de lift, la velocitat de gir màxima i el radi de la corba Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz

Aquí podem veure un gràfic on queda relacionada la velocitat de gir màxima, el CL i el radi de la corba. Tal i com s'observa, en corbes de baixa velocitat l'efecte no és gaire pronunciat, però en les corbes de mitjana i alta velocitat, queda molt clar que com més *downforce* més ràpides es podran traçar i per tant menys temps s'invertirà en fer la corba en si. De totes formes, és important buscar un equilibri en el cotxe, ja que si donem un *downforce* major a l'eix davanter podríem patir sobreviratge, en canvi, si donem més càrrega a l'eix posterior podríem patir subviratge, per tant és important trobar un equilibri en tots els sentits.

I no només això, sinó que cal trobar un compromís, ja que sempre que busques generar càrrega aerodinàmica acabes generant també resistència, i hi ha un punt on la resistència en les rectes acaba sobrepasant el benefici que et dona el *downforce* a les corbes. A més a més, no és el mateix el circuit de Mònaco, que és estret i revirat on es busca la

màxima adherència possible sense importar la resistència creada, i en canvi, en el circuit de Monza, el temple de la velocitat per excel·lència, amb rectes llarguíssimes, es busca reduir al màxim la resistència aerodinàmica sense importar gaire el *downforce*.

Dit tot això teòricament, es molt fàcil, però hi ha fenòmens externs com per exemple el vent que pot arribar a dificultar i canviar molt les coses. El vent genera una força lateral (o amb una certa inclinació) que sempre s'ha de tenir en compte, ja que sinó pots veure la teva resistència aerodinàmica incrementada, pot arribar a ser un maldecap tant pels enginyers com pel pilot.



Fig. 3.29 Efecte del vent paral·lel i inclinat en un ciclista Font:www.enterpriseai.news (2021)

Per últim, en aquest apartat cal explicar què el centre de pressions, doncs bé, es tracta del punt sobre el qual cal aplicar la resultant de totes les forces exercides per les pressions del vehicle (*downforce*, *drag*, etc) per a què la resultant sigui igual a la suma de l'efecte de totes les pressions. En general en el cotxes de carrer el CP (centre de pressions) es troba més avançat que el CG (centre de gravetat), això fa que el vehicle sigui inestable (sobretot a altes velocitats, un cotxe de carrer a velocitat de carrer és estable i segur). En canvi, en un cotxe de competició és primordial i essencial que el CG es trobi per davant del CP. Aquí es podrà veure l'explicat amb més claredat:

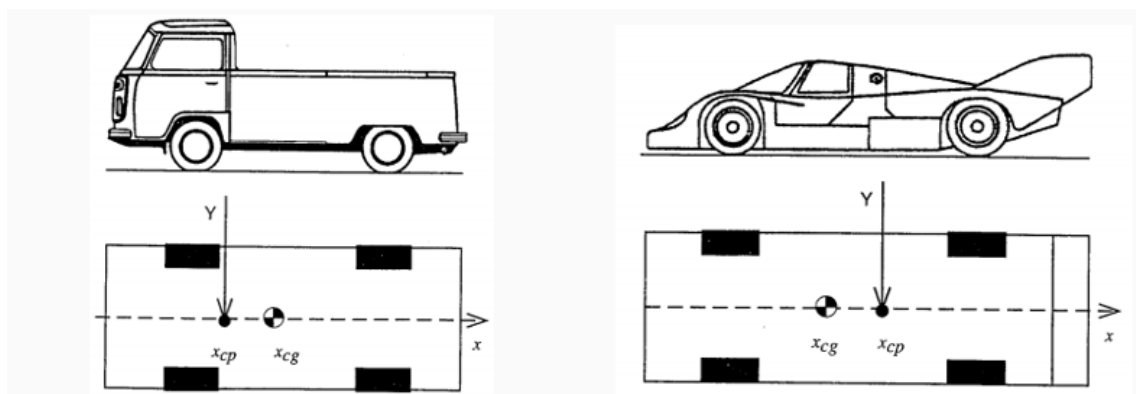


Fig. 3.30 Comparació de cg i cp entre un vehicle de carrer i un cotxe de competició Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz (2021)

4. Anàlisi de l'aleró davanter d'un Fórmula 1

4.1. Funcions principals i parts principals d'un aleró davanter

Si ens posem a analitzar els diferents components aerodinàmics que té un cotxe de Fórmula 1, el més important és l'aleró davanter. Ja que és el primer element amb el qual l'aire hi entra en contacte, per tant, un aleró davanter té dues funcions principals, la primera i més òbvia és la de generar càrrega aerodinàmica al tren davanter, però la segona i quasi més important és la de dirigir el flux d'aire cap a on interressi i de la forma que interressi també. Un exemple molt clar d'aquesta segona funció, és que l'aleró davanter sempre intenta evitar que l'aire impacti de manera directa contra els pneumàtics, ja que és l'element que més *drag* genera de tot el conjunt. Per desenvolupar aquestes tasques l'aleró davanter està conformat per diverses peces que a continuació passarem a descriure:

Pla principal

Aquesta és la part més gran de l'aleró, i de fet és la que i va fixada al morro del vehicle. Sempre s'intenta que quedi especialment a prop de l'asfalt, ja que d'aquesta forma l'aire s'accelera més ja que es crea una gran zona de baixa pressió sota seu. Sobre el pla principal van muntades les altres parts de l'aleró com serien els *flaps* o els *endplates*, per tant és important que sigui una peça forta a nivell estructural però que a l'hora permeti certa flexibilitat.

Flaps

Així com el pla principal és una peça totalment fixa, els *flaps* que van muntats a sobre seu no ho són, és a dir, són ajustables. Els equips ajusten els angles d'inclinació de cada flap per aconseguir més o menys càrrega al davant o aconseguir llançar l'aire en una altra direcció més o menys pronunciada. A part de generar càrrega aerodinàmica com és obvi, la seva funció més destacada és la de desviar el flux d'aire de les rodes, per això tenen aquesta forma de rampa.



Fig. 4.1 Aleró davanter del Ferrari de 2019 Font: www.formula1.com (2021)

No obstant, això no és tot el que els flaps d'un aleró aporten, sinó que tenen una tercera funció molt important i moltes vegades desconeguda per l'ull inexpert. Fa molt temps era permès incorporar unes faldilles als laterals del fons pla del monoplaça, la seva funció era la de sellar l'aire que passava pel fons pla i optimitzar el seu efecte, malauradament es va prohibir al cap de no gaire, ja que si el vehicle botava i s'aixecava degut a algun sot o a algun piano es perdia aquest efecte, i per tant el cotxe es tornava incontrolable. Per tant els enginyers dels equips van a ver de trobar una altre forma de crear aquest efecte sense a ver de posar les faldilles. I es van adonar que l'aleró davanter és capaç de crear un vòrtex que supleix perfectament les faldilles laterals. És un vòrtex anomenat Y250 que es genera just a la part interior de l'aleró just on acaben els flaps, allà no hi ha *endplates* per tant els dos tipus de flux d'aire (el d'alta pressió i el de baixa pressió) es barregen i això sumat a la velocitat que porta el vehicle forma un vòrtex controlat que es desplaça per tot el lateral del monoplaça fent de barrera entre l'aire exterior i l'aire de sota el fons pla.

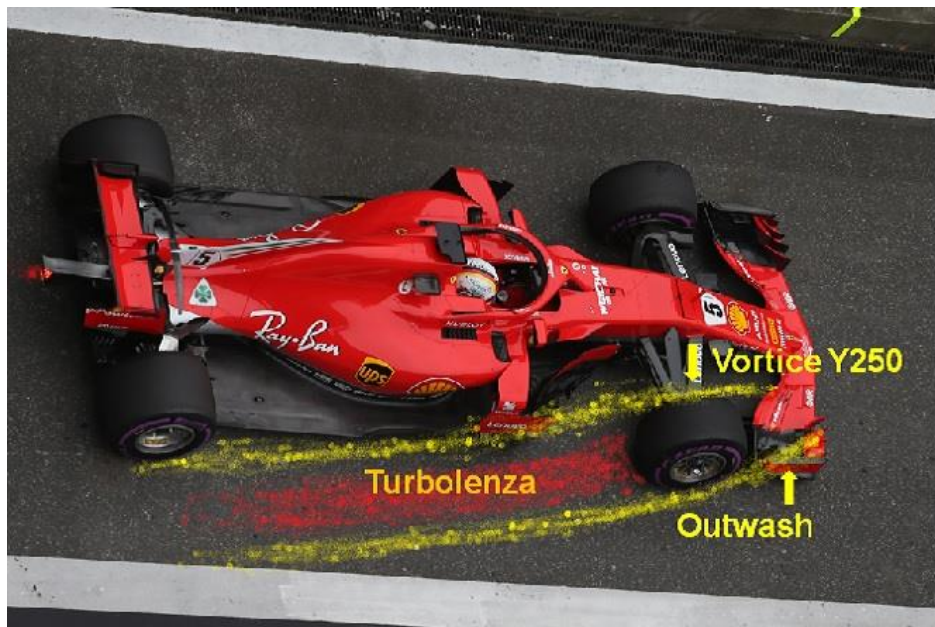


Fig. 4.2 Vortexs creats per un aleró del Ferrari de 2018 Font: www.twitter.com (2021)

Endplates

Per altra banda els *endplates* són les tapes verticals muntades als extrems de l'aleró. Sembles poc importants, però la seva funció és primordial. La seva tasca principal és la d'evitar que el flux de baixa pressió i el d'alta pressió es barregin, ja que això provocaria turbulències. Per altra banda ajuda a desviar l'aire de la roda, ja que normalment l'equip els fabriquen de forma corbada cap a l'exterior, precisament per ajudar a aquest efecte.

Footplate

Aquest és un element que es troba muntat en tota la longitud de la part inferior de l'*endplate*, i genera un vòrtex (turbulència controlada) que ajuda a l'*endplate* a complir la seva funció d'evitar que l'aire impacti en la roda.

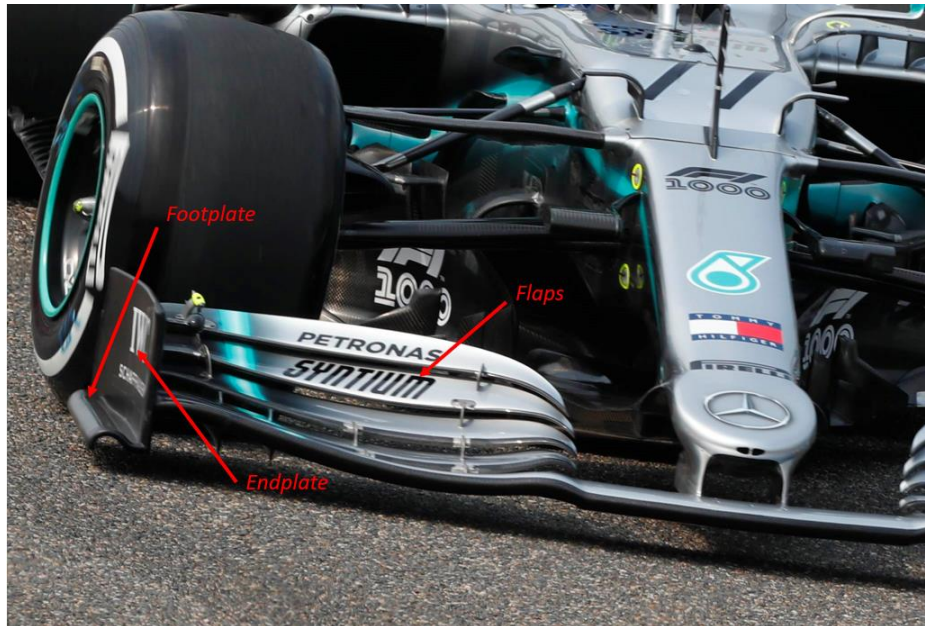


Fig. 4.3 Parts d'un aleró davanter de Formula 1 Font: www.formula1.com (2021)

Turning vane

Finalment tenim els anomenats *turning vanes* que des de 2019 que es van prohibir, de fet, és un dels factors que es vol analitzar amb aquest treball: veure quins canvis del comportament de l'aire hi ha hagut degut a la prohibició d'aquest element. Es tracta d'un generador de vòrtex que creava moltes turbulències. I segons la FIA es va eliminar ja que (junt amb el conjunt de tot el cotxe) col·laborava a generar molt aire brut i per tant feia molt difícil que els cotxes se seguissin de prop en zones amb corbes.

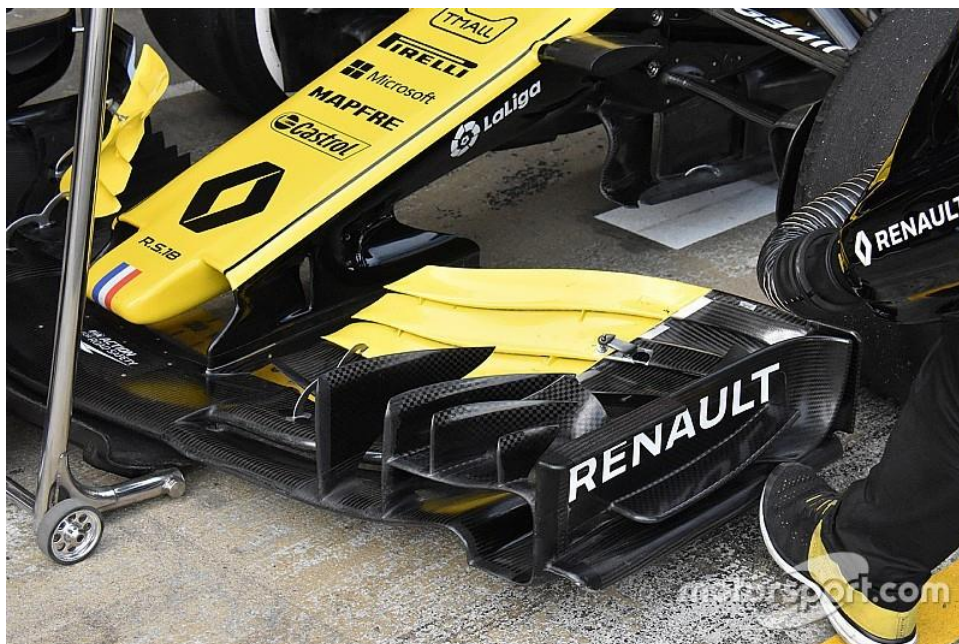


Fig. 4.4 Turning vanes de l'aleró davanter Font: www.motorsport.com (2021)

4.2. Comparació entre aleró davanter de 2018 i 2019

Entre la temporada 2018 i 2019 hi van haver diferents canvis del reglament tècnic que van afectar sobretot a l'aerodinàmica dels cotxes, sobretot als alerons, el de darrere es va fer més alt i gran per maximitzar l'efecte del DRS i el de davant es va fer més gran i simple reduir l'aire brut que generava. Així doncs, aquí una comparativa entre els dos anys:

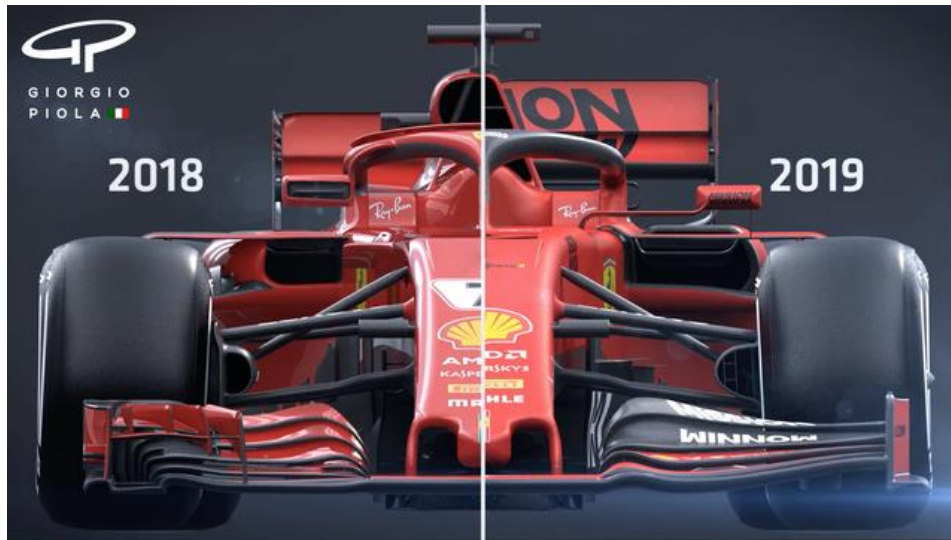


Fig. 4.5 Comparació entre el Ferrari de 2018 i el de 2019 Font: www.formula1.com (2021)

Fins l'any 2018 degut a aquests alerons tant complexos (entre d'altres coses) es generava una gran quantitat d'aire brut, que arribava al cotxe perseguidor, que a la vegada portava un aleró complex i com li arribava aire brut no el podia fer funcionar correctament i perdia càrrega aerodinàmica d'una manera notable al tren davanter del vehicle. Això a la pràctica es tradueix en que el cotxe immediatament perseguidor havia de prendre les corbes molt més lentament que el cotxe líder i per tant quan arribaven a la recta costava molt avançar ja que la distància entre ells era molt gran. Aquest és el motiu principal pel qual es va implementar aquest canvi tant substancial en el sí de l'aerodinàmica d'un Formula 1 actual.

Per reduir aquesta pèrdua de càrrega que patia el cotxe perseguidor es van fer els següents canvis: eliminació dels *turning vanes*, augment de l'amplada total de l'aleró, que passa de 1800 mm a 2000 mm, i a més dotant d'una major profunditat a la xona dels flaps, que guanya 2,5 cm de profunditat. Tot això fa que l'aleró perdi càrrega aerodinàmica, és cert, però a l'hora fa que sigui menys sensible a les condicions externes, que és l'objectiu principal.

5. Estudi fluidodinàmic dels alerons

L'objectiu d'aquest apartat és el d'analitzar mitjançant software CFD les diferències aerodinàmiques, tant de càrrega aerodinàmica, resistència a l'aire i vorticitat entre un aleró davanter de 2018 i un de 2019. Per desenvolupar tot l'anomenat anteriorment s'han fet servir diferents softwares, cadascun dels quals té una funció concreta dins la simulació CFD i han estat utilitzats segons això.

El primer i segon són dos programes de disseny realment molt ampli de l'empresa *Dassault Systems*. Es tracta de dos softwares altament conegut en el món industria, *Solidworks* i *Catia*. S'han utilitzat dos programes ja que per fer certes coses va molt bé un i per altres va millor l'altra. Per exemple, si volem modificar superfícies el *Catia* és fantàstic però si cal fer petits canvis en la geometria d'un sòlid el *Solidworks* va molt bé també, sobretot modificant arxiu en versió STEP.

Hypermesh pertany a l'empresa Altair que es fa servir a nivell internacional per sobretot crear la malla de les peces que es vulguin utilitzar per simular-les a nivell CFD. És un software que destaca sobretot pel seu gran número d'operacions i formes de mallar, la qual cosa li dona una gran versatilitat en tots els sentits. Tot i això, el nivell de coneixements del programa que es necessita per fer les diferents simulacions és molt assumible per qualsevol alumne implicat, a més també hem rebut coneixements d'aquest software a la universitat, aquest ha estat un dels factors determinants per escollir aquest programa, que a més és realment potent.

Per últim, i tot i que també es podria simular amb el *Hypermesh*, per fer les diferents simulacions CFD s'ha utilitzat un altre programa d'Altair anomenat *Virtual Wind Tunnel*, sobre el qual també hem rebut nocions a classe. És un programa que destaca per tenir una interfase molt intuïtiva i fàcil de fer anar. I pel que el necessitem és totalment vàlid. Com s'ha dit abans, el programa *Hypermesh* també és capaç de no només mallar sinó també simular, la diferència amb *Wind Tunnel* per això, és que amb l'altre t'has de crear tu mateix el túnel de vent de zero, és un nivell molt avançat, en canvi amb el *Wind Tunnel* és molt fàcil de crear-lo ja que te'l fa sol, només cal donar-li les mides que t'interessi, la velocitat del flux d'aire, identificar quines parts estàs analitzant (carrosseria, roda, bescanviador d'aigua, etc) i poc més. És tot automàtic, i com que es tracta d'analitzar i comparar les diferències entre dos alerons diferents ens val perfectament.

5.1. Disseny i geometria dels alerons

En el cas de la geometria de 2018, s'ha descarregat un CAD ja dissenyat de l'aleró. L'objectiu d'haver-ho fet així és el de aconseguir una geometria el més fidedigne possible a la realitat.

Pel que fa a la geometria de 2019, s'han trobat diversos problemes per trobar una geometria que fos possible de simular, ja que n'hi ha molt poques i les que hi ha tenen molts errors difícils d'arreglar com ara que la geometria realment sigui tota una sola entitat totalment tancada. Així que s'ha optat per agafar la geometria de 2018 que se sap que és estable i modificar-la per convertir-la en nu aleró de 2019. Sobretot el que s'ha fet és eliminar la zona dels *turning vanes*, de manera que és pràcticament un aleró amb les especificacions de 2019.

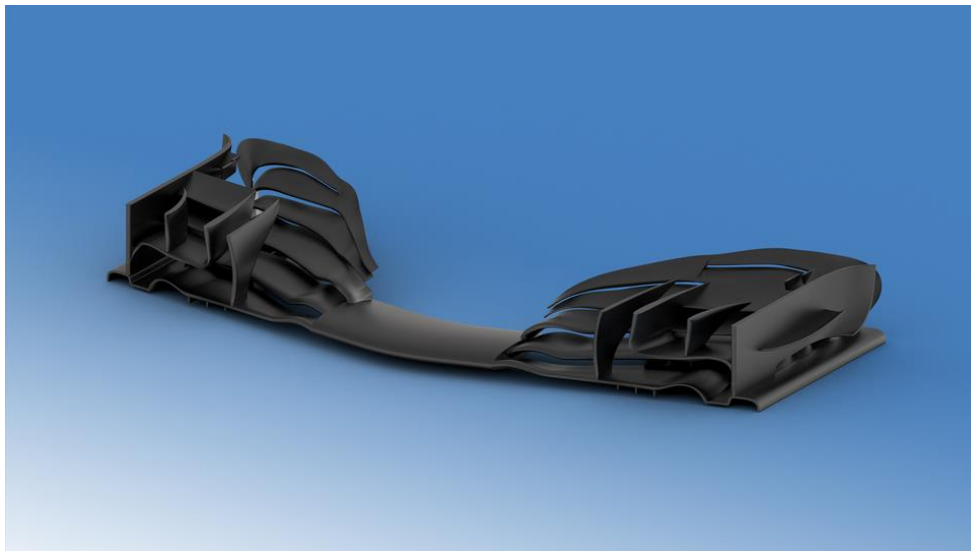


Fig. 5.2 Vista frontal de la geometria de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia

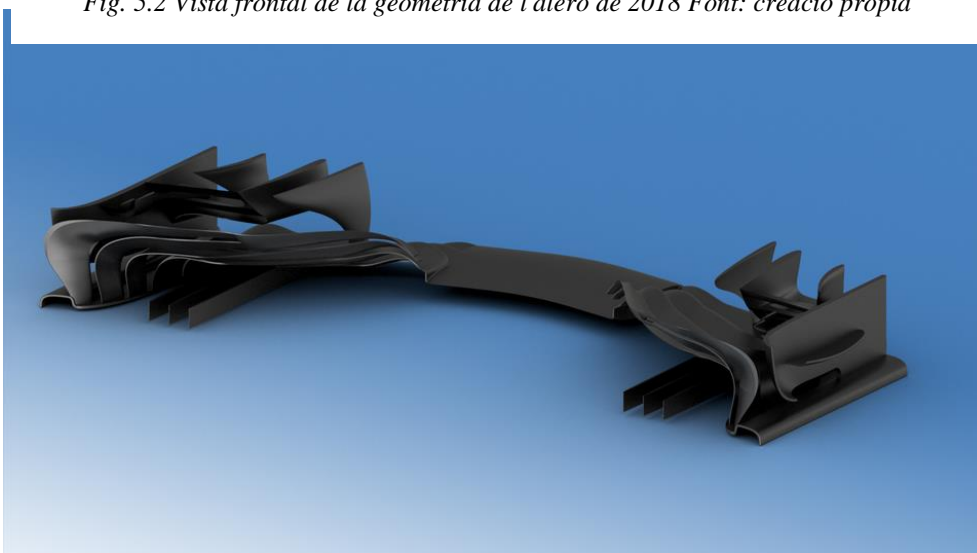


Fig. 5.1 Vista posterior de la geometria de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia

Un cop escollides les dues geometries, s'ha introduït al programa de disseny anteriorment anomenat CATIA, dins el qual s'ha partit per la meitat, ja que a l'hora de mallar i simular només s'ha fet servir una meitat. S'ha pres aquesta decisió degut a que es tracta d'una peça simètrica, per tant això ens permet partir-la just pel pla de simetria i analitzar només una meitat obtenint els mateixos resultats que si ho féssim sencera però estalviant molt temps durant el procés de simulació. Bàsicament com es veu s'ha tractat d'optimitzar tot el procés i fer-lo més eficient i lògic.

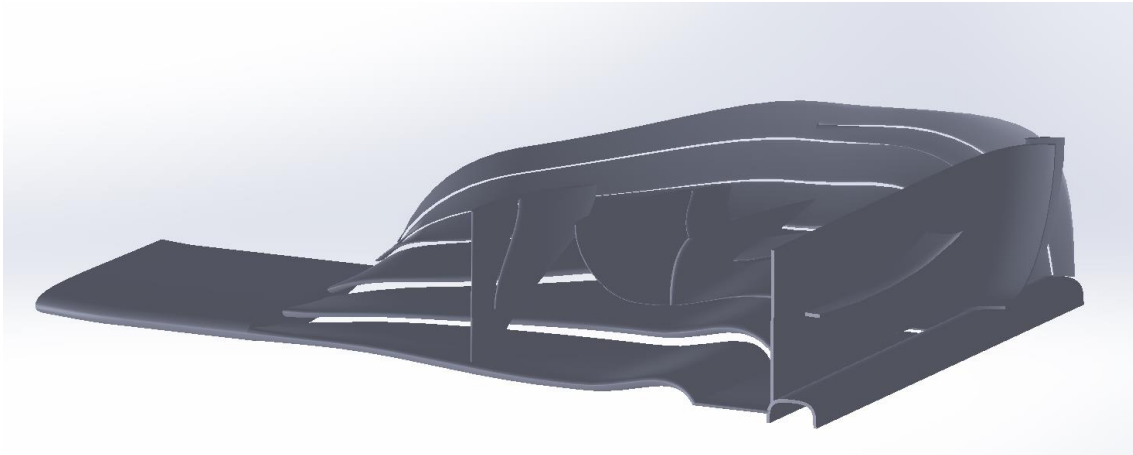


Fig. 5.3 Geometria partida per la meitat de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia

Aquest és el procés per obtenir la geometria final per poder mallar i simular mostrat amb l'aleró de 2018, amb el de 2019 s'ha aprofitat la mateixa geometria i s'ha eliminat la part de mallat dels *turning vanes*.

Per últim però no menys important, tenim la geometria de la roda que es farà servir en algunes de les simulacions. Es tracta d'una roda que conté pneumàtic i llanta corresponent a l'actualitat, una geometria que no ha canviat des de 2017, és a dir, per les simulacions amb els dos alerons farem servir el mateix arxiu de roda.



Fig. 5.4 Geometria del conjunt llanta i pneumàtic Font: creació pròpia

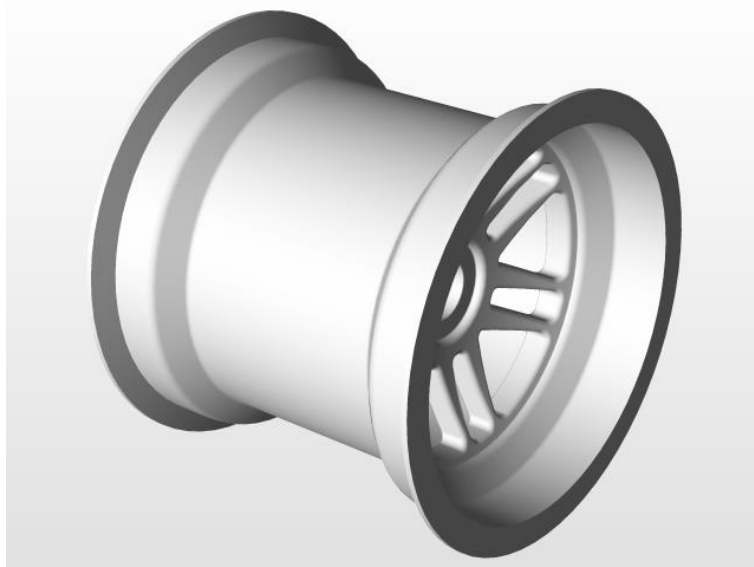


Fig. 5.5 Geometria de la llanta Font: creació pròpia



Fig. 5.6 Geometria del pneumàtic Font: creació pròpia

La geometria de la roda la componen dues peces: el pneumàtic i la llanta. El problema és que estan en contacte entre elles. Així doncs quan es mallin les dues peces juntes, hi haurà part de la malla d'una peça que interferirà amb la malla de l'altre, i això al Virtual Wind Tunnel es converteix en un error que no et permet simular el conjunt. Per tant s'ha optat per, abans d'importar aquest conjunt al *Hypermesh*, convertir-la en una sola peça mitjançant el *Catia*. Obtenint el següent resultat:

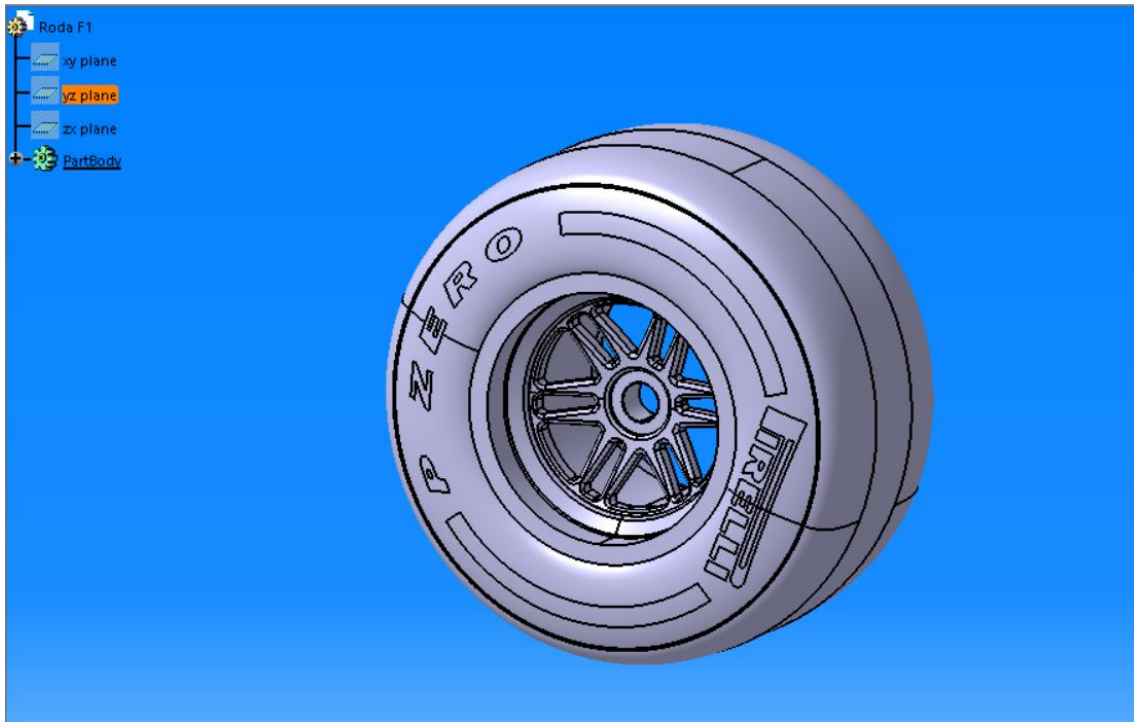


Fig. 5.7 Geometria de la roda convertida a una sola peça Font: creació pròpia

Ara sí, un cop tenim les geometries preparades, toca mallar-les.

5.2. Mallat dels alerons i roda

Bé, doncs tal i com hem comentat abans, per mallar els alerons s'ha fet servir el programa *Hypermesh*. Té moltes opcions de mallat, però en aquest cas s'ha utilitzat en els dos casos l'opció de *automesh* dins el qual s'ha escollit el mètode de *size and bias*, ja que aquest et permet aconseguir fàcilment un mallat bastant bo i a l'hora els seus paràmetres són fàcils de modificar.

Per aquest treball el tipus de mallat és híbrid i 2D, és a dir, combina elements triangulars i quadrangulars. S'ha escollit aquest tipus de mallat ja que s'adapta molt bé en superfícies complicades i diferents. Per exemple, en aquest cas, la majoria de zones de la peça, si féssim zoom, es veuria com són quadrats, ja que tenim moltes zones planes on els quadrats hi tenen l'as a guanyar ja que són molt estables. Tot i així, en zones com ara on comencen i acaben les petites unions que hi ha entre flaps allà la malla triangular s'hi adapta millor. És a dir, podem dir que el fet que sigui híbrida a nivell general fa que sigui una malla més versàtil i adaptable a més condicions.

Ara bé, abans de fer un mallat cal fer certes comprovacions, de fet, la primera comprovació es fa a la geometria que s'importa al *Hypermesh* i es fa abans de mallar. Es tracta de comprovar si la geometria té alguna vora lliure o en anglès *free edge*. Això significa que la geometria que es pretén mallar té alguna zona que està oberta, i no es podria mallar correctament, per tant caldria arreglar-ho immediatament (cosa que es pot fer amb el mateix programa, el *Hypermesh*). En aquest cas i per sort, no ens hem trobat amb aquest inconvenient, ja que la geometria té totes les vores compartides i correctes.

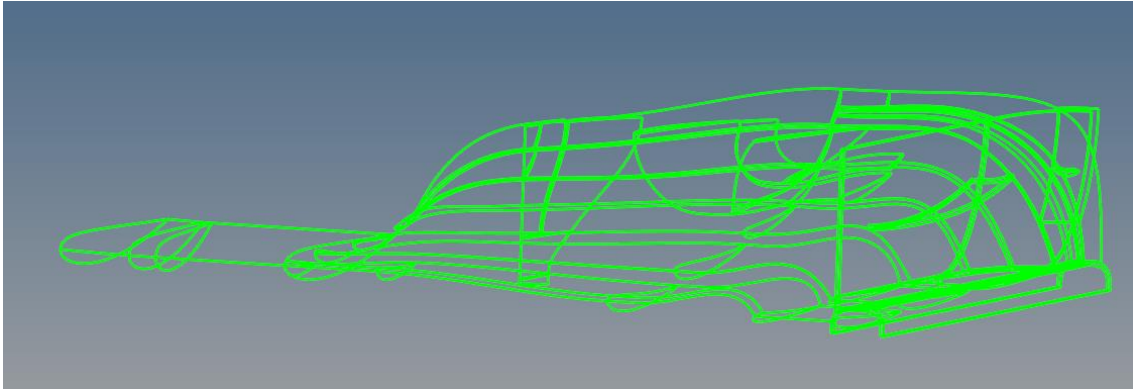


Fig. 5.8 Geometria en correcte estat de l'aleró del 2018 al *Hypermesh* Font: creació pròpia

Com es pot veure, cap de les vores de la geometria està marcada en vermell, estan totes en color verd, això ens indica que podem mallar la geometria sense por. Procedim doncs a mallar-la tal i com hem comentat amb anterioritat, aquest seria el resultat aplicant simplement la funció *automesh* amb una mida de cel·la de 2 mm:

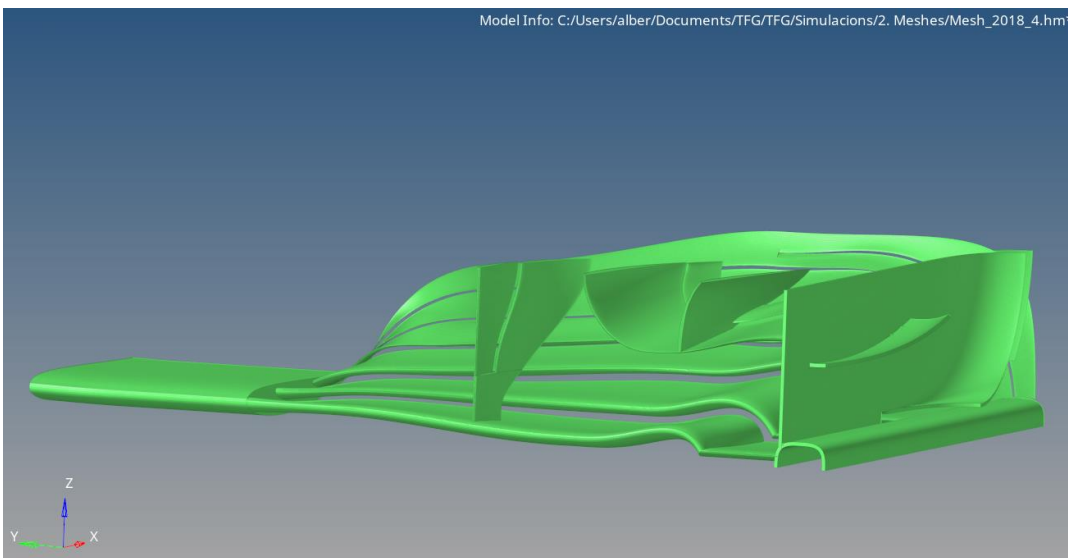


Fig. 5.9 Mallat inicial de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia

A simple vista es veu o sembla que es tracta d'una bona malla, i així és, tot i així cal fer les següents comprovacions. Primer de tot, cal fer la mateixa comprovació que hem fet amb la geometria però aquest cop amb la malla, és a dir, cal veure si tenim alguna zona on la malla estigui oberta, ja que de ser així, no es podria simular, al comprovar-ho ens adonem que té alguna zona on efectivament la malla està oberta i cal arreglar-ho.



Fig. 5.10 Error en al mallat (la malla està oberta) Font: creació pròpia

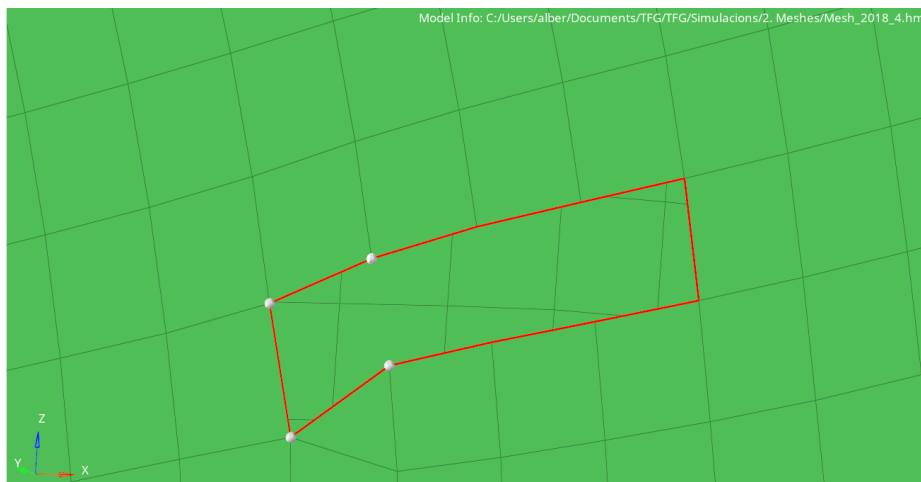


Fig. 5.11 Creació d'elements per tancar la malla Font: creació pròpia

Com es pot veure, a la part de l'endplate concretament ens trobem amb una zona on la malla està totalment oberta, és el contorn vermell, i per tant cal tancar-lo. Per fer-ho, es creen en aquest cas quatre elements quadrangulars tal i com es pot veure en la figura X, per omplir aquesta àrea oberta. De tal manera que al final quedi un mallat totalment tancat i hermètic. Un cop fet això, es comprova que no hi hagi més zones obertes i el programa ens diu que el mallat és hermètic per tant, podem avançar amb la següent comprovació o *checking*.

Ara toca comprovar si tots els elements de la malla estan ben connectats entre si, ja que a vegades pot passar que hi hagi males connexions entre ells. Com és el cas següent:

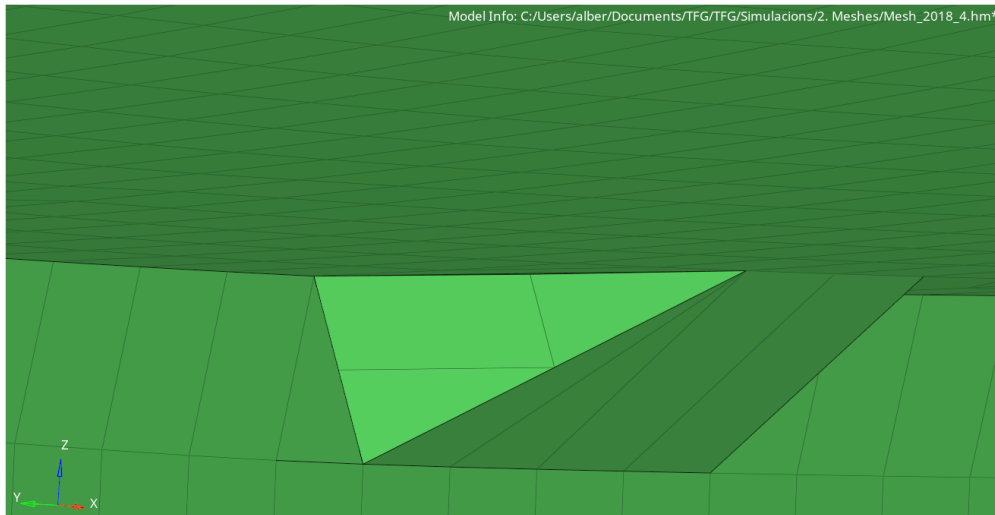


Fig. 5.12 Nodes de la malla mal connectats entre si Font: creació pròpia

Aquí veiem com realment la malla està tancada, ja que això ho hem solucionat abans, però no està ben connectada, apareixen nodes al ben mig d'una vora, cosa que no està bé. El millor que es pot fer en aquest cas és eliminar aquests tres elements i fer-ne un de sol triangular i més gran que ocupi tota la zona, d'aquesta manera estarà ben connectat tot.

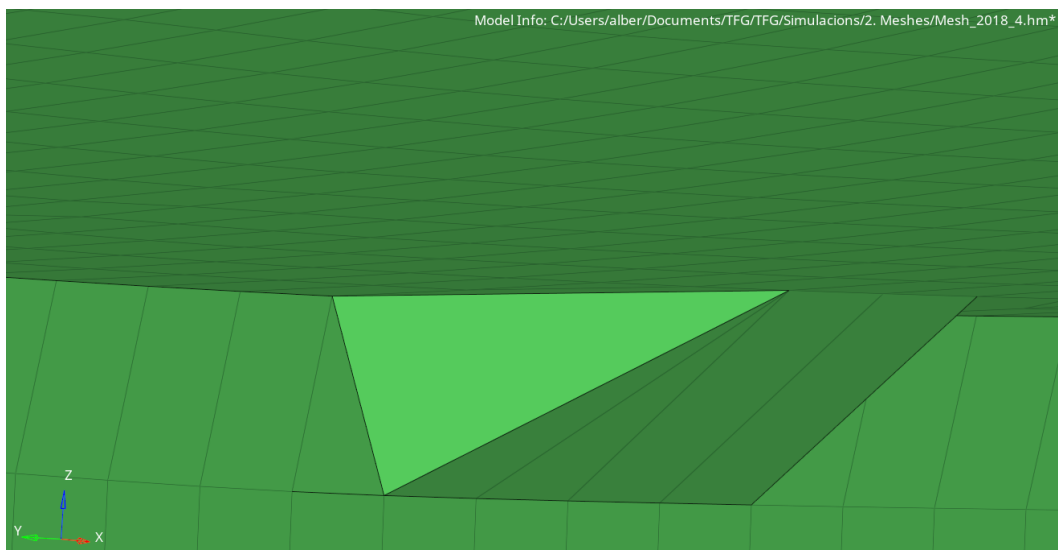


Fig. 5.13 Bona connexió dels nodes de la malla Font: creació pròpia

Un cop solucionat aquest aspecte, anem a fer la última comprovació; hem de mirar si algun element està duplicat. Els tres altres errors són més comuns que aquest, però sempre cal comprovar-ho per evitar que després la simulació CFD no funcioni. En aquest cas s'ha comprovat però cap element estava duplicat així que finalment el mallat ha quedat amb un total de 366671 elements.

Per obtenir un mallat de l'aleró de 2019, s'ha guardat la primera malla amb un altre nom i s'ha modificat de manera que resulti un aleró amb les especificacions de 2019. Pel que fa la roda, s'ha procedit de la mateixa forma que les explicacions que s'han donat abans i per tant no cal tornar-ho a explicar. Aquí una imatge resultat final del mallat amb una

taula on indica la mida de cel·la, el tipus d'element i el nombre final d'elements que té cada geometria.

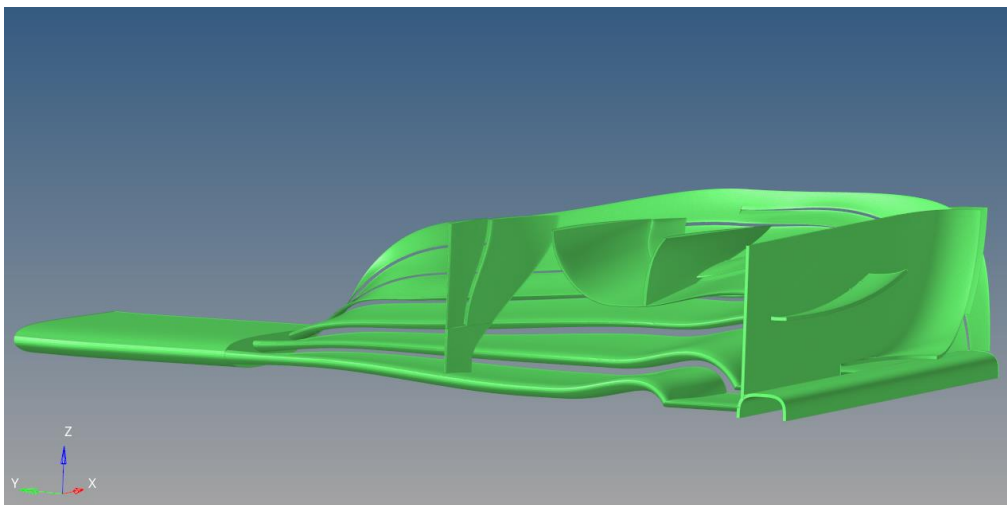


Fig. 5.14 Malla final de l'aleró de 2018 al Hypermesh Font: creació pròpia

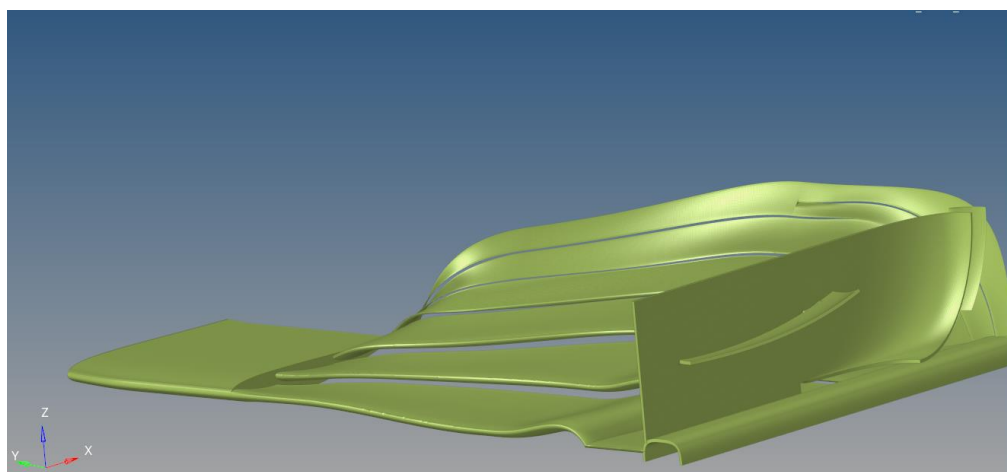


Fig. 5.15 Malla final de l'aleró de 2019 al Hypermesh Font: creació pròpia

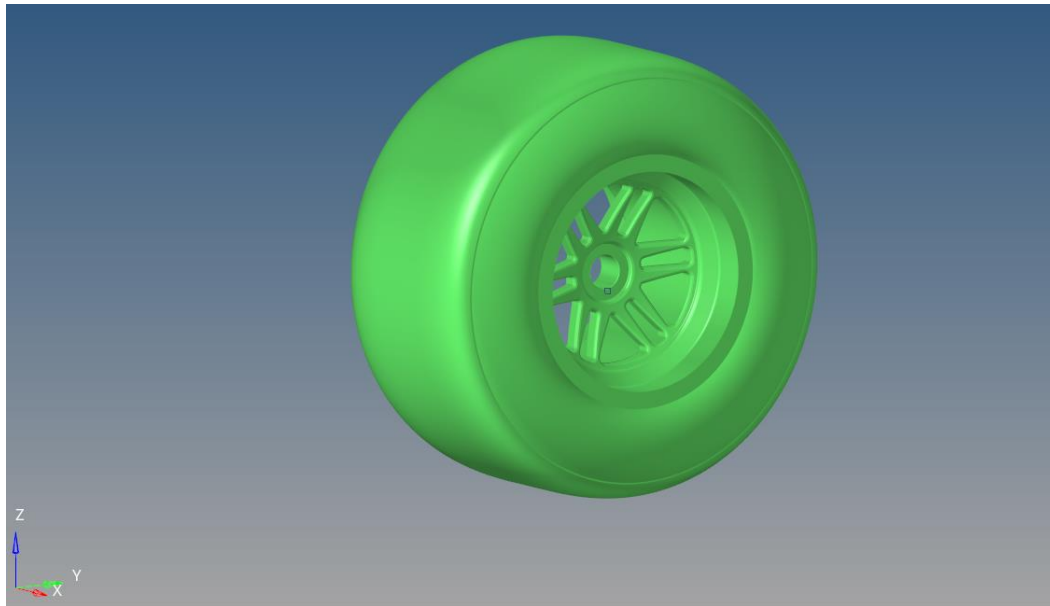


Fig. 5.16 Malla final de la roda al Hypermesh Font: creació pròpia

	Tipus de cel·la	Mida de cel·la	Nº d'elements total
Aleró 2018	Híbrida = quadrats i triangles	2 mm	366671
Aleró 2019	Híbrida = quadrats i triangles	2 mm	322025
Roda	Híbrida = quadrats i triangles	3 mm	326325

Taula 5.1 Dades del mallat final de les tres geometries analitzades

5.3. Procés de simulació de les diferents geometries i condicions de contorn

Primerament cal comentar que s'han fet diverses simulacions, anant de més senzilles a més complicades i en ordre cronològic. És a dir, primerament s'ha començat simulant l'aleró de 2018 sol i un cop analitzat els resultats i veient que eren bons, s'ha simulat el mateix aleró incorporant-hi aquesta vegada la roda. Després s'ha procedit de la mateixa forma amb l'aleró de 2019, primer ell sol i a continuació amb la roda per poder comparar els resultats. Abans però de simular pròpiament, cal decidir unes condicions de contorn que garantitzin que tots quatre simulacions es facin de la mateixa manera. Ja que, si no és així, no es podrien comparar entre elles.

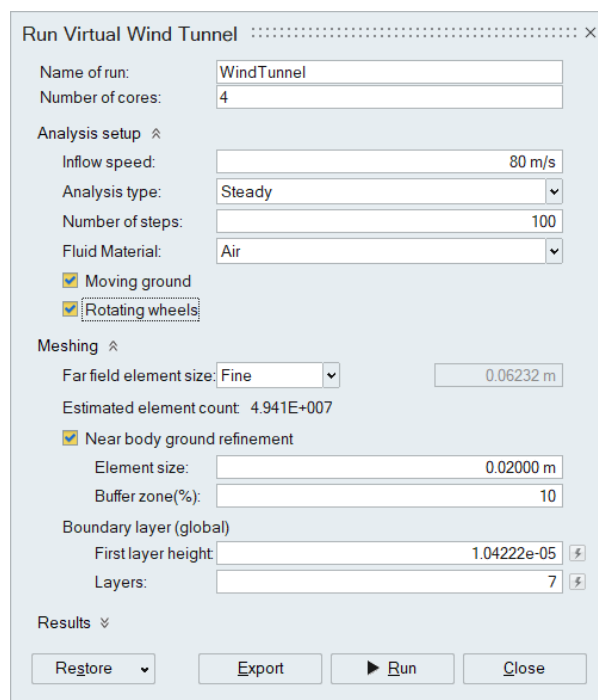
En primer lloc doncs, s'ha de definir un model de turbulència per duu a terme la simulació CFD. N'existeixen molts, i tots tenen les seves virtuts i defectes, i cadascun és més adient per tipus d'anàlisi en concret. En aquest cas es fa servir el Spalart-Allmaras, en primer lloc per què és el model de turbulència que fa servir *Virtual Wind Tunnel* i no es pot canviar, però en segon lloc per què és un model especialment dissenyat per a la indústria aeroespacial, tot i així, es tractar d'un treball comparatiu on no es busca s'analitzar els resultats de cada simulació en concret amb una alta precisió i

rigurositat, sinó que es busca comparar dos models d'aleró diferent, per tant l'important és establir aquestes condicions de contorn que s'exposen i que es mantinguin durant tots els diferents anàlisi, d'aquesta manera les simulacions seran totalment comparables i se n'extreuran comparatives molt fiables.

En segon lloc, s'ha establert la mida del túnel de vent, que en aquest cas no necessitem que sigui massa gran ja que el que volem analitzar és petit i per tant amb un volum de 4 metres d'amplada, 10 de llargada i 3 d'alçada, l'aire pot circular perfectament bé sense por a que les parets laterals, el sostre o les parets d'entrada i sortida d'aire molestin al flux d'aquest.

En tercer lloc, la velocitat de l'aire està establerta en 80 m/s mitjançant un flux d'aire recta. Són aproximadament 300 km/h que és la velocitat d'un monoplaça de Fórmula 1 quan aquest circula a la part final d'una recta de qualsevol circuit, i aquest és l'efecte que s'ha volgut explorar.

En quart lloc, l'aleró s'ha col·locat a tres metres de l'entrada de l'aire, ja que així hi ha espai entre l'entrada d'aire i quan aquest impacta en l'aleró i a una alçada del terra de 50mm, com estaria a la vida real. A més, s'ha activat la funció del terra mòbil i també que la roda giri sobre ella mateixa, amb l'objectiu de que les simulacions siguin més realistes.



Aquí s'expressen doncs, les condicions amb les que s'han fet les diferents simulacions al *Virtual Wind Tunnel*. Per una banda, i tal i com s'ha comentat abans, es pot comprovar que s'ha activat el gir de la roda, el terra també és mòbil i a més a més, s'ha fet un refinament de malla a tota la zona propera entre el cos a analitzar i el terra. I també es pot veure, que la simulació està configurada en 100 iteracions, ja que amb les proves que s'han anat fent, s'ha trobat que aquest és un valor correcte i que ofereix uns resultats coherents.

Per altra banda, que els elements del mallat del túnel de vent tenen una mida de 20 mm, i que la capa límit de l'objecte s'ha configurat amb un gruix de 0,01 mm i hi ha un total de 7 capes.

Per últim, cal esmentar que pel que fa la roda, aquesta s'ha un enfonsat una mica en el terra del túnel de vent. Ja que a la vida real, degut al pes del vehicle i sobretot a la força que genera la pròpia aerodinàmica contra el terra el pneumàtic es deforma i per tant queda a una alçada més baixa que la que realment té. Aquest efecte s'ha volgut aplicar en les simulacions, tal i com es pot veure a la següent imatge:

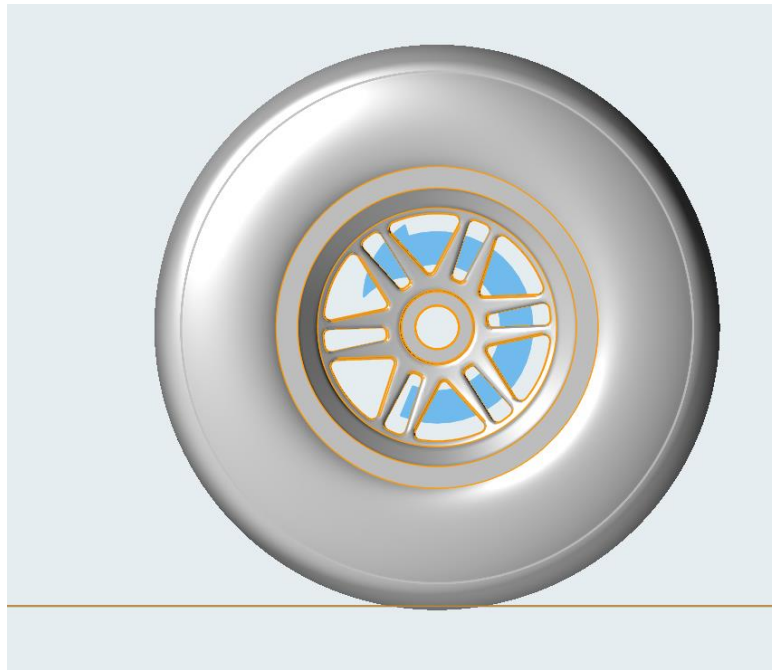


Fig. 5.17 Geometria de la roda al Virtual Wind Tunnel Font: creació pròpia

Així doncs, finalment així quedaria el conjunt d'aleró, roda i túnel de vent:

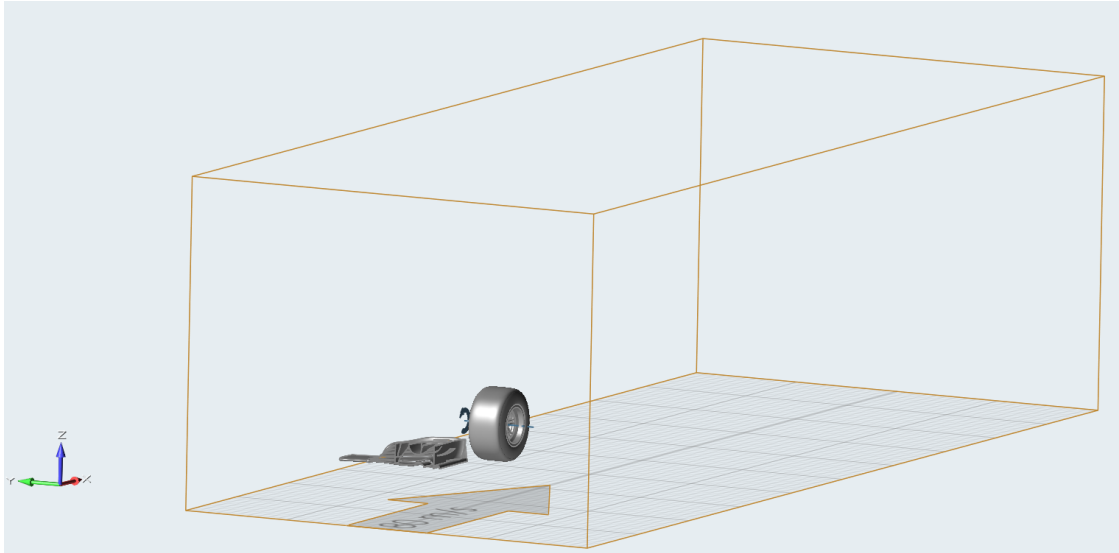


Fig. 5.18 Geometria del conjunt aleró 2018 - roda al Virtual Wind Tunnel Font: creació pròpia

Pel que fa al cas del 2019, com s'ha comentat abans s'ha adaptat la malla per convertir-lo en un aleró de 2019. Per seguir en aquest sentit, la ubicació de l'aleró respecte la roda s'ha canviat una mica per fer-lo més realista. Bàsicament el que s'ha fet és alinear la banda lateral de la roda i l'endplate, ja que al 2019 els alerons es van fer més amples, concretament tant com l'ample de vies, per tant, s'ha intentat reproduir aquest efecte en la simulació.

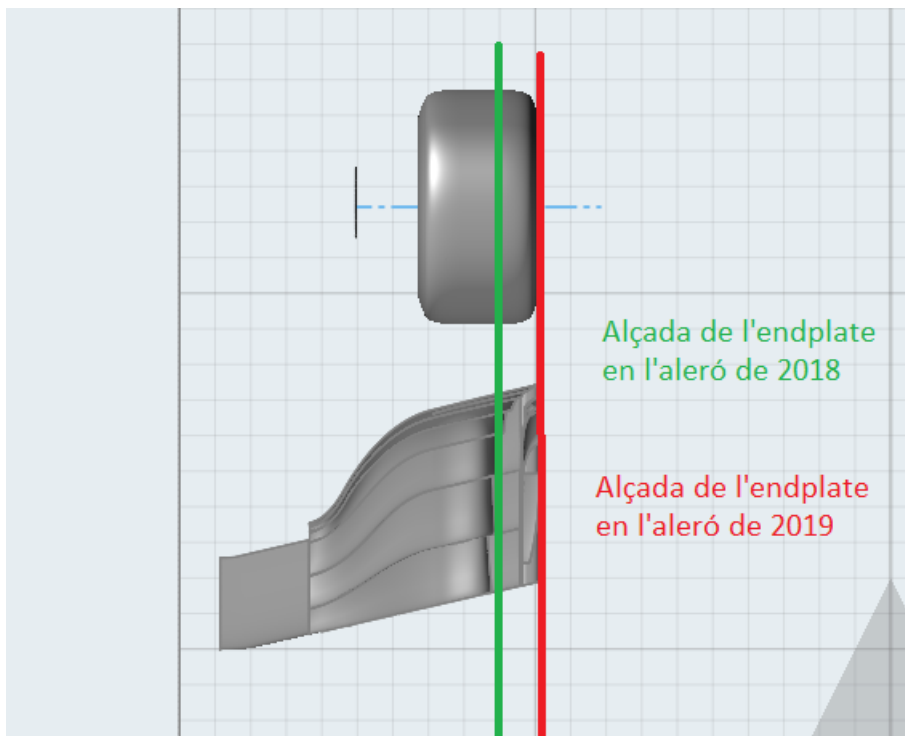


Fig. 5.19 Diferència de col·locació de l'aleró entre 2018 i 2019 Font: creació pròpia

5.4. Post-processat i presentació i anàlisi dels resultats

5.4.1. Aleró davanter de la temporada 2018

Primerament, passarem a observar i analitzar els resultats de les simulacions de l'aleró davanter de la temporada 2018:

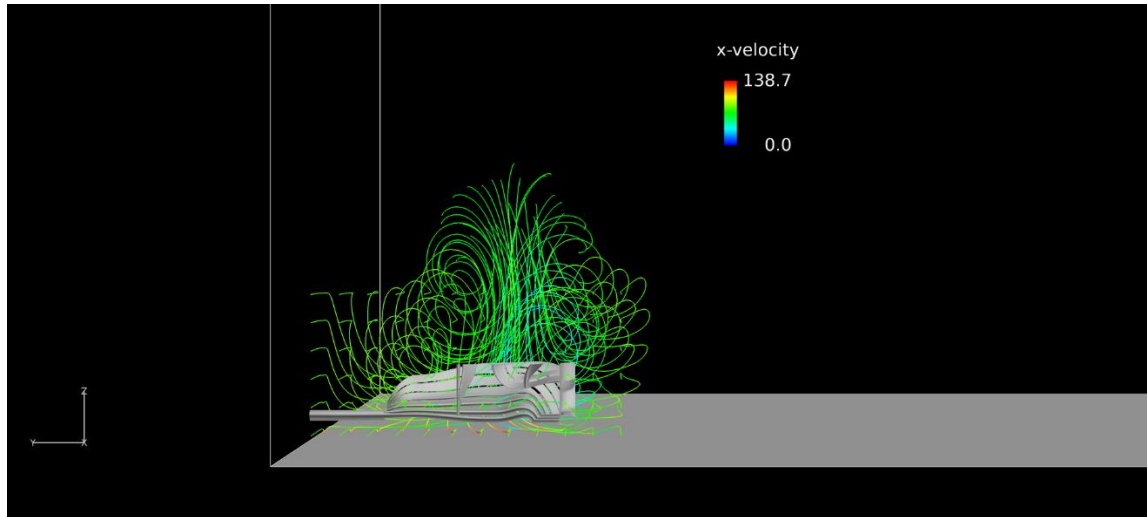


Fig. 5.20 Vista frontal de les streamlines de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia

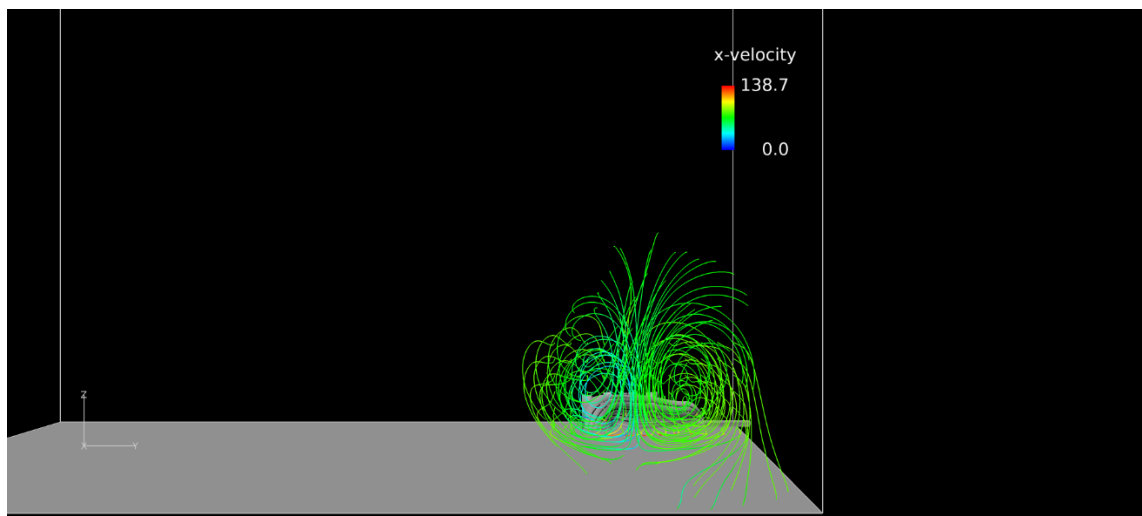


Fig. 5.21 Vista posterior de les streamlines de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia

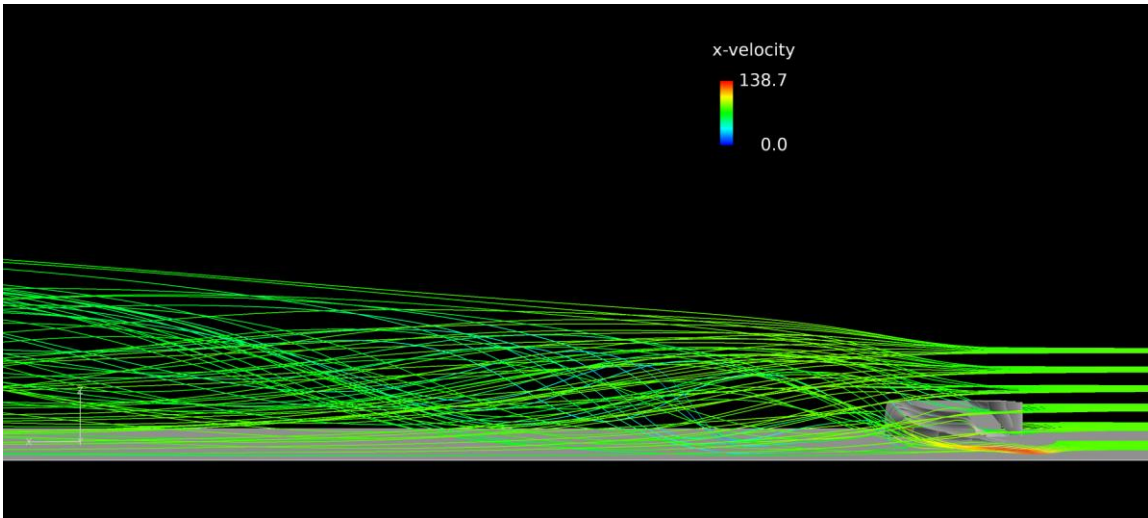


Fig. 5.22 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia

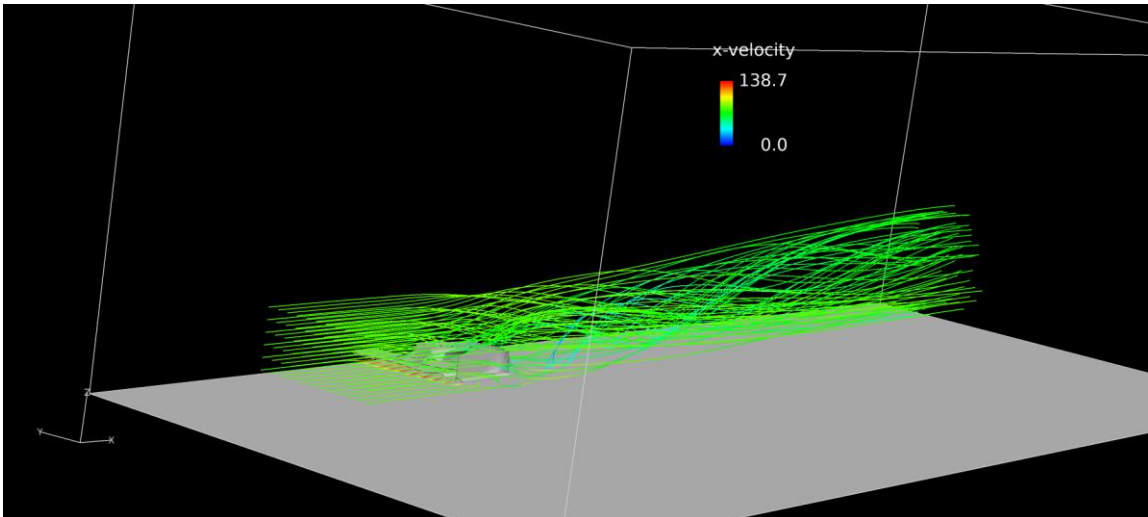


Fig. 5.23 Vista general de les streamlines de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia

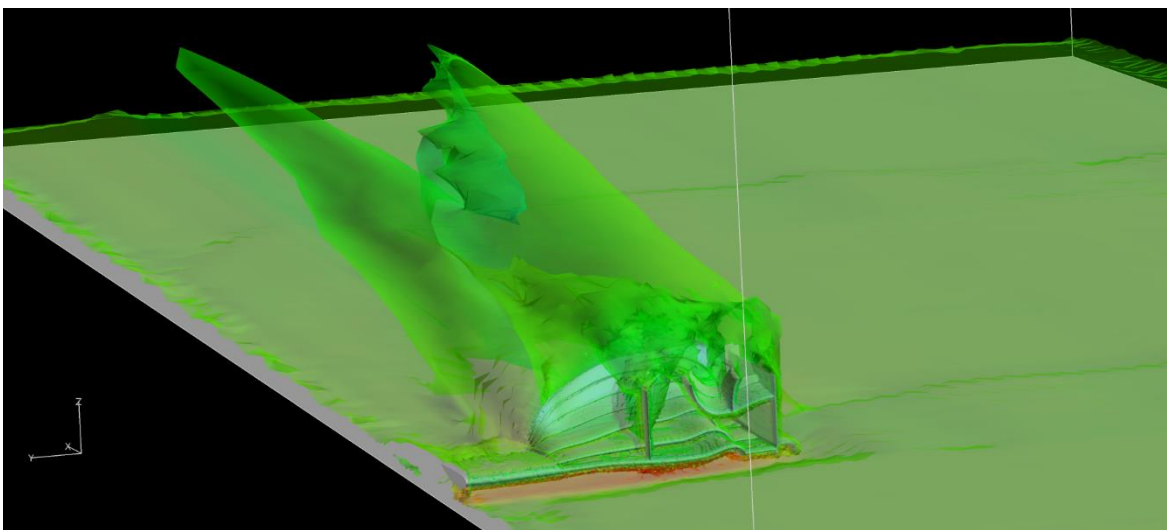


Fig. 5.24 Vista general de la vorticitat de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia

Tal i com es pot veure en les diferents imatges, l'aleró del 2018 genera molt aire turbulent, això és degut a que es tracta d'una geometria complexa, amb la qual cosa es genera un flux també complex d'aire. A partir d'aquests resultats, podem extreure varies conclusions, les quals s'exposen a continuació:

En primer lloc, en la figura 5.20, veiem que el que fa l'aleró en primer instància és llançar l'aire cap amunt, cosa totalment correcte previsible, ja que com s'ha comentat en anteriors capítols d'aquest treball una de les funcions de l'aleró davanter d'un monoplaça de Formula 1 és desviar l'aire de la roda, ja que aquesta és la part del cotxe que més turbulències genera. Aquest efecte també es pot veure molt clarament en la figura 5.22.

En segon lloc, podem dir que es generen dos grans vòrtex. Això es pot veure d'una forma molt visual en la figura 5.21. Un d'ells és el conegut com a *out wash*, generat pels *turning vanes* de l'aleró (justament un dels components que es va eliminar l'any 2019). Aquest vòrtex intenta desviar l'aire de la roda també, però no per dalt com en el primer cas, sinó per la part lateral més exterior de la roda.

En tercer lloc, es produeix un segon vòrtex, d'efecte oposat a l'anterior, és a dir, també busca reduir l'impacte d'aire de la roda però per la banda més interior d'aquesta, és el que es coneix com a efecte *in wash*. De totes formes, aquest vòrtex té una funció encara més important que aquesta, que és sellar el flux d'aire que circula per sota el cotxe. És el conegut vòrtex Y250, que ja en aquesta simulació sense la roda ja s'insinua que passa entre la roda i la carrosseria per anar a parar al lateral del fons pla.

Aquest doble vòrtex es veu també molt clarament en la figura 5.24, a més es veu perfectament que un és d'efecte *out wash*, en canvi, l'altre és d'efecte *in wash*.

Molt interessant veure també en la figura 5.24, com just sota l'ala principal de l'aleró, a l'alçada del terra es genera una zona de molt alta velocitat, cosa que ens indica que allà hi ha una zona de molt baixa pressió i per tant que l'aleró, a part de generar tots aquests efectes que s'han comentat amb anterioritat també genera una gran succió contra el terra, proporcionant càrrega aerodinàmica al tren davanter del cotxe.

5.4.2. Aleró davanter de la temporada 2018 amb roda

A continuació, passarem a observar i analitzar els resultats de les simulacions de l'aleró davanter de la temporada 2018 incloent-hi la roda davantera:

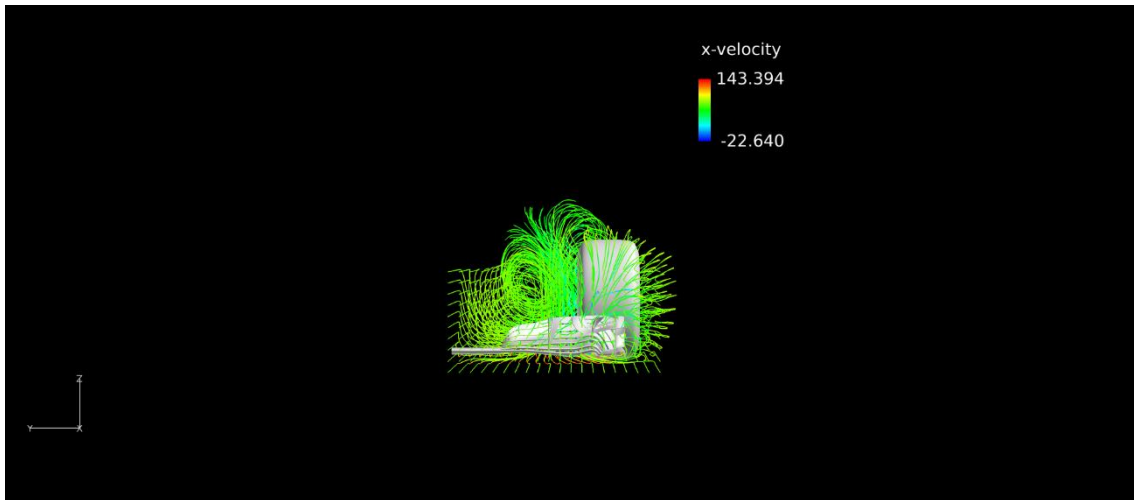


Fig. 5.25 Vista frontal de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia

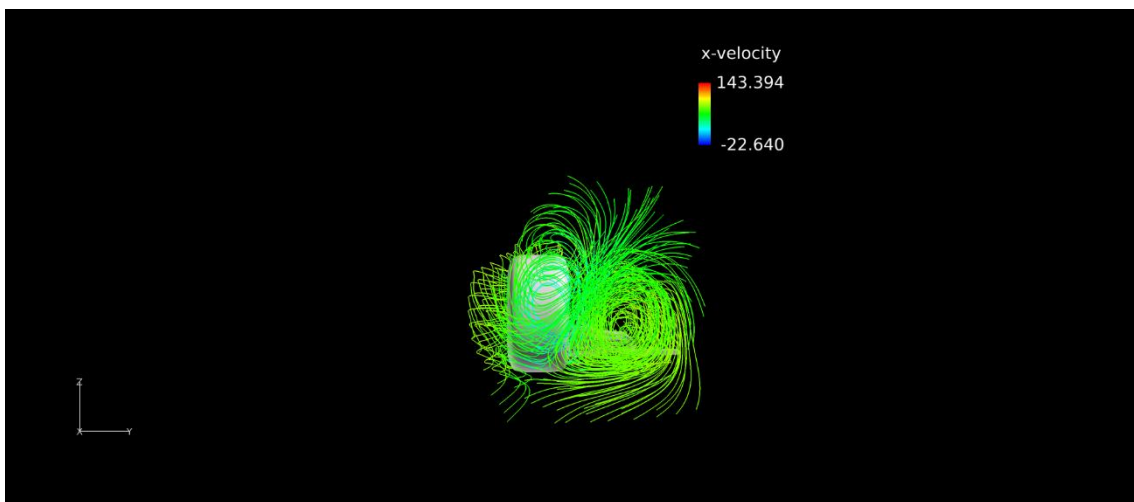


Fig. 5.26 Vista posterior de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia

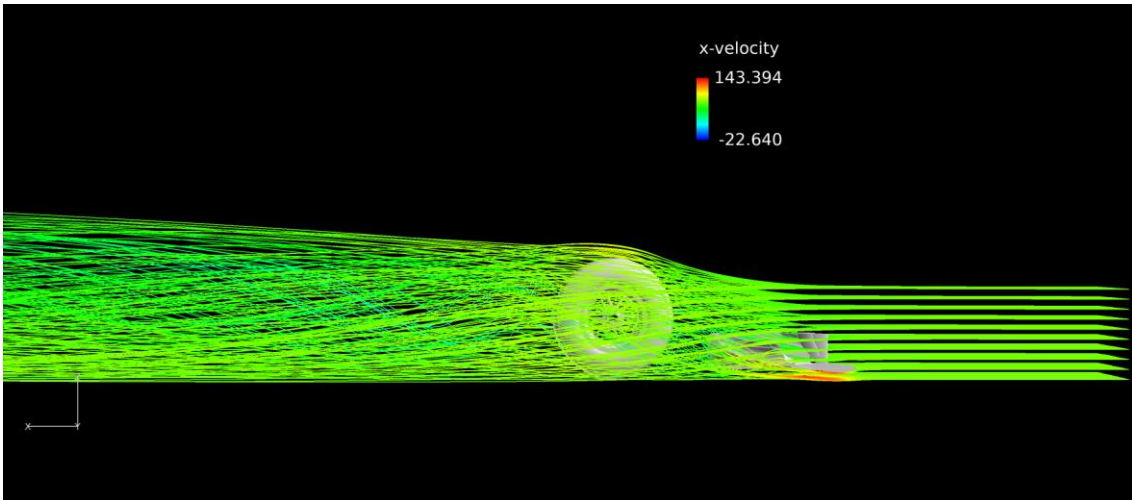


Fig. 5.27 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia

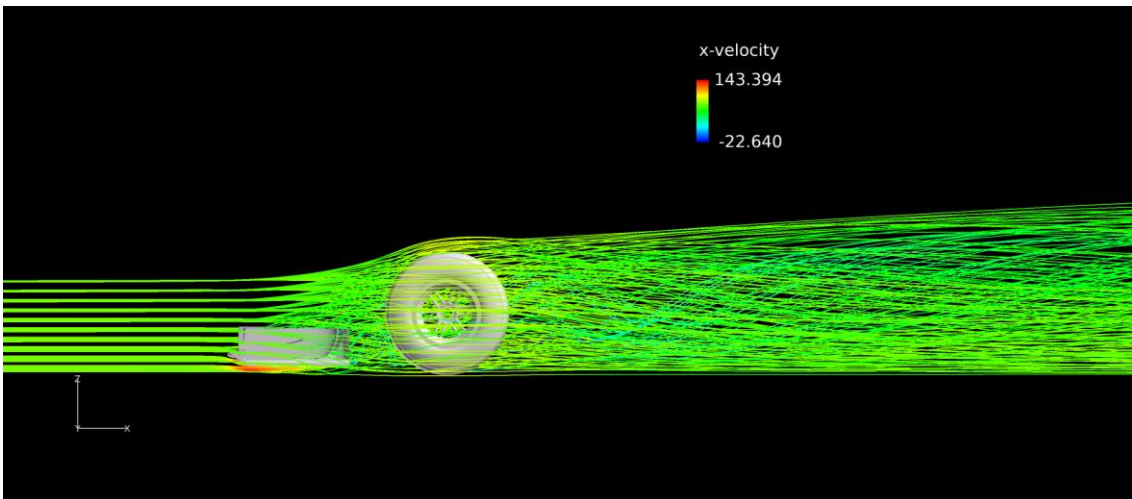


Fig. 5.28 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia

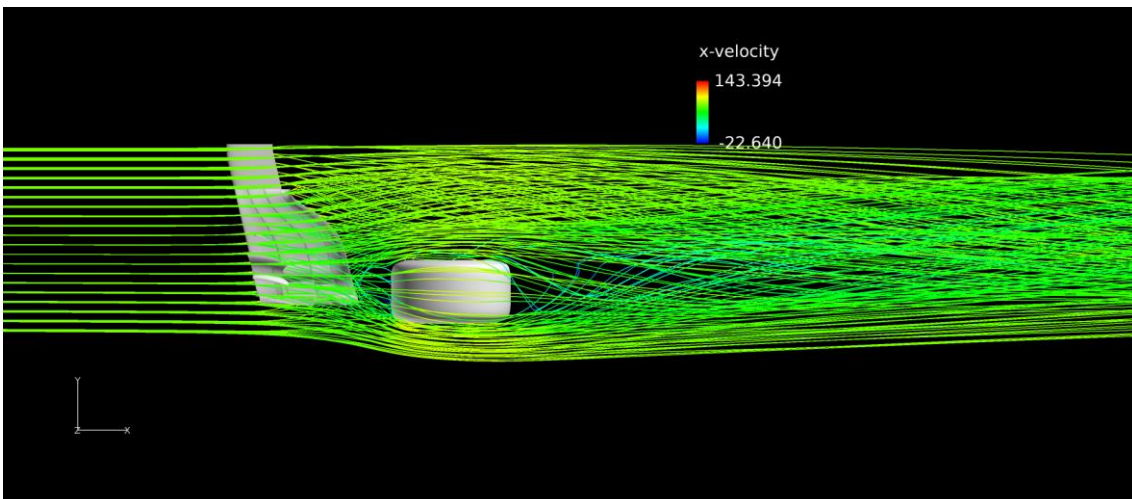


Fig. 5.29 Vista superior de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia

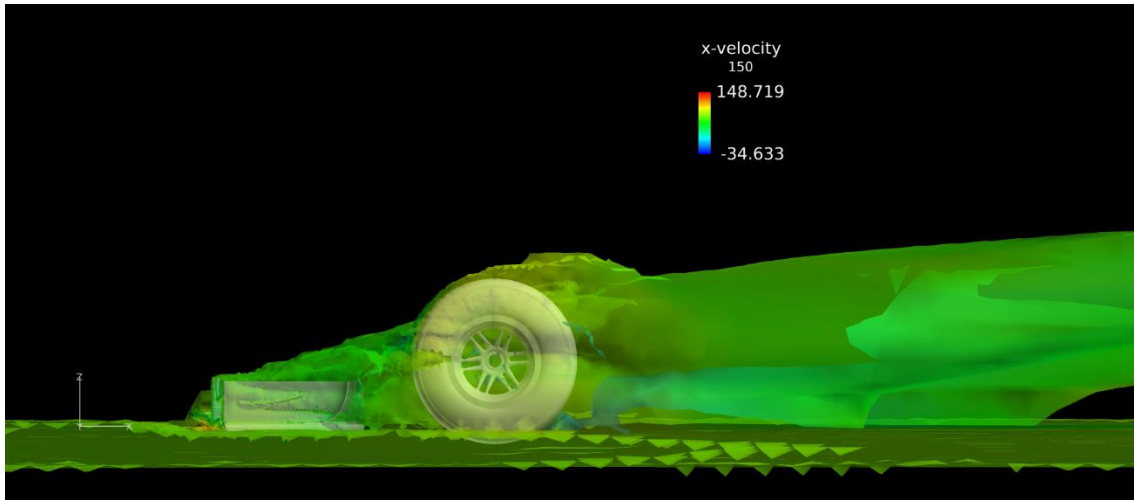


Fig. 5.30 Vista lateral de la vorticitat de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia

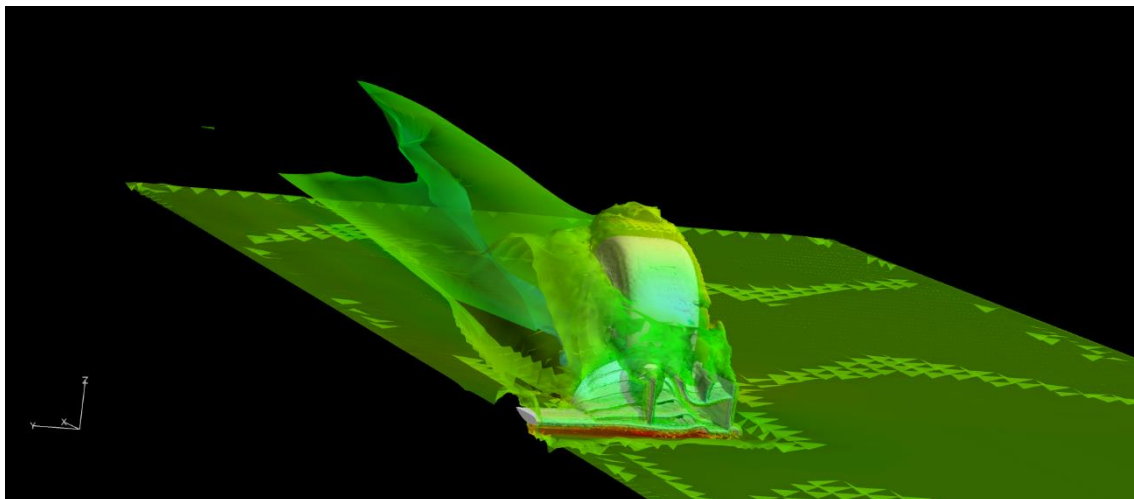


Fig. 5.31 Vista general de la vorticitat de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia

En primer lloc, i com era previsible, veiem que la roda l'únic que fa és complicar més el flux d'aire del que ja era en la primera simulació amb l'aleró sol. Per diversos motius, primer per què estem afegint un element que abans no hi era, per la qual cosa el flux canvia i genera més aire turbulent. Però també per què la roda és molt alta i a més està girant sobre ella mateixa en sentit contrari al del flux d'aire, aquest és un dels factors claus que fa que les rodes prenguin molta importància a l'hora de fer un estudi aerodinàmic.

En segon lloc, veiem que alguns efectes que havíem vist a la primera simulació es mantenen intactes i d'altres es barregen amb els que provoca la roda i s'obté una resposta una mica diferent. Per exemple, per una banda podem observar que el vòrtex que genera la part més interior dels *flaps* de l'aleró, el vòrtex Y250, es manté, per tant podem dir que és independent de la roda, això es veu sobretot a les primeres dues imatges. Però per altra banda, el segon vòrtex que es generava a l'apart més exterior de l'aleró queda desdibuixat per l'aparició de la roda. Si més no, en aquest cas, podem dir que no es genera cap vòrtex, sinó que simplement genera turbulències importants a tenir en compte.

En tercer lloc, veiem que, ja com s'havia explicat al principi del treball, la roda genera quatre efectes: una estela d'aire al seu pas, un aro al seu voltant, una bombolla de recirculació i l'efecte dels radis de la llanta que actuen com un ventilador. Aquest últim efecte és més complicat de veure, però els altres tres es veuen molt clarament. Per exemple, es veu perfectament a la figura 5.29 la roda genera una estela darrere seu on hi ha un buit de caudal d'aire molt important, aquest efecte també es visualitza clarament a la penúltima imatge, on es veu com la roda genera una estela realment potent. També es pot veure a la figura 5.30 com es genera un aro al voltant del pneumàtic. Finalment, també es pot veure clarament a la figura 5.29 com l'aire al principi xoca davant la roda i recircula fins a arribar al seu lateral, es tracta doncs de la bombolla de recirculació.

5.4.3. Aleró davanter de la temporada 2019

Ara, passarem a observar i analitzar els resultats de les simulacions de l'aleró davanter de la temporada 2019:

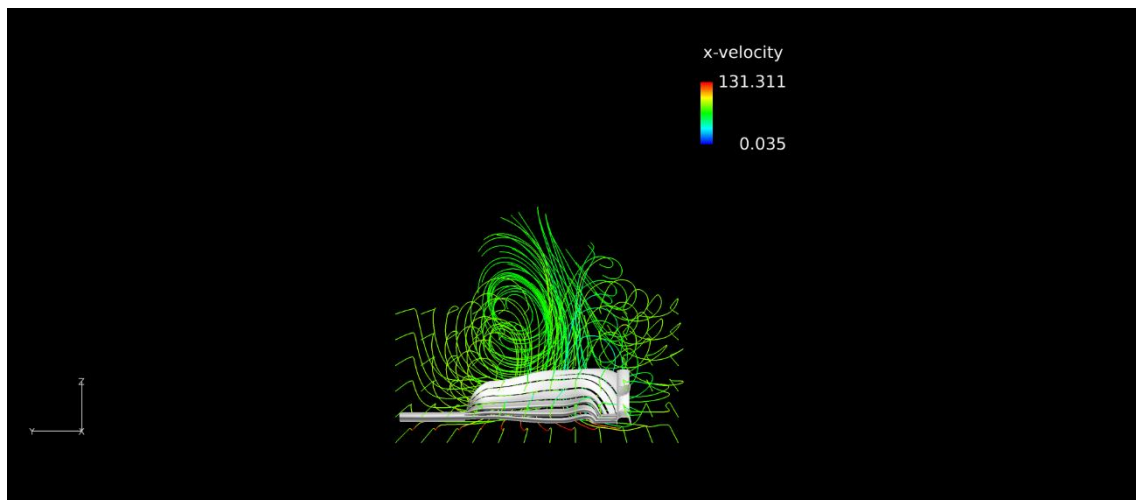


Fig. 5.32 Vista frontal de les streamlines de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia

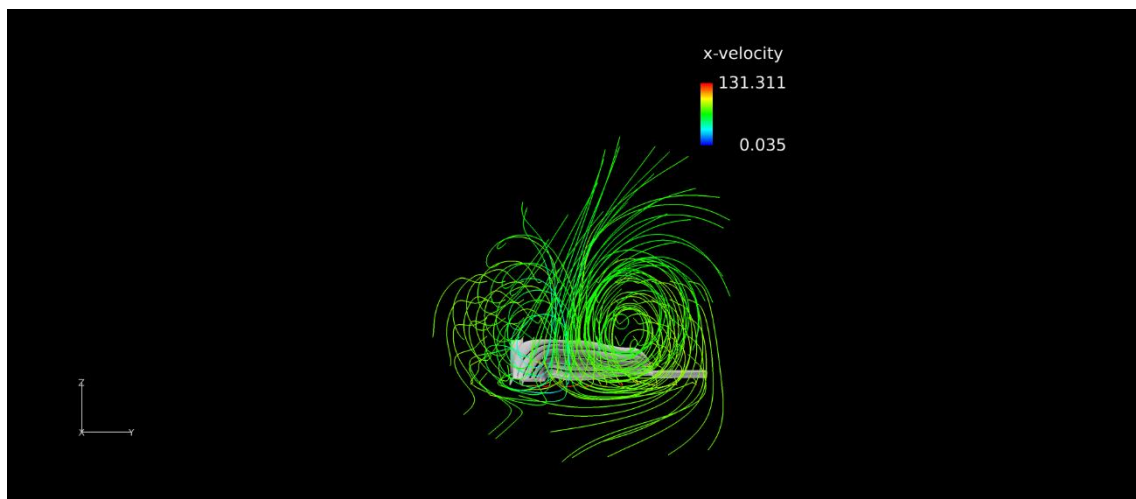


Fig. 5.33 Vista posterior de les streamlines de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia

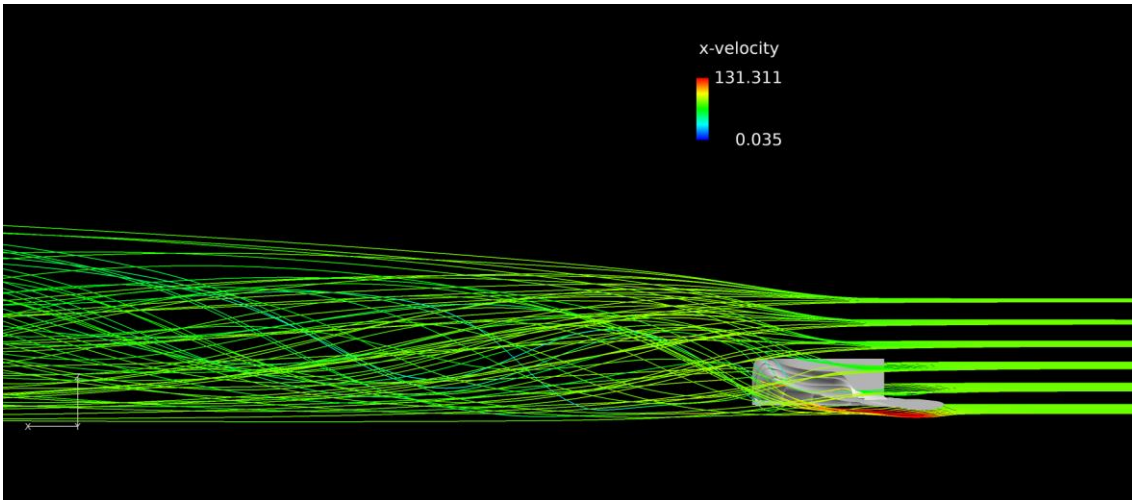


Fig. 5.34 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia

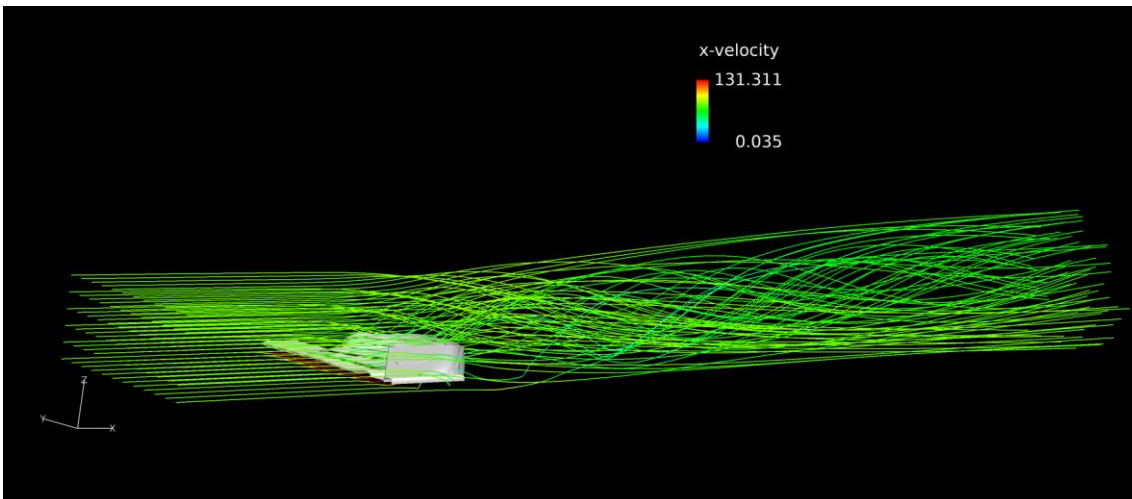


Fig. 5.35 Vista general de les streamlines de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia

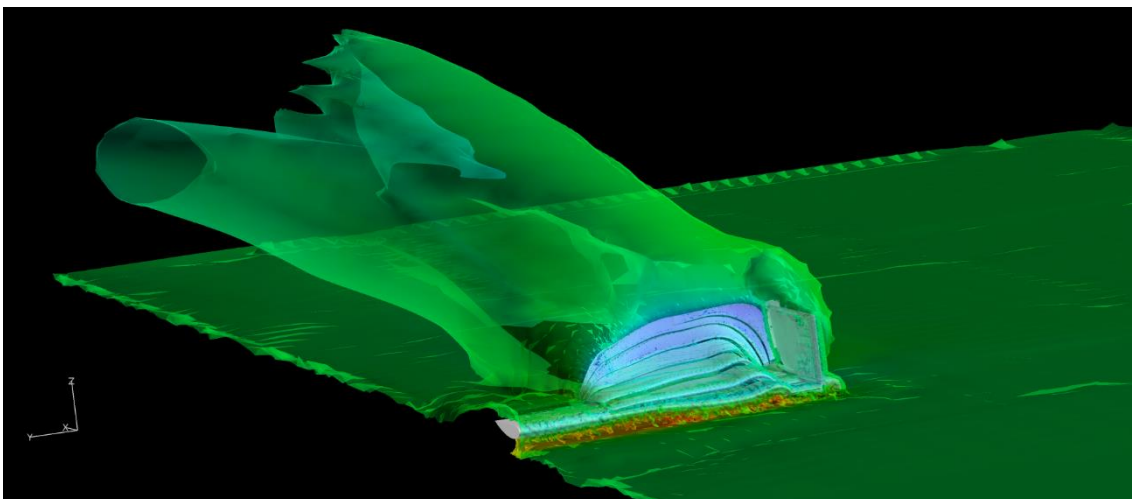


Fig. 5.36 Vista general de la vorticitat de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia

Bé, doncs a primera vista no s'aprecien gaires diferències a primera vista en comparació amb l'aleró de 2018, tot i així hi ha certs punts interessants a comentar. El primer, és

que la velocitat màxima a la que arriba l'aire és una mica més baixa que en el cas del 2018, cosa que ens indica que segurament aquest aleró genera menys càrrega aerodinàmica.

Tot i així es mantenen els vòrtexs que veiem en el primer cas amb només una petita diferència molt lògica. Com que al 2019 es van eliminar els apèndix aerodinàmics que portaven els alerons al 2018, pel que fa a aquestes últimes imatges es pot veure que, el clar vòrtex que genera o generava el primer aleró se suavitza una mica i per tant podem dir que al eliminar aquesta part de l'aleró es redueix una mica l'aire brut que genera. Aquest efecte es veu molt clar en la imatge de la vorticitat, en la figura 5.37, es veu flux molt més net i fi que no pas en el primer cas de tots, on es veu un flux molt irregular i brut.

A part d'això, el comportament general és bastant similar, es genera el vòrtex Y250 de la mateixa forma, però sembla que a aquest aleró li costarà més apartar lateralment el flux d'aire de l'impacte directe a la roda. En la propera simulació veurem si és així o no.

5.4.4. Aleró davanter de la temporada 2019 amb roda

Ara, passarem a observar i analitzar els resultats de les simulacions de l'aleró davanter de la temporada 2019 incloent la roda davantera:

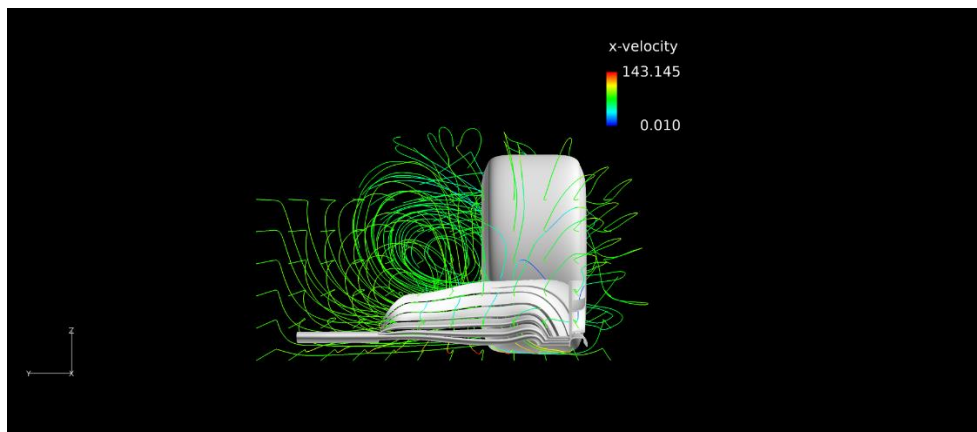


Fig. 5.37 Vista frontal de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia

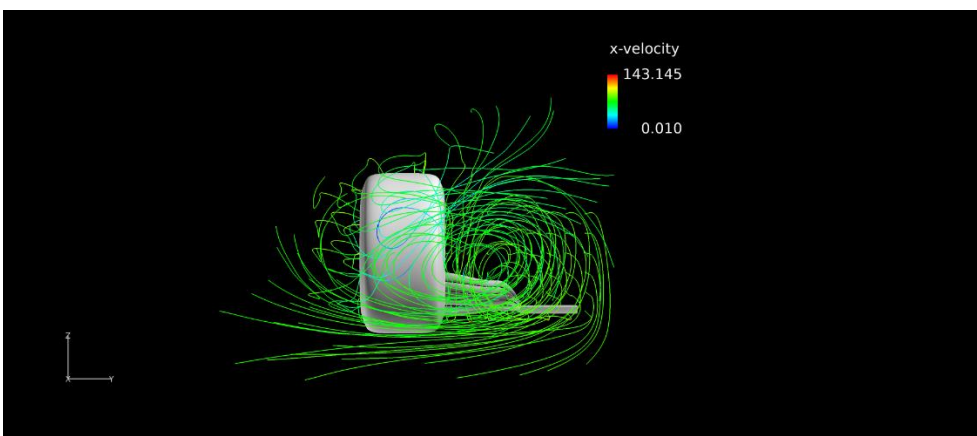


Fig. 5.38 Vista posterior de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia

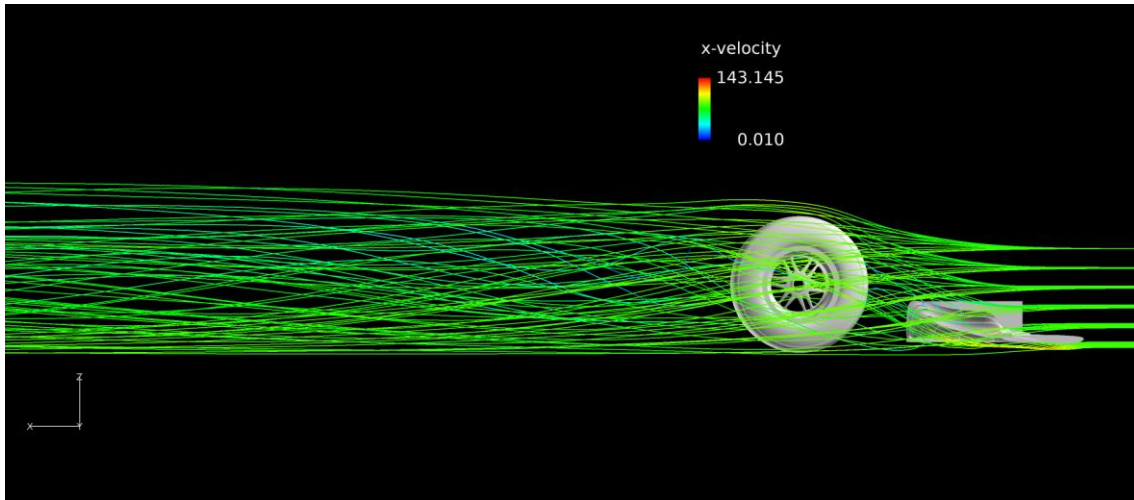


Fig. 5.39 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia

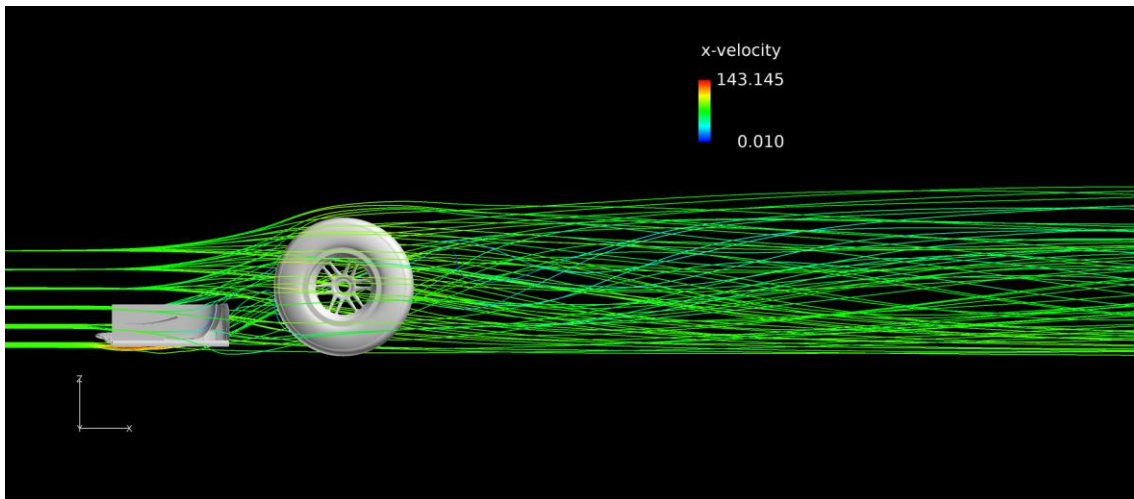


Fig. 5.40 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia

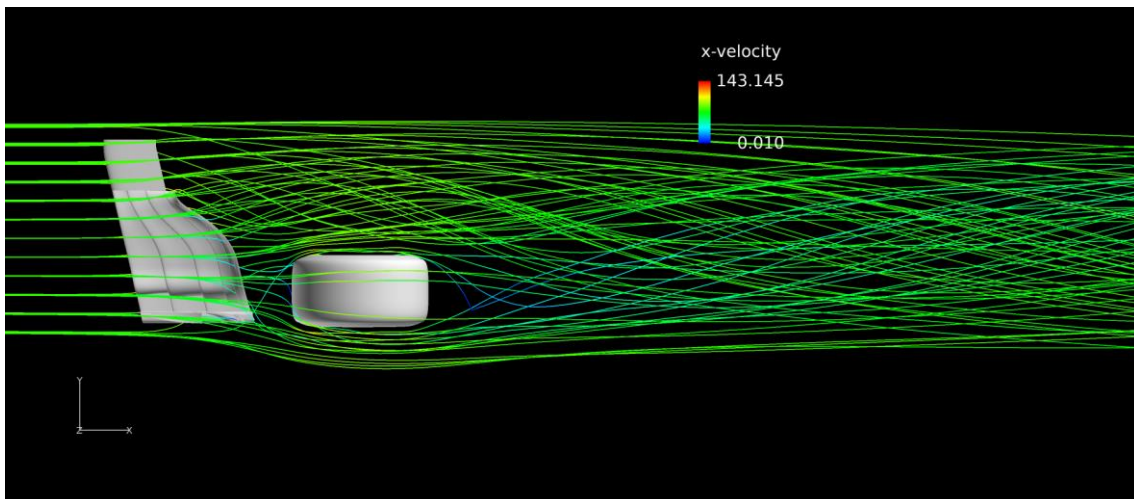


Fig. 5.41 Vista superior de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia

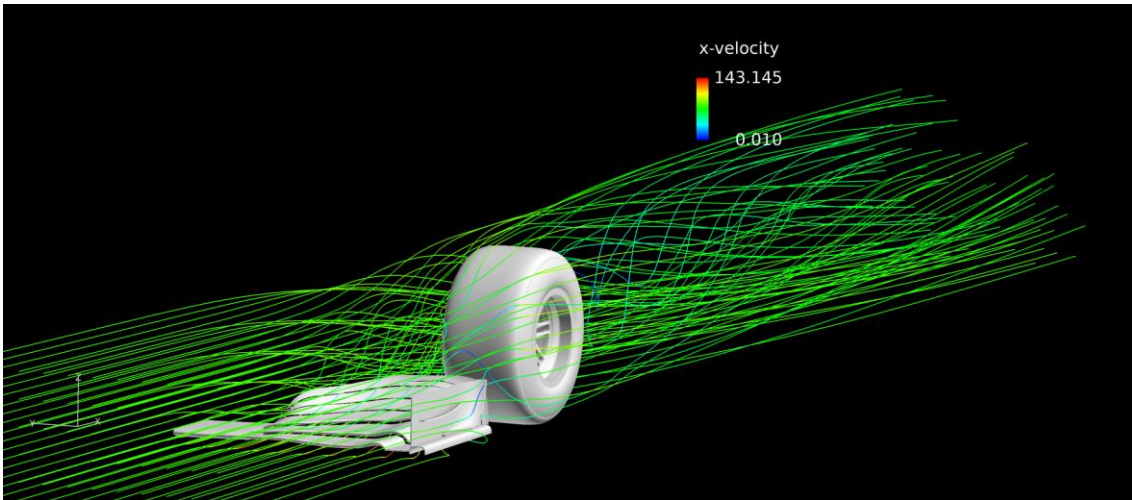


Fig. 5.42 Vista general de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia

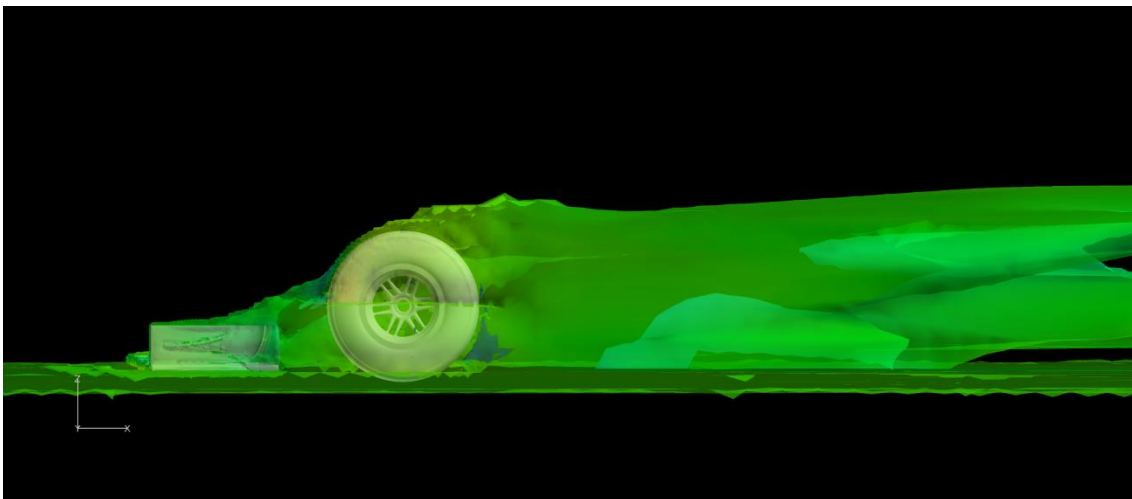


Fig. 5.43 Vista lateral de la vorticitat de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia

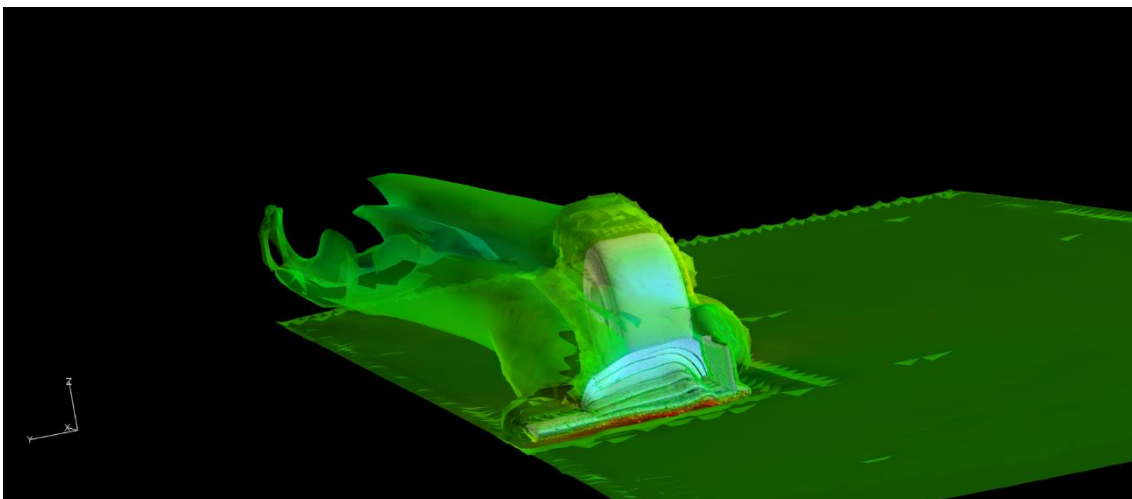


Fig. 5.44 Vista general de la vorticitat de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia

Tal i com es pot veure en les diferents imatges, es veu un comportament similar al de l'aleró de 2018 amb roda, però s'aprecien algunes diferències interessants que es comenten a continuació:

En primer lloc, si mirem a la llegenda pel que fa a l'aleró de 2018 amb roda, tenim que la velocitat més baixa en l'eix x, és a dir l'eix longitudinal, és negativa, en aquest cas de -22 m/s, això significa que en algun moment en alguna zona, el flux d'aire va enrere enlloc d'endavant. En canvi, si ens hi fixem en la última simulació de 2019. Això ja és un indicador de que realment es generava més aire turbulent durant l'any 18. De totes formes, a nivell visual s'aprecia una certa diferència en les diferents imatges, sobretot en les de vorticitat, es veu un flux més net en aquesta última simulació.

Un altre fet que confirma aquesta teoria, és el fet que la segona simulació feta (aleró de 2018 i roda) genera una mica més de resistència a l'aire, probablement pel fet que es genera més aire turbulent i és un flux d'aire complex.

En segon lloc, que l'aire impacte més directament en el pneumàtic, ja que veiem com la bombolla de recirculació és més gran que en el cas de 2018. Segurament el fet d'eliminar els *turning vanes*, fa que aquest fet s'accentui.

A part d'això ocorren els mateixos fenòmens que en el primer cas: es genera el vòrtex Y250, la roda segueix creant una estela d'aire realment important, etc.

6. Conclusions

Tal i com hem vist, l'aerodinàmica és tot un món, per tant aquest treball ha tractat d'explicar els fonaments més importants d'aquest món i aplicar-los al món de la competició automobilística, sobretot a la Fórmula 1, la categoria reina per excel·lència en el *motorsport*. Intentant veure aquests coneixements que s'han vist aplicats també a les simulacions CFD que s'han fet posteriorment. Veient doncs els resultats podem dir que el 2018 teníem unes geometries molt complicades, i per tant un fluxos d'aire molt complexos i inclús més difícils d'analitzar posteriorment. Aquest fet, per una banda és beneficiós i per l'altre no tant.

Per una banda, veiem que en els mapes de velocitats de l'aleró de la temporada 2018, la diferència entre la velocitat més alta i la més baixa és més gran que en el cas de l'aleró de 2019, cosa que ens indica que s'ha perdut càrrega aerodinàmica d'un any respecte el següent, aproximadament s'ha perdut un 3% de càrrega aerodinàmica en l'aleró davanter, ja que la diferència de velocitats entre una simulació i l'altre és d'un 1,5% aproximadament (tenint en compte que en la fórmula per calcular el coeficient de *lift* la velocitat apareix al quadrat), però a més com és només la meitat de l'aleró cal multiplicar aquest valor per dos, per tant finalment s'arriba a aquest 3% de pèrdua de càrrega aerodinàmica d'un any a l'altre. La pregunta és doncs: es pot recuperar la càrrega aerodinàmica perduda jugant amb la resta de l'aerodinàmica i xassís del cotxe? Doncs bé, amb aquest treball no podem saber la resposta exacte, ja que només s'ha analitzat l'aleró davanter. De totes formes, veient els temps per volta dels Gran Premis de 2018 i 2019, podem extreure algunes conclusions interessants:

Com es pot veure en la figura 6.1, en 13 dels 21 Gran Premis que té la temporada de F1 de 2019 s'ha superat el temps de *pole* de l'any 2018 i en 14 dels 21 GPs també s'ha aconseguit el record absolut de la volta més ràpida del circuit. A més, d'aquests 13 circuits, on s'ha millorat més és en els circuits d'alta càrrega aerodinàmica. Està clar, que d'un any a l'altra els equips hauran millorat les prestacions del seu motor, però també podem afirmar sense por a equivocar-nos que l'aerodinàmica ha jugat un factor important també i per tant, tot i que durant l'any 2019 l'aleró davanter s'ha simplificat, els equips han aconseguit revertir aquest canvi i recuperar punts de càrrega en altres parts del cotxe.

2019 vs 2018 - CALIFICACIÓN (Comparativa mejores vueltas)												
* Barra en rojo indica que en 2019 NO se consigue mejorar lo realizado en la temporada anterior												
País	GP	Localización - Circuito	2018 Mejor tiempo				2019 Mejor tiempo				Diferencia (segundos)	Diferencia (%)
			Tiempo	Piloto	Goma	Record	Tiempo	Piloto	Goma	Record		
Australia	Melbourne		1:21.164	HAM	US		1:20.486	HAM	C4	Si	0,678	0,835
Barein	Sakhir		1:27.958	VET	SS		1:27.866	LEC	C3	Si	0,092	0,105
China	Shangai		1:31.085	VET	US	Si	1:31.547	BOT	C4		-0,452	-0,496
Azerbaiyan	Baku		1:41.498	VET	US		1:40.495	BOT	C4	Si	1,003	0,988
Espanya	Montmeló		1:16.173	HAM	SS		1:15.406	BOT	C3	Si	0,767	1,007
Mónaco	Mónaco		1:10.810	RIC	HS		1:10.166	HAM	C5	Si	0,644	0,909
Canadà	Gilles Villeneuve		1:10.764	VET	HS		1:10.240	VET	C5	Si	0,524	0,740
Francia	Paul Ricard		1:30.029	HAM	US		1:28.319	HAM	C4	Si	1,710	1,899
Austria	Red Bull Ring		1:03.130	BOT	US		1:03.003	LEC	C4	Si	0,127	0,201
UK	Silverstone		1:25.892	HAM	S		1:25.093	BOT	C3	Si	0,799	0,930
Alemania	Hockenheim		1:11.212	VET	US	Si	1:11.767	HAM	C4		-0,555	-0,779
Hungria	Hungaroring		En majada	HAM			1:14.572	VER	C4	Si	No aplica	No aplica
Bèlgica	Spa-Francorchamps		1:41.501	HAM	SS	Si	1:42.519	LEC	C3		-1,018	-1,002
Italia	Monza		1:19.119	RAI	SS	Si	1:19.307	LEC	C4		-0,188	-0,237
Singapur	Marina Bay		1:36.015	HAM	HS	Si	1:36.217	LEC	C5		-0,202	-0,210
Rusia	Sochi		1:31.387	BOT	HS	Si	1:31.628	LEC	C4		-0,241	-0,264
Japón	Suzuka		1:27.760	HAM	SS		1:27.064	VET	C3	Si	0,696	0,793
Mèxic	Hermanos Rodríguez		1:14.759	RIC	HS		1:14.758	VER *	C4	Si	0,001	0,001
USA	Austin		1:32.237	HAM	US		1:32.029	BOT	C4	Si	0,208	0,225
Brasil	Interlagos		1:07.281	HAM	SS	Si	1:07.508	VER	C3		-0,227	-0,337
Abu Dabi	Yas Marina		1:34.794	HAM	HS		1:34.779	HAM	C5	Si	0,015	0,016
MEDIA											0,219	0,266

Fig. 6.1 Taula resum de tots els temps de volta de pole position l'any 2018 i 2019 Font: www.flsmdrug.com (2021)

Tot i així, s'ha vist que realment la diferència entre els dos alerons és menor a la que em pensava en un principi, semblava que hi hagués una diferència molt gran però el comportament és bastant similar. Molt probablement si s'analitza tot el monoplaça sencer la diferència en tots els aspectes s'accentuaria.

Per altra banda, podem dir el conjunt d'aleró davanter 2019 i les rodes davanteres generen menys aire brut que durant el 2018, sobretot degut a la simplificació de l'aleró que es deriva d'eliminar els *turning vanes*. En conseqüència l'aire que travessa el cotxe de punta a punta i que finalment es desprèn d'ell en última instància és una mica menys turbulent. De totes formes, tot i que aquest aire brut s'hagi aconseguit limitar una mica, segueix sent un factor determinant, ja que els pilots s'han seguit queixant aquests últims dos anys de la nova normativa de rebre massa aire brut del cotxe que estan perseguint. Per tant, és un aspecte en el qual la FIA i la Formula 1 hi haurà de seguir treballant. Veurem doncs si amb la nova i revolucionària normativa de 2022 s'aconsegueix solucionar aquest problema d'una vegada per totes.

7. Bibliografia

- [1] MARCA [en línea] Madrid: MARCA, 2020. [Consulta: 15 de gener de 2021] Disponible a: <https://www.marca.com/motor/formula1/palmares.html>
- [2] AERODINAMICAF1 [en línea] Madrid: AERODINAMICAF1, 2019. [Consulta: 21 d'abril de 2021] Disponible a: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/11/el-aleron-delantero-en-la-formula-1-partes/>
- [3] AERODINAMICAF1 [en línea] Madrid: AERODINAMICAF1, 2019. [Consulta: 21 d'abril de 2021] Disponible a: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/11/el-aleron-delantero-en-la-formula-1-funcionamiento/>
- [4] CFD-ONLINE [en línea] Estats Units: CFD-ONLINE, 2015. [Consulta: 9 de maig] Disponible a: https://www.cfd-online.com/Wiki/Spalart-Allmaras_model
- [5] WIKI2 [en línea] Estats Units: WIKI2, 2021. [Consulta: 9 de maig] Disponible a: https://wiki2.org/en/Turbulence_modeling
- [6] EFEUNO [en línea] Madrid: EFEUNO, 2021. [Consulta: 15 de maig] Disponible a: <https://efe.uno/f1-basica/el-efecto-suelo/>
- [7] FCM [en línia] Mèxic, 2012. [Consulta: 17 de maig] Disponible a: http://fcm.ens.uabc.mx/~fisica/FISICA_II/APUNTES/VISCOSIDAD.htm
- [8] Joseph Kratz. Race Car Aerodynamics Designing for Speed. Cambridge: Bently Publishers, 1995. ISBN: 0837601428.

8. Índex de figures

Capítol 3

Fig. 3.1 Giuseppe Farina amb el seu Alfa Romeo a la temporada 1950 Font: www.motorpasion.com (2021).....	7
Fig. 3.2 Lewis Hamilton amb el seu Mercedes a la temporada 2020 al Gran Premi de Monza Font: www.eurosport.com (2021)	7
Fig. 3.3 Flux d'aire al voltant d'un perfil alar sustentador Font: www.fuelwasters.com (2021)	8
Fig. 3.4 Diagrama de les forces aerodinàmiques en un vehicle Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz	9
Fig. 3.5 Lewis Hamilton durant els entrenaments de pretemporada al Circuit de Barcelona-Catalunya Font: www.motorsportmagazine.com (2021).....	10
Fig. 3.6 Lotus 79 Mk.IV vist des de sota Font: www.forocoches.com (2021)	11
Fig. 3.7 Ford Falcon Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz	11
Fig. 3.8 Ryan Blaney i Erik Jones competint a la NASCAR Font: www.deadline.com (2021)	12
Fig. 3.9 El Toyota número 7 corrent a les 24h de Le Mans Font: www.motorsport.com (2021)	12
Fig. 3.10 Lando Norris al Circuit de Barcelona-Catalunya als test de pretemporada de 2020 Font: www.motorsport.com (2021).....	13
Fig. 3.11 Streamlines al voltant d'un perfil alar sustentador Font: www.researchgate.net (2021)	14
Fig. 3.12 Representació de la capa límit sobre una superfície plana Font: www.grc.nasa.com (2021).....	14
Fig. 3.13 Comparativa entre flux laminar i turbulent Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz	15
Fig. 3.14 Diferència de viscositat entre l'aigua i la mel Font: www.cocinadelirante.com (2021)	16
Fig. 3.15 Diagrama de flux d'un fluid entre una paret fixa i l'altre mòbil Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz (2021).....	16
Fig. 3.16 George Gabriel Stokes Font: www.wikipedia.org (2021)	16

Fig. 3.17 Desenvolupament de la capa límit sobre una xapa plana Font: www.thermal-engineering.org (2021)	17
Fig. 3.18 Representació del flux d'aire al voltant d'un cotxe de carrer Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz	17
Fig. 3.19 Representació de l'efecte Venturi Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz	18
Fig. 3.20 Experiment sobre l'efecte Coanda Font: www.mallacoanda.com (2021)	19
Fig. 3.21 Representació de la creació d'un vortex Font: www.youtube.com (2021) ...	20
Fig. 3.22 Simulació del flux d'aire a un aleró davanter d'un monoplaça de F1 Font: www.tianyizf1.wordpress.com (2021)	20
Fig. 3.23 Efecte Magnus generat per un cilindre girant sobre ell mateix Font: www.aerodinamicaf1.com (2021)	21
Fig. 3.24 Efecte Magnus generat per un cilindre girant sobre ell mateix Font: www.aerodinamicaf1.com (2021)	21
Fig. 3.25 Representació de l'experiment de la goma Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz	22
Fig. 3.26 Gràfica de la força de fricció de la goma respecte el seu desplaçament Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz.....	22
Fig. 3.27 Alex Albon blocant la roda interior en el moment de la frenada Font: www.motorlat.com (2021)	23
Fig. 3.28 Relació entre el coeficient de lift, la velocitat de gir màxima i el radi de la corba Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz	24
Fig. 3.29 Efecte del vent paral·lel i inclinat en un ciclista Font: www.enterpriseai.news (2021)	25
Fig. 3.30 Comparació de cg i cp entre un vehicle de carrer i un cotxe de competició Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz (2021).....	25

Capítol 4

Fig. 4.1 Aleró davanter del Ferrari de 2019 Font: www.formula1.com (2021)	26
Fig. 4.2 Vortexs creats per un aleró del Ferrari de 2018 Font: www.twitter.com (2021)	27
Fig. 4.3 Parts d'un aleró davanter de Formula 1 Font: www.formula1.com (2021).....	28
Fig. 4.4 Turning vanes de l'aleró davanter Font: www.motorsport.com (2021)	28

Fig. 4.5 Comparació entre el Ferrari de 2018 i el de 2019 Font: www.formula1.com (2021)	29
---	----

Capítol 5

Fig. 5.1 Vista posterior de la geometria de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia	31
Fig. 5.2 Vista frontal de la geometria de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia	31
Fig. 5.3 Geometria partida per la meitat de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia.....	32
Fig. 5.4 Geometria del conjunt llanta i pneumàtic Font: creació pròpia	32
Fig. 5.5 Geometria de la llanta Font: creació pròpia	33
Fig. 5.6 Geometria del pneumàtic Font: creació pròpia	33
Fig. 5.7 Geometria de la roda convertida a una sola peça Font: creació pròpia.....	34
Fig. 5.8 Geometria en correcte estat de l'aleró del 2018 al Hypermesh Font: creació pròpia.....	35
Fig. 5.9 Mallat inicial de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia.....	35
Fig. 5.10 Error en al mallat (la malla està oberta) Font: creació pròpia.....	36
Fig. 5.11 Creació d'elements per tancar la malla Font: creació pròpia.....	36
Fig. 5.12 Nodes de la malla mal connectats entre si Font: creació pròpia	37
Fig. 5.13 Bona connexió dels nodes de la malla Font: creació pròpia	37
Fig. 5.14 Malla final de l'aleró de 2018 al Hypermesh Font: creació pròpia	38
Fig. 5.15 Malla final de l'aleró de 2019 al Hypermesh Font: creació pròpia	38
Fig. 5.16 Malla final de la roda al Hypermesh Font: creació pròpia.....	39
Fig. 5.17 Geometria de la roda al Virtual Wind Tunnel Font: creació pròpia.....	41
Fig. 5.18 Geometria del conjunt aleró 2018 - roda al Virtual Wind Tunnel Font: creació pròpia.....	42
Fig. 5.19 Diferència de col·locació de l'aleró entre 2018 i 2019 Font: creació pròpia ..	42
Fig. 5.20 Vista frontal de les streamlines de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia.....	43
Fig. 5.21 Vista posterior de les streamlines de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia	43
Fig. 5.22 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia	44
Fig. 5.23 Vista general de les streamlines de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia.....	44
Fig. 5.24 Vista general de la vorticitat de l'aleró de 2018 Font: creació pròpia.....	44
Fig. 5.25 Vista frontal de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia.....	46
Fig. 5.26 Vista posterior de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia.....	46

Fig. 5.27 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia.....	47
Fig. 5.28 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia.....	47
Fig. 5.29 Vista superior de les streamlines de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia.....	47
Fig. 5.30 Vista lateral de la vorticitat de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia.....	48
Fig. 5.31 Vista general de la vorticitat de l'aleró de 2018 amb roda Font: creació pròpia.....	48
Fig. 5.32 Vista frontal de les streamlines de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia.....	49
Fig. 5.33 Vista posterior de les streamlines de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia.....	49
Fig. 5.34 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia.....	50
Fig. 5.35 Vista general de les streamlines de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia.....	50
Fig. 5.36 Vista general de la vorticitat de l'aleró de 2019 Font: creació pròpia.....	50
Fig. 5.37 Vista frontal de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia.....	51
Fig. 5.38 Vista posterior de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia.....	51
Fig. 5.39 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia.....	52
Fig. 5.40 Vista lateral de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia.....	52
Fig. 5.41 Vista superior de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia.....	52
Fig. 5.42 Vista general de les streamlines de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia.....	53
Fig. 5.43 Vista lateral de la vorticitat de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia.....	53
Fig. 5.44 Vista general de la vorticitat de l'aleró de 2019 amb roda Font: creació pròpia.....	53

Capítol 6

Fig. 6.1 Taula resum de tots els temps de volta de pole position l'any 2018 i 2019 Font: www. flsmydrug.com (2021).....	55
	60

9. Índex de taules

Capítol 5

Taula 5.1 Dades del mallat final de les tres geometries analitzades.... **¡Error! Marcador no definido.**

10. Índex d'equacions

Capítol 3

Equació 3.1 Relació entre força, velocitat i viscositat d'un fluid Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz	15
Equació 3.2 Definició del nombre de Reynolds	16
Equació 3.3 Equació de Bernoulli que defineix la relació entre la velocitat i la pressió d'un fluid Font: Race Car Aerodynamics de Joseph Kratz	17