

Treball de Fi de Grau



Disseny i anàlisi comparatiu d'un doble difusor respecte un difusor convencional de Formula1

Memòria

Setembre 2016

Autor: Esteve Baraut Marsal

Director: Enric Trillas Gay

Resum

Un difusor d'un monoplaça de Formula 1 és un dispositiu aerodinàmic que genera molta adherència a l'asfalt a canvi de molt poca pèrdua de velocitat degut a la fricció amb l'aire. Esdevé així un dispositiu aerodinàmic fonamental per a qualsevol vehicle de competició. Un doble difusor és un dispositiu més avançat tècnicament respecte del difusor, atorgant així encara una major adherència a l'asfalt respecte el difusor convencional.

Aquest treball té com a finalitat principal posar de manifest si la superioritat del doble difusor respecte el convencional és real i exposar-ne els seus avantatges i inconvenients a través d'un anàlisi comparatiu. En l'anàlisi comparatiu s'empraran dades extretes de les simulacions d'ambdós dispositius aerodinàmics fetes a partir de programari que aplica la dinàmica de fluids computacional (*CFD*).

El treball és útil tant per aprendre com utilitzar bé el programari vinculat com per comprendre els fenòmens fluidodinàmics que fan que el dispositiu difusor treballi de la manera que ho fa en la realitat. Això és d'aquesta manera ja que prèviament a analitzar i fer l'anàlisi comparatiu d'ambdós dispositius ja esmentats, es realitzarà una recerca d'aquell perfil de difusor el més òptim possible a través dels mètodes de *CFD*. Dit perfil servirà en acabat com a punt de partida per obtenir dos models tridimensionals de difusor amb les característiques esmentades i poder establir entre ells una comparació adient.

Per finalitzar s'exposaran els avantatges e inconvenients d'haver utilitzat la dinàmica de fluids computacional (*CFD*) per a l'elaboració del projecte en clau de termes econòmics i ambientals.

Sumari

RESUM	2
SUMARI	4
1. GLOSSARI	7
2. INTRODUCCIÓ	9
2.1. Objectius del projecte	10
2.2. Abast del projecte	10
3. CONCEPTES TEÒRICS PER ENTENDRE LA F1	13
3.1. Flux laminar i flux turbulent.....	13
3.2. Capa límit.....	15
3.2.1. Regions de la capa límit	16
3.3. Forces vinculades a l'aerodinàmica del monoplaça.....	18
3.3.1. Força de resistència a l'avanç o <i>drag</i>	19
3.3.2. Força de sustentació o <i>lift</i>	20
3.3.3. Eficiència aerodinàmica.....	21
3.4. Principi de Bernoulli	21
3.4.1. L'equació de Bernoulli, la geometria i les forces aerodinàmiques	22
3.5. Despreniment de la capa límit.....	24
3.6. El dispositiu difusor.....	26
3.6.1. El doble difusor	27
4. OBTENCIÓ I SIMULACIÓ DELS MODELS	31
4.1. Conceptualització del model a simular.....	31
4.2. Modus Operandi	32
4.2.1. Geometria de partida i simplificacions	33
4.2.2. El mallat	34
4.2.3. Condicions de contorn	36
4.2.4. Solució del problema	38
4.2.5. Post-procés.....	38
4.3. Simulacions	39
4.3.1. Simulació 2D: primer disseny	39
4.3.2. Simulació 2D: segon disseny.....	45
4.3.3. Simulació 2D: tercer disseny	50
4.3.4. Simulació 2D: quart disseny	51
4.3.5. Simulació 2D: cinquè disseny	53

4.3.6. Simulació 3D: difusor convencional	55
4.3.7. Simulació 3D: doble difusor	59
4.4. Anàlisi comparatiu	69
5. PLANIFICACIÓ I COST DEL PROJECTE _____	70
5.1. Planificació	70
5.2. Cost del projecte	71
6. IMPACTE MEDIAMBIENTAL _____	74
CONCLUSIONS _____	76
AGRAÏMENTS _____	77
REFERÈNCIA BIBLIOGRÀFIQUES _____	78

1. Glossari

Símbols

A	Àrea característica de la geometria d' anàlisi [m]
C_D	Coeficient aerodinàmic de resistència a l'avanç o de <i>drag</i>
C_L	Coeficient aerodinàmic de sustentació o de <i>lift</i>
δ	Gruix de la capa límit [m]
F_D	Força de resistència a l'avanç o <i>drag</i> [N]
F_L	Força de sustentació o <i>lift</i> [N]
g	Acceleració de la gravetat [m/s^2]
L	Dimensió característica [m]
m	Massa [kg]
U	Velocitat del fluid [m/s]
ν	Viscositat cinemàtica [m^2/s]
μ	Viscositat dinàmica [$Kg/(m \cdot s)$]
Re	Número de Reynolds

Sigles, acrònims i abreviatures

<i>CAD</i>	Disseny assistit per ordinador (<i>Computer Aided Design</i>)
<i>CFD</i>	Dinàmica Computacional de Fluids (<i>Computational Fluid Dynamics</i>)
<i>F1</i>	Fórmula 1
<i>FIA</i>	Federació Internacional de l'Automobilisme
<i>VC</i>	Volum de control

Tecnicismes

Carga aerodinàmica o *downforce*: termes usats per referir-se a la força de sustentació negativa i que per tant atorga al vehicle adherència a l'asfalt.

Flux extern: flux d'un fluid que circula per una regió no confinada.

Flux intern: flux d'un fluid que circula per una regió limitada per parets

Monoplça: paraula que s'utilitzarà per referir-se exclusivament al vehicle motoritzat que participa en la competició de Fórmula 1.

Resistència aerodinàmica: terme d'ús habitual per referir-se a la força de resistència a l'avanç experimentada per un cos que circula per un fluid.

Resistència de pressions: terme d'ús habitual per referir-se a aquella fracció de la força de resistència a l'avanç generada per l'existència d'un gradient de pressions en l'objecte d'estudi.

2. Introducció

La Fórmula 1 és un esport de competició on no tan sols competeixen els pilots, sinó també totes aquelles persones que materialitzen el vehicle per tal de què el pilot pugui vèncer en cursa. Tan mecànics com enginyers treballen duríssim per aconseguir un monoplaça amb millors prestacions que el del seu veí, però, què entenem per millors prestacions?

A primera vista, podríem pensar que per anar més ràpid només ens cal un motor que ofereixi més potència, però la realitat és que és necessari que aquest motor vagi acompanyat d'una carrosseria aerodinàmica adient que en permeti el seu màxim aprofitament gràcies a poder penetrar en el flux d'aire amb més comoditat. Una geometria que minimitzi la força de resistència a l'avanç és vital per aconseguir la màxima velocitat donada una determinada potència de motor, i, una geometria que ofereixi adherència a l'asfalt quan es penetra en el flux d'aire és necessària per adquirir la màxima velocitat en corba. En aquesta línia, i al llarg dels anys de competició, el que ha marcat la diferència a sigut l'estudi i innovacions aerodinàmics del vehicle, més que no pas la materialització d'un motor més potent. És per aquest motiu que la Fórmula 1 s'ha convertit en una disciplina tan estimada per aquells que els hi interessa la mecànica de fluids, perquè any rere any s'ha convertit en un laboratori d'investigació dinàmica i divertit d'aquest camp de la mecànica.

Les diferents escuderies compten amb diferents eines per a la innovació aerodinàmica. Aquestes són, en primer lloc, els *softwares* que simulen el comportament aerodinàmic del vehicle a través de models teòrics de la mecànica de fluids (CFD), i, en segon lloc, els túnels de vent que posen de manifest el comportament real del model quan circula a través d'un flux d'aire. Tot i així, el banc de proves definitiu del procés és la carrera, on veurem realment si les innovacions implementades afecten positivament o negativament a l'aerodinàmica.

Tant important és la mecànica de fluids en aquesta disciplina que si a través d'aquests passos s'és capaç de materialitzar una millora aerodinàmica significativa, aleshores s'obté molt d'avantatge respecte els teus rivals en la competició. Un clar exemple n'és la victòria en el campionat de 2009 de *Jenson Button* amb *Brawn GP*, escudaria guanyadora també del campionat de constructors el mateix any, gràcies a la implementació del doble difusor, dispositiu aerodinàmic el qual els va permetre guanyar mig segon cada volta respecte els altres monoplaços.

En aquest treball es pretindrà explicar el perquè *Brawn GP* es va guanyar l'apel·latiu de "*lobo en piel de cordero*". Així, en el marc del treball s'estudiarà l'aerodinàmica del difusor i es compararà amb la del doble difusor, ambdós dispositius vitals per als monoplaços de

Fórmula 1 ja que els atorguen molta adherència a l'asfalt mentre generen molt poca força de resistència a l'avanç si s'implementen degudament.

2.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte es elaborar un anàlisi que permeti comparar un difusor convencional de F1 amb un doble difusor a través de la mecànica de fluids computacional, és a dir, a través de simulacions. Es pretenen posar de manifest les diferències i semblances entre ambdós dispositius així com els avantatges i inconvenients de cadascun per tal de poder concloure si existeix una millora significativa d'un respecte l'altre.

D'altre banda, i per tal d'acomplir l'objectiu principal de la millor manera possible, apareixen els objectius secundaris, els quals són, en primer lloc, dissenyar el difusor convencional a través de la recerca del seu perfil òptim atenent-nos a les limitacions dimensionals de la FIA. En segon lloc, dissenyar el doble difusor a partir del difusor convencional ja implementat, tot transformant-lo perquè adopti les característiques de doble difusor, ja que sol d'aquesta manera es pot establir un anàlisi comparatiu vàlid. Així, el treball té com a objectiu aconseguir una parella *difusor/doble difusor* el més òptima possible per a complir les seves funcions en un monoplaça de F1.

2.2. Abast del projecte

Cal aclarir que la simulació no serveix determinar valors o paràmetres aerodinàmics d'un procés amb exactitud, però es una eina que serveix de guia per a materialitzar possibles millores en un model. Una eina més precisa és, com ja hem dit, el túnel de vent, resultats del qual s'aproximen més al comportament real del model a través del flux d'aire. Així, la primera limitació d'aquest projecte és el fet de que no s'usarà cap túnel de vent per a l'anàlisi dels models, ni tant sols es materialitzaran físicament dits models.

D'aquesta manera, la metodologia que s'emprarà per a l'anàlisi no serà afirmar que els valors obtinguts dels paràmetres en la simulació són els valors reals que pren el model quan s'utilitza en cursa, fet absurd ja que per la simulació sol disposarem del model del difusor i no pas de tot el monoplaça, sinó que serà detectar millores significatives a partir de la variació percentual de dits paràmetres.

Per altre banda, l'anàlisi a traves de la mecànica de fluids computacional no es realitzarà

únicament en 2D, sinó que també s'implementarà en 3D per ambdós tipus de difusors, fet imprescindible si el que es pretén és estudiar el comportament del doble difusor atès a que la seva geometria és irrepresentable en 2D. A més a més, el comportament obtingut del model en 3D s'acostarà més al comportament real del model ja que es tenen en compte molts més aspectes geomètrics i dimensionals que en l'anàlisi 2D.

3. Conceptes teòrics per entendre la F1

En aquest apartat del treball es pretén donar tota la informació teòrica possible per tal de què qualsevol persona sense coneixements de la mecànica de fluids pugui arribar a entendre quins fenòmens es donen i quines conseqüències tenen en el pas a alta velocitat d'un monoplaça a través del flux d'aire present en l'ambient. Els conceptes exposats seran els necessaris i suficients per entendre com haurem de procedir tan en la interpretació dels resultats de simulació com en el disseny dels difusors per tal d'explotar al màxim el seu rendiment en benefici de la competició.

3.1. Flux laminar i flux turbulent

La determinació d'aquests dos règims de flux es deguda a una famosa experimentació duta a terme per l'enginyer i físic irlandès *Osborne Reynolds*. *Reynolds* va dur a terme una experimentació per verificar si les característiques d'un flux amb un determinat fluid podien veure's alterades per una modificació de les propietats físiques de dit fluid.

Per fer-ho va realitzar un muntatge que presentava una canonada per on hi circularia el fluid d'estudi, i, en el punt central d'aquesta va situar-hi un tub que desprengués tinta per tal que el comportament dinàmic del fluid d'estudi es fes visual.

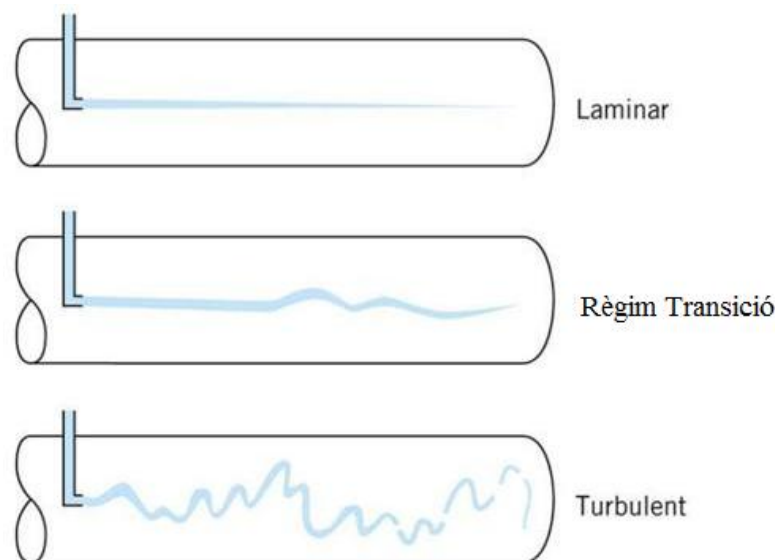


Figura 1. Representació de l'experimentació de *Reynolds*.

Primer que tot *Reynolds* va observar com la tinta circulava de forma molt ordenada i gens caòtica, cosa que indicava que així també ho feia el fluid d'estudi. En anar variant la

velocitat del fluid d'estudi a través d'una vàlvula situada al final de la canonada i arribats a cert punt, la tinta va començar a presentar símptomes d'inestabilitat, petites fluctuacions que indicaven que en augmentar més la velocitat es passaria a un règim desordenat i caòtic del fluid d'estudi tal i com mostra la figura 1.

El primer règim del flux és el règim laminar, i les seves principals característiques són que el moviment del fluid és lent i viscos, les variacions del flux són suaus, no existeix una barreja significativa entre les partícules properes entre sí i que els efectes d'inèrcia són negligibles mentre els efectes viscosos són rellevants.

El tercer règim és el règim turbulent, i les seves característiques són la presència de moviment amb fortes fluctuacions, moviment caòtic de les partícules del fluid que varia de forma irregular, les forces viscoses són dèbils enfront les inercials que són rellevants i les propietats presenten variacions aleatòries amb el temps i l'espai, per tant es descriuen mitjançant promitjos estadístics.

El règim d'entremig és el règim de transició, i es un règim on el flux presenta propietats a cavall dels dos règims anteriors. És per això un règim difícil d'estudiar ja que és frontera entre dos comportaments clarament diferenciats. [1]

Val a dir que no tan sols la velocitat del fluid és determinant sobre el règim de flux, també ho són altres paràmetres físics com per exemple l' escala de longitud del camp del flux del problema d'estudi, que en el cas de l'experimentació de *Reynolds* correspon amb el diàmetre de la canonada principal. Tan és així que, en primera instancia en fer variar la velocitat del fluid, *Reynolds* no va poder observar un canvi de règim del fluid d'estudi de laminar a turbulent atès a què el diàmetre de la canonada utilitzada era massa petit.

La necessitat de determinar en quin tipus de règim es troba un flux va portar a *Reynolds* a determinar el que es coneix com a *número de Reynolds (Re)*, el qual és adimensional i ens indicarà si un flux es troba en règim turbulent o laminar en funció dels paràmetres físics que afecten al mateix. Això és així, ja que, com hem dit, no tant sols la velocitat afecta al règim del flux, també ho fa l' escala de longitud del camp del flux o dimensió característica (L) i la viscositat cinemàtica (ν).

$$Re = \frac{U \cdot L}{\nu} \quad (\text{Eq.1})$$

A través del càlcul d'aquest número podem establir en quin règim es troba qualsevol flux. El flux serà laminar per a nombres de *Reynolds* inferiors a 2100, turbulents per nombres superiors a 10 000, i, en règim de transició per valors de *Reynolds* que es trobin entremig

d'ambdós citats.

Els conceptes de flux laminar i turbulent són molt importants per tal de comprendre bé certs fenòmens que afecten l'aerodinàmica d'un monoplaça de F1, sobretot per l'interacció que hi ha entre el tipus de flux i els seus efectes sobre la capa límit, i per tant, sobre les forces que es donen en el vehicle, conceptes que es treballaran posteriorment.

3.2. Capa límit

Si es té un flux d'un fluid amb una certa velocitat (U) que es destorbat per la presència d'un sòlid, fruit de la interacció es produeix un gradient de velocitats del flux, fenomen que es coneix com a capa límit. Aquest gradient de velocitats és degut al fenomen físic de fregament entre fluid i sòlid, de tal manera que aquelles partícules de fluid més properes al sòlid es veuran alentides mentre que aquelles suficientment llunyanes al fluid no patiran els efectes de fregament d'aquesta interacció. Tot aquest gruix en el qual els efectes de fregament són presents formen la regió coneguda com la capa límit. Si ens atenem a la condició de no lliscament en les partícules directament exposades al sòlid, podem definir el *gruix de la capa límit* (δ), que compren la regió del flux en que la velocitat passa de ser nul·la fins que passa a ser el 99% de la velocitat no destorbada del flux ($0,99 \cdot U$).

El gruix de la capa límit varia en funció de la distància de penetració del fluid sobre el sòlid en qüestió. En tot aquest gruix els efectes de fregament entre flux i sòlid es transmeten des de els punts de contacte fins al final de la capa límit (punt fins el qual el flux és destorbat) a través d'esforços tallants que es donen en les diferents capes del fluid que pertany a la capa límit. [2] Vegem dos exemples en cas de flux extern sobre una placa plana i flux intern en una canonada:

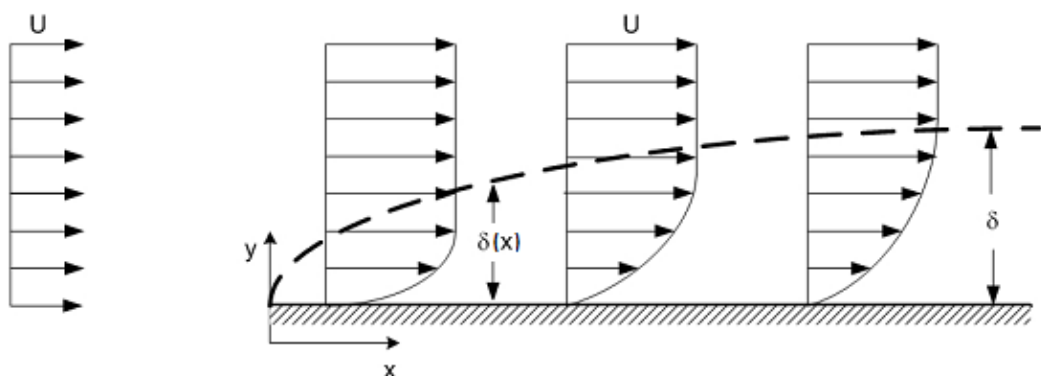


Figura 2. Perfil de capa límit que es genera per la interacció entre un flux extern i una placa plana.

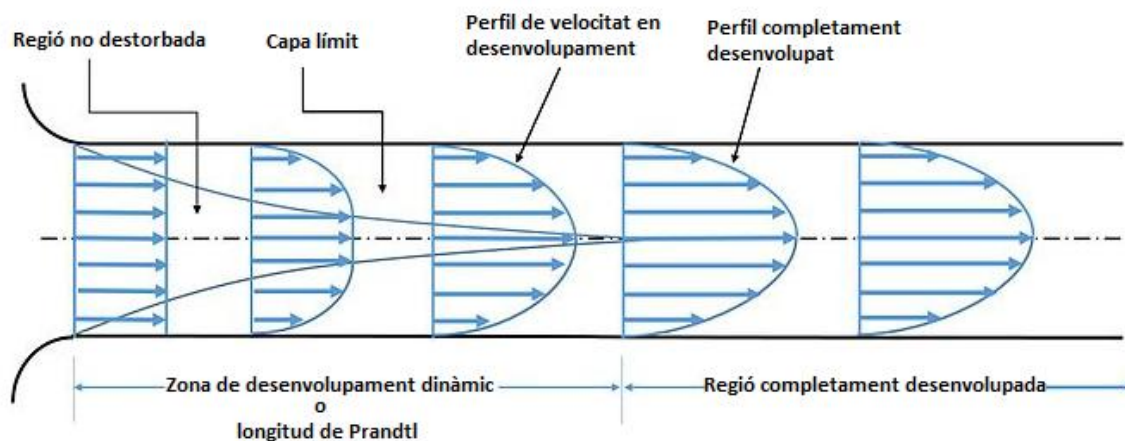


Figura 3. Perfil de capa límit que es genera quan un fluid circula per una canonada.

El perquè el gruix de la capa límit depèn de x ($\delta(x)$), és el principi de conservació de la massa entre l'entrada i la sortida del volum de control. Atès a que la velocitat mitjana del flux disminueix en la capa límit, la seva secció de pas ha d'augmentar segons la següent expressió:

$$\sum_i (A_i \cdot U_i)_{entrada} = \sum_i (A_i \cdot U_i)_{sortida} \quad (\text{Eq.2})$$

3.2.1. Regions de la capa límit

Si entrem en més detall en la capa límit, podem dividir aquesta en tres zones o tipus de capa límit ben diferenciades en funció del comportament que el flux té en el seu interior. Tal i com hem explicat anteriorment, existeixen tres tipus de règims de flux, el laminar, el turbulent i el de transició. Paral·lelament, les tres zones en que es divideix la capa límit són la laminar, la turbulenta i la de transició, que es corresponen amb els tipus de règims de flux que es donen en el seu interior. Atès a que les característiques de cada règim de flux són clarament diferenciades, cada un d'ells té uns efectes diferents quan es donen en la capa límit.

Tal i com el seu règim de flux indica, en la capa límit laminar els moviments de les partícules són ordenats i les capes del fluid llisquen suaument entre sí generant forces de

cisalla petites. En aquests tipus de capa els esforços viscosos són rellevants i el gruix de la capa és relativament petit.

Per altre banda, la capa límit turbulenta els moviments de les partícules són desordenats i aleatoris, els esforços viscosos per tant no tenen rellevància però sí els inercials. El gruix de la capa límit turbulenta és major al de la capa límit laminar. Per altre banda, i dins d'aquesta capa en les regions més pròximes al sòlid, es forma una subcapa límit laminar, d'un gruix molt petit, i que presenta les característiques d'una capa límit laminar.

Els diferents tipus de capes límit poden conviure o bé no fer-ho, es a dir, poden donar-se situacions on tan sols es doni la capa límit laminar i no es desenvolupi la capa límit turbulenta, ja sigui degut a la geometria del sòlid o a la naturalesa del problema. En el cas que si que es donin ambdós tipus de capa, també apareixerà un tercer tipus, la capa límit de transició, la qual es una zona d'impàs entre la zona laminar i la turbulenta amb un comportament poc definit.

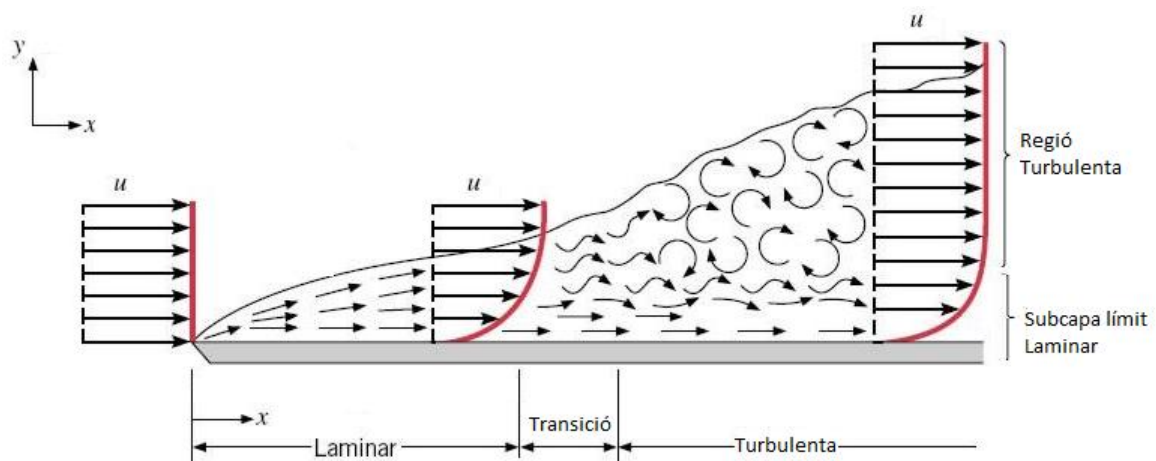


Figura 4. Pas de capa límit laminar a turbulenta d'un flux extern sobre una placa plana

En vista de les diferents zones de la capa límit ens hauríem de preguntar quin és el tipus de capa que més ens interessa per als nostres fins, ja que com hem dit cadascuna presenta un comportament diferent. Un cop sabem quin és el tipus de capa que ens interessa haurem de fer tot el que estigui a les nostres mans per tal de intentar que es doni amb predomini sobre les altres, una manera d'aconseguir-ho és a partir de la geometria del sòlid. [2] [3]

Com s'ha apuntat, en la capa límit laminar els esforços de cisalla són petits i el gruix de la capa és més petit que el de la turbulenta i per tant els efectes de fregament deguts a la interacció flux-sòlid seran menors. Però per altre banda tenir capa límit turbulenta ajuda a

que no es produeixi el fenomen de desprendiment de capa límit el qual no es gens desitjat ja que genera una zona de depressió que, en contraposició amb la zona de major pressió que hi ha abans de la zona de desprendiment, fa que es generi una força que s'oposa al sentit de l'avanç. Dit fenomen s'exposarà teòricament amb detall més endavant.

3.3. Forces vinculades a l'aerodinàmica del monoplaça

Les forces que apareixen quan un cos circula per un flux d'aire i que estan estretament vinculades a la geometria de dit cos, i per tant a l'aerodinàmica si parlem d'un vehicle, són la *força de resistència a l'avanç* o *drag*, la *força de sustentació* o *lift* i el moment de capcineig que té direcció perpendicular a les forces *drag* i *lift*. El moment de capcineig no serà objecte d'estudi per raons d'abast del projecte. D'aquesta manera podem esquematitzar les forces que seran objecte d'estudi de la següent manera:

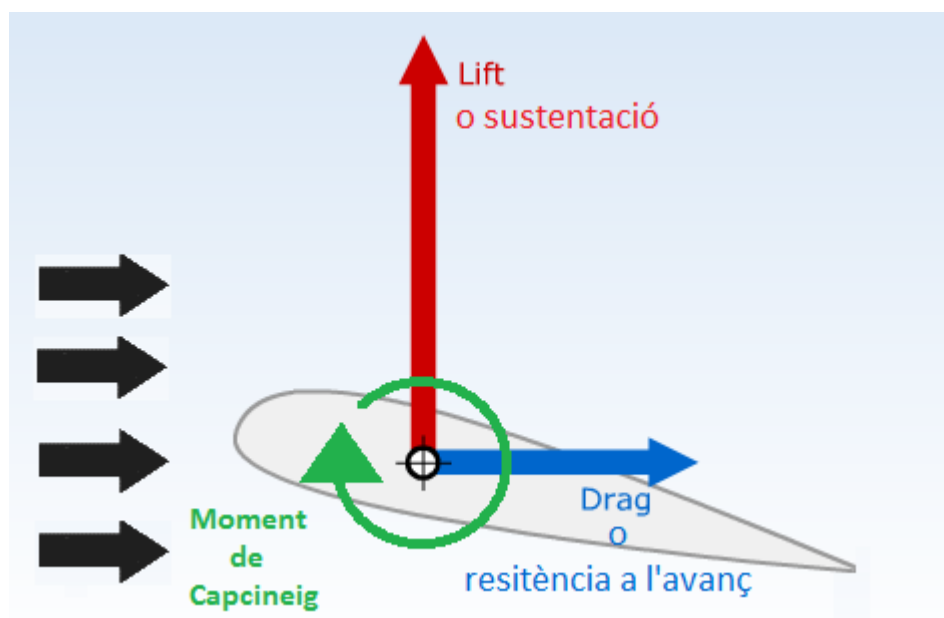


Figura 5. Representació de les forces i moment involucrats en l'estudi d'un monoplaça.

El *teorema π de Vaschy-Buckingham* estableix que donada una relació física expressable mitjançant una equació en la que estan involucrades n magnituds físiques i si dites magnituds s'expressen en termes de k quantitats físiques independents, aleshores l'equació original es pot reescriure com una equació amb una sèrie de $n-k$ nombres adimensionals construïts amb les variables originals. [2]

Tenint en compte aquest teorema i per tant aprofitant les simplificacions que l'anàlisi dimensional aporta a l'estudi experimental i teòric dels fenòmens físics, es busca definir dos coeficients o nombres adimensionals associats cadascun a una de les forces anteriorment

definides. Així anomenarem C_D al coeficient vinculat a la *força de resistència a l'avanç o drag* i C_L al coeficient vinculat a la *força de sustentació o lift*. Aquests coeficients representaran l'efectivitat de la forma d'un cos per al seu desplaçament a través de l'aire.

3.3.1. Força de resistència a l'avanç o drag

La força de resistència a l'avanç o *drag* és la força que pateix qualsevol objecte que es desplaça a través d'un flux d'aire i que, com a vector, té la direcció de la velocitat relativa del cos i sentit oposat. En el cas d'un monoplaça, és la força que s'oposa al avanç del vehicle sense tenir en compte el fregament amb el terra, i per tant, força que cal vèncer per tal d'augmentar la velocitat.

Aquesta força es deguda a dues causes diferents: a la fricció existent entre fluid i l'objecte i a la diferència de pressions existent entre la part frontal i posterior del objecte d'estudi. La diferència de pressions entre la part frontal i posterior de l'objecte d'estudi és conseqüència del fenomen de desprendiment de la capa límit, que genera una zona de depressió des del moment que es dona, i que serà explicat en detall més endavant. La força resultant que es crea de dit gradient de pressions rep el nom de *resistència de pressions*. [2]

Aplicant el *teorema π de Vaschy-Buckingham* es pot expressar la força de resistència a l'avanç de la següent manera:

$$F_D = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_D \quad [N] \quad (\text{Eq.3})$$

Les magnituds físiques involucrades són la densitat del fluid d'estudi ρ , la velocitat de desplaçament relativa entre fluid i objecte d'estudi U i la superfície característica de l'objecte d'estudi A . Aquesta expressió posa de manifest la forta dependència entre velocitat del fluid i la força de resistència a l'avanç que es desenvolupa.

Pel que fa a la superfície característica, segons la geometria del problema s'escollirà:

- L'àrea frontal de l'objecte d'estudi. Apropiaada per a cossos tancats i gruixuts com esferes, cubs, cilindres...etc.
- L'àrea de planta de l'objecte d'estudi. Apropiaada per a objectes d'estudi de poca espessor.
- L'àrea mullada. Utilitzada en nàutica per a l'estudi fluidodinàmic d'embarcacions i

que correspon a la superfície del casc de l'embarcació que està en contacte amb l'aigua.

Conegudes les variables físiques involucrades en el fenomen fluidodinàmic es pot calcular el coeficient adimensional C_D de la següent forma:

$$C_D = \frac{2 F_D}{\rho U^2 A} \quad (\text{Eq.4})$$

Cal tenir en compte que tant la força de resistència a l'avanç exposada com el seu coeficient associat fan referència a un total de força que presenta dues contribucions, una per part de la fricció entre fluid i objecte, i l'altre deguda a la diferència de pressió entre part frontal i posterior de l'objecte d'estudi, així:

$$C_D = C_{D \text{ fricció}} + C_{D \text{ pressió}} = \frac{2 (F_{D \text{ fricció}} + F_{D \text{ pressió}})}{\rho U^2 A} \quad (\text{Eq.5})$$

3.3.2. Força de sustentació o *lift*

La força de sustentació o *lift* és una força generada sobre un cos que circula a través d'un fluid que té direcció perpendicular a la força de resistència a l'avanç i per tant també a la velocitat del corrent i sentit ascendent.

Una de les aplicacions més àmpliament conegudes en l'aprofitament d'aquesta força són les ales dels avions que presenten una geometria específica per tal de que el *lift* obtingut sigui el més gran possible quan circulen a altes velocitats a través de l'aire. Tot i així existeixen altres camps d'aplicació on també s'exploten els beneficis d'aquesta força, com és el cas de l'automobilisme, ja que com hem dit anteriorment, si aconseguim que un vehicle s'adhereixi el màxim possible al asfalt aquest podrà circular més ràpidament en el pas per corba. En aquest marc el que es busca és força de sustentació negativa, habitualment denominada *carga aerodinàmica* o *downforce* en el camp de la F1.

Els monoplaques de F1 disposen de molts dispositius aerodinàmics que generen *downforce*, el més important d'ells, el difusor, que atorga grans quantitats de *carga aerodinàmica* pagant un preu molt baix pel que fa a *resistència aerodinàmica* o *drag*.

Com abans i aplicant el *teorema π de Vaschy-Buckingham* es pot expressar la *força de sustentació* o *lift* de la següent manera:

$$F_L = \frac{1}{2} \rho U^2 A C_L \quad [N] \quad (\text{Eq.6})$$

Les magnituds físiques involucrades són la densitat del fluid d'estudi ρ , la velocitat de desplaçament relativa entre fluid i objecte d'estudi U i la superfície característica de l'objecte d'estudi A la qual segueix els mateixos criteris que els exposats amb anterioritat. Seguint amb la mateixa tònica que en el cas de la força de resistència a l'avanç es determina que l'expressió del coeficient de sustentació és la que segueix:

$$C_L = \frac{2F_L}{\rho U^2 A} \quad (\text{Eq.7})$$

3.3.3. Eficiència aerodinàmica

L'eficiència aerodinàmica és una relació que determina la capacitat o facilitat d'un cos a l'hora de fluir a través d'un fluid tenint en compte les dues forces exposades anteriorment. Es calcula mitjançant la següent expressió:

$$\text{Eficiència} = \frac{F_L}{F_D} = \frac{C_L}{C_D} \quad (\text{Eq.8})$$

Si parem atenció a l'expressió de la eficiència podem dir que un cos és aerodinàmicament eficient quan en ell es genera molta sustentació i molt poca resistència a l'avanç. Atès a aquesta definició, l'eficiència esdevé un bon indicatiu a l'hora de dissenyar dispositius aerodinàmics.

3.4. Principi de Bernoulli

El principi de Bernoulli postula que un increment en la velocitat d'un fluid no viscos implica una disminució de la seva pressió o energia potencial. Així, el principi de Bernoulli, que té el seu origen en el principi de conservació de l'energia, postula que, en un flux estable, la suma de totes les formes d'energia mecànica en un fluid que passa a través d'una línia de corrent és la mateixa en tots els seus punts, això implica que la suma d'energia cinètica i energia potencial sigui constant. L'equació més simple i comuna vàlida per fluids incompressibles i compressibles que presenten nombres de Mach baixos (com els gasos)

en la qual es fonamenta dit principi és la següent:

$$\frac{v^2}{2} + gz + \frac{p}{\rho} = \text{constant} \quad \left[\frac{m^2}{s^2} \right] \quad (\text{Eq.9})$$

On v és la velocitat del fluid en un punt de la línia de corrent, g l'acceleració de la gravetat, z és l'altura del punt estudiat, p es la pressió del punt estudiat i ρ la densitat del fluid. Quan per la naturalesa del problema la quantia $g \cdot z$ no resulta significativa, com és el cas d'un vehicle circulant a través d'un flux d'aire, podem reescriure l'equació de la següent forma:

$$\frac{v^2}{2} + \frac{p}{\rho} = \text{constant} \quad \left[\frac{m^2}{s^2} \right] \quad (\text{Eq.10})$$

Aquesta forma anterior, tal i com ja s'havia comentat, suggereix que en augmentar la velocitat del fluid a de disminuir-ne la seva pressió, i, a la inversa en augmentar la pressió del fluid a de disminuir-ne la seva velocitat. És d'aquesta forma com les quanties d'energia cinètica i energia potencial fluctuen per tal de garantir en tots els punts de les línies de corrent del problema que l'energia total és manté constant. [2]

3.4.1. L'equació de Bernoulli, la geometria i les forces aerodinàmiques

Si parem atenció al principi de conservació de la massa comentat anteriorment (Eq.2) i a la vegada parem atenció a l'equació de Bernoulli, és fàcil arribar a la conclusió de que la geometria de l'objecte d'estudi determinarà l'aparició i el valor de les forces aerodinàmiques. Exemplifiquem-ho per entendre-ho millor:

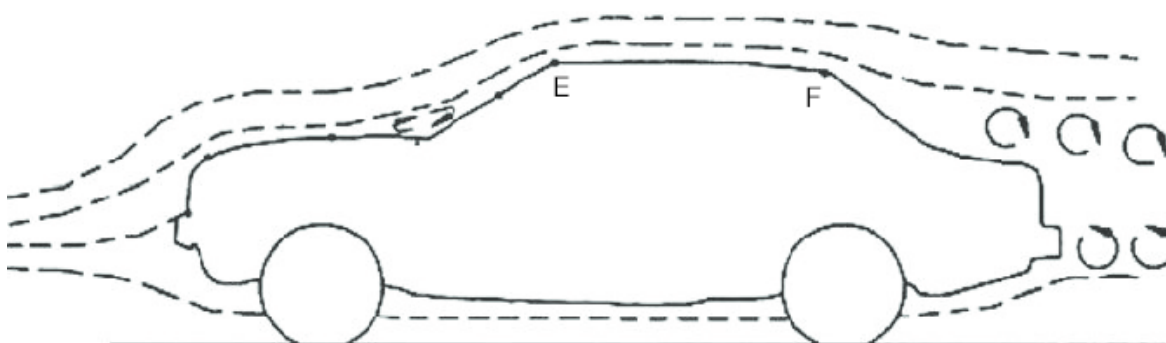


Figura 6. Representació de les línies de corrent de l'aire quan es circula amb automòbil.

En la figura 6 estan representades les línies de corrent de l'aire quan un vehicle circula a

través d'aquest fluid. Si ens atenem primer al principi de conservació de la massa (Eq.2) podem concloure ràpidament que la velocitat del fluid en el tram EF serà major que la velocitat del fluid quan no és destorbat. Això és així ja que en aquest tram la secció de pas del fluid és inferior a la secció de pas quan aquest fluid no és destorbat. Per altre banda i atenent-nos ara al principi de Bernoulli (Eq.10), si la velocitat del fluid en el tram EF és superior que en la resta de trams de la línia de corrent, vol dir que la seva pressió en aquest tram serà inferior. Aquesta zona de baixa pressió en contraposició amb la zona inferior del vehicle que tindrà una pressió més elevada generen un gradient de pressions que dona lloc a una força en direcció vertical i sentit ascendent, ni més ni menys que la força de sustentació.

En resum, les partícules d'aire que circulen per la part superior del vehicle han de recórrer una distància en el mateix temps que les que passen per la part inferior recorren una distància menor. Segons la equació de Bernoulli (Eq.10) això implicarà que la pressió en la part superior del vehicle sigui inferior a la de la part inferior del vehicle, generant un gradient de pressions que dona lloc a l'aparició de la força de sustentació.

Com hem vist, tots els vehicles convencionals tenen tendència a elevar-se quan circulen a altes velocitats a través de l'aire. Així és comprensible ara entendre el perquè els monoplaques de F1 presenten una geometria tant característica, justament perquè el que es desitja és el contrari. El dispositiu difusor és un element fonamental a la fi de revertir aquesta tendència ja que atorga al monoplaça un perfil similar al d'un àlep invertit i no pas al d'un àlep com el que presenten els vehicles convencionals.

Pel que fa a la força de resistència a l'avanç, la geometria del vehicle també té molt a dir. Per una banda la força de resistència a l'avanç apareix quan l'aire presenta dificultat per fluir a través d'un cos, per tant, la part davantera dels vehicles ha de presentar una geometria progressiva que ho faciliti.

Per altre banda, també apareix força de resistència a l'avanç degut al gradient de pressions entre part davantera i part posterior d'un cos a causa del despreniment de la capa límit. Així doncs, per tal de que la força a la resistència a l'avanç sigui el més petita possible cal que la geometria de la part posterior del vehicle no sigui gens abrupta per tal d'evitar el despreniment de la capa límit. En cas de no poder evitar dit despreniment el que s'ha de buscar és una geometria tal que retardi l'aparició del punt de separació, així els efectes del gradient de pressions seran inferiors.

3.5. Despreniment de la capa límit

El despreniment de la capa límit és un fenomen que es pot donar en la capa límit i que no és gens desitjat ja que, entre altres coses, genera una zona de depressió que contribueix a augmentar la força de resistència a l'avanç i en conseqüència el C_d . Té com a causes principals canvis bruscs en la geometria del model o la manca d'energia cinètica en la subcapa límit laminar, ja que ambdues situacions propicien l'aparició d'un gradient de pressions advers que provoca la separació de la capa. Com que la separació de la capa està tan relacionada amb la geometria del model, s'emprarà un exemple amb un model geomètric senzill i adient per al cas que faciliti la comprensió del fenomen.

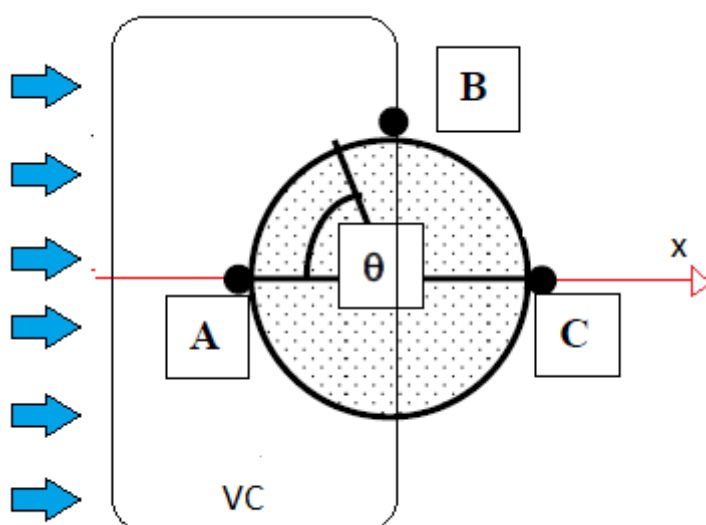


Figura 7. Esquema d'un cilindre sotmès a un flux extern d'un fluid.

Tenim una geometria cilíndrica com la de la figura 7 i la sotmetem a un flux d'aire amb una certa velocitat U en la direcció de l'eix x . Aplicant el principi de conservació de la massa (Eq.2) al volum de control, es conclou que si l'àrea de sortida es inferior a la de l'entrada, com és el cas, la velocitat de l'aire en la sortida ha de ser superior que en l'entrada. D'aquesta manera afirmem que la velocitat de l'aire en B és superior que en A . Si ara per simetria apliquem el mateix raonament entendrem que la velocitat de l'aire en B també ha de ser superior a la velocitat de l'aire en C .

Si ara apliquem el *principi de Bernoulli* (Eq.10), podrem doncs concloure que la pressió de l'aire en B , atès a que és el punt de major velocitat, ha de ser més petita que en A i C . En aquest marc, podem afirmar que les partícules més properes al sòlid del tram AB tenen en contraposició les forces viscoses però a favor les de pressió. Ara bé, en el tram BC les partícules del fluid més pròximes al sòlid tenen ambdós tipus de força en contraposició. Si

les capes límit i subcapa límit laminar, que són les capes properes al sòlid, no disposen de la suficient energia cinètica com per combatre aquestes dues forces en el tram BC , aleshores es generarà un gradient de pressions negatiu que el que farà serà provocar el despreniment de la capa límit. El punt on es dona aquest fenomen es el punt de separació.[2]

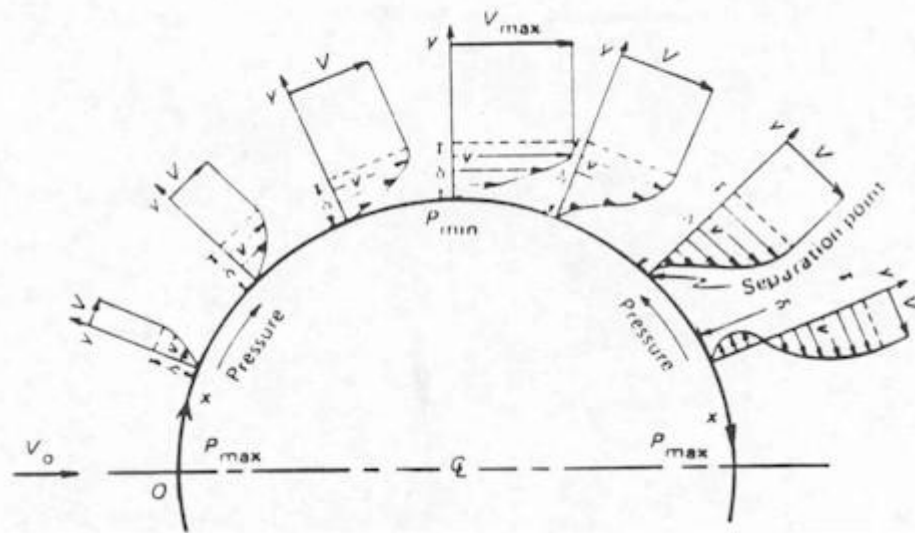


Figura 8. Esquematzació de la capa límit en diferents punts del cilindre. Gradient advers de pressió.[18]

Tal i com hem dit, si es disposa d'una capa límit turbulenta es pot evitar aquest fenomen atès que aquesta capa aportarà suficient energia cinètica a la subcapa límit laminar com per vèncer les forces que l'aboquen al despreniment. Ara bé, si el gradient de pressió advers és molt fort no podrem evitar el despreniment de la capa per molt que es doni el règim turbulent en aquesta, però sí que en retardarà la posició del punt de despreniment, fet que afecta positivament al model disminuint la resistència a l'avanç. Per tant, per tal d'evitar els efectes d'aquest fenomen o intentar-los pal·liar és convenient buscar una geometria que faciliti l'aparició de la capa límit turbulenta.

Un clar exemple d'aquest fet es dona en les pilotes de golf, en les quals gràcies a la rugositat oferta pels seus forats, s'aconsegueix fer transitar ràpidament el flux d'aire cap el règim turbulent, aportant energia cinètica a la subcapa límit laminar, i per tant, retardant l'aparició del punt de separació, fet que reduirà significativament la resistència de pressions i que permetrà realitzar llançaments més llargs.

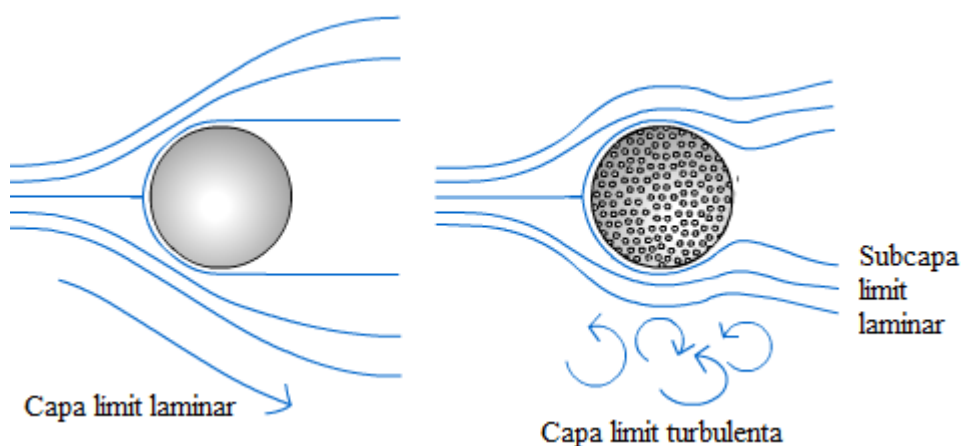


Figura 9. La rugositat de la pilota de la dreta retarda el desprendiment de la capa límit.

3.6. El dispositiu difusor

Arribats a aquest punt es procedirà a explicar de forma concreta el funcionament del dispositiu difusor d'un monoplaça de F1 atès a què ja s'han exposat els conceptes necessaris per entendre'l.

S'ha comentat anteriorment que el difusor és un dispositiu aerodinàmic situat a la part posterior del vehicle que genera, juntament amb el conjunt de la carrosseria inferior del vehicle, al voltant d'un 40% del *downforce* total del monoplaça sense generar gairebé *drag*. Per aconseguir aquestes forces amb aquesta naturalesa, el que es busca d'un difusor és que exploti els beneficis l'efecte terra que es dona en la part inferior del vehicle. L'efecte terra és causa de la reducció de la secció de pas de l'aire per la part inferior del vehicle i té com a conseqüència la generació de *downforce*. En reduir-se la secció de pas de l'aire la velocitat d'aquest augmenta (conservació de la massa, Eq.2), i, com a conseqüència d'un augment en la velocitat del fluid es dona una disminució de la pressió (principi de Bernoulli, Eq.10). EL gradient de pressió existent entre la part superior i la inferior genera el *downforce* en qüestió.[4][5]

El difusor és doncs un dispositiu destinat a explotar els beneficis d'aquest efecte terra, per una banda fent-ne augmentar el valor de depressió per tal d'aconseguir una carga aerodinàmica superior, i, per l'altre, intentant que la transició entre les diferents seccions de pas de l'aire siguin el més suaus i curoses possibles per tal d'evitar el desprendiment de la capa límit i el *drag* que aquest fenomen comporta. Per tal d'entendre amb més profunditat aquest concepte parem atenció a la següent figura que suggereix una comparació entre un tub de venturi i un monoplaça de F1:

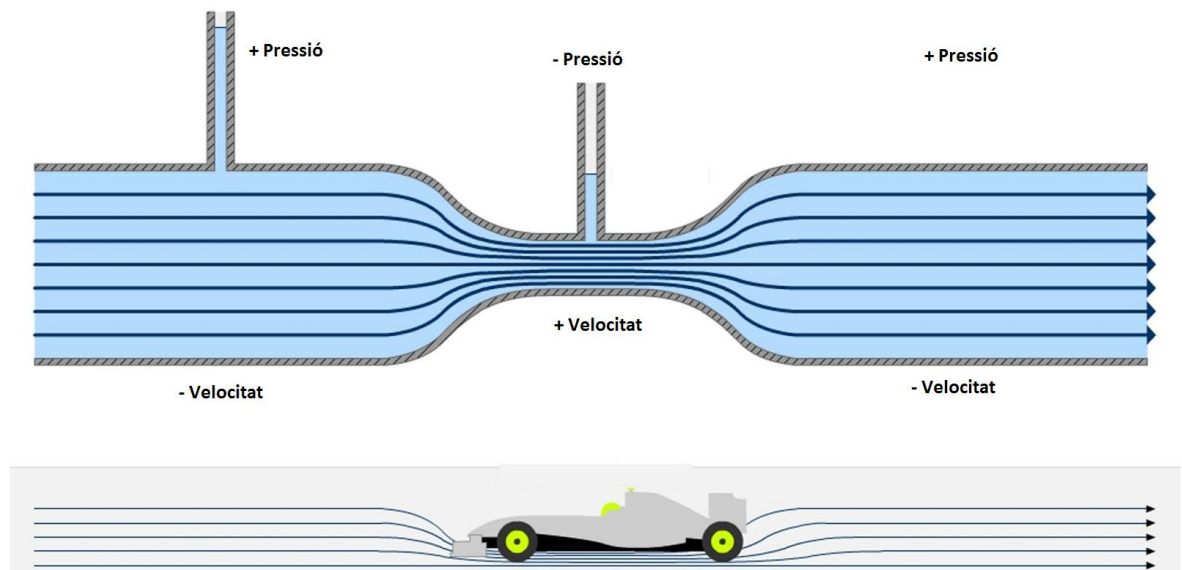


Figura 10. Similitud entre l'efecte terra amb un tub de venturi.

Si es pren atenció a la figura anterior que esquematitza de forma molt orientativa el concepte d'efecte terra serà fàcil d'entendre que la geometria del difusor serà clau per tal d'aprofitar-se al màxim dels beneficis d'aquest fenomen. Seguint amb els raonaments que involucren el principi de conservació de la massa i el de Bernoulli (Eq.2 i Eq.10) es pot concloure que com major sigui l'expansió atorgada pel difusor major serà la carga aerodinàmica obtinguda, ara bé, una expansió excessivament gran implica una geometria brusca, la qual propiciarà l'aparició del despreniment de la capa límit el qual no és desitjat. Per tant, en el disseny de la geometria dels difusors cal trobar l'equilibri ideal per obtenir el màxim *downforce* possible generant el mínim *drag* tot evitant l'aparició del despreniment de la capa límit.[6][7]

3.6.1. El doble difusor

Doble difusor és el nom que rep un tipus de difusor peculiar dissenyat el 2009 per l'escuderia *Brawn GP*, que tot i ser una escuderia a priori secundària va aconseguir guanyar el campionat aquell mateix any gràcies a les seves innovacions aerodinàmiques, on la més important d'elles fou la implementació del doble difusor. Per fer-se una idea de la superioritat que tenia l'escuderia *Brawn GP* gràcies a que els seus monoplaques incorporaven el doble difusor parem una ollada als resultats obtinguts per l'escuderia en aquella temporada:

Pos	Escuderia	Pilot	N. cobxe	AUS	MAL ¹	XIN	BHR	ESP	MON	TUR	GBR	GER	HUN	EUR	BEL	ITA	SIN	JPN	BRA	ABU	Pts
1	Brawn GP F1 Team	Button	22	1	1	3	1	1	1	1	6	5	7	7	Ret	2	5	8	5	3	172
		Barrichello	23	2	5	4	5	2	2	Ret	3	6	10	1	7	1	6	7	8	4	
2	Red Bull-Renault	Webber	14	12	6	2	11	3	6	2	2	1	3	11	9	Ret	Ret	17	1	2	153,5
		Vettel	15	13	15	1	2	4	Ret	3	1	2	Ret	Ret	3	8	4	1	4	1	
3	McLaren-Mercedes	Hamilton	1	DSQ	7	6	4	9	12	13	16	18	1	2	Ret	12	3	3	1	Ret	71
		Kovalainen	2	Ret	Ret	5	12	Ret	Ret	14	Ret	8	5	4	6	6	7	11	12	11	
4	Ferrari	Massa/Badoer/Fisichella	3	Ret	9	Ret	14	6	4	6	4	3	LES	17	14	9	13	12	10	16	70
		Raikkonen	4	15	14	10	6	Ret	3	10	8	Ret	2	3	1	3	10	4	6	12	
5	Toyota	Trulli	9	3	4	Ret	3	Ret	13	4	7	17	8	13	Ret	14	2	2	Ret	7	59,5
		Glock / Kobayashi	10	4	3	7	7	10	10	8	9	9	6	14	10	11	2	NVS	9	6	
6	BMW Sauber	Kubica	5	14	Ret	13	18	11	Ret	7	13	14	13	8	4	Ret	8	9	2	10	36
		Heidfeld	6	10	2	12	19	7	11	11	15	10	11	11	5	7	Ret	6	Ret	5	
6	Williams-Toyota	Rosberg	16	6	8	15	9	8	6	5	5	4	4	5	8	16	11	5	Ret	9	34,5
		Nakajima	17	Ret	12	Ret	Ret	13	15	12	11	12	9	18	10	10	9	15	Ret	13	
8	Renault	Alonso	7	5	11	9	8	5	7	10	14	7	Ret	6	Ret	5	3	10	Ret	14	26
		Piquet/Grosjean	8	Ret	13	16	10	12	Ret	16	12	13	12	15	Ret	15	Ret	16	13	18	
9	Force India-McLaren	Sutil	20	9	17	17	16	Ret	14	17	17	15	Ret	10	11	4	Ret	13	Ret	17	13
		Fisichella/Liuzzi	21	11	18	14	15	14	9	Ret	10	11	14	12	2	Ret	14	14	11	15	
10	Toro Rosso - Ferrari	Bourdais / Alguersuari	11	8	10	11	13	Ret	8	18	Ret	Ret	15	16	Ret	Ret	Ret	Ret	14	Ret	8
		Buemi	12	7	16	8	17	Ret	Ret	15	18	16	16	Ret	12	13	Ret	Ret	7	8	
Pos	Equip	Pilot	N. cobxe	AUS	MAL ¹	XIN	BHR	ESP	MON	TUR	GBR	GER	HUN	EUR	BEL	ITA	SIN	JPN	BRA	ABU	Pts

Figura 11. Resultats de la temporada 2009 de F1. [19]

Els resultats obtinguts per *Brawn GP* són clarament millors que els obtinguts per les altres escuderies, sobretot en les primeres carreres on les altres escuderies encara no havien incorporat un doble difusor als seus monoplaques. Això n'és prova de la millora significativa atorgada per aquest dispositiu.

L'aspecte d'un doble difusor és molt semblant al d'un difusor convencional amb la peculiaritat que el doble difusor presenta una cavitat, generalment en forma de V, al centre de la part posterior.



Figura 12. Doble difusor de *Brawn GP*. [20]

El funcionament del doble difusor és doncs molt semblant al del difusor convencional ja que es fonamenta en l'expansió d'aire per tal d'obtenir *downforce*. Ara bé, mentre el difusor convencional expandeix solament l'aire que circula per la part inferior del monoplaça, el doble difusor expandeix també part del flux d'aire que circula per la part superior del vehicle, que degudament dirigit, és canalitza cap a la cavitat en forma de V per a la seva expansió.[8] Vegem-ho:

DIFUSOR DE BRAWN

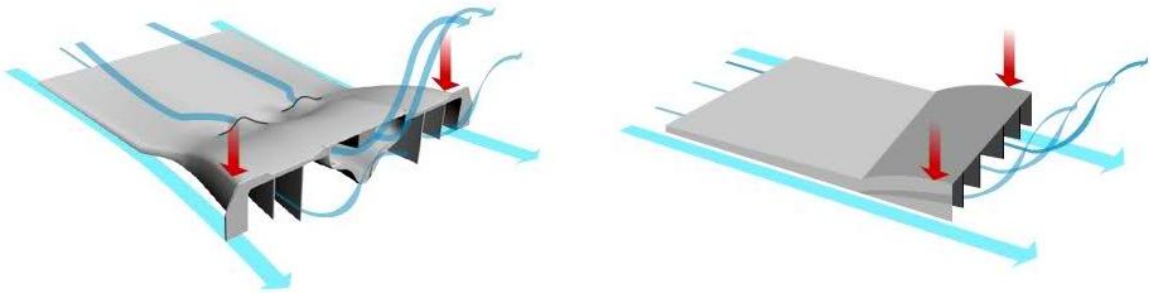


Figura 13. A l'esquerra el doble difusor, a la dreta el difusor convencional. [20]



Figura 14. En verd el flux aprofitat per la part superior del monoplaça, en groc el que prové de sota del monoplaça.[21]

Així en el doble difusor en augmentar el cabal d'aire que s'expandeix, ja que també s'expandeix aire provinent de la part superior del monoplaça, augmenta el *downforce* generat.[9] En termes d'aerodinàmica aquest model té un punt a favor i un en contra:

A favor:

- Major carga aerodinàmica atès a què el cabal d'aire expandit en el difusor és major i per tant increment de la velocitat en el pas per corba. A més a més, en comptar amb molt més *downforce* que l'habitual degut a aquesta millora es poden relaxar els

angles d'altres dispositius aerodinàmics en forma d'ala que també generen *downforce* però a canvi de generar més *drag* que el difusor. Això fa que el monoplaça pugui també anar més ràpid en recta si es desitja.

En contra:

- Una forta dependència en l'efecte terra i per tant una relaxació en la disposició dels altres dispositius aerodinàmics que generen carga aerodinàmica pot ser perillós. Això es deu a què si el vehicle trepitja algun piano del circuit o passa per damunt d'algun sot i perd l'efecte terra, aquest pot acabar enlairant-se i generant perill per al corredor i espectadors.

Cal recalcar que la *FIA* al 2009 va introduir mesures per reduir la carga aerodinàmica en els monoplaços i que la decisió de donar per vàlids a mitja temporada els dobles difusors que *Brawn GP* havia implementat va ser força contradictòria i rebuda amb recel per part de les altres escuderies, les quals es van afanyar a dissenyar el seu propi model de doble difusor a corre-cuita. Seguint amb els desitjos de reduir la carga aerodinàmica, no va ser al 2010 però sí al 2011, quan la *FIA* va decidir prohibir l'ús dels dispositius doble difusors.

4. Obtenció i simulació dels models

En aquest apartat recau la part més important del treball en el qual es tractarà el comportament aerodinàmic del dispositiu difusor tot fent ús d'eines que implementen els conceptes de la mecànica de fluids.

Es seguirà una metodologia estricta que s'explicarà més endavant per a totes les simulacions i anàlisis a realitzar. En primer lloc es partirà d'una geometria 2D fixa determinada per les limitacions dimensionals imposades per la *FIA* que englobarà el fons pla i part del difusor. Sobre aquesta geometria s'aniran dissenyant i analitzant diferents models de difusor en 2D fins a trobar el millor disseny possible. Posteriorment, utilitzant el disseny en 2D trobat s'implementarà un disseny tridimensional amb la peculiaritat que s'afegirà una cavitat en V pròpia del doble difusor. Posteriorment es realitzarà un anàlisi comparatiu d'ambdós models per determinar i quantificar l'eficàcia del doble difusor.

Tot i existir moltes maneres d'estudiar l'aerodinàmica d'un cos, una de les eines més versàtils i útils a l'hora de fer-ho és el *CFD* (Computational Fluid Dynamics) ja que permet simular els efectes que té la geometria de qualsevol cos quan l'exposen a un flux d'un fluid sense necessitat de materialitzar dit cos. En altres paraules, permetrà estudiar, analitzar i optimitzar el model de difusor que es pretén dissenyar sense necessitat de gastar esforços físics ni materials per crear-lo. En el *CFD* es treballa a partir del concepte de simulació i com tota simulació cal saber quins són els seus límits i quines aproximacions necessitem realitzar per tal de convertir-la en útil.

El *CFD* s'implementarà a través del paquet de dades *FLUENT* del programari *ANSYS*, específic per a problemes de mecànica de fluids i que aplica el mètode dels volums finits per a resoldre les equacions que modelen el comportament d'un fluid al voltant d'un cos.

Pel que fa als models tridimensionals s'usarà el programari *SOLIDWORKS* per al seu disseny, models que posteriorment s'importaran al software *ANSYS* per analitzar-los a partir del *CFD*. Per altre banda i atès a la seva senzillesa, els models 2D no s'implementaran amb el programa esmentat sinó que es farà ús de l'assistent que incorpora *ANSYS* per a la creació de geometries.

4.1. Conceptualització del model a simular

Aquest breu sub-apartat té com a finalitat explicar quin serà l'abast del model a simular i

quina correspondència té el model amb la realitat.

Per qüestions relacionades amb els softwares de simulació, la manera més adient de tractar el problema és entregant al programa un volum de control que es correspongui amb el volum per el qual circula l'aire que es objecte d'estudi. Atès a què l'objecte d'estudi es l'aire que circula per la part inferior de la carrosseria i pel difusor, el volum de control que li correspon es ben llunyà a assemblar-se a allò que el terra pla i el difusor són a la realitat.



Figura 15. En vermell es denota el perfil del volum de control a estudiar

Així doncs, en el model que simulem, el terra pla i el difusor sol es veuen reflectits per les superfícies superiors del volum de control, les quals delimiten la regió per on l'aire circula juntament amb l'asfalt.

4.2. Modus Operandi

Tal i com s'ha especificat anteriorment el disseny del model de difusor s'obindrà a partir del mètode de prova i error i de forma iterativa. Es convenient fer-ho així ja que d'aquesta manera el lector podrà veure com varien els paràmetres aerodinàmics en funció de com varia la geometria del model tot argumentant i entenent el perquè d'aquestes variacions aplicant la teoria de mecànica de fluids presentada al principi d'aquest treball.

L'anàlisi no té com a objectiu donar informació sobre els valors reals dels paràmetres físics que es donen en el problema, com per exemple valors precisos de pressió i velocitat. Això és d'aquesta manera perquè en el model s'apliquen simplificacions que poden fer que els valors obtinguts no s'assemblin en res als valors reals que el model experimentaria en un túnel de vent. Ara bé, no disposar dels valors reals atès a les simplificacions no ens limita a l'hora de realitzar anàlisis comparatius per tal d'optimitzar el model, ja que si el model A té presenta un *downforce* de 100 N i el B el presenta de 120 N , per molt que aquests valors de força siguin diferents als reals podrem afirmar que el model B és millor que l'A pel fet d'atorgar més carga aerodinàmica.

L'objectiu principal d'aquest mètode és que mica en mica i en vista dels resultats obtinguts a cada anàlisi el lector pugui familiaritzar-se amb el problema i que poc a poc pugui intuir de quina manera s'ha d'actuar sobre el model actual per tal d'obtenir un model millor. La metodologia a seguir per a la resolució de cada anàlisi es detalla en els següents subapartats, passos que es seguiran de forma estricta i sense més variacions que la geometria del model, per tal de garantir un anàlisi comparatiu fiable a l'hora de determinar quin model es millor que un altre.

4.2.1. Geometria de partida i simplificacions

La geometria de partida per a començar a simular el primer model de difusor compren des del principi del fons pla del monoplaça fins al final de difusor. Les cotes que defineixen la geometria s'han triat en base a les limitacions dimensionals per als monoplaques publicades per la *FIA* i que es poden trobar a l'apartat 1 de l'annex del treball. [10][11] Tenint en compte que el fons pla no es troba en horitzontal sinó que per la part davantera la distància entre fons pla i terra acostuma a ser de 80 mm i per la part del darrere acostuma a ser de 125 mm, s'obté la següent geometria de partida:

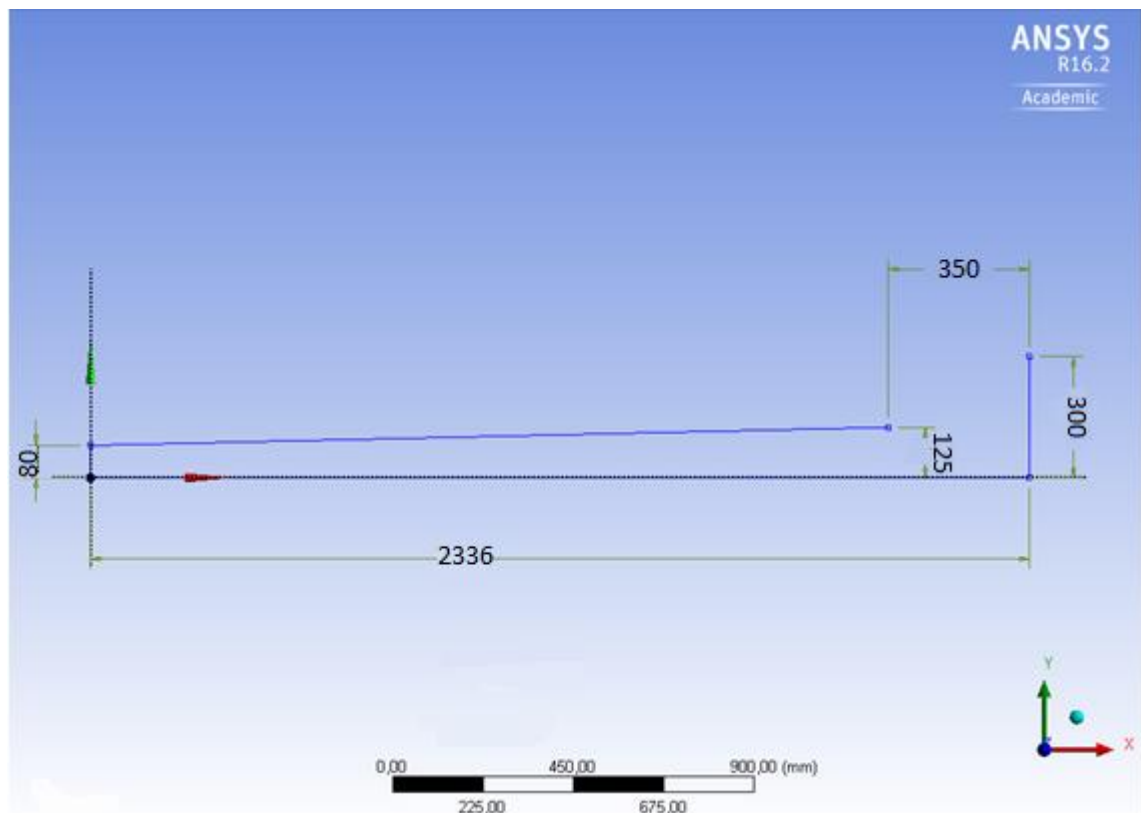


Figura 16. Límits dimensionals imposats per la *FIA* sobre la regió d'estudi. Geometria de partida.

La geometria de la figura anterior representa doncs un perfil en 2D de la cavitat que queda des del principi del fons pla del vehicle fins al final del difusor en l'eix de les x i des d'ambdós llocs fins al terra en l'eix de les y . No considerar certs elements del xassís del vehicle o dispositius aerodinàmics com l'*splitter* que es localitzen des de la part davantera del monoplaça fins al principi del fons pla és una de les simplificacions s'ha optat per fer. Això es degut a què per l'obtenció dels valors dels paràmetres aerodinàmics és imprescindible per a l'anàlisi la presència del volum comprés entre el fons pla i el terra, zona en la qual es dona la depressió que el difusor força, però en canvi no és imprescindible la presència d'altres dispositius aerodinàmics anteriors a dit volum. És per això que es conclou que es podrà establir un anàlisi comparatiu fiable entre difusors sense necessitat de representar els elements geomètrics comentats. Recordem que per a l'anàlisi comparatiu no necessitem valors reals sinó les variacions que presenten aquests al variar la geometria del problema.

4.2.2. El mallat

El mallat és segurament el procediment més crucial que s'ha de dur a terme durant la simulació. Consisteix en la divisió del model geomètric en tants elements o volums finits com es desitgi sobre els quals s'aplicaran les equacions que modelen el comportament fluidodinàmic del problema en qüestió. Atenent a la infinitat de mallats possibles per a un mateix problema, sorgeix el concepte de qualitat del mallat.

La qualitat del mallat no tan sols determinarà l'obtenció d'uns resultats fidels al esdeveniment fluidodinàmic real, sinó que també determinarà en molts casos la obtenció o no d'aquests resultats, ja que si el mallat és de baixa qualitat els càlculs iteratius realitzats no convergiran mai a cap valor. Així doncs cal dedicar molts esforços en aquest procediment que posteriorment es veuran compensats a l'hora de realitzar els càlculs, ja que un mallat d'alta qualitat agilitza moltíssim el procés de resolució, però que entenem per un mallat de qualitat?

La qualitat del mallat depèn de dos aspectes; en primer lloc d'aspectes geomètrics, i, en segon lloc d'aspectes fluidodinàmics.

Pel que fa als aspectes geomètrics, el mallat esdevé de baixa qualitat i per tant l'ordinador té problemes per a realitzar els càlculs sobre el model quan aquest presenta singularitats geomètriques com arestes o canvis geomètrics bruscs. Sobre aquestes singularitats el gestor del mallat intenta adaptar-se i acostuma a fer-ho mitjançant un gran nombre d'elements de mides diferents i a vegades descompensades, fet que comporta un gran nombre de càlculs i per tant de temps en la posterior resolució. Cal saber tractar aquestes

singularitats adequadament ja que en funció del seu pes podrien provocar no un augment de temps de resolució, sinó que podrien condicionar sobre la obtenció o no de resultats. Si les zones singulars geomètricament són de poc interès per a l'estudi es convenient evitar-les i per tant suavitzar-les o fer-les desaparèixer del model, o altrament, mallar-les amb molt pocs elements a través d'una operació de mallat.

La qualitat del mallat referent als aspectes geomètrics és quantificable, i ANSYS disposa d'una sèrie d'estadístics de mallat que pretenen donar informació sobre la qualitat geomètrica de la malla.[12] En destaquen:

- **Orthogonal quality:** estadístic de mallat que pren valors entre 0 i 1. Indica que la qualitat de la malla és major quan major sigui la distància del seu valor a 0. ANSYS llença una advertència sobre la qualitat del mallat si aquest estadístic esdevé molt proper a 0.
- **Skewness:** estadístic de mallat que pren valors entre 0 i 1. Indica que la qualitat de la malla és major quan major sigui la distància del seu valor a 1. ANSYS llença una advertència sobre la qualitat del mallat si aquest estadístic esdevé molt proper a 1.

En segon lloc, els aspectes fluidodinàmics afecten a la qualitat del mallat en el sentit que cal adaptar el mallat a cada tipus de problema fluidodinàmic diferent. Dit en altres paraules, cal adaptar la malla a aquells requeriments fluidodinàmics que presenti el problema en qüestió, per exemple, si volem estudiar a fons la capa límit que es dona quan circula flux d'aire en una placa plana, caldrà que el mallat sigui extremadament petit en aquells punts propers a la placa per tal de visualitzar correctament el fenomen de capa límit el qual té un espessor relativament petit, en canvi, aquells punts allunyats de la placa no caldrà que presentin un mallat tant abusiu, doncs la capa límit no té gairebé efectes sobre ells.

Si no adaptem la nostra malla als requeriments fluidodinàmics que presenta el problema els càlculs realitzats sobre la mateixa no representaran fidelment la realitat, és per aquest motiu que parlaríem també d'una malla de baixa qualitat tot i que els estadístics geomètrics del mallat fossin correctes. Sobre aquests aspectes del mallat no existeixen estadístics que ens n'indiquin la qualitat, el que cal fer doncs és en primer lloc usar els coneixements adquirits de la mecànica de fluids per tal d'intuir aquells punts que requereixen de major presència d'elements o d'elements amb una geometria determinada, i, en segon lloc, refinar la malla mica en mica en les zones en qüestió i comprovar si es donen canvis significatius en els resultats.

4.2.3. Condicions de contorn

Pròpies de cada problema, les condicions de contorn són un pas important i necessari abans de procedir a la resolució ja que estableixen les relacions entre el model dibuixat i la realitat.

Les condicions de contorn són restriccions que s'estableixen a les cares del model i que aporten informació al programari per tal d'ajudar-lo en els càlculs de la resolució. Per tant, per establir-les cal entendre amb profunditat el problema per saber quin tipus de restricció és adient en cada cara. A vegades ens veiem obligats a idealitzar la realitat o a simplificar-la per tal d'establir una determinada condició de contorn sobre una cara, de ser així, cal tenir-ho en compte en el posterior anàlisi de resultats i interpretar-ho adequadament.

Sobre els models involucrats en el treball, les condicions de contorn que s'han establert són les següents:

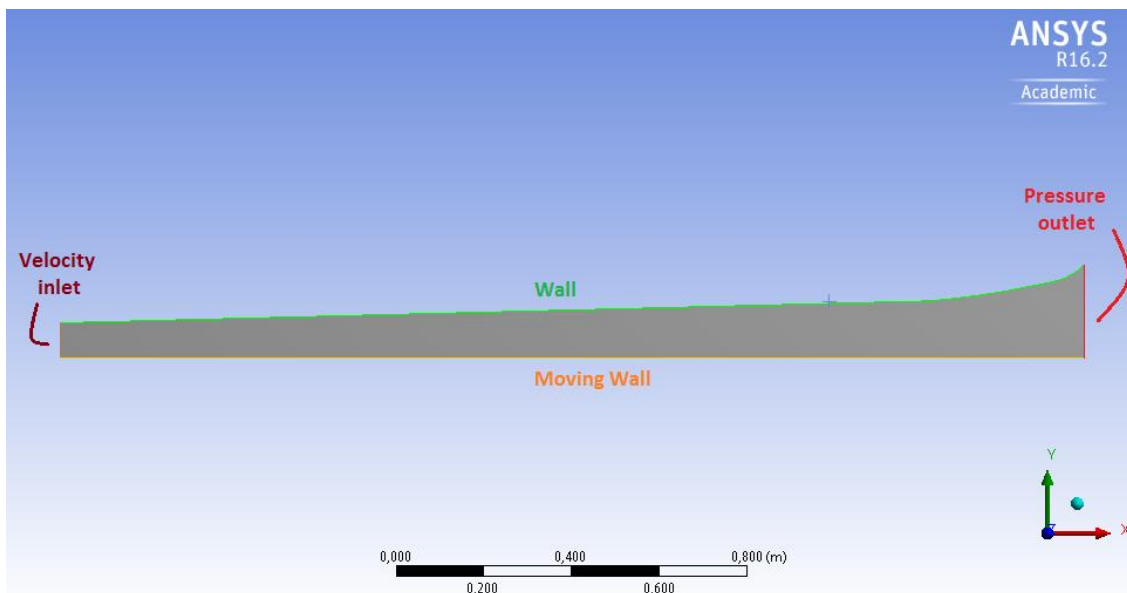


Figura 17. Condicions de contorn per a la simulació bidimensional.

- **Velocity inlet:** condició de contorn que correspon a una entrada de fluid amb una certa velocitat. S'estableix sobre la cara anterior del model ja que és per on el fluid entra al domini. Tenint en compte que el doble difusor és un dispositiu aerodinàmic molt útil en el pas per corba s'ha usat un valor de 40 m/s de velocitat del fluid en tots els anàlisis, valor que és molt representatiu i que es troba en l'ordre de magnitud de la situació real.
- **Pressure outlet:** condició de contorn que fixa la pressió en la sortida del domini. S'aplica sobre la cara posterior del domini i amb un valor relatiu fix de 0 Pa

corresponent a la pressió atmosfèrica. Això és d'aquesta manera atès a què l'aire expulsat pel difusor es retorna de forma immediata a l'atmosfera.

- **Wall:** el *wall*, o paret en català, és una condició de contorn que indica un límit impenetrable per al fluid i sobre el qual es donarà el fenomen fluidodinàmic de la capa límit quan el fluid hi entri en contacte. S'estableix sobre la cara superior del model, és a dir, en la cara que representa la superfície inferior del difusor.
- **Moving wall:** condició de contorn anàloga a l'anterior amb la peculiaritat que es pot atorgar velocitat a la paret en qüestió. S'aplica amb una velocitat de 40 m/s sobre la cara inferior del model, la corresponent al asfalt, atès a què la velocitat relativa entre asfalt i aire que entra pel model és 0 m/s.
- **Symmetry:** fruit d'una simplificació de la realitat, aquesta condició de contorn s'aplica a les cares laterals del model per tal de neutralitzar-ne la seva influència. Aquesta simplificació té com a motiu principal una reducció molt gran en els càlculs a canvi d'una pèrdua minuciosa d'informació poc rellevant en l'estudi en qüestió.

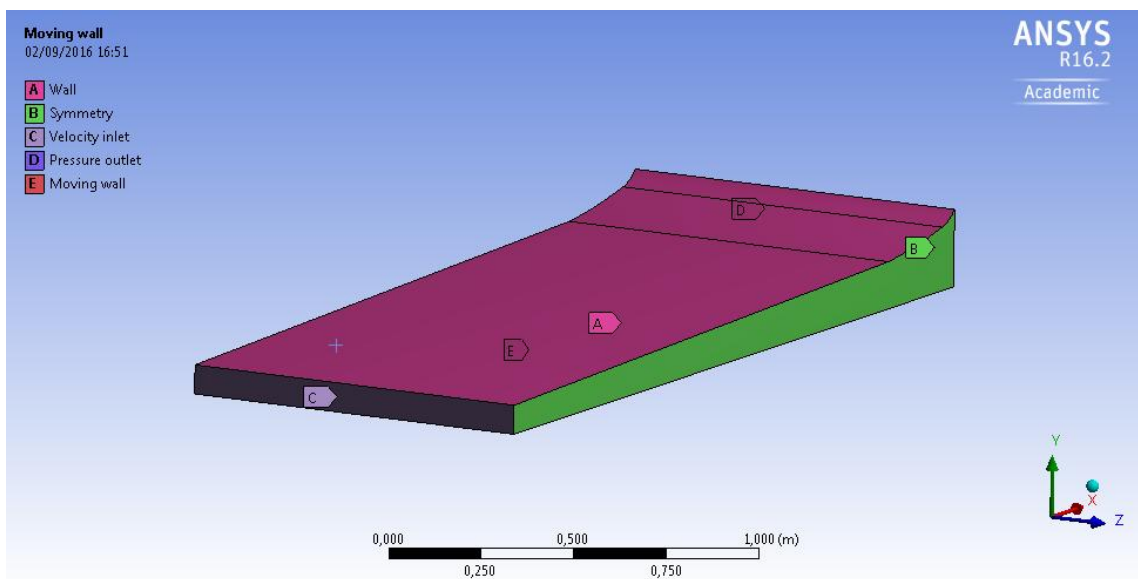


Figura 18. Condicions de contorn per a les simulacions tridimensionals.

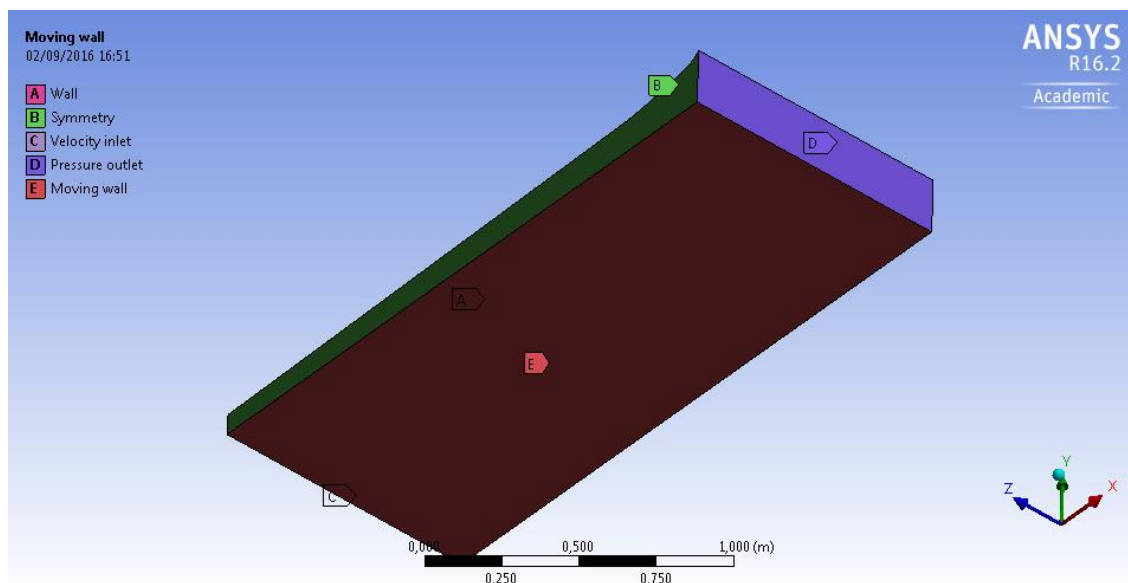


Figura 19. Condicions de contorn per a les simulacions tridimensionals.

4.2.4. Solució del problema

Abans de començar a fer qualsevol càlcul, encara queden una sèrie de paràmetres a indicar per a l'anàlisi. El paràmetre més important a determinar és el model de turbulència, que en el nostre cas serà el *k-omega SST*. S'utilitza aquest model de turbulència perquè és el més indicat per a problemes de fluxos externs en presència de capa límit, el qual ajudarà a què la solució convergeixi amb més facilitat.

Que la solució convergeixi o no és l'altre aspecte més important en la resolució del problema. Que la solució convergeixi implica que: els residus generats a través del càlcul iteratiu siguin inferiors de 10^{-3} ; les variables d'interès del problema, en el nostre cas els coeficients aerodinàmics, siguin estables al final dels càlculs; es compleixi l'equació de continuïtat que implica que tot flux que entra en un domini n'ha de sortir. Per tal d'aconseguir una solució convergent caldrà no tan sols utilitzar el model de turbulència adequat, sinó facilitar els càlculs a la computadora amb geometries el més simples possibles i mallats adequats dels models.

4.2.5. Post-procés

Un cop realitzats els càlculs sobre un model mallat i definit adequadament sol queda interpretar els resultats obtinguts. La obtenció i interpretació dels resultats es coneix amb el nom de post-procés i és la última etapa de la simulació.

Les informacions a obtenir en el post-procés després d'una simulació són moltes molt variades, ara bé, per a la comprensió i anàlisi del model de difusor ens és suficient amb:

- Forces aerodinàmiques juntament amb els seus coeficients (C_L i C_D).
- Distribució i trajectòria de les línies de corrent.
- Distribució de pressions a través d'un mapa de contorns.
- Distribució de velocitats del fluid a través d'un mapa de contorns

A través d'aquestes informacions s'aniran discriminant models fins al punt d'obtenir-ne un que ja no siguem capaços de millorar, considerarem aleshores que hem arribat al model òptim.

4.3. Simulacions

En aquesta secció s'aplicarà la metodologia exposada en l'apartat 5.1 als models més rellevants que s'han elaborat i es presentaran els resultats de les simulacions en cada cas. Recordem que l'objectiu primer de les simulacions és trobar un perfil de difusor convencional òptim a través de la simulació en 2D. Posteriorment a través d'aquest perfil trobat és generarà un model 3D i es convertirà en un doble difusor a través de la implantació de la cavitat en forma de V.

4.3.1. Simulació 2D: primer disseny

El primer disseny a simular és el més senzill dels possibles. Consisteix en un disseny de difusor recte, és a dir, amb un angle d'inclinació constant i igual al màxim angle permès degut a les limitacions dimensionals imposades per la *FIA* (apartat 1 de l'annex).

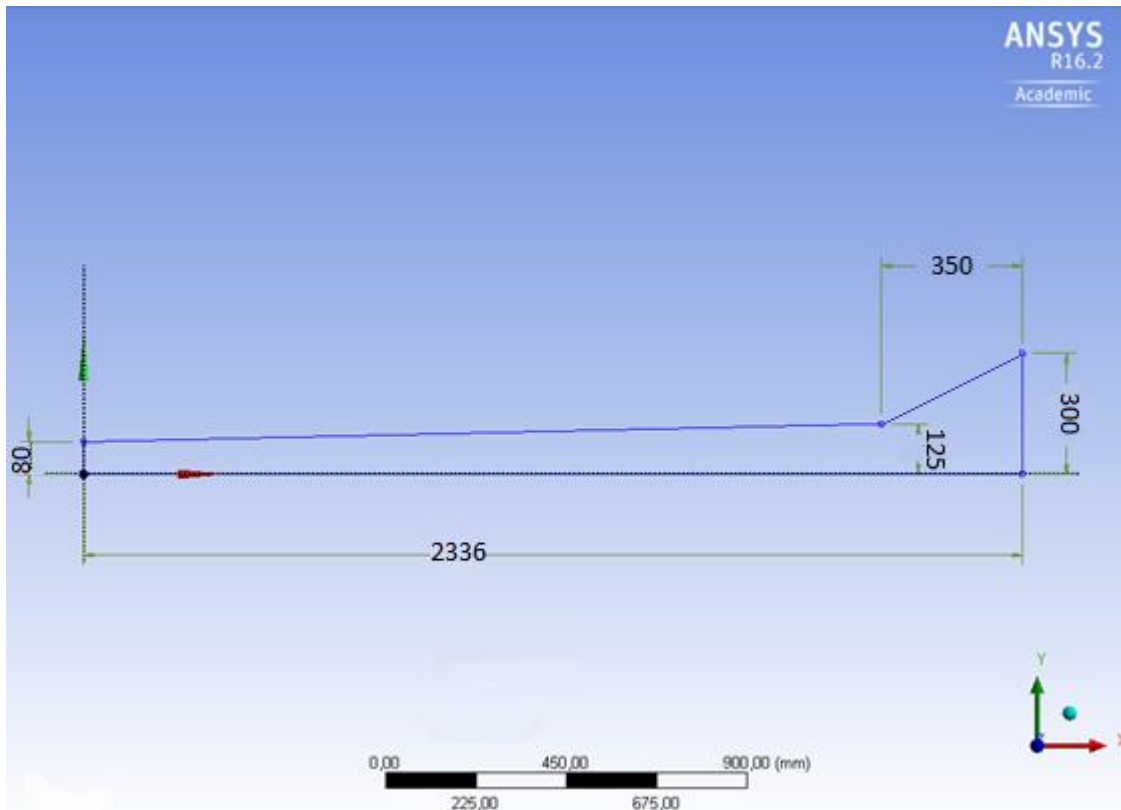


Figura 20. Geometria del primer disseny.

Per al mallat d'aquesta geometria i de totes les geometries dels dissenys en 2D s'han aplicat certes tècniques que proporciona el gestor de mallat per tal de garantir-ne la qualitat. Aquestes tècniques són:

- **Sizing:** per tal d'establir la mida dels elements que formen la malla. S'ha usat una mida de 10 mm.
- **Mesh method:** per tal de donar als elements una forma específica. S'ha triat usar elements tetraèdrics.
- **Inflation:** mètode que aplica una inflació del mallat sobre una determinada cara, és a dir, un increment de la densitat del mallat sobre una determinada cara. S'ha aplicat sobre la cara del difusor, atès que és la cara on és dona el fenomen de capa límit i a fi de que es manifesti sobre el model de forma adequada. L' inflació és de tipus *Total thickness* amb un gruix màxim de capa de 40 mm i 20 capes.

L'aplicació concreta d'aquests tres mètodes de mallat és fruit d'un gran nombre de proves i simulacions fallides que s'han dut a terme. Els paràmetres dels dos primers mètodes s'han anat ajustant mica en mica fins arribar als esmentats a través dels estadístics del mallat, els

quals s'han obtingut òptims pels valors exposats. Com que el tercer mètode té com a objectiu oferir una visualització i manifestació adient de la capa límit, els paràmetres d'aquest s'han anat ajustant en funció de si això es complia o no.

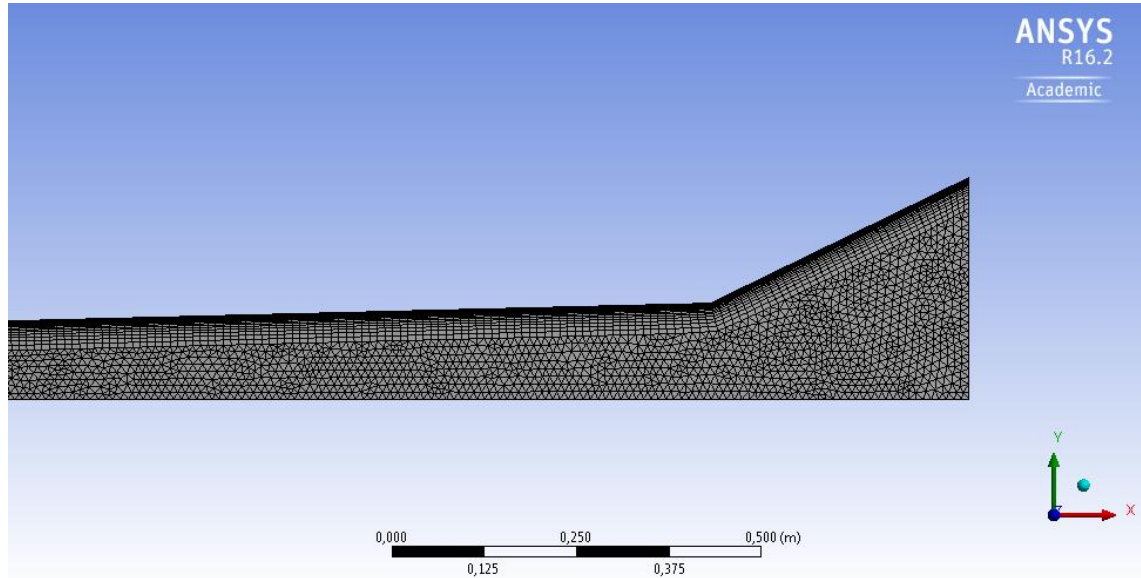


Figura 21. Mallat del primer disseny.

Un cop mallada la geometria tal i com s'ha especificat es realitza la simulació del model i s'obtenen els següents resultats del post-procés:

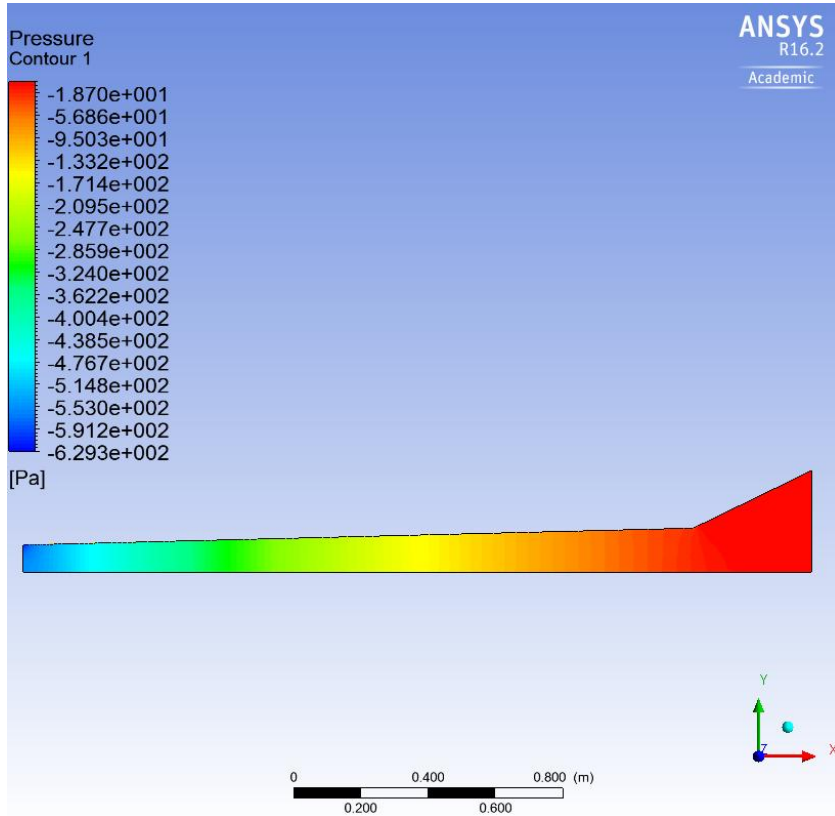


Figura 22. Mapa de pressions del primer disseny.

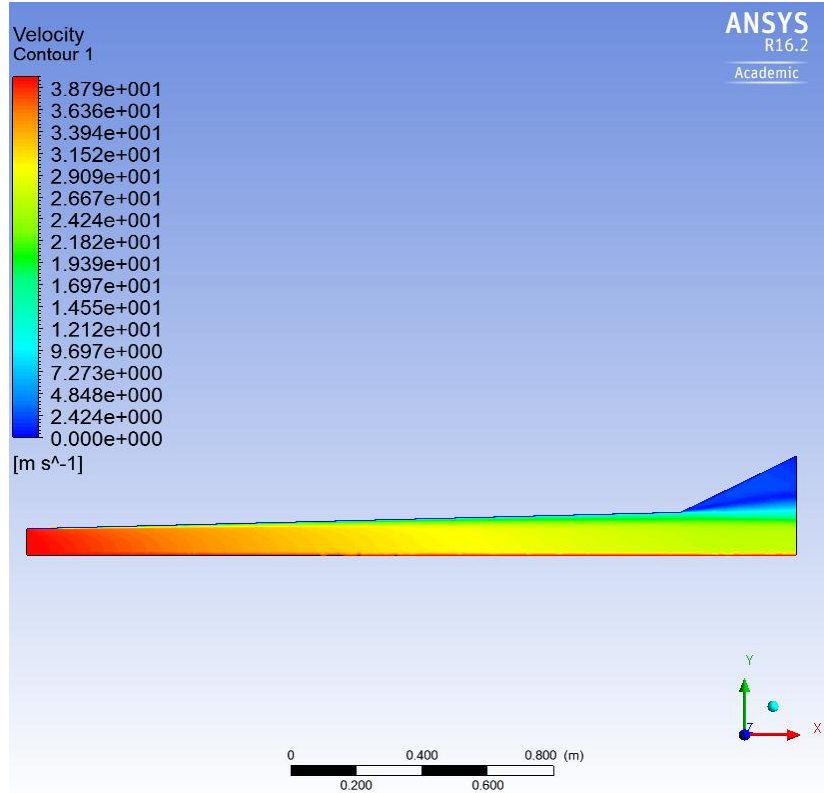


Figura 23. Mapa de velocitats del primer disseny.

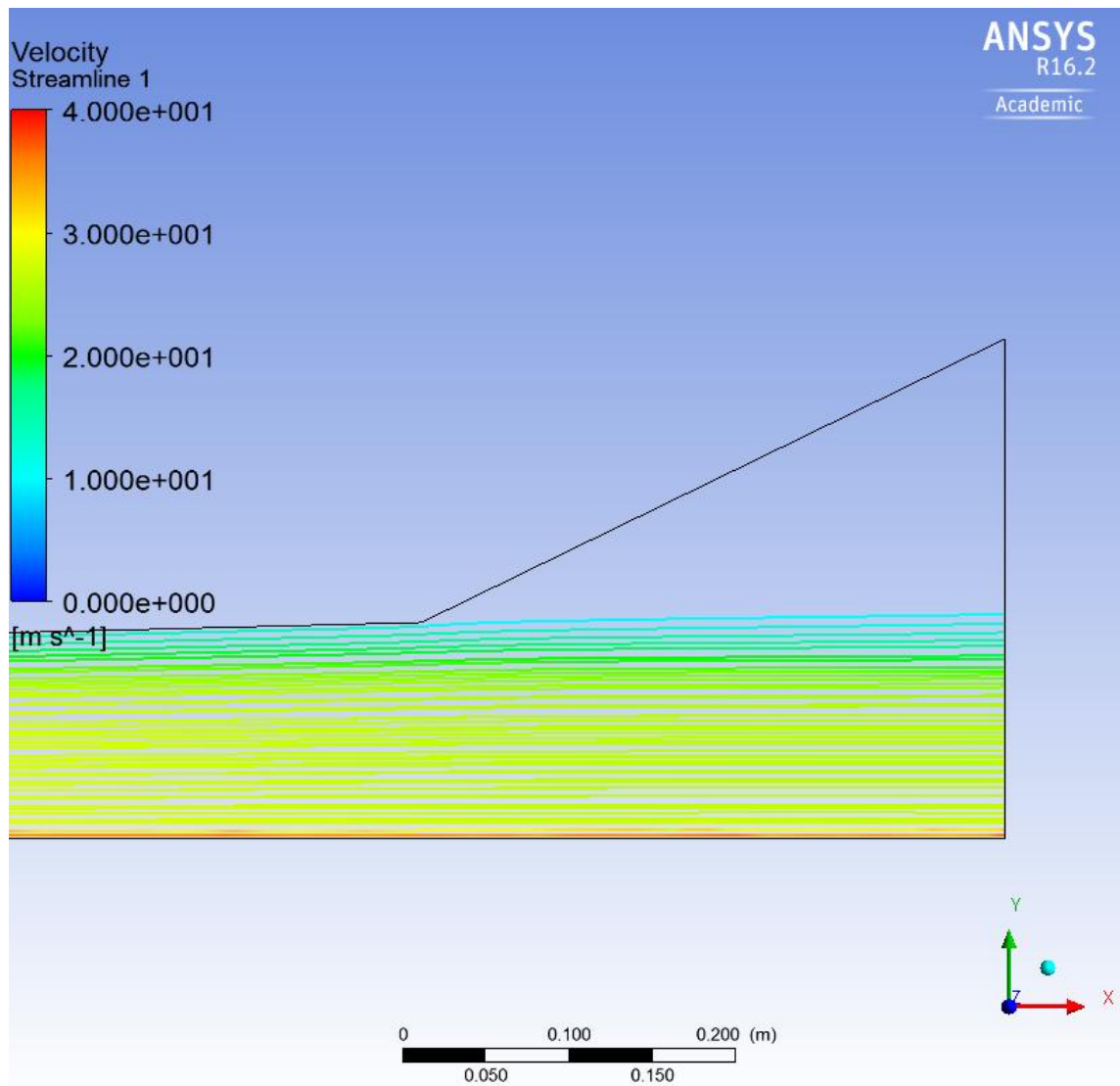


Figura 24. Línies de corrent que entren per la cara anterior del primer disseny.

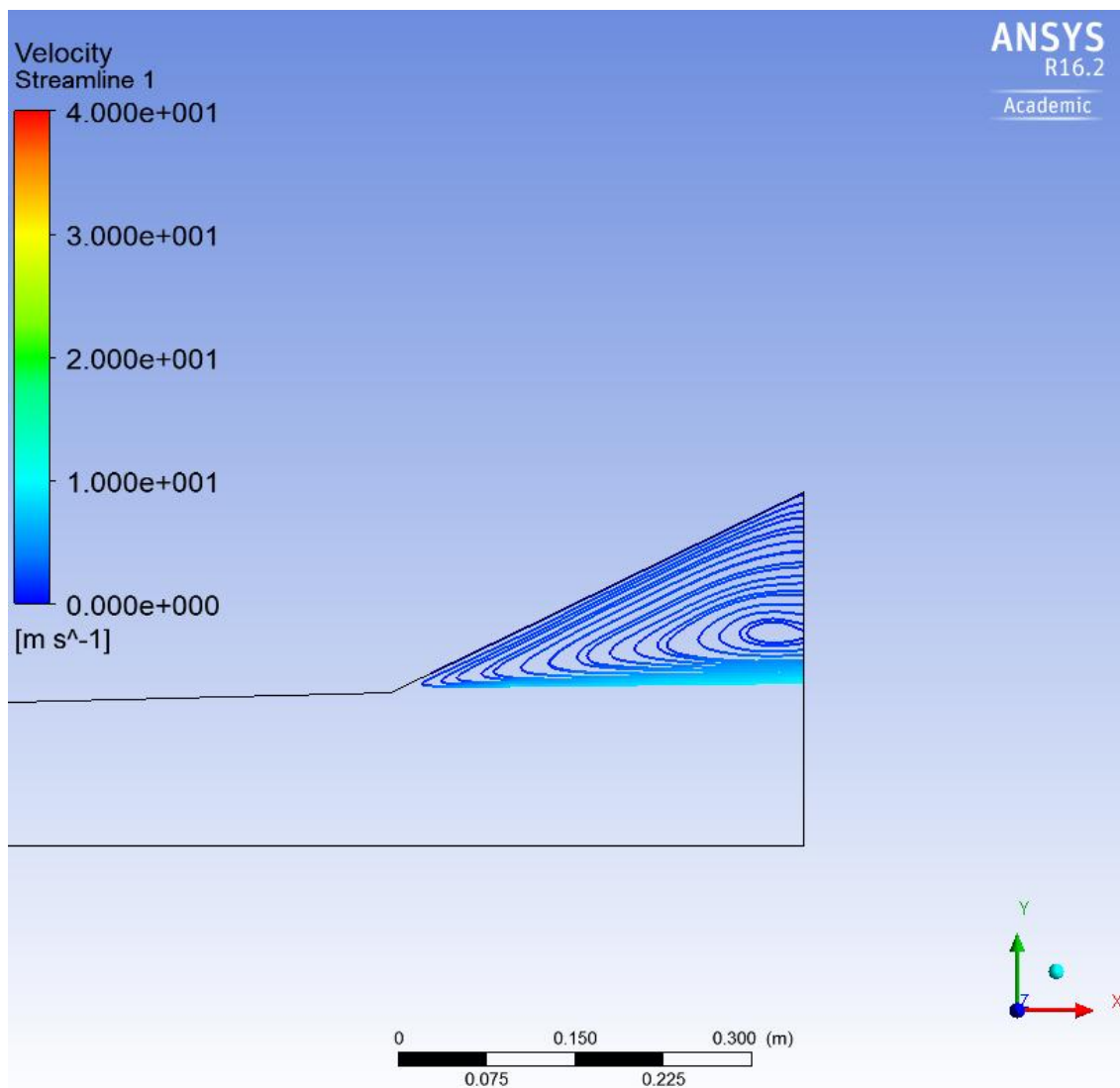


Figura 25. Línies de corrent que entren per la cara posterior del primer disseny degut a la depressió generada pel desprendiment de la capa límit.

Downforce [N]	Drag fricció [N]	Drag pressió [N]	Drag Total [N]	Cd	Cl	Eficiència
-463,724	3,424	12,152	15,576	0,0529	-0,2025	29,77

Figura 26. Resultats de la simulació del primer disseny.

Els valors de *drag* i *lift* es troben dintre de l'ordre de magnitud esperat, corresponen a 1,28kg i 47,32kg respectivament. Com era d'esperar el dispositiu difusor genera una quantitat considerable de sustentació negativa a canvi de molt poca resistència a l'avanç. Els coeficients aerodinàmics s'han calculat a partir de les superfícies característiques corresponents i la eficiència segons la equació 8.

Com era d'esperar, i degut al canvi de pendent tan brusc en la geometria, la capa límit es desprèn amb molta facilitat. Tal i com es veu en la figura 24 les línies de camp no s'arrapen gens ni mica al difusor i es produeix el despreniment tan bon punt es dona el canvi de pendent. La figura 25 mostra com la depressió fruit del despreniment de la capa límit fa que entri flux d'aire per la part posterior del vehicle, cosa que s'hauria d'evitar.

Pel que fa a les distribucions de pressió i velocitat no aporten informació més rellevant de la que ja ofereixen les línies de corrent. És doncs primordial suavitzar el canvi de pendent del difusor per tal d'evitar el despreniment de la capa límit e intentar que el fluid s'arrapi més al difusor. Recordem que evitar el despreniment és vital no tan sols per reduir el *drag* sinó per a utilitzar el fluid dinàmicament al nostre favor.

4.3.2. Simulació 2D: segon disseny

Tal i com s'ha comentat anteriorment s'ha suavitzat el canvi de pendent existent en el disseny anterior. Per a fer-ho també de la manera més simple s'ha optat per utilitzar una corba tangent al terra pla del vehicle amb radi constant que uneix els dos punts que queden flotant en la geometria de partida.

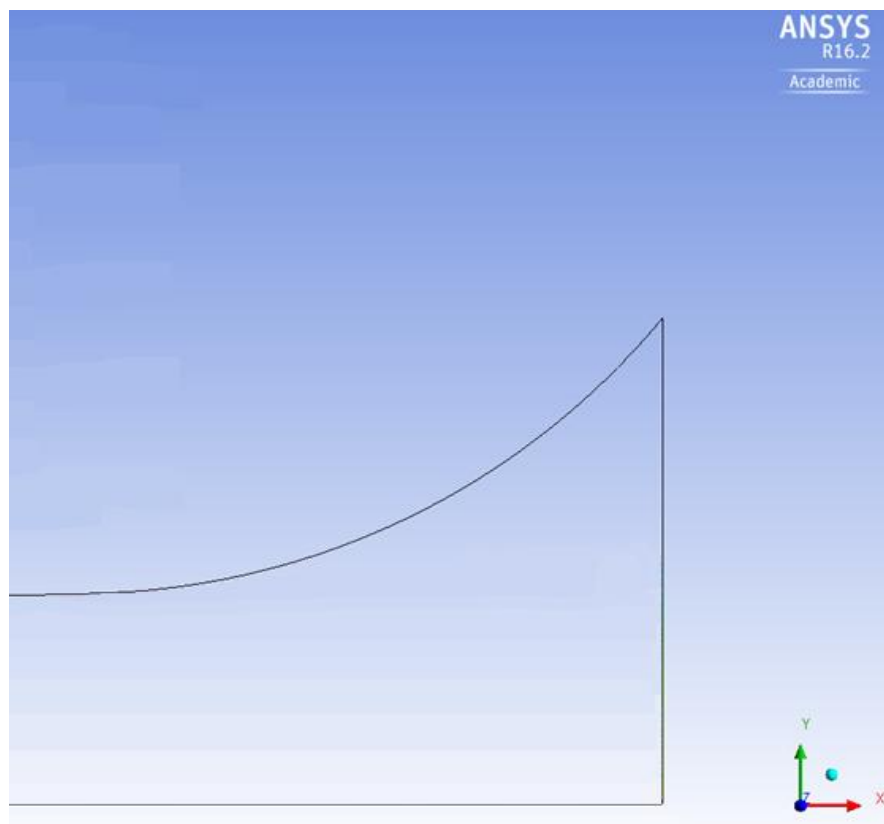


Figura 26. Geometria del segon disseny.

Aplicant el mateix tipus de mallat per aquest model s'obtenen els següents resultats:

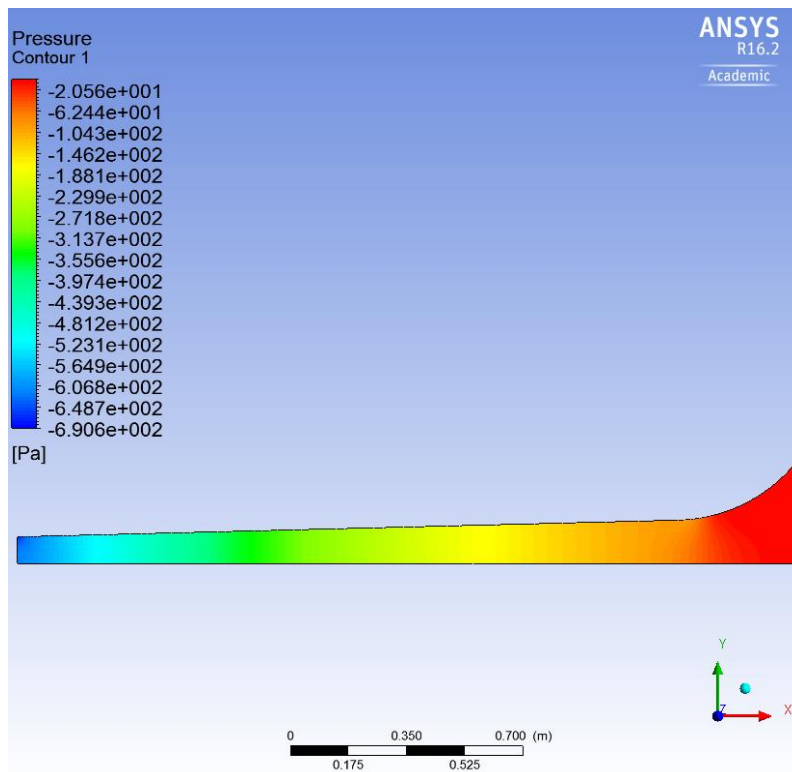


Figura 27. Mapa de pressions del segon disseny.

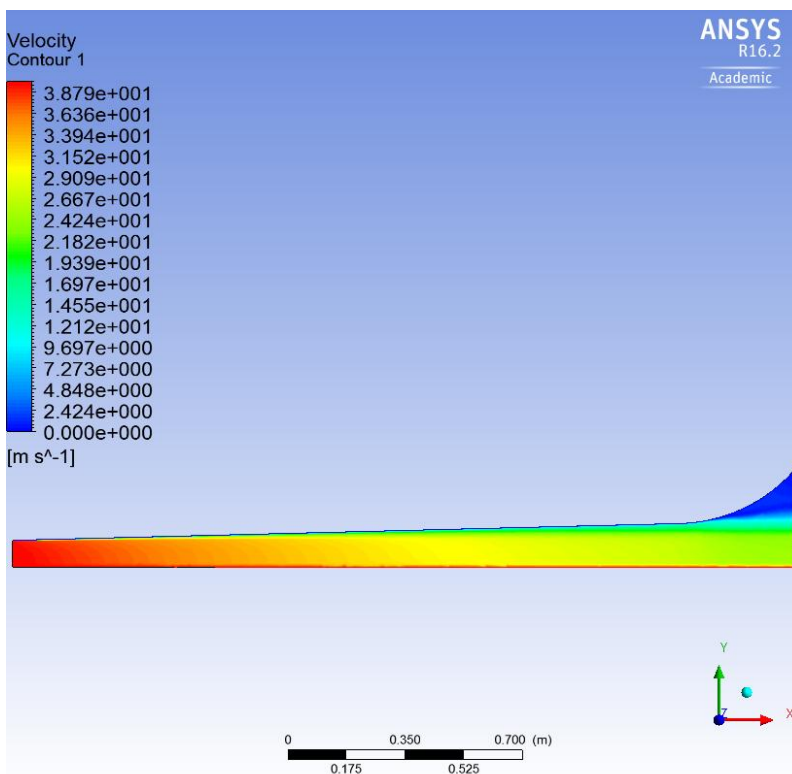


Figura 28. Mapa de velocitats del segon disseny.

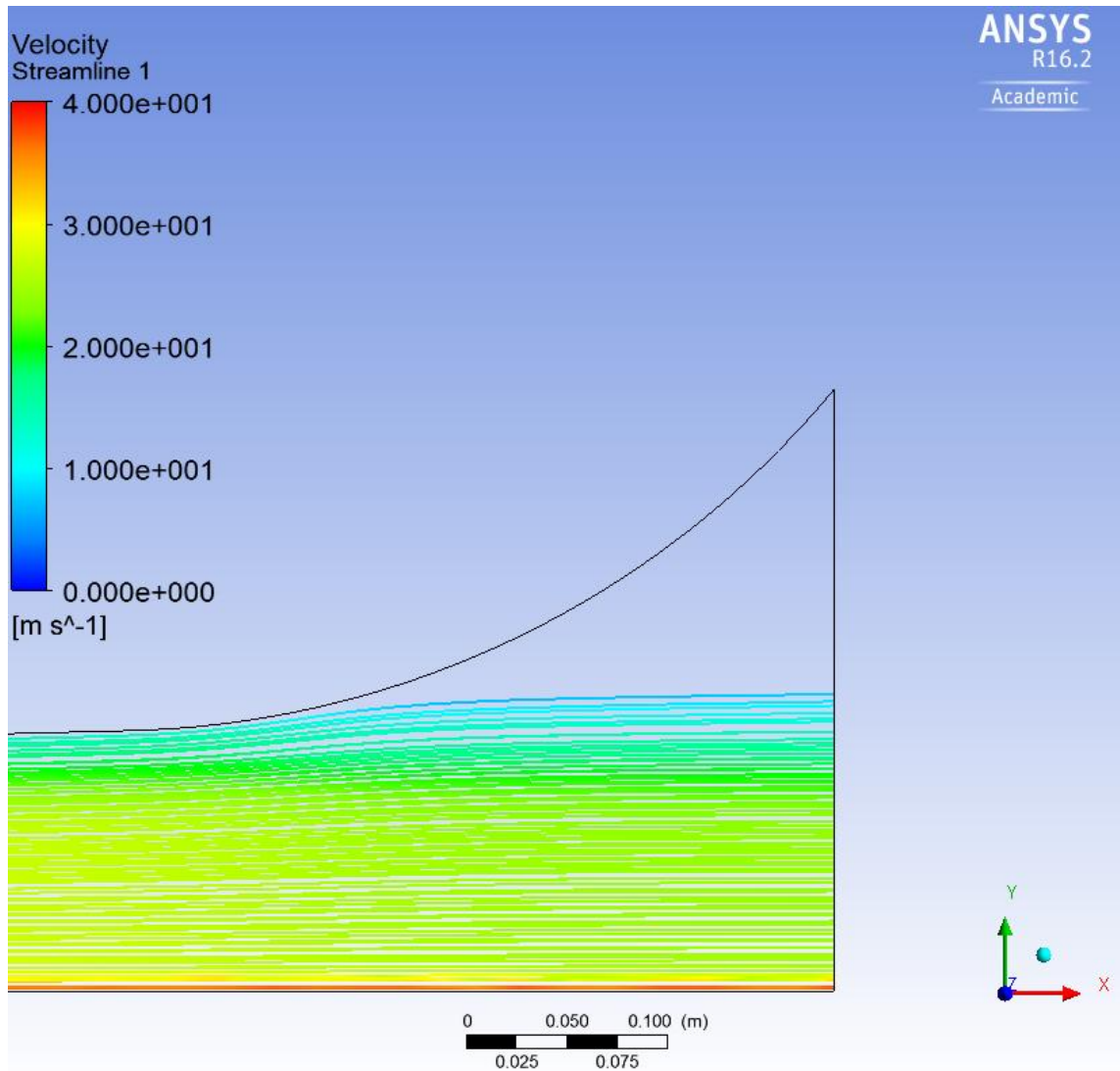


Figura 29. Línies de corrent que entren per la cara anterior del segon disseny.

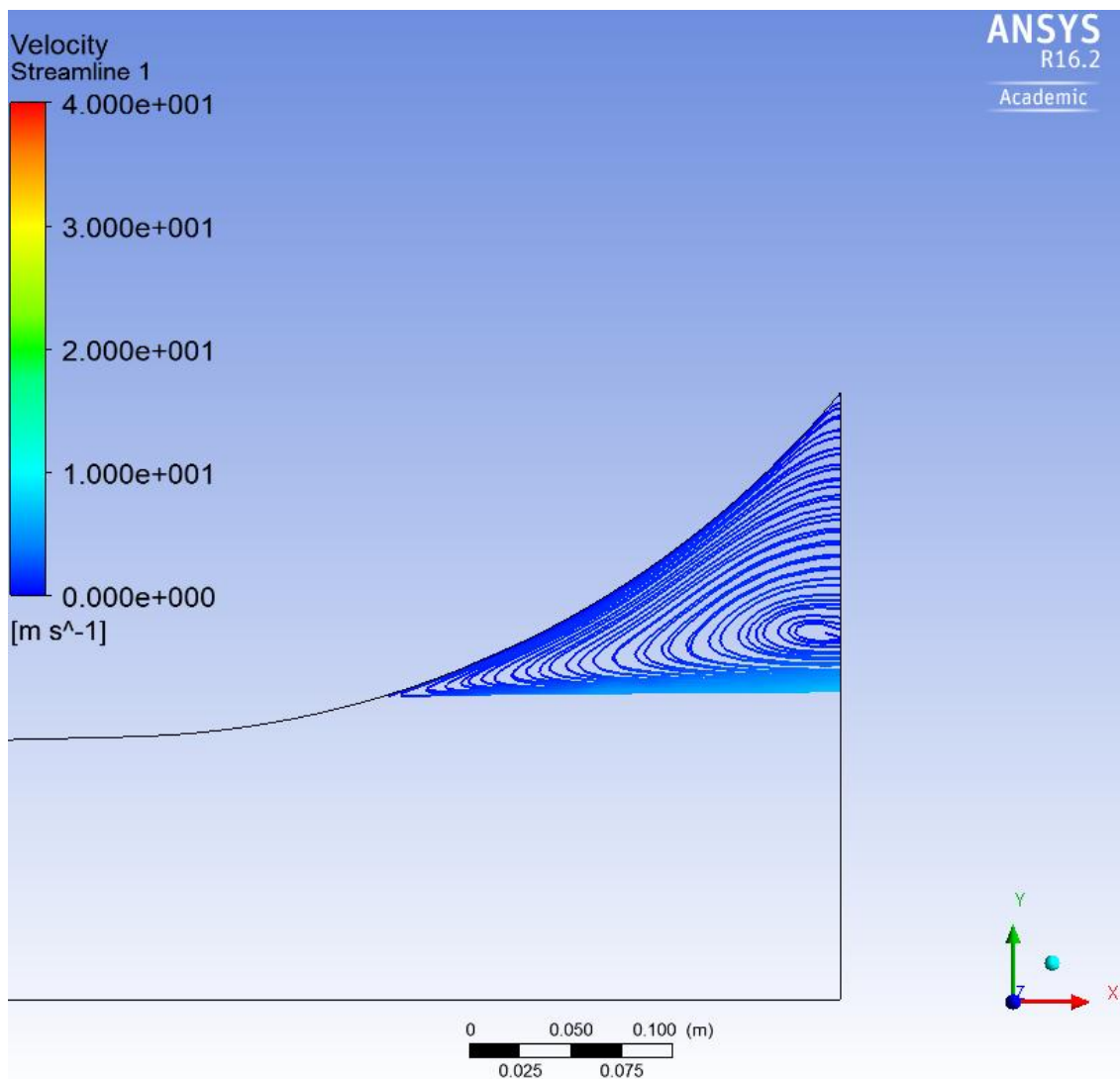


Figura 30. Línies de corrent que entren per la cara posterior del segon model degut a la depressió generada pel desprendiment de la capa límit.

Downforce [N]	Drag fricció [N]	Drag pressió [N]	Drag Total [N]	Cd	Cl	Eficiència
-591,780	3,482	15,714	19,196	0,0653	-0,2585	30,828

Figura 31. Resultats de la simulació del segon disseny.

En el disseny actual s'aprecia per sobre de tot una millora del 21,64% pel que fa a la quantitat de carga aerodinàmica generada. Això és degut, en part, a que el flux d'aire segueix la trajectòria imposada pel difusor a causa de la capa límit, com a mínim bastant més que en el cas anterior on el desprendiment era casi instantani en entrar l'aire al difusor. Aquest disseny de difusor és millor que l'anterior de forma significativa i un clar indicatiu n'és l'augment percentual de *downforce*, el qual reforça la hipòtesi de que evitant el desprendiment de la capa límit o retardant-ne la seva aparició obtenim models amb millors

resultats.

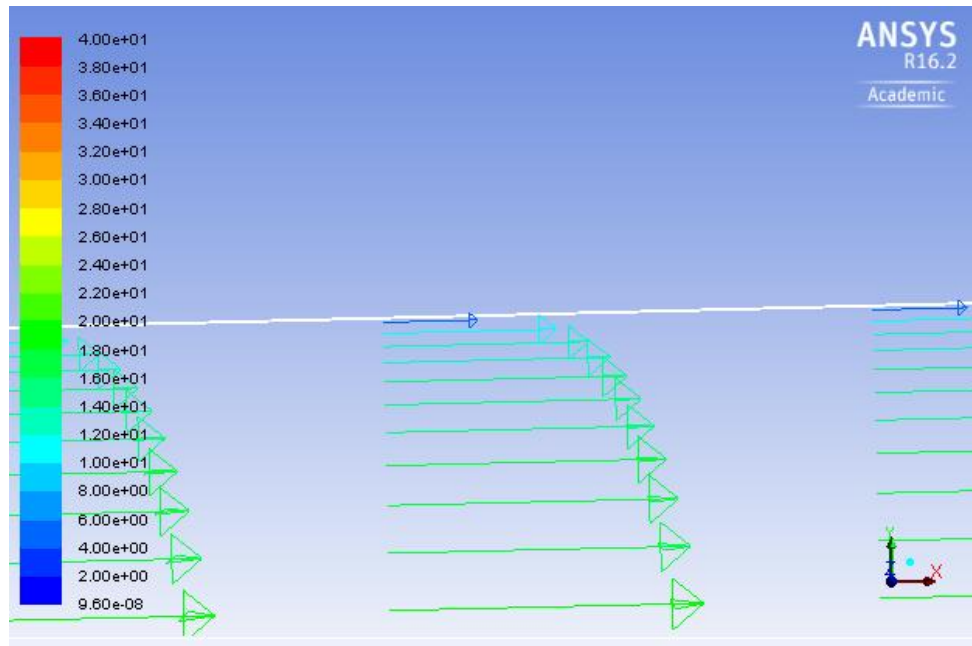


Figura 32. Mapa de vectors de la capa límit sobre el fons pla. No hi ha despreniment.

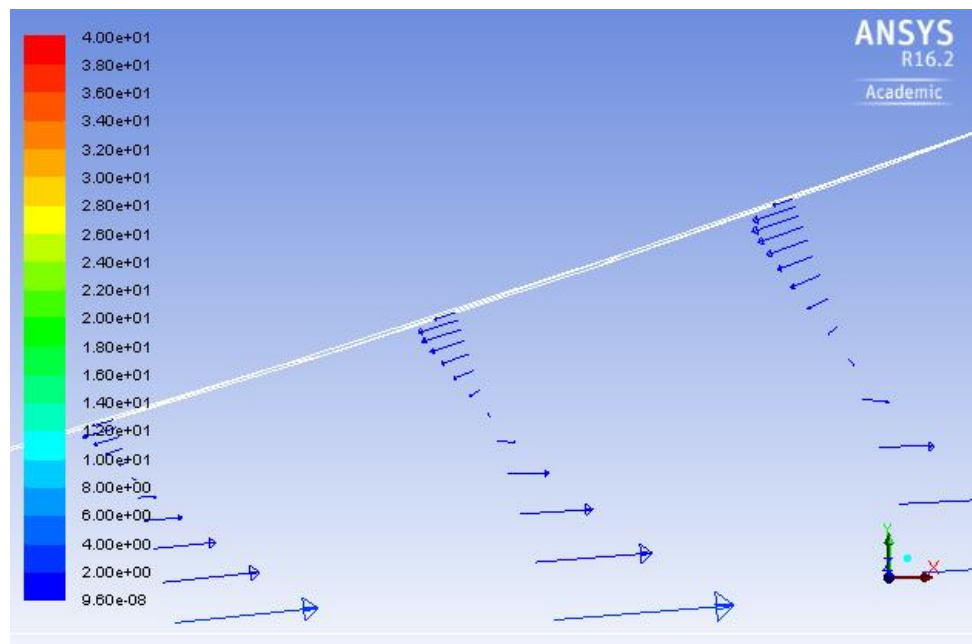


Figura 33. Mapa de vectors de la capa límit en el difusor. S'inicia el despreniment.

Les figures anteriors són mapes de vectors de la velocitat del fluid que reflecteixen els efectes que la capa límit té sobre aquest. La figura 32 mostra com les forces viscoses de la capa límit alenteixen les partícules de fluid més proper al difusor. Per altre banda la figura 33 mostra que arribats a cert punt del difusor el gradient de pressions és tant gran que fa recular el fluid en sentit contrari al de l'avanç del vehicle, per tant queda reflectit el

despreniment de la capa límit. Així, tot i la millora en la trajectòria que segueix el fluid, encara es segueix donant molt de despreniment de la capa límit i molt aviat (figures 29 i 30), caldria doncs seguir amb la mateixa metodologia per tal de allunyar el punt de separació el màxim possible. Per aconseguir-ho cal una geometria encara més suau que la dissenyada, ens veiem obligats doncs a dissenyar el difusor a través d'una corba *spline*.

4.3.3. Simulació 2D: tercer disseny

Seguint amb la mateixa idea d'intentar evitar el despreniment de la capa límit o almenys fer que es doni el més tard possible, el tercer disseny s'ha elaborat amb *splines* per garantir que la expansió del fluid es fa de forma més suau que en el cas anterior.

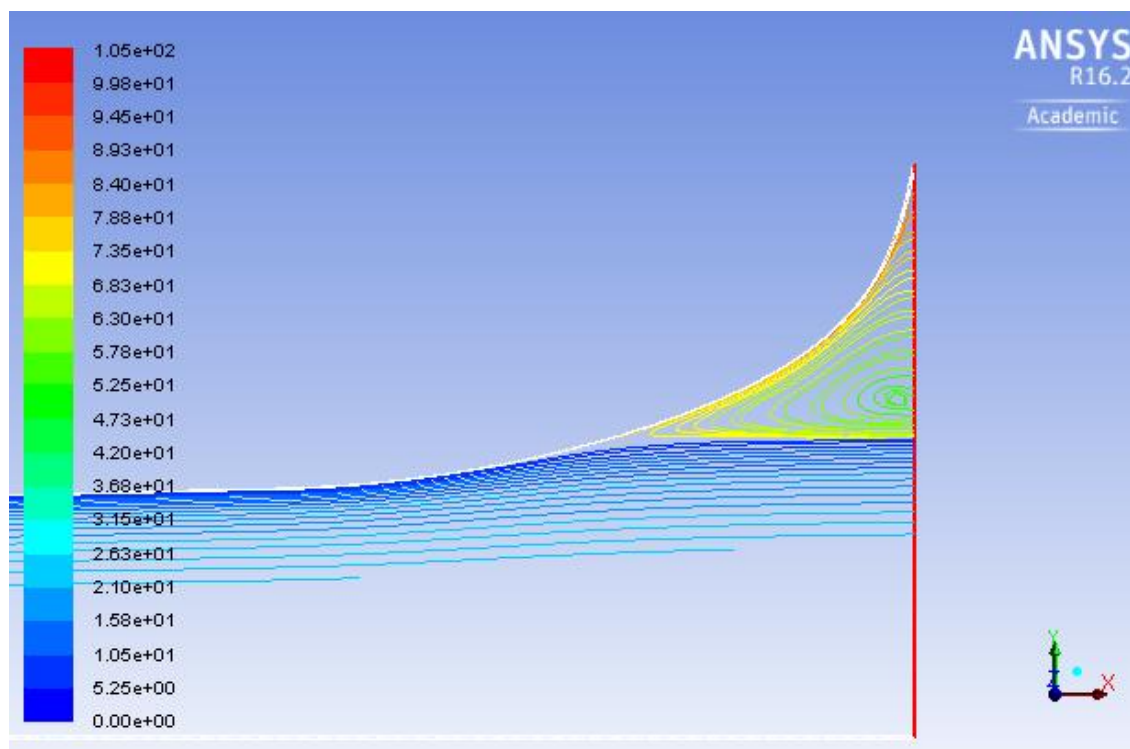


Figura 34. En tons grocs les línies de corrent que entren per la cara posterior del tercer disseny atès a la depressió generada pel despreniment de la capa límit, en tons blaus les que entren per la cara anterior.

Downforce [N]	Drag fricció [N]	Drag pressió [N]	Drag Total [N]	Cd	Cl	Eficiència
-623,794	2,889	16,691	19,581	0,0666	-0,2724	31,857

Figura 35. Resultats de la simulació del tercer disseny.

En el tercer disseny la carga aerodinàmica obtinguda es major que en qualsevol dels anteriors, clarament el fet d'intentar evitar el despreniment de la capa límit o retardar-lo esdevé bo per al model. En aquest cas, i gràcies a la utilització de les corbes *spline* veiem com les línies de corrent s'arrapen bastant més al difusor que en models anteriors (línies de corrent de tons blavosos), tenint això conseqüències positives en els resultats. Tot i així el model encara presenta força despreniment de capa límit (reflectit per les línies de corrent de tons grocs) el qual s'haurà d'intentar evitar en futurs dissenys per tal de millorar-ne el funcionament.

Arribats a aquest punt s'han elaborat diferents models difusor seguint amb el *modus operandi* i amb els raonaments exposats. Dits models, que es poden veure a l'apartat 2 de l'annex, no han revelat millors significatives per al funcionament del difusor.

El problema principal esdevé que, per una banda cal una expansió molt progressiva perquè els canvis bruscs en geometria causen el despreniment de forma immediata, però per l'altre cal expandir l'aire el màxim possible. Això ha conduït a pensar en que podria ser millor per al funcionament del difusor el no apurar al màxim les dimensions límit imposades per la *FIA*. En aquest marc s'ha intentat dissenyar un model de difusor més baix per tal d'evitar el despreniment de la capa límit però a la vegada el més alt possible tenint en compte això últim.

4.3.4. Simulació 2D: quart disseny

Tal i com s'ha comentat prèviament s'ha dut a terme un model de difusor més baix que els anteriors per tal de trobar el punt òptim entre expansió màxima del fluid i geometria suficientment suau per evitar el despreniment de la capa límit.

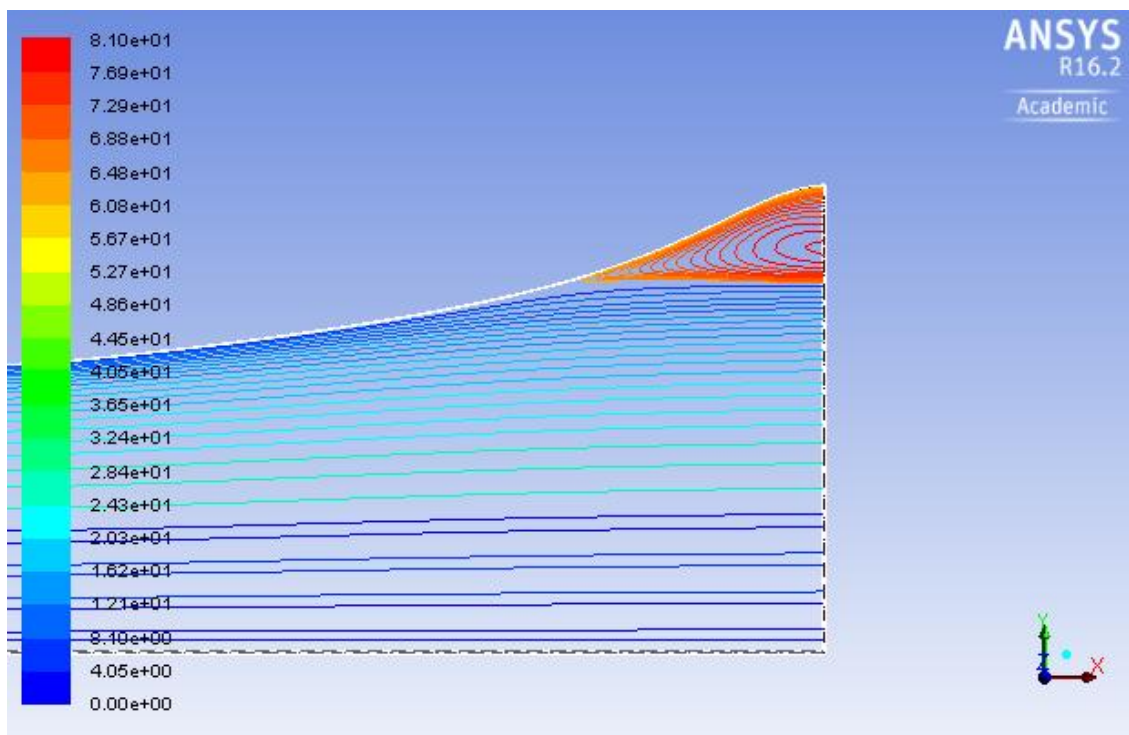


Figura 36. En tons vermellors les línies de corrent que entren per la cara posterior del quart disseny atès a la depressió generada pel despreniment de la capa límit, en tons blaus les que entren per la cara anterior.

Downforce [N]	Drag fricció [N]	Drag pressió [N]	Drag Total [N]	Cd	Cl	Eficiència
-661,885	3,504	18,136	21,639	0,0736	-0,2891	30,59

Figura 37. Resultats de la simulació del quart disseny.

Tal i com es veu en la figura 36 s’ha aconseguit un model on el fluid segueix molt la trajectòria del difusor (línies de corrent de tons blavosos) i per tant que presenta poc despreniment de la capa límit. Tot i que la eficiència del model és inferior a la de models anteriors es considera que aquest model és millor que els altres ja que una millora percentual de 5,75% en *downforce* és molt significativa, i, recordem que com més carga aerodinàmica generi el difusor més podrem relaxar els angles d’incidència d’altres dispositius destinats a generar *downforce* però amb un cost molt més alt en resistència aerodinàmica.

En definitiva, que per a augmentar el *downforce* fent ús d’altres dispositius hauríem de pagar un preu molt més alt pel que fa a resistència aerodinàmica. Així 21,992N de resistència aerodinàmica és un valor baixíssim i un preu molt baix a pagar per als 673,789N de *downforce* generats.

4.3.5. Simulació 2D: cinquè disseny

El cinquè i últim model que es presentarà en el treball és el resultat d'explotar la idea del model anterior fins al punt de trobar l'òptim entre altura de difusor i el fet d'evitar el despreniment de la capa límit. Per arribar-hi s'han dut a terme varis models que es poden consultar en l'apartat 2 de l'annex però que no tenen cap importància acadèmica més enllà d'arribar al model òptim ja que tots estan fonamentats en el mateix concepte.

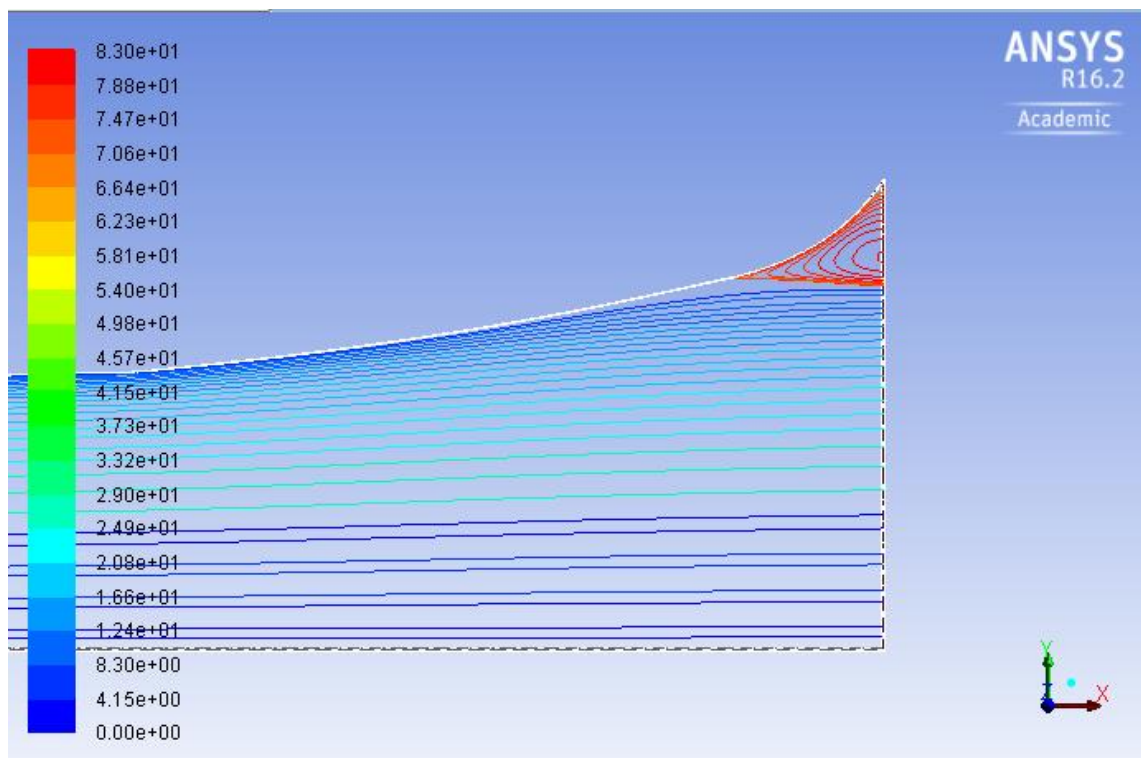


Figura 38. En tons vermellosos les línies de corrent que entren per la cara posterior del cinquè disseny atès a la depressió generada pel despreniment de la capa límit, en tons blaus les que entren per la cara anterior.

Downforce [N]	Drag fricció [N]	Drag pressió [N]	Drag Total [N]	Cd	CL	Eficiència
-673,789	3,506	18,485	21,992	0,07479	-0,2943	30,64

Figura 39. Resultats de la simulació del cinquè disseny.

Tal i com es pot apreciar en les figures anteriors, aquest model de difusor no és sols el model que presenta una carga aerodinàmica superior, sinó que és el disseny que presenta menys despreniment de capa límit amb diferència. S'ha aconseguit retardar moltíssim el

punt de separació gràcies a la utilització de les corbes *spline* per al disseny assistit per ordinador, el qual ha tingut molt bones conseqüències en vista dels resultats obtinguts.

Amb tan sols 21,992N de resistència aerodinàmica aquest disseny de difusor genera 673,789N de *downforce* convertint-lo en el millor disseny obtingut en tot el procés de simulació. No s'ha aconseguit trobar en cap simulació posterior a aquesta cap disseny que superi els 68,68kg de pes que ofereix aquest model, és per això que es considera per conclosa la tasca de cercar el perfil òptim per a un difusor convencional.

A continuació es presenta una taula resum amb les característiques de tots els models bidimensionals que s'han exposat anteriorment per tal de facilitar-ne la comparativa:

Disseny	Downforce [N]	Drag fricció [N]	Drag pressió [N]	Drag Total [N]	Cd	Cl	Eficiència
1	-463,724	3,424	12,152	15,576	0,0529	-0,2025	29,77
2	-591,78	3,482	15,714	19,196	0,0653	-0,2585	30,828
3	-623,794	2,889	16,691	19,581	0,0666	-0,2724	31,857
4	-661,885	3,504	18,136	21,639	0,0736	-0,2891	30,59
5	-673,789	3,506	18,485	21,992	0,0748	-0,2943	30,64

Figura 40. Taula comparativa dels resultats de les diferents simulacions.

Per a procedir amb el treball s'utilitzarà el perfil del cinquè difusor dissenyat per a generar un model de difusor convencional en 3D, el qual s'analitzarà mitjançant el *CFD*, i posteriorment, es transformarà en un model de doble difusor que també s'estudiarà mitjançant la mecànica de fluids computacional.

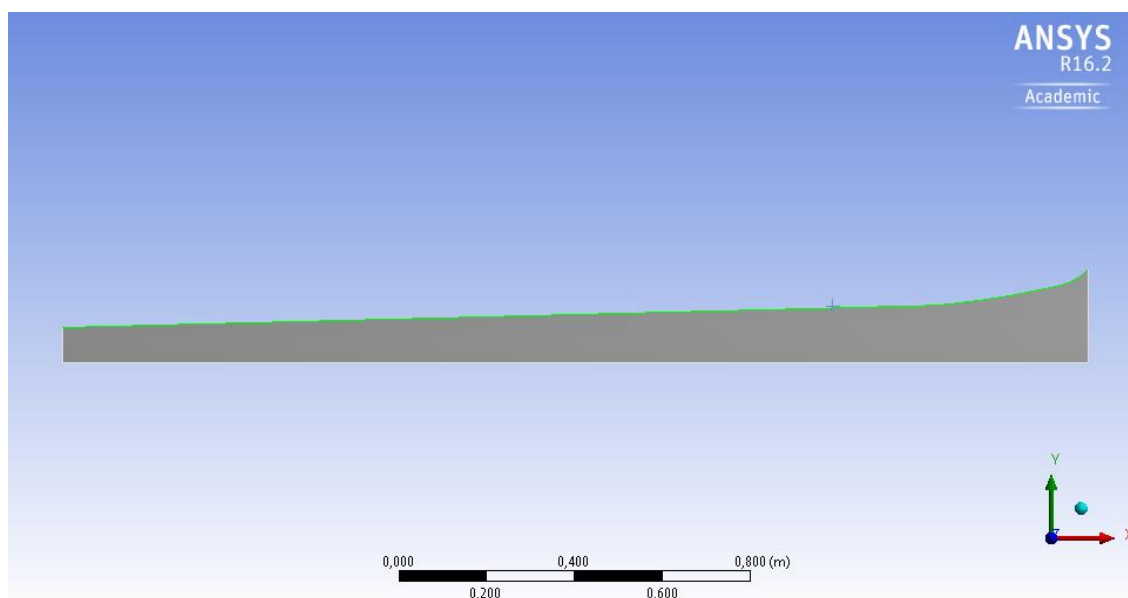


Figura 41. Perfil del volum de control del cinquè disseny de difusor.

4.3.6. Simulació 3D: difusor convencional

Aquest subapartat és un impàs entre el model de difusor convencional en 2D i el model de doble difusor en 3D. L'objectiu és obtenir un disseny tridimensional del difusor convencional que servirà com a punt de partida per posteriorment crear el doble difusor. També es té com a objectiu familiaritzar-se amb l'anàlisi tridimensional en *Ansys* ja que es pot comprovar la seva correcta execució, doncs els resultats obtinguts en l'anàlisi 3D del model haurien de ser molt similars als obtinguts en el cinquè model de difusor convencional estudiat en 2D.

En primer lloc, emprant el perfil del cinquè disseny de difusor convencional trobat en l'apartat 5.2.5 s'ha generat el següent disseny de difusor fent ús del programari *Solidworks*:

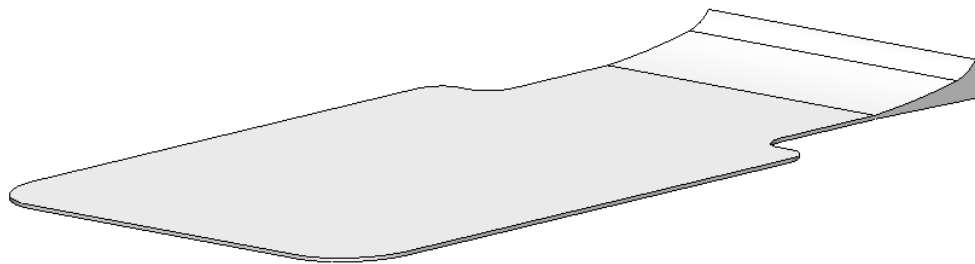


Figura 42. Disseny del difusor en 3D a partir del perfil òptim trobat anteriorment. Cara superior.

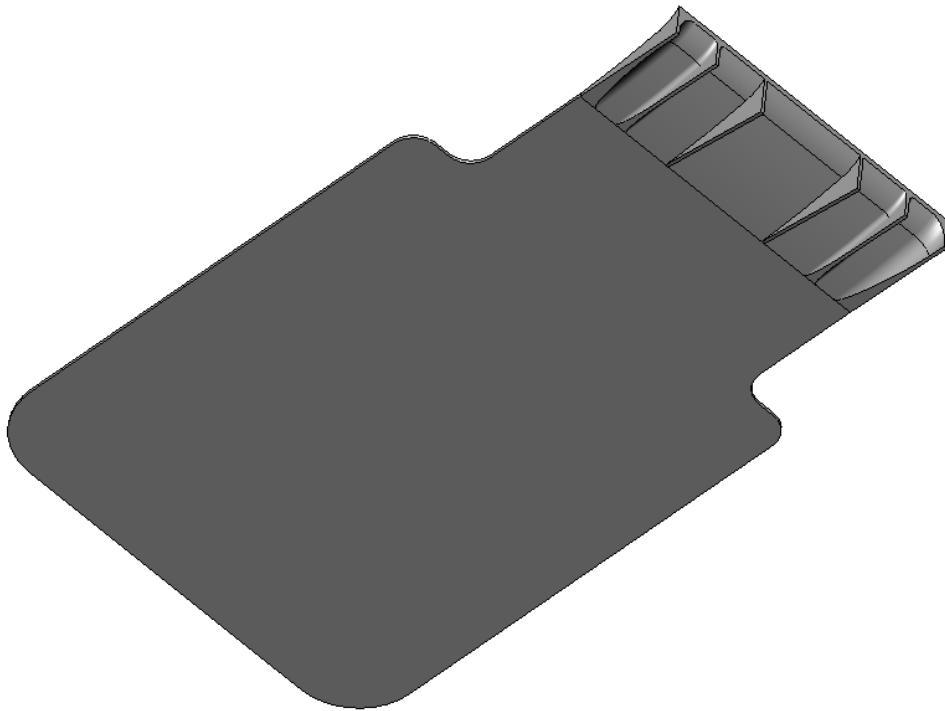


Figura 43. Disseny del difusor en 3D a partir del perfil òptim trobat anteriorment. Cara inferior.



Figura 44. Disseny del difusor en 3D a partir del perfil òptim trobat anteriorment. Cara posterior.

El disseny de les figures anteriors contempla tant el fons pla del monoplaça com el difusor tenint en compte tots els límits dimensionals imposats per la *FIA*. Ara bé, per al seu anàlisi el que necessitem carregar a *Ansys* no és pas aquest disseny geomètric, sinó que necessitem el volum comprés entre dit model i l'asfalt, volum pel qual circula l'aire i que és objecte d'anàlisi. Així doncs, i a fi d'adaptar-nos als requisits de simulació amb *Ansys*, a través del disseny anterior es genera el següent volum de control:

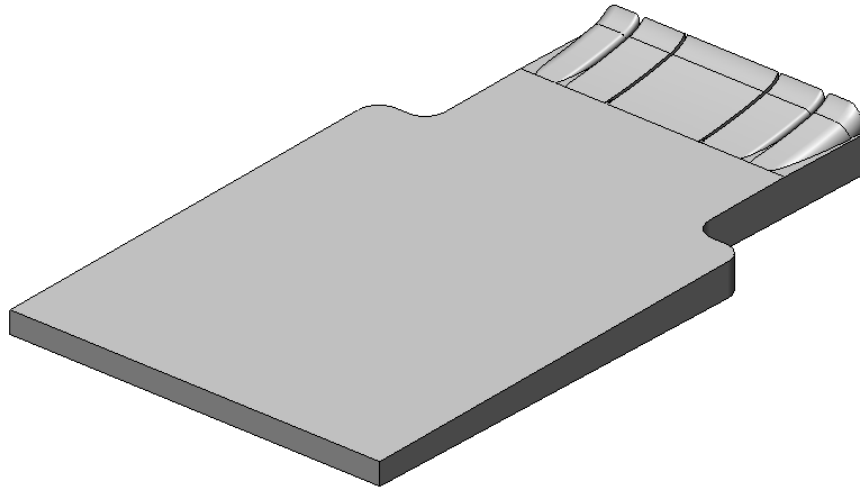


Figura 45. Volum de control corresponent al difusor tridimensional dissenyat.

En la figura 45 es veu el volum de control que s'hauria de mallar i que seria objecte d'estudi. Ara bé, el model presenta certes peculiaritats geomètriques que fan que la simulació esdevingui complexa i lenta. Per tal de facilitar els càlculs de la computadora i optimitzar així el temps d'anàlisi es decideix dur a terme certes simplificacions en el volum de control que es creu que no afectaran significativament al model, el qual es podrà comprovar posteriorment. Així el volum de control definitiu que caldrà mallar i simular és el que segueix:

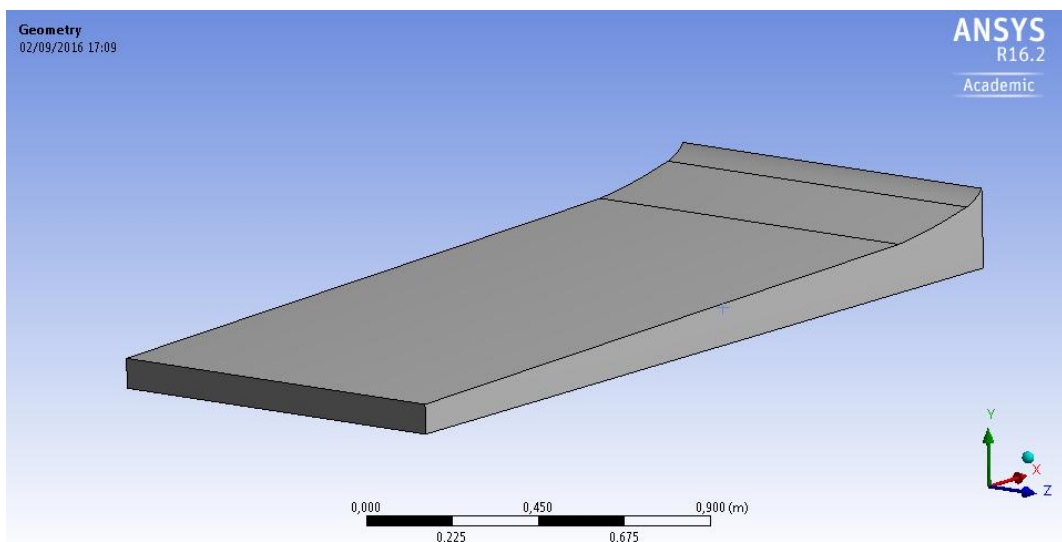


Figura 46. Volum de control resultant de les simplificacions.

En segon lloc i pel que fa al mallat, s'ha decidit relaxar una mica els paràmetres vinculats amb els mètodes de mallat per tal d'agilitzar el procés de càlcul durant les simulacions. La raó fonamental d'aquesta relaxació es deu al gran increment en el nombre d'elements vinculats en l'anàlisi tridimensional que fan que l'ordinador trigui molt en calcular el resultat de la simulació. Així s'ha optat per mallar amb elements de 20mm fent ús del mètode *inflation* amb 13 capes i un gruix màxim de 40mm. Es segueixen usant els tetraedres com a mètode de conformació dels elements.

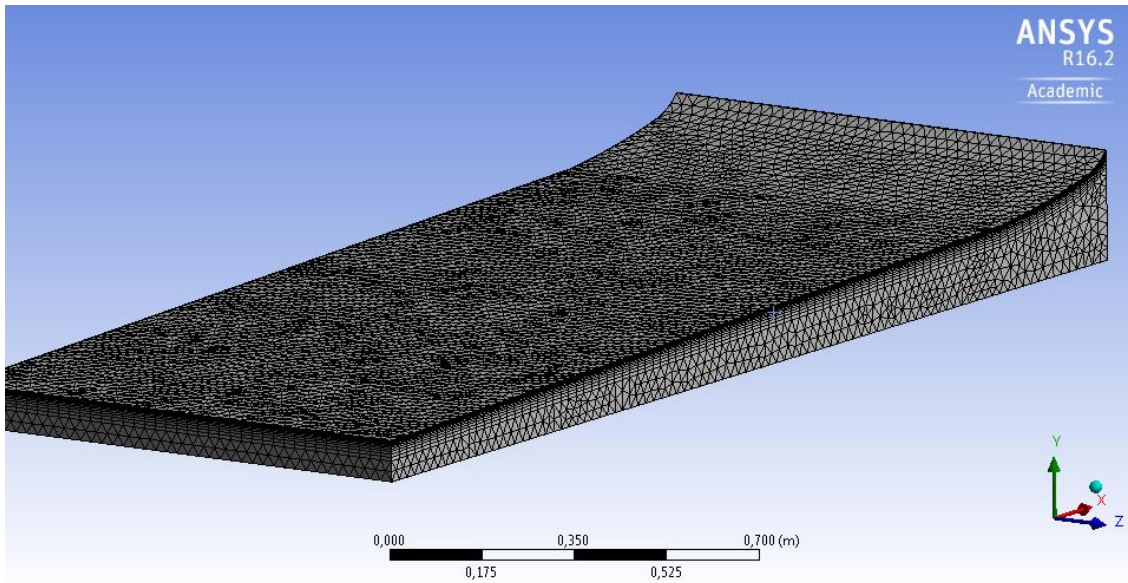


Figura 47. Mallat del volum de control.

Un cop s'ha tingut el model mallat s'ha simulat de forma anàloga als dissenys en 2D, obtenint-se els següents resultats:

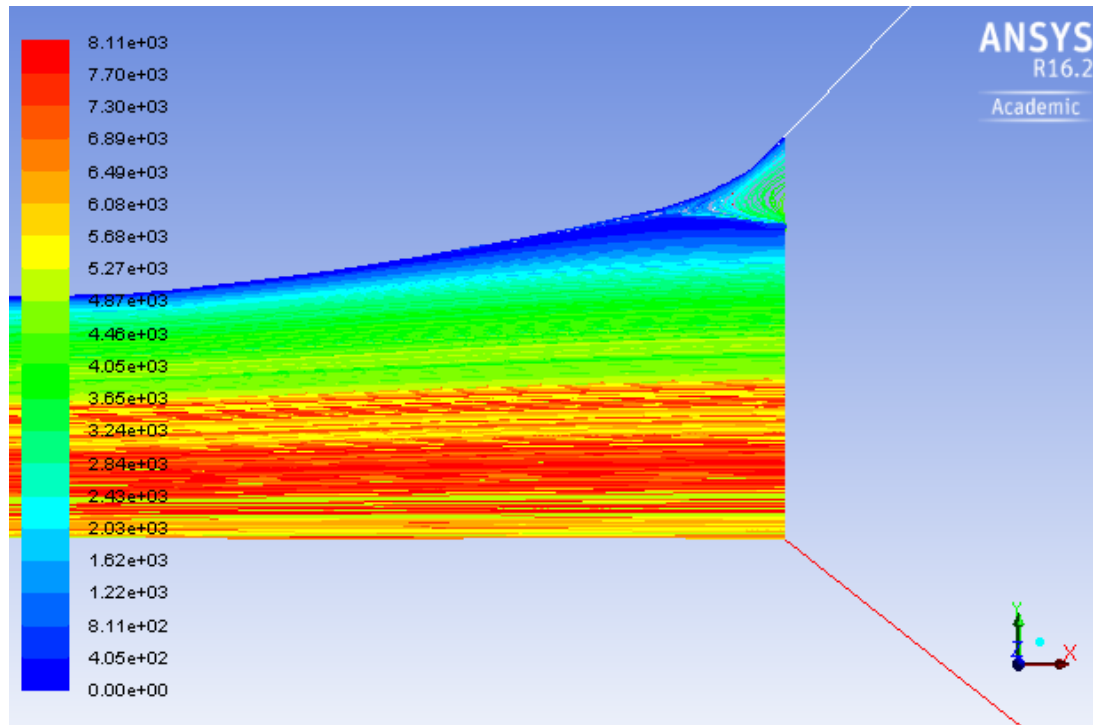


Figura 48. Línies de corrent que entren tan per la cara anterior com posterior del model en el seu pla mig. Veure figura 38.

Downforce [N]	Drag fricció [N]	Drag pressió [N]	Drag Total [N]	C _D	C _L	Eficiència
-668,513	3,688	18,537	22,225	0,07431	-0,2920	30,08

Figura 49. Resultats de la simulació del disseny tridimensional.

Els resultats obtinguts són molt similars als obtinguts en el mateix model per a l'anàlisi en 2D, a més a més, es veu clarament com les línies de corrent per a un pla del disseny són idèntiques a les línies de corrent que oferia l'anàlisi bidimensional. Les petites variacions que s'han donat entre ambdós anàlisis s'atribueixen a les simplificacions geomètriques dutes a terme i a la relaxació del mallat.

Un cop familiaritzats amb la simulació en 3D i en vista de l'èxit en els resultats obtinguts el següent pas és la incorporació d'un canal en V en el difusor convencional per tal d'aconseguir un disseny adient de doble difusor per al posterior anàlisi comparatiu.

4.3.7. Simulació 3D: doble difusor

Tal i com s'ha exposat anteriorment, en aquest apartat s'implementarà un disseny de doble difusor a partir del model de difusor convencional obtingut.

Com ja s'ha explicat, el doble difusor consisteix en la incorporació d'un canal en forma de V en el difusor convencional que aprofita aire que circula per la part superior del monoplaça per a expandir-lo i generar així major carga aerodinàmica. Així un doble difusor ben implementat serà aquell que ofereixi major *downforce* que un difusor convencional en les mateixes condicions d'estudi.

La geometria del doble difusor no és trivial i la dificultat del disseny recau en dissenyar un doble difusor efectiu i que tingui una geometria prou simple com perquè les solucions en *Ansys* puguin convergir. Evidentment una part fonamental del procés per tal de que les solucions convergeixin serà també el mallat del model. Per al seu disseny s'ha seguit fent ús del programari *Solidworks* obtenint-se el següent model:

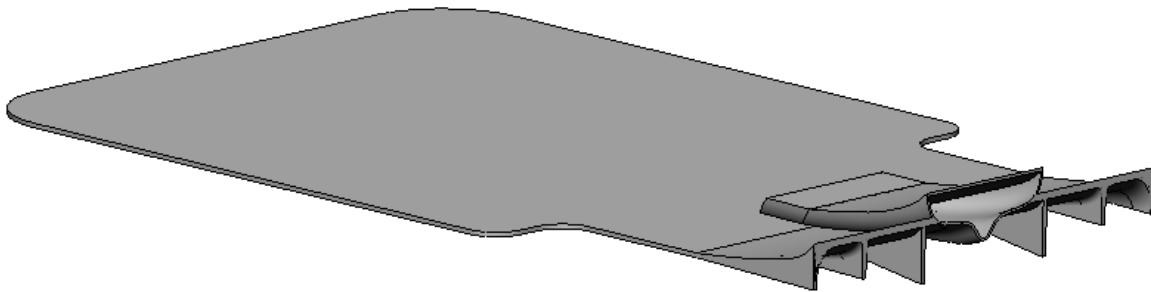


Figura 50 . Disseny del doble difusor a partir del perfil òptim trobat.

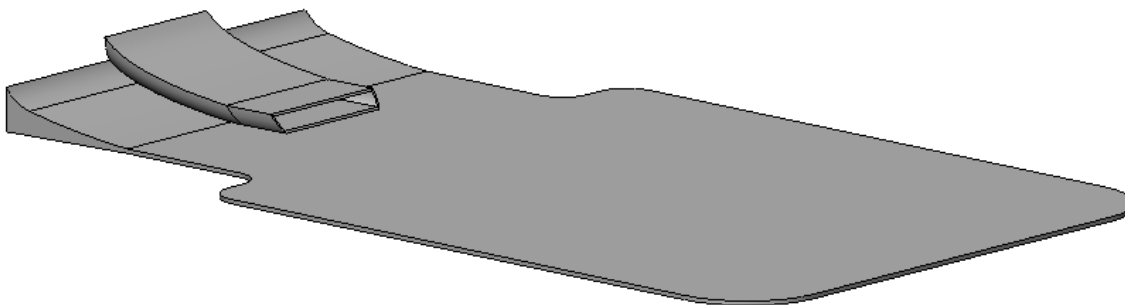


Figura 51. Disseny del doble difusor a partir del perfil òptim trobat.

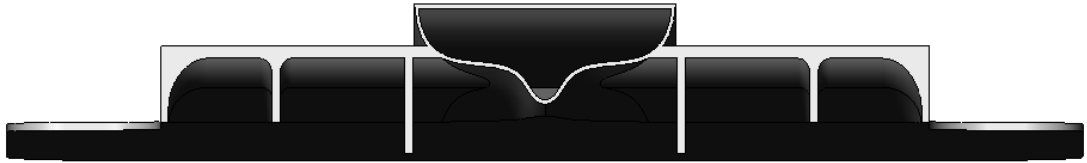


Figura 52. Disseny del doble difusor a partir del perfil òptim trobat. Cara posterior.

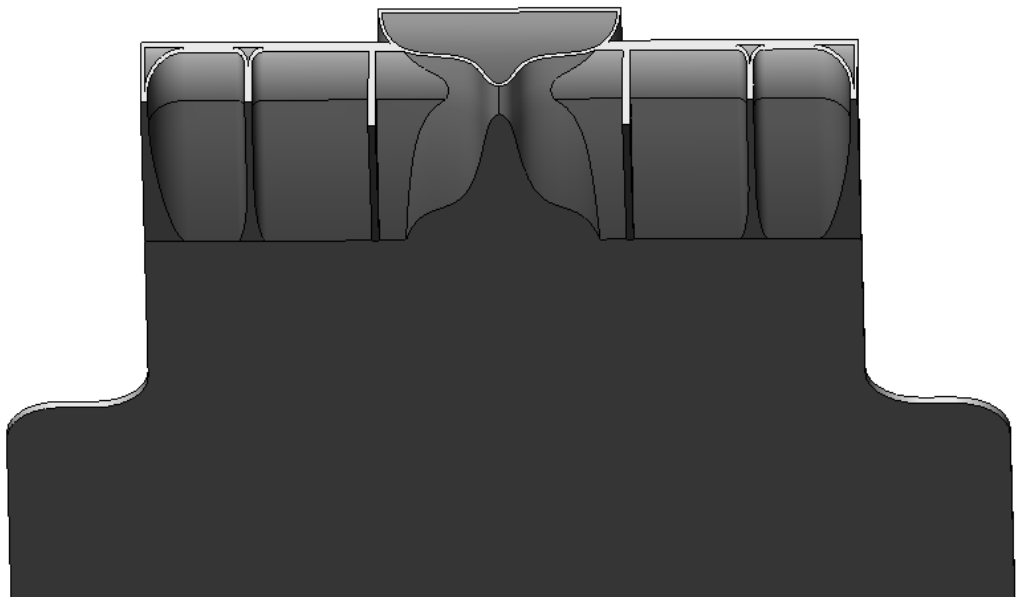


Figura 53. Disseny del doble difusor a partir del perfil òptim trobat. Cara inferior.

En les figures anteriors es pot apreciar com la cavitat en V es troba una mica a sobre del difusor, això és possible i no supera els límits dimensionals imposats per la *FIA* ja que, si recordem, el model de difusor convencional s'havia implementat per sota dels límits dimensionals.

Per a la simulació d'aquest disseny també ens veiem obligats a tindre d'obtenir el volum de control per on circula el fluid. Atès a què existeixen dos volums per on hi circulen diferents fluxos d'aire ens veiem obligats doncs a obtenir dos volums de control que, un cop aplicades les simplificacions geomètriques convenientes per a facilitar els càlculs a la computadora, tenen l'aspecte següent:

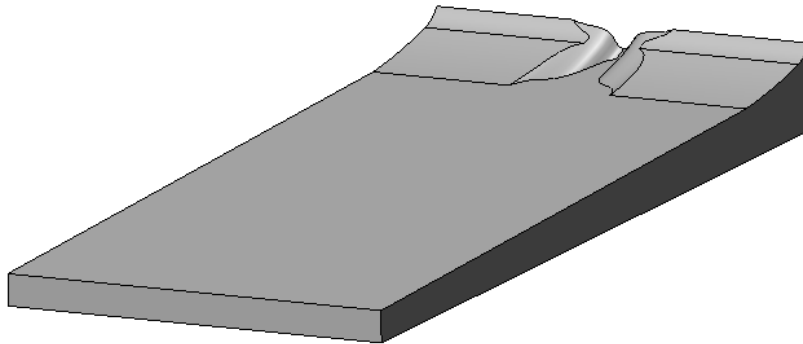


Figura 54. Volum de control corresponent a la part inferior del difusor aplicades ja les simplificacions pertinents.

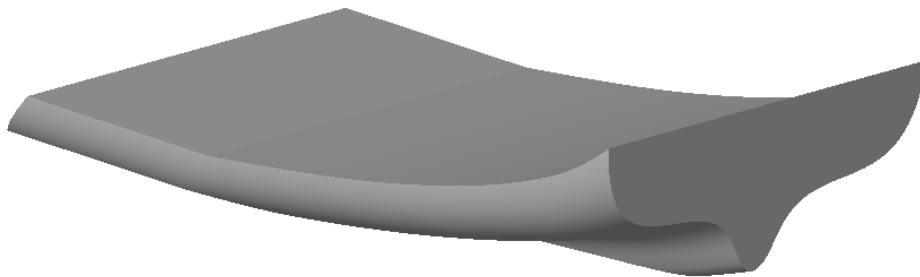


Figura 55. Volum de control de la cavitat en forma de V del doble difusor.

Per al mallat del volum inferior del difusor s'han ajustat els mètodes de mallat tal que els elements tenen una mida de 20mm i l'*inflation* presenta 13 capes amb un gruix màxim de 40mm. Aquesta petita relaxació respecte als paràmetres utilitzats en l'estudi bidimensional té com a finalitat agilitzar el procés de càlcul durant la simulació atès a què en 3D el nombre d'elements és molt més superior. Pel que fa a la cavitat en forma de V s'ha optat per elements de 10mm on l'*inflation* presenta 12 capes amb un gruix màxim de 10mm. També en ambdós volums d'ha optat pels tetraedres com a mètodes de conformació dels

elements.

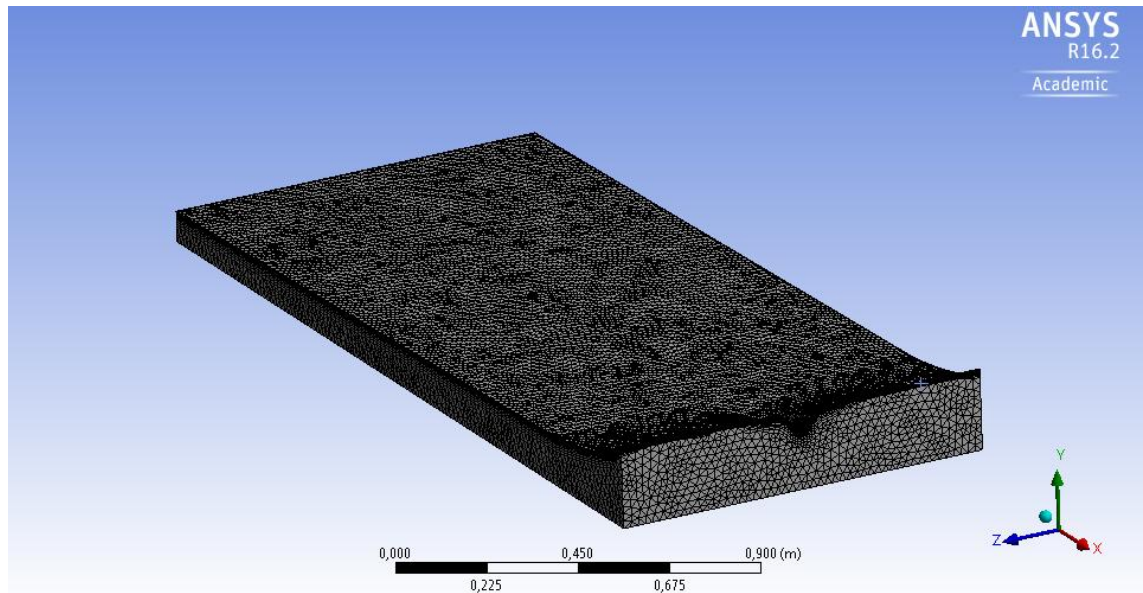


Figura 56. Mallat del volum de control de la part inferior del doble difusor.

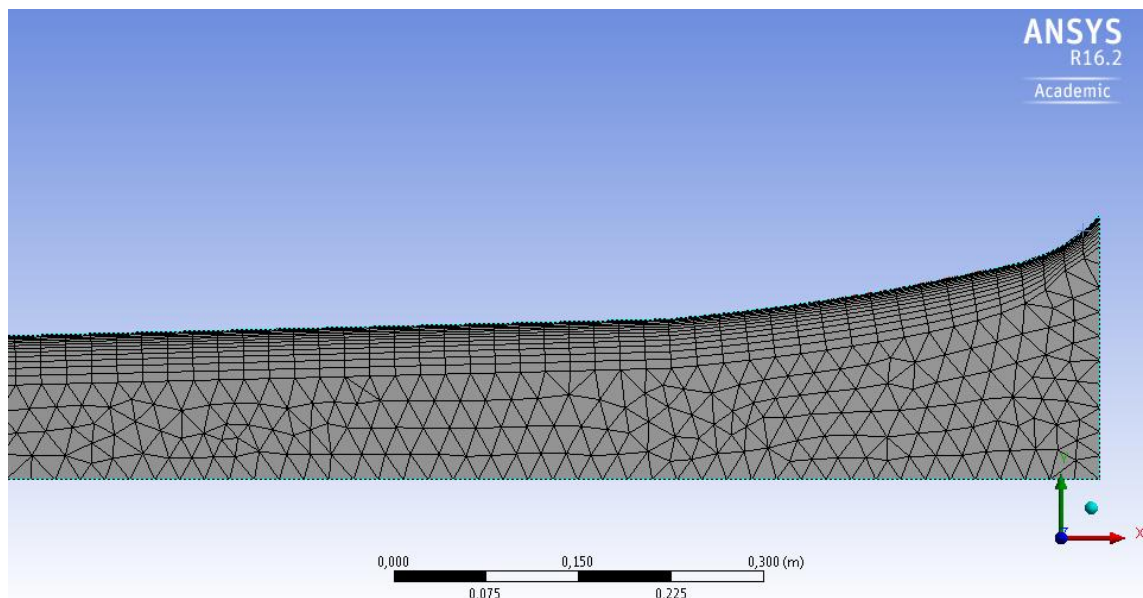


Figura 57. Mallat del volum de control de la part inferior del doble difusor. Vista de perfil.

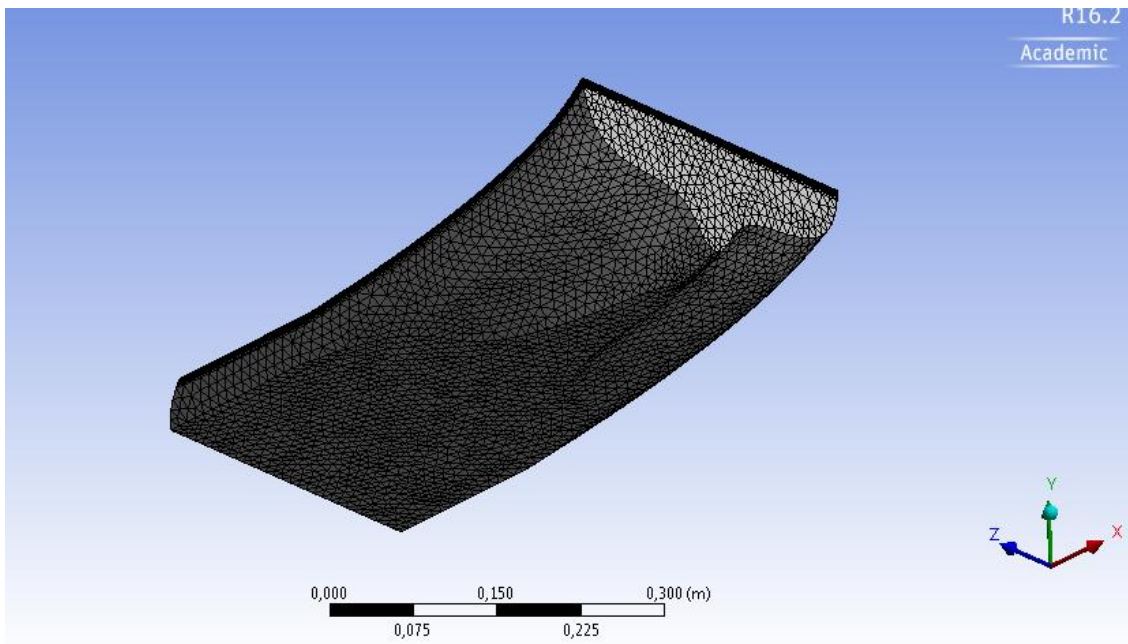


Figura 58. Mallat del volum de control corresponent a la cavitat en V del doble difusor.

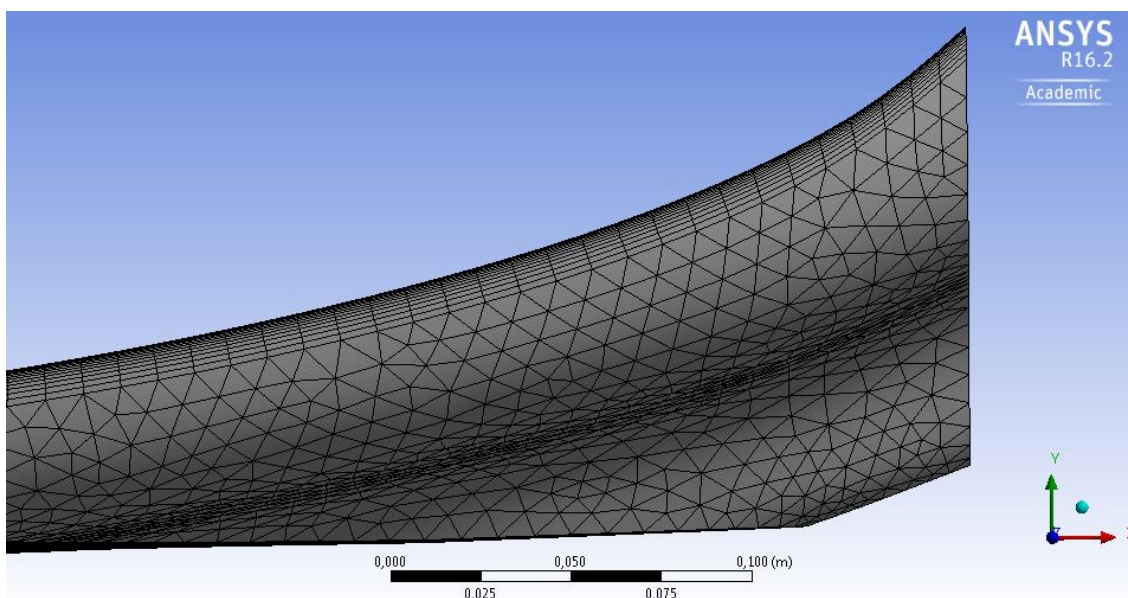


Figura 59. Mallat del volum de control corresponent a la cavitat en V del doble difusor. Vista de perfil.

Atès a aquè es disposa de dos volums d'estudi i no pas d'un sol caldrà dur a terme doncs dos simulacions diferents. Un cop dutes a terme ambdues simulacions és sumaran els resultats obtinguts per tal d'obtenir un resultat global. Per tal d'entendre bé com es duran a terme les simulacions per separat hi ha un aspecte a aclarir: a quina velocitat entra el flux d'aire que circula per la cavitat en V?

Cal tenir ben present que en F1 es compta amb una infinitat de dispositius aerodinàmics i formes geomètriques de xasis diferents per tal de dirigir el flux d'aire allí on ens interessa.

En el cas del doble difusor, dits dispositius i formes de xasís aconseguirien dirigir una gran quantitat de flux d'aire a la cavitat en V del doble difusor. Com que hem realitzat tots els anàlisis suposant que el monoplaça circulava a 40m/s, i aplicant la equació de conservació de la massa (eq.2), és fàcil d'entendre que, en el pitjor dels casos, el flux d'aire entrarà a la cavitat en V a 40 m/s. Això és així ja que la secció de pas del flux d'aire en l'entrada de la cavitat en V mai serà superior a la secció de pas del flux d'aire en qualsevol punt situat al davant del coxe (on és màxima).

Així es realitzen les simulacions utilitzant els mateixos paràmetres físics i condicions de contorn que en les simulacions anteriors pel que fa al volum de control inferior. Per al volum de control superior (cavitat en V) s'estableix *velocity inlet* a 40m/s en la cara anterior (com ja hem explicat), *pressure outlet* a 0Pa en la cavitat posterior (pressió atmosfèrica) i *wall* (paret) a la resta de cares. S'obtenen així els següents resultats:

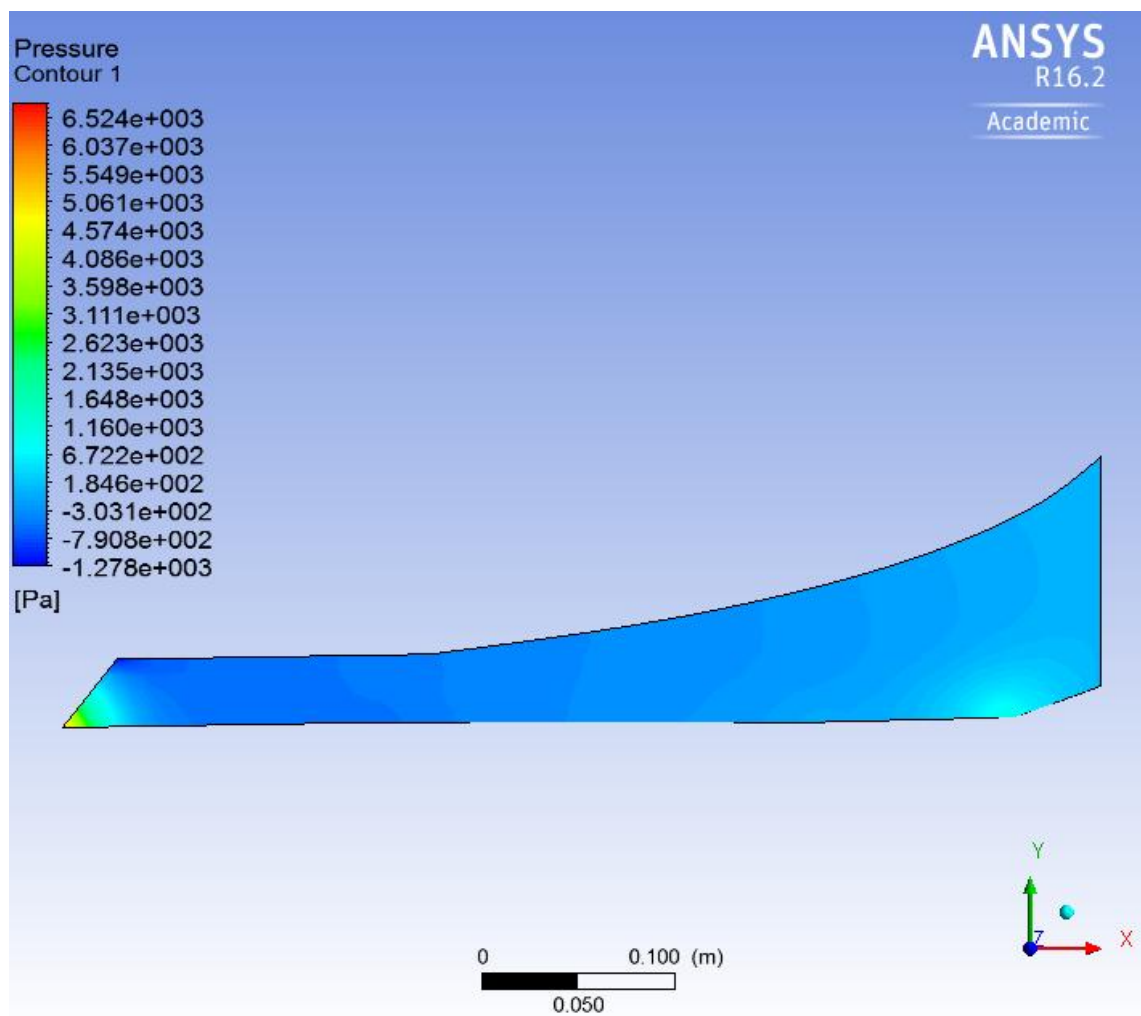


Figura 60. Mapa de contorns de pressió del pla mig de la cavitat en forma de V del doble difusor.

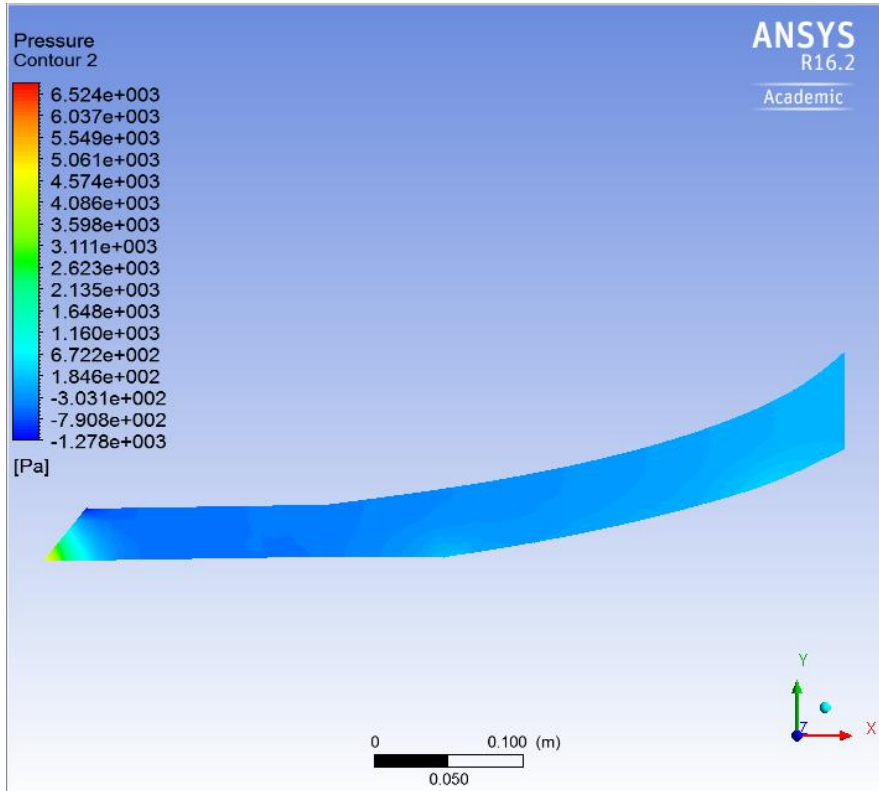


Figura 61. Mapa de contorns de pressió del pla que queda a un quart de la distancia total lateral de la cavitat en forma de V d'un dels seus plans laterals més externs.

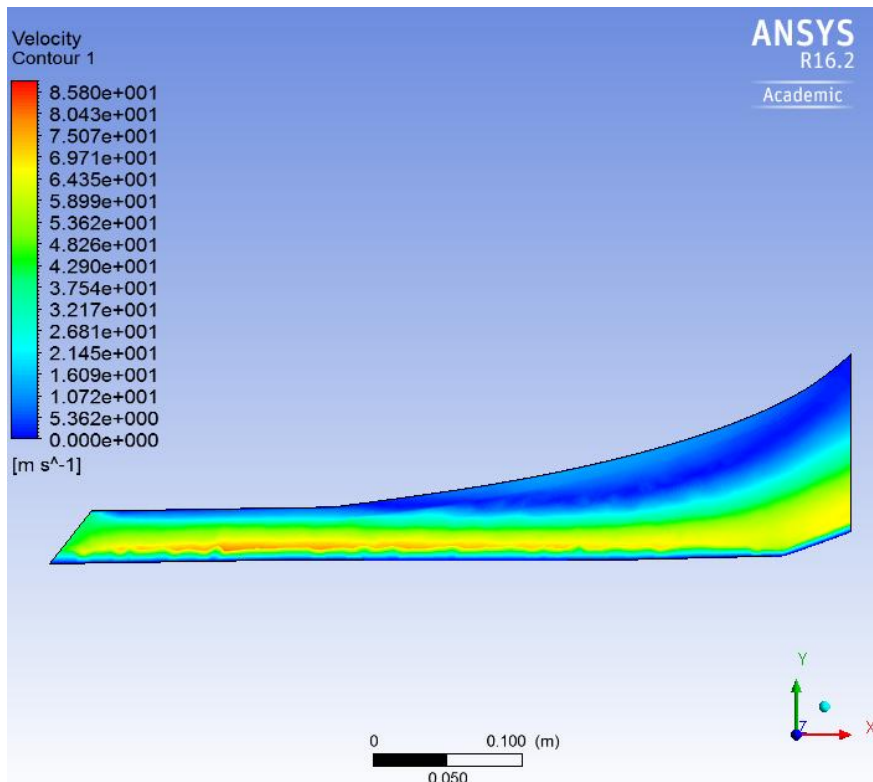


Figura 62. Mapa de contorns de velocitat del pla mig de la cavitat en forma de V del doble difusor.

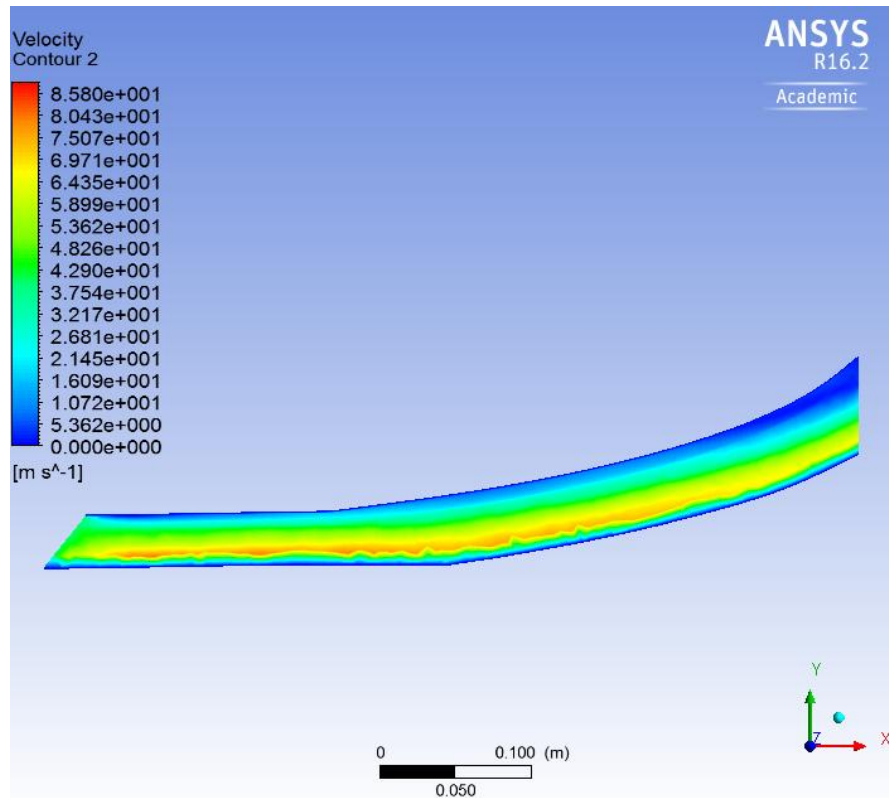


Figura 63. Mapa de contorns de velocitat del pla que queda a un quart de la distancia total lateral de la cavitat en forma de V d'un dels seus plans laterals més externs.

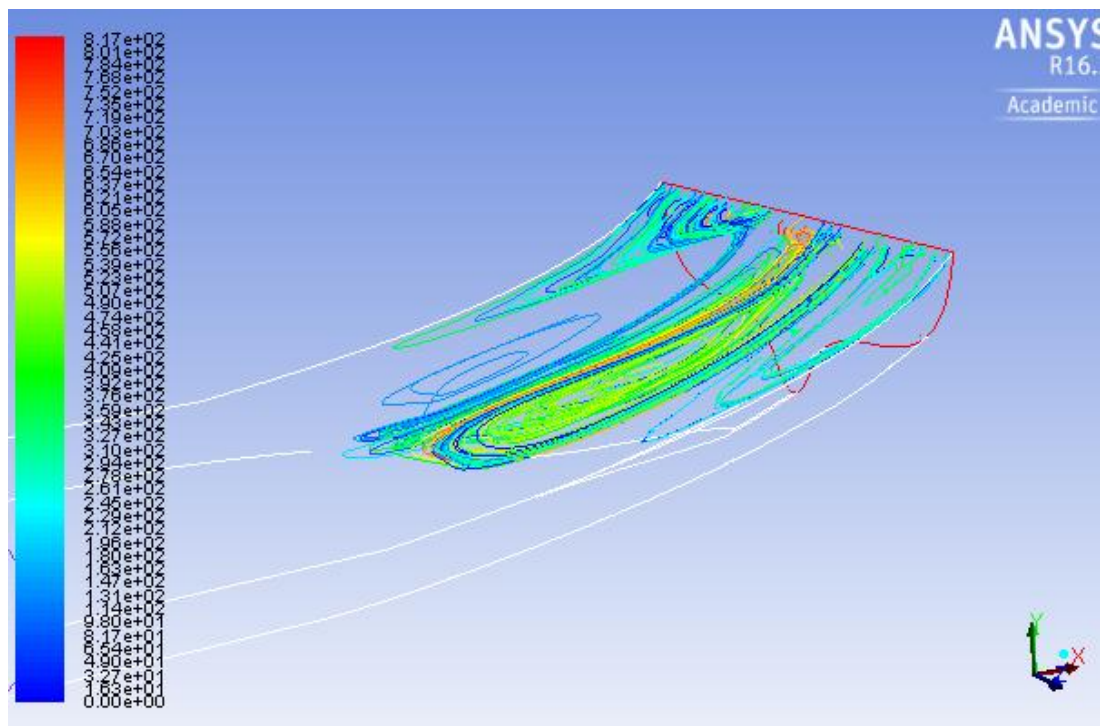


Figura 64. Línies de corrent que entren per la cara posterior de la cavitat en forma de V del doble difusor degut a la depressió causada pel despreniment de la capa límit.

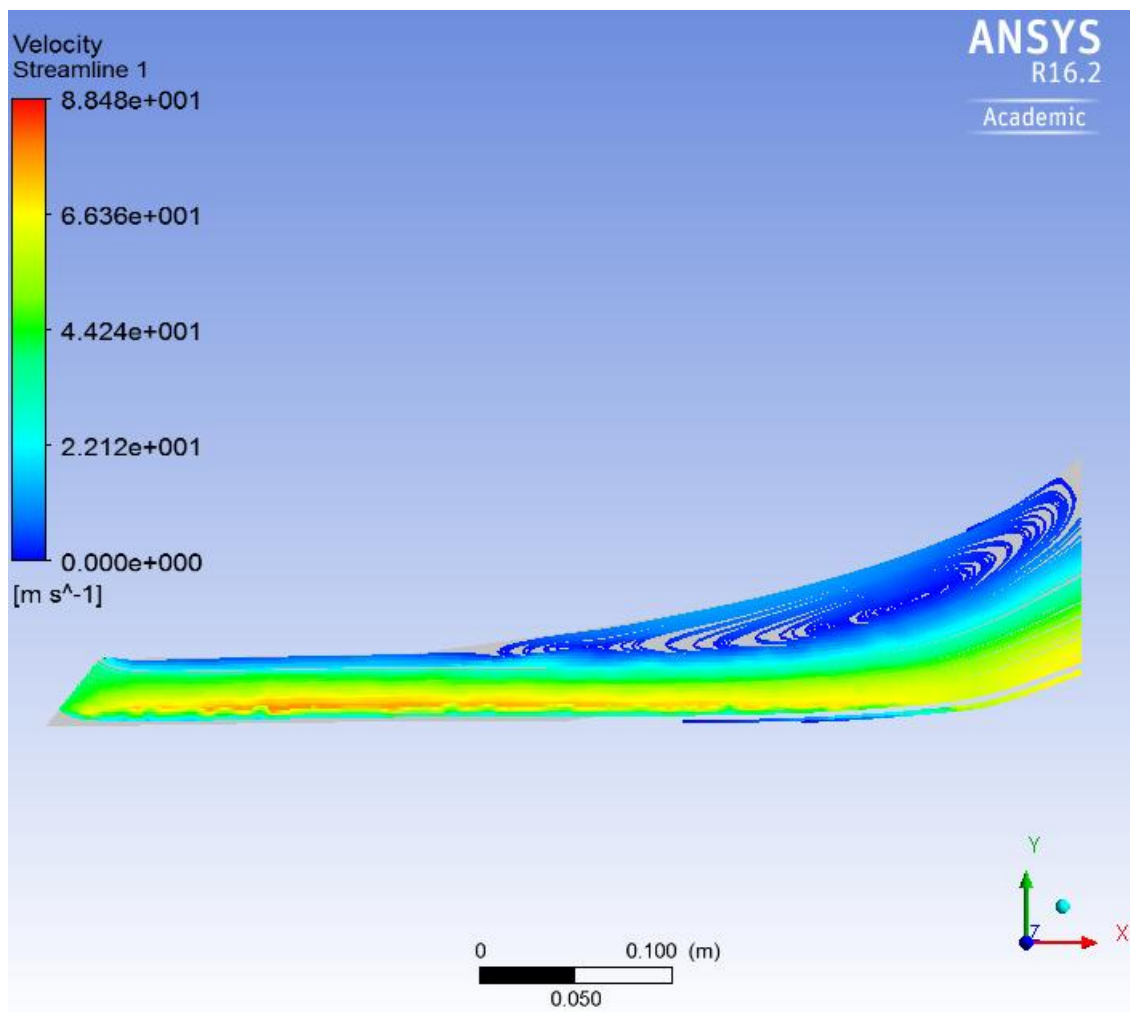


Figura 65. En blau més fosc les línies de corrent que entren per la cara posterior de la cavitat en forma de V del doble difusor degut a la depressió generada pel desprendiment de la capa límit, en grocs i blaus més clars les que entren per la cara anterior.

	Downforce [N]	Drag Total [N]	Eficiència
Volum inferior	-654,465	17,904	36,55
Volum superior (V)	-62,499	8,338	7,5
Total	-716,964	26,242	27,32

Figura 66. Resum dels resultats obtinguts d'ambdues simulacions.

La carga aerodinàmica obtinguda en aquest model és un 6,76% superior a la obtinguda en el model de difusor convencional, prova de què el doble difusor és realment efectiu. Els 716,964N que corresponen a 73,09kg són el total de força que el dispositiu difusor en combinació amb el fons pla són capaços d'exercir sobre el monoplaça.

En vista dels resultats i tal i com s'ha comentat anteriorment, tot i que la eficiència total del doble difusor sigui més baixa que l'eficiència d'altres models obtinguts, el fet disposar significativament de més carga aerodinàmica permetrà poder relaxar molt els angles d'incidència d'altres dispositius aerodinàmics que, per a l'obtenció de la mateixa carga aerodinàmica suposen un increment major de resistència aerodinàmica. Això farà que la eficiència total del monoplaça sigui superior.

4.4. Anàlisi comparatiu

Per a culminar el treball es presentaran adientment els resultats obtinguts per als dos models tridimensionals a fi de poder establir una comparació que permeti discriminar entre els dos models de forma ràpida i senzilla i poder arribar a les conclusions del treball de forma adient.

	Difusor convencional	Doble difusor		Balanç [%]
Downforce [N]	668,513	716,964		↑ 6,75%
Drag Total [N]	22,225	26,242		↑ 15,31%
Eficiència	30,08	27,32		↓ 9,18%

Figura 67. Taula resum dels resultats obtinguts en els models de difusor convencional i doble difusor per tal d'establir la comparativa.

Tal i com s'aprecia en la figura anterior, el dispositiu doble difusor genera significativament més *downforce* que el difusor convencional tot i fer-ho a costa de més resistència a l'avanç. Tot i així, per aquest augment de carga aerodinàmica l'augment en *drag* (que segueix sent molt baix) no és significatiu, ja que per aconseguir la mateixa carga aerodinàmica amb altres dispositius que disposa el monoplaça ho faríem encara a costa de més *drag*. És per aquest motiu que es pot concloure que el dispositiu doble difusor és, en termes de competició de F1, millor que el dispositiu difusor convencional.

5. Planificació i cost del projecte

5.1. Planificació

Tant bon punt es va trobar un tema per al projecte i tenint en compte que el projecte s’havia de dur a terme paral·lelament amb tres assignatures es va dur a terme una planificació per setmanes on cada setmana es dedicés una mitja de 20 hores (4 hores al dia). Per tal de situar en l’eix temporal les setmanes és necessari apuntar que la setmana 2 correspon a la primera setmana de Març del 2016. Així el diagrama de Gantt de la planificació és el que segueix:

Tasca \ Setmana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
Inici	█													
Documentació teòrica	█	█												
Aprenentatge autònom (CFD)		█	█	█										
Primers pasos Ansys					█	█	█							
Difusor 2D							█	█	█					
Difusor 3D									█					
Doble difusor 3D										█	█	█		
Anàlisi Comparatiu												█	█	
Redacció			█	█	█			█				█	█	█

Figura 68. Taula de la planificació del treball.

Tenint en compte que es disposava de 14 setmanes per a realitzar-lo el total del projecte hauria d’haver englobat 280 hores.

Tot i tenir la intenció de seguir la planificació proposada fil per randa el cert és que en la realitat van anar sorgint certs inconvenients que no es van tenir en compte en un inici i que dificultaven el seguiment de la planificació. Alguns d’aquests inconvenients estan relacionats amb la vida laboral, com la realització de pràctiques externes, i d’altres en canvi amb l’àmbit acadèmic, com la finalització del període d’intercanvi (erasmus) i la realització d’exàmens. El cert és que la planificació del projecte va ser fortament condicionada pel fet d’haver finalitzat el període d’intercanvi força tard en relació a l’inici del quadrimestre a l’ETSEIB.



Tots aquests fets han condicionat el desenvolupament del projecte fent que al final acabés prenent una forma diferent però sense comprometre'n la seva finalització ni qualitat.

Tasca \ Setmana	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15-16-17-18
Inici	■														
Documentació teòrica	■	■													
Aprenentatge autònom (CFD)		■	■	■											
Primers pasos Ansys					■	■	■	■							
Difusor 2D							■	■	■						
Difusor 3D									■	■					
Doble difusor 3D										■	■	■			
Anàlisi Comparatiu											■	■			
Redacció			■	■				■				■	■	■	■

Figura 69. Desenvolupament real del projecte. En blau fosc els excessos i en vermell les mancances sobre la planificació inicialment prevista.

Tal i com és veu en el diagrama de Gantt del desenvolupament del projecte, on es marquen amb blau fosc els excessos i amb vermell les mancances, podem dir que el projecte ha tingut finalment una durada de 320 hores ja que hi ha hagut un excés de 2 setmanes i tenint en compte que s'ha treballat una mitja de 20 hores la setmana.

5.2. Cost del projecte

Davant el fet que el treball s'ha realitzat en la seva totalitat de manera informàtica els costos que s'hi associen són els corresponents al material informàtic utilitzat i al salari atorgat a aquells que l'utilitzen.

Pel que fa a costos salarials, considerant que és una empresa externa la que encarrega l'elaboració del treball a fi d'obtenir un model de doble difusor òptim i assumint que l'enginyer a càrrec de l'elaboració del projecte té un salari mitjà de 20€/h es calcula que els costos salarials ascendeixen a 6.400€ atès que la durada del projecte és de 320 hores.

En segon lloc i pel que fa als costos relacionats amb el material informàtic i els *softwares* utilitzats. L'adquisició del programari *Solidworks* té un cost de 5.000€ IVA inclòs i la renovació anual de la llicència un preu de 1.200€ IVA inclòs. Per altra banda, per l'adquisició del programari de *CFD Fluent (Ansys)* té un cost també de 5.000€ amb un cost de renovació de la llicència de 3.000€ anuals, ambdós costos amb IVA inclòs.

Pel que fa al *hardware* s'estima un cost total de l'ordinador de 1.000€ IVA inclòs i se li considera una vida útil de 10 anys, el que fa que el cost de l'ordinador sigui de 100€/any.

Pel que fa al consum energètic vinculat a l'electre que és indispensable per a l'ús de l'ordinador present en cada minut de l'execució del projecte, té un aproximat de 0,145€/kWh IVA inclòs [13] i on el consum de l'ordinador és de 1kWh aproximadament. Tenint en compte que el treball s'ha elaborat en un període de temps de 0,4 anys i que el cost del programari s'estima a 20 anys:

	Cost unitari [€/temps]	Quantitat [temps]	Cost [€]
Cost programari	500 €/any	0,4 anys	200 €
Cost llicències	4.200 €/any	0,4 anys	1.680 €
Cost hardware	100 €/any	0,4 anys	40 €
Cost energètic	0,145 €/kWh	320 hores	46,40 €
Total			1.966,40 €

Figura 70. Taula resum dels costos informàtics del treball.

El total d'ambdós costos calculats prèviament, tant per despeses salarials com les vinculades a les tecnologies, ascendeix a 8.366,4 € IVA inclòs. Davant les possibles irregularitats o incidències que es puguin donar a nivell econòmic durant el transcurs del treball s'estima un marge de seguretat sobre el cost total del 5%. Així el cost ascendirà a 8.784,72 € IVA inclòs. Per últim cal afegir al cost total el benefici industrial que es vol obtenir del projecte, que considerant-lo del 10%, s'obté una estimació última del cost del projecte de 9.663,2€. Vegem-ho:

	Costu unitari [€/temps]	Quantitat [temps]	Cost [€]
Cost programari	500 €/any	0,4 anys	200 €
Cost llicències	4.200 €/any	0,4 anys	1.680 €
Cost hardware	100 €/any	0,4 anys	40 €
Cost energètic	0,145 €/kWh	320 hores	46,40 €
Cost salarial	20 €/h	320 hores	6.400 €
Total costos			8.366,40 €
		Marge seguretat 5%	418,32 €
		Benefici Industrial 10%	878,48 €
		Total	9.663,20 €

Figura 71. Taula resum dels costos vinculats al treball.

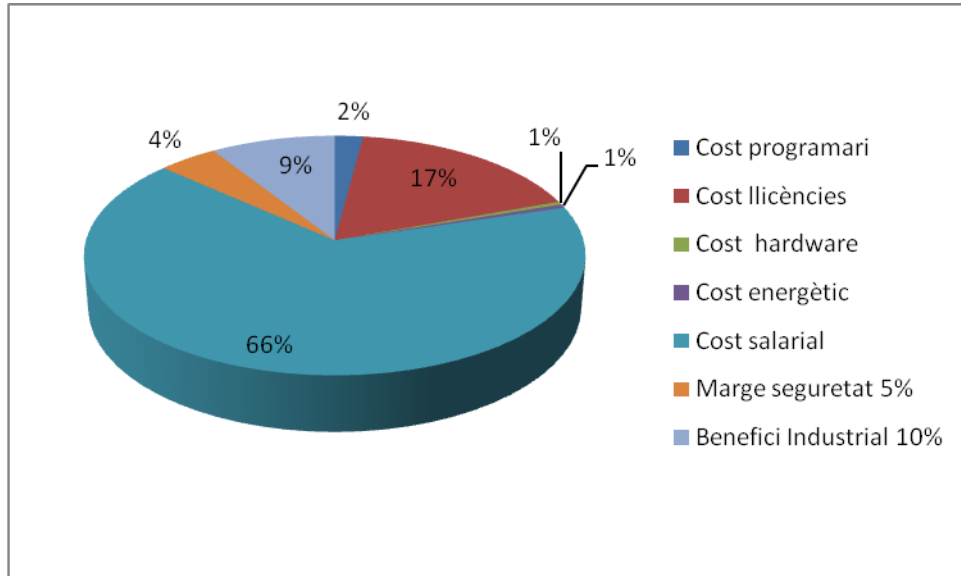


Figura 72. Diagrama de pastís dels costos vinculats al treball.

Cal recalcar l'estalvi econòmic i temporal del treball ja que, d'haver construït un model físicament i haver-lo analitzat a un túnel de vent el cost i el temps d'execució s'haguessin disparat. Caldria incloure els preus dels materials del model, el preu de tots els treballadors que intervindrien, el preu de llogar un túnel de vent per a fer l'estudi, el preu del desplaçament del model fins al túnel...etc. L'ús del *CFD* és doncs un pilar fonamental en els aspectes econòmics i temporals comentats en els dos últims subapartats, i per això se'n destaca la seva importància.

6. Impacte mediambiental

Atès a la naturalesa del projecte, no té massa sentit parlar de l'impacte ambiental que el treball suposa ja que s'ha realitzat informàticament en tota la seva integritat. Així, les activitats dutes a terme durant el projecte no suposen cap tipus de risc per el medi ambient més enllà de l'obtenció de l'electre necessari per fer funcionar l'ordinador, que és una quantitat d'energia que no es desmarca del consum habitual d'electre de qualsevol llar per a l'ús de la computadora, i que per tant no suposa cap risc mediambiental.

El que té més sentit remarcar és l'impacte mediambiental que tindria un treball de les mateixes característiques però que hagués sigut dut a terme per altres vies que no fossin el *CFD*, com per exemple les vies experimentals.

En el cas que s'hagués optat per la via experimental, existeixen dos activitats principals que haguessin suposat un risc mediambiental que són les que es presenten a continuació:

- Túnel de vent: necessària per a l'obtenció dels resultats aerodinàmics vinculats a cada model. S'hauria d'utilitzar cada vegada que es dissenyés un model nou amb les implicacions mediambientals que també suposa materialitzar un altre model. El consum energètic d'un túnel de vent adequat per als anàlisis ronda els 2MW [14] cada vegada que necessitèssim fer-ne ús. A més a més caldria tindre en consideració el medi de transport del model fins al túnel de vent, on l'impacte mediambiental d'aquest desplaçament variaria en funció de la tria.
- Proves en circuit: necessàries per a veure com funciona el dispositiu en cursa. Si s'estima que un monoplaça consumeix 46 litres de gasolina cada 100Km, que per cada kilogram de gasolina s'emeten 2,3 kilograms de CO₂ i que la densitat de la gasolina és de 0,680 Kg/L [15]; es preveuen unes emissions totals de 72Kg de CO₂ per cada prova que es dugui a terme en el circuit. A més a més caldria tindre en consideració el medi de transport del monoplaça fins al circuit, on l'impacte mediambiental d'aquest desplaçament variaria en funció de la tria.

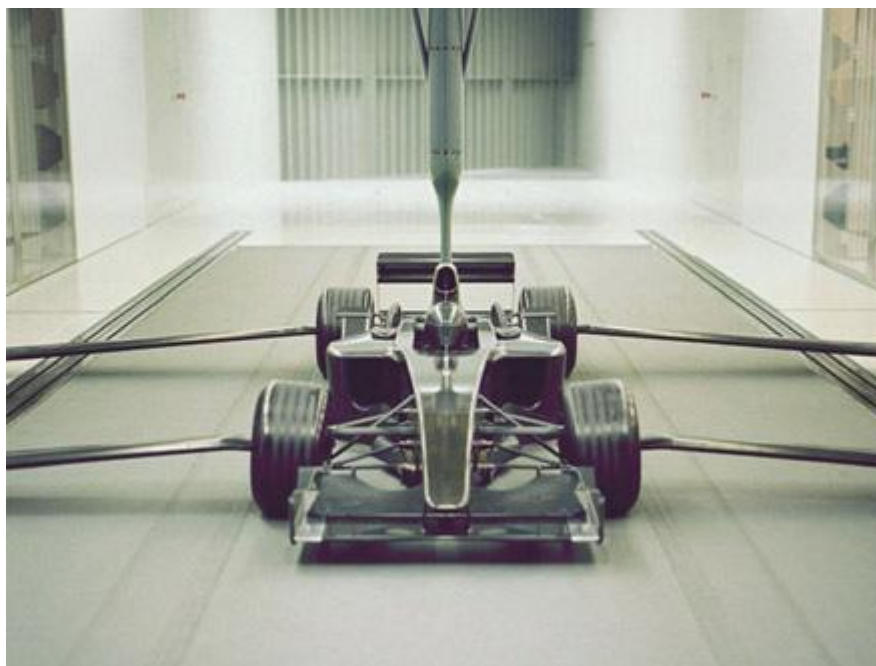


Figura 73. Model d'un monoplaça en un túnel de vent. [22]

Per últim s'insisteix en la necessitat de recolzar-se sobre els mètodes de *CFD* per al disseny i estudi d'elements aerodinàmics no tant sols atenent-nos al seu baix cost sinó també al seu baix impacte mediambiental.

Conclusions

En primer lloc es recalca la importància del *CFD*, eina que permet tan entendre com funciona la mecànica de fluids com dissenyar infinitat de coses diferents i veure quin comportament tindrien en presència de fluid sense la necessitat de materialitzar-les. Es recalquen les connotacions positives que això comporta tan econòmicament com mediambientalment.

A través d'aquesta eina s'ha aconseguit arribar a un perfil de difusor aerodinàmicament molt superior al plantejat en un inici i amb un cost i contaminació molt reduïts. Això és molt important no tan sols en el camp de la competició de *F1* sinó en qualsevol camp on intervingui la mecànica de fluids com a pilar fonamental per aconseguir qualsevol objectiu.

Fent més referència al nucli del projecte es conclou que el dispositiu doble difusor és més efectiu que el dispositiu difusor convencional ja que genera significativament més *downforce* a cost de gairebé el mateix *drag*, i que per tant, no és d'estranyar que aquells que en disposaven al 2009 obtinguessin molt avantatge respecte d'aquells que no o que el van dissenyar tard i a corre-cuita.

	Difusor convencional	Doble difusor		Balanç [%]
Downforce [N]	668,513	716,964		↑ 6,75%
Drag Total [N]	22,225	26,242		↑ 15,31%
Eficiència	30,08	27,32		↓ 9,18%

Figura 74. Taula resum dels resultats obtinguts en els models de difusor convencional i doble difusor per tal d'establir la comparativa.

El que s'afirmava amb anterioritat queda reflectit en la figura 71 on es pot apreciar com augmenta la càrrega aerodinàmica pel simple fet d'introduir una cavitat en forma de V al nostre difusor convencional. El gran augment en *downforce* que s'experimenta permetrà relaxar els angles d'atac d'altres dispositius que per aconseguir càrrega aerodinàmica ho paguem amb molta resistència aerodinàmica fent així que el *drag* total del monoplaça sigui inferior per aquells que disposen del doble difusor. Es conclou així que el doble difusor es realment un dispositiu més útil i sofisticat per a la competició de *F1*.

Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair a la meva família que no tan sols m'han ofert suport en el desenvolupament del projecte sinó que me l'han ofert al llarg de tota la vida.

En segon lloc agrair el suport tant del meu tutor Enric Trillas com del Xavier Escaler per haver-me guiat i ajudat contínuament en el desenvolupament del projecte, tant en aspectes formals, com teòrics i tècnics.

Per últim i no gens menys important agrair l'ajuda que els amics i alumnes de l'ETSEIB Genís Battle, Roger Lloret i Álvaro Alonso m'han ofert atès a què tots ens trobàvem amb dificultats similars per la semblança dels nostres projectes.

Referència bibliogràfiques

- [1] Marco Filippo Torchio, Termodinamica e Trasmissione del Calore. Torino: 2001.
- [2] Frank M. White. Mecánica de Fluidos. Madrid: McGRAW-HILL, 1990.
- [3] Textos científicos. “Flujos en capa límite e internos (tubos y ductos)”. Madrid. 2014.
<http://www.textoscientificos.com/fisica/fluidos/flujos-en-capa-limite>
- [4] Motor.es, “EL difusor: un elemento aerodinámico vital”. Murcia. 2015.
- [5] Caranddriver.com. “The physics of diffusers: How to make a car really suck”. Michigan. 2013.
<http://www.caranddriver.com/features/the-physics-of-diffusers-how-to-make-a-car-really-suck-feature>
- [6] Racecar engineering. “Diffuser, Engineering basics, Aerodynamics”. 2015.
<http://www.racecar-engineering.com/technology-explained/diffusers-engineeringbasics-aerodynamics/#>
- [7] Formula1-dictionary.net. “Diffuser”. 2010
<http://www.formula1-dictionary.net/diffuser.html>
- [8] Diario Marca. “Funcionamiento del doble difusor de Brawn”. Madrid. 2014.
<http://www.marca.com/2009/04/15/motor/formula1/1239825973.html?a=3627b31%20198b3398a3676be35186a54da&t=1405035767>
- [9] Motorsport.com. “Why have double diffusers become an F1 talking point again”. Miami. 2016.
<http://www.motorsport.com/f1/news/analysis-why-have-double-diffusers-become-an-f1-talking-point-again-666313/>
- [10] F1.com. Bodywork dimensions and cockpit. 2016.
https://www.formula1.com/en/championship/inside-f1/rules-regs/Bodywork_and_dimensions_and_Cockpit.html

- [11] FIA , Reglament i limitacions dimensionals. 2016. <http://www.fia.com/>
- [12] Ansys.com, Ansys Fluent. 2016. <http://www.ansys.com/Products/Fluids/ANSYS-Fluent>
- [13] Red Eléctrica de España. “Término de facturación de Energía Activa del PVPC”. Madrid. 2016. <http://www.esios.ree.es/pvpc/>
- [14] Prada y Nogueira, Isaac. El túnel de viento como herramienta de ensayo aerodinámico en la Fórmula 1. Madrid. 2006.
- [15] La Vanguardia. “¿Cuánto contamina un gran premio de la F1?”. Barcelona. 2016.
- [16] Technical F1 dictionary. “Exhaust Driven (Blown) Diffusers”. 2015. http://www.formula1-dictionary.net/diffuser_blown.html#index_top_page
- [17] F1 al dia. Noticias relacionadas amb el món de la F1. Madrid. 2009. <http://www.f1aldia.com/6037/dos-patrocinadores-mas-para-brawn-gp-en-brasil/>
- [18] People.rit.edu . “Boundary layer”. 2016. https://people.rit.edu/pnveme/MECE356/drag/boundary_layer.html
- [19] Wikipedia. “Temporada 2009 de Fórmula 1”. 2016. https://ca.wikipedia.org/wiki/Temporada_2009_de_F%C3%B3rmula_1
- [20] Motor1.com . “Diffusers ban to make F1 cars two seconds slower”. 2014 <http://www.motor1.com/news/21731/diffuser-ban-to-make-f1-cars-two-seconds-slower/>
- [21] Taringa.net . “La técnica de la F1 antes de Australia”. 2011. <http://www.taringa.net/posts/autos-motos/9836496/La-Tecnica-de-la-Formula-1-antes-de-Australia-Parte-2.html>
- [22] Motorsport.com. “Wind tunnel clampdown will curb F1 dominance”. Miami. 2016. <http://www.motorsport.com/f1/news/wind-tunnel-clampdown-will-curb-f1-dominance-symonds-799129/>