

Treball de Fi de Grau
Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

Millores aerodinàmiques d'un turisme

MEMÒRIA

Autor: Joan Vidal i Mas
Director: Enric Trillas i Gay
Convocatòria: Gener 2015



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

“Millores aerodinàmiques d'un turisme” és un treball en l'àmbit de la mecànica de fluids aplicada a vehicles amb la intenció d'identificar quines possibles modificacions, ja siguin geomètriques o per incorporació d'apèndixs aerodinàmics, es poden realitzar en un vehicle convencional per tal de millorar-ne l'eficiència aerodinàmica.

Aquest treball s'ha dividit en dues parts. La primera és de caire teòric on s'expliquen tots els conceptes necessaris de la mecànica de fluids per comprendre el comportament de l'aire al voltant d'un vehicle. Tots aquests conceptes s'han explicat de forma qualitativa, sense entrar en detall.

La segona part ha consistit en l'estudi de diverses millores aerodinàmiques. Primerament s'ha realitzat una recerca bibliogràfica. A continuació s'ha estudiat mitjançant simulacions quin impacte tenien aquestes modificacions en un Volkswagen Golf I, el turisme escollit per realitzar el treball. Cal destacar que tots els estudis han estat realitzats en dues dimensions.

De totes les modificacions estudiades, al final s'han escollit aquelles que maximitzaven l'eficiència aerodinàmica del vehicle i s'ha comparat el comportament aerodinàmic del Golf I modificat amb el de partida.

Amb aquest treball s'han pogut quantificar en primer lloc les contribucions relatives de les diferents parts del cotxe al coeficient de resistència a l'avanç. Addicionalment, també s'ha destacat la importància que té la reducció del coeficient aerodinàmic en el consum de combustible del vehicle, i en conseqüència, la contaminació ambiental que aquest produeix.

Sumari

RESUM	1
SUMARI	3
1. GLOSSARI	5
2. PREFACI	7
3. INTRODUCCIÓ	9
3.1. Objectius del projecte	9
3.2. Abast del projecte.....	10
4. INTRODUCCIÓ A L'AERODINÀMICA EN EL VEHICLE	11
4.1. Fenòmens i forces de l'aire al voltant d'un cos.....	12
4.2. Influència de la geometria en el drag i lift.....	15
4.2.1. Complicacions de la viscositat.....	16
4.2.2. Càrrega aerodinàmica	22
4.3. Història de l'aerodinàmica en vehicles.....	24
4.4. Volkswagen <i>Golf I</i> (1974).....	26
5. PART EXPERIMENTAL	29
5.1. Objectius i metodologia.....	29
5.2. Realització de les Simulacions	31
5.2.1. CFD.....	31
5.2.2. Procediment	31
5.3. Modificacions realitzades	42
5.3.1. Aerodinàmica del <i>Golf I</i> : Punt de partida.....	42
5.3.2. Part davantera	45
5.3.3. Part posterior.....	50
5.3.4. Fons del cotxe.....	65
5.3.5. Parabrises	75

5.4. Forma bàsica modificada.....	78
6. IMPACTE AMBIENTAL _____	83
7. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I COSTOS _____	86
7.1. Planificació temporal del treball	86
7.2. Costos del treball	87
CONCLUSIONS _____	89
AGRAÏMENTS _____	93
BIBLIOGRAFIA _____	95

1. Glossari

Aleró: En automobilisme és sinònim d'ala. És emprat per generar càrrega aerodinàmica.

Àrea frontal: L'àrea vista des de davant del vehicle.

Càrrega Aerodinàmica: El contrari a sustentació aerodinàmica, també coneguda com sustentació negativa.

CFD: Abreviatura per Computer Fluid Dynamics. Consisteix en l'ús d'ordinadors per calcular les equacions dinàmiques dels fluids que resolen el comportament d'aquests al voltant d'un cos.

Coefficient de resistència a l'avanç: Número adimensional que permet comparar la resistència induïda per cossos de diferent geometria.

Coefficient de sustentació: Número adimensional que permet comparar la sustentació en cossos amb diferents geometries. Un coeficient positiu representa sustentació, mentre que un negatiu la càrrega aerodinàmica.

C_D : Abreviatura de coeficient de resistència a l'avanç.

C_L : Abreviatura de coeficient de sustentació.

Difusor: Secció divergent d'un conducte que frena el flux de l'aire. En un vehicle es troba situat en la part inferior d'aquest.

Drag: Força de resistència a l'avanç.

Flux adherit: Quan el flux d'un fluid segueix els contorns de la superfície del cos pel que passa.

Flux principal: És la part del flux d'un fluid al voltant d'un cos que està suficientment allunyat del cos com per no veure's afectat per l'efecte de la viscositat.

Flux separat: Quan el flux d'un fluid no és capaç de seguir els contorns de la superfície del cos pel que passa.

Lift: Força de sustentació.

Línia de flux: La traçada del flux d'una partícula de fluid al passar al voltant d'un cos. En el cas de trobar-se davant d'un problema estacionari amb un flux estacionari (com succeeix en aquest treball), la línia de flux i **línia de corrent** coincideixen.

Punt d'estancament: Punt on la velocitat de l'aire és zero i en conseqüència la pressió elevada.

Túnel del vent: Sala en el qual es fa passar un flux d'un fluid a través d'una maqueta per obtenir dades aerodinàmiques.

Viscositat: Resistència a moure's a través d'un fluid.

Vòrtex: Flux turbulent en rotació espiral i amb trajectòries de corrent tancades.

2. Prefaci

L'elaboració del present treball va sorgir de l'interès personal en aprofundir en l'aerodinàmica aplicada a vehicles. La meua curiositat pel món dels automòbils va començar fa uns anys gràcies a la fórmula 1. Vaig començar a seguir aquest esport quan Schumacher i Alonso es disputaven pel títol mundial. Al principi només m'interessava veure els grans premis, ara bé, des de fa quatre anys m'he aficionat a tot el món de l'automòbil. Segurament ha ajudat el fet d'estudiar el grau en enginyeria en tecnologies industrials, en què cada vegada senti més curiositat pel funcionament dels automòbils, tant en aspectes aerodinàmics com mecànics. La idea d'estudiar un turisme i millorar-lo aerodinàmicament va sorgir justament de les ganes d'introduir-me en el món de la mecànica de fluids aplicada als automòbils. Es va creure que aquest treball permetria assolir una base de com es comporta l'aire al pas d'un vehicle.

El vehicle escollit ha estat el *Golf I* per dos motius. El primer ha estat de caràcter pràctic. Aquest model té molts anys d'antiguitat i, per tant, era un vehicle perfecte per a poder estudiar-lo aerodinàmicament i millorar-lo, atès que el primer model encara tenia una forma bàsica molt rectangular. El segon ha estat de caire personal. Existeixen tres vehicles els quals sempre m'han agradat molt. Aquests són el *Subaru WRX*, el *Nissan Skyline* i el *Golf*. Dels tres vehicles esmentats, el que millor s'ajustava per realitzar el treball era el *Volkswagen Golf*, ja que els altres dos estan molt treballats des del punt de vista aerodinàmic.

3. Introducció

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que s'ocupa del moviment de l'aire i altres fluids gasosos, i de les forces que actuen sobre els cossos que es mouen en els fluids esmentats anteriorment¹. Un exemple quotidià de l'aerodinàmica seria el moviment d'un avió a través de l'aire i com gràcies a la força que exerceix l'aire sobre l'avió, aquest és capaç de volar.

Ara bé, l'aerodinàmica no només apareix en el món dels avions. Aquesta té efectes sobre qualsevol cos envoltat per un gas. És per aquest motiu que ha estat un camp d'estudi molt important en els últims anys. Alguns exemples curiosos de la influència de l'aerodinàmica en el disseny d'objectes, bé per aprofitar les forces que provoca l'aire sobre el cos o bé per reduir-ne la seva influència, són els següents: pilotes de golf, fonts d'alimentació² o la postura i equipament idonis d'un esquiador per assolir velocitats de 200 km/hora. Un altre camp molt important on la aerodinàmica juga un gran paper és en l'automoció. Gràcies als estudis aerodinàmics s'ha aconseguit reduir el consum dels vehicles a base de reduir la influència de les forces de l'aire que s'oposen a l'avanç. Per altra banda, també s'ha tret profit de les forces de l'aire sobre el cotxe per augmentar la velocitat màxima de pas per corba d'un vehicle.

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte ha estat analitzar diverses modificacions aerodinàmiques en la forma bàsica del vehicle *Volkswagen Golf I* per tal d'obtenir la configuració òptima que redueixi al màxim possible el coeficient de resistència a l'avanç. Per realitzar aquest estudi s'ha dividit el treball en diversos apartats.

En primer lloc es realitzarà un estudi teòric de l'aerodinàmica aplicada en turismes. Aquest apartat inclourà també l'aprenentatge de les eines necessàries per poder analitzar a posteriori les diverses modificacions aerodinàmiques, com podria ser el software.

¹ Definició extreta de la referència [1].

² En la referència [2] es troba un article que explica com influeix l'aerodinàmica en les fonts d'alimentació.

A continuació, mitjançant simulacions emprant programes informàtics adients, es compararan diverses modificacions realitzades en el vehicle per tal d'obtenir la forma bàsica òptima, és a dir la que condueix a un coeficient de resistència a l'avanç mínim.

Per últim, però no menys important, s'estudiarà l'impacte ambiental del projecte i els costos que suposa la realització d'aquest.

Degut a la possibilitat que ofereix la part inferior d'un vehicle a augmentar de manera considerable la seva càrrega aerodinàmica, sempre i quan no es produeixi una repercussió negativa en el coeficient de resistència a l'avanç, com a objectiu secundari del present treball es procurarà augmentar al màxim possible la sustentació negativa generada per la part inferior del vehicle. Ara bé, això es durà a terme sense perdre de vista l'objectiu principal, és a dir reduir al màxim possible les forces de resistència a l'avanç. Per tant, no serà vàlida cap solució que millori molt la càrrega aerodinàmica del vehicle si això implica un augment del coeficient de *drag*.

3.2. Abast del projecte

Els estudis realitzats en aquest treball seran els equivalents a la investigació prèvia abans de començar a estudiar un vehicle en 3D. Únicament s'estudiarà la forma bàsica del vehicle *Golf I*. Aquest projecte contemplarà modificacions aerodinàmiques en la part davantera, parabrises, part posterior i baixos del vehicle. S'estudiaran diverses modificacions en cada una de les parts anteriorment esmentades, es compararan i en cada cas s'escollirà la configuració que menys *drag* ofereixi. Un cop trobada la configuració òptima, s'analitzarà l'impacte ambiental d'aquesta i el cost de la realització del treball.

Quedarà exclòs del projecte qualsevol anàlisi 3D de la aerodinàmica del vehicle. A més a més, tampoc s'estudiarà l'impacte en el comportament de l'aire que provoquen les rodes, una part inferior del vehicle no llisa o el para-xocs. Degut a la falta de medis i temps, tampoc es corroborarà cap simulació de forma experimental, és a dir mitjançant un túnel del vent. Per acabar, destacar que es tracta d'un treball on el que es pretén és minimitzar el coeficient de resistència a l'avanç. Per tant, en aquest treball no s'inclourà cap demostració matemàtica dels conceptes teòrics ni la derivació de les equacions emprades.

4. Introducció a l'aerodinàmica en el vehicle

És sorprenent com un fórmula 1, a una certa velocitat, és capaç de generar tanta força de sustentació negativa que podria circular per un sostre d'una habitació gran, cap per avall i sense caure, desafiant la gravetat i el sentit comú de les persones, atès que ningú s'imagina un cotxe circulant per un sostre d'una habitació. Tot això, suposant que es disposa d'una habitació suficientment gran i que s'hagi aconseguit accelerar el cotxe fins la velocitat requerida.

Ara bé, si s'intentés el mateix experiment amb un turisme, el resultat seria totalment diferent. En aquest cas, el turisme no podria vèncer la gravetat amb la força de sustentació per ell generada i, conseqüentment, cauria.

Aleshores, si es tracta en ambdós casos de dos automòbils, a què es deu que un generi molta més sustentació que l'altre? La clau es troba en la geometria i els apèndixs aerodinàmics. Un fórmula 1 té una geometria específica de gran rendiment, la qual no és extrapolable a turismes.

Aquesta geometria específica és la responsable que el fórmula 1 sigui capaç de generar molta força de sustentació i disminuir la força de resistència a l'avanç. A més a més, compta amb uns apèndixs aerodinàmics molt elaborats, els quals encara accentuen la generació de força de sustentació. Si per exemple un es fixa en la *figura 1*, observarà el grau de detall d'un aleró davanter d'un fórmula 1.

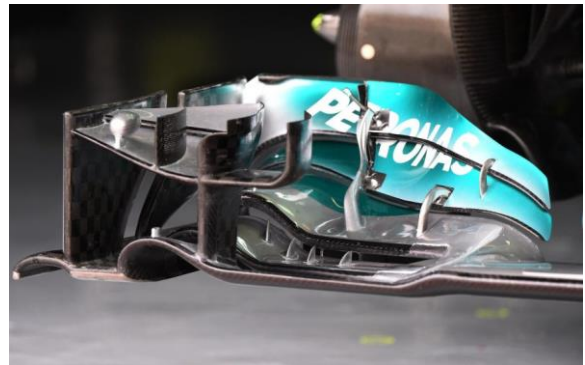


Figura 1. Aleró davanter d'un fórmula 1. [3]

Aquests dos aspectes són els que marquen la diferència entre el turisme i el fórmula 1.

Per tal de comprendre com influeixen els apèndixs aerodinàmics en el rendiment del cotxe, així com els canvis en la seva geometria, s'explicaran a continuació de forma qualitativa els coneixements teòrics necessaris.

4.1. Fenòmens i forces de l'aire al voltant d'un cos

Intuïtivament, es coneixen ja algunes forces aerodinàmiques. En un dia d'estiu calorós, un trajecte en cotxe per la ciutat pot arribar a ser molt pesat. Una bona solució que té el conductor per fer el trajecte més agradable, és baixar la finestra, treure una mà per aquesta i deixar que l'aire circuli. Ara bé, si aquest decideix realitzar la mateixa acció en una autopista alemanya, a 180 km/h, ja no serà tan agradable. Notarà una pressió enorme en el braç, la qual li empenyerà el braç enrere. Aquesta força, és la força que produeix l'aire en un cos, en aquest cas, el braç.

Aleshores, la qüestió és d'on provenen totes aquestes forces. Tot i que el primer en estudiar el moviment d'un cos al voltant d'un fluid va ser n'Aristòtil, la primera teoria no va sorgir fins al 1726, de mans de Isaac Newton. Aquest va arribar a la conclusió que les forces que actuaven sobre un objecte eren causades per partícules d'aire rebotant

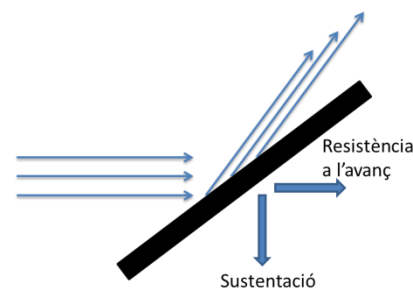


Figura 2. Nomenclatura de les forces a mecànica de fluids.

contra l'objecte. D'aquesta manera, degut a la transferència de quantitat de moviment entre les partícules de l'aire i les de l'objecte, es produïen les forces. Aquest raonament semblava correcte, ara bé, els resultats teòrics divergien molt dels pràctics.

No va ser fins al 1907, que es van obtenir resultats similars. Joukowski³, es va adonar que la influència de la placa inclinada afectava l'interior de l'aire, a una distància considerable degut als efectes de viscositat. Per tant, la força que l'aire realitza sobre un cos, no només depèn de la quantitat de moviment transmès entre partícules, sinó que la viscositat també hi juga un paper important.

³ Nikolái Yegórovich Zhukovski. Nascut al 17 de gener del 1847. Enginyer mecànic rus. Va ser un dels precursors de la aerodinàmica moderna. A part del descobriment pel que fa a la influència de la viscositat en un fluid, destaquen els seus estudis sobre el fenomen denominat com a pols de Zhukovski.

Com a curiositat, abans de què es conegués la teoria de Joukowski, es pot esmentar que l'any 1903 els germans Wright van ser capaços de fer volar un avió durant 259,8 metres sense coneixement de la teoria aerodinàmica exacta.

En aerodinàmica, la força que produeix l'aire sobre un cos, es pot descomposar en dues components: una d'horitzontal, la qual s'anomena **resistència a l'avanç** i és l'encarregada d'oferir resistència quan un cos es desplaça tot provocant que s'hagi de realitzar més treball a la hora de moure'l, i una de vertical, la qual s'anomena **sustentació** i és l'encarregada de fer enlairar un cos (si és positiva) o empènyer el cos al terra (si és negativa).

Cada una d'aquestes forces té un coeficient adimensional associat. Aquests són els coeficient de resistència a l'avanç o "**coeficient de drag**" i el coeficient de sustentació o "**coeficient de lift**". A major coeficient, major és la força. Aquest fet es pot observar en les expressions algebraiques de cada una de les forces indicades a l'*equació 1*:

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 A c_D$$

D és la força de resistència a l'avanç, ρ la densitat del fluid, v la velocitat, A l'àrea i c_D el coeficient de *drag*.

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

L és la força de sustentació, ρ la densitat del fluid, v la velocitat, A l'àrea i c_L el coeficient de *lift*.

Equació 1. Càlcul de la força de resistència a l'avanç i la força de sustentació.

Fins ara, només s'ha explicat d'on provenen les forces que l'aire aplica sobre un cos. Ara bé, com es comporta el fluid al voltant d'un cos? Es mou a velocitat constant al resseguir tota la geometria? La pressió que exerceix aquest sobre el cos, és constant en tot el recorregut, o depèn del punt on es trobi? La resposta de totes aquestes preguntes es troba en el principi de Bernoulli, postulat per aquest enginyer l'any 1738 qui va trobar una relació matemàtica entre la pressió i la velocitat a una línia de corrent concreta. La relació en un fluid ideal és la següent:

$$P + \frac{1}{2} \rho v^2 = K$$

On, P és la pressió estàtica
 $0,5\rho v^2$ és la pressió dinàmica

Equació 2. Expressió de Bernoulli sense frecs (fluid ideal).

i K és una constant

Aquesta fórmula indica que al llarg **d'una línia de corrent**, la suma de la pressió estàtica i dinàmica en qualsevol punt es manté constant. Expressat d'una manera pràctica, als punts on la velocitat sigui màxima, la pressió serà mínima i viceversa.

Un exemple on es pot veure una aplicació pràctica del teorema de Bernoulli és el tub Venturi.

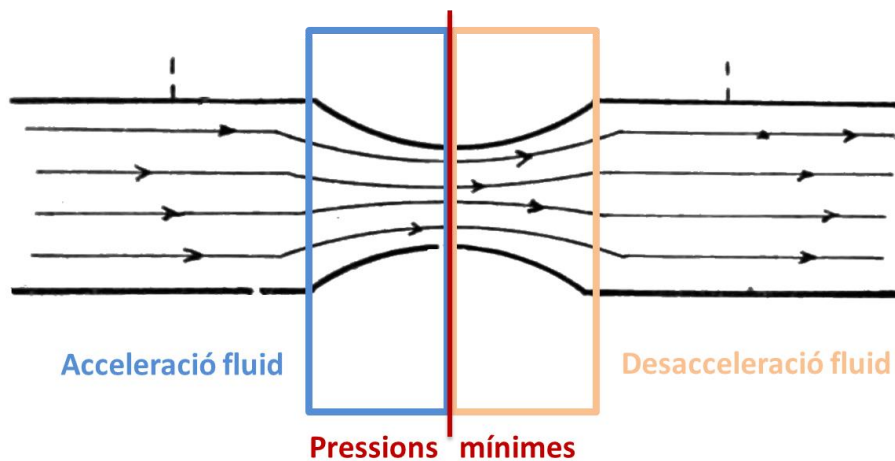


Figura 3. Diagrama dispositiu venturi.

Com es pot observa a la *figura 3*, a la zona del quadrat blau, es produeix un augment de la velocitat. Això és degut a que el cabal ha de ser constant a cada secció del tub, no pot desaparèixer cabal si no existeix una fuita. Aleshores, sabent que el cabal és igual al producte de velocitat i àrea, si es disminueix l'àrea (zona blava), per força ha d'augmentar la velocitat. Justament el contrari succeeix a la zona del quadrat taronja. A l'augmentar l'àrea, la velocitat torna a disminuir. Aplicant el teorema de Bernoulli, s'arriba a la conclusió que si s'augmenta la velocitat, la pressió disminueix, sent mínima en el lloc de velocitat màxima, exactament on coincideixen els dos quadrats. D'aquesta manera, jugant només amb la geometria d'un tub, es pot aconseguir una zona de succió dins del tub. Dit d'una altra manera, es pot aconseguir un tub, on variant el diàmetre d'aquest, es pugui modificar la velocitat del fluid en el seu interior.

4.2. Influència de la geometria en el drag i lift

Com s'ha comentat al apartat 4.1, la geometria juga un paper molt important a la hora d'influir en els valors del *drag* i *lift*. Un exemple, era el dispositiu venturi. La importància de la geometria s'il·lustra en el perfil indicat a la *figura 4*.

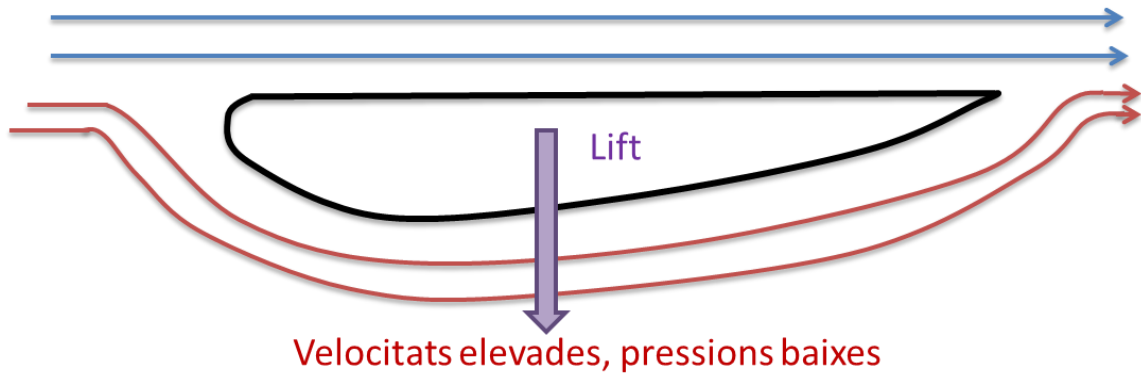


Figura 4. Comportament del flux en un perfil aerodinàmic.

En la *figura 4* es resumeix el que succeeix amb un perfil d'aquestes característiques. Les línies de corrent inferiors han de recórrer més distància que les superiors. Això provoca un augment de la velocitat d'aquestes. Si s'aplica Bernoulli en les línies vermelles, s'arriba a la conclusió de que les pressions han de ser molt baixes. Per tant, es genera una zona de pressions negatives a la part inferior i gràcies a això, es genera una sustentació negativa.

La geometria no només juga un paper important en el *lift*. La forma d'un cos pot tenir un impacte important en el *drag*. No és el mateix tenir un cilindre, un cub o una placa plana. Intuïtivament es pot establir l'ordre dels coeficients de *drag* d'aquestes figures geomètriques: el del cub seria el més elevat, seguit del coeficient del cilindre i, per últim, del de la placa plana. A més a més, com s'explicarà més endavant, la geometria té un paper fonamental en les dimensions del deixant.

Shape	Drag Coefficient
Sphere → ○	0.47
Half-sphere → ◐	0.42
Cone → ▲	0.50
Cube → □	1.05
Angled Cube → ◇	0.80
Long Cylinder → ▭	0.82
Short Cylinder → ◻	1.15

Figura 5. Coeficients de resistència a l'avanç per varies geometries.

Una curiositat dels turismes és que si un es fixa en el perfil exterior de la seva carrosseria, aquesta té una certa similitud amb un perfil com el de la *figura 4*, però invertit. La cerca del mínim coeficient de resistència a l'avanç ha conduït al disseny de la carrosseria amb la forma d'una ala, com les que s'utilitzarien per generar una sustentació positiva, és a dir, per a fer volar un cos. És per aquest fet, que els cotxes de carrer tendeixen a generar sustentació positiva. Ara bé, tot el que s'ha exposat no vol dir que si s'assolís una velocitat prou gran el cotxe fos capaç de volar, ja que conté altres elements que compensen aquesta generació de sustentació positiva, com poden ser els apèndixs aerodinàmics.

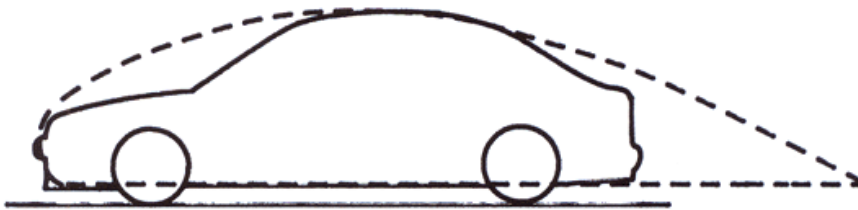


Figura 6. Semblança entre la forma bàsica d'un vehicle i un perfil aerodinàmic de generació de sustentació positiva. [6]

4.2.1. Complicacions de la viscositat

Fins el moment, només s'ha comentat de forma genèrica que la viscositat influeix en el fluid. Ara bé, hi ha algunes definicions que no es poden ignorar per tal de comprendre el comportament d'un fluid i l'influència de la viscositat en aquest.

En primer lloc, s'ha de distingir entre dos tipus de fluxos, el laminar i el turbulent. El paràmetre que defineix de quin tipus és un flux és el paràmetre de Reynolds.

$$Re = \frac{\sum F_{inèrcia}}{\sum F_{viscoses}} = \frac{\rho v L}{\mu}$$

Equació 3. Càlcul número de Reynolds.

Si s'observa l'expressió matemàtica, la longitud i la velocitat són directament proporcionals al número de Reynolds. Per tant, com que un flux es va tornant turbulent a mesura que s'augmenta la longitud i la velocitat, a alts Reynolds el flux serà turbulent. En canvi, si la velocitat o la longitud és molt petita, el flux serà laminar, per tant es tindrà flux laminar en Reynolds baixos. Dit d'una altre manera, el número de Reynolds és un paràmetre

adimensional, el qual té moltes utilitats, però en aquest treball en concret, només interessa una. Aquesta és la capacitat d'indicar el tipus de flux amb el qual s'està treballant.

Si totes les partícules dins del flux es mouen en la mateixa direcció que la velocitat de l'aire, aleshores el flux es considera laminar. En canvi, si les partícules es mouen desordenadament, en camins no paral·lels a la velocitat de l'aire, aleshores el flux és turbulent.

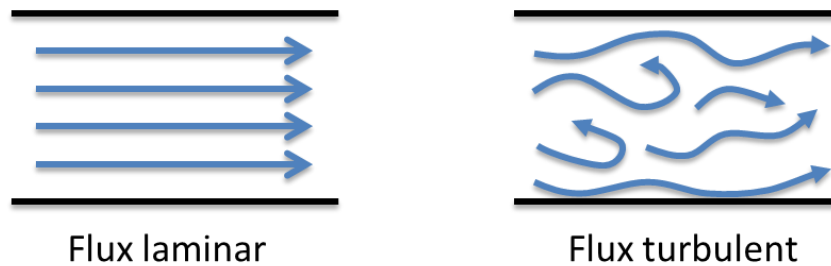


Figura 7. Flux laminar i turbulent.

La segona propietat a considerar és la capacitat que té l'aire de seguir els contorns d'un objecte. En la introducció de l'apartat 4.2, s'ha comentat com l'aire es manté adherit a un cos. Ara bé, en cap moment s'ha plantejat la qüestió de si l'aire és capaç de resseguir qualsevol geometria, o en alguns casos pren una altra direcció. Fins ara, s'ha donat per suposat que l'aire era capaç de fer-ho.

En una situació ideal, la següent suposició és correcta: Un fluid es capaç de mantenir-se adherit en l'objecte en qüestió sense desprendre-se'n.

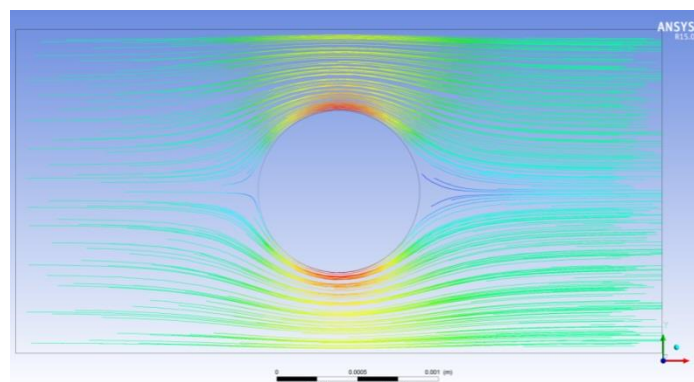


Figura 8. Línies de corrent per un fluid ideal.

Ara bé, en les situacions reals, aquesta suposició no es compleix. L'aire té viscositat i, a efectes pràctics, això es tradueix en un frec intern que es transmet entre capa i capa de fluid

i en un frec entre el fluid i el sòlid. Per tant, al tenir un fluid en moviment al voltant d'un cos, la part del fluid que fa contacte amb aquest, és frenat degut al frec i en conseqüència la capa s'adhereix (condició de no lliscament) a la superfície. Com que el fluid és viscos, les capes de fluid superiors també seran frenades degut al frec intern. A mesura que augmenta la distància respecte el cos, la força de frenada provocada pel frec intern és menor, fins que arriba un punt en que les capes de fluid ja no es veuen afectades per la capa interna. A

partir d'aquest punt, totes les capes ja tenen la velocitat del fluid. Aquesta velocitat es coneix com a velocitat de l'aire del flux principal.

Per tant, com es pot observar a la *figura 9*, existeix una capa d'aire la qual té un gradient de velocitat, fins que assoleix la velocitat del flux. Aquesta capa rep el nom de **capa límit** i té una repercussió important en el coeficient de resistència a l'avanç.

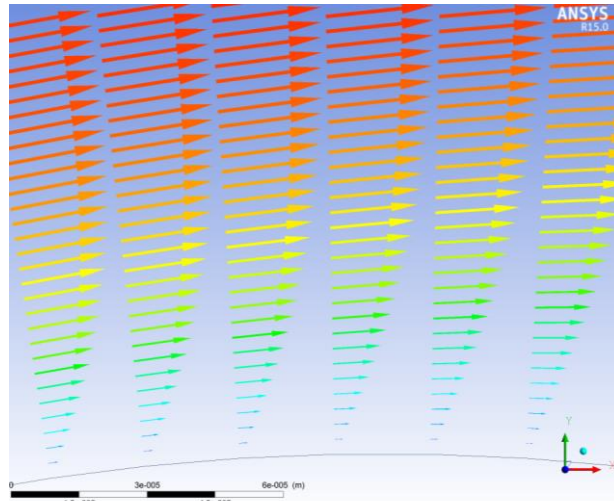


Figura 9. Capa límit. A mesura que els colors tendeixen al vermell, més gran és la velocitat.

Depenent de com es comporti la capa límit, existiran dos tipus de situacions. La primera implicaria una capa límit laminar. Aquesta es caracteritza per tenir un gradient de velocitat molt petit i això provoca que les capes de fluid llisquin d'una manera suau, sense gairebé interactuar entre elles. Per tant, les forces de cisallament són baixes. La segona possibilitat implicaria una capa límit turbulenta. Aquesta té un gradient de velocitat molt gran i està formada per vòrtexs de diferents mides.



Figura 10. Tipus de capa límit.

Tal com es pot apreciar a la *figura 10*, la capa límit va variant a mesura que el flux es desenvolupa. D'aquesta manera, al principi es té una capa límit laminar, seguida per un període de transició i finalment per una capa límit turbulenta. Destacar que en la zona de capa límit turbulenta es forma una subcapa laminar. Aquest fet es deu a que en aquella zona la velocitat tendeix a zero i per tant el Reynolds serà molt baix. És per aquest motiu que a prop del cos existirà una petita subcapa laminar. Aquesta també rep el nom de subcapa viscosa.

En algunes situacions concretes, es pot donar el cas que en un determinat cos només existeixi capa límit laminar, o alternativament que aquesta sigui molt petita i predomini la turbulenta.

En la *figura 10*, també es pot observar que el gruix de la capa límit laminar és menor. Aquest fet, juntament amb el fet que les forces internes de cisallament són molt petites, es tradueix en una superfície de fregament menor i, per tant, en una resistència a l'avanç menor. Pel contrari, la capa límit turbulenta té un gruix molt més gran i aquest fet es tradueix en una resistència a l'avanç major. Ara bé, això no implica que s'hagi d'evitar la capa límit turbulenta per reduir la resistència a l'avanç global dels cossos, ja que l'avantatge d'aquesta capa és que costa més que es desprengui. Per tant, es poden tenir casos on interressi tenir una capa límit turbulenta, com podria ser la part posterior d'un automòbil, on es busca que el fluid sigui capaç de mantenir-se adherit durant tota la geometria, per tal de disminuir el màxim possible el deixant⁴.

Un cop explicada la teoria, a continuació es presenta el mateix cilindre d'abans, però ara tenint en compte la viscositat.

⁴ En aquest mateix apartat, a la pàgina 21 s'explica en detall el deixant i l'impacte en el coeficient de resistència a l'avanç.

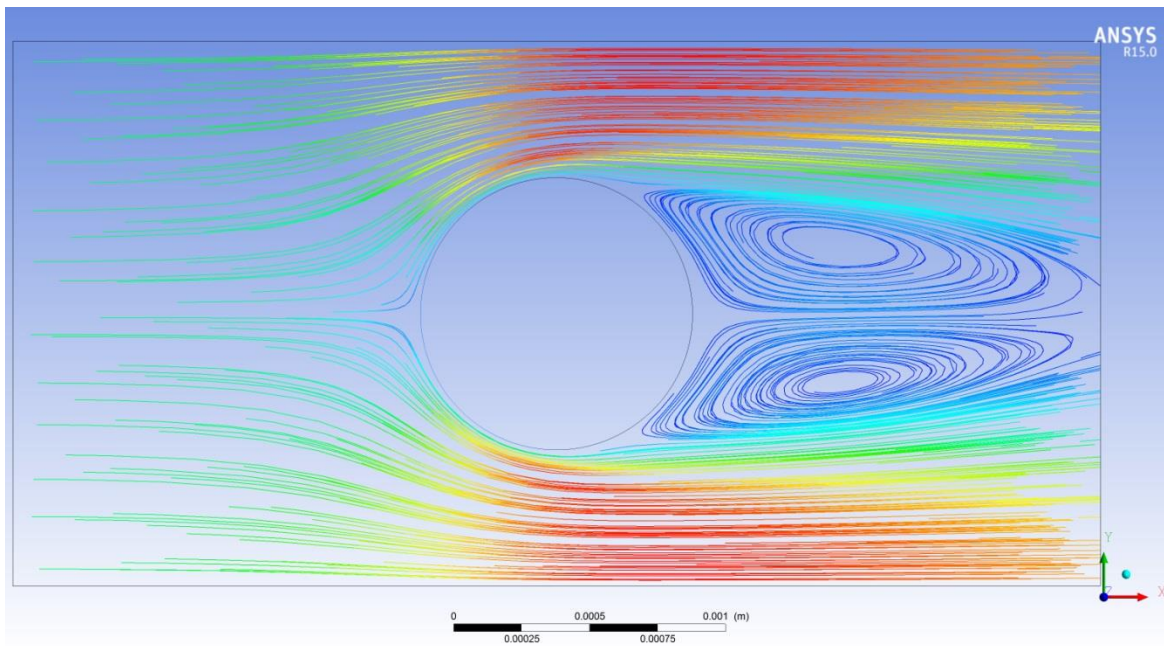


Figura 11. Línies de corrent de l'aire en un cilindre.

Com es pot observar, al no tractar l'aire com a ideal, el fluid ja no és capaç de mantenir-se adherit al llarg de tota la geometria, produint-se un desprendiment.

Per poder explicar a què és degut aquest desprendiment de la capa límit, és necessari primer explicar la influència dels gradients de pressions al flux.

Un fluid normalment es desplaça amb molta més facilitat si parteix d'un punt d'alta pressió i es desplaça fins a un de baixa pressió. Si es dona el cas contrari, és a dir si hi ha un gradient de pressions creixent, llavors s'anomena gradient advers. Aquest fet per si sol no genera cap problema. Ara bé, si s'ajunta un gradient de pressions advers juntament amb un canvi bruscat de geometria (per exemple a la part darrera del sostre d'un cotxe), es pot produir un desprendiment de la capa límit.

Com s'ha comentat abans, depenent de com sigui la capa límit, aquesta té més o menys tendència a desprendre's.

Una capa límit laminar va perdent velocitat al llarg de la capa límit, fins que pot arribar un punt en que s'atura, o fins i tot retrocedeixi. Aquest fet provoca que es desprengui i ja no ressegueixi la forma de la superfície.

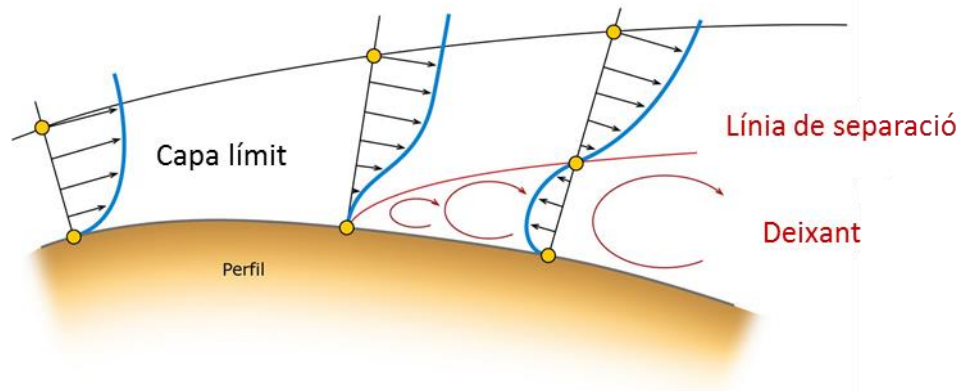


Figura 12. Despreniment d'una capa límit laminar. [4]

A la *figura 12* s'observa l'efecte d'un gradient de pressions advers en la naturalesa de la capa límit laminar. En aparèixer aquest gradient, la capa límit laminar acaba desprenent-se, atès que la part interior no només s'ha frenat sinó que a més a més ha retrocedit. Se sap que el gradient de pressions és advers, ja que el fluid va perdent velocitat i això es tradueix en un augment de pressions.

Ja s'ha comentat que la capa límit turbulenta és més difícil de què es desprengui. Aquest fet es deu a que part de l'energia cinètica de la zona més exterior de la capa límit turbulenta, és a dir la més allunyada del cotxe, es transmet a la part interior, és a dir a les zones de menys velocitat. Aquest fet provoca que aquesta zona interior trigui molt més en frenar-se i, per tant, retarda el desprendiment de la capa límit.

En desprendre's la capa límit, es forma una zona de depressió coneguda com a **deixant** (vegi's *figura 12*). El deixant és una zona de pressions baixes, la qual es caracteritza per augmentar la resistència a l'avanç i reduir les forces de sustentació. És per aquest motiu que té un impacte molt negatiu en el rendiment d'un vehicle. Tot i que en molts casos és impossible eliminar-lo al complet, en especial a velocitats altes, l'objectiu ha de ser que el deixant sigui el més petit possible.

Per aprofundir més en els conceptes teòrics de la capa límit, vegi's la referència [5].

4.2.2. Càrrega aerodinàmica

Fins ara s'ha parlat de la sustentació negativa i que aquesta adhereix el cotxe al terra, però en cap moment s'han comentat els seus beneficis.

La primera qüestió seria perquè un cotxe llisca. Si un cotxe pren una corba tancada a 40 km/h podrà seguir la trajectòria sense complicacions. Ara bé, si el mateix conductor la realitza a 100km/h, segurament es trobarà amb què les rodes li lliscaran. Aquesta diferència es deu a les forces que es generen a la hora de girar i la força de fricció generada pels neumàtics.

Un neumàtic que està en contacte amb el terra pot generar com a màxim una força de $\mu \cdot R$, on μ és el coeficient de fricció i R el pes del cotxe. En el cas que la força valgués el seu màxim, els neumàtics es trobarien al llindar de lliscament. Aquesta força màxima que pot suportar un neumàtic és la que marca la velocitat màxima d'un cotxe a la hora de realitzar una corba, frenar o accelerar.

Si per exemple es vol saber la velocitat màxima a la que un cotxe de massa 1000 kg pot realitzar un tomb amb un radi de curvatura de 50 metres, una àrea de referència de $1,5m^2$, un c_L negatiu de 2 i amb un coeficient de fricció de 1,4 (correspon al de un neumàtic de carreres normal) s'hauria de realitzar el següent procediment:

La força que genera un cos al girar és equivalent a:

$$F = \frac{mv^2}{r}$$

Es conegut que la força màxima capaç de suportar el neumàtic sense lliscar és $\mu \cdot R$. Per tant:

$$\mu R = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{\mu R r}{m}} = \frac{1,4 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 50}{1000} = 26,46 \text{ m/s} = 95,25 \text{ km/h}$$

A la hora de solucionar aquest problema, en cap moment s'ha tingut en compte el coeficient de sustentació del vehicle. Si es torna a solucionar el problema, tenint ara en compte el *lift* del vehicle, s'obté un resultat molt diferent.

En primer lloc cal calcular la força de sustentació que genera el vehicle.

$$L = \frac{1}{2} \rho v^2 A c_L = \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot v^2 \cdot 1,5 \cdot 2 = 1,5v^2$$

Aquest valor, es suma al pes del vehicle, ja que el cotxe ja no només està essent empès pel seu propi pes, sinó també per la força del fluid. Per tant, R ja no valdrà únicament el pes del vehicle, sinó que serà la suma del propi pes del vehicle més la força de sustentació. Si ara es torna a dur a terme el mateix procediment que en el problema anterior s'arriba al següent resultat:

$$\mu R = \frac{mv^2}{r}$$

$$\mu(P_{\text{vehicle}} + 1,5v^2) = \frac{mv^2}{r}$$

$$v = \sqrt{\frac{\mu r P_{\text{vehicle}}}{m - 1,5r\mu}} = \sqrt{\frac{1,4 \cdot 10 \cdot 1000 \cdot 50}{1000 - 1,5 \cdot 50 \cdot 1,4}} = 27,97 \text{ m/s} = 100,68 \text{ km/h}$$

Resumint, gràcies a la força de sustentació, s'ha aconseguit augmentar la velocitat de pas per corba i el rendiment tant de frenada com d'acceleració.

Aquest exemple ha estat realitzat basant-se en un de similar del llibre de Simon McBeath.[6]

4.3. Història de l'aerodinàmica en vehicles

L'aerodinàmica s'ha convertit en un dels aspectes més importants a la hora d'augmentar el rendiment d'un vehicle. És per aquest motiu que en el món de la competició automobilística es troba en desenvolupament constant. La millora que es pot produir en el vehicle és tan gran, que els apèndix aerodinàmics es troben limitats en totes les categories.

No va ser fins als anys seixanta, que els enginyers van començar a intentar obtenir avantatge respecte els seus rivals mitjançant l'aerodinàmica. El que cercaven eren formes molt afilades per tal de reduir la resistència a l'avanç. Ara bé, l'augment de velocitat que es va obtenir en emprar geometries afilades no va provocar el resultat esperat. Tot i l'augment de velocitat punta, només s'aconseguia millorar el temps per volta si es mantenia o s'augmentava el rendiment a les corbes. Això es devia a què tot i tenir un cotxe que fos capaç de córrer molt més en una recta, a la hora de girar, no s'havien produït millores.

Cercant aquesta millora del pas per corba, fou quan van aparèixer els *spoilers* que cercaven l'augment de l'adherència del cotxe respecte al terra. L'enginyer i pilot Jim Hall,⁵ l'any 1966, va arribar al següent raonament: si uns alerons poden enlairar un avió, amb tot el pes que això comporta, perquè no invertir-los i generar una força que empenyi el cotxe cap al terra, augmentant d'aquesta manera l'adherència del vehicle. Posant en pràctica aquesta idea, l'any 1966, va córrer amb el primer cotxe que incorporava un aleró. Aquest va rebre el nom de Chaparral 2E.



Figura 13. Jim Hall. [7]

⁵ Enginyer i pilot americà. Destaca per haver estat el fundador de Chaparral Cars juntament amb Hap Sharp. [5]



Figura 14. Chaparral 2E. [5]

L'addició d'apèndixs que generen una càrrega aerodinàmica produeix un augment del coeficient de resistència al avanç. Tot i això, els enginyers van observar que els temps per volta milloraven considerablement atès que, tot i tenir menys velocitat en recta, el pas per corba era molt més ràpid. És per aquest motiu, que després de l'aparició del Chaparral 2E, immediatament s'introduïren aquests elements a la fórmula 1.

D'aquesta manera, l'aerodinàmica en un vehicle va anar guanyant importància, fins a convertir-se en un aspecte fonamental avui en dia.

4.4. Volkswagen Golf I (1974)

El model *Golf* de l'empresa *Volkswagen* és un dels cotxes amb més història que es poden trobar al mercat actual.

El seu origen va ser al maig del 1974, dissenyat pel dissenyador Giorgio Giugiaro⁶. Suposà un model innovador, ja que va substituir el motor convencional d'aquella època, un motor posterior refrigerat amb aire, per un frontal refrigerat amb aigua. A part, es modificà la tracció posterior per una davantera. Pel que fa a les línies del vehicle, es substituïren les formes rodones d'aquella època, per una estructura de disseny rectangular.



Figura 15. Golf I (1974). [8]

Quaranta anys més tard, el *Volkswagen Golf* encara segueix al mercat. Actualment, és el tercer cotxe més venut de la història, amb unes 30 milions d'unitats venudes. Dit d'una altra manera, cada dia dues-mil persones han adquirit un *Golf* durant aquests quaranta anys.

⁶ 7 d'agost del 1983, Garessio. Dissenyador automotriu italià. Creador del primer vehicle multipropòsit. Guanyador de molts premis, els més destacats són: Medalla de plata atorgada per la Societat Britànica d'Artistes i Dissenyadors Industrials, gallardó Golden Compass, Volant d'Or per la FIAT i títol Honoris Causa en disseny per la seva enorme aportació creativa al disseny industrial contemporani. [9]

Com es pot observar en les figures 16 i 17, la carrosseria del *Golf* ha anat evolucionant al llarg dels anys, intentant cada vegada tenir una forma molt més suau i rodona, per tal de disminuir al màxim possible el coeficient d'avanç.



Figura 16. Evolució de la part posterior del Golf. [10]



Figura 17. Evolució de la part davantera del Golf. [10]

5. Part experimental

5.1. Objectius i metodologia

L'objectiu principal ha estat disminuir al màxim possible el coeficient de resistència a l'avanç de la forma bàsica d'un *Volkswagen Golf I* de l'any 1974. A part, com a objectiu secundari, s'intentarà augmentar la força de sustentació negativa amb la part inferior del vehicle, sempre i quan les modificacions no tinguin un impacte negatiu en el coeficient de resistència a l'avanç. Per dur a terme aquesta millora de rendiment en el vehicle, s'han afegit apèndixs aerodinàmics o modificat la geometria inicial de la peça.

Per observar l'impacte que tenia cada millora en el *drag*, s'han realitzat simulacions amb la forma bàsica original incorporant únicament canvis en la mateixa zona del vehicle. D'aquesta manera es podia avaluar com influïa en el *drag* cada modificació realitzada. Les zones han estat: part davantera, posterior i fons del vehicle.

Totes les modificacions han estat simulades mitjançant el programa "*Fluent*". A l'apartat 5.2. s'explica en detall com s'han realitzat aquestes simulacions. A la hora d'estudiar el vehicle, s'ha considerat que aquest circulava a 30m/s, uns 110 km/h. Aquest valor es deu a que normalment les vies de circulació tenen una restricció de velocitat entre 100 i 120 km/h. Degut a aquestes velocitats i el fluid ser aire, es tindrà un flux turbulent, tal com es pot comprovar a l'*equació 4*. A més a més, per tal de simplificar les simulacions s'ha considerat que el fons del vehicle era llis, sense cap mena d'irregularitat deguda a elements del vehicle com podria ser un tub d'escapat. A part, s'han negligit efectes del para-xocs i les rodes.

$$Re = \frac{v_s \cdot D}{\nu} = \frac{30 \cdot 3,705}{1,520 \cdot 10^{-5}} = 7,3 \cdot 10^6$$

Equació 4. Càlcul del nombre de Reynolds del vehicle.

Un cop realitzades les simulacions, s'ha procedit a analitzar totes les configuracions en cada una de les parts del vehicle i escollir la geometria que tenia una repercussió més positiva en el coeficient de resistència a l'avanç.

Pel que fa a la inclinació del parabrises, aquesta s'ha estudiat amb la forma bàsica que inclouïa les modificacions definitives de la part davantera, posterior i inferior. Aquest fet es deu, a que la inclinació del parabrises es veu molt limitada per la geometria del vehicle. Per tant, s'ha hagut d'estudiar ja només per casos possibles amb la forma bàsica modificada.

Un cop escollida la inclinació òptima, s'ha realitzat un breu apartat on es resumeixen totes les modificacions òptimes realitzades i es comparen amb l'original.

5.2. Realització de les Simulacions

5.2.1. CFD

En l'actualitat, existeixen molts problemes els quals és impossible recórrer a solucions analítiques degut a l'elevat grau de complexitat dels sistemes. Per tal de poder solucionar aquests problemes, s'utilitza la mecànica de fluids computacional, també coneguda com CFD (Computer Fluid Dynamics). Aquesta utilitza mètodes numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes de fluids. Mitjançant aproximacions numèriques de les equacions empleades i un mètode iteratiu, s'intentarà trobar solucions al problema.

5.2.2. Procediment

En aquest apartat, s'explicarà tot el procediment que s'ha realitzat per cada una de les simulacions.

I. GEOMETRIA-CAD

El primer pas de tots, ha estat dissenyar la geometria en un programa CAD. Per dur-la a terme, s'ha emprat el programa *Solid Works*. S'ha dissenyat la superfície de la formà bàsica del vehicle per cada modificació aerodinàmica.



Figura 18. Geometria forma bàsica Golf I.

Ara bé, pel *Fluent* no n'hi ha prou amb la forma bàsica. El programa requereix una superfície que contingui el flux de l'aire. Aquesta superfície, s'anomena "*Default Domain*" i qualsevol element que es vulgui estudiar haurà d'estar comprès en la superfície. La manera de dissenyar amb *SolidWorks* el "*Default Domain*" és la següent: Es genera una superfície amb les mesures desitjades i mitjançant una operació boleana, es "resta" la superfície de la forma bàsica del vehicle. D'aquesta manera s'obté el següent resultat:



Figura 19. Superfície a estudiar.

A la hora de determinar la longitud de la superfície, s'ha de tenir en compte un aspecte fonamental. Es vol estudiar el flux de l'aire al voltant d'un cos. A priori, es coneix que es formaran turbulències, a part d'un deixant. És per aquest motiu, que es necessita una superfície prou gran, com per poder observar tot el deixant generat pel desprendiment de la capa límit. Una mesura recomanada, prenent com a referència la corda (en aquest cas té un valor de 3,705m) consisteix en deixar:

- Al davant l'equivalent a una/dues vegades la corda del vehicle.
- Al darrera l'equivalent a quatre/cinc vegades la corda del vehicle.
- A la part superior l'equivalent a tres/quatre vegades la corda del vehicle.
- A la part inferior, el valor ve fixat per l'alçada del vehicle respecte el terra.

D'aquesta manera, al final queda una superfície amb les següent dimensions respecte el vehicle:

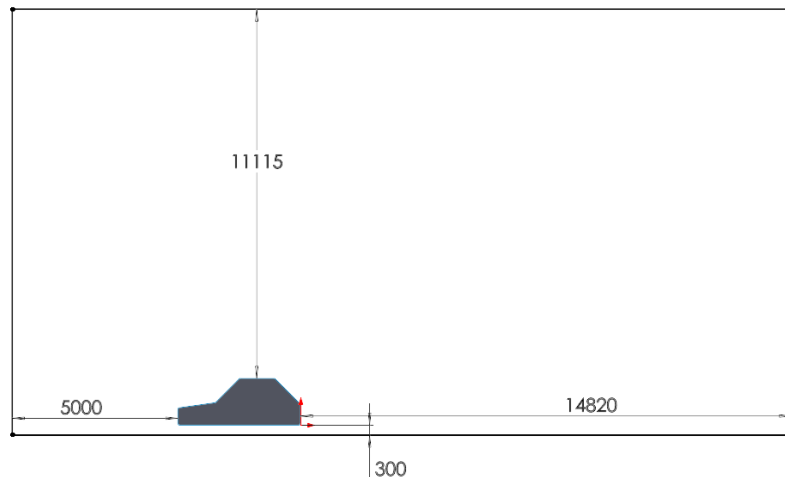


Figura 20. Distàncies entre el vehicle i les parets del volum de control.

II. MALLAT

Un cop es té ja definida la geometria, es pot prosseguir al següent pas. Aquest consisteix en definir un mallat pel “*Default Domain*”, és a dir, la superfície que es vol estudiar. Aquest és un dels passos més importants, sinó el que més, de les simulacions. De la malla dependran tots els resultats obtinguts. Una malla poc fina, donaria com a resultat uns valors amb un error molt gran. Per contra, una malla massa fina, donaria problemes a la hora de convergir els resultats, fins al punt de que la computadora no seria capaç de resoldre el sistema.

Per tant, s’ha de trobar una malla suficientment fina com perquè sigui estable, és a dir, que els resultats obtinguts en aquesta malla o una més fina siguin casi iguals, però evitant que estigui formada per molts elements, ja que sinó la solució no serà capaç de convergir.

La malla estarà formada per elements triangulars. Aquesta decisió s’ha fet degut a la geometria del vehicle. Un cotxe té molts canvis de direcció al llarg de la seva forma bàsica i els triangles permeten adaptar-se millor a aquests. Com que la part important d’estudi és a prop del contorn del vehicle, s’ha mallat el cos de manera que a la zona d’estudi la malla fos molt fina i les zones de poc interès tingués elements grans.

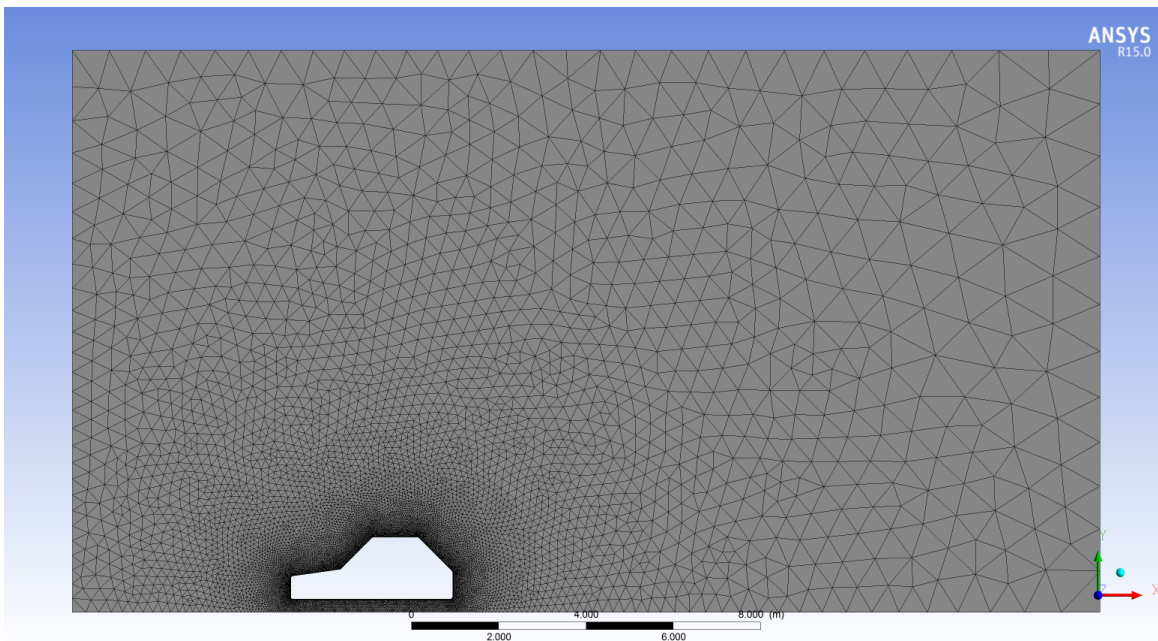


Figura 21. Mallat inicial.

Per tal de disminuir l'error dels resultats obtinguts, s'ha realitzat un "*Inflation*" a les zones a prop de la superfície del cotxe. Això consisteix en afegir elements quadràtics molt petits en aquestes zones, per tal de que la computadora pugui calcular d'una manera més acurada les forces de viscositat.

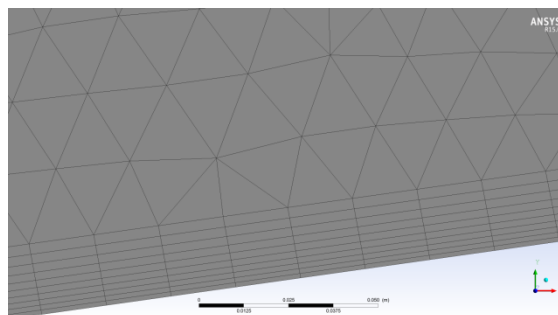


Figura 22. Inflation amb *Number of Layers* =10.

D'aquesta manera, s'obtenen resultats amb menys error. Per tenir un valor orientatiu del gruix d'aquesta capa d'elements quadràtics per tal que inclogui tota la capa límit, s'ha calculat de manera aproximada el gruix d'aquesta. Destacar que els paràmetres que es poden modificar a la hora de realitzar un *inflation* són: el gruix d'aquest, el nombre d'elements quadràtics que hi ha en una columna, és a dir, entre la superfície del cos i el límit del *inflation* i com creix cada element quadràtic respecte l'anterior. Els noms tècnics d'aquests conceptes són: "*Maximum thickness*", "*Number of Layers*" i "*Growth Rate*" respectivament.

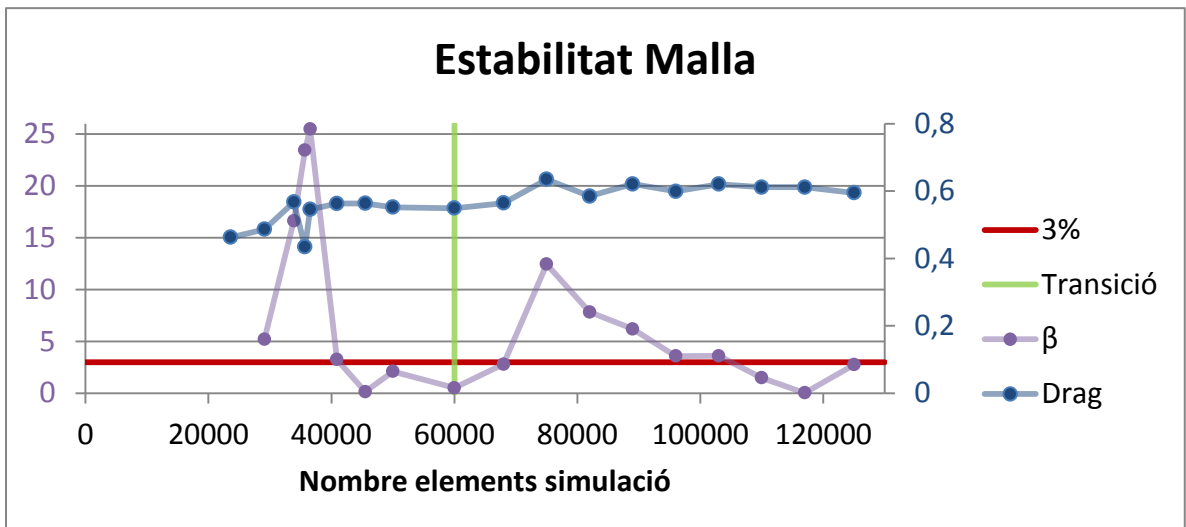
Per cercar la malla estable, s'ha decidit partir d'una malla amb elements grans i anar-la refinant fins que la divergència dels resultats d'una malla a la següent fos inferior al 3%. Aquest 3% equivaldria a una diferència màxima en el coeficient de resistència a l'avanç de $\pm 0,02$. Aquest paràmetre que indica la divergència entre un mallat i el següent, s'ha anomenat β .

$$\beta^n = \frac{|c_D^n - c_D^{n+1}|}{c_D^n} \cdot 100; \text{ per } n = [0, 1, \dots, n - 1]$$

On n és cada una de les simulacions, ordenades en ordre creixent

Equació 5. Definició del paràmetre β .

En el *gràfic 1* es pot observar les diferents simulacions realitzades en la mateixa forma bàsica per diferents mallats, amb el c_D obtingut i el paràmetre β , indicant la diferència entre una simulació i la següent.



Gràfic 1. Evolució del paràmetre β i el *drag* depenent del nombre d'elements del mallat.

Cal destacar les dues línies. La primera, l'anomenada 3%, és la que indica quan el paràmetre β és inferior al 3%. Per tant, quan un punt es troba sota aquesta recta, la divergència entre una simulació i una altre està dins de la tolerància acceptada. Per altre banda, és té la recta "Transició", la verda, la qual s'explica a continuació.

Al principi, a la hora de modificar el mallat, el *inflation* es va mantenir sempre amb un *Number of Layers* comprès entre 5 i 15 i s'anava disminuint la mida dels elements

triangulars. Com es pot veure representat al gràfic, justament abans de la línia verda, semblava que el mallat era estable. Ara bé, això no és del tot cert. El que indica, és que els elements triangulars del mallat ja són estables, però al no haver modificat el *inflation*, o en cas de fer-ho, amb una diferència mínima respecte el de l'anterior simulació, no es pot afirmar que aquest sigui estable. Per cercar l'estabilitat d'aquest, es va mantenir els elements triangulars iguals i es va anar refinant el *inflation*. La línia verda, marca justament aquest canvi en les simulacions. La part esquerra correspon a la cerca d'estabilitat dels elements triangulars i la dreta a la del *inflation*.

Al final, el mallat emprat, rondarà al voltant dels cent-vint-mil elements. Pel que fa al *inflation*, el "Number of Layers" estarà comprès entre 40 i 45. Totes les simulacions compliran aquests requisits, ja que aquests són els que corresponen a les últimes malles que compleixen la tolerància establerta.



Figura 23. Inflation amb *Number of Layers* =45.

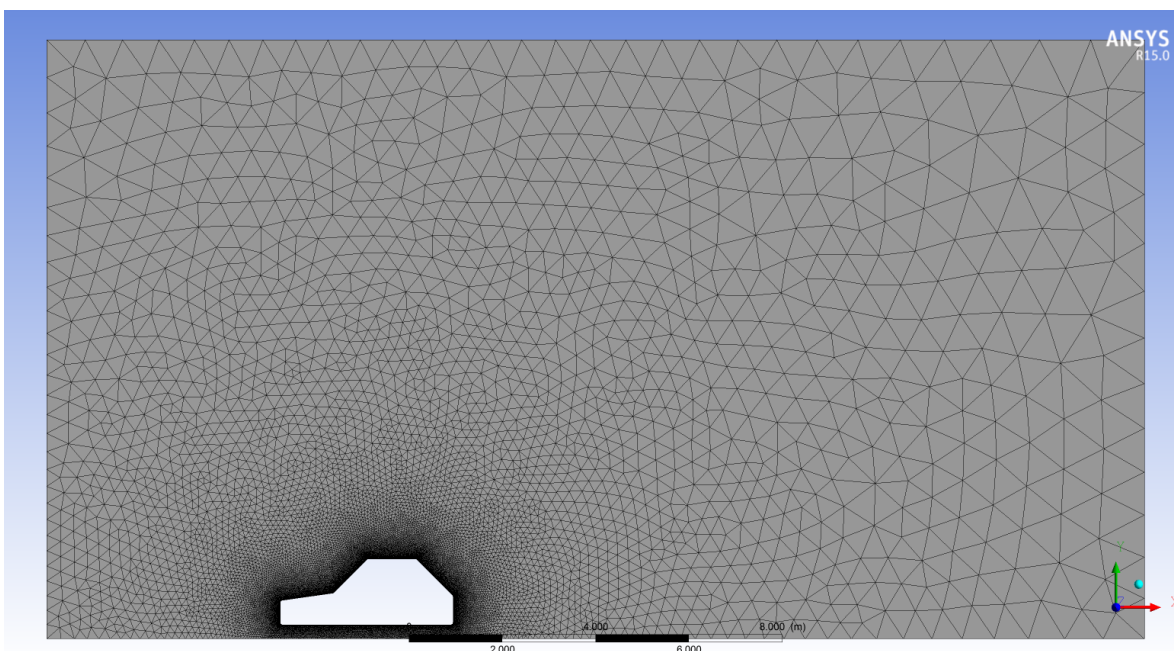


Figura 24. Mallat de 110.000 elements.

III. FLUENT

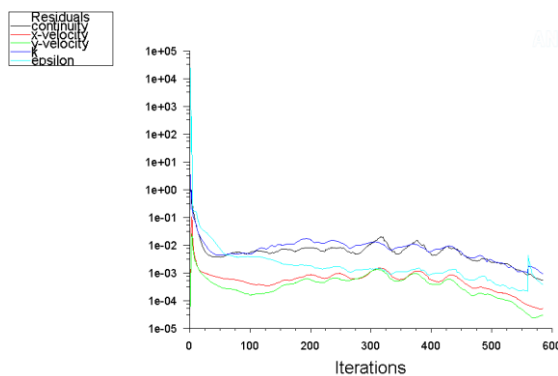
Un cop realitzat el mallat, es prossegueix a realitzar la simulació amb el *Fluent*. Aquest és un software que conté amplies capacitats de modelat físic necessàries per modelar flux, turbulències i transferència de calor.

El primer que s'ha de decidir és el model de turbulència. De tots els possibles, destacar el *k-epsilon* i *k-omega*. Aquests dos, són els més comuns a la hora de modelitzar un problema amb flux turbulent.

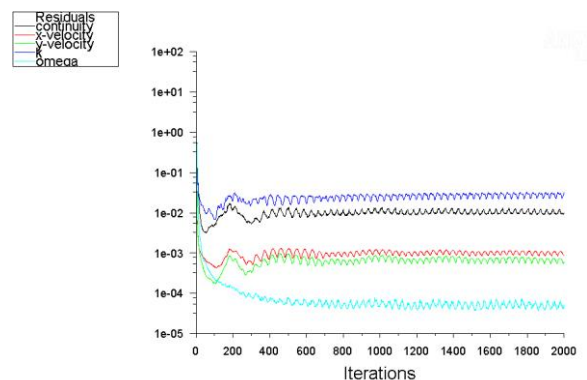
	avantatges	inconvenients
<i>k-epsilon</i>	<ul style="list-style-type: none"> -bones prediccions per la majoria de fluids -convergeix amb més facilitat que molts altres models 	<ul style="list-style-type: none"> -vàlida només per fluids turbulents i Reynolds elevats -falta de sensibilitat a gradient de pressions adversos
<i>k-omega</i>	<ul style="list-style-type: none"> -permet simular Reynols baixos -millors aproximacions de la capa límit 	<ul style="list-style-type: none"> -necessita mallat molt fi a la zona propera a la paret -prediu una separació de capa límit excessiva i anterior a la realitat

Taula 1. Síntesis dels avantatges i inconvenients dels models *k-epsilon* i *k-omega*. [11],[12]

A priori, el *k-omega* sembla tenir més avantatges davant del *k-epsilon*. Ara bé, el fet de que requereixi un mallat molt fi, pot provocar problemes de convergència. A continuació es poden observar els residus de la mateixa forma bàsica amb el mateix mallat simulada amb els dos models:



Gràfic 2. Residus del model *k-epsilon*.



Gràfic 3. Residus del model *k-omega*.

Com es pot observar en els *gràfics 2 i 3*, el model *k-omega* ha estat incapaç de convergir després de dos-mil iteracions, mentre que el *k-epsilon* amb menys de 600 ja ha convergit. Degut als problemes de convergència i al tractar-se d'un flux turbulent i amb Reynolds elevats, s'ha decidit optar pel model *k-epsilon RNG*, el qual és una millora del *k-epsilon*. Aquest compta, com a avantatge significatiu, amb una millora a la hora d'aproximar la capa límit.

El següent pas ha estat definir el fluid. *Fluent* conté una llibreria, al qual es poden trobar una gran quantitat de fluids. En aquest cas s'ha escollit l'aire.

A continuació s'han definit les condicions de contorn. Primerament s'ha d'indicar quina funció fa cada una de les zones d'estudi. Aquestes zones, en el cas en particular de la simulació realitzada, serien: les quatre parets del volum de control i la forma bàsica. Les possibles funcions són:

- **Inlet:** És per on entrarà el flux a una determinada velocitat, pressió o qualsevol altre propietat física.
- **Outlet:** És per on sortirà el flux. De la mateixa manera que succeïa amb el "*Inlet*", es podrà definir la sortida amb qualsevol propietat física.
- **Wall:** Per definir les parets, el terra, el perfil del cos,... Serien totes aquelles zones, on la velocitat del fluid ha de ser tangencial a la superfície. Aquesta opció permet desplaçar a una velocitat constant "la paret". Aquest fet és molt útil, per exemple, a la hora de representar un cotxe desplaçant-se, ja que si es pren com a referència el vehicle, el terra es mou.
- **Symmetry:** En les simulacions realitzades en el projecte, fa la mateixa funció que "*slip wall*", és a dir, una paret sense fricció.

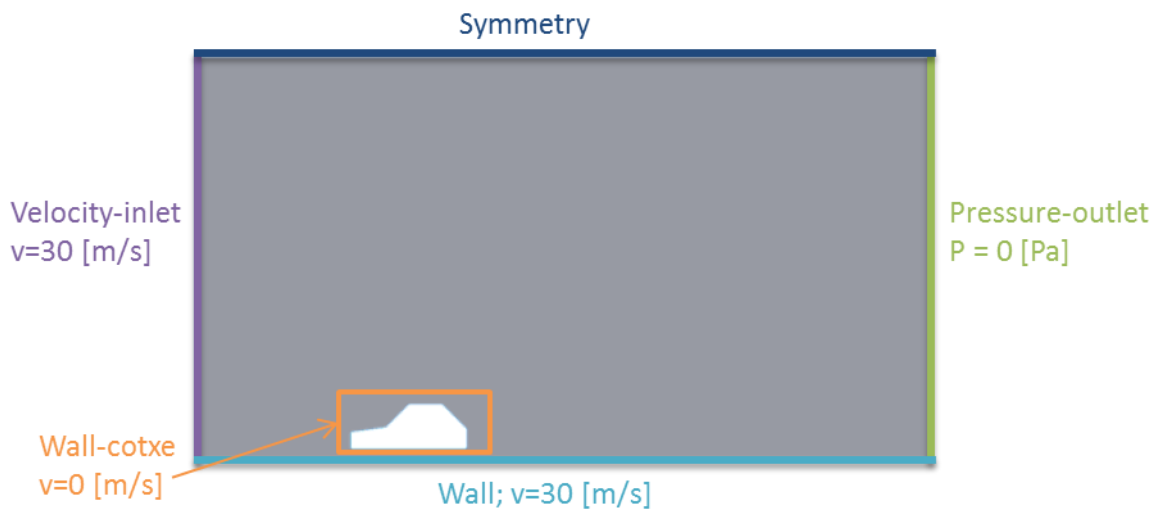


Figura 25. Condicions de contorn.

A la *figura 25* es poden observar totes les condicions de contorn del problema. Destacar que tota la simulació s'ha realitzat prenent com a referència el vehicle. En conseqüència, aquest no es mou, i tant l'aire com el terra es desplacen a la velocitat a la qual es mouria el vehicle, però en direcció contrària.

Com es mostra en la *figura 26*, hi ha dos paràmetres que fan referència a la turbulència. La funció d'aquests és representar que el flux té una lleugera turbulència degut a condicions externes. Així mateix, a "Pressure-outlet" s'ha imposat un 5% d'intensitat de turbulència. Aquest augment pretén representar que durant el pas pel vehicle el flux es veu pertorbat. Recordar que la pressió són 0 Pa, ja que es tracta de la pressió manomètrica (*Gauge Pressure* en anglès), és a dir, prenent com a referència l'atmosfèrica.

Per acabar, cal indicar els valors de referència. Aquests serien la velocitat, l'àrea, viscositat, temperatura i pressió. Menys l'àrea, tots els altres ja estan definits pel programa, gràcies a la seva base de dades i les condicions de contorn incloses anteriorment.

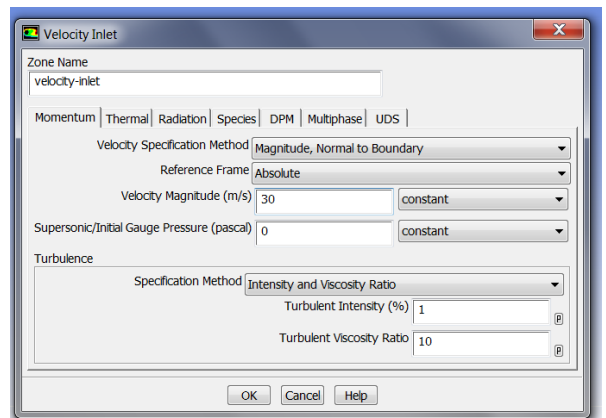


Figura 26. Finestra per introduir les dades de cada condició de contorn. En aquest cas en particular, la condició de velocitat.

Per últim cal indicar els paràmetres a estudiar i començar les simulacions. El primer es fa mitjançant els anomenats “*monitors*”. Al activar aquests, el programa calcularà els coeficients de *lift* o *drag*. També es poden crear superfícies per estudiar paràmetres d’interès, com ara pressions o velocitats, només en aquella zona.

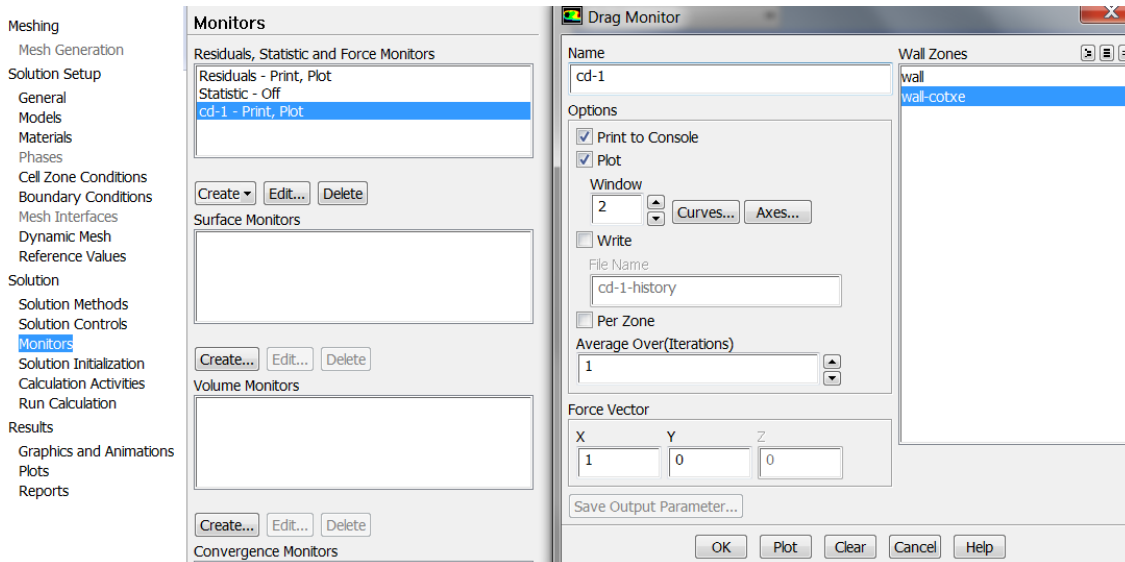


Figura 27. Finestra de configuració dels monitors.

Un cop realitzat tots els passos anteriors ja es pot procedir a simular la solució.

IV. RESULTATS

Durant el procés de simulació, el software pot deixar de simular per dos motius. El primer es produeix quan detecta que la solució ha convergit. La segona al arribar al nombre màxim d’iteracions determinades. Aquest valor es pot modificar abans d’iniciar la simulació.

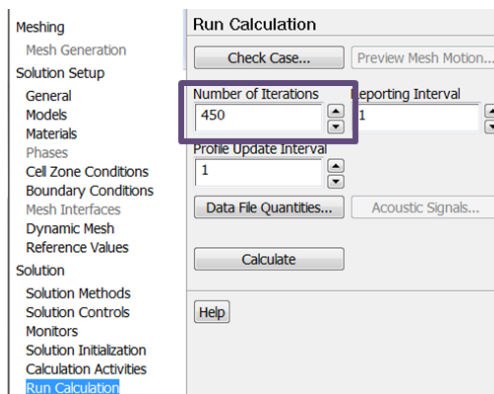
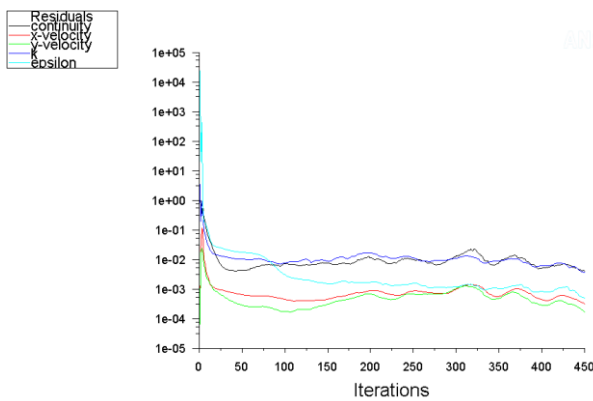
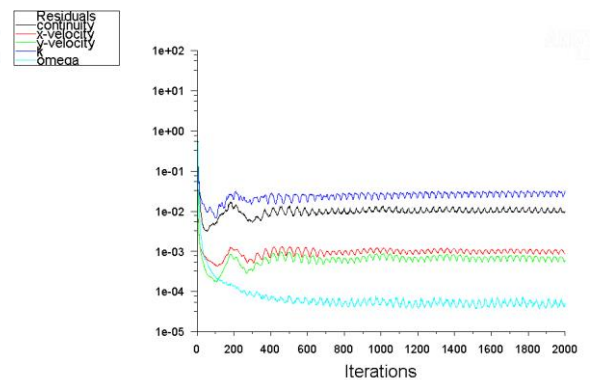


Figura 28. Finestra de configuració del nombre de simulacions.

Un cop el programa ha acabat de realitzar càlculs, el primer que s'ha de fer és observar els residus. Aquests indiquen la diferència d'un valor entre la iteració anterior amb l'actual. Si aquest valor és inferior a $1E-3$, es considera que la solució ha convergit. S'ha considerat que un error al quart decimal en el cas del projecte era acceptable. En problemes on es necessiti una solució molt més acurada, es pot restringir encara més aquest valor. Quan tots els residus com a mínim compleixen l'error acceptat, el software atura la simulació, ja que la solució ha convergit. Per tant, a major restricció d'error, més es dificulta la convergència de la solució. En el cas de que el programa hagi arribat al màxim d'iteracions sense haver convergit, consultar la tendència dels residus pot ajudar a actuar en conseqüència. Si s'observa que aquests tendeixen cada vegada a fer-se més petits, potser amb algunes iteracions més la solució convergirà. Ara bé, en cas de que els residus oscil·lin sense tendir a valors baixos, el millor que es pot fer és revisar la malla i les condicions de contorn, ja que aquella simulació difícilment convergirà.



Gràfic 4. Gràfic dels residus on la solució pot arribar a convergir.



Gràfic 5. Gràfic dels residus on la solució difícilment convergirà.

5.3. Modificacions realitzades

5.3.1. Aerodinàmica del *Golf I*: Punt de partida

El *Volkswagen Golf I* va destacar per unes formes molt més rectangulars que els vehicles d'aquella època. Les mesures de la seva forma bàsica són les següents:

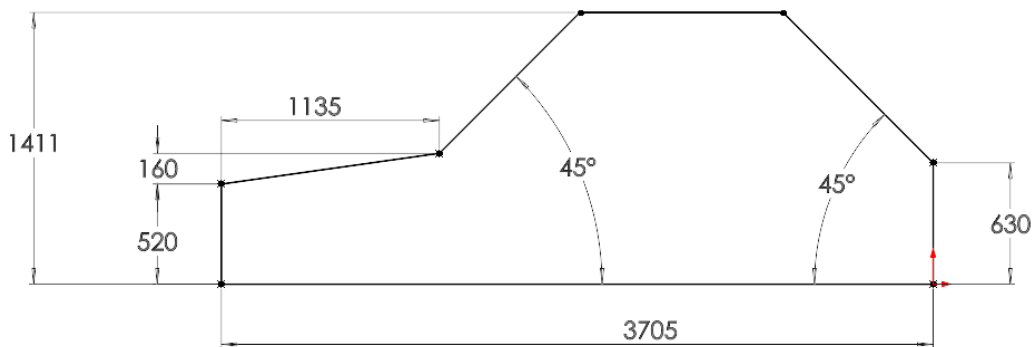


Figura 29. Dimensions del Volkswagen *Golf I*. [13]

Com es pot observar, la part davantera té una geometria molt semblant a la d'un rectangle. Aquest fet, provoca que hi hagi pressions molt elevades, i en conseqüència una gran resistència a l'avanç. A més a més, degut a que el fluid és incapaç de seguir la geometria del quadrat després del punt d'estancament, es forma un vòrtex en la part davantera inferior, produint turbulències, i en conseqüència, un augment del coeficient de resistència a l'avanç.

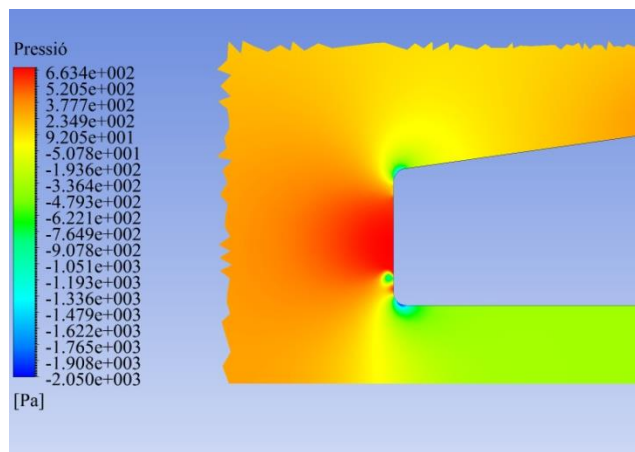


Figura 30. Distribució de pressions locals a la part davantera.

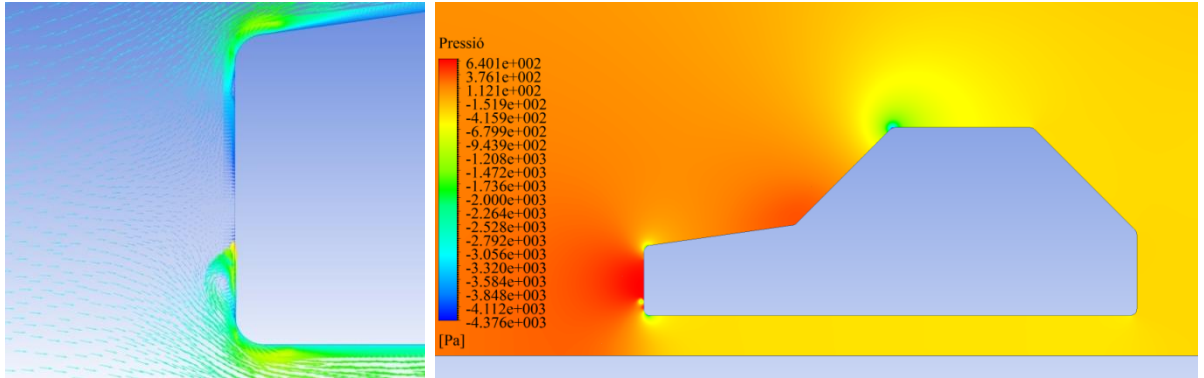


Figura 31. Vòrtex generat en la part davantera del vehicle. **Figura 32.** Distribució de pressions al llarg de tot el vehicle.

En la part de transició entre el capó i el parabrises també s’hi troba un altre punt conflictiu. En aquest punt, es produirà un gradient de pressions molt elevat, tal com es pot observar en la figura 33, el qual també augmentarà el drag. Destacar que les pressions en aquest punt d’estancament són inferiors a les que es produeixen en la part davantera.

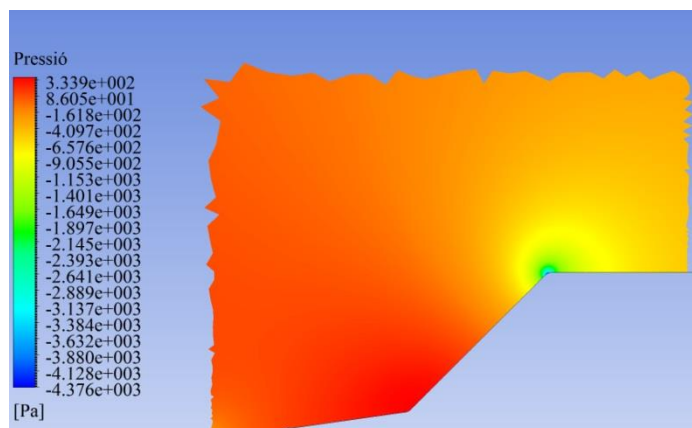


Figura 33. Distribució de pressions locals en el para-brises.

En la part posterior, degut al canvi de geometria tan brusc, es produeix un despreniment de la capa límit molt aviat. Aquest fet provoca que el deixant sigui molt gran, i en conseqüència afecti d’una manera molt negativa al rendiment del vehicle.

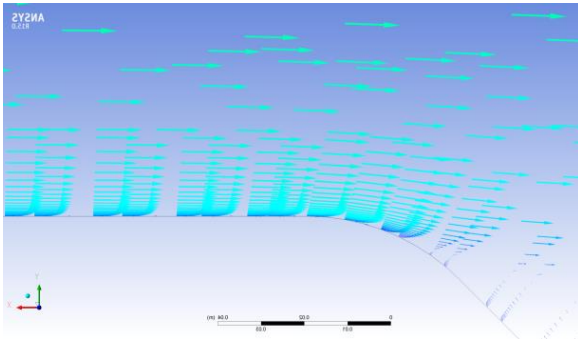


Figura 34. Despreniment capa límit en la part posterior superior.

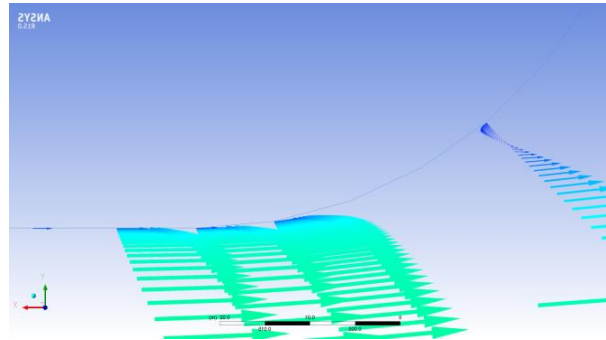


Figura 35. Despreniment capa límit en la part posterior inferior.

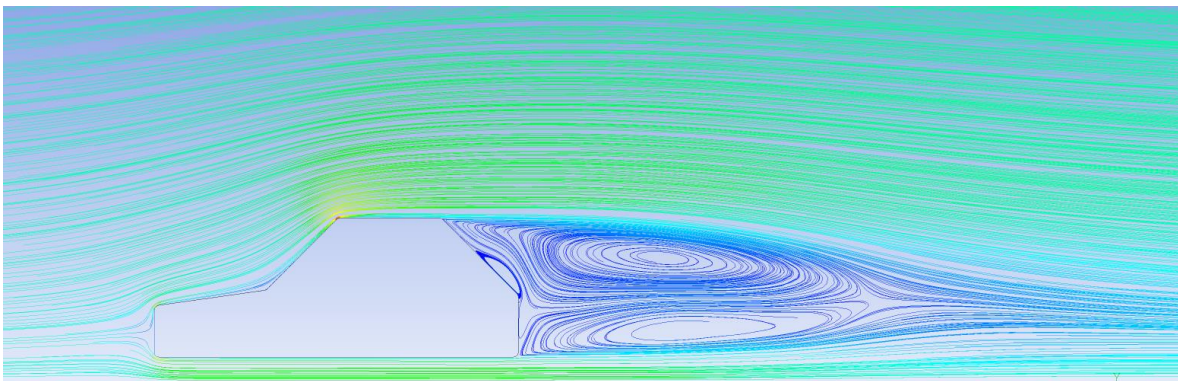


Figura 36. Deixant.

Pel que fa a la part inferior, està molt poc treballada. En el treball s'intentarà modificar-la no només per reduir el coeficient de resistència a l'avanç, sinó també per augmentar lleugerament la càrrega aerodinàmica sense que el coeficient de resistència a l'avanç se'n vegi ressentit.

Tots aquests detalls provoquen un coeficient de resistència a l'avanç molt gran, exactament el seu valor és de 0,61971. Pel que fa el coeficient de sustentació pren el valor de -0,1733.

	C_D	C_L
VW Golf I	0,6197	-0,1733

Taula 2. Taula resum dels coeficients de *drag* i *lift* del *Golf I*.

5.3.2. Part davantera

La forma bàsica del *Golf I* en la part davantera, com s'ha comentat en detall a l'apartat 5.3.1, es pot assimilar a un quadrat, el qual té una resistència d'avanç molt elevada. A part, es suma l'aparició d'un vòrtex degut a que el fluid no és capaç de resseguir la geometria.

És per aquest motiu, que s'ha buscat arrodonir la part frontal del vehicle, per tal de reduir-ne les pressions i eliminar el vòrtex. Amb aquestes modificacions, es busca disminuir al màxim possible el coeficient de resistència a l'avanç.

El primer disseny realitzat ha estat una part davantera simètrica.



Figura 37. Geometria del primer disseny de la part davantera estudiat.

Com es pot observar a la *figura 37*, aquesta geometria elimina la semblança de la part davantera amb un quadrat. A més a més, millora considerablement la facilitat que té el flux per adherir-se a la superfície, eliminant les turbulències que es tenien anteriorment. A part, el gradient de pressions inicial es veu reduït.

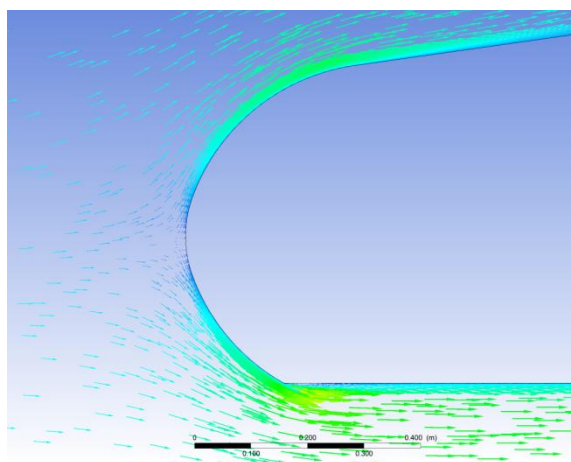


Figura 38. Vectors de velocitat amb la nova geometria.

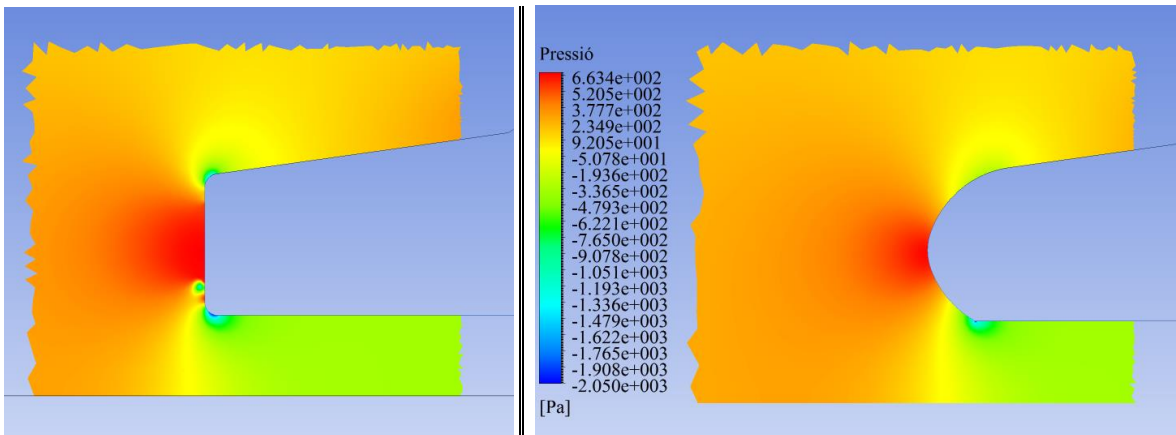
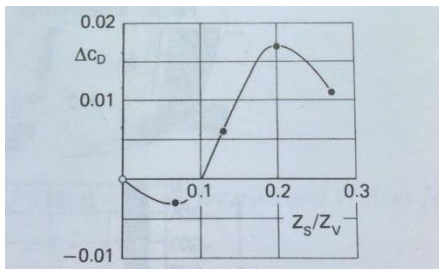


Figura 39. Comparació pressions en la part davantera entre el *Golf I* i la nova geometria. L'escala de valors de les pressions és la mateixa en els dos casos, per tant, es poden extreure conclusions comparant colors.

El coeficient d'avanç obtingut és de 0,5960. Això suposa una reducció del 3,8%.

A partir d'aquí, conservant la geometria arrodonida de la part davantera, s'ha prosseguit a intentar-la millorar per tal d'obtenir un *drag* menor.

Segons estudis realitzats per R. Buchheim, depenent d'on estigués situat el punt d'estancament, el *drag* es veia modificat. Cal destacar que aquests estudis van ser realitzats per un turisme en concret, per tant, els valors obtinguts en el gràfic són orientatius però no exactes.



Gràfic 6. Variació del coeficient de *drag* segons el posicionament del punt d'estancament segons R. Buchheim. [14]

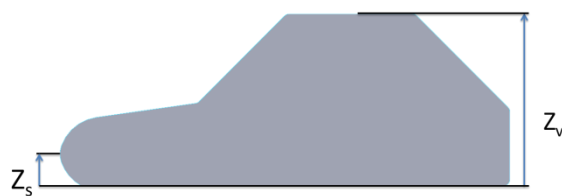


Figura 40. Definició dels paràmetres Z_s i Z_v .

Del *gràfic 6* s'extreu que la relació òptima entre l'alçada del punt d'estancament (Z_s) respecte l'alçada total del vehicle (Z_v) ronda als 0,08 en aquell cas en particular. Per tant, el valor òptim en el *Golf I* serà semblant però no exacte. És per aquest motiu, que la primera simulació s'ha realitzat per un quocient de 0,08 i a partir d'aquest punt, s'han dut a terme diverses simulacions fins a trobar el mínim de la funció en el cas particular del *Golf I*. Aquestes simulacions han estat calculades variant cada vegada un $\pm 0,01$ el quocient Z_s/Z_v .

Quocient	ΔC_D	$\Delta C_D / c_D$
0,07	-0,0388	-6,20%
0,08	-0,0375	-6,05%
0,09	-0,0407	-6,57%
0,1	-0,0404	-6,52%
0,11	-0,0423	-6,83%
0,12	-0,0173	-2,79%

Taula 3. Recopilació dels resultats per la simulació del quocient Z_s/Z_v .

D'aquesta taula es pot concloure, que la configuració òptima del punt d'estancament es troba quan el quocient Z_s/Z_v és equivalent a 0,11.

Per tant, en la part davantera, es tindrà un punt d'estancament a 155 mm respecte la base del cotxe. Pel que fa a la substitució de les formes quadràtiques per arrodonides es mantindrà, ja que com s'ha observat en el primer disseny, suposen una reducció del coeficient d'avanç. La forma final obtinguda ha estat representada a la *figura 41*.



Figura 41. Forma bàsica de la part davantera amb una Z_s de 155mm.

Com es pot observar a les *figures 42 i 43*, la nova geometria segueix complint els dos objectius que es perseguien per tal de reduir el coeficient de resistència a l'avanç. Primerament, disminueix el gradient de pressió, a part d'eliminar el vòrtex que es tenia.

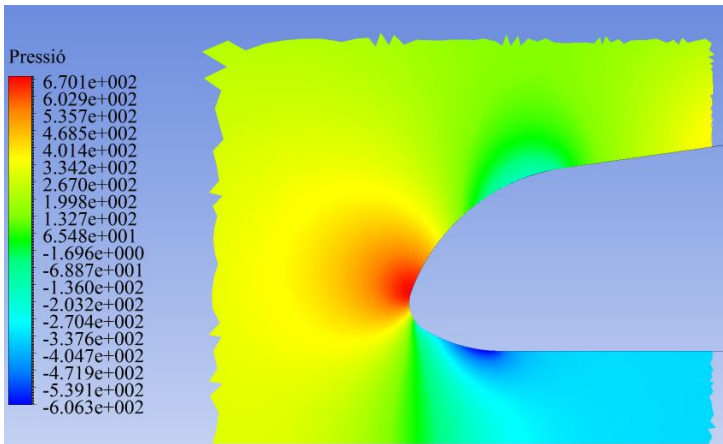


Figura 42. Distribució de pressions.

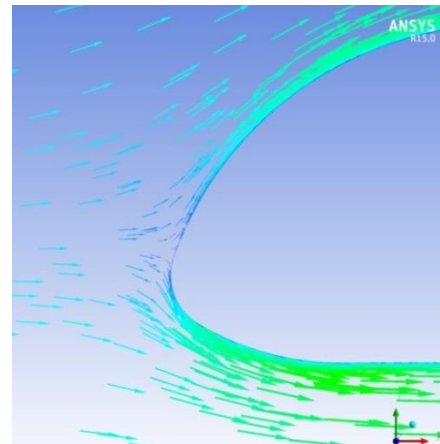


Figura 43. Vectors velocitat.

El C_D obtingut ha estat 0,5763. Això suposa un decreixement del 6,83% respecte l'inicial.

Un cop definit ja el punt d'estancament s'han realitzat simulacions per estudiar si el radi de curvatura de la part superior respecte el punt d'estancament influïa en el coeficient de resistència a l'avanç.

Per dur a terme aquest estudi, s'han estudiat cinc geometries, les cinc conservant el punt d'estancament al lloc òptim. El paràmetre modificat ha estat únicament el radi de curvatura de la corba esmentada anteriorment. Els cinc radis estudiats han estat els següents: 400,500, 600 (el mateix que l'estudiat en les simulacions per trobar el punt d'estancament òptim),

800 i 1000 mil·límetres. Estudiar valors superiors a 1000 mil·límetres no són possibles, ja que redueixen la longitud del capó excessivament. Podria donar-se el cas, que el fet d'eliminar la part recta del capó per complert millorés el coeficient de *drag*, ara bé, aquesta solució no seria possible per una qüestió geomètrica. Es disminuiria en excés l'espai on hi va situat el motor. Per tal de garantir que el motor tingui prou espai s'ha limitat el radi de curvatura a 1000 mil·límetres.

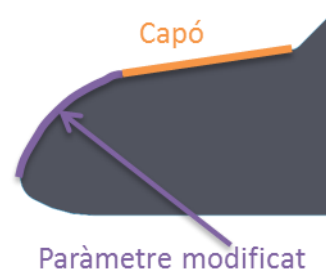


Figura 44. Paràmetre modificat.

El motiu pel qual no s'han estudiat valors més petits de 400, es deu també únicament a un tema geomètric. Si el radi de curvatura és inferior a 400, el punt d'estancament es veu modificat i ja no es troba a l'alçada òptima. A la *figura 45* es pot apreciar aquest fet.



Figura 45. Forma bàsica per un radi de curvatura de 300mm.

radi curvatura [mm]	C_D
400	0,5815
500	0,5756
600	0,5763
800	0,5781
1000	0,5900

Taula 4. Recopilació dels resultats per diversos radis de curvatura.

De la *taula 4* es pot extreure la conclusió de que el radi de curvatura no té un impacte significatiu en el coeficient de resistència a l'avanç sempre i quan es trobi en l'interval entre 400 i 800 mil·límetres. Per tant el radi de curvatura serà modificat dins d'aquest interval a conveniència amb les altres modificacions aerodinàmiques.

La part davantera final tindrà el punt d'estancament situat en una $Z_s = 155$ mil·límetres i el seu radi de curvatura estarà comprès entre 400 i 800 mil·límetres. El coeficient de resistència a l'avanç d'aquesta geometria serà de **0,5763**. Això suposa una millora del 7,00% respecte la forma bàsica del *Golf I*.

5.3.3. Part posterior

Com s'ha esmentat al apartat 5.3.1., el deixant del *Golf I* és molt gran. Aquest fet provoca un empitjorament molt important del coeficient de resistència a l'avanç. Amb la intenció de reduir la resistència a l'avanç, en aquest apartat s'ha treballat per disminuir al màxim possible el deixant.

Normalment un turisme presenta una geometria en la part posterior corresponent a les *figures 46 i 47*. Per tal de cercar la reducció del *drag* òptima, s'han estudiat les dues possibilitats.



Figura 46. Part posterior inclinada.



Figura 47. Part posterior en graó.

5.3.3.1. Part posterior inclinada

En la part posterior inclinada un es troba amb un paràmetre clau. Aquest és la inclinació de la finestra posterior respecte la vertical. Per analitzar els resultats, a aquest paràmetre se li ha anomenat α .

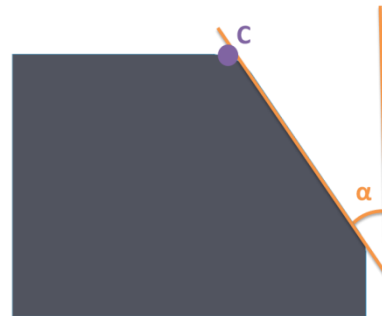


Figura 48. Explicació paràmetre α .

La primera simulació realitzada, per comparar la influència de α en el coeficient de resistència a l'avanç s'ha realitzat amb una $\alpha = 35^\circ$. Aquest valor es deu a que és la inclinació mínima que permet la geometria. En cas de ser inferior, la zona interior del vehicle seria massa petita. La primera simulació ha estat la α mínima permesa perquè si aquesta geometria no aconseguia disminuir el deixant, qualsevol geometria amb una α superior tampoc ho aconseguiria. Aquest fet es deu a que si el fluid no es capaç de resseguir la part posterior per una α mínima, no serà capaç de fer-ho amb una α superior, ja que al augmentar el valor d'aquesta, es produirà un canvi de geometria encara més brusca i en conseqüència el fluid continuarà desprenent. És per aquest motiu que tampoc s'ha estudiat cap inclinació superior als 45° . Aquest valor correspon a la α del *Golf I* i com ja s'ha esmentat, produeix un deixant molt gran.

α	C_D
Inicial	0,61971
35	0,5931

Taula 5. Resultats de les simulacions per $\alpha = 35^\circ$ i 45° .

.Com es pot observar en la *taula 5*, la millora en el coeficient de *drag* ha estat mínima. L'explicació d'aquest fet es troba en la *figura 49*. Tot i haver reduït α , és a dir, haver suavitzat els canvis de geometria, el fluid es segueix desprenent en el mateix punt. És per aquest motiu que les millores en el coeficient de resistència a l'avanç han estat mínimes.

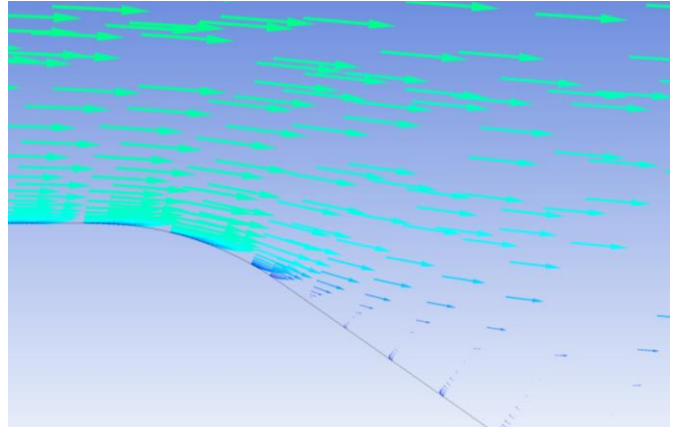


Figura 49. Vectors velocitat en el punt C.

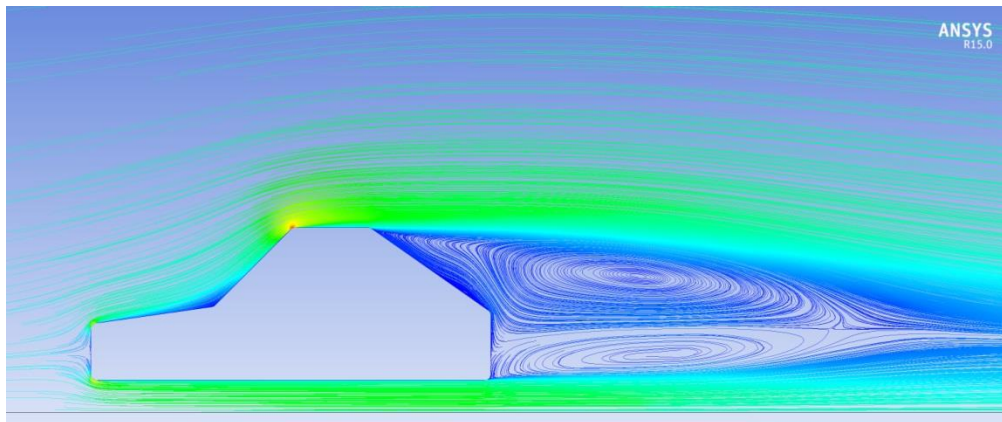


Figura 50. Deixant.

Tot i haver reduït al màxim possible el pendent, no s'ha aconseguit disminuir el deixant. A causa d'aquest fet, la tendència de les següents simulacions ha estat cercar que el sostre del vehicle en comptes de ser horitzontal, passi a ser arrodonit. Amb aquesta modificació es busca que el despreniment de la capa límit es produeixi en un punt més endarrerit.



Figura 51. Geometria amb sostre arrodonit.

En aquesta forma bàsica el paràmetre clau és la màxima pendent que es produeix en aquest sostre arrodonit. Aquesta màxima pendent es troba situada justament on acaba la circumferència i comença la finestra posterior. Al llarg d'aquestes simulacions

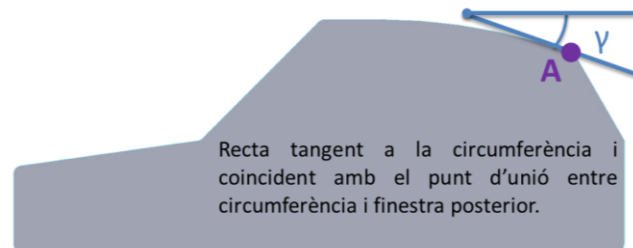


Figura 52. Paràmetre característic γ i punt A.

s'ha anomenat a aquest paràmetre γ . Destacar també el punt A. Aquest punt és justament on es produeix un canvi brusc de geometria. Aquest fet, juntament amb el gradient de pressions advers provoquen que sigui impossible evitar el desprendiment arribat al punt A.

Per cercar la γ màxima possible sense que es provoqui desprendiment de la capa límit abans d'assolir el punt A s'han anat realitzat simulacions cada vegada amb una γ superior. Ara bé, a la hora de realitzar les simulacions a partir d'una γ superior a 20° s'han tingut problemes amb la convergència del mallat. Per solucionar-lo, s'han intentat mallats diversos o arrodonir les zones puntegudes sense èxit.

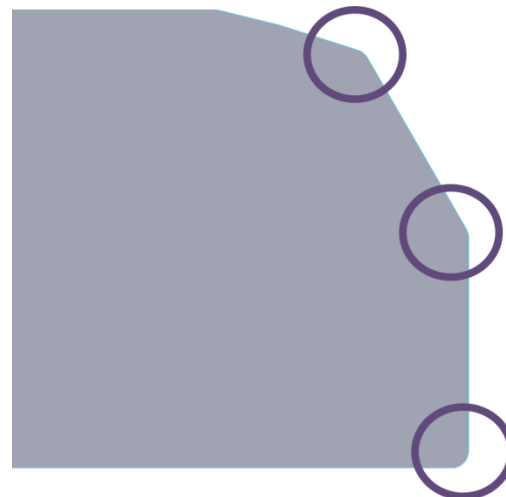


Figura 53. Vèrtexs on s'han realitzat arrodoniments.

Al final s'ha hagut de treballar amb un model que convergís més fàcilment. El model de turbulència emprat ha estat el *k-epsilon Standard* a partir de valors de γ superiors a 20° . Al tenir resultats obtinguts a partir de dos models diferents, no s'ha considerat correcte comparar-los, ja que com s'ha comentat anteriorment, el model *k-epsilon RNG* proporcionava millors aproximacions de la capa límit. És per aquest motiu, que en aquest apartat, per tal de trobar la γ òptima s'han comparat els valors obtinguts a partir d'un model *k-epsilon Standard*.

γ	c_D (<i>k-epsilon RNG</i>)	c_D (<i>k-epsilon Standard</i>)
10	0,4591	0,4900
15	0,4426	0,4775
20	-	0,4133
25	-	0,4082
30	-	-

Taula 6. Recopilació dels resultats per γ diverses.

Com es pot observar, a mesura que es va augmentant γ es produeix una reducció important en el *drag*.

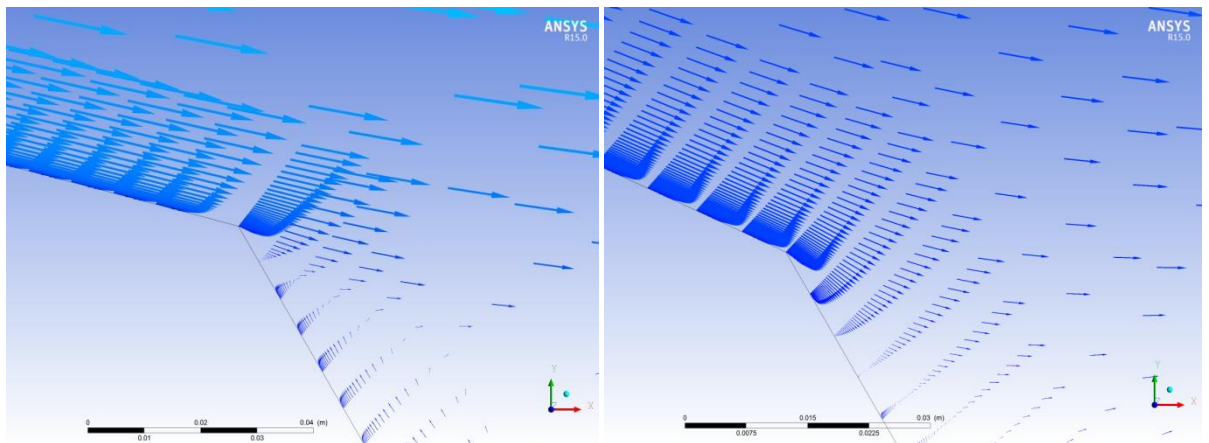


Figura 54. Vectors velocitat en el punt A per $\gamma = 15^\circ$ i 25° respectivament.

La *figura 54* mostra la capa límit en el punt A, comparant la simulació de $\gamma = 15^\circ$ amb la de 25° . En les dues el despreniment es produeix justament en el punt A. Aquest fet té sentit, ja que es produeix un canvi de geometria molt brusc amb un gradient de pressions advers. Tot i que pugui semblar que es desprèn a una distància considerable del punt A, cal tenir present

que les imatges han estat capturades a una escala molt petita. És a dir, el que sembla una gran distància, pot tractar-se de dos mil·límetres

Per tant, l'explicació de la diferència de *drag* entre un cas i l'altre no es troba en el despreniment. Ara bé, si un estudia els deixants, observarà com en el cas de $\gamma = 25^\circ$ aquest és menor.

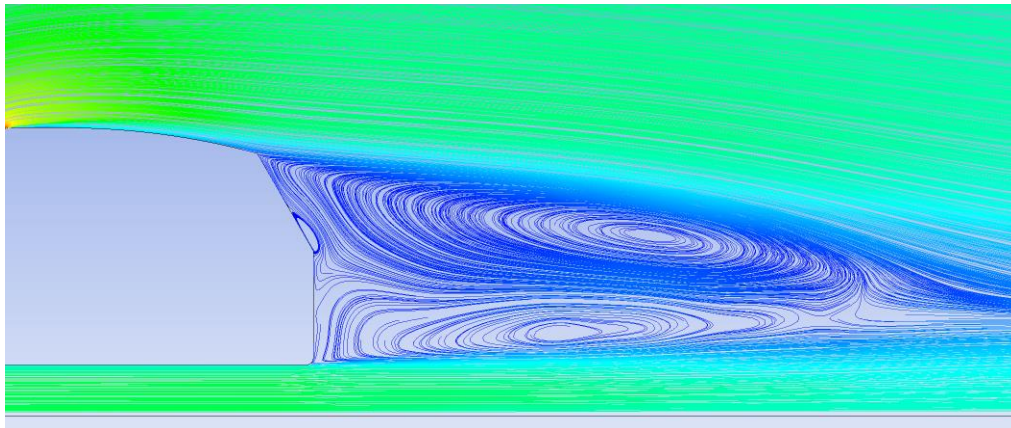


Figura 55. Deixant per $\gamma = 15^\circ$.

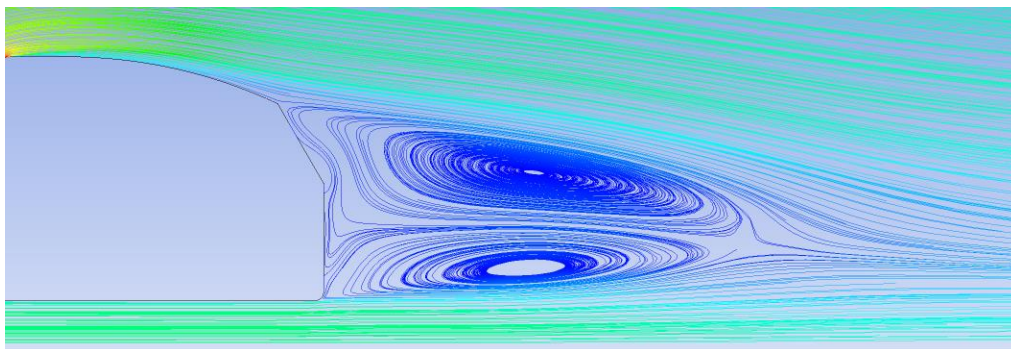


Figura 56. Deixant per $\gamma = 25^\circ$.

Si s'observen els deixants, en les *figures 55 i 56* (les quals estan a la mateixa escala) es pot comprovar com clarament el deixant de $\gamma=25^\circ$ és menor al de $\gamma = 15^\circ$. Aquest fet es deu a que tot i que en els dos casos la capa límit es desprèn en el punt A, en el cas de $\gamma=25^\circ$ aquest es troba més endarrerit.

A la *taula 6*, per $\gamma=30^\circ$ no hi apareix cap resultat. Aquest fet és degut a que la simulació no va realitzar una bona aproximació del model. Això es pot observar en la capa límit al punt A. Com s'havia comentat, el despreniment es produirà en el punt A degut al canvi de geometria brusca i el gradient de pressions advers. Segons la solució obtinguda, en el cas de $\gamma=30^\circ$ el

fluid no és tan sols capaç de no desprender's en el punt A, sinó que tampoc es desprèn en la zona on la geometria és vertical.

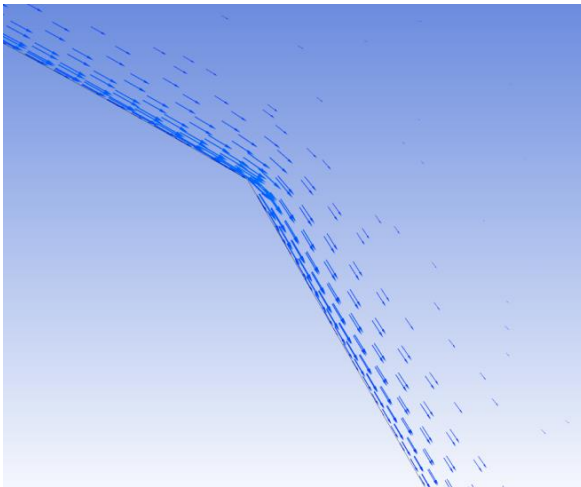


Figura 57. Vectors velocitat en el punt A per $\gamma = 30^\circ$.

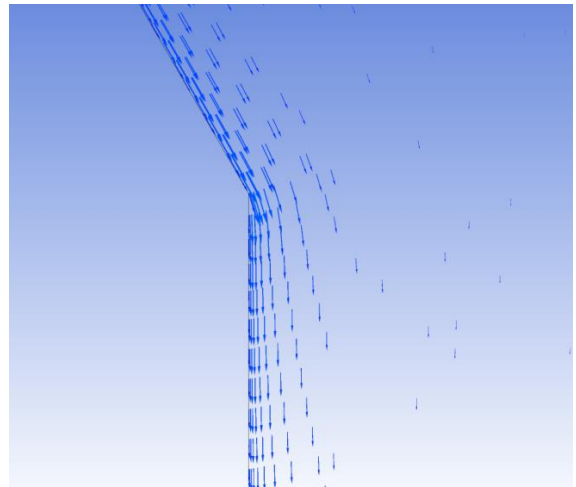
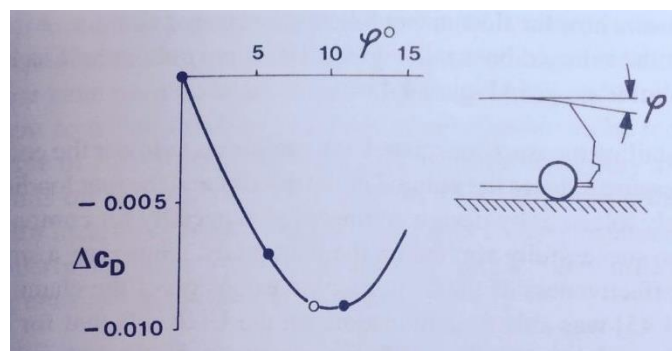


Figura 58. Vectors velocitat en la zona vertical per $\gamma = 30^\circ$.

És per aquest motiu, que els valors fiables són els obtinguts per $\gamma < 30^\circ$. Entre aquests valors, la diferència entre 20° i 25° és mínima. Aquests resultats concorden amb uns estudis realitzats per M. Maioli⁷. En aquests, Maioli afirmava que en la part posterior d'un *Fiat Uno*, la màxima millora del coeficient de *drag* es trobava per un valor de γ entre 10° i 15° . A partir d'aquests valors el coeficient de resistència a l'avanç anava cada cop anava augmentant. Tot i no coincidir els valors que ofereixen el menor coeficient de *drag* (degut a tractar-se de dos models de cotxe diferents), les simulacions obtingudes tenen una forta semblança amb els resultats obtinguts per Maioli en el seu temps.



Gràfic 7. Reducció del coeficient de *drag* modificant el paràmetre γ segons M. Maioli. [14]

⁷ Per llegir l'estudi, vegi's pàgina 166 de la referència [14].

Es creu que per $\gamma = 30^\circ$ la capa límit s'hagués després abans d'arribar al punt A, ja que diversos estudis així ho indiquen. Per desgràcia, la última afirmació no s'ha pogut comprovar en el projecte degut a problemes de convergència de les geometries i solucions sense cap mena de sentit físic.

Resumint, amb la forma arrodonida s'aconsegueix un despreniment de la capa límit més endarrerida que amb el primer cas estudiat. En les figures 59 i 60 s'han comparat els dos deixants, el de la part posterior inclinada i el de la forma arrodonida per $\gamma = 25^\circ$.

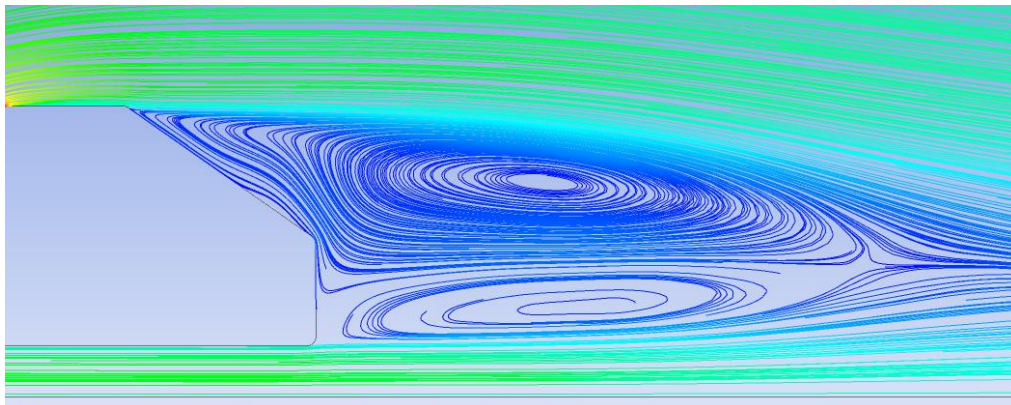


Figura 59. Deixant amb la part posterior inclinada.

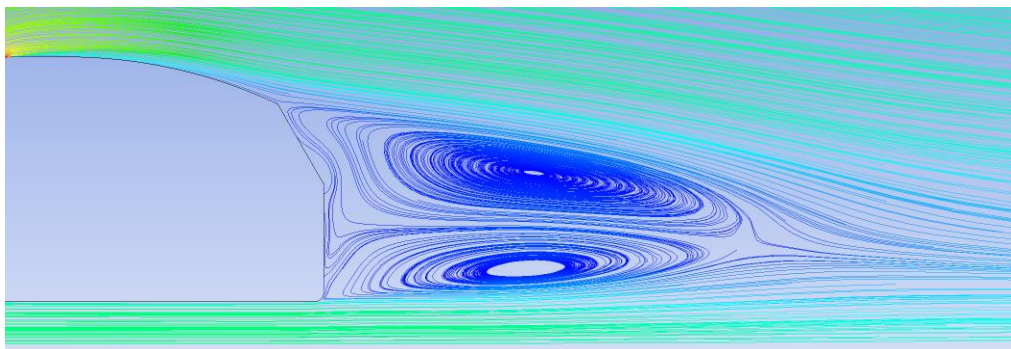


Figura 60. Deixant amb la part posterior arrodonida i $\gamma = 25^\circ$.

Aquest fet es tradueix amb un deixant més petit i en conseqüència un *drag* menor. El coeficient de resistència a l'avanç per $\gamma=25^\circ$ és de **0,4082**. Això suposa una millora aproximada (es recorda que el model emprat ha estat *k-epsilon Standard* i s'està comparant amb el coeficient de resistència a l'avanç del *Golf I* obtingut amb *k-epsilon RNG*) del 34%.

5.3.3.2. Part posterior en graó

Tot i haver millorat de forma important el coeficient de *drag* mitjançant una part posterior inclinada, el despreniment de la capa límit continua produint-se molt aviat. Seguint amb la filosofia d'atraçar al màxim possible el despreniment de la capa límit, s'ha optat per afegir un graó al final. Amb aquest graó el que es busca és el flux després en la part posterior, aconseguint d'aquesta manera disminuir el deixant. Aquesta geometria és molt emprada tant en els turismes de competició com en els esportius.



Figura 61. Vehicle de competició en el campionat "Deutsche Tourenwagen Masters". [15]

Per tant, a la part posterior del vehicle per aquest estudi s'afegirà un graó de 0,75 metres d'allargada. S'ha considerat 0,75 metres perquè sigui prou gran com per tenir un efecte positiu en el coeficient de resistència a l'avanç, però suficientment petit com per no suposar un canvi brusca en l'allargada del vehicle. Aquest canvi suposa un increment de la llargària del vehicle del 20% respecte l'inicial.



Figura 62. Forma bàsica amb una part posterior en forma de graó.

En aquestes simulacions els paràmetres característics han estat els següents: γ , δ i z . En la figura 63 s'explica cada un el que representa. Pel que fa al radi de curvatura R , aquest no és un paràmetre a estudiar ja que es modifica segons γ per mantenir sempre la condició de tangència a les dues rectes on fa contacte.

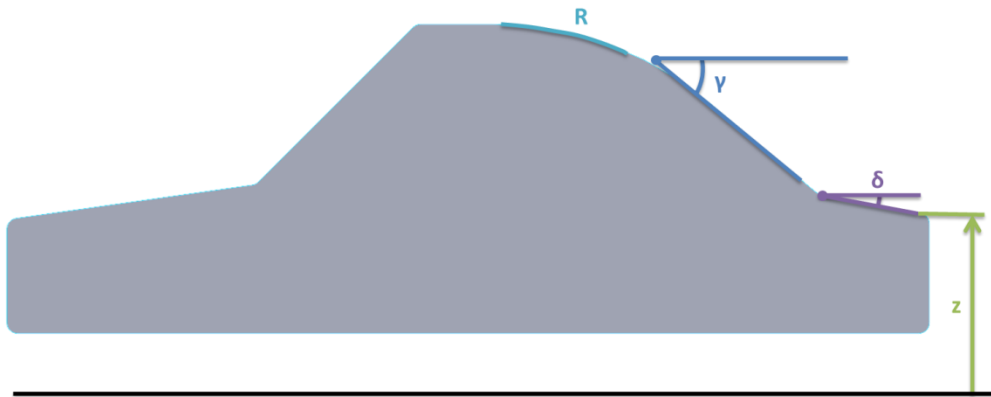


Figura 63. Paràmetres característics per una part posterior en forma de graó.

Els valors de la primera simulació han estat els següents: $\delta = 10^\circ$, $\gamma = 35^\circ$ (valor mínim per garantir que a la part interior hi hagi suficient espai per quatre persones) i $z = 0,85$ metres. Aquest últim correspon al mateix valor que es tenia en el *Golf I*. Per aclarir, z és l'alçada de l'últim punt del graó respecte al terra.

Els resultats d'aquesta geometria no han estat els esperats. El coeficient de resistència a l'avanç era molt superior al òptim trobat en l'apartat anterior. El valor obtingut ha estat de 0,4706. Aquest fet es deu a que el fluid es desprèn a la hora de resseguir la pendent de 35° i genera un gran deixant.

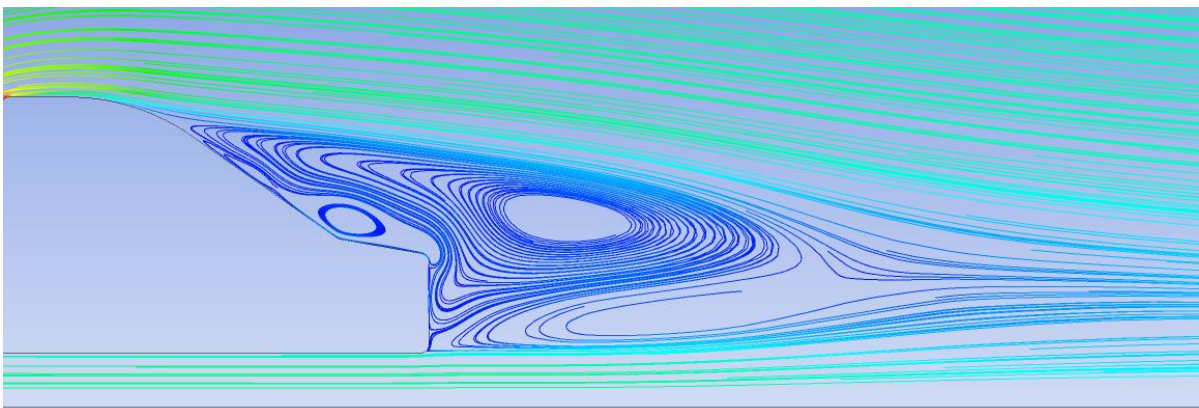


Figura 64. Deixant per $\delta = 10^\circ$, $\gamma = 35^\circ$ i $z = 0,85$ m.

Estudi del paràmetre γ

La primera acció realitzada ha consistit en modificar la geometria per tal de poder disminuir γ .



Figura 65. Forma bàsica amb un graó de 300 mil·límetres de llarg

Com es pot apreciar a la *figura 65*, s'ha disminuït la llargada del graó a 300 mil·límetres (abans era de 750 mil·límetres). És a dir, dels 750 mil·límetres que s'ha allargat el vehicle, 300 mil·límetres s'han emprat pel graó i la resta per disminuir l'angle γ . D'aquesta manera s'aconsegueix que la γ prengui un valor de 30° . Per tal de que hi segueixin cabent 4 persones al vehicle, l'arrodoniment inicial s'ha allargat. Pel que fa als paràmetres δ i z es mantenen constants.

En aquest cas el valor del coeficient de *drag* ha estat de 0,3467. Aquesta reducció tant important es deu a dos fets. El primer és el despreniment de la capa límit, que no es produeix fins al arribar al final del graó.

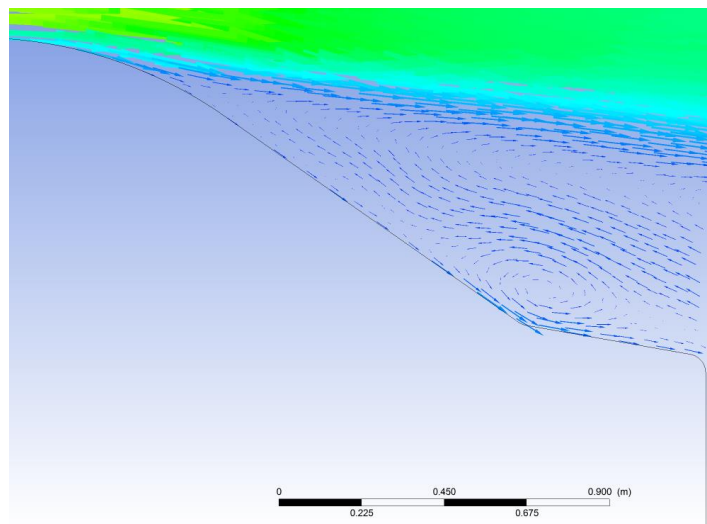


Figura 66. Vectors velocitat en el punt A per $\gamma = 35^\circ$

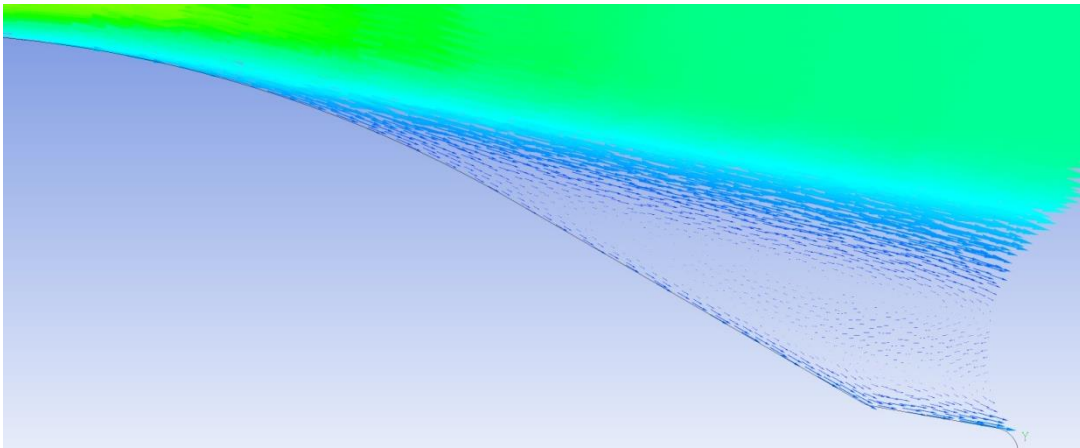


Figura 67. Vectors velocitat en el punt A per $\gamma = 30^\circ$.

Per l'altre banda es té el deixant. Gràcies al tard despreniment de la capa límit, el deixant s'ha vist reduït d'una manera considerable.

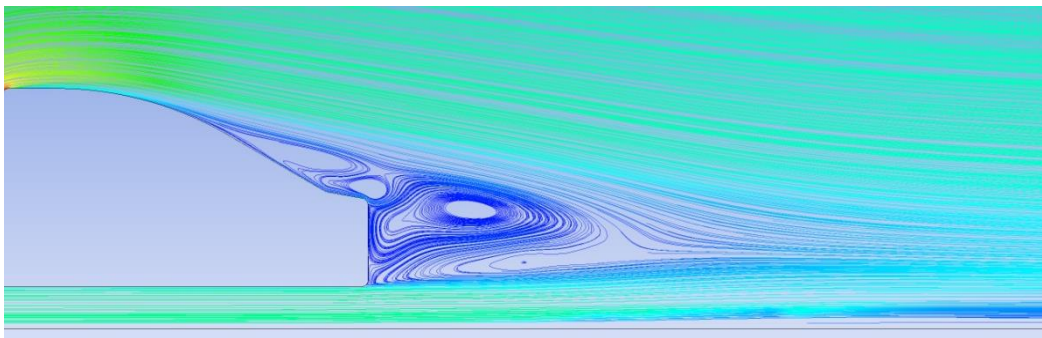


Figura 68. Deixant per $\gamma = 30^\circ$.

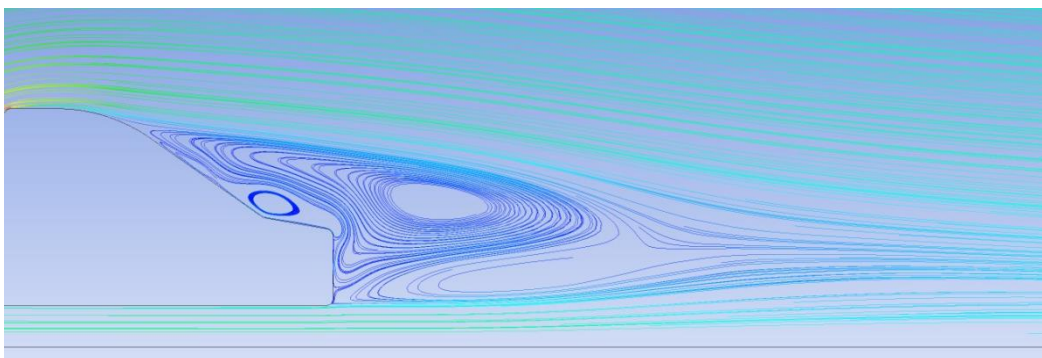


Figura 69. Deixant per $\gamma = 35^\circ$.

Degut a que γ no pot prendre un valor a inferior a 30° , i anteriorment s'ha demostrat que per $\gamma = 35^\circ$ el fluid ja no era capaç de resseguir la geometria, s'ha considerat aquest valor com a òptim.

Estudi paràmetre α

Un cop es tenia la y fixada, s'ha prosseguit a estudiar la influència del paràmetre α .

α	c_D
0	0,3699
5	0,3724
10	0,3467
15	0,3417
20	0,3400

Taula 7. Recopilació dels resultats per α diverses.

Com es pot observar, per una $\alpha < 5$ el coeficient de resistència a l'avanç no es veu modificat. És cert que no s'obté el mateix valor, hi ha una diferència de $2,5 \cdot 10^{-3}$. Ara bé, al tractar-se d'una diferència del tercer decimal, no es pot considerar millora ja que com s'ha comentat anteriorment, els càlculs s'han realitzat tots amb un error acceptable al tercer decimal. Al passar a una α compresa entre 5° i 10° el coeficient de *drag* és reduït considerablement. Ara bé, un cop s'assoleix l'interval $10^\circ < \alpha < 20^\circ$, el coeficient de resistència a l'avanç ja no es veu influenciat per l'angle. Tot i no tenir el mateix valor, el motiu pel qual es considera que ja no es veu modificat és l'esmentat anteriorment.

Per tant, per l'interval de $\alpha = [10^\circ, 20^\circ]$ es té la configuració òptima d'aquest paràmetre.

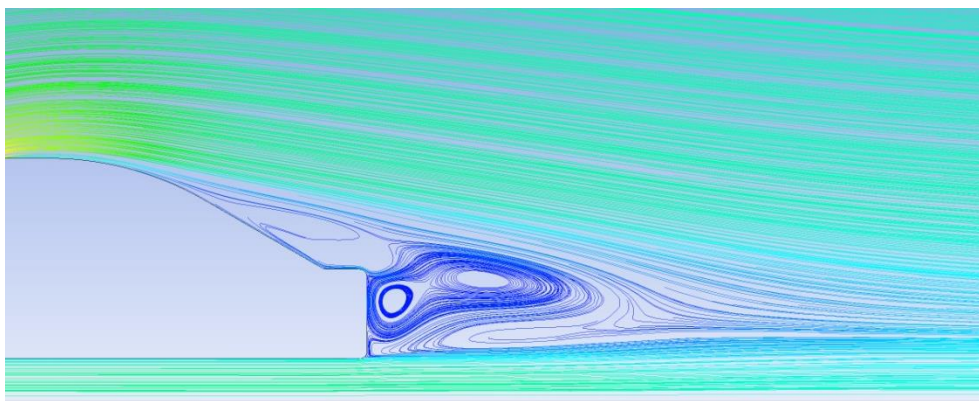


Figura 70. Deixant per $\alpha = 0^\circ$.

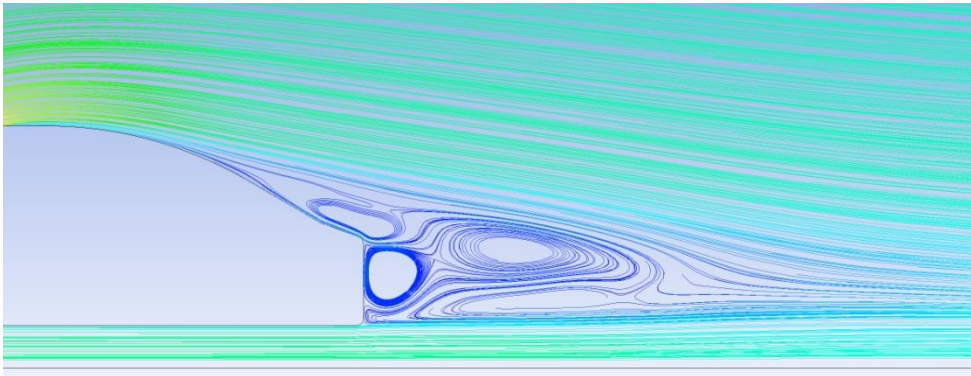
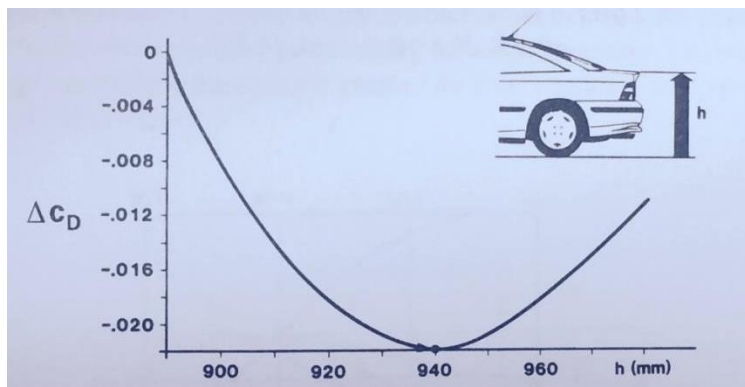


Figura 71. Deixant per $\alpha = 20^\circ$.

A les figures 70 i 71 es pot apreciar com gràcies a la inclinació final del graó el deixant s'ha disminuït lleugerament. Per tant, sempre i quan α estigui compresa entre 10° i 20° , es tindrà la geometria òptima. El coeficient de resistència a l'avanç per $\alpha = 20^\circ$ és de **0,3400**. Aquest suposa una millora del 8,08% respecte una $\alpha = 0^\circ$.

Estudi paràmetre z

Per últim, falta estudiar la influència del paràmetre z en el *drag*. Segons estudis realitzats per H.-J. Emmelmann⁸, aquest paràmetre influïa en el *drag* del vehicle. A priori pot semblar que com més baix millor, però en els seus estudis va concloure que aquest fet no és així.



Gràfic 8. Reducció del coeficient de resistència a l'avanç modificant el paràmetre z segons H.-J. Emmelmann. [14].

⁸ Per llegir l'estudi, vegi's pàgina 176 de la referència [14].

Com es pot apreciar en el gràfic, la clau es troba en buscar el mínim de la funció. L'objectiu de les següents simulacions ha estat justament cercar aquest mínim. El *Golf I* originalment tenia una z de 930 mil·límetres. S'ha partit d'aquesta i en intervals de 20 mil·límetres s'han anat realitzant simulacions.

z	C_D
910	0,3392
930	0,3400
950	0,3275
970	0,3433

Taula 8. Recopilació dels resultats per z diverses.

El mínim de la funció es troba per $z=950$ mm i suposa una reducció del *drag* de 0,0125.

5.3.3.3. Part posterior final

Com que s'han realitzat moltes modificacions en la part posterior, en aquest apartat es pretén mostrar el resultat final i indicar les mesures finals dels paràmetres.

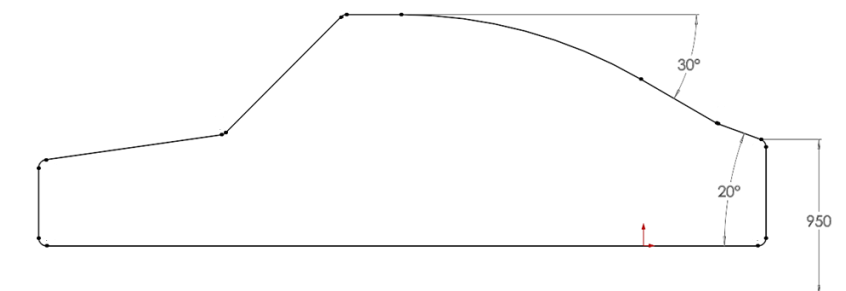


Figura 72. Valors dels paràmetres de la forma bàsica òptima.

Al final s'ha optat per una $\alpha=20^\circ$. Aquest fet es deu a que davant la indiferència de l'angle α sempre i quan estigui comprès en l'interval $[10^\circ, 20^\circ]$, s'ha optat per aquell que maximitzés la mida de l'interior del vehicle.

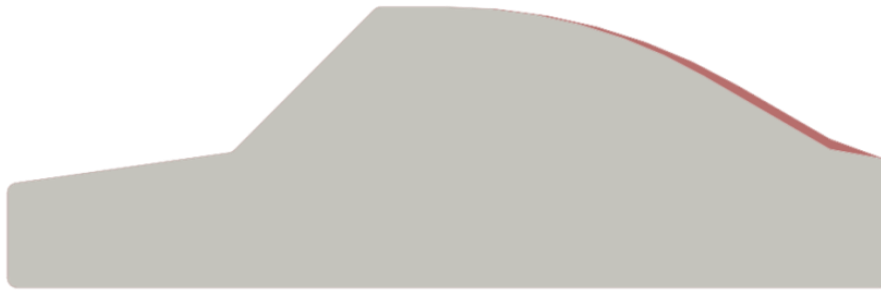


Figura 73. Comparació de les formes bàsiques per $\alpha = 10^\circ$ (grisa) i 20° (vermella).

En la *figura 73* es pot observar com la forma bàsica de color vermell ($\alpha = 20^\circ$) té una mica més d'espai interior si es compara amb la grisa ($\alpha = 10^\circ$).

El coeficient de resistència a l'avanç d'aquesta geometria és de **0,3275**. Això suposa una millora del 47,15%.

D'aquesta geometria destacar els punts conflictius. En la *figura 74* s'observa el deixant de la part posterior final, el qual s'ha disminuït de forma considerable respecte el deixant de partida. A la *figura 75* s'ha realitzat un zoom per mostrar amb més detall el petit vòrtex que es forma en la finestra posterior.

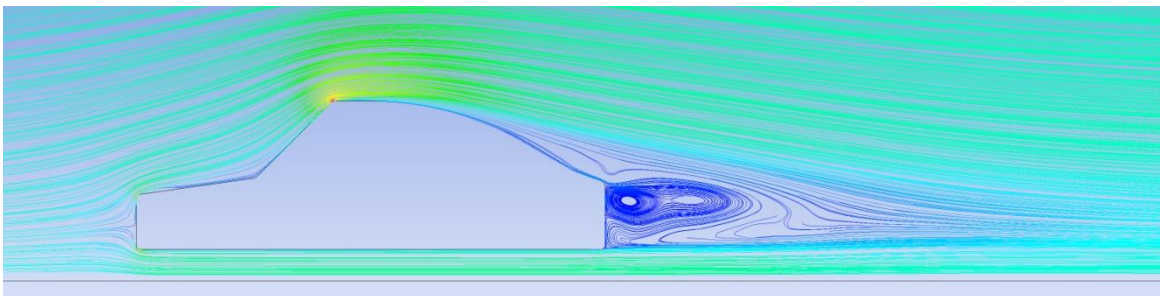


Figura 74. Deixant de la geometria posterior final.

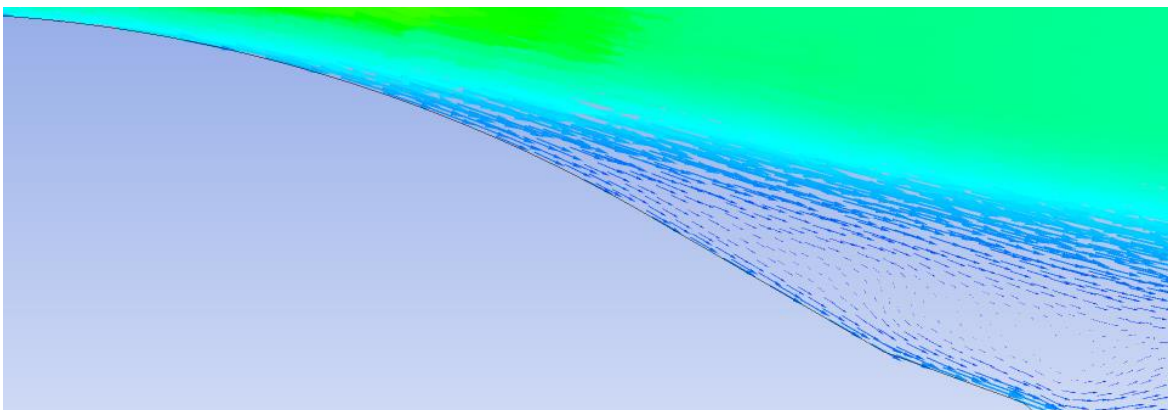


Figura 75. Vectors velocitats en la finestra posterior.

5.3.4. Fons del cotxe

A la hora de realitzar aquestes simulacions, com ja s'ha comentat en l'apartat 5.1, s'ha considerat el fons pla. Aquest fet suposa un cas ideal on l'existència de relleus en el fons del vehicle són inexistents.

Primerament s'ha cercat l'alçada ideal del fons del cotxe respecte el terra. A aquesta alçada se li ha anomenat h . La h mínima possible s'ha considerat de 12 centímetres. Aquest fet es deu a que el vehicle ha de circular pel carrer. Això inclou rampes de pàrquing inclinades, ressals⁹,... Si el vehicle fos massa baix respecte el terra, a la hora de trobar-se amb algun d'aquests elements es fregarien els baixos amb el terra, podent provocar el malmetement d'aquests. Les primeres simulacions realitzades han estat: l'altura mínima, 10 cm superior a l'altura mínima, a 200 cm respecte el terra i una altura 10 cm superior a l'altura del *Golf I*. Si d'aquestes no es pot extreure cap conclusió, s'estudiaran més simulacions.

h	C_D
120	0,6183
130	0,6250
200	0,6041
300	0,6197
310	0,5733

Taula 9. Recopilació dels resultats per h diverses.

Els resultats obtinguts divergeixen molt dels teòrics. Aquest fet es deu a que en aquest treball s'ha menystingut l'efecte de les rodes i en la part inferior d'un vehicle hi juguen un paper molt important. Segons les simulacions és el mateix tenir un vehicle a 120 mil·límetres respecte al terra que a 300. Aquest resultat indica que els valors obtinguts no són correctes. Un exemple on es pot veure que no pot ser el mateix són els tot terrenys. Aquests tenen una

⁹ Col·loquialment coneguts com a bonys o "bache".

distància dels baixos del vehicle respecte el terra superior a un turisme. Els 4x4 també són coneguts per consumir molt més que un vehicle convencional. Aquest alt consum es deu en part a la seva major força de fricció amb l'aire. A més a més, són molt més inestables al tenir el centre de gravetat molt més elevat que altres cotxes. Un altre extrem es pot observar en el món de la competició. Si un es fixa amb aquests, la distància respecte al terra és mínima, lo just i necessari perquè no fregui amb l'asfalt.



Figura 76. McLaren P1. [16]



Figura 77. Vehicle tot terreny. [17]

Per tant, degut a no haver tingut en compte l'efecte de les rodes no es pot obtenir de manera experimental la h òptima. És per aquest motiu que s'ha imposat una alçada del vehicle respecte el terra de 120 mil·límetres. Aquest valor s'ha escollit tenint present els següents aspectes:

El primer es basa amb la fórmula de resistència a l'avanç. Si es recorda la fórmula:

$$D = \frac{1}{2} \rho v^2 A c_D$$

D és la força de resistència a l'avanç, ρ la densitat del fluid, v la velocitat, A l'àrea i c_D el coeficient de *drag*.

Equació 6. Càlcul força resistència a l'avanç.

Com es pot apreciar en l'equació matemàtica, l'àrea és directament proporcional a la força.



Figura 78. Àrees frontals (línia lila) per una forma bàsica menystenint les rodes i l'altre tenint-les en compte.

Com es mostra a la *figura 78*, al no haver tingut en compte les rodes, tot i modificar l'altura del vehicle l'àrea frontal (línia lila) no es veu modificada. En canvi, en el cas d'incloure les rodes, el fet de baixar o pujar el vehicle si que té un impacte amb l'àrea frontal.

Per tant, si es tenen en compte les rodes, donat un cas on el vehicle està a 300 mil·límetres respecte el terra i un altre cas on el mateix vehicle es troba a 120 mil·límetres respecte el terra, les àrees frontals dels següents serien:

$$A_{\text{frontal}_1} = (1,411 + 0,3) \cdot e = 1,711e \quad \text{On } e \text{ és el gruix del vehicle i } 1,411 \text{ l'alçada d'aquest.}$$

$$A_{\text{frontal}_2} = (1,411 + 0,12) \cdot e = 1,531e$$

Si ara es calcula la força de resistència a l'avanç en els dos casos:

$$D_1 = \frac{1}{2} \rho v^2 A_{\text{frontal}_1} c_D \quad D_2 = \frac{1}{2} \rho v^2 A_{\text{frontal}_2} c_D$$

$$D_1 = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot 1,711 \cdot e \cdot c_D \quad D_2 = \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot 1,531 \cdot e \cdot c_D$$

Si es partia del cas 1 i s'ha modificat el vehicle al cas 2 es tindria una reducció del coeficient de resistència a l'avanç del:

$$\Delta_{\text{drag}} = \frac{\frac{1}{2} \rho v^2 \cdot 1,711 \cdot e \cdot c_D - \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot 1,531 \cdot e \cdot c_D}{\frac{1}{2} \rho v^2 \cdot 1,711 \cdot e \cdot c_D}$$

$$\frac{1,711 - 1,531}{1,711} = \mathbf{10,5\%}$$

Això no implica que a la pràctica sigui exactament així, ja que hi ha molts més factors que s'han de tenir en compte. Amb aquests càlculs només es vol fer un exemple qualitatiu mostrant de quina manera podria influir l'àrea frontal en el *drag*.

El segon motiu està relacionat amb les rodes. Les rodes són un element molt turbulent en un vehicle. És per això que es vol reduir al màxim possible la quantitat de fluid que està en contacte amb aquestes. Tal és les turbulències que provoquen, que en el cas dels fórmula 1, els cotxes estan dissenyats de tal manera que reconduïxen el fluid de diverses maneres per

tal de reduir al màxim possible la quantitat de fluid que arriba a les rodes. Estudis realitzats per A. Cogotti¹⁰ mostren com només les rodes poden suposar en vehicles a velocitats lentes un 50% del coeficient de resistència a l'avanç total del vehicle.

Per últim, també s'ha tingut en compte un aspecte de seguretat. Com més alt és el vehicle, més alt es troba el centre de gravetat i més inestable és a les corbes. Aquesta inestabilitat es podria traduir en bolcada si es donessin les condicions idònies. És el que succeïa alguns anys enrere amb els vehicles alts. Per sort l'electrònica ha solucionat part del problema i actualment és molt més difícil que succeeixi aquest fenomen. Ara bé, les lleis de la física hi segueixen sent i serà molt més probable que bolqui un cotxe amb un centre de gravetat alt que un amb aquest més baix.

Un cop escollida la distància òptima entre terra i baixos del cotxe s'ha prosseguit a dissenyar un difusor. El primer pas ha estat inclinar els baixos del vehicle. Aquesta geometria del fons del cotxe té una similitud amb un dispositiu venturi. Al principi el flux es veu accelerat degut al pas estret generant una zona de depressió. Aquesta zona de pressions negatives generarà carga aerodinàmica. A mesura que s'avança en el vehicle, el fluid va disminuint la velocitat per tal de que arribi al deixant a una velocitat tan pròxima com sigui possible a la velocitat mitjana d'aquest. A més a més, el fet de que existeixi al final del difusor un pendent, permet la interacció entre el deixant i la part inferior posterior del cotxe. Això provoca que a la zona posterior hi segueixin existint pressions baixes augmentant també la càrrega aerodinàmica.

¹⁰ Per llegir l'estudi, vegi's pàgina 180 de la referència [14].

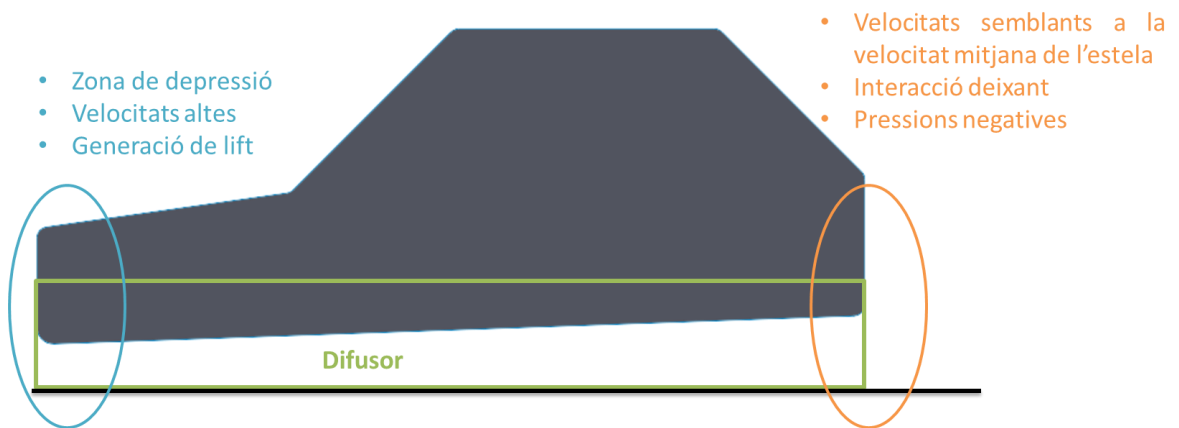


Figura 79. Esquema del funcionament d'un difusor.

Ara bé, cal recordar que en un vehicle convencional un augment de *lift* no és tant important com una reducció del *drag*, ja que en molt rares ocasions es realitzaran corbes a grans velocitats, que és on el *lift* guanya molta importància. Per tant, s'ha dissenyat el difusor buscant el *drag* mínim i no cercant un augment del *lift*.

A l'angle respecte l'horitzontal i els baixos del vehicle se li ha anomenat μ . Aquest ha de ser molt petit, és a dir, ha de realitzar les seves funcions d'una manera controlada i progressiva. D'aquesta manera s'evita una influència negativa del gradient de pressions advers i en conseqüència un possible desprendiment de la capa límit. Per tal d'estudiar l'angle μ òptim s'han realitzat simulacions amb els valors $1^\circ, 2^\circ$ i 3° .

μ [°]	C_D
1	0,5834
2	0,5723
3	0,5916

Taula 10. Recopilació dels resultats per μ diverses.

Com es pot observar amb aquestes simulacions ja es tenen suficients. El mínim coeficient de resistència a l'avanç es produeix per $\mu=2^\circ$. A més a més, si es comparen les pressions en la part inferior del vehicle respecte la geometria de partida, es pot veure com amb aquesta petita inclinació s'ha aconseguit augmentar la pressió negativa i en conseqüència, la càrrega aerodinàmica.

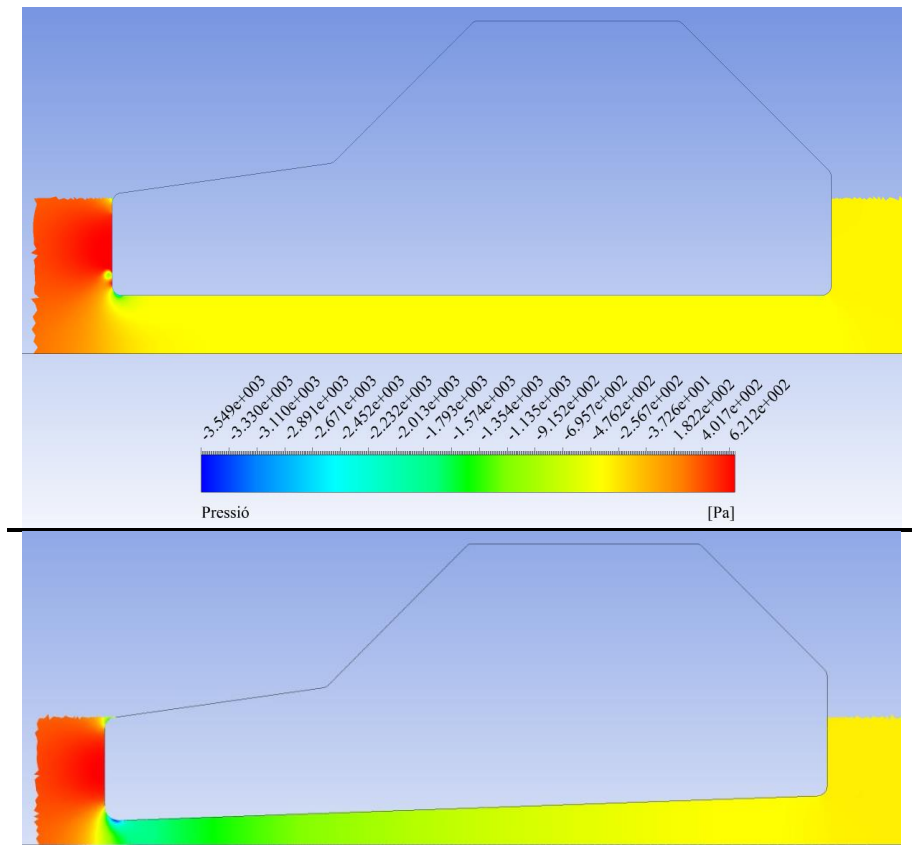


Figura 80. Comparació de la distribució de pressions entre el *Golf I* (superior) i la forma bàsica amb difusor (inferior). L'escala de valors de les pressions és la mateixa en els dos casos, per tant, es poden extreure conclusions comparant colors.

Ara bé, com ja s'ha explicat, el *lift* també influeix a la hora d'accelerar i frenar. Aquestes dues característiques ja són més importants, ja que a vegades poden salvar al conductor d'algun ensurt. Per tal de potenciar aquest valor, s'ha intentat augmentar encara més la zona d'incidència entre part posterior i deixant. Per potenciar aquest efecte, s'ha augmentat més l'altura de la part posterior del vehicle.



Figura 81. Part posterior sense potenciar efecte deixant.



Figura 82. Part posterior potenciant efecte deixant.

En cap moment s'ha perdut l'objectiu del treball de vista, és a dir, del *drag* mínim, per tant aquesta modificació es durà a terme sempre i quan no es produeixi un augment del *drag*. Els paràmetres per realitzar aquets estudi han estat els següents:

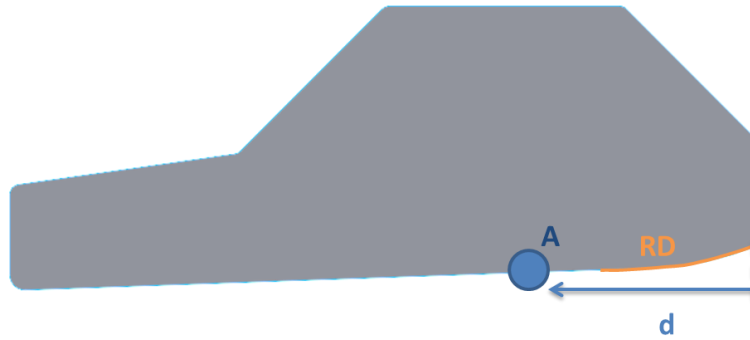


Figura 83. Paràmetre característic RD i punt A.

Primerament s'ha calculat el pendent màxim de la corba RD que disminuïa al màxim possible el *drag*. Posteriorment s'ha desplaçat el punt A, el qual indica quan es produeix la transició de recte a corba, per tal d'estudiar la correlació d'aquest amb el *drag* i *lift*.

RD [°]	c _D
15	0,5827
20	0,5711
25	0,5827

Taula 11. Recopilació dels resultats per RD diverses.

d [mm]	c _D	c _L
300	0,5825	-
500	0,5711	-1,4884
700	0,5752	-1,4960
900	0,5800	-

Taula 12. Recopilació dels resultats per d diverses.

Com es pot observar la distància d òptima es troba compresa entre 500-700 mm. Ara bé, la diferència entre els valors de 300 i 900 és mínima. Es produeix un augment aproximadament del 2% en el coeficient de resistència a l'avanç respecte el coeficient de *drag* obtingut per $d = 500$ mil·límetres.

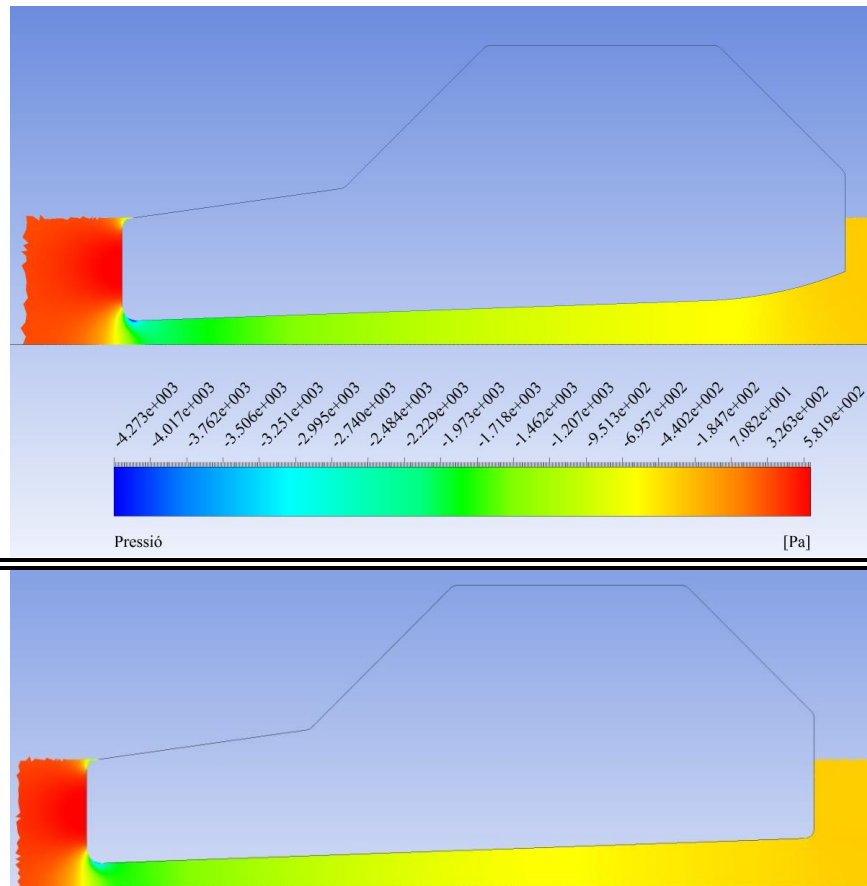


Figura 84. Comparació de la distribució de pressions entre un difusor amb la part posterior elevada I (superior) i un difusor sense elevar-la (inferior). L'escala de valors de les pressions és la mateixa en els dos casos, per tant, es poden extreure conclusions comparant colors.

A la *figura 80*, es pot comprovar com s'ha produït una zona de depressió més gran que abans, degut a la major influència del deixant.

5.3.4.1. Fons del cotxe final

Resumint, les dimensions finals de la part inferior del cotxe són les següents:

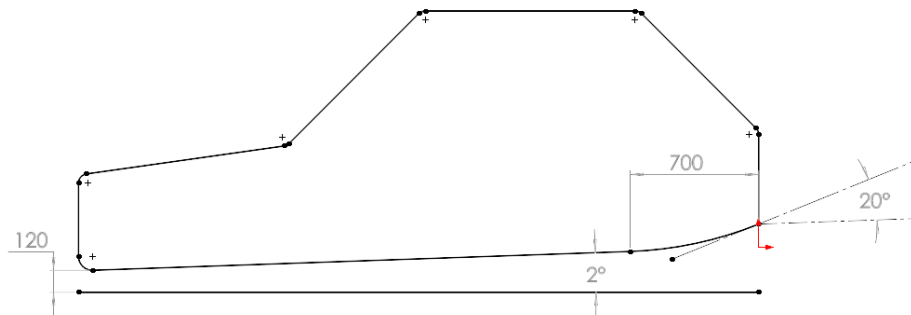


Figura 85. Valors dels paràmetres de la forma bàsica òptima

En aquest apartat 5.3.4., s'ha buscat primerament reduir tant com fos possible el *drag*. Un cop ja es tenia el *drag* mínim, sense influir en aquest negativament, s'ha intentat augmentar la càrrega aerodinàmica. Això s'ha dut a terme introduint un difusor en el vehicle. La funció d'aquest és semblant al d'un dispositiu venturi. Al principi accelera el fluid per generar una zona de pressions baixes i a poc a poc va frenant el fluid per arribar al final del vehicle a unes condicions semblants als del deixant. A més a més, per intentar millorar encara una mica més la càrrega aerodinàmica, s'ha elevat la part posterior, per augmentar la incidència del deixant i millorar el *lift*. Això s'ha realitzat sempre millorant lleugerament el coeficient de resistència a l'avanç o almenys sense empitjorant-lo.

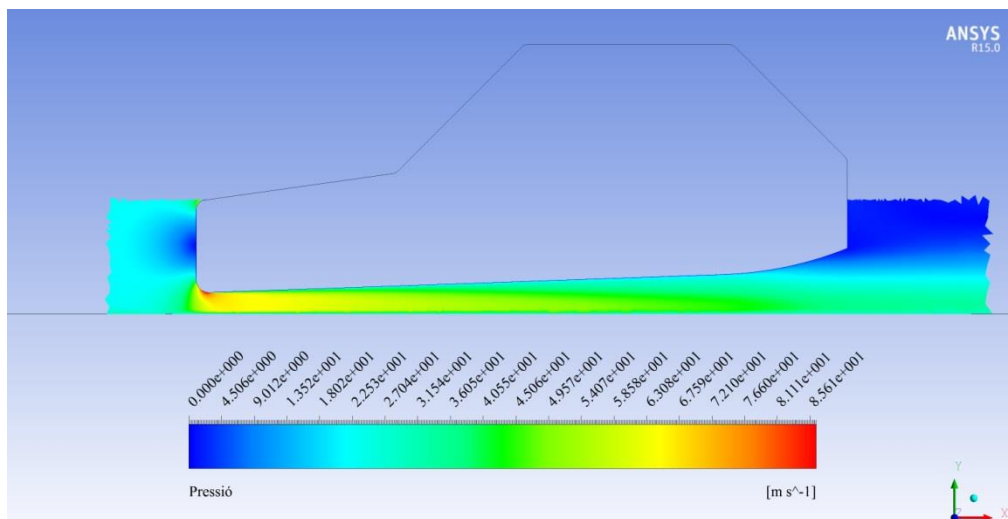


Figura 86. Distribució velocitats en el difusor final.

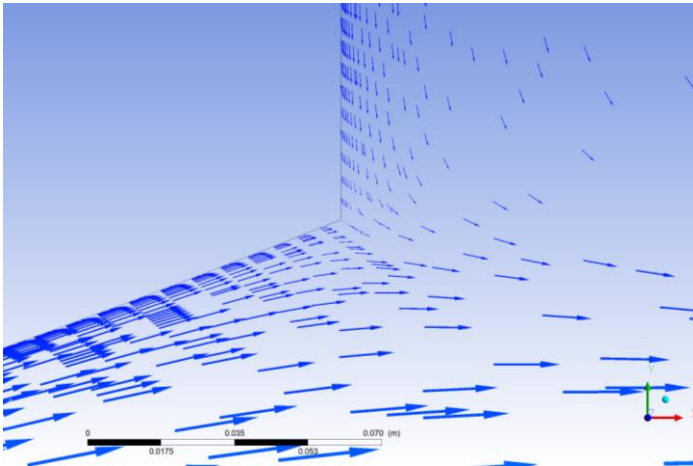


Figura 87. Vectors velocitats en l'últim punt del difusor.

Com es pot observar a la *figura 87*, en la part posterior no es produeix cap despreniment gràcies a que el màxim pendent és de 20° . Aquest fet ajuda a disminuir el deixant en la part inferior, tal com es mostra a la *figura 88*.

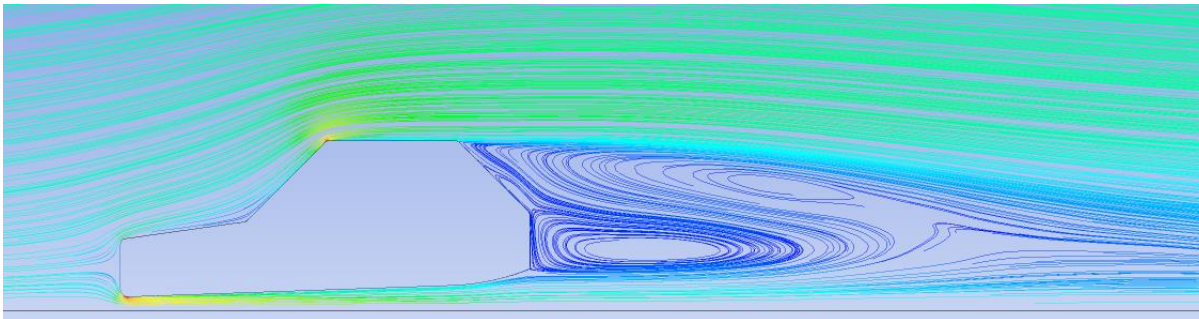


Figura 88. Deixant.

El coeficient de resistència a l'avanç d'aquesta geometria té un valor de **0,5752**. En aquest apartat si que és important també comentar el coeficient de sustentació. El valor d'aquest és de **-1,4960**. Aquests valors suposen un increment del -7,18% i 763% respecte l'inicial dels coeficients de *drag* i *lift* respectivament. Com es pot observar la incidència del difusor en el *lift* és molt més important que en el *drag*.

5.3.5. Parabrises

Per últim s'ha estudiat l'angle del parabrises que minimitzi el *drag*. El problema ha estat que el fet de modificar l'angle del parabrises influïa molt en la geometria del sostre. És per aquest motiu que aquest últim element s'ha estudiat introduint ja tots els canvis aerodinàmics en la forma bàsica. A l'angle entre l'horitzontal i el parabrises se l'ha anomenat ϑ . Per tant la forma bàsica estudiada ha estat la següent:

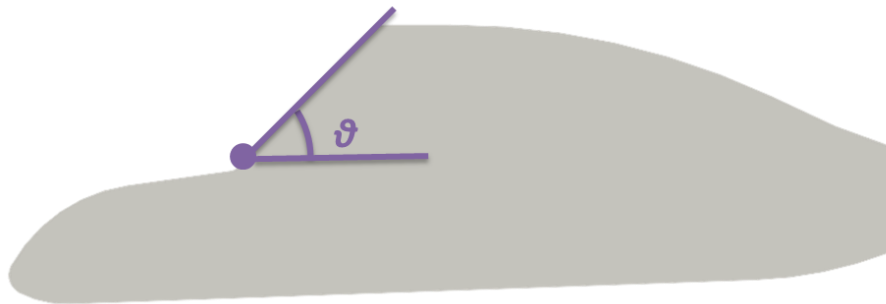


Figura 89. Paràmetre característic ϑ .

Com es pot observar a la imatge, la part posterior divergeix una mica respecte la de l'apartat 5.5.5.3. Aquest fet es deu a que en el moment de reduir la distància del vehicle respecte el terra, també s'ha disminuït la distància z (com a recordatori, correspon a la distància del terra al punt on desprèn la capa límit en el graó, es a dir, l'últim punt de la part posterior). Per poder complir aquesta distància z , s'ha hagut de disminuir la part recte de la part posterior i augmentar la longitud de la circumferència. A part d'aquest canvi, tots els altres paràmetres s'han mantingut en el valor òptim.



Figura 90. Comparació entre part posterior final (grisa) i la ideal calculada al apartat 5.3.3. (vermella).

Els valors de ϑ estudiats han estat 35, 40, 45 i 50 graus. A priori com més s'augmenta ϑ pitjor és el *drag* ja que més similitud té a una placa plana vertical. És per aquest motiu que només s'ha estudiat un valor per corroborar aquesta afirmació. Estudiar valors inferior a 30° no té sentit realitzar-los, degut a un motiu de visibilitat del conductor. A partir d'aquesta inclinació hi ha estudis¹¹ que indiquen que el conductor no és capaç de veure a través del vidre. En el cas d'aquest treball, no s'han estudiat valors inferiors a 35° davant la impossibilitat que presenta la geometria.



Figura 91. Forma bàsica per $\vartheta = 35^\circ$.



Figura 92. Forma bàsica per $\vartheta = 40^\circ$.



Figura 93. Forma bàsica per $\vartheta = 45^\circ$.



Figura 94. Forma bàsica per $\vartheta = 50^\circ$.

ϑ	c_D
35	0,2383
40	0,2842
45	0,3161
50	0,3025

Taula 13. Recopilació dels resultats per ϑ diverses.

¹¹ Per més informació, vegi's secció 12.5.4.1. de la referencia [14].

Com era d'esperar, la ϑ òptima ha estat la de 35° . A part, es pot observar com a mesura que augmenta ϑ cada vegada hi ha menys diferència entre el coeficient de resistència a l'avanç, fins al punt que entre 45° i 50° la diferència és mínima. Crida l'atenció que el de 50° sigui lleugerament inferior a 45° . Aquest fet es pot deure primerament a un error de la simulació (recordar que la diferència és d'aproximadament 0,01 i justament aquest valor és inferior a l'error acceptable) o degut a la corba de la part superior, la qual es més gran que per $\vartheta = 45^\circ$.

En definitiva s'ha optat per un valor de ϑ de 35° . Gràcies a aquesta modificació, s'ha aconseguit disminuir les pressions al parabrises, les quals suposen una força de resistència a l'avanç important.

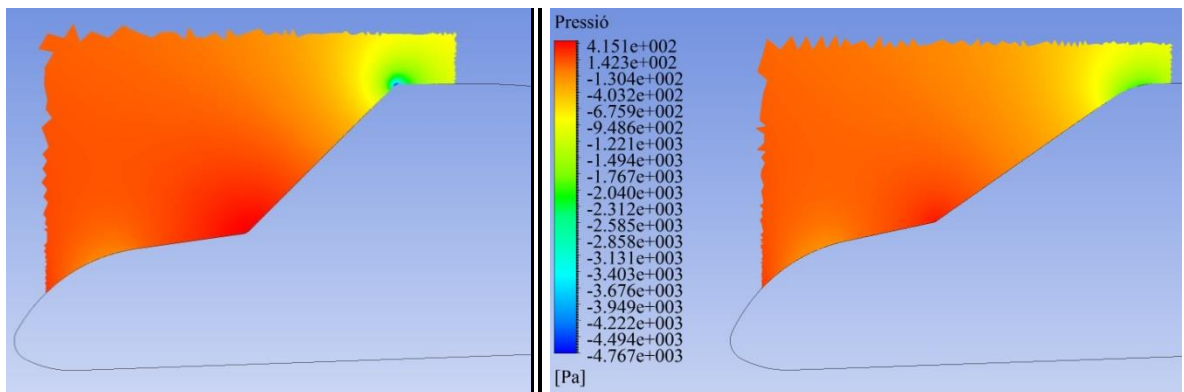


Figura 95. Comparació distribució de pressions per $\vartheta = 45^\circ$ (esquerra) i 35° (dreta). L'escala de valors de les pressions és la mateixa en els dos casos, per tant, es poden extreure conclusions comparant colors.

El coeficient de *drag* aconseguit en aquesta geometria és de **0,2383**. Aquest fet suposa una millora del 24,61% respecte un parabrises amb una inclinació del 45° . A més a més, s'ha reduït les pressions negatives en la part superior del vehicle. Aquest fet ajuda a millorar la càrrega aerodinàmica, ja que aquestes pressions produïen una sustentació positiva, justament el contrari al que es busca en un turisme.

5.4. Forma bàsica modificada

Breument s'ha resumit en aquest apartat totes les modificacions finals realitzades en el vehicle i l'impacte que tenen en aquest, comparant el resultat final amb la geometria inicial del *Golf I*.

Primer de tot, comparar la forma final amb la de partida. Com es pot observar en la *figura 96*, s'han eliminat totes les zones amb formes de tendència quadràtica per formes arrodonides. A més a més, s'han suavitzats els canvis geomètrics. Ara bé, s'ha hagut d'allargar el vehicle i també s'ha perdut espai interior pels viatgers.

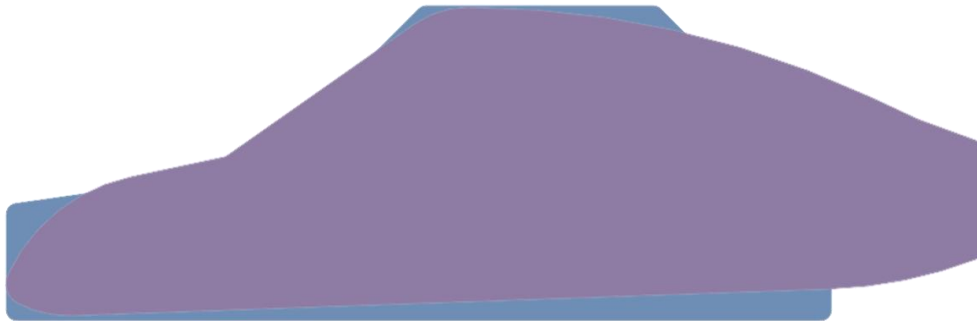


Figura 96. Comparació forma bàsica inicial amb final.

Un dels canvis més significatius es troba en la part posterior. Amb aquesta nova geometria s'ha aconseguit reduir de forma significativa el deixant demorant de manera considerable el despreniment de la capa límit.

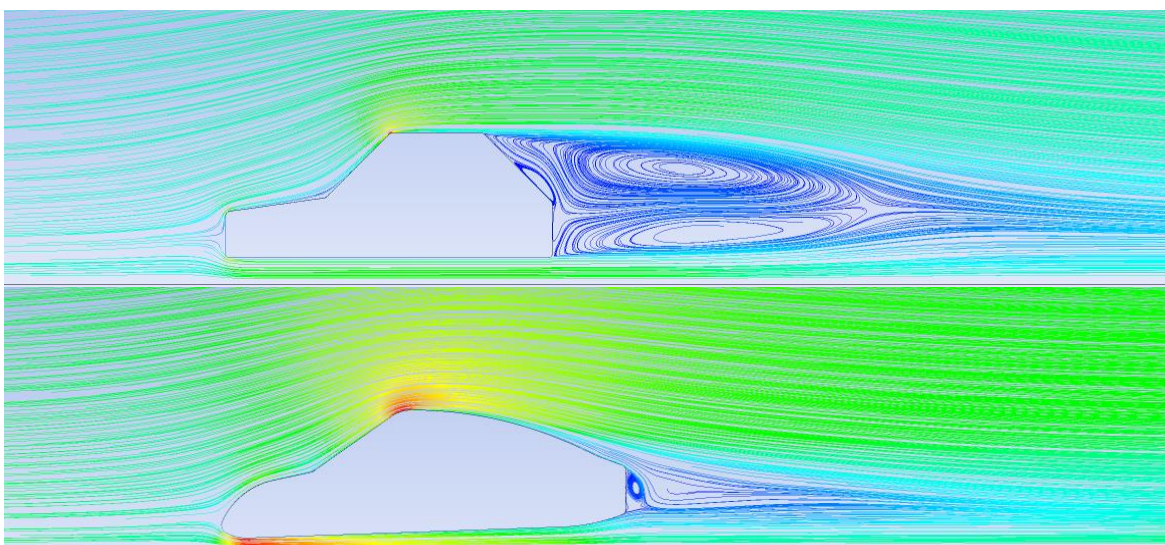


Figura 97. Comparació deixant del *Golf I* amb el *Golf I* modificat.

Pel que fa a la part davantera i parabrises, també han estat modificats d'una manera considerable. Primerament s'ha cercat reduir al màxim possible les pressions en els punts d'estancament, els quals influeixen negativament en el coeficient de resistència a l'avanç. L'arrodoniment del morro també ha eliminat el vòrtex format en aquella zona. Pel que fa al punt d'unió entre el capó i el parabrises, a vegades és conflictiu degut a l'aparició d'un vòrtex. En la *figura 100* es pot observar aquest punt i comprovar que en aquets cas no es genera cap vòrtex.

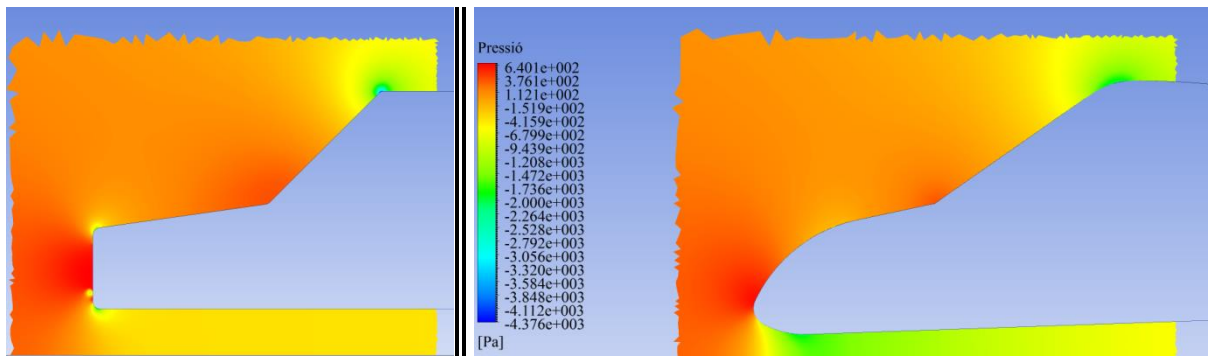


Figura 98. Comparació de distribució de pressions entre el Golf I amb el Golf I modificat.

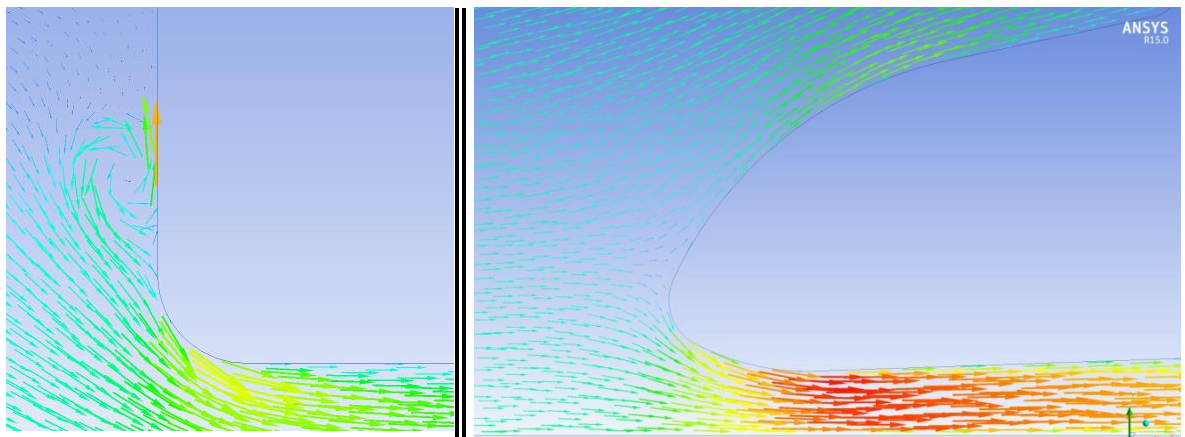


Figura 99. Eliminació del vòrtex que es generava al Golf I gràcies a la forma arrodonida.

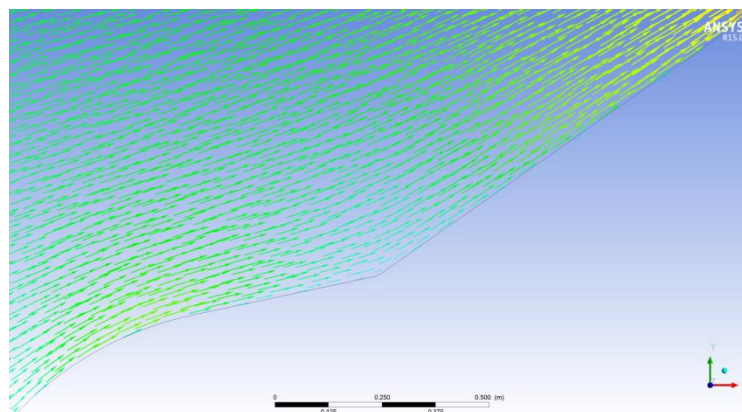


Figura 100. Corroboració de que no es forma vòrtex en el parabrises.

Per acabar, s'ha treballat en la part inferior. En aquesta zona s'ha buscat reduir el màxim possible el *drag*. A més a més, s'han realitzat algunes modificacions addicionals per tal de millorar la càrrega aerodinàmica sense repercutir negativament en el coeficient de resistència a l'avanç. Aquesta millora es pot apreciar en la distribució de pressions, on amb la nova geometria són més negatives i per tant, generen més *lift*.

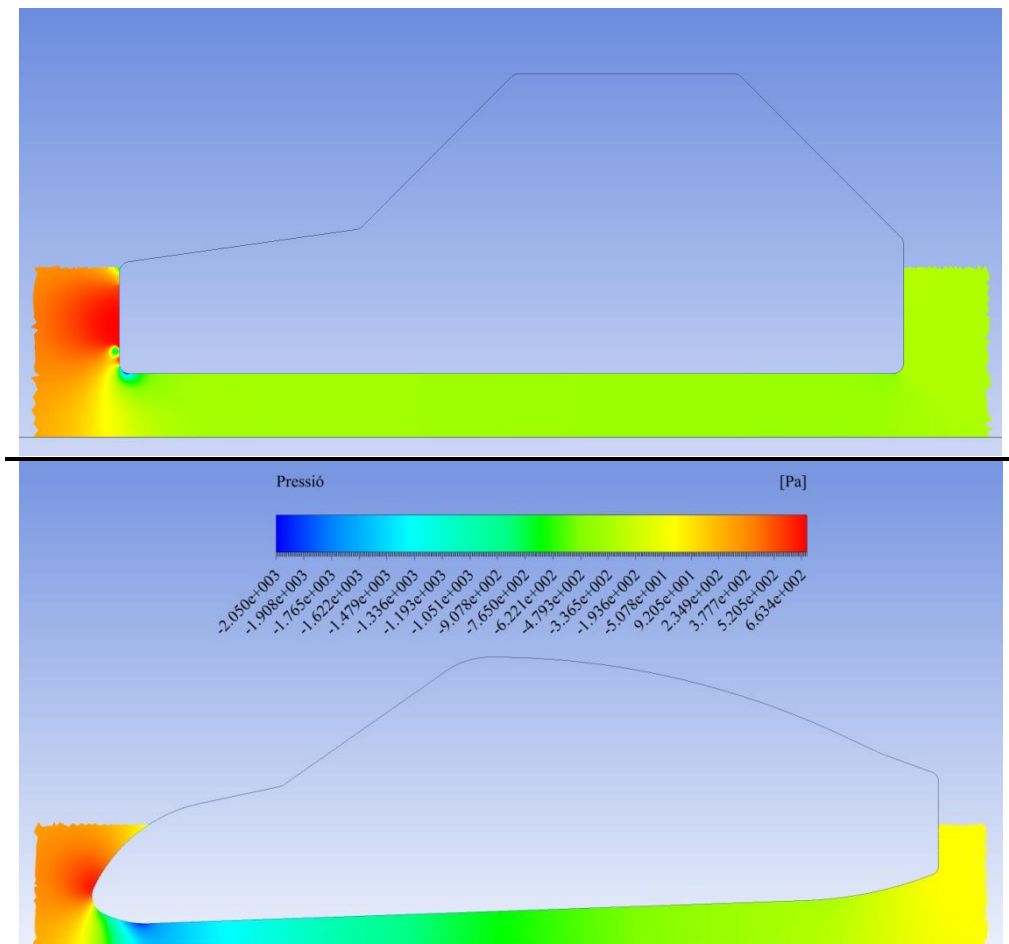


Figura 101. Comparació distribució de pressions entre el *Golf I* amb el *Golf I* modificat. L'escala de valors de les pressions és la mateixa en els dos casos, per tant, es poden extreure conclusions comparant colors.

Les millores de prestacions gràcies a les modificacions han estat les següents:

	<i>Golf I</i>	<i>Golf I modificat</i>	Creixement
c_D	0,6197	0,2383	-61,55%
c_L	-0,1733	-0,6781	291,29%

Taula 14. Comparació prestacions entre el *Golf I* original i amb les modificacions realitzades.

Totes les modificacions del projecte s'han realitzat sempre pensant en la reducció màxima del coeficient de resistència a l'avanç. El resultat final ha estat satisfactori ja que s'ha passat de tenir un vehicle amb una força de resistència a l'avanç molt gran a un que s'aproxima molt als vehicles amb menys *drag* del mercat actual.

Un dels valors que crida molt l'atenció és el creixement d'un gairebé 300% del *lift*. Aquest valor sembla molt alt, ara bé, també cal tenir present que es partia d'un valor molt baix. A efectes pràctics, un vehicle a 80 km/h, si abans generava 7,1N/m de càrrega aerodinàmica, actualment aquest valor s'ha incrementat a 33,53N/m. Tot i haver augmentat lleugerament la càrrega aerodinàmica, el seu valor segueix sent baix. Aquest fet és degut al que ja es comentava al principi del treball: per tal d'obtenir una resistència a l'avanç baixa s'ha de sacrificar càrrega aerodinàmica. No es pot aspirar a valors semblants als de un fórmula 1, ja que aquests tot i produir 4 vegades més càrrega aerodinàmica, també ofereixen el triple de resistència a l'avanç.

Cal tenir present que les simulacions s'han realitzat sense tenir en compte un element molt turbulent del vehicle i el qual ofereix una gran resistència a l'avanç, les rodes. Per tant, la resistència a l'avanç es veurà augmentada al incloure aquest element. A més a més, tots els resultats obtinguts han estat mitjançant simulacions. Per tal de corroborar que les conclusions extretes siguin correctes, caldria realitzar una maqueta i assajar-la a un túnel del vent. Un cop es tinguessin resultats tant experimentals (túnel del vent) com teòrics (CFD) es podrien extreure conclusions de molta més qualitat que només comptant amb resultats teòrics.

6. Impacte Ambiental

El vehicle a part de ser un element clau en el funcionament de la societat actual, també és una causa important de contaminació ambiental. Tot i que actualment els turismes contaminen 10 vegades menys que els de fa 20 anys, segueixen tenint un gran impacte negatiu sobre el medi ambient. El fet de funcionar amb motors de combustió interna provoca que emetin diversos gasos i partícules contaminants en el medi ambient. A tall d'exemple, un 18% de la producció mundial de diòxid de carboni (CO₂) prové dels turismes. A conseqüència de l'escalfament global del planeta, cada vegada s'està treballant més en reduir la contaminació produïda pels vehicles. D'entre les millores més conegudes que s'han anat introduint en els vehicles per tal de reduir la contaminació que produeixen, es poden citar per exemple:

- la millora del rendiment dels motors de combustió interna
- recerca de nous combustibles per tal d'evitar els derivats del petroli, com ara l'hidrogen o l'electricitat
- la tecnologia "stop and start"¹².

Cal destacar que n'hi ha una altra que no és tant coneguda. De la potència generada pel motor d'un turisme, una part va destinada a vèncer la resistència de l'aire. Per tant, reduint la resistència a l'aire que ha de vèncer un vehicle, es pot reduir el consum de combustible i en conseqüència les emissions de gasos i partícules contaminants.

L'impacte que té la reducció del *drag* en un vehicle respecte el consum d'aquest es pot calcular amb la següent equació:

$$R_c = 0.307 \cdot \left(\frac{\%C_D \cdot A}{100} \right) \cdot \frac{1}{m_c} = X \text{ [gals/mi]}$$

Equació 7. Càlcul de l'estalvi en combustible gràcies a la reducció del *drag*. [14]

¹²Consisteix en un sistema que atura el motor quan el vehicle ha d'estar estacionat, com podria ser en un semàfor. El problema d'aquest sistema és que el gran nombre de parades i arrancades del motor perjudica al sistema d'arrancar el cotxe. [18]

En aquesta equació, R_c correspon a la reducció de consum en combustible, el terme entre parèntesis a la reducció en tant per ú del producte del coeficient de resistència a l'avanç (c_D) i l'àrea frontal (A) i m_c les milles que es poden recórrer amb un galó. En aquest treball, el producte inicial $\%c_D \cdot A$ era de $0,8744e$ i s'ha aconseguit reduir a $0,3362e$, on e és el gruix del vehicle. El terme entre parèntesi a l'Equació 7 pren ara el valor $0,6155$, $m_c = 34$ [mpg]¹³ i aplicant aquest equació es pot calcular que hi ha hagut un estalvi de 1,3 litres de combustible per cada 100 km.

$$R_c = 0.307 \cdot (0,6155) \cdot \frac{1}{34} = 5,5576 \cdot 10^{-3} \left[\frac{gals}{mi} \right] = 1,3060 \left[\frac{L}{100km} \right]$$

Una altra manera d'estudiar la reducció en consum és considerar la reducció aparent en la massa del cotxe en virtut de les propietats aerodinàmiques més favorables. La següent equació permet calcular la reducció en la massa aparent del vehicle, en virtut de la reducció del coeficient de resistència a l'avanç, que reflecteix la reducció en el consum.

$$R_M = 0.624 \cdot \left(\frac{\%c_D \cdot A}{100} \right) \cdot M$$

Equació 8. Càlcul de la reducció aparent de la massa d'un vehicle. [14]

En aquesta equació, R_M correspon a la reducció de la massa aparent del vehicle, el terme entre parèntesis a la reducció en tant per ú de $c_D \cdot A$ (definits a l'Equació 7) i M a la massa del vehicle. En el cas del *Golf I*, les modificacions suposarien una reducció aparent de la massa de 288 Kg, tal i com s'indica a continuació.

$$R_M = 0.624 \cdot (0,6155) \cdot 750 = 288 \text{ kg}$$

Per tant, el motor tot i que la massa del vehicle sigui de 750 kg, només hauria de generar potència pel mateix vehicle però amb una massa de 462 kg.

D'aquest vehicle se'n vengueren 6,72 milions d'unitats¹⁴. En un cas hipotètic de que totes les unitats venudes estiguessin circulant un mateix any amb una mitjana de recorregut de

¹³ Valor extret de "Automobile-catalog". [13]

¹⁴ Valor extret de "CarScoops". [19]

15.000 quilòmetres per vehicle, gràcies a la reducció del coeficient de resistència a l'avanç s'emetrien 3 milions de tones de CO₂ de menys.

$$6,72 \cdot 10^6 \text{ cotxes} \cdot \frac{15000 \text{ km/any}}{1 \text{ cotxe}} \cdot \frac{1,306 \text{ L estalviats}}{100 \text{ km}} \cdot \frac{2,32 \text{ kg CO}_2}{1 \text{ L gasolina}} = 3,054 \cdot 10^6 \text{ tones CO}_2/\text{any}$$

Aquest valor pot semblar molt gran, ara bé si es compara amb les 40.000 milions de tones de diòxid de carboni emeses a l'any 2013¹⁵, representaria una reducció del 0,0075% de la contaminació global degut a les millores en 6,72 milions d'unitats d'un model (*Golf I*).

Cal tenir present que aquesta millora s'ha dut a terme amb un vehicle de fa 40 anys, l'emissió de gasos i partícules dels quals encara no estaven restringits per normativa. A tall de curiositat, les primeres regulacions van aparèixer l'any 1980 i el *Golf I* va sortir al mercat l'any 1974. A més a més, en ser un vehicle tant antic té un coeficient de *drag* molt elevat i és molt més fàcil disminuir les forces de resistència a l'avanç que en un vehicle actual, on els coeficients de c_D estan al voltant de 0,3 (el coeficient de c_D del *Golf I* en el seu disseny dels anys setanta és de 0,61). És per aquest motiu que no es pot extrapolar aquesta reducció de consum de combustible als més del mil milions de vehicles que existeixen actualment, ja que en molts casos seria difícil reduir el consum en més d'un litre a base de disminuir només disminuint el coeficient de resistència a l'avanç.

No obstant, aquestes dades no impliquen que treballar en la millora aerodinàmica dels vehicles no hagi estat ni sigui encara important. En un món on no s'hagués treballat l'aerodinàmica dels vehicles i els coeficients de resistència a l'avanç fossin els de fa quaranta anys, s'estarien generant 454 milions de tones de diòxid de carboni més a l'any, és a dir l'any 2013 s'hagués produït un 1,14% més de diòxid de carboni¹⁶. Per tant, és un aspecte important a tenir en compte, el problema del qual és que ja ha estat molt explotat i actualment és ja molt difícil reduir encara més el consum mitjançant millores en l'aerodinàmica dels vehicles degut als baixos valors de coeficient de resistència a l'avanç que tenen les vehicles actuals.

¹⁵ Valor extret de "Europa Press". [20]

¹⁶ Càlcul realitzat considerant que actualment hi ha mil milions de vehicles i que cada un d'aquests recorre 15.000 quilòmetres l'any.

7. Planificació temporal i costos

7.1. Planificació temporal del treball

Per tal d'establir els objectius del treball, els recursos i el temps necessari per dur a terme cada una de les tasques és necessari una bona planificació. La planificació d'aquest treball s'ha representat en el següent diagrama de Gantt.

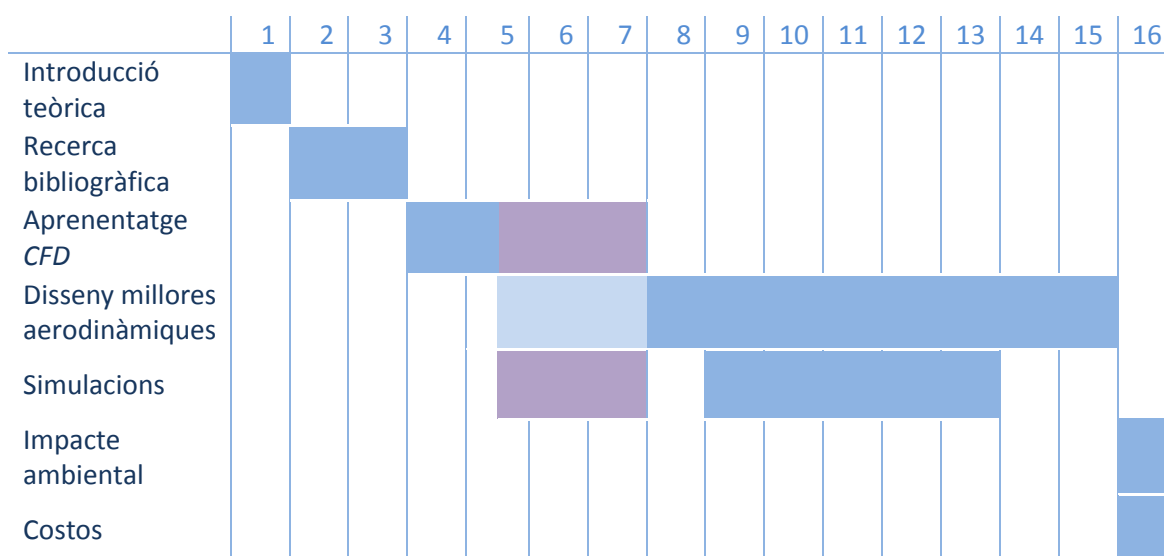


Diagrama 1. Diagrama de Gantt mostrant la planificació inicial i la final. En blau fort s'indiquen els aspectes mantinguts respecte als plans inicials, en blau cel el que s'havia previst i en lila els canvis produïts.

Aquest diagrama de Gantt s'ha dissenyat considerant que es realitza el projecte en 16 setmanes, començant el projecte el dia 15/09/2014 i acabant-lo el 05/01/2015. Es va preveure destinar 19 hores al treball cada setmana. D'aquesta manera es va predir una dedicació del treball de 300 hores. En les primeres tres setmanes es va dur a terme la recerca bibliogràfica i la introducció teòrica del treball. Les següents dues setmanes estaven destinades *a priori* a l'aprenentatge del software *Fluent*. Ara bé, la identificació d'un mallat de la forma bàsica del vehicle que no desestabilitzés la solució va resultar ser més difícil del que es va preveure. És per aquest motiu que les tres setmanes inicialment previstes per desenvolupar millores en el Golf I, s'hagueren de destinar a la cerca d'un mallat que convergís i fos estable. Aquest fet està indicat en el diagrama de Gantt i correspon al blau més suau, el qual indica que s'havia previst dedicar-les a identificar millores aerodinàmiques, però al final es destinaren a trobar un mallat estable (color lila). Un cop es tingué el mallat

adequat, les següents setmanes es dedicaren al disseny de millores aerodinàmiques i a la simulació d'aquestes. Les dues últimes setmanes destinades al disseny de millores aerodinàmiques s'utilitzaren per extreure conclusions de tots els resultats obtinguts i a la seva redacció. Per acabar, s'invertí l'última setmana en el càlcul de costos i l'impacte ambiental del treball.

El fet d'allargar les setmanes dedicades a l'aprenentatge del software ha tingut un impacte negatiu en els costos del treball, ja que ha suposat un augment d'hores dedicades a aquest aspecte i un augment considerable del nombre de simulacions.

7.2. Costos del treball

Els costos d'aquest treball provenen de les hores de treball d'un enginyer en formació, del consum elèctric degut a les simulacions i, en cas de no disposar d'un software CFD o ordinador, a la compra d'aquests.

En primer lloc, com s'ha esmentat, es consideren les hores de treball invertides per un enginyer. Aquest valor divergeix molt segons la titulació, l'àmbit de treball i l'empresa en la qual treballa. S'ha considerat que es tracta d'un estudiant d'enginyeria, el qual encara es troba en període de formació. En termes generals, el seu sou ronda els 10€/h nets, per tant pel treball suposaria un cost de 12€/h, en tenir en compte l'IRPF.

En segon lloc s'haurien de considerar les despeses necessàries per obtenir l'equipament tècnic necessari. En aquest cas en concret es tractaria d'un ordinador capaç de realitzar simulacions, disposar del software *Fluent* i un programa CAD. En cas de ja disposar d'aquests medis de treball el cost del projecte es veuria reduït en 2000 €, és a dir en un 33%.

Per últim s'ha volgut estudiar l'impacte d'una simulació en el pressupost. Per a fer-ho, a la *Taula 15* s'ha considerat el consum energètic d'un ordinador funcionant durant mitja hora. Els costos allà calculats han tingut en compte el consum mitjà d'un ordinador en 180 kW/mes, el temps mitjà necessari per a realitzar una simulació en 30 min i el preu del kW en 0,14 € més el 21% IVA (tarifa del mes de desembre de l'any 2014). A més a més, cal tenir en compte que cada simulació requereix de mitjana 30 minuts per a dur-se a terme i això reverteix en 6 euros de costos associats a personal, atès que la presència de l'enginyer és

necessària durant la simulació (900 € de les despeses de personal corresponen al temps dedicat a les simulacions, 150 en total). En conseqüència les simulació tenen un impacte important en el pressupost (15%). Les hores de l'enginyer dedicades a simulacions han estat incloses en les 338 hores treballades.

El fet de que s'hagin requerit 338 hores i no 300 es deu al contratemps a la hora de trobar un mallat que després no donés problemes en la convergència de la solució, tal i com s'ha comentat en l'apartat 7.1.

Quantitat	Concepte	Preu unitari	Total
338	Enginyer en formació	12 €/hora	4056€
-	Informàtica	-	2000€
150	Simulacions	0,02 €	3€
			6059€

Taula 15. Costos del treball.

El cost final del projecte ha estat de 6059 €. Aquest valor és raonable per un primer estudi. Tenint en compte que Volkswagen és una de les empreses que més inverteix en I+D (investigació i desenvolupament), el pressupost d'aquest primer estudi seria insignificant, ja que la marca alemanya l'any 2012 va invertir 9.515 milions d'euros¹⁷ només en I+D.

Cal destacar que és no és possible extrapolar el cost dels estudis fets en aquest treball a un cas on s'hagués estudiat al complet l'aerodinàmica del vehicle. En aquest cas s'haguessin realitzat també estudis del vehicle en tres dimensions i simulacions per tal de comparar els resultats obtinguts a partir d'un mètode CFD i del túnel del vent. El cost d'aquests estudis no és proporcional al del treball, ja que per exemple, el fet de realitzar simulacions en túnels del vent és molt car, fins al punt de suposar un impacte en el pressupost de milions d'euros. Així doncs, no és possible extrapolar quin impacte econòmic tindria un estudi complet per a un vehicle determinat.

¹⁷ Valor extret de "EsMateria". [21]

Conclusions

S'han analitzat diverses modificacions aerodinàmiques a les diferents parts d'un cotxe (part davantera, posterior, inferior o al parabrises) per tal de comprovar les contribucions relatives de les diferents parts del cotxe al coeficient de resistència a l'avanç. Mentre que algunes millores en el disseny han portat a una reducció considerable del *drag*, modificacions en altres parts dels vehicle han tingut un efecte menor.

Part	Reducció del <i>drag</i> [%]
Posterior	47,15
Para-brises	24,61
Inferior	7,18
Davantera	7,00

Taula 16. Influència de cadascuna de les parts en el *drag*.

És per aquest motiu que a l'hora d'introduir modificacions en el vehicle que millorin la seva aerodinàmica, és important prioritzar aquestes zones. Per tant, primerament caldrà fixar-se en la part posterior i el para-brises d'un vehicle, ja que la seva repercussió en el *drag* és la més gran. A continuació s'hauria d'estudiar els baixos del vehicle. Cal recordar que aquesta zona permet a més a més augmentar la càrrega aerodinàmica sense repercutir negativament en el *drag*. Per últim cal centrar-se en la part davantera.

Un altre fet que s'ha pogut observar durant el treball és com l'ús de canvis geomètrics progressius, és a dir mitjançant elements circulars, beneficia de forma considerable el comportament del fluid reduint gradients de pressió i evitant desprendiments de capa límits prematurs.

La forma de la part davantera i la situació del punt d'estancament influeixen en el *drag*. En arrodonir la part davantera, s'aconsegueix reduir les pressions en el punt d'estancament i en conseqüència el *drag* es veu també disminuït. A més a més, si el punt d'estancament es col·loca en una posició determinada ($Z_s = 155$ mm, vegi's pàg. 47 del treball per a la definició d'aquest paràmetre) el *drag* encara es veu més millorat.

Com ja s'ha esmentat, la part posterior té un impacte molt important en el coeficient de resistència a l'avanç. La geometria òptima ha estat aquella que inclou un graó. Gràcies al graó, el flux no es desprèn fins a l'últim punt del vehicle i per tant s'aconsegueix retardar al màxim possible el despreniment de la capa límit. Aquest fenomen redueix el deixant de forma considerable, provocant una millora important en el *coeficient de resistència a l'avanç*.

Tal i com s'ha esmentat, la zona inferior del vehicle té dues funcions. La primera és la reducció del *drag* a base de disminuir l'alçada del vehicle respecte el terra, disminuint l'àrea frontal i, conseqüentment, la força de resistència a l'avanç. Per altra banda, és possible augmentar la càrrega aerodinàmica mitjançant un difusor, sense que això repercuteixi negativament en el *drag*.

Per últim, cal esmentar que el parabrises també juga un paper fonamental. Si es redueix la inclinació d'aquest respecte la horitzontal, s'aconsegueix reduir les pressions en aquella zona, disminuint el gradient de pressions. Aquests dos fets tenen un impacte molt favorable en la millora del *drag*.

Per tal de demostrar aquests resultats, caldria realitzar alguns estudis experimentals, és a dir, mitjançant el túnel del vent. D'aquesta manera es disposaria de resultats obtinguts amb dues aproximacions diferents: per CFD i experimentalment. Les conclusions que es poden obtenir mitjançant aquestes dues aproximacions són, en alguns casos, divergents i seria per tant convenient disposar de resultats de les dues fonts per poder establir de forma definitiva quines conclusions són correctes i quines no.

La importància de la reducció del *drag* s'ha pogut comprovar en l'apartat d'impacte ambiental. És veritat que en el món actual no se li dóna valor a aquest fet atès que tots els vehicles han estat dissenyats cercant valors de coeficient de resistència a l'avanç molt baixos. Ara bé, no sempre ha estat així. És per aquest motiu que s'ha de seguir en aquesta línia: si en l'actualitat tots els vehicles tinguessin un coeficient de resistència igual als vehicles de fa 20 anys, es produirien 454 milions de tones de CO₂ més l'any. Per tant, gràcies a la millora aerodinàmica dels vehicles al llarg dels anys s'ha aconseguit disminuir les emissions

de CO₂ equivalents a les que generarien trenta-i-una àrees habitades iguals que Catalunya l'any 2012¹⁸.

¹⁸ Valor extret de "La Región". [22]

Agraïments

Voldria agrair al director d'aquest treball final de grau, el Prof. Enric Trillas i Gay, per l'oportunitat que em va donar per a realitzar aquest sota la seva supervisió. Li voldria agrair també la seva dedicació, el seu guiatge i la seva ajuda.

També m'agradaria esmentar a tota la meva família, en especial als meus pares i al Jordi, pel seu constant suport i comprensió al llarg de tots aquests anys.

Bibliografia

- [1] EcuRed. "Aerodinámica". Havana, 2004.
[<http://www.ecured.cu/index.php/Aerodinámica>, 03/12/2014]
- [2] Ibertronica. "Aerodinámica de pelotas de golf en fuentes de alimentación". Sevilla, 2009.
[<http://www.ibertronica.es/blog/tutoriales/aerodinamica-pelotas-golf-fuentes-alimentacion/>, 03/12/2014]
- [3] EnCurva. "Análisi". Nova York, 2014.
[<http://encurva.com/category/analisis/>, 15/11/2014]
- [4] Reflexiones en boxes. "Flujo arriba, flujo abajo". Nova York, 2010.
[http://reflexionesenboxes.blogspot.com.es/2013_02_01_archive.html, 16/11/2014]
- [5] UNAM. "Aparición de esteles vorticosas". Ciudad de México, 1989.
[<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/640/A6.pdf?sequence=6>, 02/12/2014]
- [6] Simon McBeath. *Aerodinámica del automóvil de competición*, Madrid-CEAC. 2005.
- [7] 27vueltas. "Chaparral Cars". San Francisco, 2000
[<https://27vueltas.wordpress.com/2013/04/03/chaparral-cars-el-genio-de-jim-hall-parte-1-chaparral-2j-el-coche-ventilador/>, 16/11/2014]
[<https://27vueltas.wordpress.com/2013/09/05/chaparral-cars-el-genio-de-jim-hall-parte-3-los-experimentos-y-final/>, 16/11/2014]
- [8] LaMusica. "Los 10 autos más vendidos de la historia". Miami, 1999.
[http://gallery.lamusica.com/v/LaMusica/Auto/autoshistoria/VW_Golf_I_Bj_1974.jpg.html, 16/11/2014]
- [9] Autocosmos. "Giorgetto Giugiaro: la historia de un genio". San Antonio, 1999.
[<http://noticias.autocosmos.com.ar/2014/07/08/giorgetto-giugiaro-la-historia-de-un-genio>, 02/12/2014]
- [10] NoticiasCoches. "Historia del Volkswagen Golf". Madrid, 2014.
[<http://noticias.coches.com/noticias-motor/historia-del-volkswagen-golf-40-anos-del-rey-de-europa/119502>, 16/11/2014]

- [11] CFD Online. "Use of k-epsilon and k-omega Models". Arizona, 2006.
[<http://www.cfd-online.com/Forums/main/75554-use-k-epsilon-k-omega-models.html>, 07/10/2014]
- [12] IIT Madras. "Turbulence models and their applications". Arizona, 2006.
[<http://www.leb.eei.uni-erlangen.de/winterakademie/2011/report/content/course01/pdf/0112.pdf>, 07/10/2014]
- [13] Automobile-catalog. "1974 Volkswagen Golf 1100". Paris, 2009.
[http://www.automobile-catalog.com/make/volkswagen/golf_1gen/golf_1gen/1974.html, 01/11/2014]
- [14] Wolf-Heinrich Hucho. *Aerodynamics of Road Vehicles*, EE.UU.-SAE. 1998.
- [15] Car and DriverThief1. "DTM y Fórmula 1, cruce de caminos". Paris, 2014.
[<http://www.caranddrivethef1.com/formula1/articulos/2013/05/03/73447-dtm-y-formula-1-dos-caminos-destinados-cruzarse>, 03/01/2015]
- [16] Noticias.Coches. "El McLaren P1 debutará en el Salón de París". Madrid, 2012.
[<http://noticias.coches.com/noticias-motor/el-mclaren-p1-debutara-en-el-salon-de-paris/57121/>, 10/11/2014]
- [17] MDQ 4x4. "MDQ 4x4 Equipamento". Buenos Aires, 2000.
[<http://encurva.com/category/analisis/>, 10/11/2014]
- [18] AutoBild. "Sistema Start-Stop". Madrid, 2009.
[<http://www.autobild.es/practicos/sistema-start-stop-prueba-ahorro-combustible-166409/>, 29/12/2014]
- [19] CarScoops. "Volkswagen and the Seven Golfs". California, 2000.
[<http://www.carscoops.com/2012/09/volkswagen-and-seven-golfs-brief.html>, 29/12/2014]
- [20] Europa Press. "Principal contribuyente al calentamiento global". Madrid, 2013.
[<http://www.europapress.es/ciencia/habitat-y-clima/noticia-emisiones-globales-co2-alcanzaran-nuevo-record-40000-millones-toneladas-2014-20140921200433.html>, 29/12/2014]
- [21] EsMateria. "Volkswagen y BMW invierten más en I+D que toda España". Madrid, 2013.
[<http://esmateria.com/2013/11/19/volkswagen-y-bmw-invierten-mas-en-id-que-toda-espana//>, 30/12/2014]

[22] La Región. “España mantuvo las emisiones de CO2 en 2012 tras tres años de descensos”. California, 2014.

[<http://www.laregion.es/articulo/sociedad/espana-mantuvo-emisiones-co2-2012-anos-descensos/20140519143706469612.html>, 03/01/2015]