

## Resum

Aquest projecte es basa en l'estudi del comportament aerodinàmic d'un cotxe dels anys 70 utilitzant programes de càlcul numèric basats en la Dinàmica Computacional de Fluids. L'objectiu d'estudi és visualitzar i comprendre el comportament del flux d'aire al voltant del vehicle i la influència dels diferents elements del mateix. S'han realitzat algunes modificacions al model original i, finalment, s'han comparat els resultats obtinguts.

Es comença amb un estudi teòric sobre l'aerodinàmica de cotxes, descrivint diferents elements i estudiant com afecten al comportament aerodinàmic. A més a més, s'inclou l'evolució que ha patit l'aerodinàmica de vehicles des dels seus inicis. El model escollit per ser estudiat és el SEAT 132.

Per el disseny del model s'utilitza el programa de Disseny Assistit per Ordinador (CAD, en anglès) Solidworks i el programa de simulació numèrica Fluent per l'estudi del CFD. El model s'ha creat a partir de 4 vistes amb algunes mesures, ja que ha estat impossible trobar més informació sobre aquest cotxe.

Després de la creació del model, es procedeix a crear el mallat i a realitzar la simulació del comportament aerodinàmic del vehicle, realitzant posteriorment modificacions en determinades zones. L'objectiu principal durant tota la fase de disseny és maximitzar l'eficiència de les forces aerodinàmiques generades.



# Sumari

<b>RESUM</b>	<b>1</b>
<b>SUMARI</b>	<b>3</b>
<b>ÍNDIX DE FIGURES</b>	<b>5</b>
<b>ÍNDIX DE TAULES</b>	<b>6</b>
<b>1. GLOSSARI</b>	<b>7</b>
<b>2. PREFACI</b>	<b>8</b>
2.1. Origen del projecte .....	8
2.2. Motivació .....	8
<b>3. INTRODUCCIÓ</b>	<b>9</b>
3.1. Objectius del projecte .....	9
3.2. Abast del projecte .....	9
<b>4. AERODINÀMICA DE VEHICLES</b>	<b>11</b>
4.1. Introducció a l'aerodinàmica de vehicles .....	11
4.1.1. Una mica d'història .....	11
4.1.2. Cossos aerodinàmics .....	15
4.1.3. Capa límit .....	16
4.1.4. Forces aerodinàmiques .....	17
4.2. Elements aerodinàmics en un vehicle .....	18
4.2.1. Para-xocs davanter .....	18
4.2.2. Capó i parabrisa davanter .....	20
4.2.3. Sostre .....	21
4.2.4. Parabrisa posterior i maleter .....	22
4.2.5. Laterals .....	23
4.2.6. Baixos i difusor .....	24
4.2.7. Rodes .....	26
4.2.8. Alerons i spoilers .....	27
<b>5. DINÀMICA COMPUTACIONAL DE FLUIDS</b>	<b>29</b>
5.1. Introducció al CFD .....	29
5.2. Creació del model .....	30
5.3. Creació de la malla .....	32
5.4. Condicions de contorn .....	34
5.5. Configuració i càlcul de la solució .....	35

<b>6. ANÀLISIS DE RESULTATS</b>	<b>36</b>
<b>7. OPTIMIZACIÓ DEL MODEL</b>	<b>41</b>
7.1. Primera modificació .....	41
7.2. Segona modificació.....	43
7.3. Tercera modificació .....	46
<b>8. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I ECONÒMICA</b>	<b>48</b>
8.1. Planificació temporal.....	48
8.2. Planificació econòmica .....	49
<b>CONCLUSIONS</b>	<b>52</b>
<b>AGRAÏMENTS</b>	<b>54</b>
<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>55</b>



## Índex de figures

4.1	Les quatre principals etapes de l'aerodinàmica de vehicles [3] .....	11
4.2	Le jamais contente.....	12
4.3	Alfa Romeo de Mario Ricotti .....	13
4.4	Rumpler Tropfenwagen de Edmund Rumpler .....	13
4.5	Chrysler Airflow a la esquerra i Tatra77 a la dreta.....	14
4.6	Audi 100 III .....	14
4.7	Capa límit en una placa plana [3].....	16
4.8	Descomposició de les forces aerodinàmiques.....	17
4.9	Variació del $C_D$ en funció de l'altura del punt d'estancament.....	18
4.10	Reducció del $C_D$ a partir de modificacions a la part frontal [1] .....	19
4.11	Variació del $C_D$ per diferents acabats de la zona davantera.....	19
4.12	Influència de l'angle del capó ( $\alpha$ ) i del parabrisa ( $\delta$ ) en el $C_D$ [1].....	20
4.13	Influència de la curvatura del sostre en el $C_D$ [1] .....	21
4.14	Variació del $C_D$ en un Audi III en funció de tres paràmetres: $\gamma$ , $z$ , $x$ [1] .....	22
4.15	Influència de la curvatura dels laterals en el $C_D$ [1].....	23
4.16	Evolució del $C_D$ amb la col·locació de làmines sota el vehicle [6] .....	24
4.17	Influència de la longitud i l'angle del difusor en el $C_D$ [5].....	25
4.18	Augment del $C_D$ i del $C_L$ provocat per les rodes [1].....	26
4.19	Variació del $C_D$ i del $C_L$ en funció de la mesura del spoiler davanter [1].....	27
4.20	Variació del $C_D$ i del $C_L$ en funció de la configuració de l'aleró [1] .....	28
5.1	Plànols del SEAT 132.....	30
5.2	Disseny del SEAT 132 en Solidworks.....	31
5.3	Aspecte general del mallat .....	33
6.1	Representació del camp de pressions.....	37
6.2	Representació del camp de velocitats .....	39
6.3	Vista lateral del camp de velocitats .....	40
7.1	Para-xocs de la primera modificació.....	41
7.2	Camp de pressions de la primera modificació.....	42
7.3	Camp de velocitats de la primera modificació.....	42
7.4	Angles del capó i del parabrisa de la segona modificació.....	43
7.5	Camp de pressions de la segona modificació.....	44
7.6	Camp de velocitats de la segona modificació.....	45

7.7	Implementació del spoiler posterior.....	46
7.8	Camp de pressions de la tercera modificació.....	47
8.1	Diagrama de Gantt del projecte.....	49
8.2	Gràfic circular del pressupost del projecte.....	51

## Índex de taules

4.1	Coeficient de resistència a l'avanç de diferents geometries [3] .....	15
6.1	Valors dels coeficients, forces i eficiència .....	36
7.1	Resultats de la primera modificació .....	43
7.2	Resultats de la segona modificació.....	45
7.3	Resultats de la tercera modificació .....	47
8.1	Llista d'activitats del projecte.....	48
8.2	Pressupost del projecte.....	50



# 1. Glossari

A	Àrea frontal
CAD	<i>Computer Aided Design</i> o Disseny Assistit per Ordinador
$C_D$	Coefficient de resistència a l'avanç
CFD	<i>Computational Fluid Dynamics</i> o Dinàmica Computacional de Fluids
$C_L$	Coefficient de sustentació
$F_D$	<i>Drag</i> o Força de resistència a l'avanç
$F_L$	<i>Lift</i> o Força de sustentació
g	Acceleració gravitatòria
k	Energia cinètica turbulenta
P	Pressió
Re	Número adimensional de Reynolds
U	Velocitat del fluid
Z	Cota d'energia potencial
$\gamma$	Pes específic
$\delta$	Gruix de la capa límit
$\delta^*$	Gruix de desplaçament de la capa límit
$\epsilon$	Ràtio de dissipació de l'energia cinètica turbulenta
$\rho$	Densitat del fluid

## 2. Prefaci

### 2.1. Origen del projecte

Des de la crisi del petroli de l'any 1973 l'aerodinàmica ha jugat un paper fonamental per tal de reduir el consum dels cotxes. Aquesta crisi va provocar l'augment del preu del barril de petroli. Així doncs, aquest fet històric va ser el detonant del desenvolupament de l'aerodinàmica en els cotxes, no només com a ús estètic sinó buscant una major eficiència energètica. Aquesta millora energètica segueix sent molt important avui en dia a l'hora de dissenyar els nous models.

### 2.2. Motivació

L'elecció del tema del Treball de Final de Grau sorgeix a partir de l'interès per el món de l'aerodinàmica, així com el del disseny industrial i el de l'automoció. Relacionant aquests aspectes de la enginyeria i afegint els conceptes adquirits a la mecànica de fluids durant els estudis de Grau en Enginyeria Industrial i altres assignatures complementàries com Projecte 2 on es va fer el treball en 2D i l'optativa d'Aerodinàmica, neix la idea sobre la qual tracta el projecte.

El treball pretén recopilar tots aquests interessos i coneixements en un estudi on es realitzarà el disseny del model amb un programa de Disseny Assistit per Ordinador (CAD, en anglès), s'analitzarà el comportament del mateix a través d'un flux d'aire utilitzant la Dinàmica Computacional de Fluids (CFD, en anglès) i tot això aplicat al món de l'automoció.





## 3. Introducció

### 3.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte és analitzar diverses millores aerodinàmiques en un cotxe dels anys 70 posant en pràctica tots els coneixements adquirits al llarg del Grau per tal de reduir el coeficient de resistència a l'avanç i augmentar el de sustentació. D'aquesta manera s'obtindrà un disseny amb la màxima eficiència.

A part de complir amb l'objectiu principal, es plantegen altres objectius menys importants però igualment necessaris, com per exemple, recordar el funcionament del programa de CAD per realitzar un model el més semblant a la realitat, ja que la realització d'un bon model és clau per l'obtenció de bons resultats. D'altra banda, és necessari conèixer la funció de cada element del vehicle i saber quina és la seva influència en el comportament aerodinàmic del mateix. Finalment, posar en pràctica els conceptes i hipòtesis de la mecànica de fluids quan s'estudia l'aerodinàmica d'un cotxe mitjançant CFD és un altre dels objectius plantejats.

Per acabar es compararan els resultats extrets en aquest projecte amb els resultats que es van obtenir a l'assignatura de Projecte 2 en el treball en 2D.

### 3.2. Abast del projecte

Les companyies automobilístiques realitzen aquests estudis per tal de reduir costos ja que és una forma d'obtenir bons resultats sense haver de fabricar cap cotxe. Posteriorment ja es farien assaigs a túnels de vent, proves en circuit tancat, etc...

En aquest cas, s'ha triat el Seat 132 comercialitzat entre els anys 1973 i 1982. Per tal de realitzar l'estudi es seguiran els següents punts.

1. Estudi teòric de l'aerodinàmica de vehicles, analitzant la influència de cada element del cotxe en el comportament aerodinàmic del mateix.
2. Creació del model en CAD, implementació del model mitjançant CFD i càlcul de la solució.
3. Anàlisi dels resultats obtinguts i optimització del disseny.
4. Realització d'una planificació temporal i econòmica.



## 4. Aerodinàmica de vehicles

### 4.1. Introducció a l'aerodinàmica de vehicles

#### 4.1.1. Una mica d'història

La història de l'aerodinàmica de vehicles està dividida en les quatre etapes que es poden observar a la Figura 4.1.










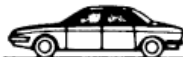
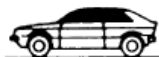



Basic shapes	1900 to 1930	 Torpedo	 Boat tail	 Air ship
	Streamlined cars	1921 to 1923	 Rumpler	 Bugatti
1922 to 1939		 Jaray		
1934 to 1939		 Kamm	 Schlör	
Since 1955		 Citroen	 NSU-Ro 80	
Detail optimization		Since 1974	 VW-Scirocco I	 VW-Golf I
	Shape optimization	Since 1983	 Audi 100 III	 Ford Sierra

Fig. 4.1. Les quatre principals etapes de l'aerodinàmica de vehicles [3]

La introducció de l'aerodinàmica en el disseny dels vehicles es va produir a principis del segle XX degut al gran avanç de la indústria aeronàutica. Per tant, els primers dissenys estaven basats en la indústria nàutica i aeronàutica i no en l'automobilística.

El primer disseny de vehicle que va equipar una carrosseria aerodinàmica va ser *Le jamais contente* que va adquirir forma de torpede. Amb aquest cotxe, Camille Jenatzy va aconseguir el rècord del món de velocitat superant els 100 km/h l'any 1899.

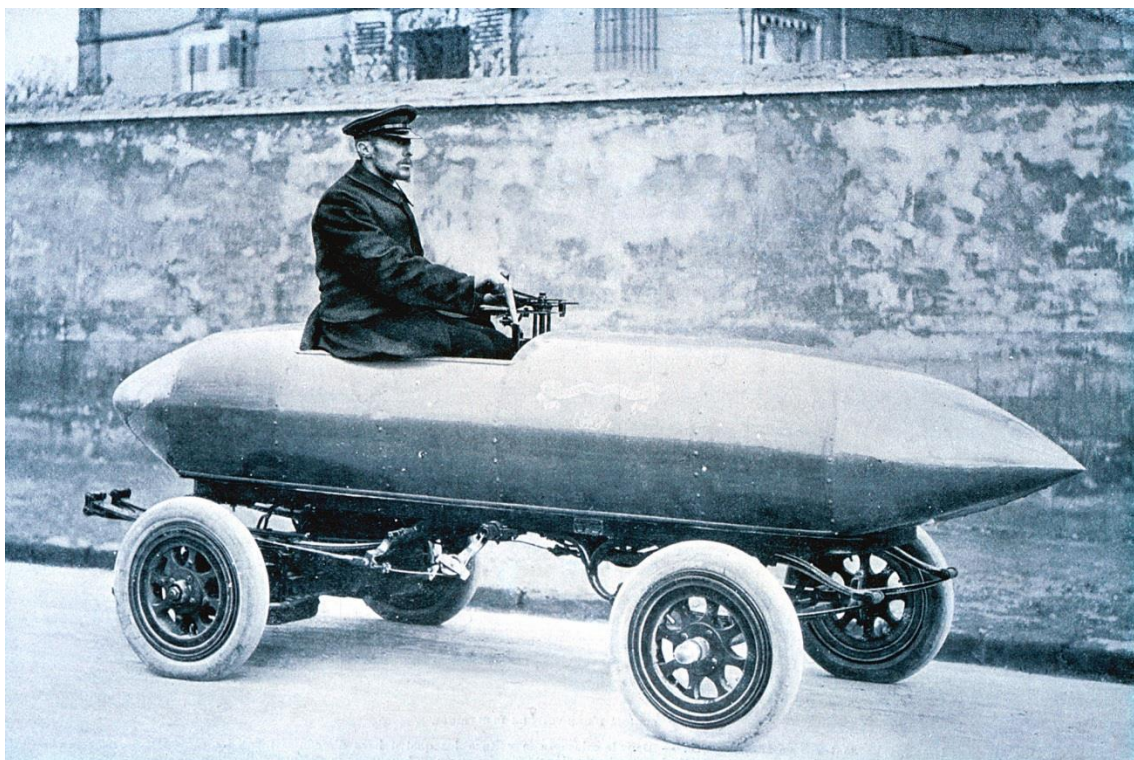


Fig. 4.2. Le jamais contente

Posteriorment l'any 1913, es va fabricar l'Alfa Romeo dissenyat per Mario Ricotti que és un exemple de la influència de la indústria aeronàutica ja que la seva forma s'assembla a la d'un dirigible. Amb aquest model es va assolir una velocitat de 139 km/h.





Fig. 4.3. Alfa Romeo de Mario Ricotti

L'any 1921, l'austríac Edmund Rumpler va dissenyar el primer vehicle amb l'objectiu de reduir la resistència a l'avanç. Aquest vehicle es va denominar *Rumpler Tropfenwagen* i destacava per el seu baix coeficient de resistència de només 0,28 amb una àrea frontal de 2,57 m<sup>2</sup>.

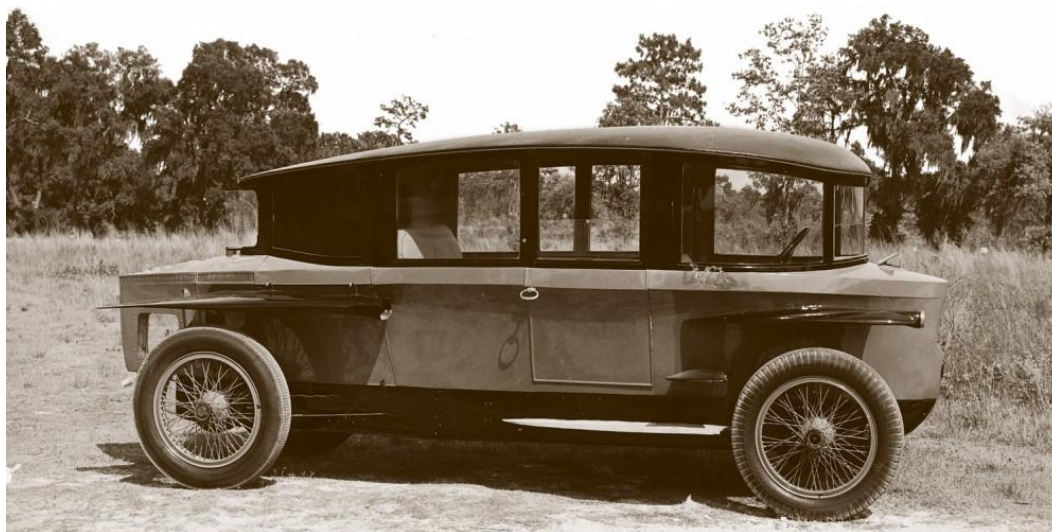


Fig. 4.4. Rumpler Tropfenwagen de Edmund Rumpler



Posteriorment, al 1934, es van produir els primers cotxes en sèrie dissenyats a partir de l'aerodinàmica. Aquests models eren el Chrysler Airflow i el Tatra 77.



Fig. 4.5. Chrysler Airflow a la esquerra i Tatra 77 a la dreta

Es van seguir millorant els dissenys però no va ser fins després de la crisi del petroli, l'any 1973, que va haver una millora en l'aerodinàmica dels cotxes. Les empreses van treballar per tal de reduir al màxim el consum. L'exemple més evident d'aquesta millora va ser l'Audi 100 III.



Fig. 4.6. Audi 100 III

Les modificacions dels següents anys es van centrar en la millora de determinats elements del vehicle com retrovisors, carrosseria, etc. per tal de reduir lleugerament el  $C_D$ .



### 4.1.2. Cossos aerodinàmics

La resistència d'un cos a l'avanç es pot dividir en dues components, la de pressió o resistència de forma i la de fricció o resistència de superfície. La resistència de forma és la que ve donada per culpa de la diferència de pressions entre la part frontal on es produeix l'estancament i la part posterior on hi ha la separació del flux. La resistència de fricció ve donada pels esforços viscosos sobre la superfície del cos. La suma de les dues components dona lloc al coeficient de resistència a l'avanç ( $C_D$ ).

La taula 4.1 mostra el coeficient de resistència a l'avanç de diferents geometries basats en l'àrea frontal.

Forma	$C_D$ basado en el área frontal	Forma	$C_D$ basado en el área frontal	Forma	$C_D$ basado en el área frontal
Cilindro cuadrado:	2,1	Medio cilindro:	1,2	Placa:	2,0
	1,6		1,7	Placa plana perpendicular a pared:	1,4
Medio tubo:	1,2	Triángulo equilátero:	1,6		
				Hexágono:	1,0
	2,3		2,0		0,7

Taula. 4.1. Coeficient de resistència a l'avanç de diferents geometries [3]

En el cas de la placa plana vertical, la resistència a l'avanç es deu exclusivament a la resistència de pressió, en canvi, la horitzontal, la seva resistència és deguda exclusivament a la resistència de fricció per culpa del desprendiment de la capa límit.

### 4.1.3. Capa límit

L'any 1904, Ludwig Prandtl va introduir el concepte de capa límit, una zona prima de fluid propera a la superfície del cos, en la que hi ha grans variacions de velocitat i on es concentren els efectes viscosos.

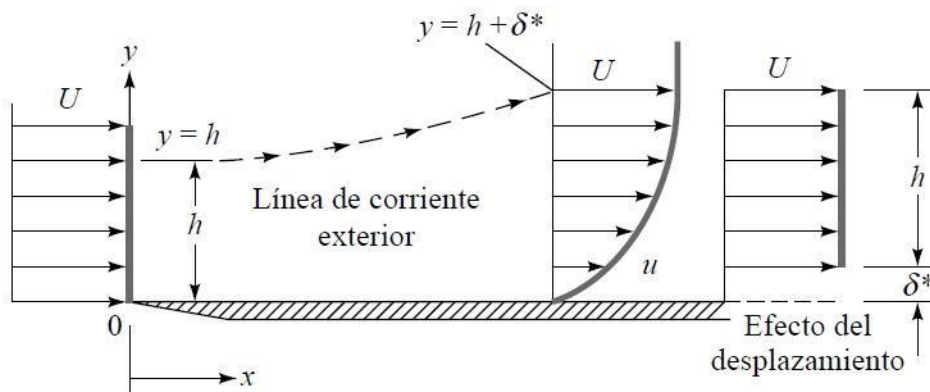


Fig. 4.7. Capa límit en una placa plana [3]

Per efecte de la viscositat, les partícules de fluid que es troben en contacte amb una paret es mouen a la velocitat de la paret. En aquest cas, les partícules en contacte amb la placa fixa tindran velocitat igual a zero. A l'entrada de la placa hi ha una discontinuïtat de la velocitat ja que abans de la entrada la velocitat del flux és uniforme i immediatament després la velocitat de les partícules que toquen la placa, és nul·la. La velocitat passa gradualment de zero a la superfície de la placa, fins al valor de flux uniforme (U) a una altura  $\delta$  a partir de la qual la velocitat no varia, on  $\delta$  és el gruix de la capa límit. El gruix de la capa límit és la distància des del punt de contacte amb la placa plana al punt vertical per la qual la velocitat és el 99% de la velocitat uniforme (U).





#### 4.1.4. Forces aerodinàmiques

Qualsevol element que es mou a través de l'aire pateix una força anomenada aerodinàmica. Aquesta es descompon en dues components: sustentació (o *Lift*) i resistència a l'avanç (o *Drag*). Com es pot observar a la Fig. 4.8., la component de resistència és paral·lela al vent relatiu i la de sustentació perpendicular a aquest.

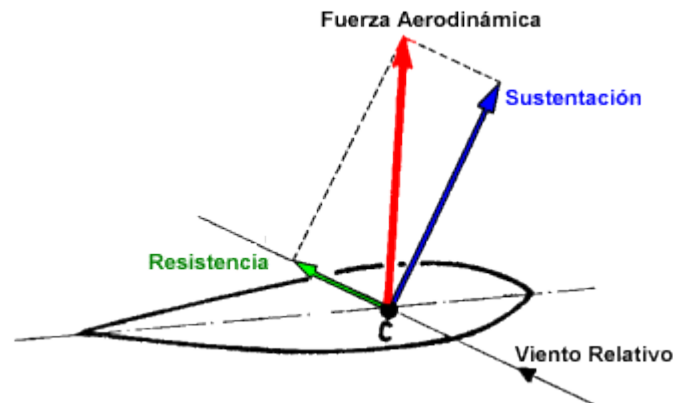


Fig. 4.8. Descomposició de les forces aerodinàmiques

En el cas particular d'un vehicle, considerant la simetria en el pla transversal, només rep dues forces, la de resistència i la de sustentació. La força de resistència a l'avanç és la que pateix el cos contra el fluid en la direcció del flux. La de sustentació es produeix en la direcció perpendicular a la resistència. Les dues forces es defineixen matemàticament de la següent manera:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A$$

On  $F_D$  i  $F_L$  són les forces de *Drag* i *Lift* respectivament,  $\rho$  i  $U$  representen la densitat i la velocitat del fluid.  $C_D$  i  $C_L$  són els coeficients aerodinàmics de resistència a l'avanç i sustentació. Finalment,  $A$  és la superfície característica de cada cos, que en el cas dels vehicles és l'àrea frontal.

## 4.2. Elements aerodinàmics en un vehicle

Per tal d'optimitzar el comportament aerodinàmic d'un vehicle, un dels principals factors a estudiar és el coeficient de resistència a l'avanç. Els retrovisors, les rodes, l'acabat superficial de la carrosseria i altres detalls influeixen en el seu valor per ells mateixos però també quan es combinen, fet que complica l'estudi de l'aerodinàmica. A continuació s'estudiaran diferents parts del vehicle per tal d'optimitzar-ho al màxim.

### 4.2.1. Para-xocs davanter

El primer element d'un vehicle amb el que contacta l'aire és el para-xocs davanter. Per això, és molt important fer un bon disseny del mateix ja que, des d'aquest element, es redirecciona el flux a altres parts del vehicle. Cal considerar totes les entrades de ventilació tancades, tal i com es farà en la simulació numèrica, el flux al voltant del morro del vehicle es pot caracteritzar per un punt d'estancament i una àrea d'alta pressió que el rodeja. A la Figura 4.9. es pot observar la variació del  $C_D$  en funció de la relació entre l'altura del punt d'estancament i l'altura del vehicle (sense considerar les rodes) [5].

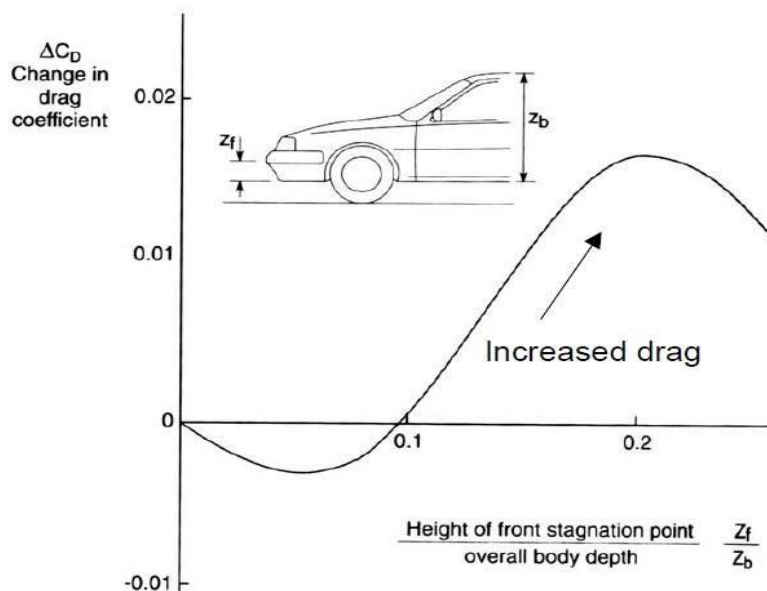


Fig. 4.9. Variació del  $C_D$  en funció de l'altura del punt d'estancament [5]



Es pot apreciar que l'única forma de reduir el coeficient de resistència a l'avanç és aconseguint una altura del punt d'estancament menor que el 10% de l'altura del vehicle. Qualsevol altre solució farà augmentar el  $C_D$ .

Les cantonades de la carrosseria del vehicle produeixen la separació del flux i, en conseqüència, la pèrdua de l'eficiència aerodinàmica. A la Figura 4.10 es mostren diferents dissenys de la part frontal d'un vehicle [1]. A menor altura del para-xocs, major reducció del coeficient aerodinàmic degut a la distribució del flux.

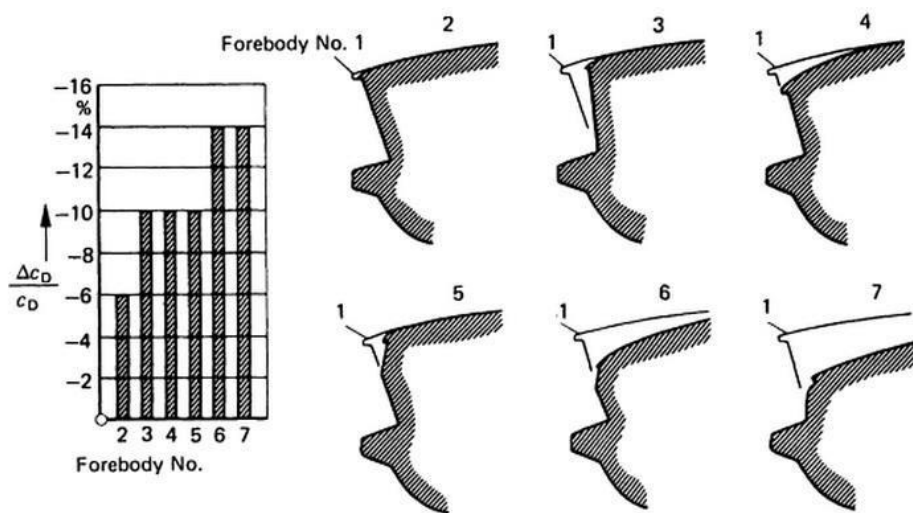


Fig. 4.10. Reducció del  $C_D$  a partir de modificacions a la part frontal [1]

A la Figura 4.11 es mostra un altre exemple d'aquest fenomen [1]. La configuració amb el punt d'estancament més baix i sense cantonades, és la que aconsegueix una major reducció del coeficient de resistència a l'avanç.

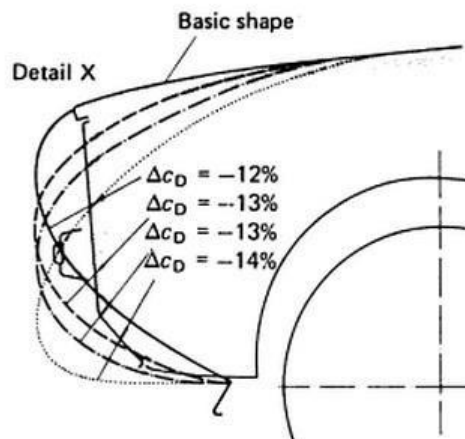


Fig. 4.11. Variació del  $C_D$  per diferents acabats de la zona davantera [1]

### 4.2.2. Capó i parabrisa davanter

L'angle del capó ( $\alpha$ ) influeix en el gradient de pressió de la zona i és molt important per mantenir el flux enganxat a la carrosseria. És necessari un angle del capó petit (al voltant de  $10^\circ$ ) per reduir el  $C_D$ . A part, també és beneficiós per retardar la separació del flux a la unió amb el parabrisa.

L'angle del parabrisa davanter ( $\delta$ ) té un paper fonamental en el control del punt d'unió amb el sostre. A major angle, major reducció del  $C_D$ , però es recomana que no sigui superior a  $60^\circ$  ja que, per angles majors, provoquen problemes de visibilitat del conductor i un increment de la calor dins el cotxe provocat per la radiació solar.

A la Figura 4.12 es mostra la influència que tenen els dos angles sobre el coeficient de resistència a l'avanç [1].

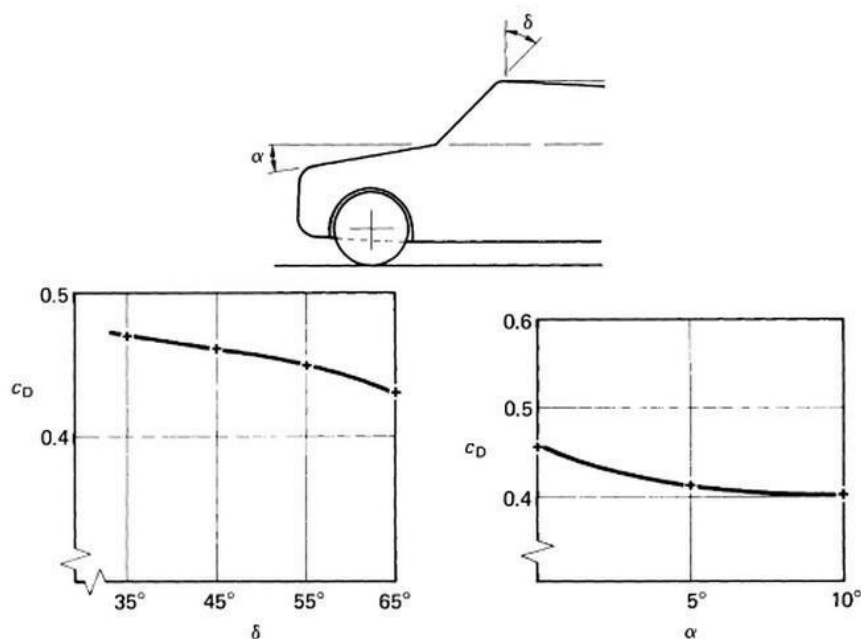


Fig. 4.12. Influència de l'angle del capó ( $\alpha$ ) i del parabrisa davanter ( $\delta$ ) en el  $C_D$  [1]



### 4.2.3. Sostre

El sostre d'un vehicle és l'element d'unió entre el parabrisa davanter i el posterior, per tant, ha de ser dissenyat per garantir una transició suau del flux de la part davantera a la posterior, sense provocar la separació del flux en aquella zona i intentar mantenir-lo enganxat a la carrosseria.

El coeficient de resistència a l'avanç pot ser reduït mitjançant l'arquejament del sostre tal i com es mostra a la Figura 4.13 [1].

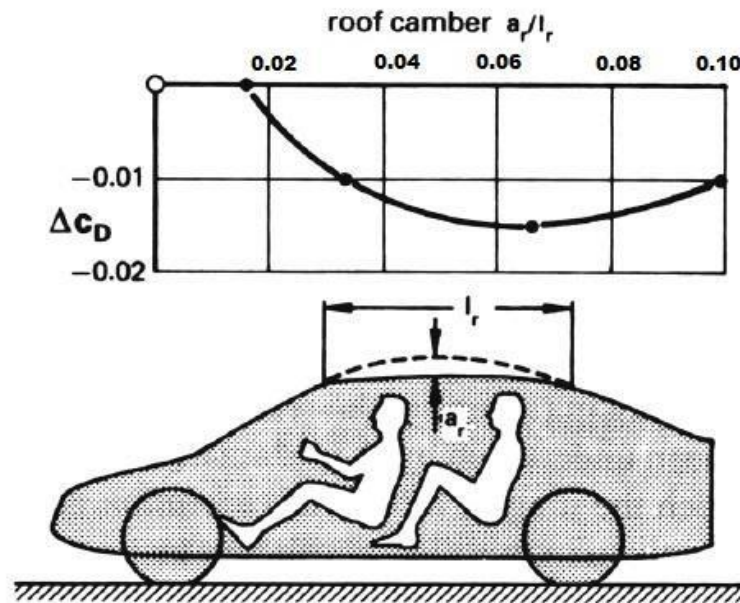


Fig. 4.13. Influència de la curvatura del sostre en el  $C_D$  [1]

### 4.3.4. Parabrisa posterior i maileter

La funció del parabrisa posterior, en els vehicles tipus *Notchback*, segueix sent, com els elements anteriors, mantenir el flux d'aire enganxat a la carrosseria i retardar la separació el màxim possible. Existeixen tres paràmetres per tal de definir el comportament aerodinàmic del vehicle que són l'angle del parabrisa posterior ( $\gamma$ ), l'altura del maileter ( $z$ ) i la longitud del maileter ( $x$ ). A la Figura 4.14, es mostra la influència d'aquests tres paràmetres en un Audi 100 III [1].

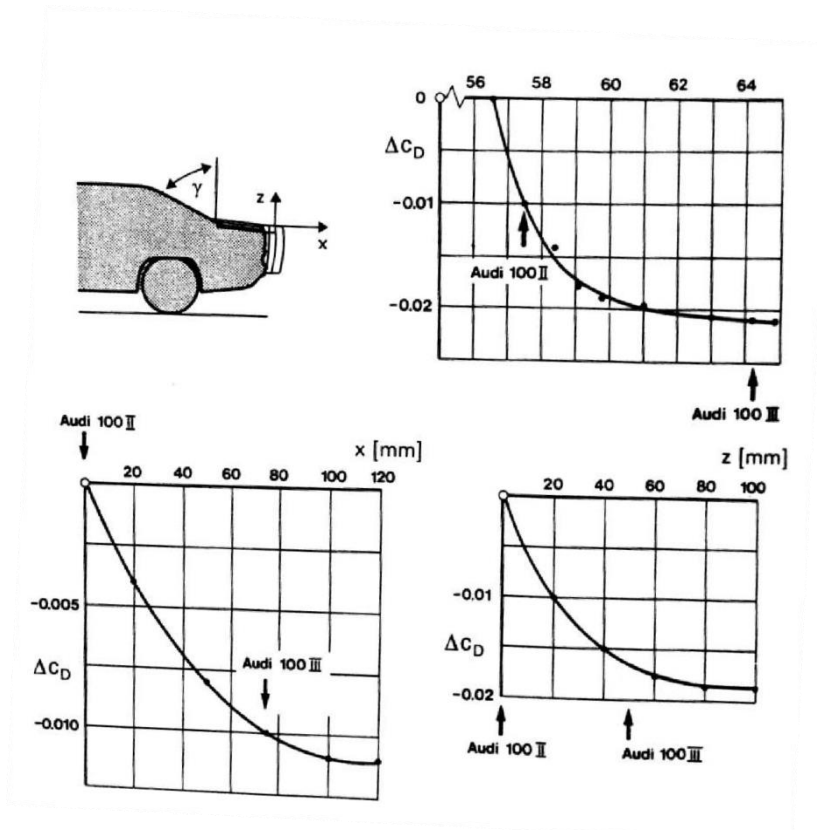


Fig. 4.14. Variació del  $C_D$  en un Audi III en funció de tres paràmetres:  $\gamma$ ,  $z$ ,  $x$  [1]



### 4.2.5. Laterals

Per reduir el coeficient de resistència a l'avanç, cal millorar el moviment del flux al voltant del cotxe. Amb aquesta intenció, i de la mateixa forma que amb el sostre, s'augmenta la convexitat dels laterals del vehicle. Així doncs, s'aconsegueix que el flux romanguí enganxat a la carrosseria des de la part frontal fins la part posterior del vehicle.

A la Figura 4.15 es mostra la variació del  $C_D$  en funció de la curvatura dels laterals [1].

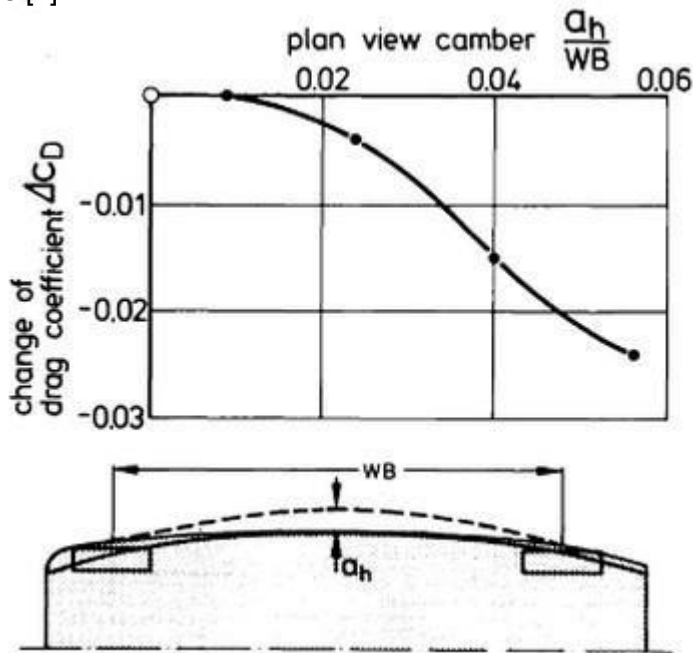


Fig. 4.15. Influència de la curvatura dels laterals en el  $C_D$  [1]

Tal i com succeeix amb el sostre, un augment excessiu de la curvatura pot tenir l'efecte contrari al desitjat, ja que al augmentar la curvatura, l'àrea frontal també augmenta.

### 4.2.6. Baixos i difusor

Els baixos dels vehicles són zones molt rugoses ja que hi ha diferents elements, com per exemple, la suspensió, el sistema d'escapament i l'eix de transmissió, que fan augmentar el coeficient de resistència a l'avanç.

Per tal d'evitar aquest problema, una solució seria carenar la part inferior utilitzant làmines de plàstic o metall llises, dissenyar el para-xocs davanter de forma òptima per tal de reduir la quantitat d'aire que circula per sota el cotxe, o col·locar un spoiler davanter.

A la Figura 4.16 es pot observar com varia el  $C_D$  a mesura que se li afegeixen làmines en els baixos del cotxe. [6.]

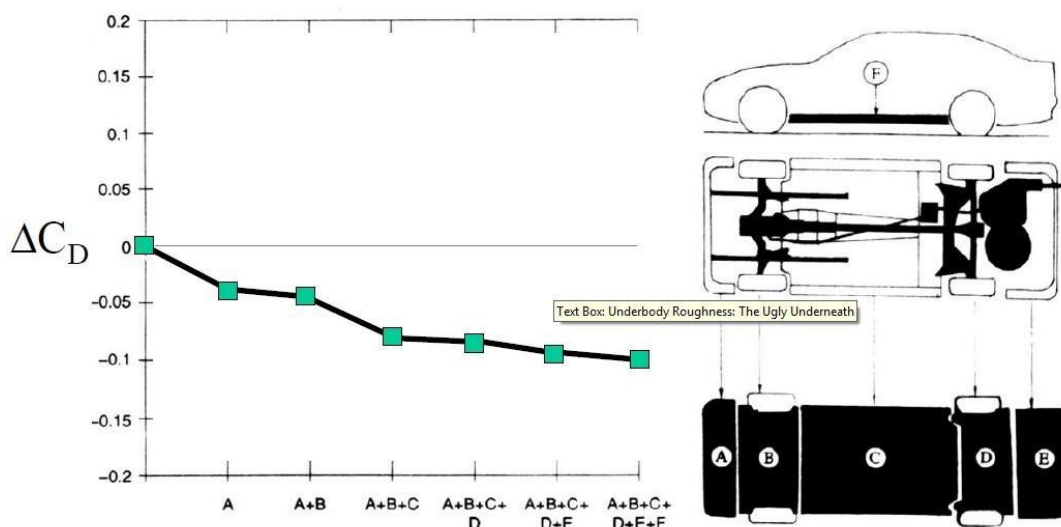


Fig. 4.16. Evolució del  $C_D$  amb la col·locació de làmines sota el vehicle [6]

Els beneficis que aporta l'ús dels difusors a l'aerodinàmica de vehicles són: la reducció de la fricció de resistència a l'avanç i dels vòrtexs o la reducció de la fricció dels baixos. D'aquesta manera, el vehicle consumeix menys combustible i és més estable a l'hora de conduir gràcies a la reducció del coeficient de sustentació degut a la creació de *downforce*.

A la Figura 4.17 es pot observar diferents configuracions de difusors en funció de l'angle del difusor i de la longitud del mateix respecte a la longitud total del vehicle [5]. La millor configuració és aquella en la que el difusor és llarg i té poca inclinació.





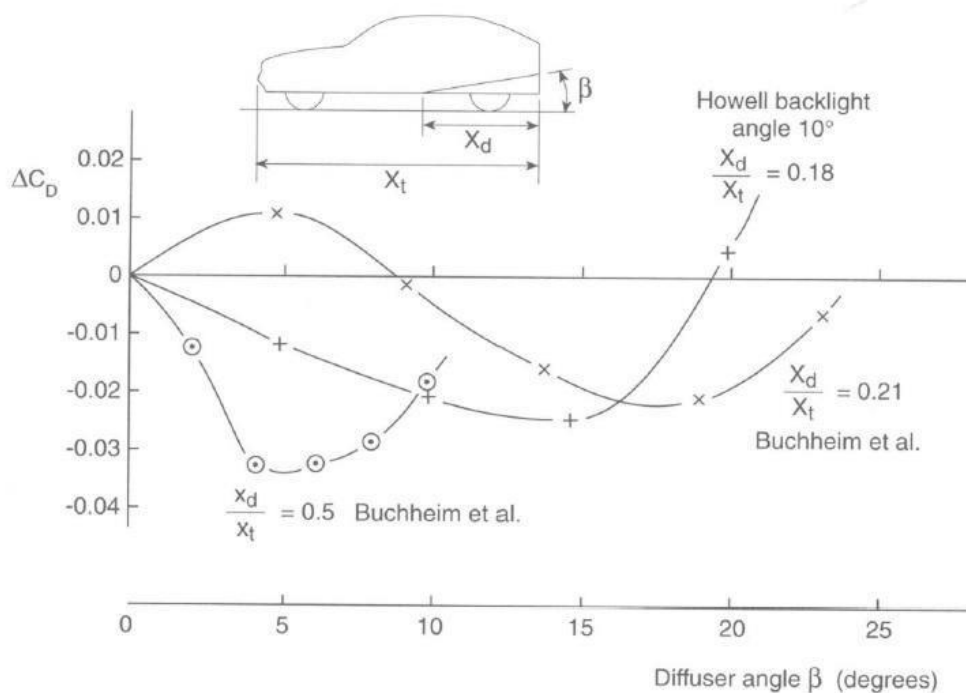


Fig. 4.17. Influència de la longitud i l'angle del difusor en el  $C_D$  [5]

### 4.2.7. Rodes

Les rodes en un vehicle tenen una gran influència en l'aerodinàmica ja que en alguns cotxes pot arribar a representar el 50% de la resistència a l'avanç.

A la Figura 4.18 s'aprecia l'augment del coeficient de resistència a l'avanç i sustentació causat per la implementació de les rodes en el model [1].

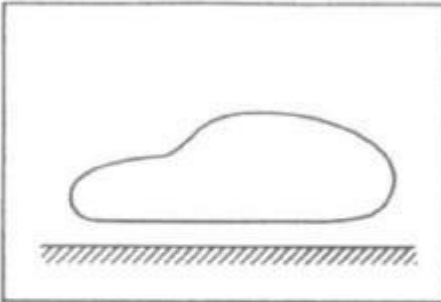
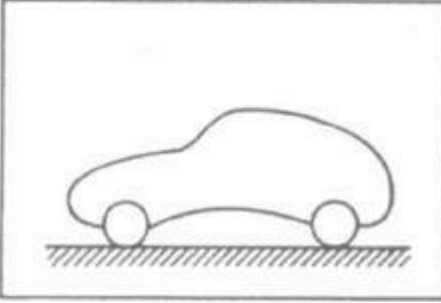
	$C_D$	$C_L$	A in $m^2$ M 1:2
	0.073	-0.044	0.407
	0.157	-0.009	0.462

Fig. 4.18. Augment del  $C_D$  i del  $C_L$  provocat per les rodes [1]



### 4.2.8. Alerons i spoilers

Els spoilers serveixen per millorar l'estabilitat a les corbes gràcies a la generació de *downforce*, utilitzats majoritàriament en cotxes esportius. Existeixen dos tipus, els spoilers davanters i els posteriors.

Els spoilers davanters tenen tres aspectes positius; redueixen la resistència a l'avanç, augmenten el *downforce* a l'eix davanter i augmenten el flux volumètric d'aire de refrigeració. Els aspectes positius dels spoilers posteriors són la reducció de la resistència a l'avanç igual que els davanters, augmenten el *downforce* a l'eix de darrere i redueixen la brutícia de la part posterior.

A la Figura 4.19 s'observa la millora de l'eficiència aerodinàmica per diferents configuracions del spoiler davanter [1].

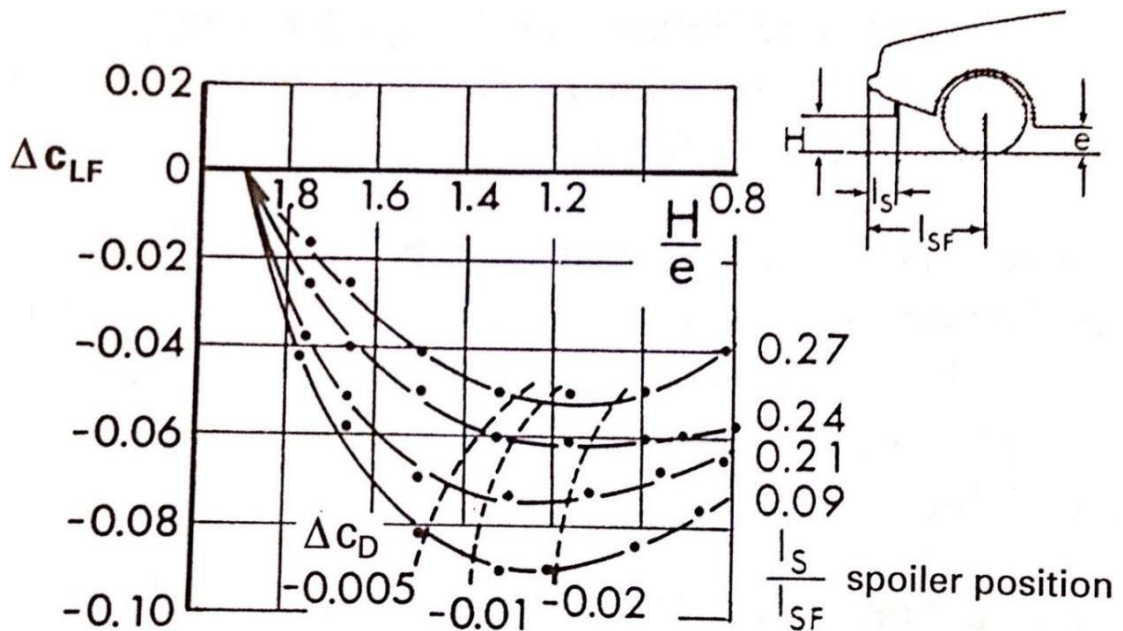


Fig. 4.19. Variació del  $C_D$  i del  $C_L$  en funció de la mesura del spoiler davanter [1]

La principal diferència que existeix entre un spoiler i un aleró és que al spoiler, el flux només circula per un cantó, en canvi, a l'aleró el flux circula per sobre i per sota.

A la Figura 4.20 s'observen diferents configuracions d'alerons i l'efecte en el coeficient de resistència a l'avanç i de sustentació [1]. Totes les configuracions redueixen el coeficient de sustentació però, en algunes configuracions, fan augmentar el coeficient de resistència a l'avanç.

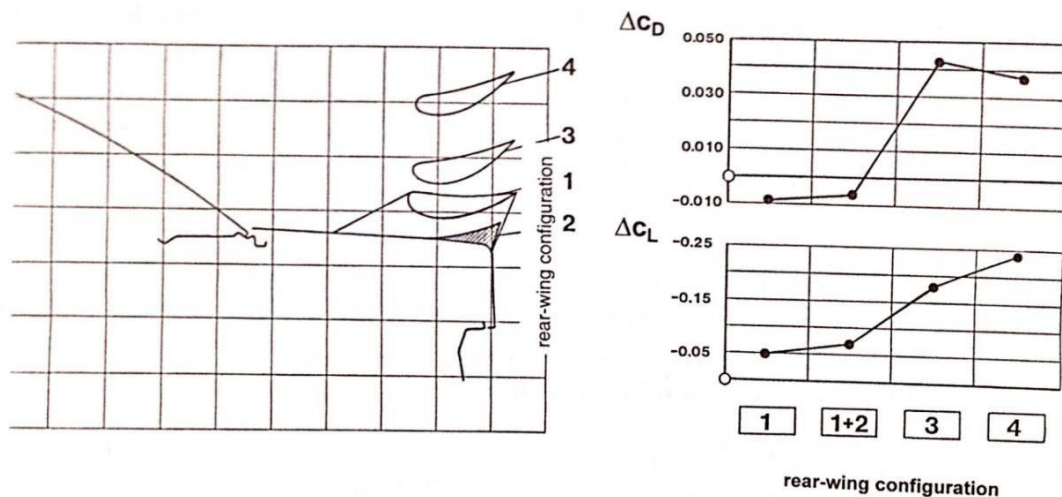


Fig. 4.20. Variació del  $C_D$  i del  $C_L$  en funció de la configuració de l'aleró [1]



## 5. Dinàmica Computacional de Fluids

### 5.1. Introducció al CFD

Un estudi mitjançant CFD es pot utilitzar en qualsevol etapa d'un procés de disseny, ja sigui en estudis preliminars, en el desenvolupament d'un producte, per solucionar problemes que apareguin durant el disseny o directament per realitzar un redisseny de producte. Serveix com a complement de l'experimentació per reduir l'esforç i els costos necessaris per realitzar els experiments i recollir dades.

Un anàlisi realitzat amb CFD consta de tres etapes diferenciades: pre-procés, solució i post-procés. En el pre-procés es construeix la geometria i es crea la malla d'elements finits. També s'apliquen les condicions de contorn de l'estudi i les característiques del fluid per tal d'iniciar el càlcul de la solució.

A la solució es defineix el mètode de càlcul, les iteracions necessàries per realitzar-lo i el valor objectiu dels residus. Els residus són la diferència que existeix entre la solució obtinguda en una iteració i la obtinguda en la iteració anterior. Serveix per saber si el càlcul proposat convergirà o la solució divergirà. A part, cal afegir que el temps que es necessita per fer el càlcul depèn de la quantitat d'elements finits que tingui el model. Com més elements tingui, major serà el temps per arribar a la solució tot i que el resultat serà més precís.

Finalment, en el post-procés s'analitzen els resultats obtinguts a l'etapa de solució mitjançant gràfics com per exemple la velocitat o pressió. En aquesta etapa es comparen els resultats obtinguts amb la realitat i poder validar el model i proposar millores.

Tot l'estudi realitzat en aquest treball s'utilitzarà el programa FLUENT.

## 5.2. Creació del model

El cotxe que s'estudiarà en aquest treball és el SEAT 132 que es va comercialitzar entre el 1973 i el 1982. Per tal de crear el model s'ha utilitzat el Solidworks i s'ha utilitzat un pla amb quatre vistes amb algunes mesures com el de la Figura 5.1 ja que no hi havia cap model 3D d'aquest vehicle ja creat.

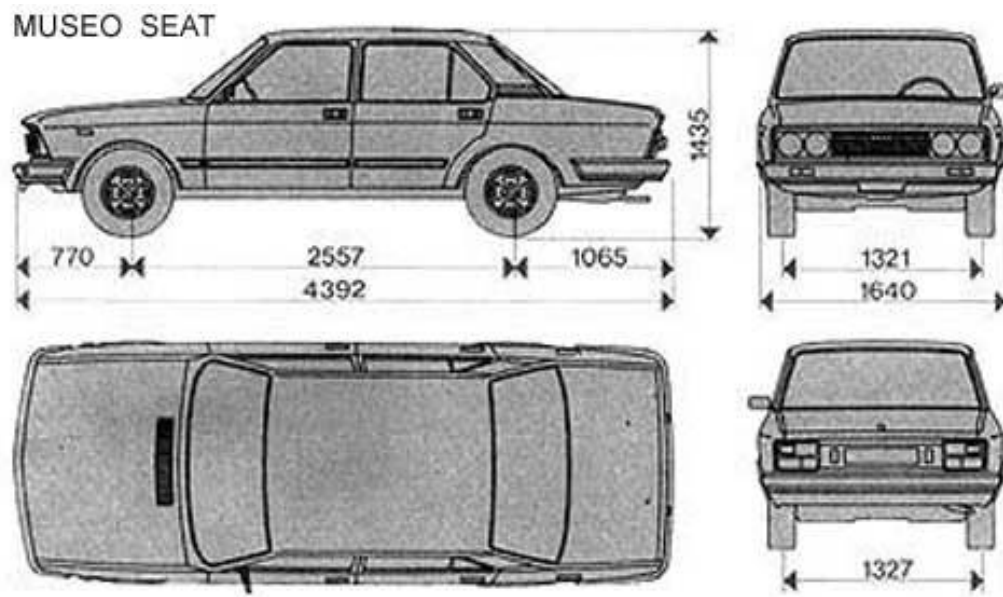


Fig. 5.1. Plànols del SEAT 132

Utilitzant les quatre vistes s'ha creat el model 3D el més semblant possible tot i que la quantitat de mesures de les que es disposava era petita. A la figura 5.2 es pot observar el disseny 3D definitiu del cotxe.



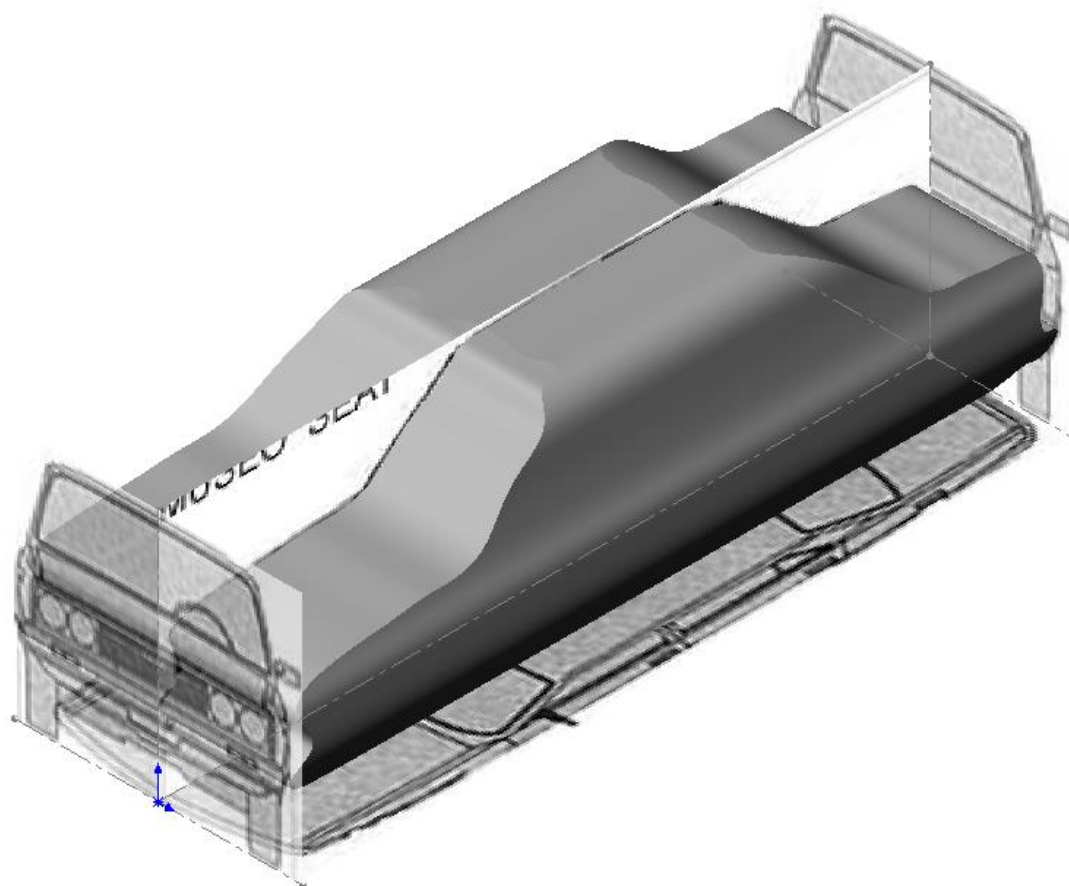


Fig. 5.2. Disseny 3D del SEAT 132 en Solidworks

Cal comentar que s'ha utilitzat el programa Solidworks, tot i que no és el més utilitzat a la indústria de l'automòbil, ja que era el programa que més dominava gràcies a les diferents assignatures cursades durant el Grau.

### 5.3. Creació de la malla

El següent pas és el mallat del model. Un bon mallat en un estudi CFD és crucial per obtenir una solució bona i fiable. Com ja s'ha comentat a l'apartat 5.1, la mida dels elements finits i la quantitat dels mateixos determinen el temps de processament i la potència de càlcul necessària per obtenir una solució.

Per aquest motiu s'ha intentat realitzar un mallat el més refinat possible però tenint en compte que és una versió educacional i el nombre d'elements està limitat.

Per començar cal definir el volum de control on s'estudiarà el comportament aerodinàmic del vehicle. En aquest cas, el volum de control representa un assaig d'un túnel de vent. Per tant, cal deixar una distància per la part de darrere per tal de simular l'efecte de les turbulències i a la part de davant per tal de representar el flux lliure d'aire.

La mida del volum de control per un estudi aerodinàmic d'un vehicle no és una cosa exacta però sí que acostuma a estar fitat. Per la part davantera cal deixar entre una i tres vegades la longitud del vehicle i a la part posterior entre tres i sis vegades la longitud. Tant l'altura com l'amplada ha de tenir entre una i tres vegades la longitud del vehicle [7].

En aquest treball en particular, s'ha agafat un volum de control amb dos cotxes de longitud per la part de davant i quatre per la posterior. A la secció transversal s'han agafat dos vehicles tant d'altura com d'amplada. Per tant, les dimensions obtingudes d'aquest volum de control son: 30,744 m de longitud, 8,784 m d'alt i 8,784 m d'amplada.

Seguidament s'ha procedit a mallar el model. S'ha utilitzat un *Body Sizing* de 0,4 per el volum de control i un *Body Sizing* de 0,1 per al cotxe. A més a més, s'ha aplicat un *Face Sizing* de 0,15 a la superfície del cotxe.





Així doncs, tenint en compte tot el que s'ha esmentat, l'aspecte del mallat del nostre model es pot observar a la Figura 5.3.

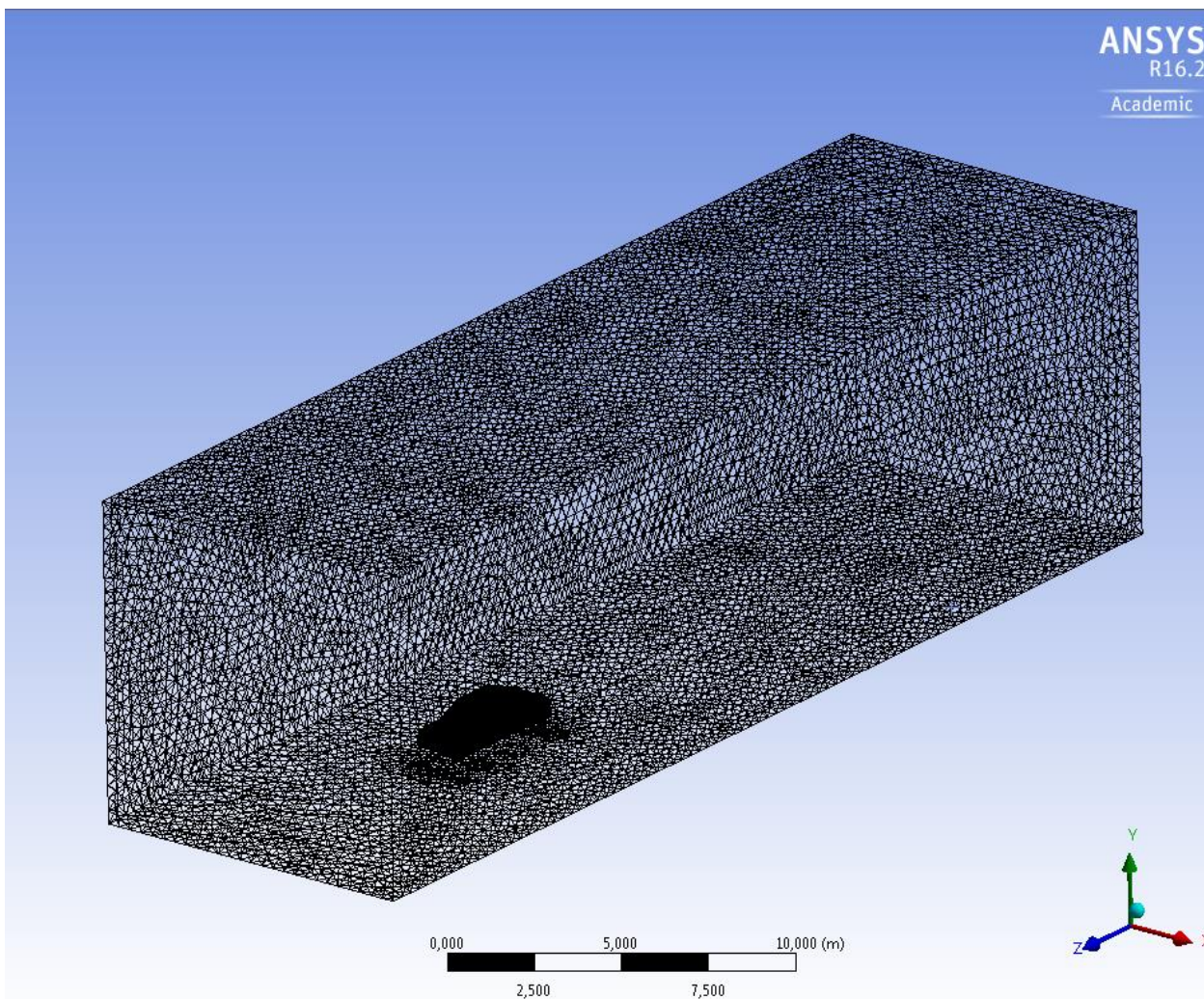


Fig. 5.3. Aspecte general del mallat

## 5.4. Condicions de contorn

Abans de realitzar el mallat, el programa de simulació necessita que les superfícies del volum de control tinguin un nom per tal d'aplicar les condicions de contorn més endavant.

La superfície per on entra el flux d'aire s'ha anomenat *inlet* i a la de sortida *outlet* ja que Fluent necessita una velocitat a la entrada i una pressió de referència a la sortida. Les altres superfícies del volum de control s'han anomenat *free1*, *free2*, *free3* i *free4* on *free1* era la superfície que representa la carretera. Finalment el conjunt de superfícies que modelen el cotxe se l'ha anomenat *body*.

A continuació, s'exposen les condicions de contorn aplicades al model i la zona en la que són aplicades:

- A la zona per on incideix el flux d'aire, *inlet*, s'aplica una velocitat de 30 m/s que és una velocitat una mica inferior a 120 km/h ja que és la màxima velocitat permesa per la Direcció General de Trànsit (DGT) per circular per qualsevol autopista de l'Estat i, a més a més, és la velocitat que es va utilitzar en el treball en 2D. A part, se li ha aplicat una intensitat de turbulència de l'1%.
- La condició de contorn aplicada a la sortida del flux del volum de control, *outlet*, és la pressió de referència i pren un valor de 0 Pa, ja que cal especificar un valor relatiu de pressió i l'estudi es realitza a una pressió absoluta igual a la atmosfèrica. A més a més, degut a que en aquesta zona el flux d'aire és objecte de la turbulència provocada per el vehicle, se li aplica una intensitat de turbulència del 5%.
- Les superfícies del vehicle i la carretera (*body* i *free1*, respectivament) es defineixen com a parets, és a dir, són superfícies on l'efecte viscos del flux d'aire es té en compte. En el cas del vehicle, es defineix com a paret estàtica, en canvi, la carretera és una paret mòbil la velocitat de la qual és la mateixa que la d'entrada, és a dir, 30 m/s en la direcció del flux.



## 5.5. Configuració i càlcul de la solució

Abans de calcular la solució cal configurar el programa introduint el model de turbulència que es vol utilitzar. En aquest treball s'ha utilitzat el model  $k-\varepsilon$ , ja que és el model més utilitzat en CFD per simular fluxos turbulents. Aquest model consta de dues equacions que representen les condicions turbulentes del flux. Per una banda tenim la variable  $k$  (Energia Cinètica Turbulenta) que representa l'energia en la turbulència. D'altra banda tenim la variable  $\varepsilon$  (Dissipació Turbulenta) i determina la proporció de dissipació de l'energia cinètica.

A part, s'ha escollit l'opció *realizable* ja que les aplicacions industrials d'aquest model proven que és possible aconseguir bons resultats. Aquest és un model estable i convergeix ràpidament.

També s'ha seleccionat l'opció *Non-equilibrium Wall Functions* dins el model  $k-\varepsilon$ . Aquesta modificació permet obtenir una predicció més realista del comportament de la capa límit turbulenta sense un augment significatiu del temps ni de potència de càlcul necessària.

Durant el procés de càlcul, s'ha monitoritzat el coeficient de resistència a l'avanç i el coeficient de sustentació així com els residus per tal d'assegurar que els resultats obtinguts convergien. A l'hora de visualitzar el coeficient de resistència a l'avanç, al principi, es van obtenir valors negatius i, per tal de corregir-ho, es van canviar els eixos ja que també calia configurar-los correctament.

## 6. Anàlisis de resultats

A l'hora d'analitzar els resultats d'un estudi CFD cal calcular les forces que actuen sobre el vehicle, així com els coeficients aerodinàmics per valorar l'eficiència aerodinàmica.

A part, és de gran ajuda, la representació de gràfics dels camps de pressió i els vectors velocitat per tal de localitzar els punts que poden ser objecte de millora. A la Taula 6.1 es poden observar tots els valors numèrics de l'estudi (forces, coeficients i eficiència).

L'eficiència és la relació entre el  $C_L$  i el  $C_D$  i, s'utilitza principalment per valorar el funcionament de perfils alars però també pot ser útil per valorar el funcionament aerodinàmic del vehicle en aquest estudi.

El programa de simulació ha utilitzat una àrea de referència de  $1,7 \text{ m}^2$  i una densitat de  $1,225 \text{ kg/m}^3$  per al càlcul del  $C_D$  i  $C_L$ .

Variable	Valor
$C_L$	-6,42E-2
$C_D$	3,67E-1
$C_L/C_D$	0,1749
<i>Lift</i>	-60,16 N
<i>Drag</i>	343,92 N

Taula. 6.1. Valors dels coeficients, forces i eficiència

La representació del camp de pressions que actua sobre el vehicle és important per saber on es troben els punts d'estancament i les zones de sobrepressió i depressió i poder millorar el comportament aerodinàmic. A la Figura 6.1 es pot observar la distribució de pressions sobre la superfície del vehicle.



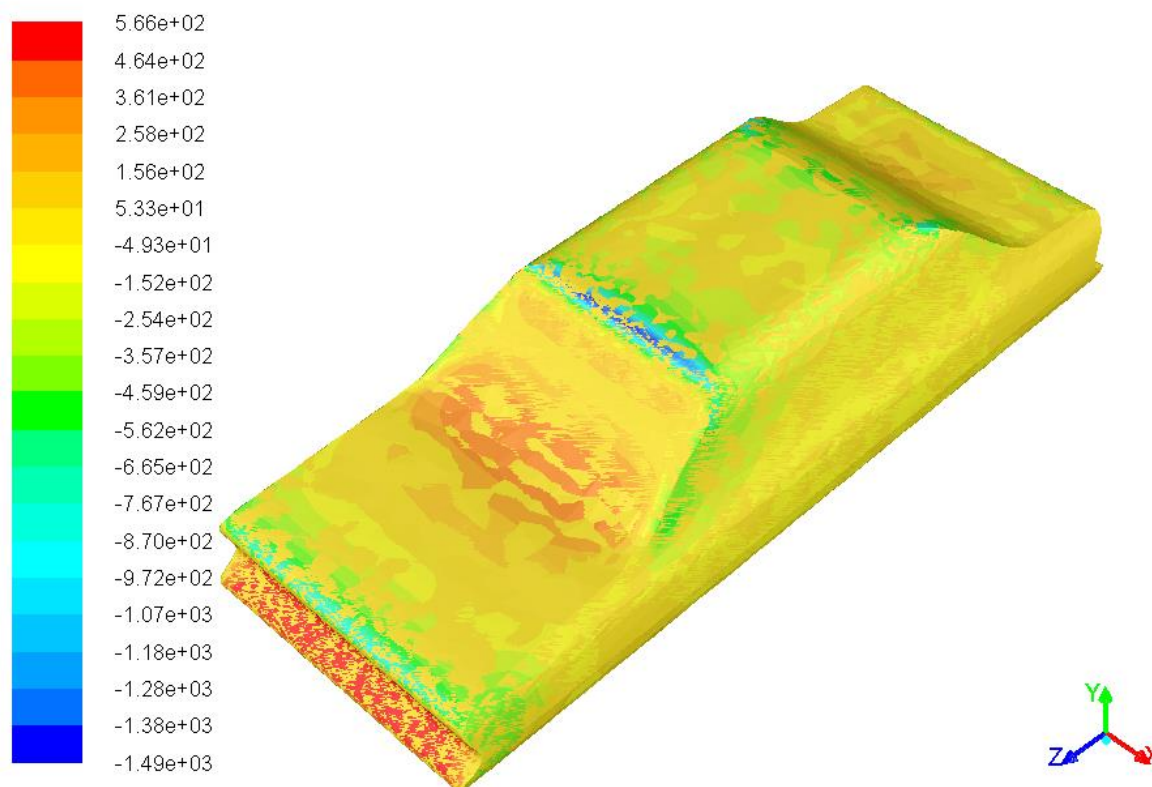


Fig. 6.1. Representació del camp de pressions

A la figura anterior, les zones representades de color vermell corresponen a punts d'estancament, és a dir, zones on la pressió és màxima i la velocitat és mínima. Aquestes zones corresponen al para-xocs davanter i a la unió del capó amb el parabrisa. D'altra banda, les zones representades de color blau corresponen a les que tenen mínima pressió i una alta velocitat. Bàsicament es concentra a la unió del parabrisa davanter amb el sostre.

Aplicant l'*Equació de Bernoulli* entre un punt A, situat en un punt qualsevol del flux lliure d'aire que s'apropa al vehicle i, un punt B, situat al para-xocs davanter, es pot calcular la pressió aplicada en aquest segon punt, la qual hauria de ser semblant a l'obtinguda amb el programa de simulació.

La següent equació mostra el *Principi de Bernoulli*.

$$\frac{P_A}{\gamma} + z_A + \frac{v_A^2}{2g} = \frac{P_B}{\gamma} + z_B + \frac{v_B^2}{2g}$$

On:

$$P_A = 0 \text{ Pa}$$

$$\gamma = \rho g$$

$$z_A = z_B = 0$$

$$v_A = 30 \text{ m/s}$$

$$v_B = 0 \text{ m/s}$$

$$P_B = \frac{v_A^2 \cdot \rho \cdot g}{2 \cdot g} = \frac{30^2 \cdot 1,225}{2} = 551,25 \text{ Pa}$$

Si calculem l'error relatiu d'aquest resultat amb l'obtingut gràficament:

$$\% \text{ error relatiu} = \frac{551,25 - 566}{566} \cdot 100 = -2,6 \%$$

Com l'error és menor d'un 5%, es pot considerar que el resultat és correcte.

Un cop estudiat l'efecte de la pressió en el model, falta estudiar l'efecte complementari a la pressió, la velocitat. D'aquest gràfic junt amb el de pressions es pot extreure les zones que seran objecte de millora en el vehicle per tal de millorar l'eficiència aerodinàmica. A la Figura 6.2 es pot observar la representació de la velocitat del fluid al voltant del cotxe.





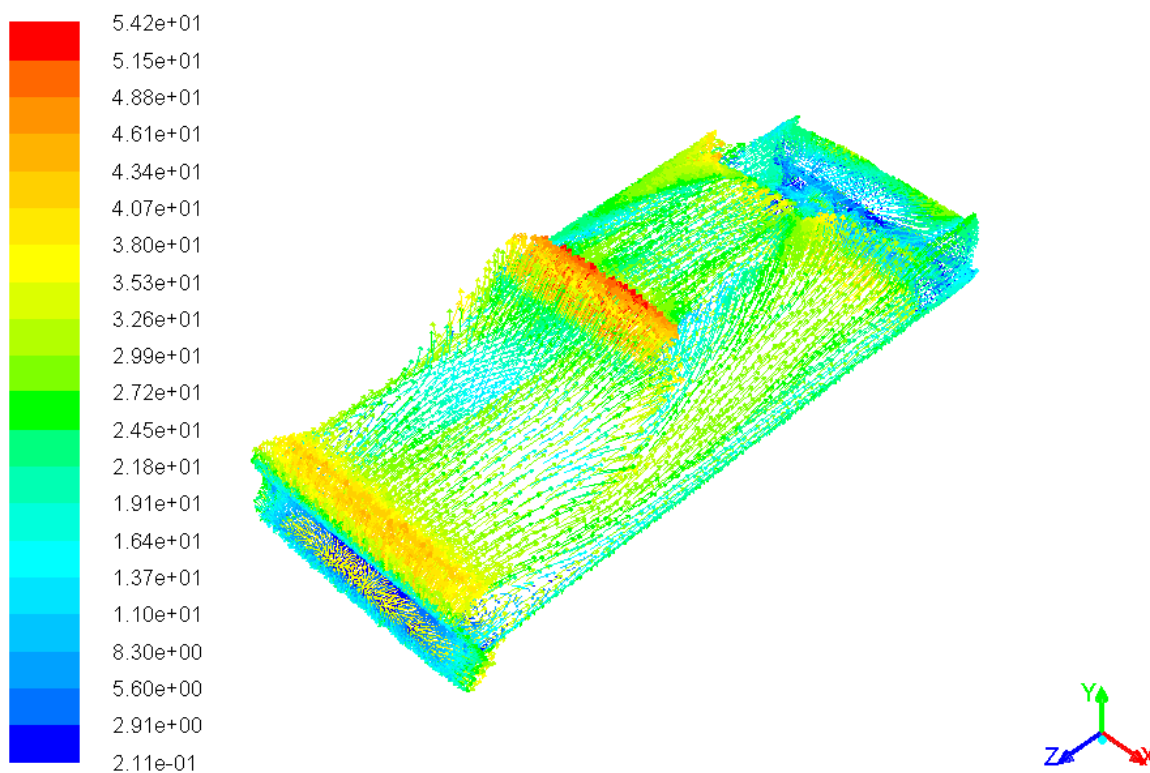


Fig. 6.2. Representació del camp de velocitats

Els resultats que es poden extreure d'aquesta Figura és complementari al que s'ha comentat prèviament amb el gràfic de pressions ja que el fluid augmenta la seva velocitat en els punts on hi ha depressions i viceversa. A la Figura 6.3 es pot observar la vista lateral del camp de velocitats al voltant del vehicle.

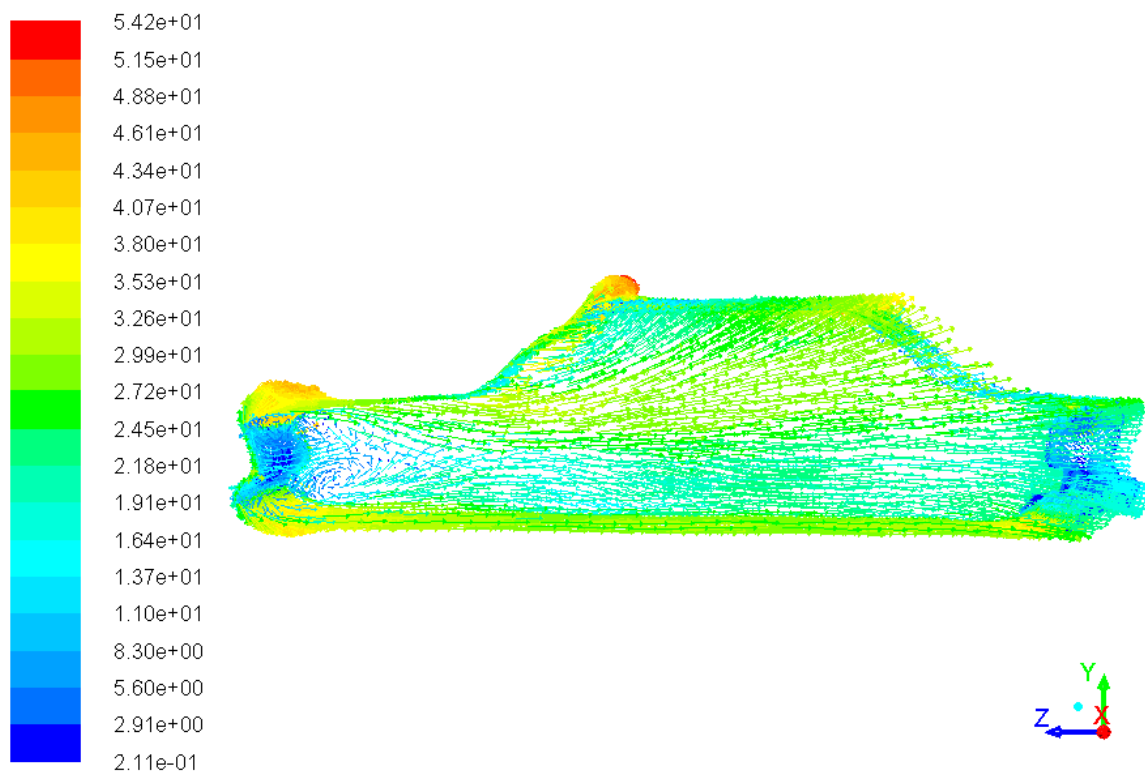


Fig. 6.3. Vista lateral del camp de velocitats





## 7. Optimització del model

### 7.1. Primera modificació

La primera modificació del model ha estat un arrodoniment al para-xocs davanter per suavitzar la unió entre el para-xocs i la zona inferior del vehicle i millorar el flux d'aire que circula al voltant del cotxe. Tal i com s'ha estudiat a l'apartat 4.2.1, s'ha reduït l'altura del punt d'estancament per tal de disminuir el coeficient de resistència a l'avanç. A la Figura 7.1 es mostra la primera modificació realitzada.

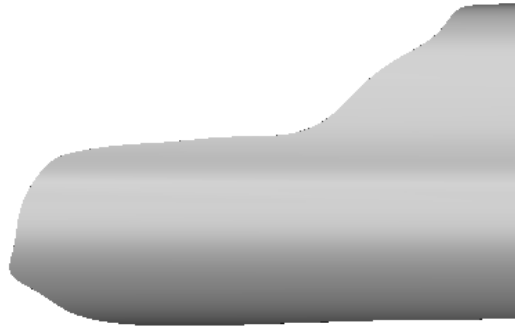


Fig. 7.1. Para-xocs de la primera modificació del vehicle

Tal i com es pot apreciar a la Figura 7.2, s'ha aconseguit disminuir lleugerament la pressió a la zona del para-xocs, tot i que el coeficient de resistència a l'avanç hagi augmentat molt lleugerament. A la Figura 7.3 observem el camp de velocitats al voltant del cotxe.

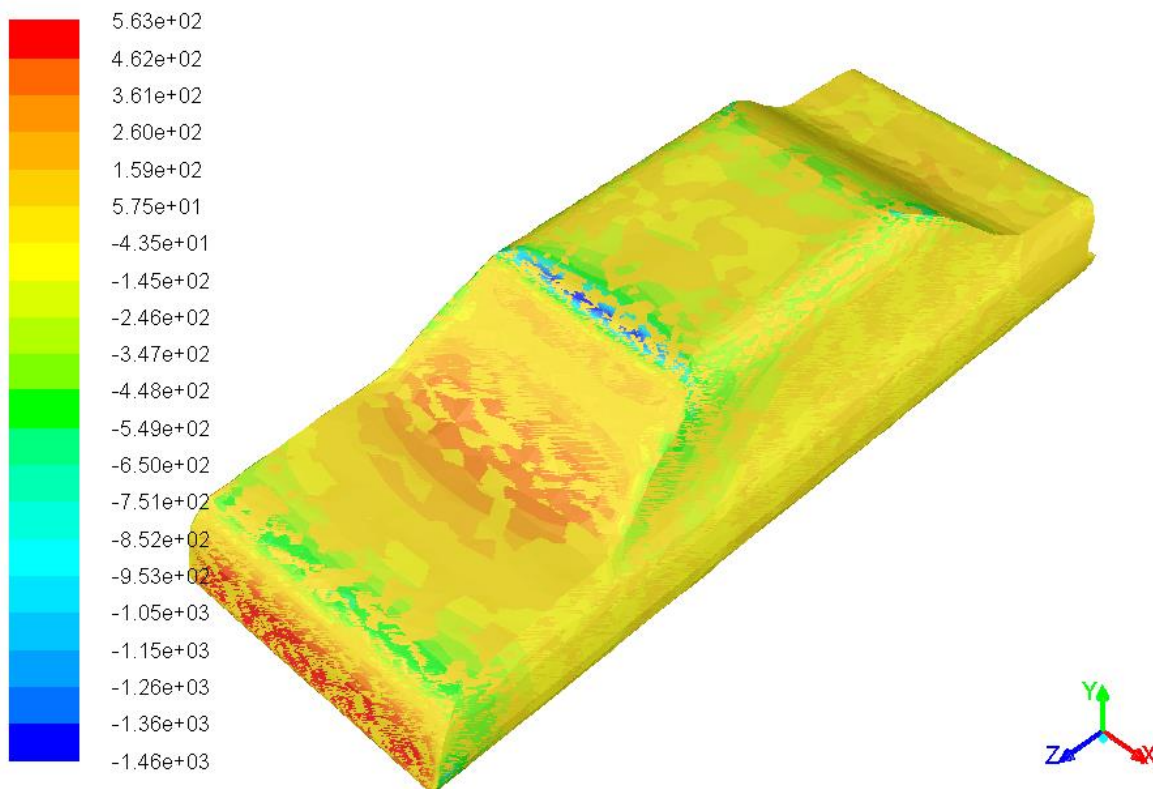


Fig. 7.2. Camp de pressions de la primera modificació

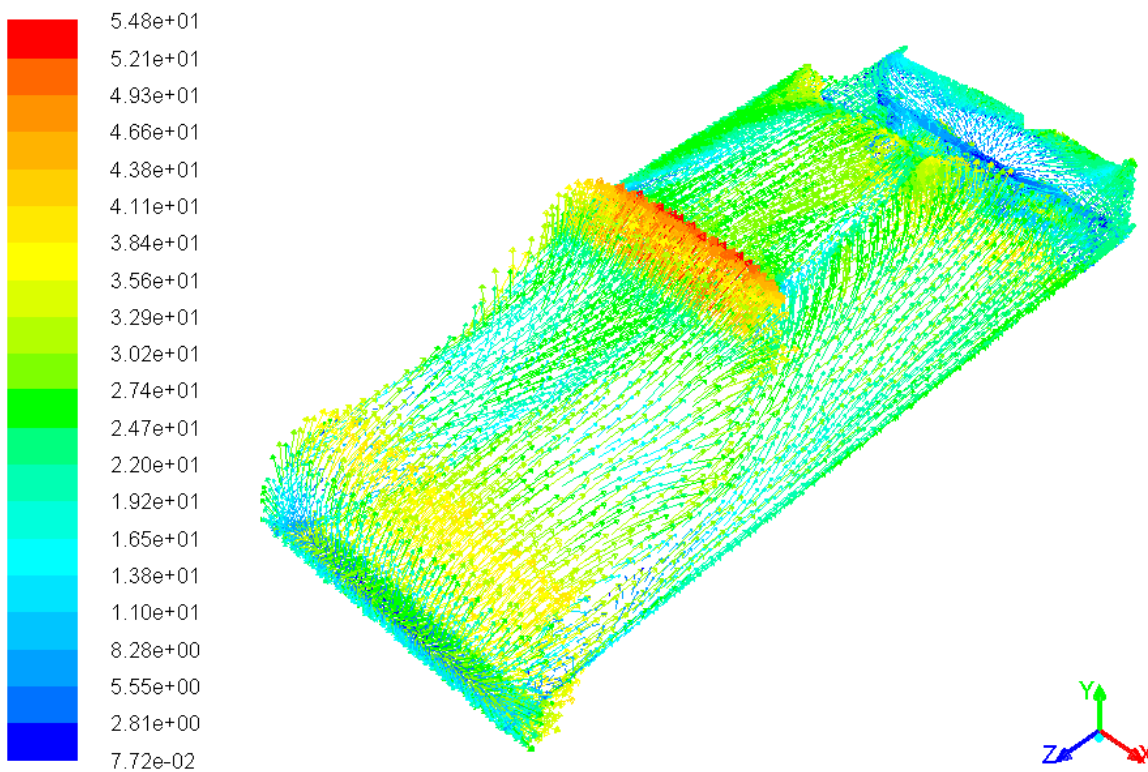


Fig. 7.3. Camp de velocitats de la primera modificació



Finalment, com es pot observar a la Taula 7.1, el coeficient de resistència a l'avanç ha augmentat però el de sustentació ara és més negatiu respecte el model inicial. Per tant, l'eficiència d'aquesta primera modificació ha augmentat. Els resultats de les variacions són respecte l'original.

Magnitud	Valor	Variació	Magnitud	Valor	Variació
$C_D$	0,369	+0,54%	Drag	345,78 N	+0,54%
$C_L$	-0,223	-247,35%	Lift	-208,98 N	-247,37%
$C_L/C_D$	0,6043	+245,51%			

Taula. 7.1. Resultats de la primera modificació

## 7.2. Segona modificació

La segona modificació del vehicle consisteix, tal i com s'ha estudiat a l'apartat 4.2.2, posar l'angle del capó ( $\alpha$ ) a uns  $10^\circ$  i l'angle del parabrisa ( $\delta$ ) el més proper a  $60^\circ$ . A la Figura 7.4 s'aprecia com l'angle  $\alpha$  és de  $10^\circ$  i l'angle  $\delta$  és de  $51^\circ$  aproximadament. Cal afegir que els angles modificats són molt semblants als del model original i, és per això que els resultats obtinguts han estat gairebé idèntics.

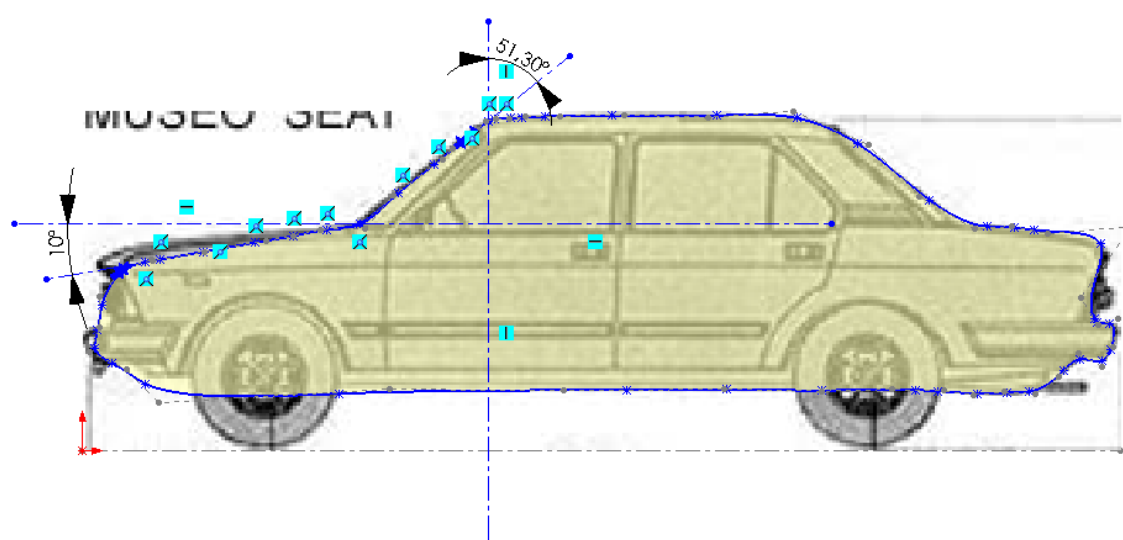


Fig. 7.4. Angles del capó i del parabrisa de la segona modificació

A la Figura 7.5 es pot observar el camp de pressions i apreciem que la pressió màxima és molt semblant a la de la modificació 1. És per això que els resultats de la modificació 1 i 2 són gairebé idèntics. A la Figura 7.6 veiem el camp de velocitats al voltant del cotxe.

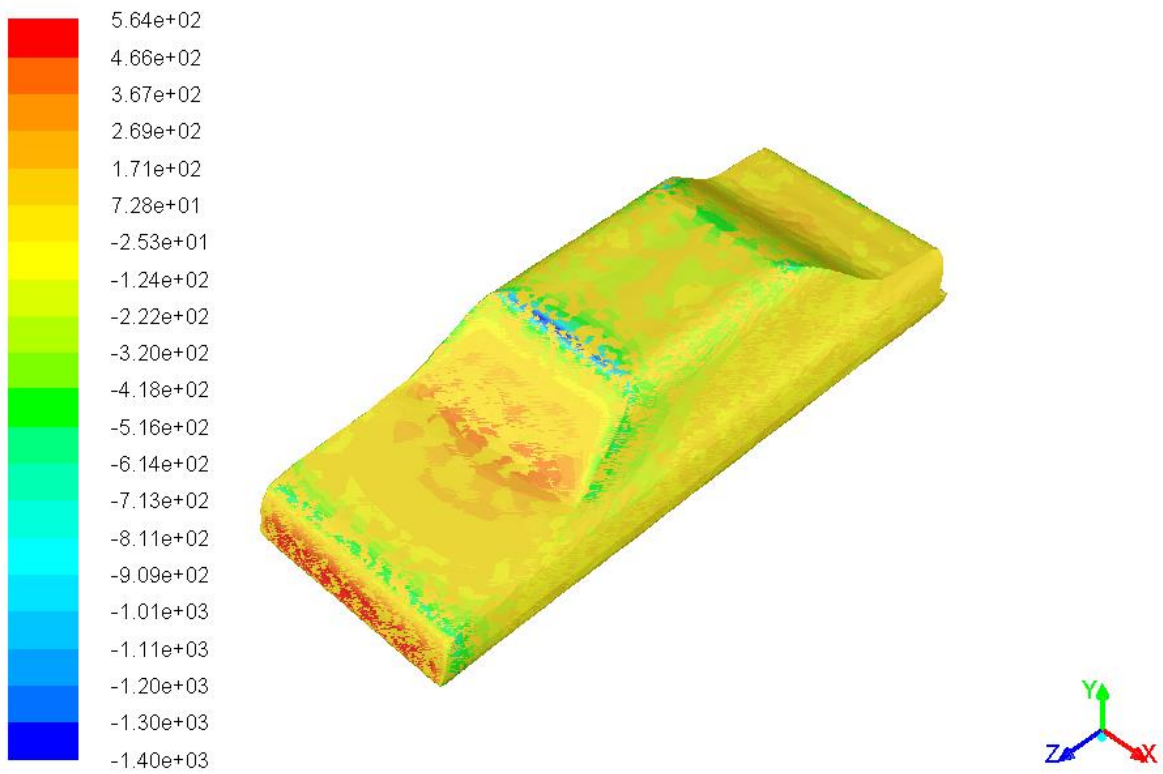


Fig. 7.5. Camp de pressions de la segona modificació



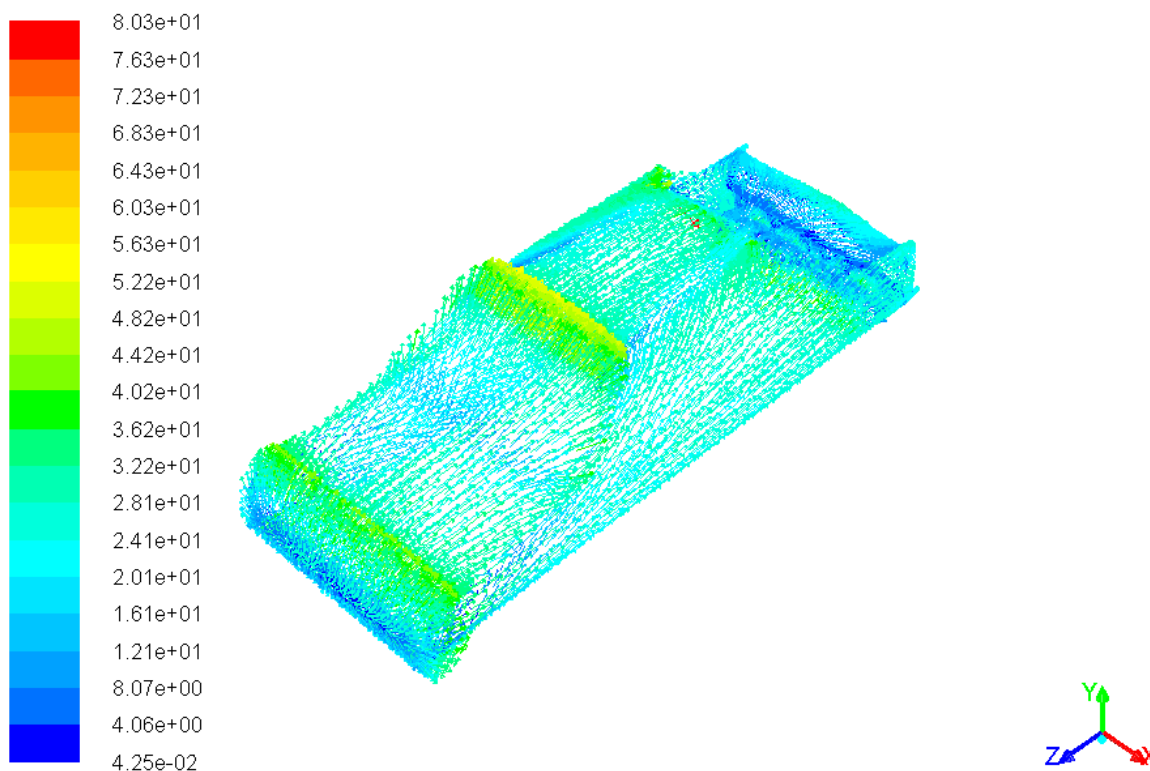


Fig. 7.6. Camp de pressions de la segona modificació

Finalment, com es pot observar a la Taula 7.2, el coeficient de resistència a l'avanç ha disminuït però el de sustentació ara és menys negatiu respecte la primera modificació. Per tant, l'eficiència d'aquesta segona modificació ha disminuït un 1% aproximadament. Els resultats de les variacions són respecte la primera modificació.

Magnitud	Valor	Variació	Magnitud	Valor	Variació
$C_D$	0,366	-0,81%	Drag	342,99 N	-0,81%
$C_L$	-0,219	+1,79%	Lift	-205,23 N	+1,79%
$C_L/C_D$	0,5981	-1,03%			

Taula. 7.2. Resultats de la segona modificació

### 7.3. Tercera modificació

La tercera i última modificació consisteix en la incorporació d'un spoiler a la part posterior del vehicle per tal d'augmentar el *downforce* i disminuir el coeficient de sustentació. A la Figura 7.7 es pot observar el spoiler que s'ha implementat.

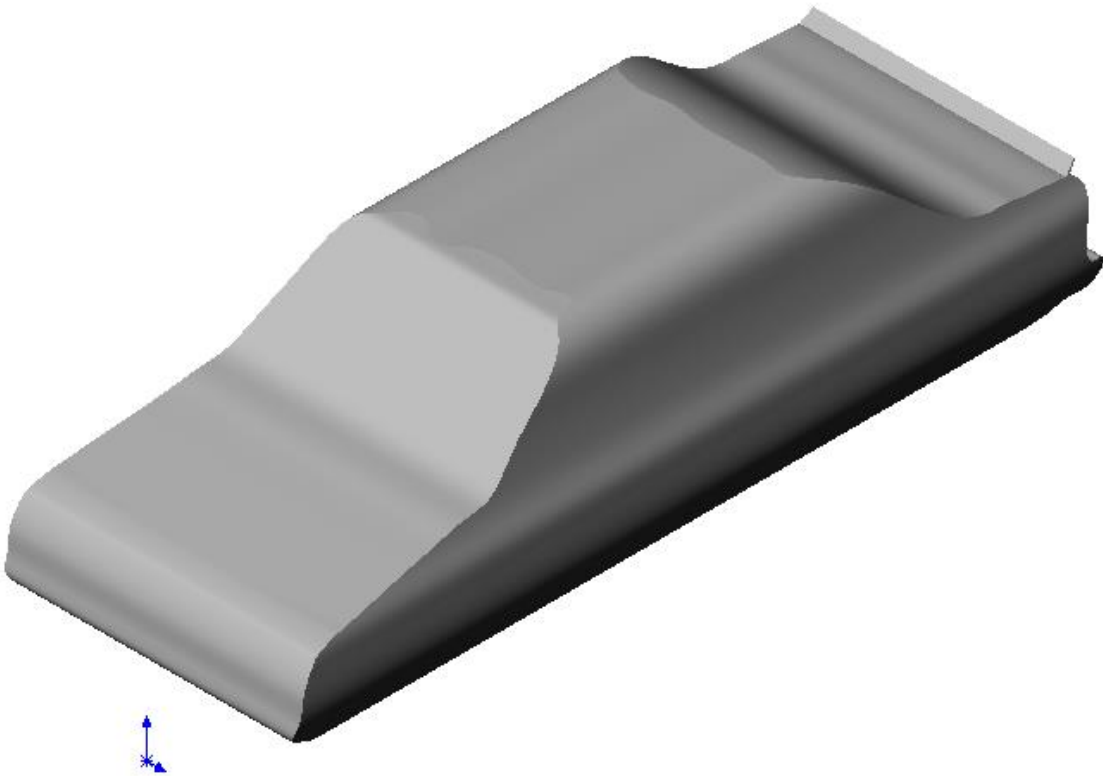


Fig. 7.7. Implementació del spoiler posterior

A la Figura 7.8, es pot observar com hi ha un augment de la pressió al spoiler posterior que implica un augment del *downforce*. Per tant, tot i que augmenti el coeficient de resistència a l'avanç, hem aconseguit fer augmentar en valor absolut el coeficient de sustentació i ara és més negatiu.



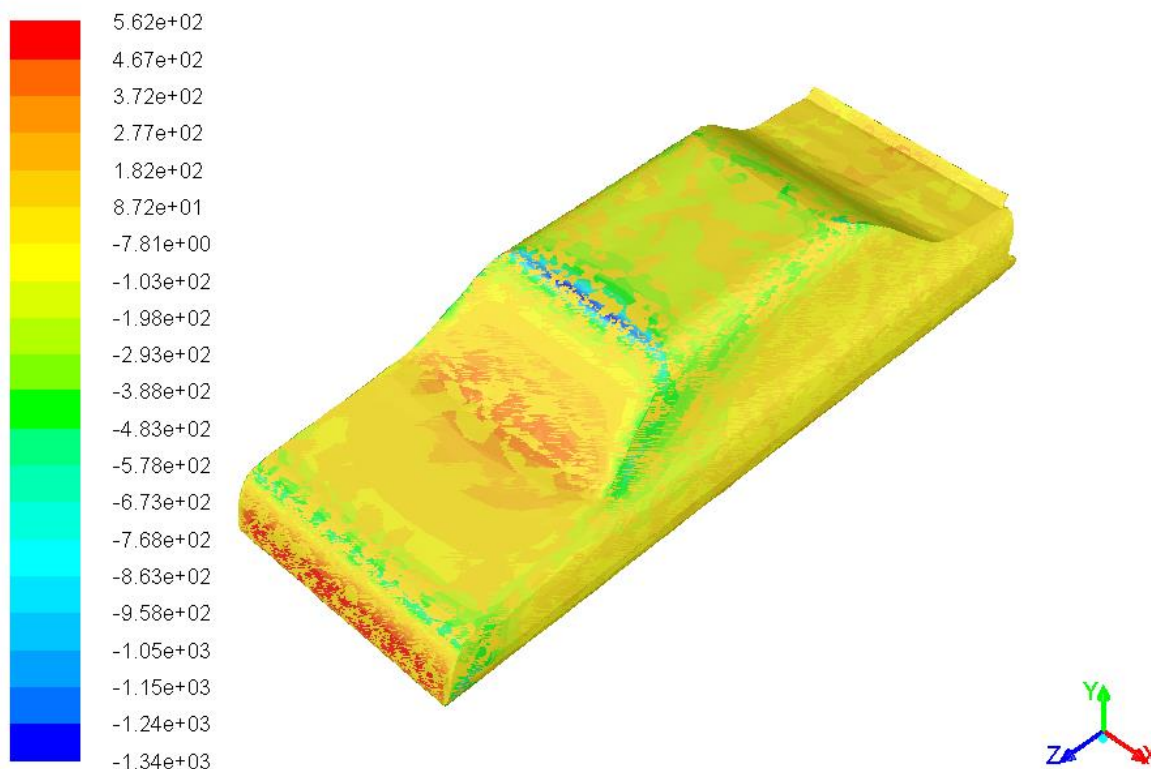


Fig. 7.7. Camp de pressions de la tercera modificació

Tal i com s'observa a la taula 7.3 s'ha aconseguit un augment considerable de l'eficiència aerodinàmica del vehicle comparant-lo amb les altres modificacions. Cal afegir que les variacions són respecte la modificació 2.

Magnitud	Valor	Variació	Magnitud	Valor	Variació
$C_D$	0,4107	+12,21%	Drag	384,88 N	+12,21%
$C_L$	-0,3828	+74,79%	Lift	-358,73 N	+74,79%
$C_L/C_D$	0,932	+55,83%			



## 8. Planificació temporal i econòmica

### 8.1. Planificació temporal

Per tal de fer la planificació d'activitats del projecte s'utilitzarà un diagrama de Gantt. A la Taula 8.1 s'aprecien les diferents activitats que cal dur a terme, així com la duració i si es tracta d'una activitat crítica o no.

Una activitat és crítica quan no es poden canviar els seus instants inicials i finals sense modificar la durada del projecte. El camí crític és la unió de totes les activitats crítiques, que, en aquest cas, és A-C-E-F-G-H i té una durada total del projecte de 105 dies.

Activitats	Inici	Final	Durada	Activitat crítica
(A) Recordar Solidworks	25/01/16	01/02/16	7 dies	Sí
(B) Recerca d'informació	30/01/16	20/02/16	21 dies	No
(C) Disseny CAD del vehicle	02/02/16	23/02/16	21 dies	Sí
(D) Aprenentatge de FLUENT	21/02/16	28/02/16	7 dies	No
(E) Redacció de la memòria (Part 1)	01/03/16	22/03/16	21 dies	Sí
(F) Estudi CFD	22/03/16	16/04/16	25 dies	Sí
(G) Optimització del disseny	17/04/16	27/04/16	10 dies	Sí
(H) Redacció de la memòria (Part 2)	13/04/16	04/05/16	21 dies	Sí

Taula. 8.1. Llista d'activitats del projecte

A la Figura 8.1 es pot observar la representació del diagrama de Gantt utilitzant les activitats anteriors.





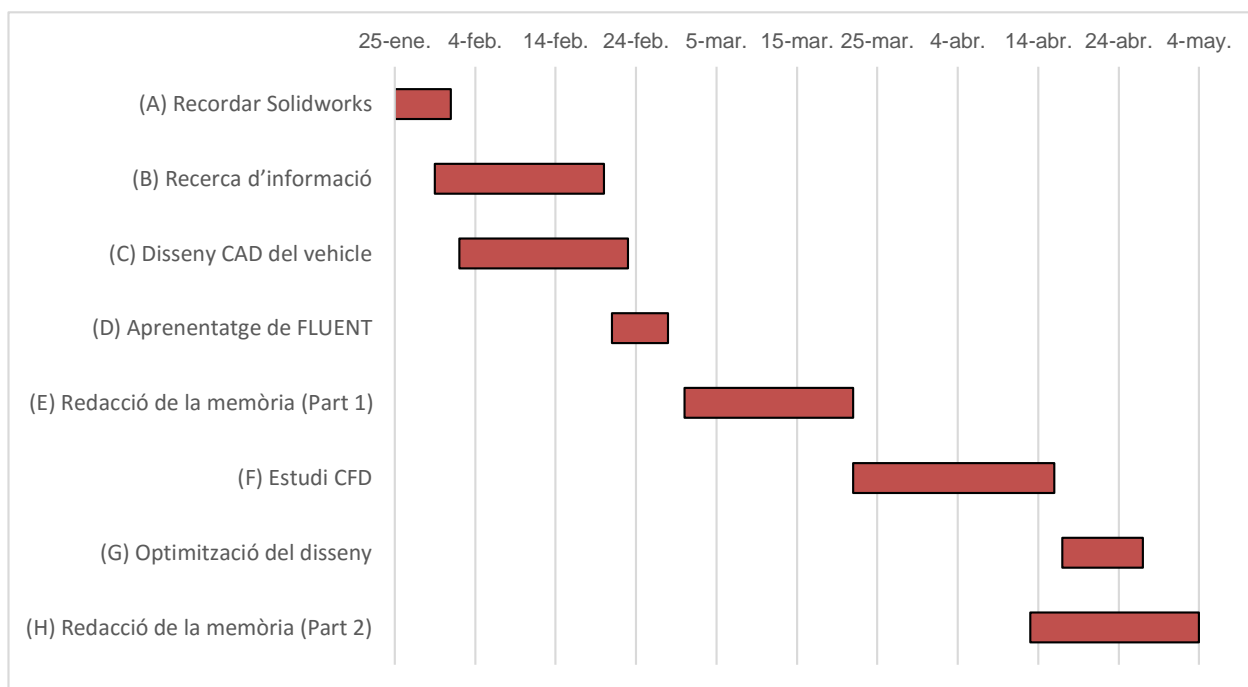


Fig. 8.1. Diagrama de Gantt del projecte

## 8.2. Planificació econòmica

El càlcul del pressupost del treball s'ha realitzat en base a quatre punts: enginyeria, *software*, consum elèctric i amortització.

La part d'enginyeria representa els honoraris que rep l'enginyer per la realització del projecte. S'ha calculat tenint en compte una remuneració de 10€/h durant 4h/dia, que multiplicat per els 105 dies que dura el projecte són 420h.

La part de *software* és la que representa la major part del pressupost ja que consta de l'adquisició de les llicències dels programes informàtics. Per aquest projecte, s'ha utilitzat el paquet ofimàtic *MS Office*, el programa de simulacions numèriques *ANSYS Workbench* on inclou el *FLUENT*. Finalment, s'ha utilitzat el programa *Solidworks* per realitzar el model 3D.

Per tal de comptabilitzar el consum elèctric s'ha utilitzat la potència màxima que marca el transformador, 120 W, durant tota la durada del projecte i s'ha considerat un preu de la llum de 0,14 €/kWh.

Finalment, pel càlcul de l'amortització de l'ordinador portàtil s'ha pres una vida útil de 5 anys i un percentatge de pèrdua de valor anual del 25% durant la realització del projecte.

Sumant totes les parts del pressupost, obtenim un cost total del projecte de 13912,94 €. A la Taula 8.2 s'aprecia el pressupost desglossat en les diferents parts i a la Figura 8.2 el diagrama circular del pressupost del projecte.

<b>Enginyeria</b>	<b>Concepte</b>	<b>Preu per hora</b>	<b>Temps invertit</b>	<b>Total</b>	
	Honoraris	10 €/h	420 h	4200,00 €	
	<b>Total</b>			4200,00 € (1)	
<b>Software</b>	<b>Concepte</b>	<b>Preu adquisició</b>	<b>Percentatge d'ús*</b>	<b>Total</b>	
	<i>MS Office</i>	100 €	33,33%	33,33 €	
	<i>ANSYS Workbench</i>	7500 €	33,33%	2500,00 €	
	<i>Solidworks</i>	10950 €	33,33%	3650 €	
	<b>Total</b>			6183,33 € (2)	
<b>Consum elèctric</b>	<b>Concepte</b>	<b>Potència</b>	<b>Temps d'ús</b>	<b>Preu unitari</b>	<b>Total</b>
	Ordinador portàtil	0,12 kW	420 h	0,14 €/kWh	7,06 €
	<b>Total</b>				7,06 € (3)



Costs totals	Concepte		Total	
	Cost total	(1)+(2)+(3)	10390,39 €	(4)
	Imprevistos	10% de (4)	1039,04 €	(5)
	Total abans d'impostos	(4)+(5)	11429,43 €	(6)
	I.V.A	21% de (6)	2400,18 €	(7)
	<b>Total després d'impostos</b>	<b>(6)+(7)</b>	<b>13829,61 €</b>	<b>(8)</b>

Amortització	Concepte	Preu adquisició	Coefficient d'amortització	Percentatge d'ús*	Total
	Ordinador portàtil	1000 €	0,25	33,33%	83,33 €
	<b>Total</b>				<b>83,33 € (9)</b>

<b>Cost total del projecte</b>	<b>(8)+(9)</b>	<b>13912,94 €</b>
--------------------------------	----------------	-------------------

\*Percentatge de l'any, on 100% equival a 12 mesos

Taula. 8.2. Pressupost del projecte

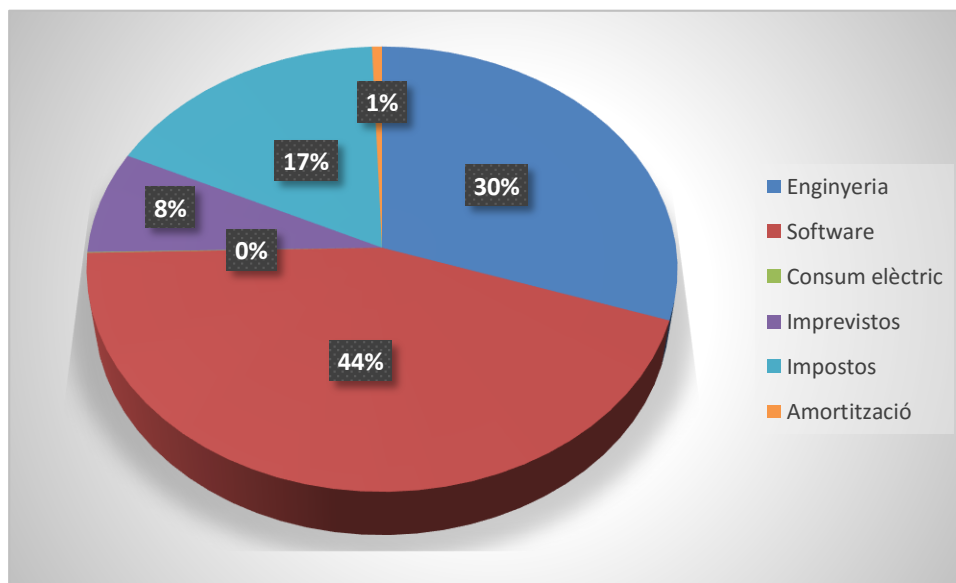


Fig. 8.2. Gràfic circular del pressupost del projecte

## Conclusions

En aquest projecte s'ha complert satisfactòriament els objectius plantejats. Primerament, s'ha posat en pràctica els coneixements obtinguts durant el Grau, en especial, el què s'ha après de la mecànica de fluids aplicat en el món de l'automoció.

Per començar, s'ha realitzat una simulació inicial per extreure els resultats dels coeficients de resistència a l'avanç i sustentació per realitzar una valoració quantitativa i qualitativa del vehicle aplicant les condicions de contorn adients en el programa de simulació. A partir d'aquí, s'ha optat per realitzar modificacions en el para-xocs, a la unió entre el capó i el parabrisa i la implementació del spoiler posterior. Tot i que hi ha hagut un petit augment en el coeficient de resistència a l'avanç, s'ha aconseguit una millora substancial en el coeficient de sustentació fet que ha millorat molt l'eficiència aerodinàmica.

Un altre objectiu del treball que s'ha complert ha estat el d'estudiar com funcionen els diferents elements que formen un vehicle i com es poden millorar per tal d'optimitzar l'eficiència aerodinàmica, ja sigui variant angles del capó, disminuint el punt d'estancament o afegint spoilers al vehicle.

A més a més, s'ha aconseguit profunditzar més amb els programes informàtics Solidworks i Fluent que, durant el Grau, ja s'havien impartit classes. S'ha modelat el disseny 3D a partir de quatre vistes amb algunes mesures amb el programa Solidworks i, posteriorment, s'ha traslladat del model CAD al *software* CFD Fluent per tal de fer l'estudi.

Finalment, caldria afegir que a l'assignatura de Projecte 2 ja es va realitzar el mateix estudi en 2D (utilitzant la mateixa velocitat també) i els resultats obtinguts del model definitiu tenen un error considerable respecte als resultats en 3D ja que en aquell estudi el coeficient de resistència a l'avanç va ser de 0,55 i el de sustentació de -1,3 amb una eficiència de 2,36.

Un cop finalitzat aquest estudi, a continuació, s'hauria de fer un model a escala del vehicle per realitzar un estudi en el túnel de vent per poder validar els resultats obtinguts a la simulació numèrica. Com ja s'ha comentat, l'avantatge de la simulació numèrica és la quantitat de diners que s'estalvia l'empresa i el temps que es tardaria en realitzar un model a escala i anar-lo modelant segons els resultats que s'obtenen a les proves en túnel de vent.



Finalment, gràcies a aquest estudi realitzat, es poden seguir dos camps en el futur. El primer és el del disseny assistit per ordinador (o *CAD*) on caldria millorar la geometria per fer-ho el més exacta possible, de cara a millorar resultats ja que és una font d'errors. El segon seria el de seguir investigant en el mallat ja que també és una altra font d'errors. Aconseguir un mallat eficient pot suposar una millora en la precisió dels resultats així com el temps i potència de càlcul.

## Agraïments

En primer lloc m'agradaria agrair al professor Enric Trillas per acceptar la tutoria d'aquest treball i, a part, m'ha ajudat a solucionar molts dels problemes que he tingut, que no han estat pocs.

També m'agradaria donar les gràcies als meus amics que m'han estat ajudant en tot el que he necessitat i per totes les hores que hem estat estudiant junts.

Finalment, i no menys important, a cada un dels membres de la meva família que també han estat recolzant-me aquests anys, tot i que s'ha patit, també s'ha gaudit.



## Bibliografia

- [1] WHITE, F. M. *Mecánica de Fluidos (Quinta Edición)*, Madrid: McGRAW-HILL, 2004.
- [2] SARAROLS, M., VECIANA, J. *Apunts de classe de l'assignatura vehicles*, Barcelona: Campus Virtual ETSEIB, 2015.
- [3] HUCHO, W. H. *Aerodynamics of Road Vehicles (Fourth Edition)*, USA: Society of Automotive Engineers, Inc, 1998.
- [4] UNIVERSIDAD DE VALLADOLID, MASTER EN AUTOMOCIÓN. *Apuntes de aerodinámica exterior*.
- [5] BARNARD, R.H. *Road Vehicle Aerodynamic Design: An Introduction (Second Edition)*, Hertfordshire: MechAero, 2001.
- [6] LANDMAN, D. *Flow Field Features and Aerodynamic Drag of Passenger Cars*, Old Dominion University.
- [7] LANFRIT, M. *Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with Fluent*, Darmstadt: Fluent Deutschland GmbH, 2005.
- [8] ANSYS, Inc. *Inlet Boundary Conditions*.