

## Treball final de grau

**Estudi:** Grau en Enginyeria Mecànica

**Títol:** Estudi comparatiu de generadors de vòrtexs en l'estructura d'un vehicle mitjançant programari CFD

**Document:** Memòria i Annexos

**Alumne:** Oleguer Muñoz Borrell

**Tutor:** José Ramón González

**Departament:** Enginyeria mecànica i de la construcció industrial

**Àrea:** Mecànica de fluids

**Convocatòria (mes/any):** Juny 2020

<b>MEMÒRIA</b> .....	1
<b>1. INTRODUCCIÓ</b> .....	1
1.1 Antecedents i origen de l'estudi .....	2
1.2 Objectius de l'estudi .....	2
1.3 Abast de l'estudi .....	3
<b>2. FONAMENTS TEÒRICS DE LA MECÀNICA DE FLUIDS</b> .....	4
2.1 Viscositat .....	4
2.2 Nombres adimensionals .....	5
2.3 Capa límit .....	6
2.4 Equacions de la mecànica de fluids .....	9
2.5 Força d'arrossegament ( <i>Drag</i> ) i força de sustentació ( <i>Lift</i> ) .....	11
<b>3. DISSENY DEL VEHICLE</b> .....	13
3.1 Geometria del cotxe .....	13
3.2 Vistes i dimensions .....	14
<b>4. METODOLOGIA</b> .....	15
4.1 Geometria .....	15
4.2 Mallat .....	17
4.3 Configuració i solució .....	21
4.4 Resultats .....	30
<b>5. GENERADORS DE VÒRTEXS</b> .....	32
5.1 Definició i principi de funcionament .....	32
5.2 Tipus de generadors de vòrtexs .....	35
<b>6. DISSENY DELS GENERADORS DE VÒRTEXS</b> .....	36
6.1 Factors de disseny .....	36
6.2 Disseny <i>GV1</i> .....	37
6.3 Disseny <i>GV2</i> .....	38
6.4 Disseny <i>GV3</i> .....	39
6.5 Disseny <i>GV4</i> .....	40
<b>7. ANÀLISI COMPARATIU DELS DISSENYS DE <i>GV</i></b> .....	42
7.1 Simulació del cotxe sense <i>GV</i> .....	42
7.2 Simulació del cotxe amb <i>GV1</i> .....	44
7.3 Simulació del cotxe amb <i>GV2</i> .....	45
7.4 Simulació del cotxe amb <i>GV3</i> .....	46
7.5 Simulació del cotxe amb <i>GV4</i> .....	47
7.6 Comparativa dels resultats obtinguts .....	48
<b>8. ANÀLISI COMPARATIU DELS PARÀMETRES I CONFIGURACIONS DELS <i>GV</i></b> .....	52

8.1 Paràmetre: Altura del GV .....	53
8.2 Paràmetre: Quantitat de GV .....	55
8.3 Paràmetre: Angle entre els GV.....	58
8.4 Paràmetre: Velocitat de funcionament .....	60
9. RESULTATS .....	62
10. CONCLUSIONS.....	63
11. BIBLIOGRAFIA .....	64
ANNEXOS .....	65
A. SIMULACIÓ DE GV EN UNA PLANXA.....	65
B. IMPACTE MEDIABIENTAL .....	68
C. REPRESENTACIÓ TEMPORAL DE L'ESTUDI .....	69
D. COST DE L'ESTUDI.....	70

# MEMÒRIA

## 1. INTRODUCCIÓ

A finals del segle XIX es van començar a dissenyar i fabricar cotxes de combustió interna amb gasolina. Anys més tard (segle XX), amb l'ajuda de la revolució industrial, moltes empreses van decidir dedicar-se a la producció d'automòbils.

Es va contemplar que els automòbils podien oferir un servei a la població molt útil, que per la època era totalment revolucionari. Els empresaris no van tardar en invertir en el sector, i poc a poc s'han anat millorant els vehicles fins a les tecnologies que tenim actualment.

Són moltes les branques de l'enginyeria que han evolucionat al llarg del temps (mecànica, termodinàmica, física de materials, mecànica de fluids, electrònica, processos de fabricació...)

De totes elles, he tractat la mecànica de fluids que es centra en l'estudi del comportament dels líquids i gasos. L'aplicació en l'automoció és de gran interès, ja que es tracta d'un cos (cotxe) immers en un fluid (aire). Quan el cotxe amb velocitat travessa l'aire, es genera una resistència aerodinàmica deguda a la força de fricció amb l'aire. El coeficient d'arrossegament (*Drag Coefficient*) és el valor atribuït a la forma geomètrica que s'ha de minimitzar per millorar el rendiment aerodinàmic. Una de les formes més aerodinàmiques és la geometria de gota d'aigua. Quan plou, l'aigua adopta la forma geomètrica més optimitzada amb el major rendiment aerodinàmic. Partint d'aquesta idea, el més ideal per l'aerodinàmica seria dissenyar un cotxe amb forma de gota d'aigua, però la raó per la qual no veiem cotxes amb aquesta forma és que sobre el disseny, no només s'hi basa l'aerodinàmica, també intervenen altres factors com la rigidesa del vehicle, la maniobrabilitat, l'estètica, l'ergonomia, la fabricació, el muntatge, el cost...

És per això, que s'intenten buscar elements, dispositius i formes geomètriques de la carrosseria d'un vehicle que millorin el rendiment aerodinàmic sense alterar els aspectes anteriors.

És aquí d'on sorgeix la idea del projecte: L'estudi de generadors de vòrtex en l'estructura d'un vehicle.

### 1.1 Antecedents i origen de l'estudi

La mecànica de fluids és un camp de gran aplicació en l'automoció, on s'intenta aconseguir el millor rendiment de l'aerodinàmica de la carrosseria. En la seva fabricació també s'hi troba involucrat la branca del disseny estètic i ergonòmic. Un punt bàsic pels turismes, on el primer que es veu a simple vista és el disseny exterior i serà el factor en que la majoria de clients es basaran a l'hora de comprar-se el cotxe.

En altres paraules, no té massa sentit pensar en un vehicle on només s'hi hagi treballat per obtenir el millor rendiment aerodinàmic, deixant de banda el disseny del producte. Per tant, el que es busca és un equilibri entre l'estètica i el rendiment de treball.

Per altre banda, la decisió i motivació del projecte ve donada per l'interès cap al món de l'aeronàutica, que en el cas d'aquest projecte s'aplica a l'aerodinàmica en l'automoció.

L'interès cap a les assignatures de mecànica de fluids, també em va ajudar a decidir-me per un projecte relacionat amb l'àmbit. La intenció era reforçar i incrementar els coneixements ja adquirits, apropant-me més en la branca d'enginyeria aerodinàmica.

Entendre com es comporta el flux d'aire que travessa un vehicle, amb l'ajuda del programa *ANSYS*, i incrementar els coneixements de la mecànica de fluids computacional (*CFD*) amb l'*ANSYS Fluent*. Considero que és un programa molt potent, amb moltes branques d'estudi de l'enginyeria. Aprofundir en el coneixement del programa és un objectiu i a l'hora una motivació més.

### 1.2 Objectius de l'estudi

Els objectius de l'estudi són varis però la idea és similar per tots ells:

- Com a objectiu principal, el projecte es centra en la reducció de la resistència aerodinàmica d'un cotxe, i per tant la reducció del consum de combustible que provoca l'ús de generadors de vòrtexs. Una vegada s'entén el comportament del flux d'aire, interessa conèixer el comportament d'aquests elements, i quines diferències i millores es poden observar entre un vehicle que no disposi d'ells i un altre que si que els incorpori.
- Elaborar una comparativa entre un cotxe sense els dispositius i un cotxe equipat amb els generadors de vòrtexs. S'analitzarà 4 dissenys per tal de fer l'estudi comparatiu i avaluar el comportament dels elements.

- Arribar mitjançant el software de simulació, a uns resultats el més verídics i reals possibles, corroborant les hipòtesis teòriques que es plantegen en el projecte.

El projecte intenta ser el més fidel i proper a la realitat possible, intentant sempre recrear la situació real amb dissenys de generadors de vòrtexs basats amb els existents.

### **1.3 Abast de l'estudi**

Es tracta d'un estudi comparatiu de generadors de vòrtexs en l'estructura d'un vehicle, on el seu contingut arriba fins:

- El modelatge 3D del vehicle i dels 4 dissenys de GV (generadors de vòrtexs). Es tracta de geometries simplificades i no s'explica com s'han modelat, sinó que es mostren els resultats finals, amb les especificacions que cal saber per entendre el projecte.

- La simulació amb *ANSYS Fluent* de les diferents distribucions dels GV en l'estructura del vehicle per tal d'obtenir unes comparatives que permetin valorar el comportament aerodinàmic. Les distribucions, configuracions i comparatives s'especifiquen dins el treball, i qualsevol paràmetre que no s'hagi estudiat i/o comparat queda fora de l'abast de l'estudi.

No entra dins l'abast de l'estudi la fabricació, ni la implementació dels GV, tot i que se'n parla en algun moment.

## 2. FONAMENTS TEÒRICS DE LA MECÀNICA DE FLUIDS

En aquest apartat s'expliquen els aspectes teòrics d'interès, necessaris per entendre el treball. Les explicacions són breus, sense aprofundir gaire, ja que s'interpreta que el lector té uns coneixements previs de mecànica de fluids.

### 2.1 Viscositat

La viscositat d'un fluid és la resistència a les deformacions graduals produïdes per les tensions tallants. Aquesta propietat física és causada per el fregament molecular i de les col·lisions entre partícules que es mouen a diferents velocitats, provocant una resistència al moviment.

Es relaciona la tensió tallant amb la següent equació:

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}$$

On  $\tau$  és la tensió tallant;  $\mu$  és la viscositat dinàmica, i  $\frac{du}{dy}$  és el gradient vertical de velocitats.

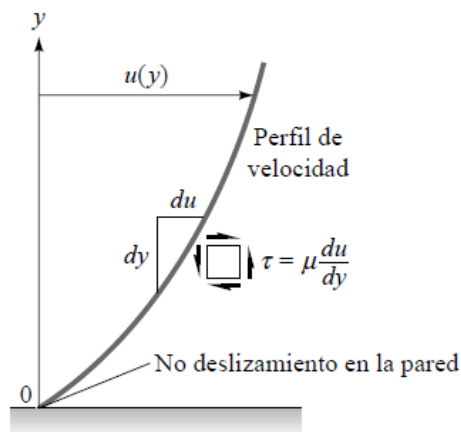


Figura 2.1: Tensió tallant d'un fluid a la zona propera a la paret.

La viscositat cinemàtica ( $\nu$ ) és el quocient entre viscositat dinàmica i la densitat del fluid.

## 2.2 Nombres adimensionals

A l'hora de fer experiments o simulacions d'aerodinàmica, cal tenir en compte els nombres adimensionals, que tenen la funció d'imposar les condicions perquè es compleixin les equacions que governen en un model o prototip a les escales imposades.

Existeixen molts nombres adimensionals en la mecànica de fluids i es tracten d'uns o d'altres segons el problema que estiguem treballant.

Un dels nombres més importants en l'aerodinàmica és el nombre de Reynolds. Aquest nombre relaciona les forces inercials i viscoses que apareixen en el fluid, i permet caracteritzar el règim del flux (laminar o turbulent). Reynolds es defineix com:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu}$$

On  $\rho$  és la densitat;  $v$  és la velocitat;  $L$  és la longitud característica que depèn del problema, i  $\mu$  és la viscositat dinàmica del fluid.

Un altre nombre molt important en aerodinàmica és el nombre de Mach. Permet estimar la relació de compressibilitat que té un gas. Es considera que si  $Ma < 0,3$  el fluid és incompressible en l'estudi de l'aerodinàmica i models amb gasos, simplificant els càlculs realitzats per l'ordinador en l'estudi.

Aquest numero es defineix com:

$$Ma = \frac{v}{c}$$

On  $v$  és la velocitat del fluid, i  $c$  és la velocitat del so en l'aire (la velocitat del so a nivell del mar és d'aproximadament 340 m/s).



### 2.3 Capa límit

Quan un fluid entra en contacte amb un cos, les partícules més properes al cos es frenen a causa del fregament, provocant un gradient vertical de velocitats. S'entén com a capa límit a la regió del flux on les velocitats van des de 0 (fluid tocant la paret), fins a 99% de la velocitat del flux inicial.

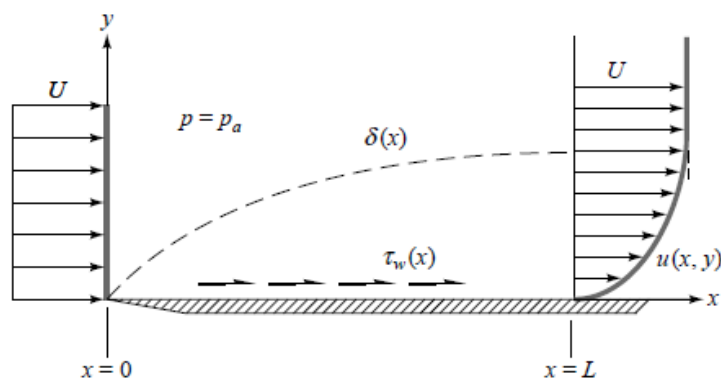


Figura 2.2: Creixement de la capa límit en una placa plana.

El desprendiment de la capa límit és el fenomen que apareix quan les partícules del fluid van perdent velocitat a mesura que avancen fins que ja no poder vèncer la pressió adversa. En alguns casos pot aparèixer un flux invers. Això fa que el flux d'aire deixi d'estar en contacte amb el cos. En aerodinàmica, interessa que el flux de la capa límit sigui turbulent, ja que es manté adherida al perfil durant més distància.

Per entendre millor el despreniment de la capa límit, es considera que  $\frac{dU}{dx}$  és el gradient de velocitats, i  $\frac{dp}{dx}$  és el gradient de pressions. Si  $\frac{dp}{dx} < 0$  s'entén que és un gradient de pressions favorable i no presentarà mai una separació. A continuació es mostra una representació del comportament de la capa en funció de les condicions, on PI és el punt d'inflexió del perfil de velocitats.

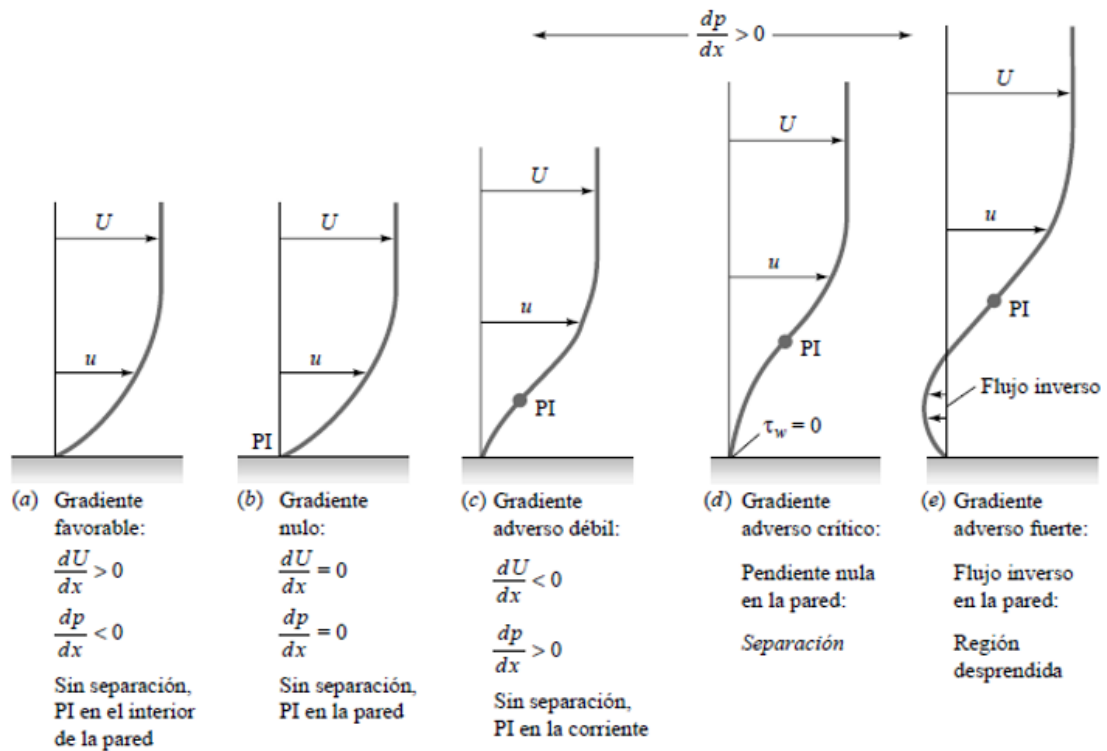


Figura 2.3: Efecte del gradient de pressió en el perfil de velocitats d'una capa límit; PI = Punt d'inflexió del perfil.

Un exemple clar per interpretar els gradients i el fenomen de la separació de la capa límit és una tovera-difusor:

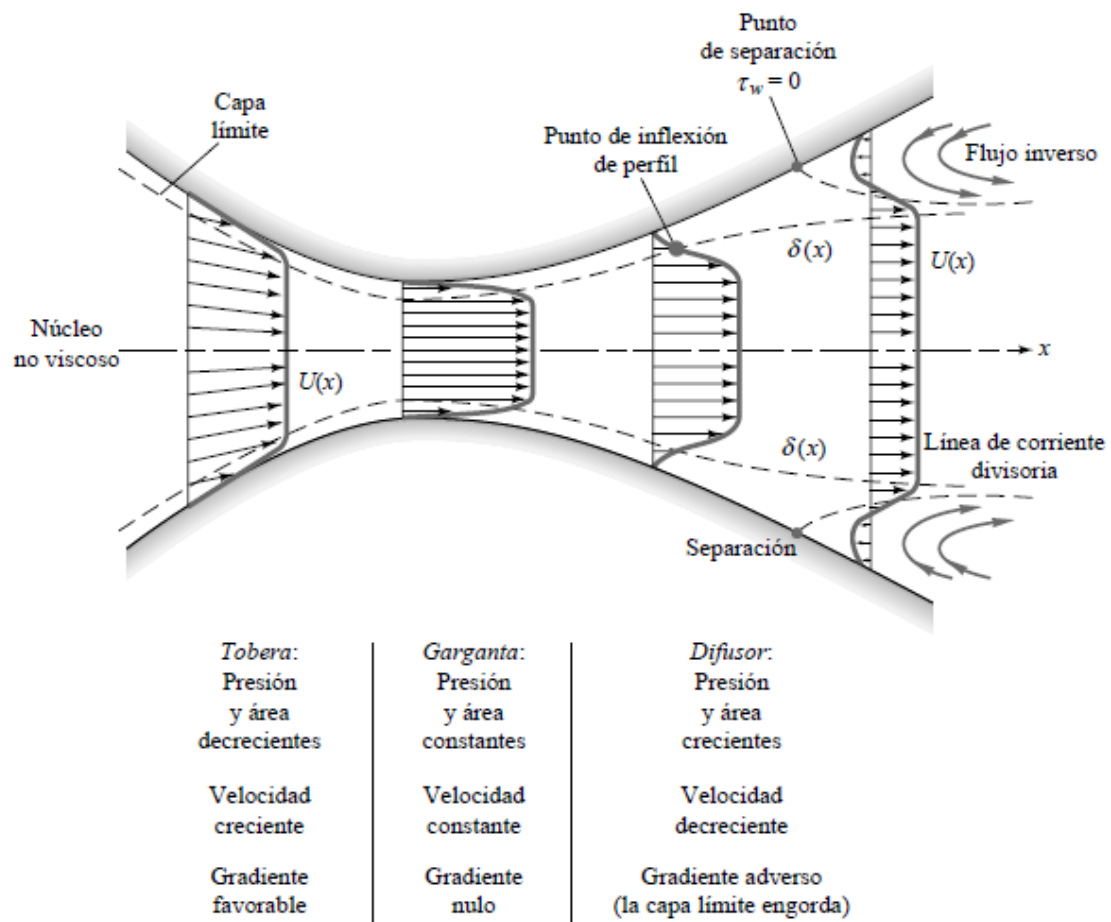


Figura 2.4: Creixement i separació de la capa límit en una configuració tovera-difusor.

Si ho apliquem al nostre cas, és el cotxe que té el moviment. Els efectes viscosos del flux es restringeixen a la capa límit. A fora la capa límit es considera fluid no viscos amb una velocitat “ $U$ ”, que és la relativa entre el vehicle i la carretera. Es pot calcular una aproximació de l’espessor de la capa límit amb les següents expressions:

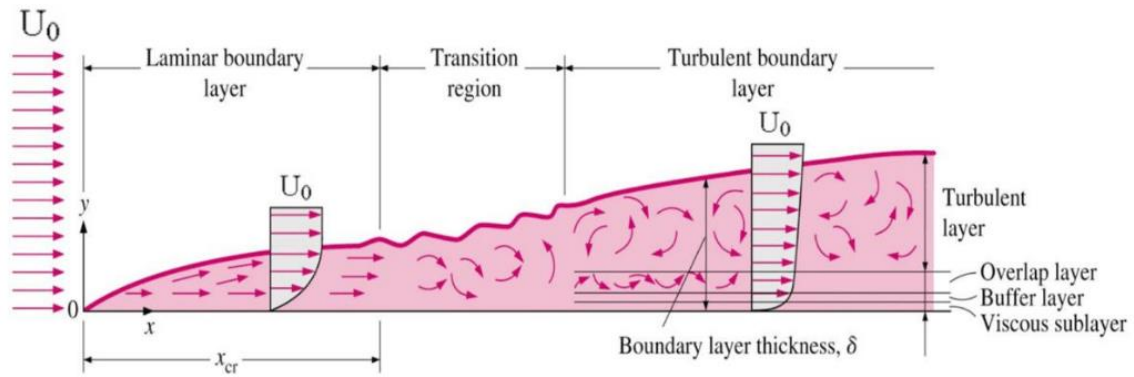


Figura 2.5: Regions segons el règim de flux.

En règim laminar:

$$\delta = \frac{5 \cdot x}{Re^{1/2}}$$

En règim turbulent:

$$\delta = \frac{0,382 \cdot x}{Re^{1/5}}$$

## 2.4 Equacions de la mecànica de fluids

Les equacions amb les que treballen els programes de mecànica de fluids computacionals són la conservació de la massa, la conservació del moment, i la conservació de l'energia.

Per a la conservació de la massa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla(\rho \cdot U) = 0$$

On  $\rho$  és la densitat, i  $U$  la velocitat.

Si el fluid és incompressible, la densitat és constant i l'expressió es simplifica:

$$\nabla \cdot U = 0$$

Per a la conservació del moment tenim les equacions de Navier-Stokes:

$$\rho \left( \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \rho g_x - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \rho g_y - \frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right)$$

$$\rho \left( \frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \rho g_z - \frac{\partial p}{\partial z} + \mu \left( \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right)$$

On  $\rho$  és la densitat;  $u$ ,  $v$  i  $w$  són les components de la velocitat en  $x$ ,  $y$  i  $z$ ;  $\mu$  és la viscositat dinàmica;  $g$  és la gravetat, i  $p$  és la pressió.

Per a la conservació de l'energia:

$$dE_t = dQ + dW$$

On  $dQ$  és la calor aportada al sistema;  $dW$  és el treball fet al sistema, i  $dE_t$  és l'increment del total de l'energia del sistema.

La següent equació que cal presentar és l'equació de Bernoulli, que descriu el comportament de un fluid movent-se al llarg d'una línia de corrent. Exposa que l'energia d'un fluid ideal (sense fregament ni viscositat) es manté constant al llarg del recorregut.

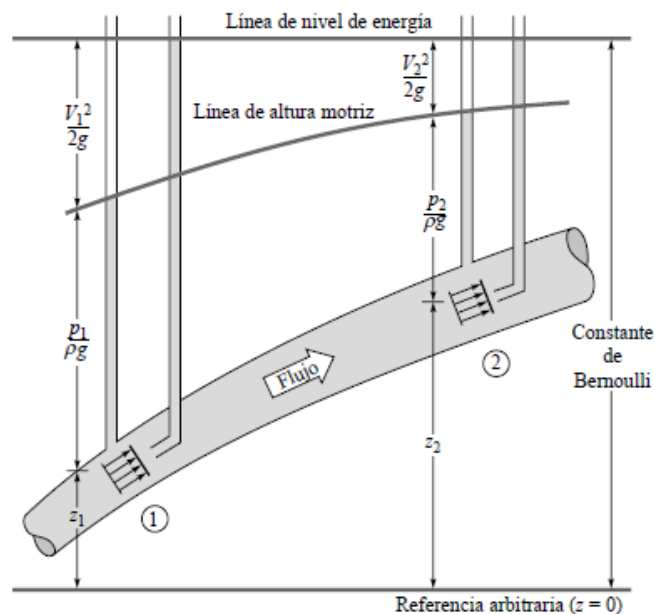


Figura 2.6: Representació gràfica dels termes de l'equació de Bernoulli.

L'equació de Bernoulli:

$$\frac{P}{\gamma} + h + \frac{v^2}{2g} = constant$$

Separat per termes tenim:

$\frac{P}{\gamma}$  és el terme de l'energia de la pressió;  $P$  és la pressió, i  $\gamma$  és el pes específic.

$h$  és l'energia potencial.

$\frac{v^2}{2g}$  és el terme de l'energia cinètica;  $v$  és la velocitat, i  $g$  és la gravetat.

L'equació ens mostra com a una mateixa cota, si la velocitat augmenta, la pressió haurà de disminuir per compensar i viceversa, per tal de mantenir la suma dels termes com a constant.

## 2.5 Força d'arrossegament (*Drag*) i força de sustentació (*Lift*)

En dinàmica de fluids es coneix com a força d'arrossegament a la força que actua oposada al moviment relatiu entre l'objecte i el fluid. També es coneix com a resistència aerodinàmica i és la força que ens frena quan ens movem immersos en un fluid.

L'expressió per calcular la força d'arrossegament:

$$F_x = \frac{C_d \cdot \rho \cdot A_x \cdot U^2}{2}$$

On  $\rho$  és la densitat del fluid;  $A_x$  és la àrea frontal del cos;  $U$  és la velocitat fora la capa límit, i  $C_d$  és el coeficient de arrossegament.

El coeficient d'arrossegament  $C_d$  és un valor adimensional per quantificar la resistència d'una geometria immersa en un fluid. En altres paraules, quan d'aerodinàmic és un perfil determinat.

Varia en funció de la geometria i l'acabat de la superfície.

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

Measured Drag Coefficients

Figura 2.7: Coeficients d'arrossegament segons la geometria.

Similar a la força d'arrossegament, la força de sustentació és la component de la força aerodinàmica que és perpendicular al moviment i apunta vertical a l'objecte. Com diu el propi nom, és la força encarregada d'aixecar els avions del terra en el cas que la fletxa del vector força apunti cap amunt. En el cas dels cotxes interessa que la fletxa apunti cap a terra, per tal d'assegurar-se el bon contacte dels pneumàtics i millorar la tracció i el control del vehicle.

L'expressió és similar:

$$F_y = \frac{C_l \cdot \rho \cdot A_y \cdot U^2}{2}$$

On les variables són les mateixes d'abans canviant que  $C_l$  és el coeficient de sustentació, i  $A_y$  és l'àrea del cos perpendicular a l'eix.

### 3. DISSENY DEL VEHICLE

En una simulació aerodinàmica, els dissenys es solen simplificar força. L'objectiu és evitar totes les geometries complexes que puguin portar problemes en la posterior simulació.

En el nostre cas de l'estructura d'un vehicle, hi ha molts elements (entrades d'aire, llums, retrovisors, portes...) que no ens aporten massa informació per l'estudi que es vol realitzar, per això s'ha decidit eliminar-los. La geometria del cotxe és una simplificació d'un vehicle. S'ha utilitzat el programa *SolidWorks* per dissenyar el model.

Cal aclarir que l'objectiu de l'estudi no és recrear un model de cotxe amb un programa de disseny 3D.

#### 3.1 Geometria del cotxe

La simplificació ha consistit en modelar únicament l'estructura del cotxe (sense detalls) amb les mesures més aproximades possibles a les d'un vehicle convencional. Un cop creat el model, s'han arrodonit les arestes vives per evitar problemes de mallat.

També s'ha tingut en compte que el sostre del cotxe sigüés pla, per afavorir la posterior implementació dels generadors de vòrtexs.

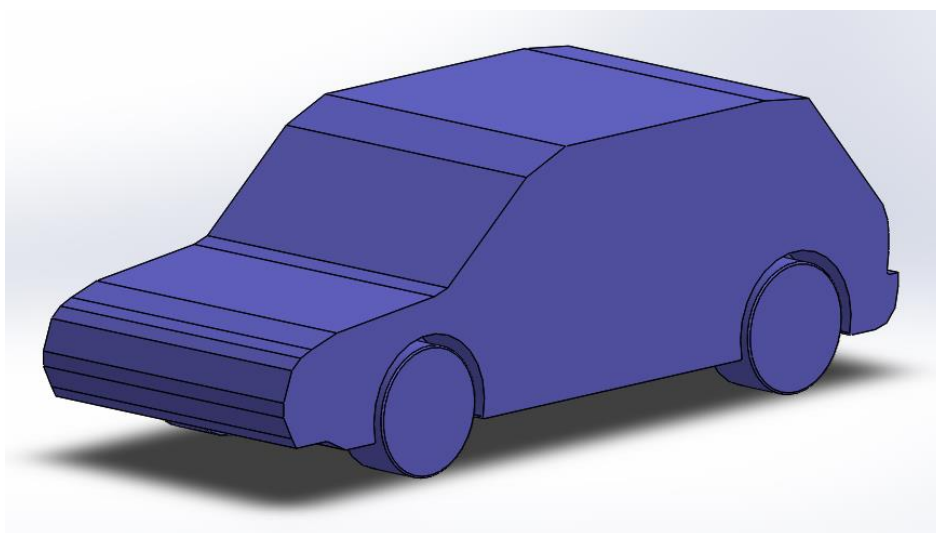


Figura 3.1: Geometria del vehicle.



### 3.2 Vistes i dimensions

Es mostren les dimensions del cotxe en mil·límetres. Amb el *SolidWorks* calculem la l'Àrea frontal que serà la que introduïrem en l'*ANSYS* perquè calculi el  $C_d$ . Aquesta àrea frontal és de  $2,38 \text{ m}^2$ , que serà la mateixa per a totes les simulacions, ja que no es modifica la geometria, i la implementació dels generadors de vòrtexs no afecta significativament a l'àrea frontal.

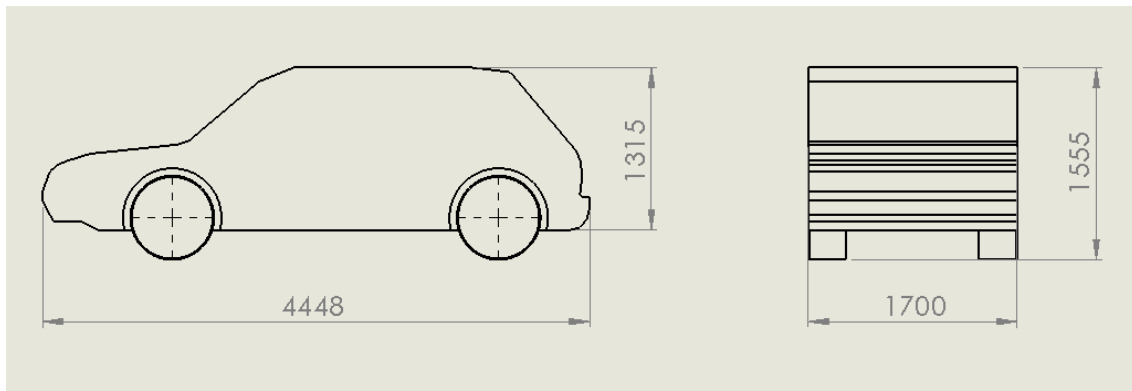


Figura 3.2: Vistes lateral i frontal del vehicle amb dimensions (mm).

Per tal d'exportar el model a l'*ANSYS* es fa amb format IGES, que des del mateix *SolidWorks* ens permet guardar-ho amb aquesta extensió.

## 4. METODOLOGIA

La metodologia consisteix en explicar detalladament quins passos i mètodes s'han seguit a l'hora de fer un estudi. A continuació, s'exposa cada un dels apartats de la simulació, explicant el procés que s'ha seguit fins a arribar a una solució real. Cal dir que en aquest procés de simulació, alguns valors han estat trobats per assaig i error, és a dir s'han hagut de modificar repetidament fins a ajustar-se adequadament.

El programa que s'ha utilitzat és una versió d'estudiant de l'ANSYS Fluent, un software de CFD (*Computational Fluid Dynamics*).

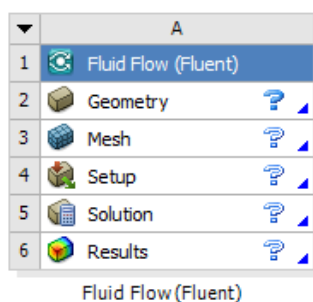


Figura 4.1: Blocs del menú del programa.

### 4.1 Geometria

En el bloc de geometria, el primer que s'ha fet és importar el model del cotxe que s'ha dissenyat prèviament. S'ha de definir un volum de control al voltant del vehicle, que serà la zona per on hi haurà l'aire en circulació, similar a un túnel de vent.

Les dimensions del túnel virtual que s'especifiquen en la figura 4.2, han sigut pensades per a que es pugui visualitzar el mapa de velocitats i pressions amb claredat. Fer-lo massa llarg i ample, ens repercutiria en el posterior mallat.

La distància del volum de control per davant és d'unes 3 vegades la llargada del cotxe i d'unes 6 vegades per darrere.

Details View	
[-] Details of Enclosure1	
Enclosure	Enclosure1
Shape	Box
Number of Planes	0
Cushion	Non-Uniform
<input type="checkbox"/> FD1, Cushion +X value (>0)	1 m
<input type="checkbox"/> FD2, Cushion +Y value (>0)	2 m
<input type="checkbox"/> FD3, Cushion +Z value (>0)	12 m
<input type="checkbox"/> FD4, Cushion -X value (>0)	1 m
<input type="checkbox"/> FD5, Cushion -Y value (>0)	0.001 m
<input type="checkbox"/> FD6, Cushion -Z value (>0)	26 m
Target Bodies	All Bodies
Export Enclosure	Yes

Figura 4.2: Dimensions del volum de control.

Un cop tenim el volum de control, es fa una operació booleana de subtracció entre els dos cossos, és a dir es resta un de l'altre.

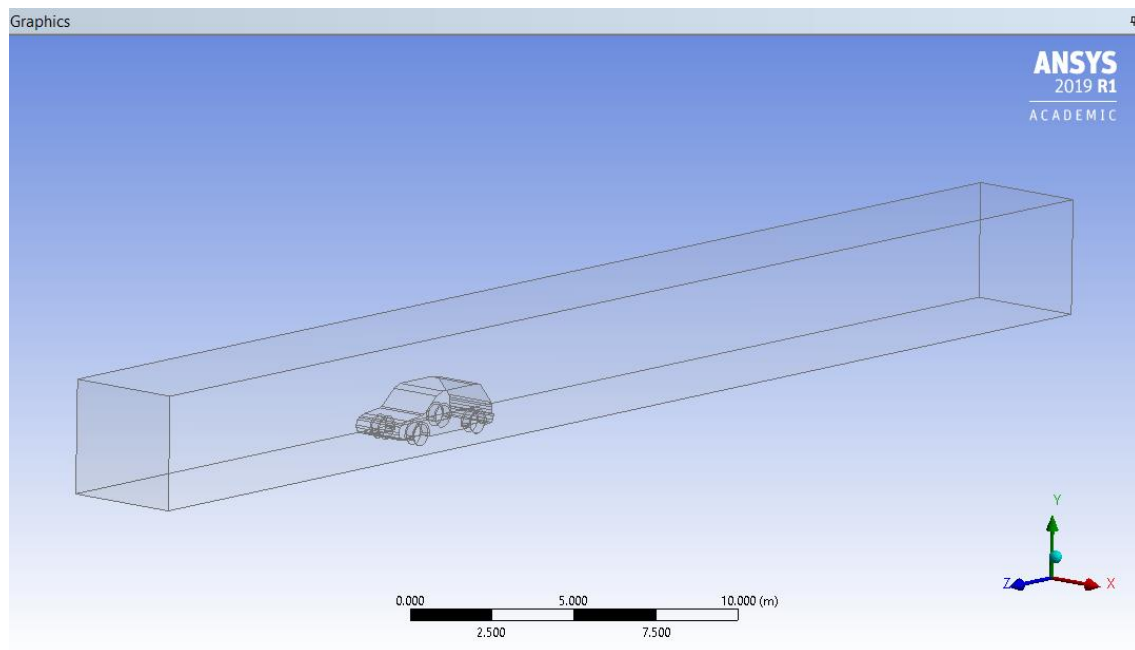


Figura 4.3: Volum de control un cop aplicada la operació booleana de subtracció.

Seguidament s'anomenen les cares del volum amb el nom que hi pertoca segons sigui l'entrada o sortida d'aire, i les parets. Seguir aquesta nomenclatura ens serveix perquè el programa detecti de quina condició de paret s'està tractant i ens sigui més fàcil en el posterior apartat de configuració.

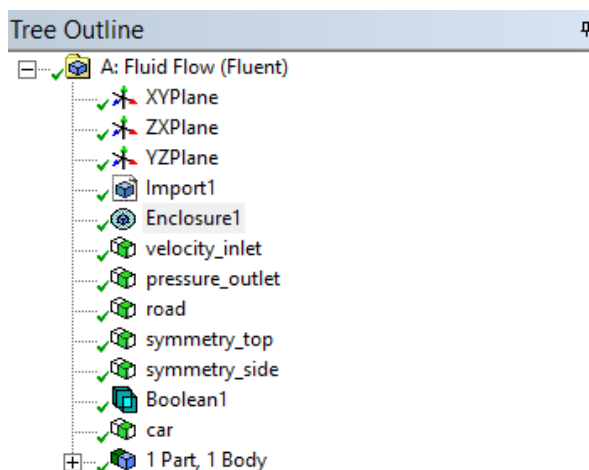


Figura 4.4: Noms de les cares del volum.

## 4.2 Mallat

El mallat és el procés de la simulació on les geometries complexes es divideixen en elements simples que es poden utilitzar com a aproximacions discretes locals de un domini més gran. El mallat influeix en la precisió, convergència i la velocitat de simulació.

Per simular el cotxe correctament s'han seguit els següents passos:

Primerament s'ha creat un mallat d'elements amb forma de tetraedre. La mida d'aquests elements està pensada per omplir tot el túnel de vent, per tant no poden ser massa petits ja que ens passaríem del límit de 512.000 elements de l'*ANSYS Fluent Student*. Per contra, si fossin massa grans, perdriem precisió i ens podria falsejar els resultats.

Es personalitza la mida del mallat a prop del cotxe, que és on ens interessa obtenir els resultats i que siguin el més fiable possible.

Es configura un mallat refinat a les proximitats de les parets i les arestes del vehicle. *Growth rate* és l'índex de creixement dels elements en funció de la distància que es troben de les parets del cotxe. *Defeature size* serveix per eliminar possibles forats i/o concentracions d'elements molt propers que provocarien errors i no donarien informació. S'activa *capture proximity* amb la funció de proximitat en les cares i arestes, per tal de refinar el mallat al voltant de les parets del cotxe amb una mida mínima d'element molt més petita que a la resta del volum de control.

Details of "Mesh"	
+ Display	
- Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	Fluent
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	2.0 m
Export Format	Standard
Export Preview Surface...	No
- Sizing	
Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.1
<input type="checkbox"/> Max Size	2.2 m
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	2.e-002 m
Capture Curvature	No
Capture Proximity	Yes
<input type="checkbox"/> Proximity Min Size	5.e-002 m
<input type="checkbox"/> Num Cells Across Gap	5
Proximity Size Function...	Faces and Edges
Bounding Box Diagonal	42.757 m
Average Surface Area	8.5202 m <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	1.e-002 m

Figura 4.5: Valors de la mida del mallat.

Seguidament es crea una *inflation* al voltant del cotxe. La funció de la inflació és crear uns elements al voltant de la geometria del vehicle que segueixin la direcció de les parets. Aquesta operació està pensada per captar la capa límit per això els elements no són tetraedres sinó capes amb un cert gruix.

- Inflation	
Use Automatic Inflati...	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	car
Inflation Option	Total Thickness
<input type="checkbox"/> Number of Layers	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1.1
<input type="checkbox"/> Maximum Thickness	0.3 m
Inflation Algorithm	Pre
View Advanced Opti...	No

Figura 4.6: Valors de la inflació del mallat.

Amb aquesta configuració s'ha obtingut el mallat següent:

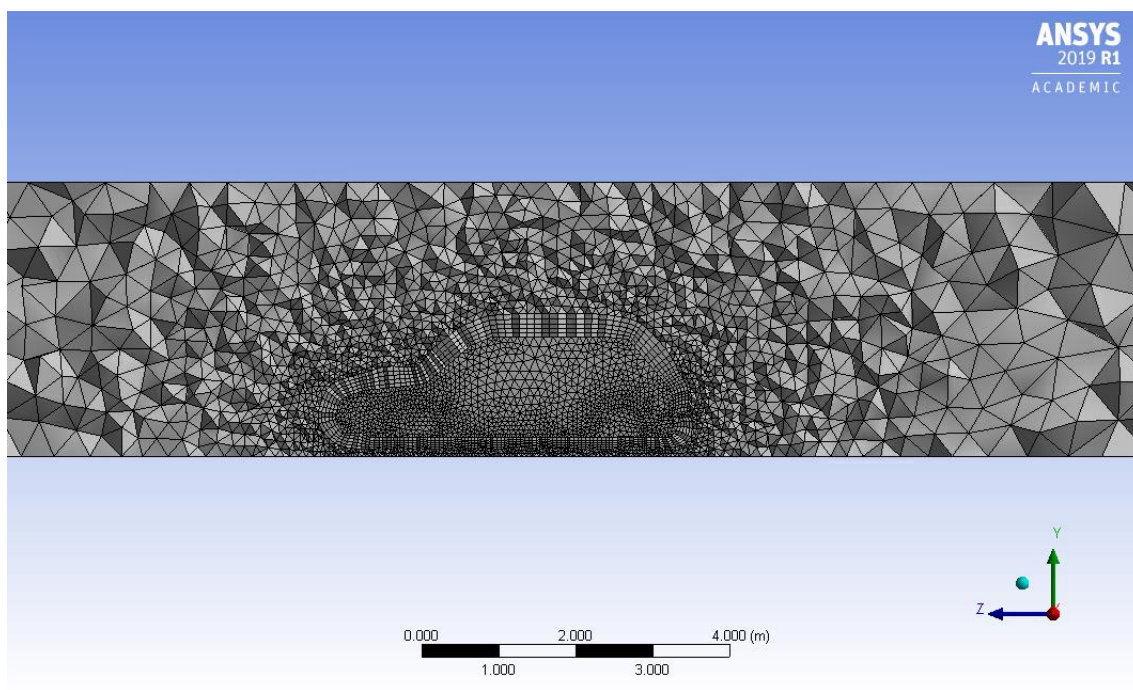


Figura 4.7: Vista en secció del mallat.

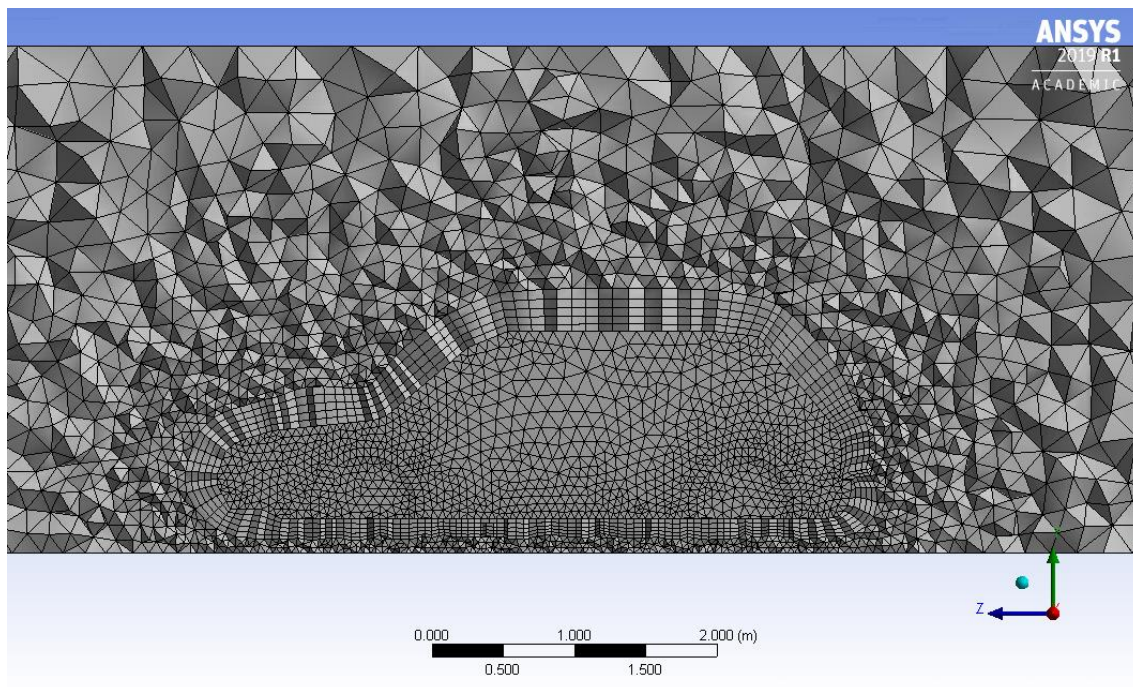


Figura 4.8: Detall del mallat.

Un cop creada la malla, ens interessa saber de quans elements esta composta i les qualitats del mallat per determinar si és viable i correcte per a la simulació.

Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	99173
<input type="checkbox"/> Elements	454795

Figura 4.9: Quantitat de nodes i elements de la malla.

Com s’ha dit anteriorment, el límit de la versió d’estudiants és de 512.000 elements per tant, la nostra malla entra dins d’aquest límit.

Per valorar la qualitat del mallat, ens fixem en dues mesures:

*Skewness* és la asimetria d’una distribució, o en el nostre cas la asimetria del elements. Per tant, com més proper a 0, més simètrics seran els elements.

Skewness mesh metrics spectrum:



Figura 4.10: Qualitat simètrica en funció del valor.

*Orthogonal Quality* és la relació entre els angles de les cares o arestes dels elements adjacents i l’angle òptim. Com més proper a 1 millor és la relació.

Orthogonal Quality mesh metrics spectrum:



Figura 4.11: Qualitat ortogonal en funció del valor.

A continuació es mostren les qualitats obtingudes del nostre mallat. Si ens fixem en la mitjana dels elements veiem com ambdues qualitats són força bones.



Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	4.8212e-004
<input type="checkbox"/> Max	0.99999
<input type="checkbox"/> Average	0.2265
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.12558

Figura 4.12: Qualitat asimètrica del mallat.

Quality	
Check Mesh Quality	Yes, Errors
<input type="checkbox"/> Target Skewness	Default (0.900000)
Smoothing	Medium
Mesh Metric	Orthogonal Quality
<input type="checkbox"/> Min	7.4911e-006
<input type="checkbox"/> Max	0.99529
<input type="checkbox"/> Average	0.7724
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0.12435

Figura 4.13: Qualitat ortogonal del mallat.

### 4.3 Configuració i solució

La configuració és el bloc on s'especifiquen totes les condicions i factors de la simulació.

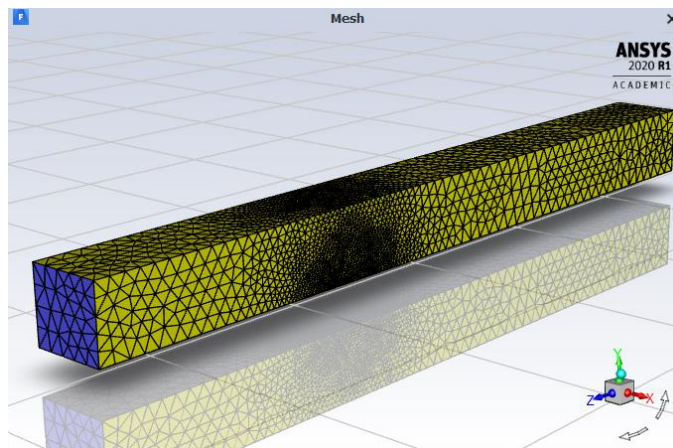


Figura 4.14: Interfície gràfica de la configuració.



La configuració està desglosada per apartats per tal de confeccionar-la ordenadament. Primerament en el menú general s'escull el *solver* que es vol utilitzar, les referències de velocitat i temps, i si es vol tenir en compte l'efecte de la gravetat, que en el nostre cas es pot negligir. Es fa servir el *solver pressure-based*, perquè es considera el fluid com incompressible ja que  $Ma < 0,3$ .

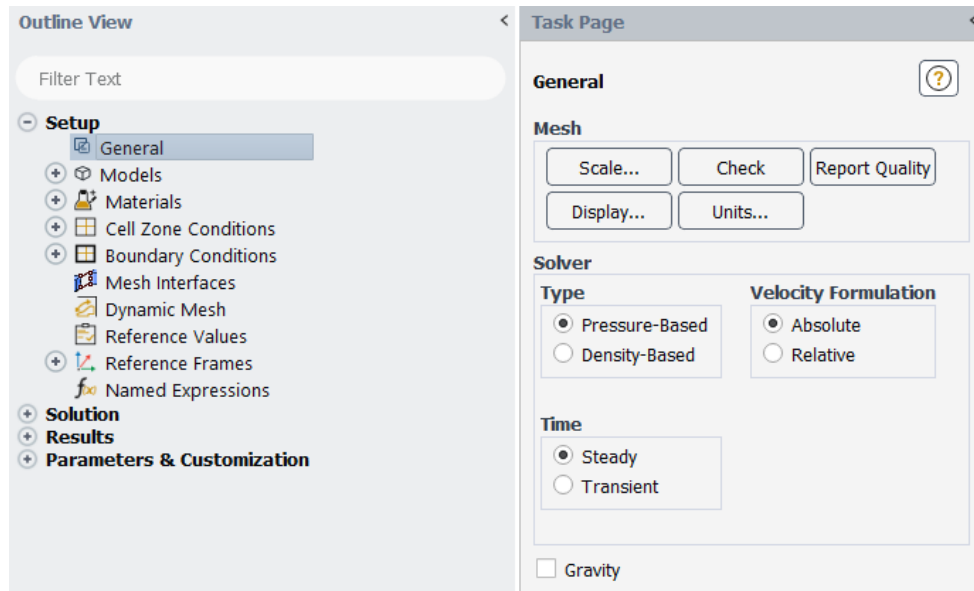


Figura 4.15: Menú general de la configuració.

Pel que fa el càlcul del programa, es fa amb el model viscos  $k$ - $\epsilon$  de tipus *realizable* i amb un tractament a prop de les parets de *non-equilibrium wall functions*.

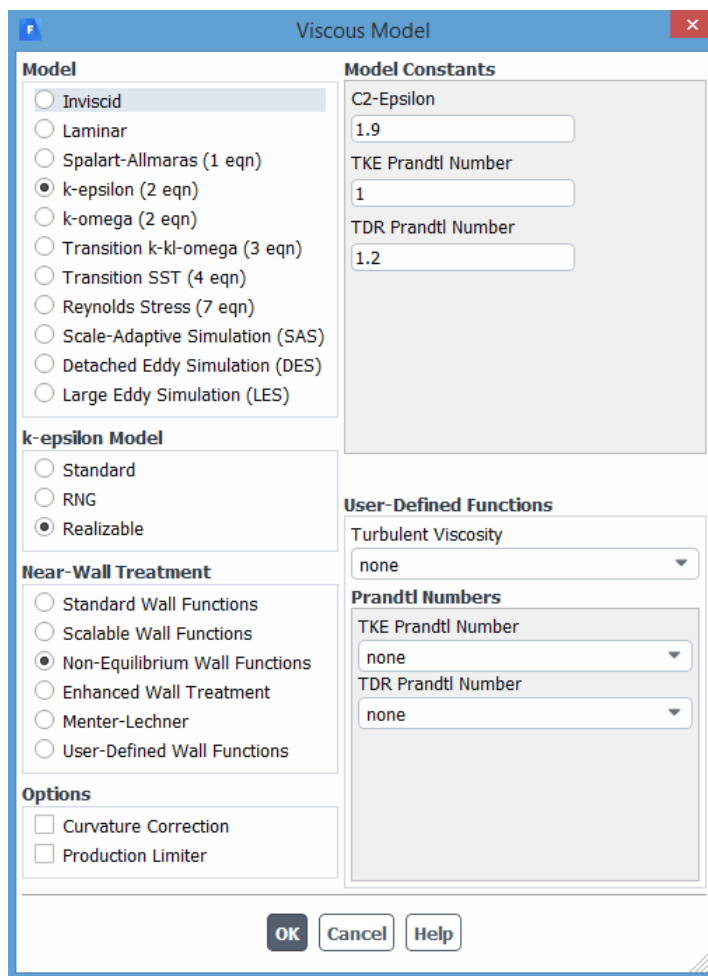


Figura 4.16: Model de la configuració.

A l'apartat de materials ja ve per defecte l'aire com a fluid i l'alumini com a material per a les parets que siguin del tipus *no-slip wall*. Tot i això, ens assegurem que les propietats de l'aire són correctes.

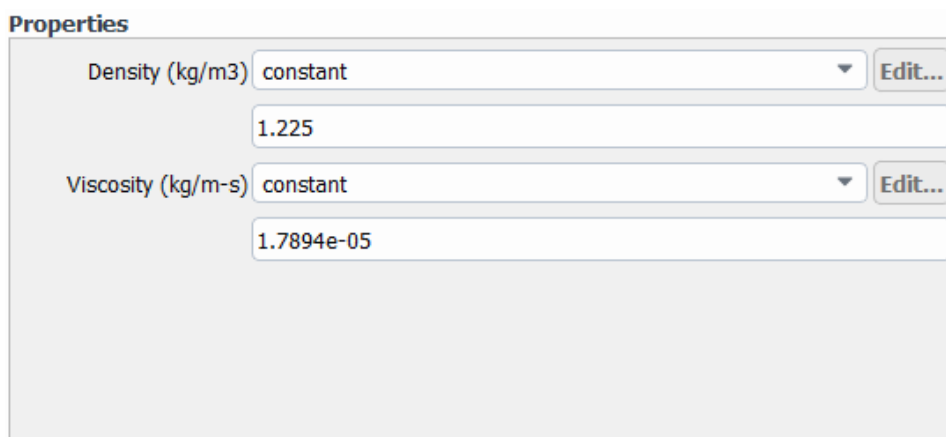


Figura 4.17: Propietats de l'aire.

La següent configuració que cal definir són les condicions de contorn. Es tracta d'especificar els tipus de parets, i les condicions d'entrada i sortida del túnel de vent. Per l'entrada *velocity inlet* s'introdueix la magnitud de velocitat de 34 m/s i una intensitat de turbulència de l'1%.

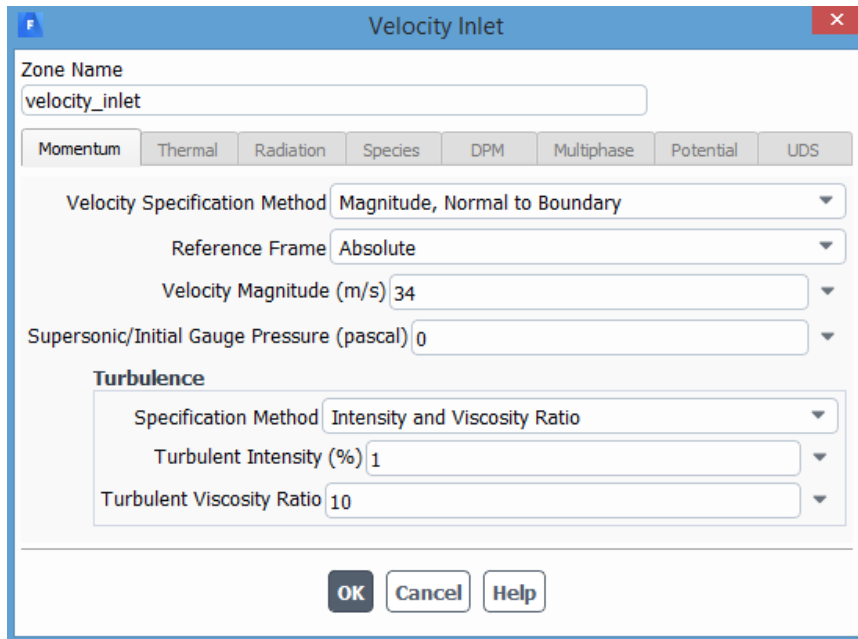


Figura 4.18: Condiició de contorn de l'entrada d'aire.

Per a la sortida d'aire *pressure outlet*, els valors per defecte ja són els correctes, només cal assegurar-se que la pressió relativa a la sortida és 0 (pressió atmosfèrica).

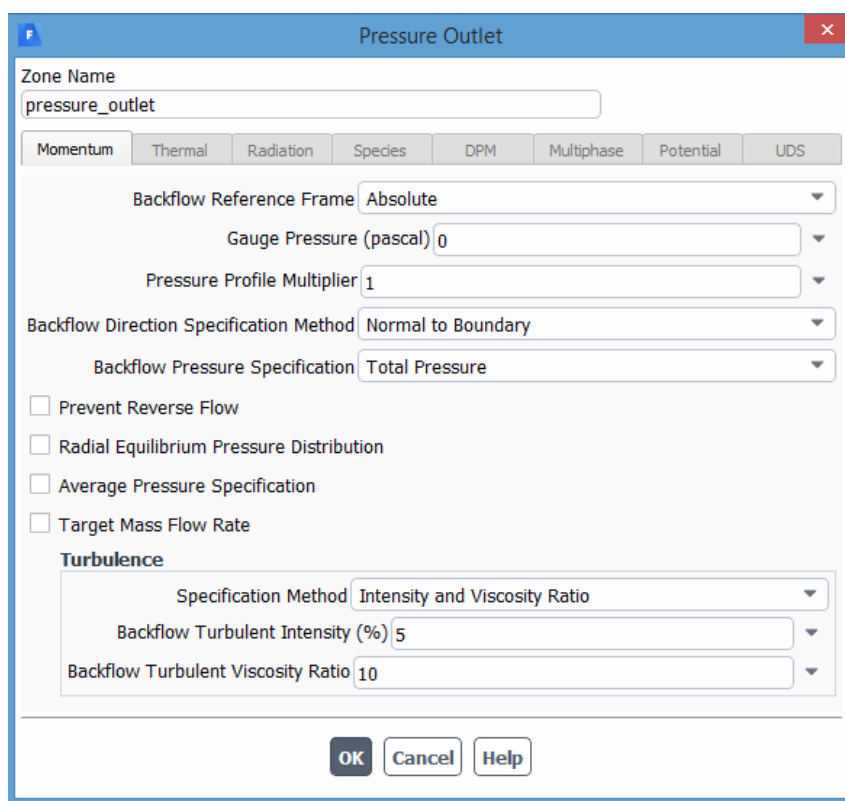


Figura 4.19: Condiçió de contorn de la sortida d'aire.

Els valors de referència són aquells valors de les variables que el programa utilitzarà per calcular. El programa pren alguns valors automàticament o que han sigut definits anteriorment com ara la velocitat, la temperatura, la densitat o la viscositat del fluid.

Recordem que ens interessa saber el coeficient d'arrossegament, per tant definim la àrea frontal (calculada anteriorment amb el *SolidWorks*) i la longitud del vehicle. També definim *velocity inlet* com a referència d'inici de càlcul.

Property	Value
Area (m <sup>2</sup> )	2.38
Density (kg/m <sup>3</sup> )	1.225
Enthalpy (j/kg)	0
Length (m)	4.44
Pressure (pascal)	0
Temperature (k)	288.16
Velocity (m/s)	34
Viscosity (kg/m-s)	1.7894e-05
Ratio of Specific Heats	1.4

Figura 4.20: Valors de referència.

Un cop definits els valors de referència, hem d'especificar les magnituds que volem que ens calculi el programa. Per això, es defineix la variable de coeficient d'arrossegament. El programa calcula el  $C_d$  a partir de la força que es genera en el vehicle. Com que ja sabem que el vector força anirà en el mateix sentit del moviment del fluid s'introdueix una unitat negativa en la component Z del vector força (Depèn del sistema de coordenades que es tingui).

Es seleccionen aquelles superfícies que es vol tenir en compte pel càlcul. En el nostre cas seleccionem les parets del cotxe (definides en el bloc de geometria). També seleccionem els laterals i les rodes del vehicle que ens ho interpreta com a paret real amb el nom de *wall-solid*, ja que no ha estat definida anteriorment.

Finalment li diem que ens tregui el valor per pantalla quan s'estigui executant la simulació.

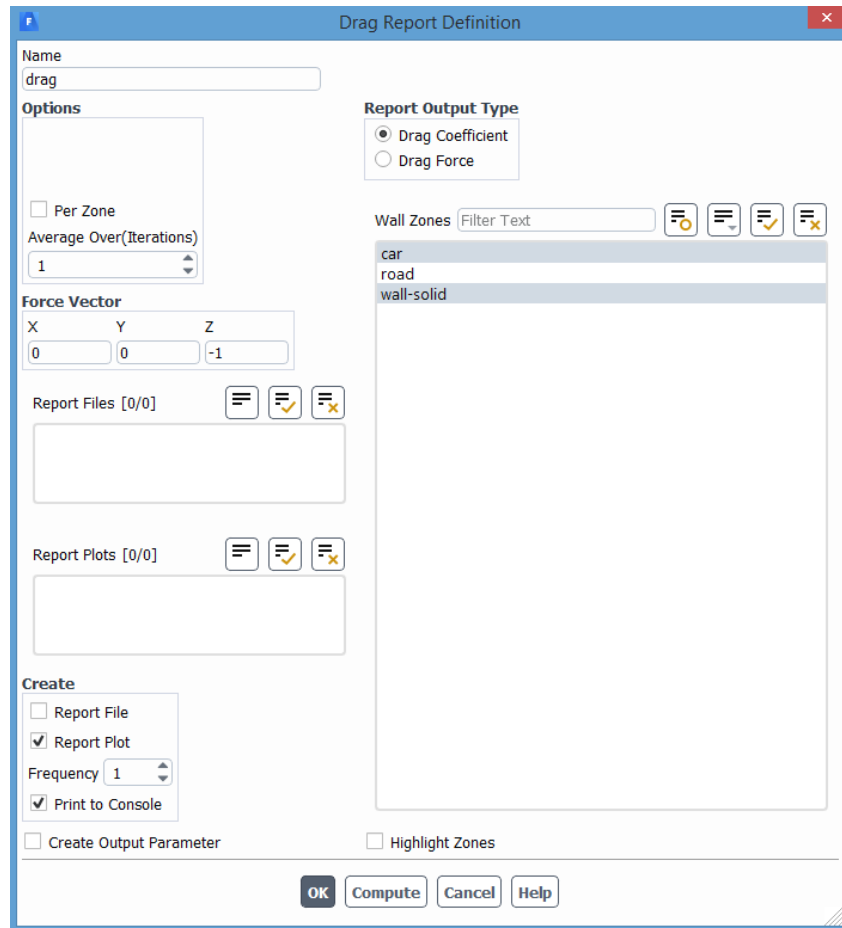


Figura 4.21: Definició del coeficient d'arrossegament.

Per saber l'estat de la simulació mentre s'estigui executant, fem que també ens mostri per pantalla els residuals de les iteracions (s'expliquen amb més detall més endavant).

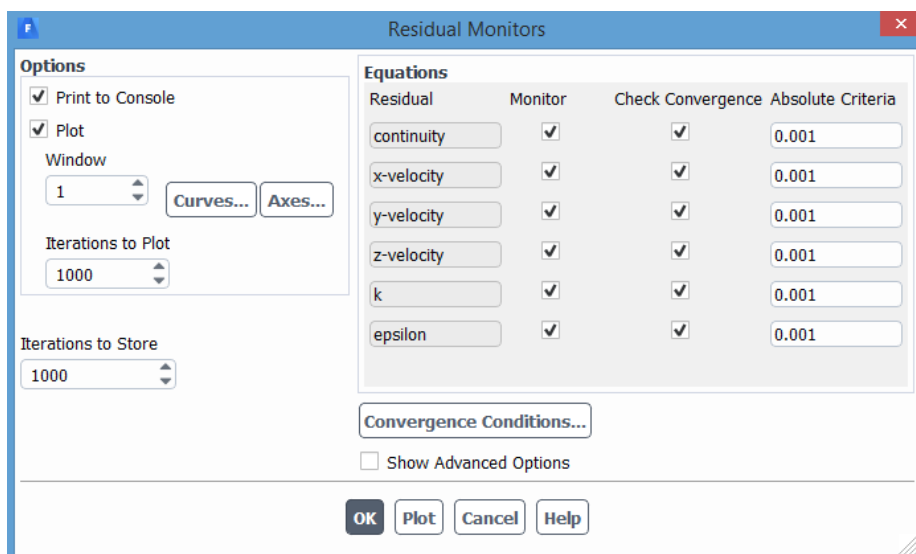


Figura 4.22: Definició del monitor de residuals.

Abans de començar la simulació, s'han d'introduir els valors dels quals començar a iterar. Amb l'opció de inicialització híbrida, es duen a terme 10 iteracions emprant un model laminar d'una equació per trobar una solució amb la qual començar a iterar en la simulació del problema.

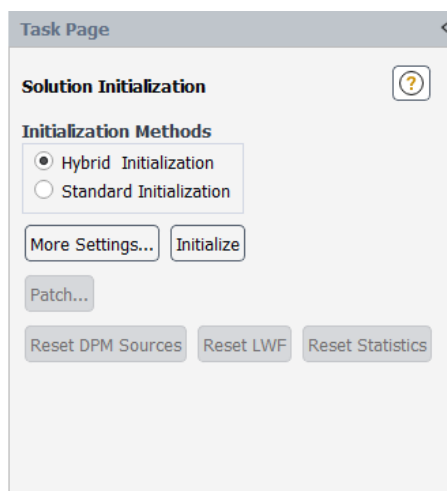


Figura 4.23: Definició de la inicialització de la solució.

Si no apareix cap problema de inicialització, es pot començar la simulació. El programa ens ofereix una opció (*check case*) per assegurar-nos que no hi ha cap problema important en el procés que s'ha seguit o en el mallat. Es defineixen el nombre d'iteracions que es volen dur a terme i s'inicia el càlcul.

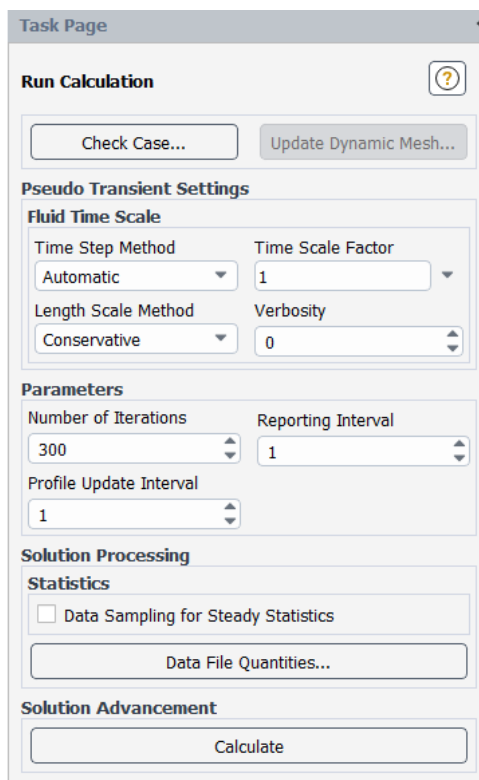


Figura 4.24: Definició del càlcul.

Mentre s'està executant la simulació, podem anar veient l'estat de la solució amb les pantalles anomenades monitors. El monitor de residuals ens indica si la solució convergeix en una solució física real. Els residuals són les diferències dels valors de les variables entre una iteració i l'anterior.

Per tant, interessa que els residuals vagin disminuint i que s'estabilitzin en un valor relativament petit. Això significa que ha anat depurant la solució a base del càlcul iteratiu fins a trobar uns resultats on l'error és petit.

Si la gràfica de residuals comencés a fluctuar, significaria que està trobant valors molt diferents respecte la iteració anterior, sense arribar a concretar un resultat real.

En els residuals que es mostren a continuació, es veu com la solució fluctua a les primeres 75 iteracions fins que s'estabilitza. Si no s'hagués estabilitzat no podríem donar la solució com a bona. El valor del coeficient d'arrossegament que estem buscant tampoc seria fiable. S'hauria de revisar el mallat i les condicions de contorn de nou.

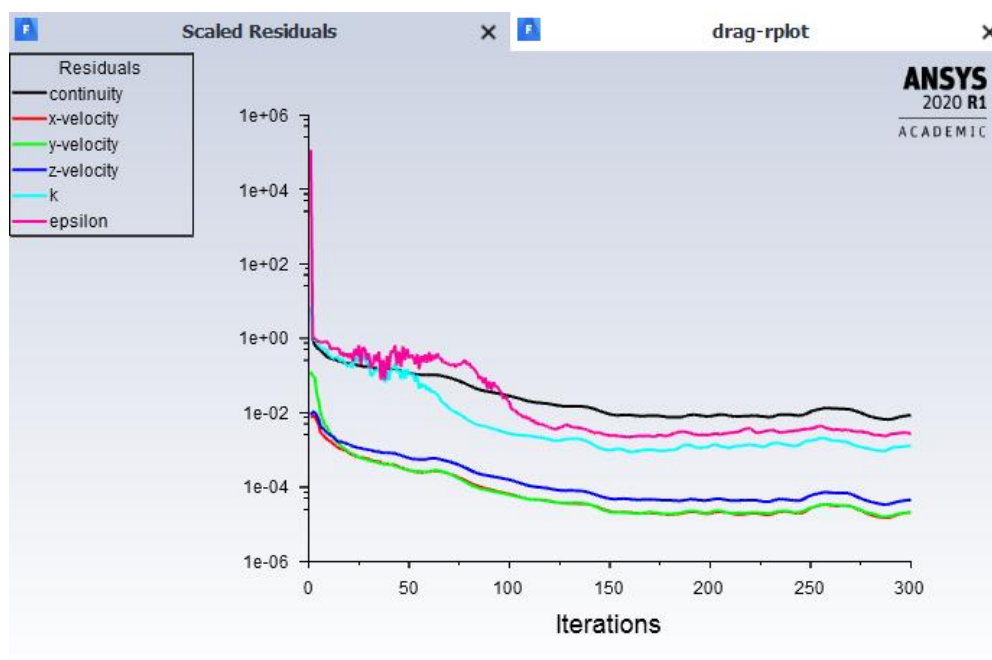
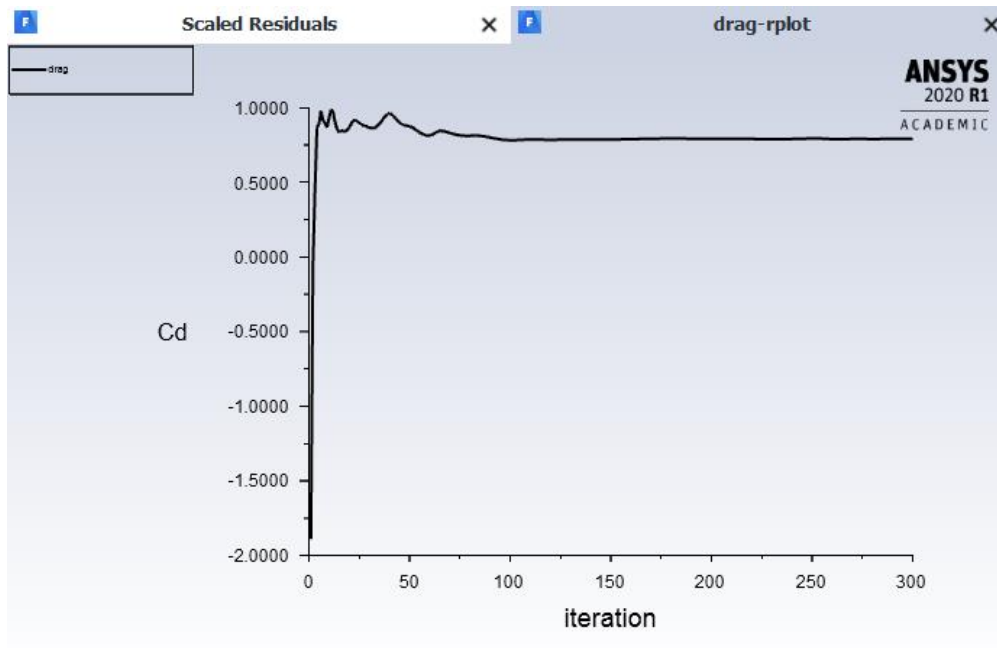


Figura 4.25: Monitor de residuals.

En l'altre monitor tenim la gràfica del valor que pren  $C_d$  en cada iteració. Si s'ha arribat a la solució, la gràfica s'estabilitza clarament tal i com es mostra a la figura 4.26.



Figura 4.26: Monitor de  $C_d$ .

#### 4.4 Resultats

Per poder veure el comportament del flux d'aire, la interfície dels resultats en permet visualitzar les solucions calculades anteriorment. El programa ens ofereix moltes opcions per poder veure els resultats.

En el nostre cas ens interessa veure el flux d'aire al voltant del cotxe, i el deixant de la part posterior.

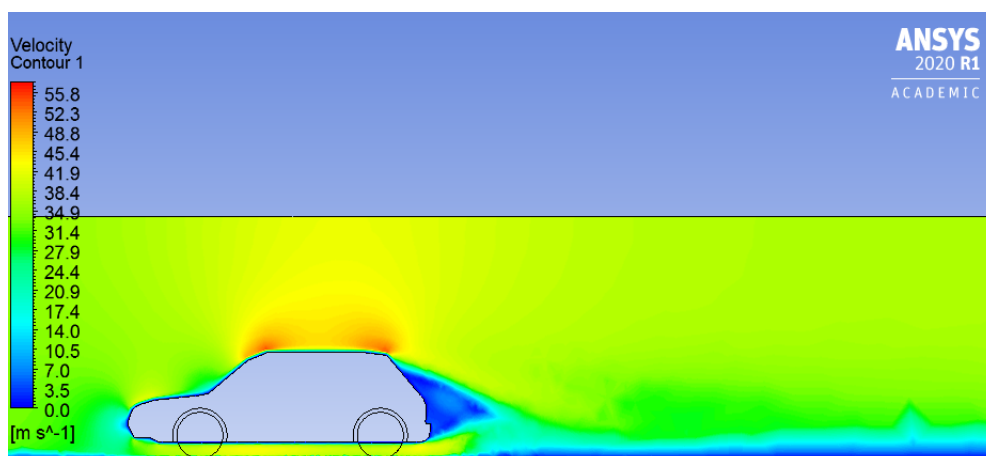


Figura 4.27: Contorn de velocitats al voltant del cotxe.

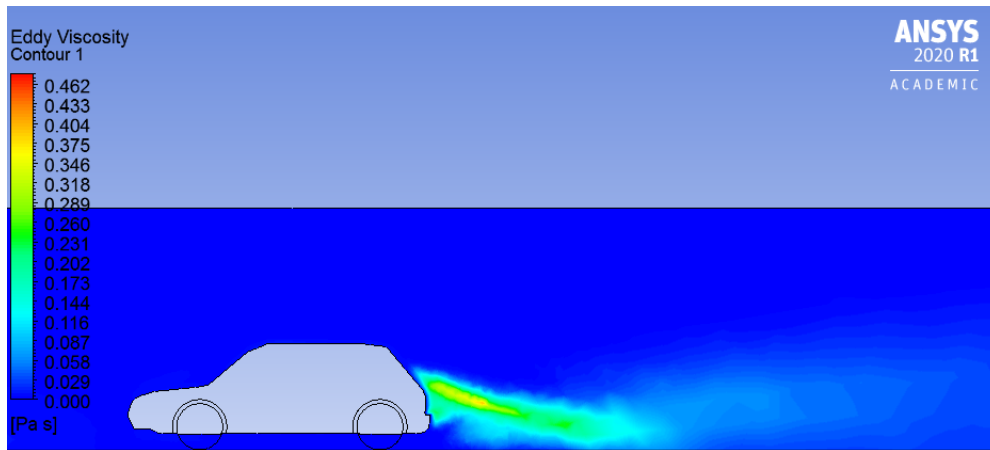


Figura 4.28: Contorn de remolins del deixant del cotxe.

## 5. GENERADORS DE VÒRTEXS

L'objectiu de l'estudi és analitzar i comparar qualitativament l'efecte aerodinàmic dels generadors de vòrtexs en l'estructura d'un vehicle. En aquest apartat s'explicarà què són els GV, el principi de funcionament i els tipus que hi ha.

### 5.1 Definició i principi de funcionament

En la resistència aerodinàmica que pateix un cos, no només entra en joc la geometria frontal, sinó que la part posterior també juga un paper molt important.

Com s'ha explicat en els fonaments teòrics, estudiar la capa límit és de gran importància en l'aerodinàmica per tal d'analitzar com es comporta el flux d'aire al voltant d'una superfície.

La capa límit s'ha de mantenir unida a la superfície el màxim temps possible, d'aquesta manera l'estela produïda és torna més estreta. Cal recordar que un règim turbulent, la capa límit es manté durant més temps en la superfície del cos. El deixant o estela és una zona on la velocitat disminueix força, i per tant crea resistència al moviment, per això interessa que l'estela sigui estreta.

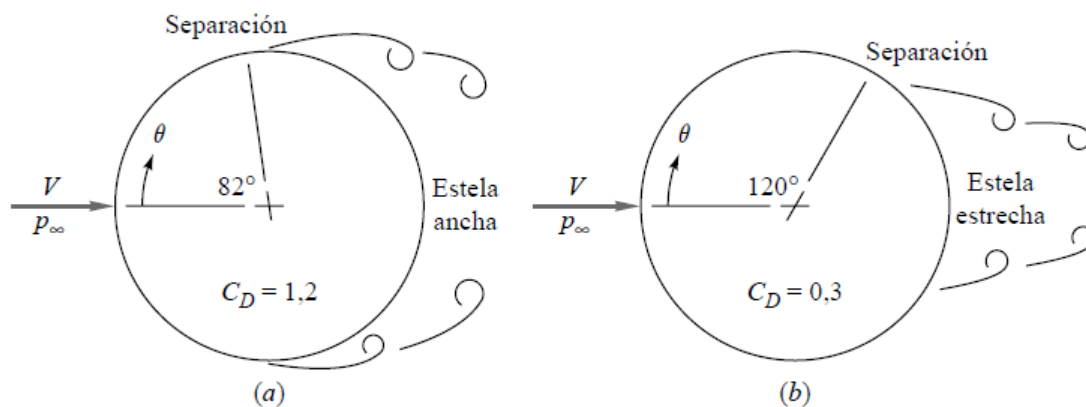


Figura 5.1: Flux al voltant d'un cilindre circular: (a) separació laminar; (b) separació turbulenta.

En la figura s'aprecia com el flux turbulent, encara que no ho sembli, manté la capa límit més temps, creant una estela més estreta i disminuint la resistència aerodinàmica, per això les pilotes de golf tenen petits forats. En la següent imatge es mostra el mateix efecte amb dues pilotes que cauen a l'aigua.

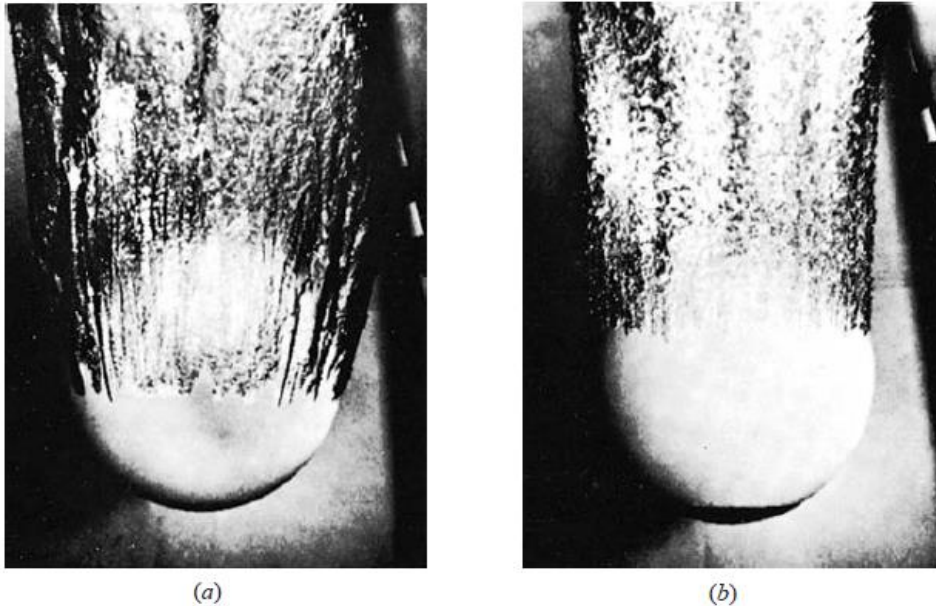


Figura 5.2: Separació laminar i turbulenta de dues pilotes que cauen a l'aigua: (a) superfície de la bola llisa, capa límit laminar; (b) flux turbulent amb la mateixa velocitat, creat per una banda rugosa a la part frontal.

A partir d'aquest concepte, es busquen elements que redueixin el deixant, entre ells, els generadors de vòrtexs. L'objectiu dels GV és, com bé diu el nom, crear un remolí capaç de mantenir la capa límit enganxada a la superfície. Aquest vòrtex generat aporta energia a la zona més propera a la superfície, retardant així, el despreniment de la capa límit.

En aviació, els GV es col·loquen a l'extradós (part superior de l'ala) per tal de mantenir la capa límit a angles d'atac més grans i no entrar en pèrdua de la superfície sustentadora.

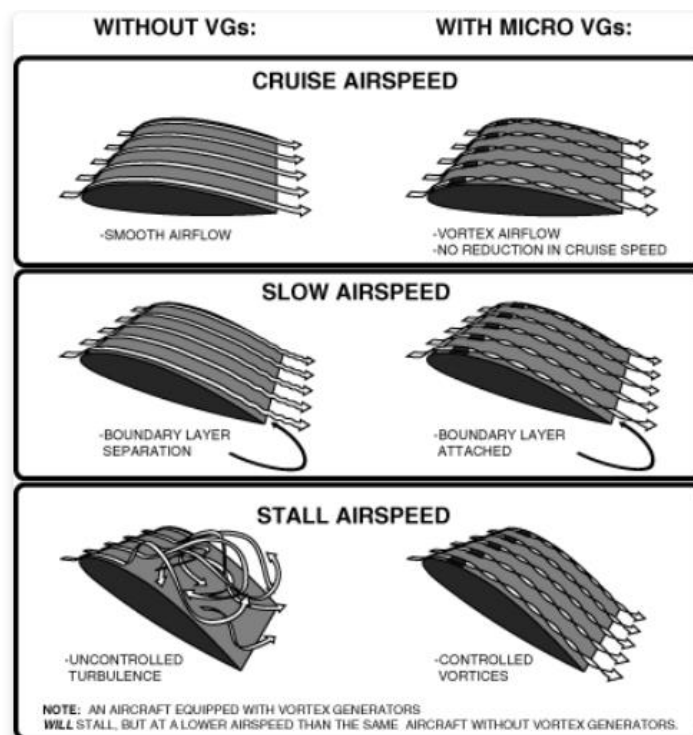


Figura 5.3: Efecte dels GV en l'ala d'un avió.

Els GV també han sigut implementats en l'automoció de competició, utilitzats també per redirigir l'aire cap al lloc desitjat i evitar els refluxos. Es solen col·locar en aquells llocs on hi ha una inclinació descendent de la geometria, perquè és on es desprèn la capa límit.



Figura 5.4: GV en les carrosseries de F1.

En el cas d'un turisme convencional la capa límit es desprèn a la part del sostre on comença el vidre posterior del vehicle, per això es col·loquen allà.



Figura 5.5: GV en el sostre d'un turisme.

## 5.2 Tipus de generadors de vòrtexs

L'objectiu de crear vòrtexs es pot fer amb moltes geometries diferents. Segons l'aplicació que s'hi vulgui donar, obtindrem els factors de disseny que determinaran la forma del GV.

S'han classificat els GV en dos grups: de tipus aleta i de tipus *airtab*. Els de tipus aleta són utilitzats en els cotxes i a les ales d'avió, i reben el nom degut a la forma que tenen, tot i que no tenen perquè ser exactament en forma d'aleta.



Figura 5.6: GV tipus aleta.

Els *airtabs* tenen una geometria més complexa i són més grans. Tenen capacitat de generar vòrtexs més grans per això s'implementen en vehicles com autobusos, camions o autocaravanes, on el desprendiment de la capa límit és més dràstic i l'estela és molt més gran.



Figura 5.7: *Airtab*.

## 6. DISSENY DELS GENERADORS DE VÒRTEXS

En aquest apartat s'explicarà com s'han dissenyat els generadors de vòrtexs i quins són els aspectes que s'han de tenir en compte a l'hora de modelar la geometria.

### 6.1 Factors de disseny

Com s'ha dit anteriorment, no hi ha una sola geometria per tal de crear l'efecte esperat. Tot i això si el que es vol és reduir la resistència i no el contrari, s'ha de valorar l'espessor de la capa límit.

S'ha d'especificar que el disseny ha estat calculat per a una velocitat d'uns 120 km/h. A partir d'uns 80 km/h, el motor destina més potència a vèncer la força aerodinàmica, que a vèncer la força de fricció dels pneumàtics. La força aerodinàmica creix en funció del quadrat de la velocitat, per això com més sigui la velocitat, molt més important és la força a vèncer. S'escull fer el càlcul amb 120 km/h ja que és la màxima velocitat en les autopistes de l'estat. A més, és una velocitat de creuer molt comuna en trajectes llargs, és a dir una situació de règim nominal.

Es calcula el nombre de Reynolds:

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot L}{\mu} = \frac{1,225 \cdot 34 \cdot \sqrt{2,38}}{1,74 \cdot 10^{-5}} = 3,69 \cdot 10^6$$

Es pot considerar que  $Re > 5 \cdot 10^5$ , el flux ja és turbulent. Per tant estem clarament amb en règim turbulent. Es calcular l'espessor de la capa límit en règim turbulent:

$$\delta = \frac{0,382 \cdot L}{Re^{\frac{1}{5}}} = \frac{0,382 \cdot \sqrt{2,38}}{(3,69 \cdot 10^6)^{\frac{1}{5}}} = 0,0286 \text{ m}$$

Tenim una capa de 29 mm aproximadament. Per tant els GV hauran de fer al voltant d'aquesta mesura com a altura. Si l'altura és massa gran, estarem generant turbulències a una zona fora de la capa límit, cosa que no ens interessa.

S'ha de tenir en compte altres factors com la fàcil implementació en el vehicle, la fabricació i l'estètica.

## 6.2 Disseny GV1

Pel primer disseny s'ha pensat en una forma de piràmide triangular inclinada, simulant l'efecte d'aleta. Basant-me en els GV que hi ha al mercat, es busca una geometria semblant, amb una forma simple per tal de facilitar la fabricació i la implementació. Una cota important del disseny és l'altura del dispositiu, que en aquest cas s'ha fet de  $20\text{ mm}$ , per assegurar-nos de no sobrepassar la capa límit. L'amplada també és un factor important ja que massa gran provocaria una resistència que no es podria compensar amb l'efecte del GV.

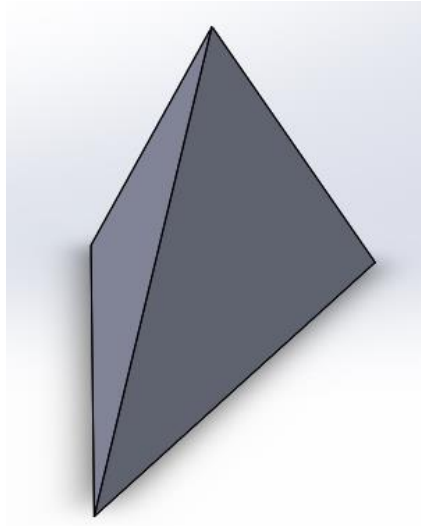


Figura 6.1: Vista 3D del GV1.

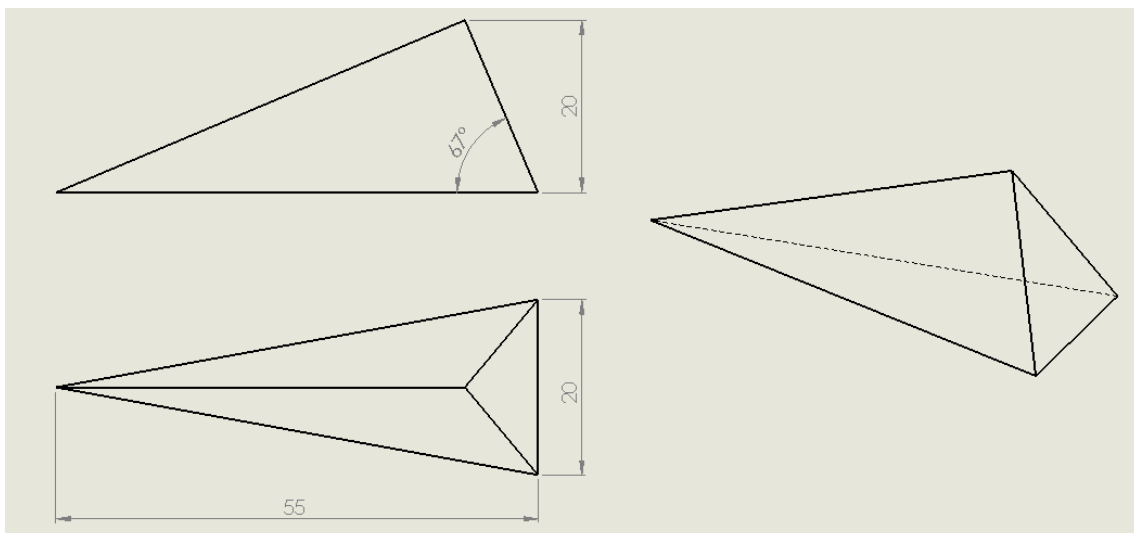


Figura 6.2: Geometria i dimensions GV1 (mm).



### 6.3 Disseny GV2

Per el següent disseny vaig basar-me en l'*airtab*. La figura és una rampa on cada cop es fa més estreta fins a acabar punta, on es crea el vòrtex. El que es busca d'aquesta geometria és que el flux d'aire es reparteixi per les dues cares laterals inclinades, i una tercera cara que és la rampa. S'espera que els tres fluxos convergeixin en l'aresta posterior que és on es busca l'efecte de remolí. Pel que fa les dimensions són força semblants al disseny anterior.

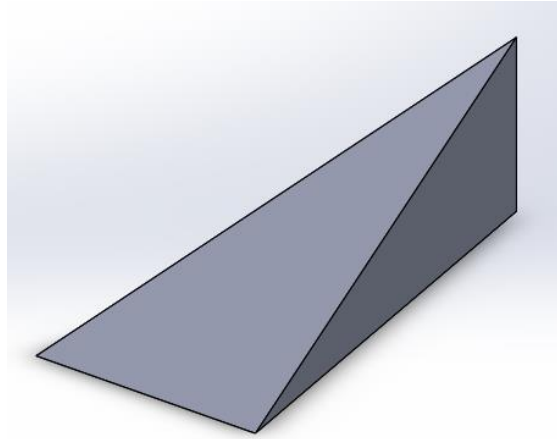


Figura 6.3: Vista 3D del GV2.

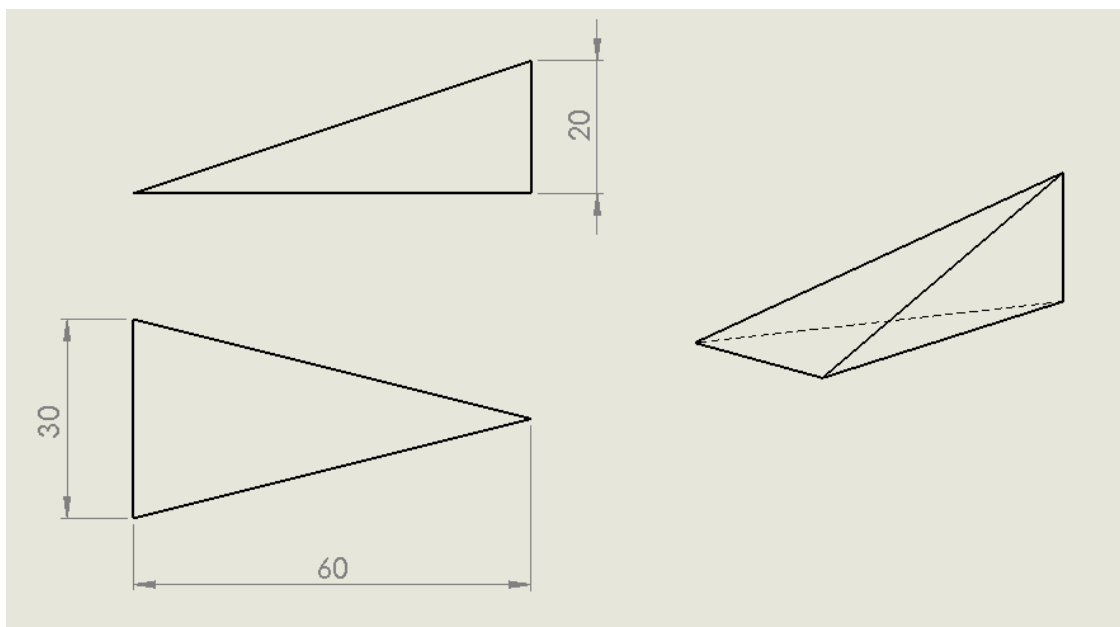


Figura 6.4: Geometria i dimensions GV2 (mm).

### 6.4 Disseny GV3

Com es pot veure en apartats anteriors del treball, en aviació i automoció de competició es fan servir plaques disposades en la direcció del corrent com a GV. S'ha volgut simular aquesta mateixa geometria per veure si realment és tant eficaç com sembla ser. S'ha augmentat l'altura de l'element fins a  $24\text{ mm}$ , ajustant-nos més a l'alçada de la capa límit que és de  $29\text{ mm}$ . També s'han arrodonit les cares per on incideix i es desprèn el flux d'aire, per tal reduir la resistència que es pugui generar.

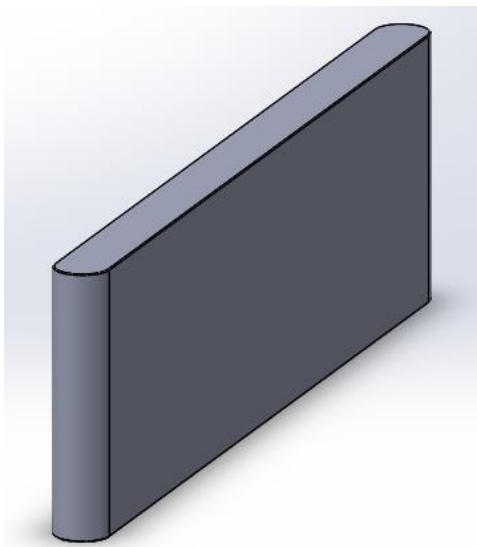


Figura 6.5: Vista 3D del GV3.

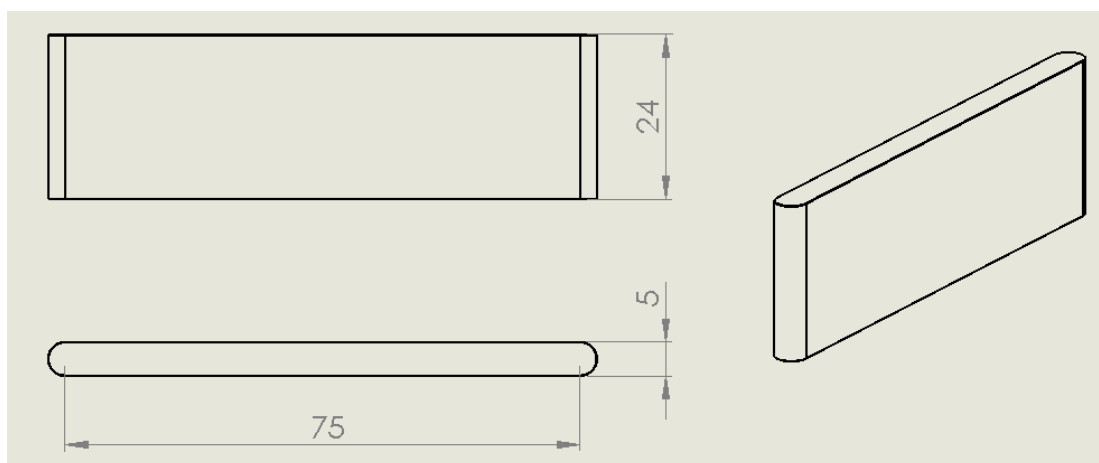


Figura 6.6: Geometria i dimensions GV3 (mm).

## 6.5 Disseny GV4

El quart disseny també és força senzill, similar a un GV de tipus aleta. La particularitat és la inclinació de la figura que a l'igual que el primer disseny, evita generar una resistència massa elevada.

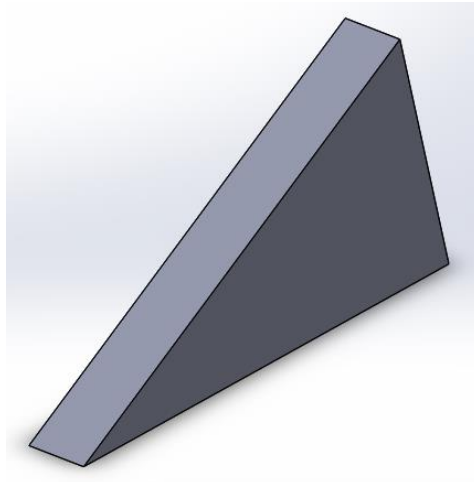


Figura 6.7: Vista 3D del GV4.

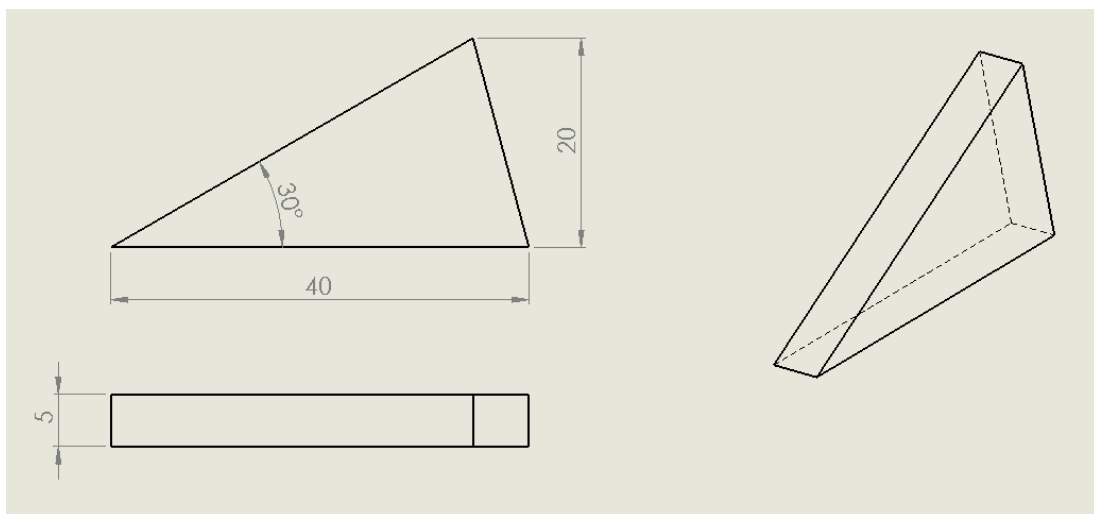


Figura 6.8: Geometria i dimensions GV4 (mm).

Com s'ha vist, tots els GV dissenyats tenen aspectes semblants i factors que comparteixen. Un dels factors ja explicat, és la cota de l'altura, que no interessa que excedeixi el gruix de la capa límit, per no generar turbulències en una zona no desitjada.

L'altre factor clau de disseny són els angles d'incidència. S'eviten cares frontals planes, on el flux xoqui perpendicularment. Totes les geometries tenen un creixement de la àrea frontal per reduir la resistència aerodinàmica. En el cas del GV3, s'han arrodonit les cares frontals per aconseguir el mateix efecte de reduir la resistència.

A continuació es simularan els 4 dissenys proposats i es compararan entre ells per determinar quin és el més eficient.

## 7. ANÀLISI COMPARATIU DELS DISSENYES DE GV

Un cop dissenyats els GV, ja els podem implementar en l'estructura del vehicle i simular-los. Primer de tot s'ha d'especificar com es volen fer les simulacions i seguir el mateix procediment en totes, per tal d'obtenir un resultat fiable.

Pel que fa la configuració de la simulació de l'ANSYS Fluent està explicat a l'apartat de metodologia, i és el procés que es seguirà en cada simulació.

Pel que fa la implementació dels GV en el cotxe, es col·loquen 6 unitats a la part del darrere del sostre i equidistants entre ells.

Com s'ha especificat en l'apartat del disseny dels GV, es simularan a una velocitat de 34 m/s (122,4 Km/h).

Primerament es simula el cotxe sense cap GV, s'especifica el  $C_d$  i es pren com a referència per fer la comparativa respecte el cotxe sense i amb GV.

Per a cada simulació es mostrarà el valor de  $C_d$  juntament amb la gràfica del valor durant la simulació, per tal de mostrar quina evolució ha seguit i l'estabilització del valor real. També es mostra la distribució dels GV en el vehicle i el mapa de contorn de velocitats.

Al final de l'apartat es resumeixen els resultats obtinguts, i es comparen els mapes de velocitats.

### 7.1 Simulació del cotxe sense GV

Com s'ha explicat primer es simula el cotxe sense GV. El valor del coeficient d'arrossegament obtingut és  $C_d = 0,7913$ .

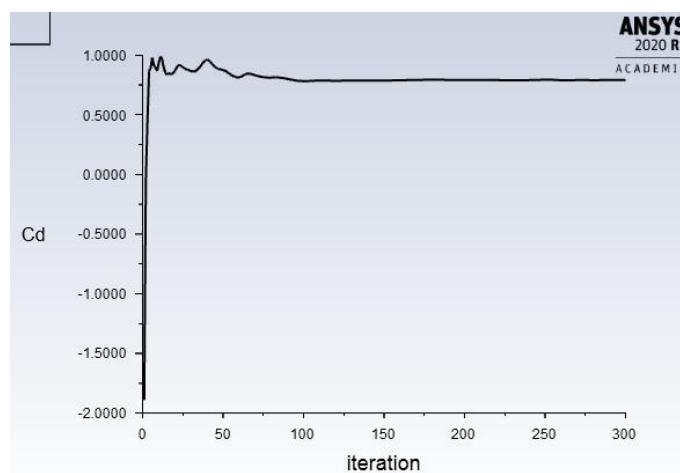


Figura 7.1: Gràfica de  $C_d$  al llarg de la simulació del cotxe sense GV;  $C_d = 0,7913$ .

Per veure l'estela del deixant es visualitza amb un mapa de velocitats en el pla que talla el cotxe longitudinalment per la meitat. Saber les velocitats ens proporciona informació per saber com actua el flux al voltant del cotxe. Al final de l'apartat es mostra la comparativa dels mapes obtinguts en les simulacions.

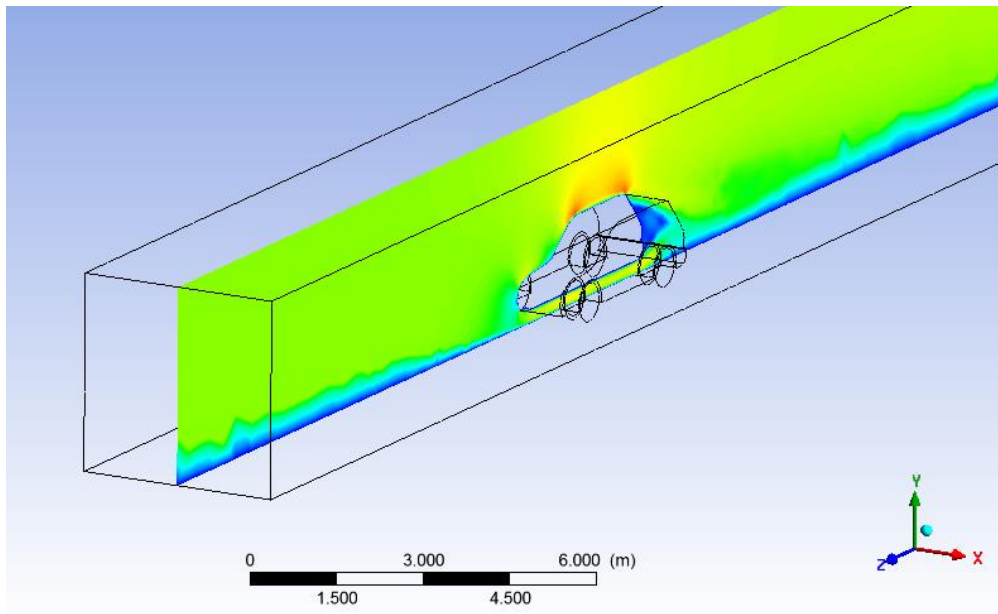


Figura 7.2: Pla en YZ que talla el cotxe per la meitat.

## 7.2 Simulació del cotxe amb GV1

Es disposen els GV1 al sostre del vehicle tal i com es mostra a la figura.

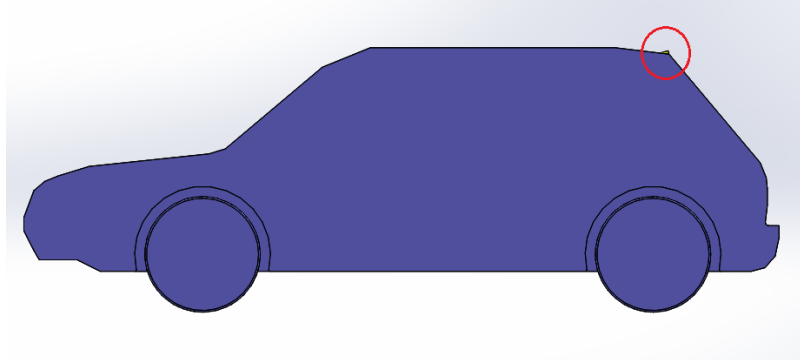


Figura 7.3: Posició dels GV.

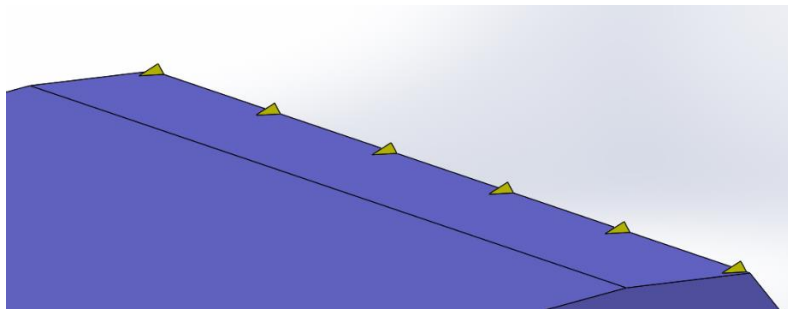


Figura 7.4: Distribució dels GV1.

El valor obtingut és  $C_d = 0,747$ , un 5,59% inferior respecte del cotxe sense GV.

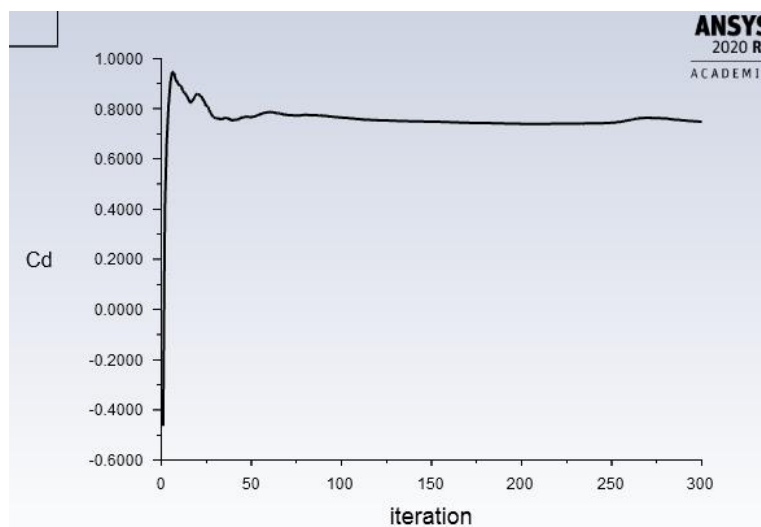


Figura 7.5: Gràfica de  $C_d$  al llarg de la simulació del cotxe amb GV1;  $C_d = 0,747$ .

### 7.3 Simulació del cotxe amb GV2

La distribució és la mateixa en tots els casos. La figura és perquè es vegi de quins GV s'està tractant.

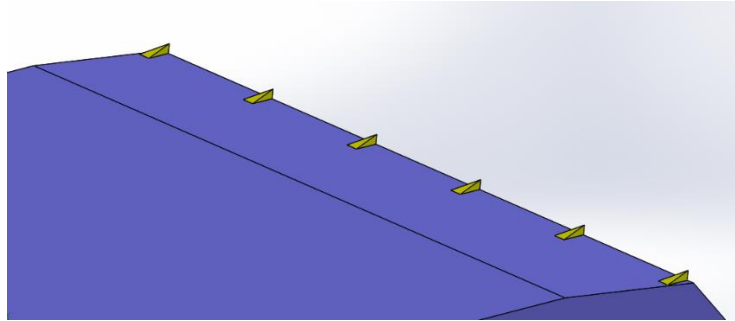


Figura 7.6: Distribució dels GV2.

El valor obtingut és  $C_d = 0,778$ , un 1,68% inferior respecte del cotxe sense GV.

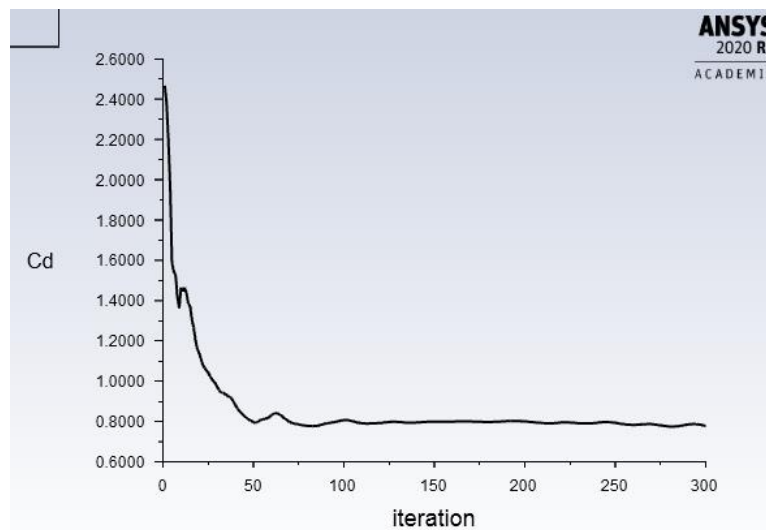


Figura 7.7: Gràfica de  $C_d$  al llarg de la simulació del cotxe amb GV2;  $C_d = 0,778$ .



#### 7.4 Simulació del cotxe amb GV3

De la mateixa manera s'assaja el següent disseny.

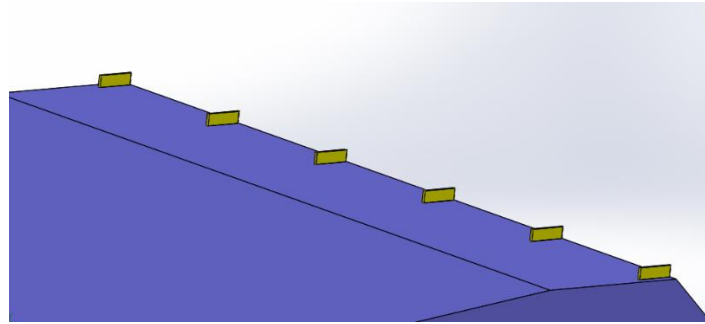


Figura 7.8: Distribució dels GV3.

El valor obtingut és  $C_d = 0,712$ , un 10,02% inferior respecte del cotxe sense GV.

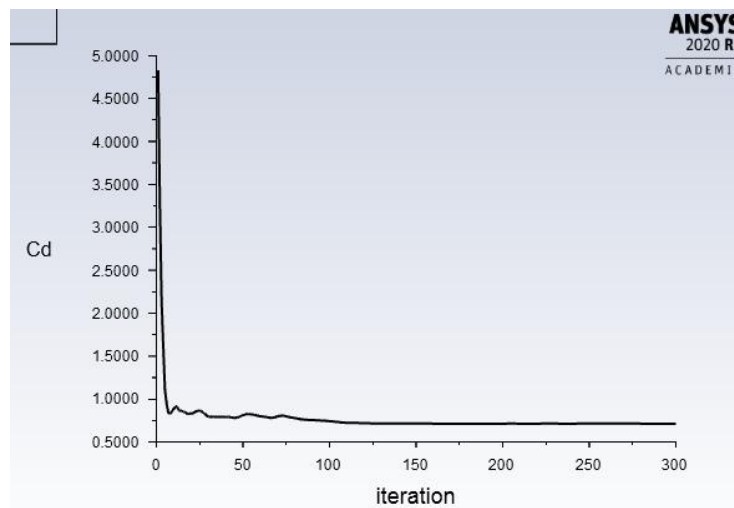


Figura 7.9: Gràfica de  $C_d$  al llarg de la simulació del cotxe amb GV3;  $C_d = 0,712$ .

Aquest disseny de GV ha aconseguit reduir el coeficient un 10,02%, una reducció molt notable.

## 7.5 Simulació del cotxe amb GV4

Es simula l'últim disseny proposat.

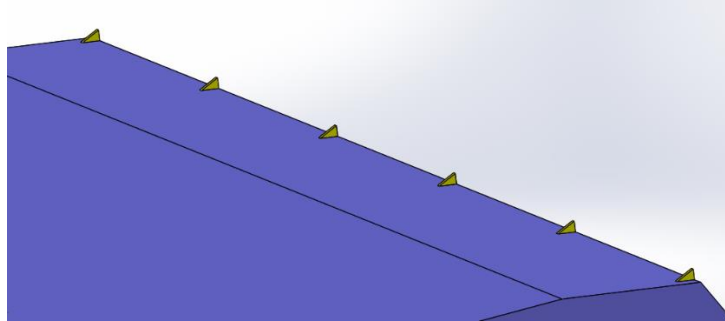


Figura 7.10: Distribució dels GV4.

El valor obtingut és  $C_d = 0,752$ , un 4,96% inferior respecte del cotxe sense GV.

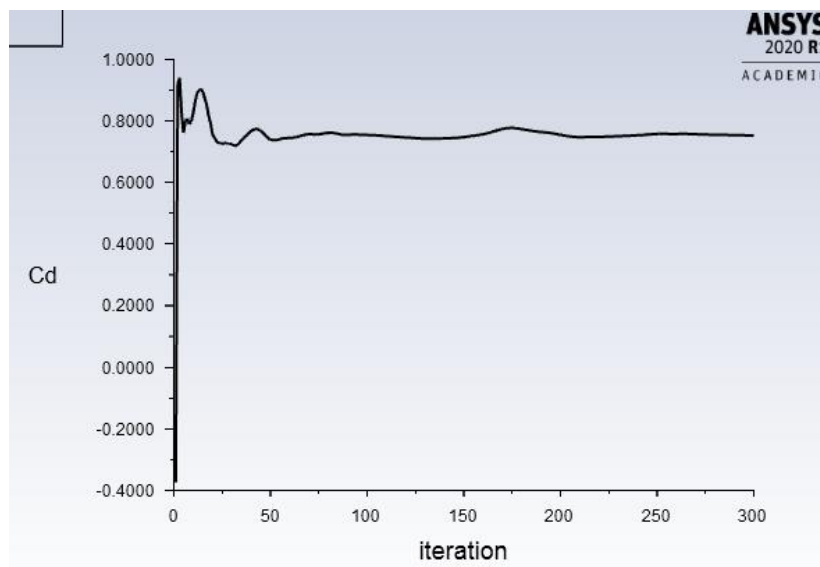


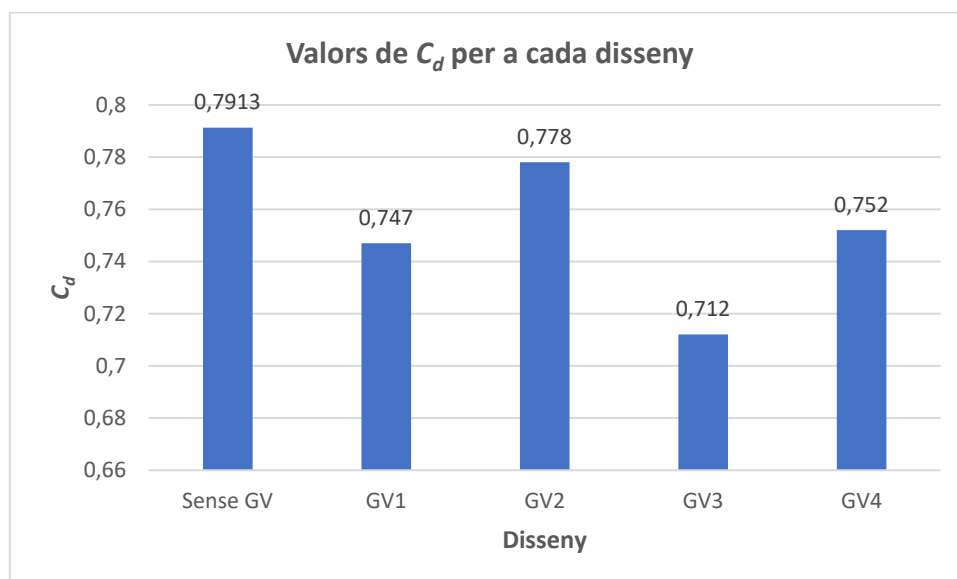
Figura 7.11: Gràfica de  $C_d$  al llarg de la simulació del cotxe amb GV4;  $C_d = 0,752$ .

## 7.6 Comparativa dels resultats obtinguts

Un cop fetes totes les simulacions es resumeixen els resultats obtinguts, per interpretar els valors més fàcilment. Es mostren els valors de  $C_d$  per a cada disseny de generador de vòrtex, amb el percentatge de reducció respecte al cotxe sense GV.

Disseny	$C_d$	% de reducció del $C_d$
Sense GV	0,7913	-
GV1	0,747	-5,59%
GV2	0,778	-1,68%
GV3	0,712	-10,02%
GV4	0,752	-4,96%

Taula 7.1: Taula de valors de  $C_d$  (Dissenys).



Gràfica 7.1: Valors de  $C_d$  (Dissenys).

Tots els dissenys de GV han donat resultat, tal i com s'esperava, tot i que alguns són més eficaços que d'altres. Clarament, el tercer disseny és el que ha reduït més el coeficient d'arrossegament. Pot semblar que ha disminuït molt poc, però si ens fixem en el percentatge respecte al cotxe sense GV, apreciem com aquesta reducció del 10,02% es força notable.

L'equivalència en la força d'arrossegament que suporta el cotxe a la velocitat de l'estudi de 34 m/s, és que el cotxe sense GV ha d'arrastrar uns 14 Kg més que el cotxe amb GV3. Cal remarcar que aquesta força no és com si carregéssim el cotxe amb una maleta del mateix pes, sinó que és la força horitzontal que ha de vèncer el cotxe, per tant molt més important.

En trajectes llargs pot representar un estalvi notable de combustible, (una reducció del consum d'aproximadament 2,5%) i també s'ha de tenir present que com més altes són les velocitats, més grans són les forces que es generen, i per tant més rellevància se li atribueix a la reducció del coeficient d'arrossegament.

Un aspecte important a comentar és la geometria que ha donat més bons resultats. El disseny està basat en els d'aviació i automoció de competició, i s'ha comprovat que és un disseny molt eficaç.

L'altura del dispositiu era la més gran de tots els dissenys (24mm), arribant així a més alçada dins la capa límit i millorant el rendiment. Pot ser que sigui un factor que hagi afavorit el disseny.

Tot i això, la geometria és molt senzilla, cosa que afavoreix a la fabricació i la implantació en el vehicle. S'ha de pensar que poden anar col·locats en superfícies corbes, per tant interessa que sigui fàcil d'implementar sense modificar la geometria. Al tractar-se d'una placa pot ser modelat com es vulgui i inclús es pot corbar per si es desitja redirigir el flux d'aire, com es fa en l'automoció de competició.

S'ha de dir que aquests resultats no es poden generalitzar per a tots als vehicles. Cada vehicle té una geometria concreta i potser respon millor a uns altres GV i una distribució diferent. Abans d'implementar els dispositius s'hauria de fer un estudi com aquest, per tal d'avaluar el comportament de varis dissenys. Per això, en el següent apartat s'aprofundirà més en analitzar i comparar el comportament entre diverses distribucions i configuracions del disseny GV3, que és el més eficaç.

Per últim es mostren els mapes de velocitats del cotxe sense GV i els de cada disseny de GV.

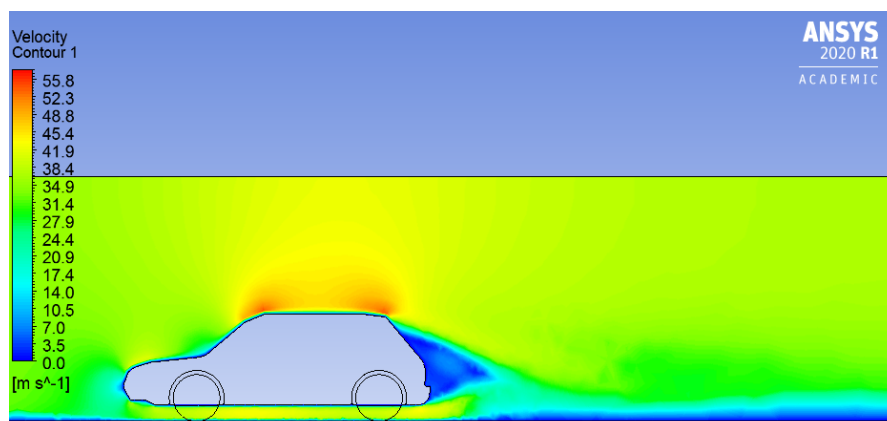


Figura 7.12: Mapa de velocitats del cotxe sense GV.

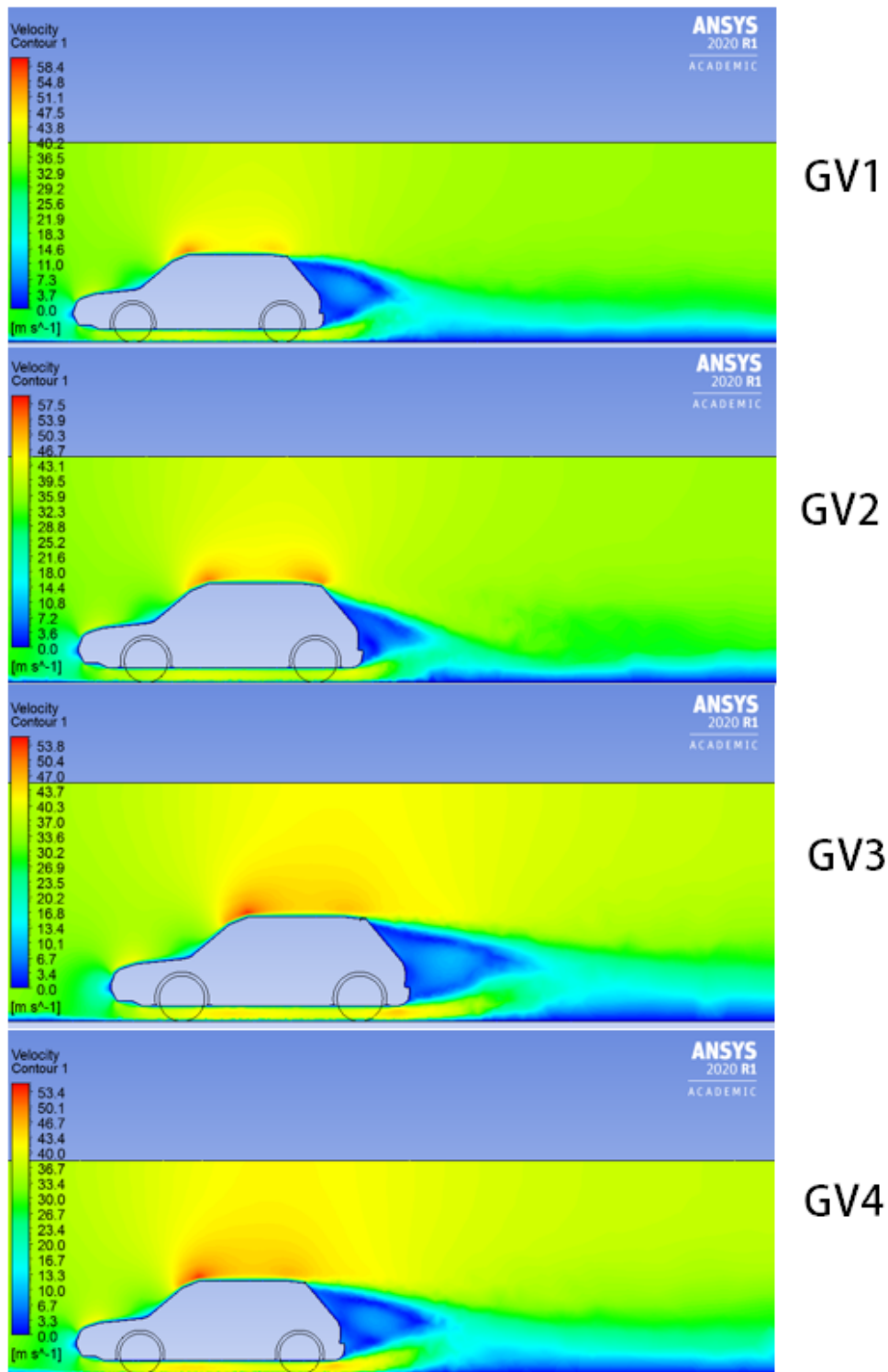


Figura 7.13: Comparativa dels mapes de velocitats.

Si ens fixem en els mapes de velocitat, es veu com l'estela produïda s'allarga més amb els GV, i això sembla que no tingui sentit amb que el resultat de  $C_d$  hagi disminuït. Això es deu a que les diferències de velocitats dins el deixant, han disminuït. La incorporació dels GV han fet que

l'estela tingui una forma diferent, en concret han provocat que el flux que es separa del cotxe segueixi recte durant més distància, fent que la diferència de velocitats no sigui tant brusca.

Es com si l'estela no afectés tant, tot i que és més gran, ja que està més allunyada del cotxe. Si ens fixem en el cotxe sense GV, es veu com l'estela està completament enganxada, a diferència dels cotxes amb GV. En el cas de GV3 és on s'aprecia millor l'efecte generat, ja que és el que ha donat millors resultats.

## 8. ANÀLISI COMPARATIU DELS PARÀMETRES I CONFIGURACIONS DELS GV

En l'apartat anterior, s'han comparat els 4 tipus de GV, i s'ha vist com el GV3 és el que ha donat més bon resultat. En aquest capítol, es modificarà alguns paràmetres per tal de veure el resultat en les noves condicions imposades, i arribar a obtenir una configuració òptima (dins dels límits dels paràmetres que es modifiquin).

Els paràmetres que es modificaran són l'altura del GV, la quantitat d'elements implementats, l'angle entre dos elements col·locats en el cotxe, i la velocitat de treball.

Es consideren que són paràmetres importants que afecten directament a el resultat. L'altura afecta en la capacitat de generar turbulència dins la capa límit, per tant, en teoria si disminuïm l'altura perdrem eficàcia del GV, però tampoc és bo si l'augmentem massa ja que pot ser que actui fora la capa límit.

Es considera que la quantitat de dispositius que s'instal·lin pot influir directament en l'efecte que tenen. De nou, tampoc és bo col·locar-ne molts ja que s'interferirien entre ells.

Pel que fa l'angle entre dos dispositius, s'espera obtenir un angle on millori el rendiment dels GV. La idea es que amb un cert angle d'inclinació hi haurà més àrea eficaç i provocarà un major impacte en la generació de remolins. El fet de col·locar-los de dos en dos és crear un efecte d'embut en una zona determinada i que els possibles refluxos que pugui haver-hi es compensin entre ells.

La velocitat de treball també és molt important a l'hora de fer el disseny dels GV, ja que determina l'altura de la capa límit. Fins ara s'ha mantingut la velocitat constant, però també és d'interès saber com es comportarà un mateix GV en diferents velocitats, ja que un cotxe en la carretera està constantment variant la velocitat a excepció de les autopistes.

Per a ordenar l'anàlisi i poder comparar-ho millor, primer s'analitzarà el comportament modificant l'altura. Posteriorment es treballarà amb el GV amb l'altura que hagi respòs millor i es modificarà la quantitat d'elements. Seguint amb el mateix patró, s'agafarà el nombre de GV que responguin millor i es modificarà l'angle entre ells. Per últim, s'utilitzarà la combinació d'altura, quantitat i angle que sigui més eficaç i es simularà en diferents velocitats.

En cada apartat només es modifica el paràmetre que s'estigui estudiant mentre els altres es mantenen constants. D'aquesta manera es pot valorar únicament el paràmetre que s'està comparant.

Els valors dels paràmetres que s'han agafat per a fer l'anàlisi s'especifiquen i es justifiquen en cada subapartat.

### 8.1 Paràmetre: Altura del GV

L'altura dels GV és bàsica per tal de que actuïn com es desitja. Es simularan 4 altures diferents, més la que ja teníem del primer disseny. Les altures que s'han agafat per l'estudi estan pensades per demostrar que la zona de treball del GV està dins la capa límit, i valorar quina és l'altura òptima de treball.

Aquestes simulacions s'han fet igual que les altres, és a dir col·locant 6 dispositius, i a una velocitat de 34 m/s.

Tenint en compte que el gruix de la capa límit és d'uns 30 mm, les alçades estudiades "h" són: 16, 20, 24 i 32 mm.

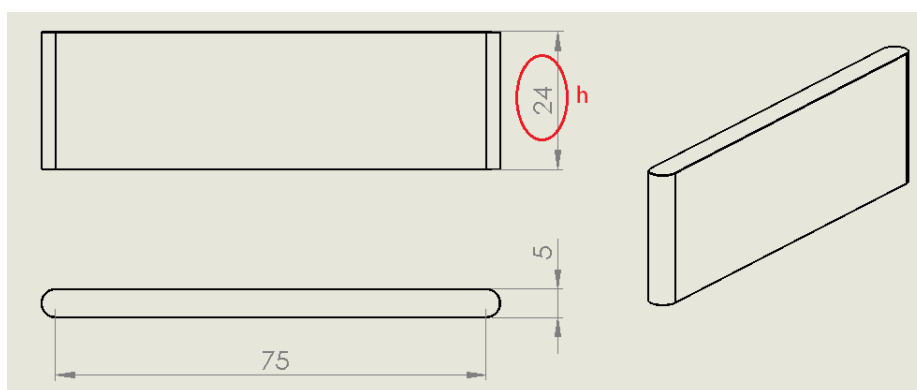


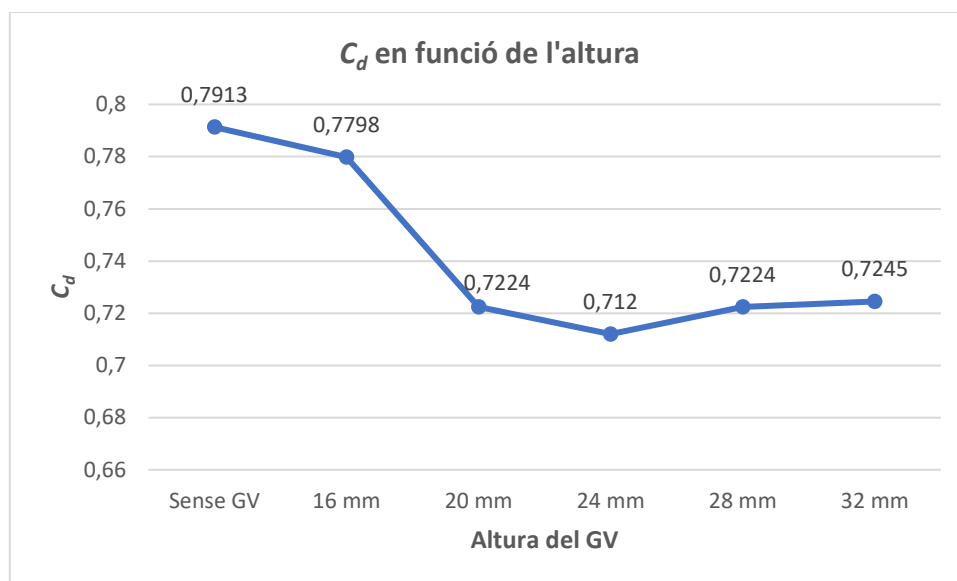
Figura 8.1: Cota modificada (Altura).

S'entén que per a cada simulació s'han tornat a obtenir unes gràfiques i unes solucions de mapes de velocitats similars, per això no es tornen a mostrar una per una.

Es resumeixen directament els resultats obtinguts de  $C_d$  i es comparen, de nou, amb el cotxe sense GV.



Altura	Cd	% de reducció del Cd
Sense GV	0,7913	-
16 mm	0,7798	-1,45%
20 mm	0,7224	-8,71%
24 mm	0,712	-10,02%
28 mm	0,7224	-8,71%
32 mm	0,7245	-8,44%

Taula 8.1: Taula de valors de  $C_d$  (Altures).Gràfica 8.1: Gràfica dels valors de  $C_d$  en funció de l'altura.

Com s'esperava de les hipòtesis teòriques, l'altura òptima és al voltant del gruix de la capa límit. En el nostre cas equival a l'altura de 24 mm, que precisament és el que ja teníem dissenyat per el primer anàlisi comparatiu.

Si l'alçada no és suficient, l'efecte que genera no és gaire important. Per l'altre banda, si el fem massa gran treballarà fora la capa límit, generant resistència.

S'ha de pensar que aquest és un cas en concret, però tot i això es pot generalitzar. És més útil interpretar el resultat com a un percentatge respecte la capa límit, per tant es pot afirmar que l'alçada òptima de treball és un 80% del gruix de la capa.

En la figura 8.2 es comparen els deixants del GV de 16mm (A dalt), i el de 24mm (A baix). Es veu com l'efecte del de 16mm no s'allarga tant, i les turbulències es queden enganxades al cotxe.

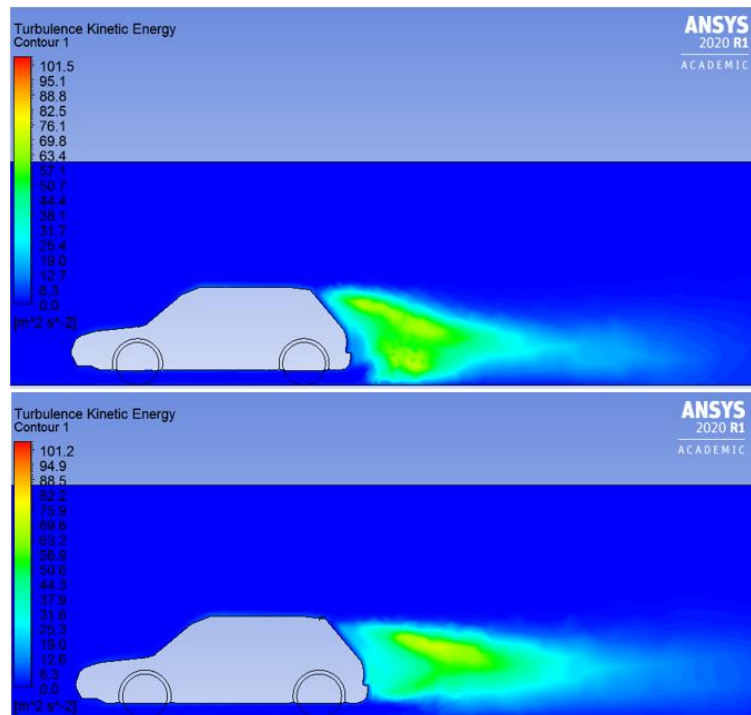


Figura 8.2: Comparativa de les esteles; A dalt 16mm; A baix 24mm.

Un cop s'ha obtingut l'alçada que dona més bon resultat, es valora el següent paràmetre, és a dir la quantitat de GV.

## 8.2 Paràmetre: Quantitat de GV

Com s'ha especificat, s'estudiarà la quantitat d'elements, a partir del GV de 24 mm d'alçada, ja que és el que ha donat millors resultats

Per tal de fer l'estudi comparatiu del nombre de dispositius, simplement es col·loquen la quantitat de GV que es vulgui estudiar de manera equidistant, en la mateixa posició que les anteriors simulacions.

Les quantitats estudiades són: 4, 6 i 8 elements. En la figura es mostra la distribució en el cas de 8 elements.

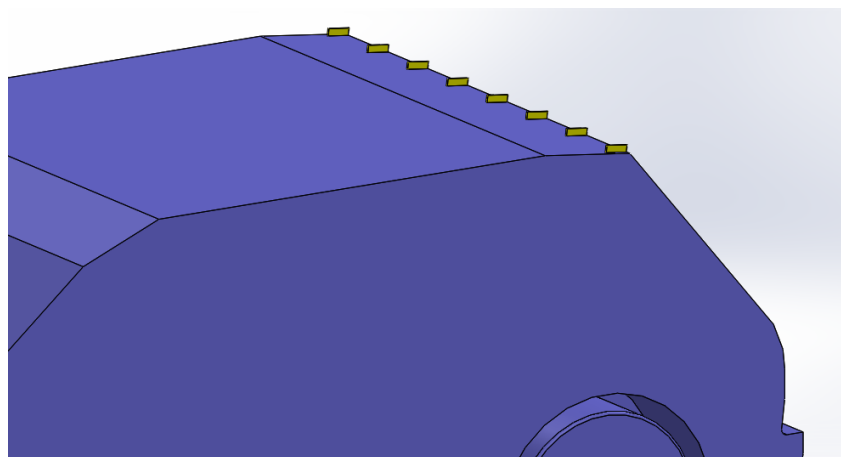
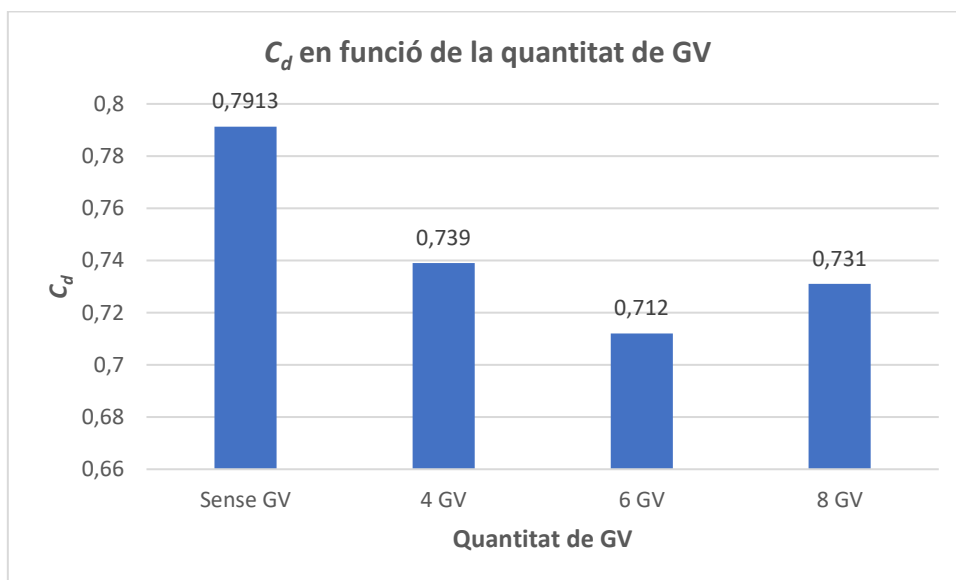


Figura 8.3: Distribució del cas amb 8 elements.

Es simulen els casos i s’obtenen els següents resultats:

Quantitat	Cd	% de reducció del Cd
<b>Sense GV</b>	0,7913	-
<b>4 GV</b>	0,739	-6,60%
<b>6 GV</b>	0,712	-10,02%
<b>8 GV</b>	0,731	-7,62%

Taula 8.2: Taula de valors de  $C_d$  (Quantitat).



Gràfica 8.2: Valors de  $C_d$  (Quantitat).

Pel que fa la quantitat s'ha encertat des de bon principi. Totes les simulacions estan fetes amb 6 unitats, i efectivament és la quantitat més òptima.

És intuïtiu i correcte pensar que com menys elements hi hagi, menys efecte generaran. Però seria un error pensar que la quantitat millora l'efecte. És cert fins a un punt, on ja no es redueix més el coeficient, sinó el contrari, augmenta.

El fenomen es degut a la proximitat excessiva entre els elements. Al estar tant junts, els vòrtexs generats es solapen, creant l'efecte contrari. Apareix un excés de turbulències descontrolades.

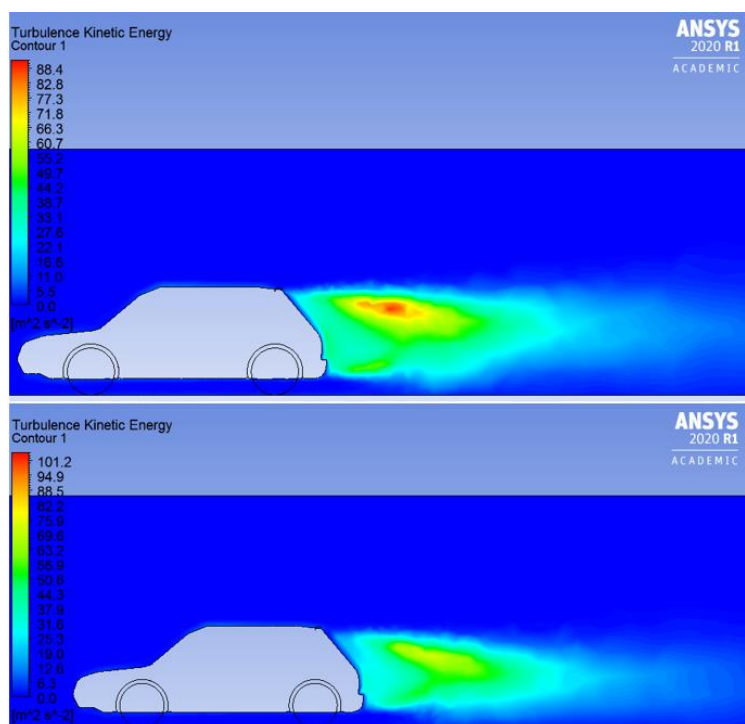


Figura 8.4: Comparativa de les esteles; A dalt 8 elements; A baix 6 elements.

S'insisteix en que aquest estudi és un cas en particular i per tant no es pot generalitzar. Tot i això, es pot valorar com a una relació entre l'altura del GV i la distància que hi ha d'haver entre ells.

S'està treballant amb els GV de 24 mm d'alçada, i hem trobat que la quantitat òptima és de 6 elements en un cotxe que fa 1700 mm d'amplada, per tant es pot afirmar que entre elements hi ha d'haver una distància d'unes 14 vegades l'alçada del GV.

Com que l'alçada òptima dels GV s'ha demostrat que estar al voltant d'un 80% de la capa límit, també es pot dir que la distància entre els GV ha de ser d'unes 11 vegades el gruix de la capa límit.

### 8.3 Paràmetre: Angle entre els GV

Per fer l'estudi de l'angle també s'ha d'especificar algunes distàncies que roman constants, per tal de variar únicament l'angle sense variar altres paràmetres.

S'implantarà 6 GV de 24mm d'alçada, que és la combinació que de moment ha donat més bon resultat. La distància entre GV és de 200mm i es mantindrà constant per a totes les simulacions d'angle. A la figura es mostra la distància i l'angle que s'està tractant.

Els angles que s'estudiarà són de 0, 5 i 10°. Si orientéssim els GV amb massa angle, l'àrea frontal dels elements crearia resistència, per això els angles estudiats són petits.

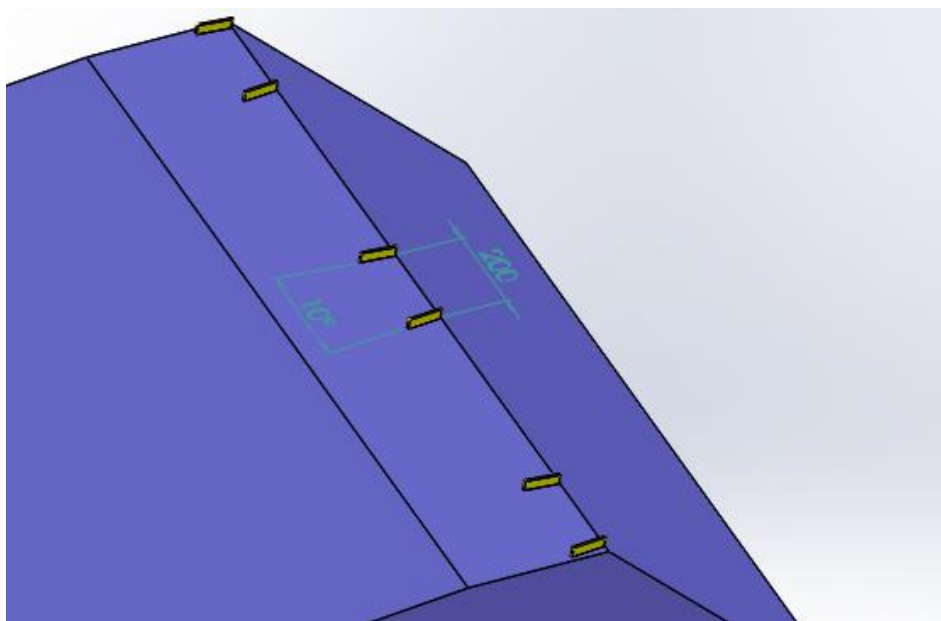
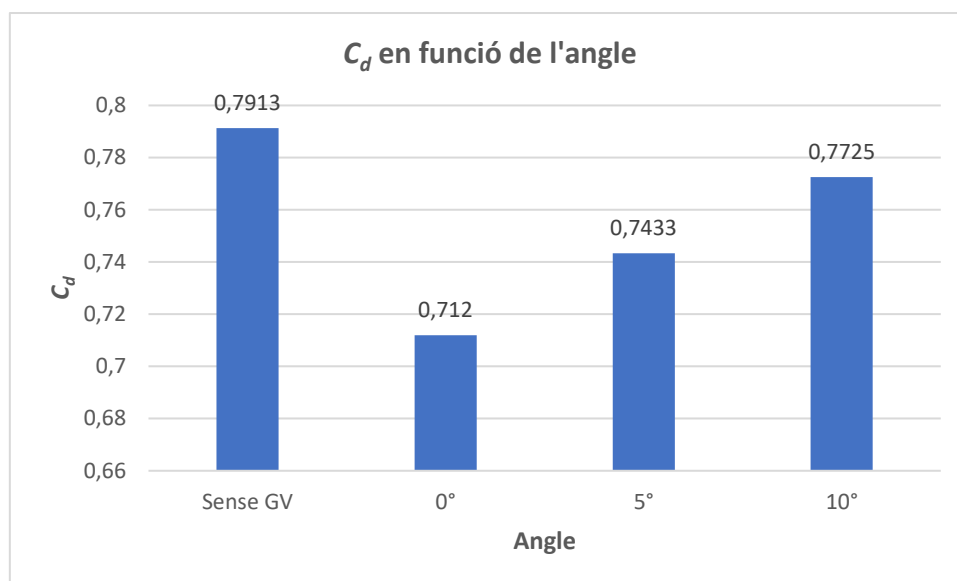


Figura 8.5: Distribució dels GV amb angle 10°.

Un cop simulats els casos, s'obtenen els resultats següents:

Angle	Cd	% de reducció del Cd
Sense GV	0,7913	-
0°	0,712	-10,02%
5°	0,7433	-6,07%
10°	0,7725	-2,38%

Taula 8.3: Taula de valors de  $C_d$  (Angle).

Gràfica 8.3: Valors de  $C_d$  (Angle).

Per una part si que han reduït el  $C_d$  respecte el cotxe sense els elements, cosa que és favorable. Però per altre banda, l'efecte que s'esperava aconseguir no és exactament el que els resultats mostren. Es creia que l'angle ajudaria a generar els remolins afavorint al comportament aerodinàmic. Probablement no s'ha arribat al resultat esperat perquè la distància entre ells no és l'adequada, provocant un excés de turbulències descontrolades. A més, sembla que a major angle el resultat empitjora, ja que la resistència generada no és compensada per l'efecte dels vòrtexs.

Si comparem les esteles dels GV a 10°, i dels GV a 0°, no hi ha massa diferència, però tot i això es veu com el primer deixant (10°) no té una forma tant definida que segueixi la línia del cotxe, sinó que xoca contra el terra i no s'arriba a allargar massa.

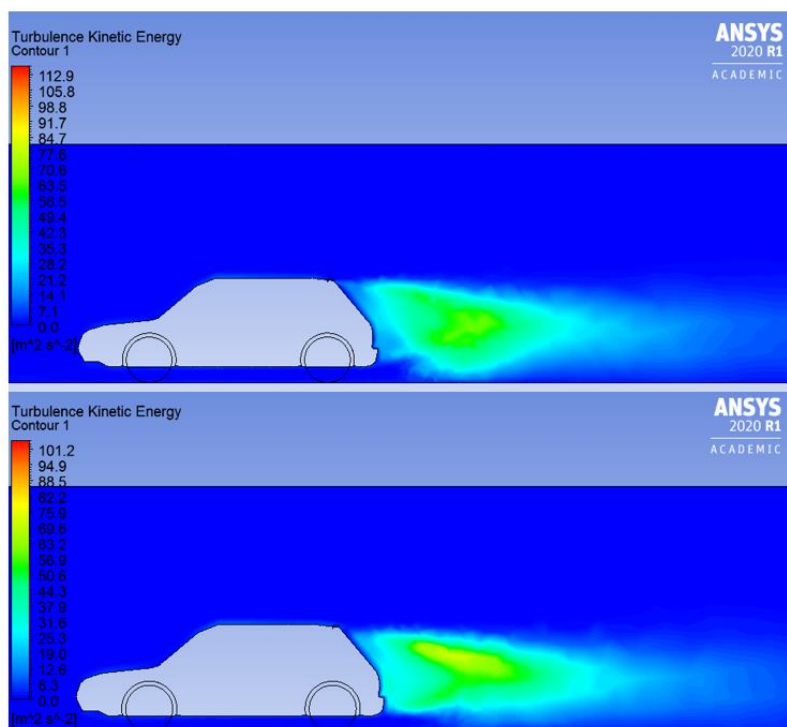


Figura 8.6: Comparativa de les esteles; A dalt GV a 10°; A baix GV a 0°.

No podem afirmar que l'angle sigui un paràmetre que ens vagi a favor en el nostre cas, però tot i això, pot donar bons resultats segons la geometria i l'aplicació que s'estigui tractant.

### 8.4 Paràmetre: Velocitat de funcionament

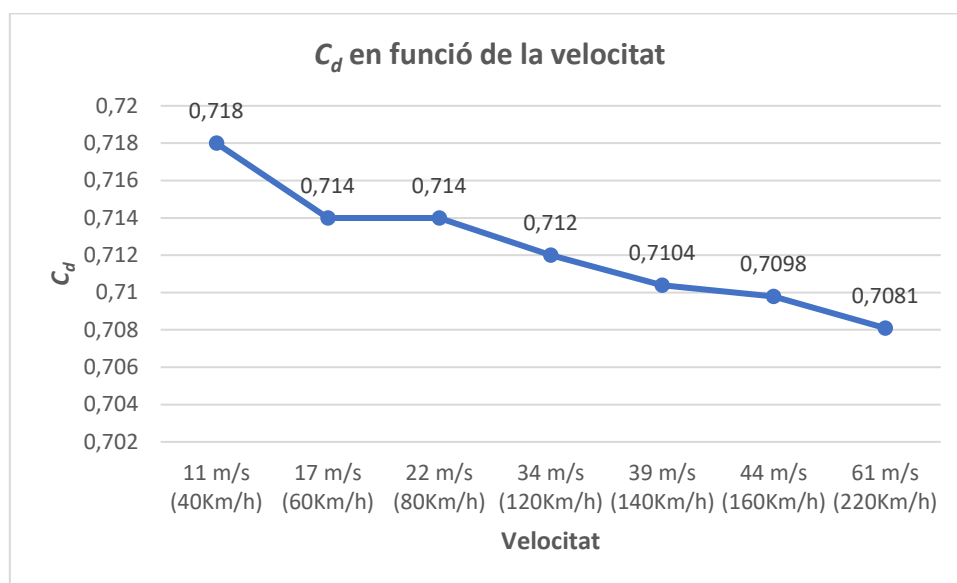
Per últim, es simularà la combinació dels paràmetres dels GV estudiats que millor resultats ha donat i es tractarà a diferents velocitats de treball.

La configuració més òptima és de 6 unitats del disseny GV3 de 24mm d'alçada, disposats a 0°.

L'objectiu de valorar la velocitat és apreciar com a altes velocitats és més efectiu l'ús de GV. Les velocitats d'estudi seran: 40, 60, 80, 120, 140, 160 i 220 Km/h.

Els casos de 160 i 220 Km/h són per mostrar l'efecte a altes velocitats en el cas d'un automòbil de competició.

Velocitat	Cd	% de reducció del Cd
11 m/s (40Km/h)	0,718	-9,26%
17 m/s (60Km/h)	0,714	-9,76%
22 m/s (80Km/h)	0,714	-9,76%
34 m/s (120Km/h)	0,712	-10,02%
39 m/s (140Km/h)	0,7104	-10,22%
44 m/s (160Km/h)	0,7098	-10,30%
61 m/s (220Km/h)	0,7081	-10,51%

Taula 8.4: Taula de valors de  $C_d$  (Velocitat).Gràfica 8.4: Valors de  $C_d$  (Velocitat).

Per comparar la velocitat no s'agafa la referència del cotxe sense GV, sinó que es valora el resultat dels mateixos elements a diferents velocitats.

Com s'havia predit, els resultats demostren que a major velocitat, més efectiu és l'efecte dels GV. No es una millora dràstica, però quan es tracta de vehicles que es mouen a altes velocitats com és l'exemple d'un avió o un cotxe de competició, interessa centrar-se en un disseny que millori al rendiment a altes velocitats.

Pel que fa el comportament a baixes velocitats (40 Km/h), el rendiment aerodinàmic és molt bo tenint en compte que el disseny del GV ha estat pensat per a 120 Km/h.

Es podria pensar que el vehicle sense GV a altes velocitats també disminueix el  $C_d$  de la mateixa manera que es redueix amb els dispositius implementats, però no és així. S'ha simulat el cotxe sense GV a 220 Km/h i el valor obtingut és  $C_d = 0,7901$ , és a dir pràcticament el mateix a 120 Km/h que és de  $C_d = 0,7913$ .



## 9. RESULTATS

En els capítols anteriors s'han calculat i especificat totes les configuracions dels GV implementats en el cotxe que entren dins l'abast de treball. En aquest capítol es tracta de resumir tots els valors i resultats obtinguts. No s'especifica com s'ha simulat, només es resumeix el que s'ha fet, adjuntant els resultats.

S'han dissenyat 4 tipus de GV, amb la finalitat de trobar el disseny més eficaç. Un cop implementats en el vehicle, s'han simulat i s'ha obtingut que el disseny GV3 és el que millors resultats ha donat, amb una reducció del  $C_d$  d'un 10,02% respecte el cotxe base sense GV.

Posteriorment, agafant el disseny GV3, s'ha modificat l'altura de l'element, per veure els canvis del comportament aerodinàmic en funció de l'altura. Després de simular varies alçades, la cota més òptima és la de 24mm, que és la que ja tenia el propi disseny GV3. Per tant, la reducció de  $C_d$  no s'ha vist reduït respecte l'anterior.

El següent paràmetre modificat, ha sigut la quantitat d'elements disposats en l'estructura del vehicle. De nou, la quantitat d'elements òptima és de 6 unitats, que és la distribució que s'ha fet servir durant les altres simulacions.

Amb la mateixa finalitat de deduir la configuració dels paràmetres amb el comportament aerodinàmic més òptim, s'ha decidit modificar l'angle entre dos elements GV. Fins ara s'ha estat calculant amb un angle de 0°, és a dir paral·lel al flux d'aire. Curiosament, els resultats ens indiquen que és l'angle més eficaç, o sigui sense inclinació.

Per últim s'ha valorat com a altes velocitats l'efecte generat és més important. Tot i això, la reducció de  $C_d$  és molt petita. És a dir, la reducció del *drag* a 120Km/h és d'un 10%, i la reducció a 220Km/h és del 10,51%.

Tots aquests resultats són per el cas específic de la simplificació del cotxe que s'ha dissenyat. No es pot generalitzar per a tots els casos, però si que es poden treure conclusions molt bones.

## 10. CONCLUSIONS

Amb aquest apartat es pretén recollir els resultats obtinguts i valorar els objectius de l'estudi.

- El primer punt a tractar és la resolució dels objectius. Pel que fa l'objectiu principal de reduir la resistència aerodinàmica d'un vehicle, s'ha resolt de forma positiva, donant una resposta al problema que s'estava perseguint. Pel que fa el comportament dels elements estudiats, s'han comparat, obtenint unes respostes fiables que permeten treure conclusions i corroborar les hipòtesis teòriques plantejades.

- Després d'haver fet l'estudi aerodinàmic del cotxe i comparar l'efecte dels generadors de vòrtexs, es pot afirmar que un bon ús d'aquests elements, milloren el rendiment aerodinàmic del vehicle. Quan es parla d'un bon ús, ens referim a que hi hagi un estudi del mateix estil abans d'implementar-los. Com s'ha apreciat, el comportament dels elements depenen de varis factors que poden ser modificats, i obtenint moltes possibles combinacions. Per tant, si es tracten els paràmetres correctament, es pot fer un estudi similar per aplicacions com ara l'automoció de competició o l'aviació.

- En aquest punt ens centrem en fer una reflexió sobre la qualitat dels resultats obtinguts i dels possibles punts dèbils de l'estudi. En conjunt es considera haver arribat a uns resultats fiables i força verídics. No obstant això, els valors no es poden prendre estrictament, per exemple, els valors de  $C_d$ , no són els mateixos que ens trobaríem si féssim l'estudi amb la geometria exacte d'un cotxe. Això ve donat per la simplificació de la geometria del vehicle, que ja es sabia de bon principi que no s'obtidrien els valors reals que obtenen les empreses d'automoció quan simulen els seus vehicles. Tot i això, els resultats segueixen sent vàlids dins el marc de la simplificació del vehicle i es podria fer el mateix estudi amb simulació CFD si es disposa de la geometria real del cotxe que s'estigui tractant.

- Per últim, cal comentar que durant l'elaboració d'aquest estudi, he hagut d'afrontar moltes dificultats pel que fa l'aprenentatge i la familiarització amb l'*ANSYS Fluent*, tot i que un cop confeccionat l'estudi he aconseguit adquirir un coneixement addicional amb el programari CFD. Tenint en compte que s'ha utilitzat una versió d'estudiant de l'*ANSYS*, s'han obtingut resultats molt bons. A més la capacitat de càlcul i simulació que té aquest programari en el camp de l'enginyeria és de gran aplicació, cosa que el fa més atractiu a l'hora de treballar-hi. És per això, que considero que ha sigut un intens però satisfactori estudi.

## 11. BIBLIOGRAFIA

- [1] ***Mecanica de los Fluidos***, FRANK M. WHITE, McGraw-Hill; 5ta Edición, ISBN 10: 8448140761
- [2] ***Fluid Dynamics***, MICHEL RIEUTORD, Springer; ISBN 978-3-319-09351-2 (eBook)
- [3] ***The Finite Element Method and Applications in Engineering Using ANSYS®***, ERDOGAN MADENCI · IBRAHIM GUVEN, Springer; ISBN 978-1-4899-7550-8 (eBook)
- [4] Exemples d'altres TFG,  
Consorti de Serveis Universitaris de Catalunya (CSUC) [[http://cbueg-mt.iii.com/iii/encore/search/C\\_SAerodinamica\\_Orightresult\\_U?lang=cat&suite=def](http://cbueg-mt.iii.com/iii/encore/search/C_SAerodinamica_Orightresult_U?lang=cat&suite=def)]  
DUGiDocs [<https://dugi-doc.udg.edu/>]
- [5] Canals de YouTube  
CFD.NINJA ANSYS [<https://www.youtube.com/user/Ivanrips/vídeos>]  
ANSYS How To Videos [<https://www.youtube.com/user/ANSYSHowToVideos/videos>]

## ANNEXOS

### A. SIMULACIÓ DE GV EN UNA PLANXA

Per veure de més a prop l'efecte que creen els GV, s'ha simulat dos elements col·locats en una placa de  $1800\text{mm} \times 160\text{mm} \times 2\text{mm}$ , perquè es vegi la capa límit.

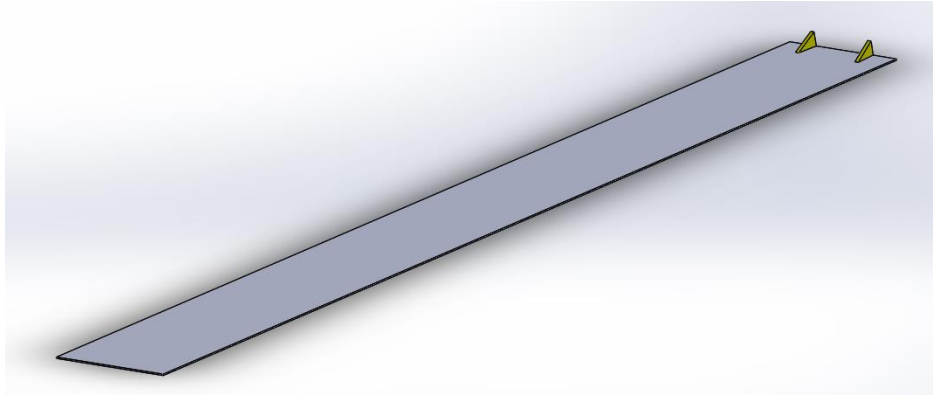


Figura A.1: GV col·locats a la planxa.

Pel mallat s'ha fet força fi, amb una inflació al voltant de la planxa i del GV per captar millor la capa límit.

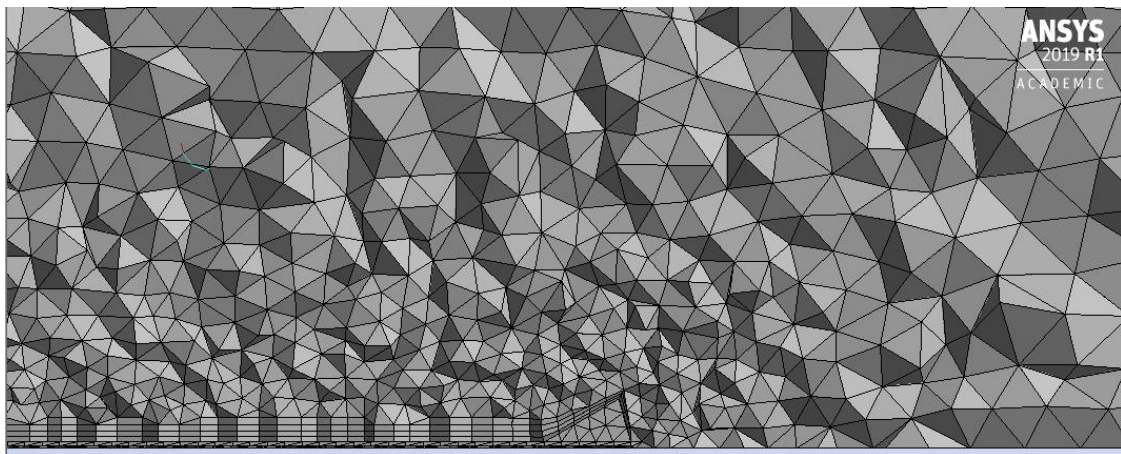


Figura A.2: Detall del mallat.

S'ha simulat el conjunt a  $34\text{ m/s}$ , com s'ha fet durant l'estudi.

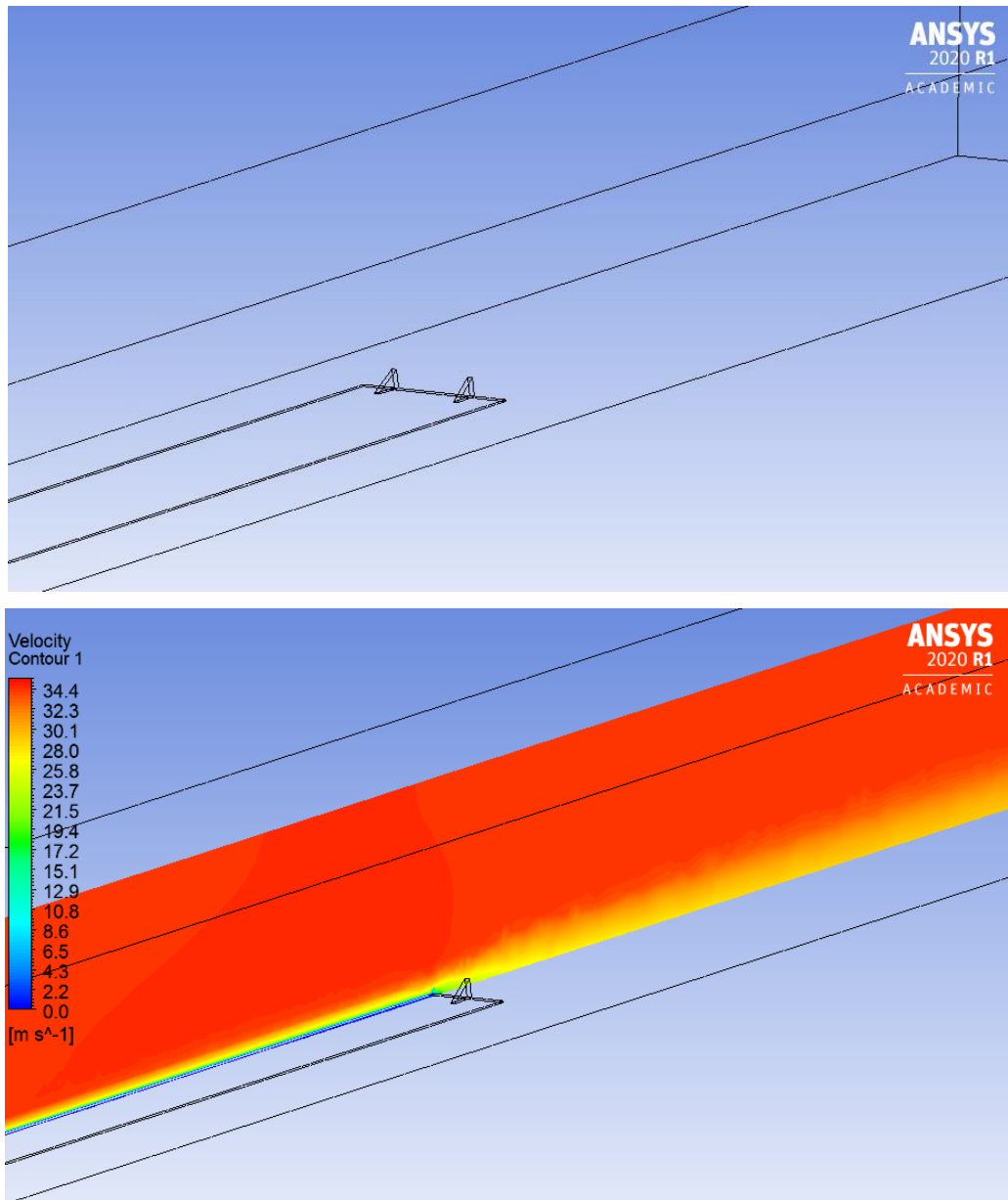


Figura A.3: Mapa de velocitats del pla central.

Es pot apreciar la capa límit que es crea a la planxa i quan arriba al GV, es desfà però mantenint la direcció que portava. Aquest efecte és el que s'aconsegueix en l'estructura del vehicle, allargant i deformant l'estela, reduint la resistència induïda per aquesta. En la següent figura es veuen les velocitats en el pla que talla un GV. És una bona imatge per veure la capa límit i la distorsió de velocitats que provoquen els dispositius.

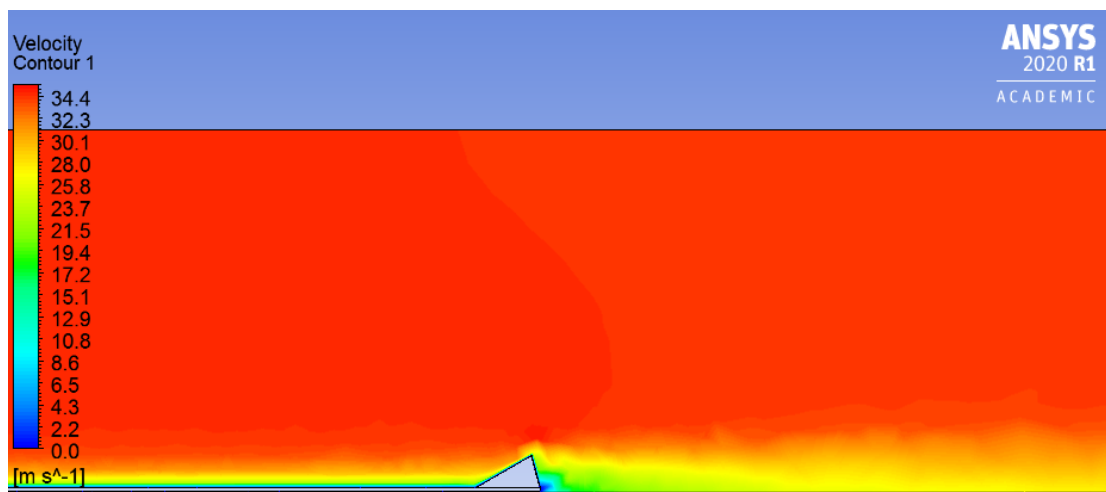


Figura A.4: Capa límit i estela generada pels GV.

## B. IMPACTE MEDIABIENTAL

L'impacte ambiental d'aquest estudi és pràcticament nul. El fet de realitzar l'estudi mitjançant un software de simulació, permet resoldre problemes d'enginyeria pràcticament sense cap impacte ambiental. L'única despesa que s'ha de considerar és l'electricitat que consumeix l'ordinador i la llum de la oficina. Per aquesta raó, és interessant comparar l'energia gastada en la simulació CFD amb les despeses que implicaria realitzar la simulació en un túnel de vent físic.

Un ordinador té un consum d'uns  $250W$  que amb el total de hores invertides obtenim una energia consumida de  $88,5kWh$ . A un preu de  $0,14€/kWh$  significa uns  $12,5€$  (Només ordinador).

Pel que fa un túnel de vent per simular-hi cotxes, gasta uns  $120€/h$  de funcionament. La diferència és evident, tot i que cal dir que el túnel de vent només funciona unes hores determinades per obtenir els resultats mitjançant sensors.

S'estalvien grans quantitats d'energia si s'utilitzen programes de simulació CFD, resultant amb un impacte ambiental molt més favorable. S'ha de tenir en compte que, tot i que el software de simulació proporciona resultats molt verídics, probablement el túnel de vent aconseguirà una resposta més acurada dels valors.

A més de l'energia gastada en el túnel de vent, s'hi ha de sumar les despeses relacionades en la fabricació de la maqueta i/o prototip per simular, i els residus que es generen una vegada utilitzats.

### C. REPRESENTACIÓ TEMPORAL DE L'ESTUDI

Es mostra el temps invertit en l'estudi, desglossat en cada etapa i dividit en mesos, per tal de fer una valoració de la planificació que s'ha dut a terme i tenir una idea de quins aspectes de l'estudi han requerit més hores.

<b>Etapes de l'estudi</b>	<b>Hores invertides al mes de Març</b>	<b>Hores invertides al mes de Abril</b>	<b>Hores invertides al mes de Maig</b>	<b>Hores invertides al mes de Juny</b>	<b>Total</b>
Plantejament del problema i planificació	10	2	4	-	<b>16</b>
Recerca d'informació i ampliació de coneixements en MF i CFD	32	4	-	-	<b>36</b>
Familiarització amb el software ANSYS	4	24	-	-	<b>28</b>
Redacció de la memòria de l'estudi	4	6	60	8	<b>78</b>
Modelatge amb SolidWorks	28	8	12	-	<b>48</b>
Simulació amb ANSYS (Mallat, Configuració, Càlcul, Post-procés)	-	38	30	4	<b>72</b>
Obtenció i comparació dels resultats	-	6	10	4	<b>20</b>
Anàlisi de resultats i conclusions	-	4	8	8	<b>20</b>
Estudi econòmic i mediambiental	-	-	2	2	<b>4</b>
Presentació de l'estudi	-	-	-	6	<b>6</b>
Reunions	4	8	10	4	<b>26</b>
<b>Total</b>	<b>82</b>	<b>100</b>	<b>136</b>	<b>36</b>	<b>354</b>

Taula C.1: Representació temporal de l'estudi.

El total d'hores invertides en l'estudi han sigut d'aproximadament 354 hores. La càrrega de treball s'ha distribuït al llarg d'uns tres mesos, tot i que s'ha dedicat molt de temps al mes d'abril i de maig, degut a les dificultats per realitzar el mallat i les configuracions de les simulacions. Els mesos de març i abril es van destinar a la investigació, recerca d'informació i millorar el coneixement amb l'ANSYS Workbench.



## D. COST DE L'ESTUDI

Per fer una estimació correcta del cost de l'estudi, s'han anotat les hores invertides en cada programa, i s'hi ha associat un preu a cada un. Aquest concepte és el subtotal que fa referència al sou d'enginyer junior. Posteriorment es sumen tots els conceptes, és a dir els costos assignats a l'ús del hardware, software i factures.

Mesos	Hores de programa		
	Word/Excel	SolidWorks	ANSYS
Març	14	24	2
Abril	6	10	40
Maig	92	12	46
Juny	16	-	-
<b>Total</b>	<b>128</b>	<b>46</b>	<b>88</b>

Taula D.1: Hores de cada programa.

Preu associat a cada programa (€/h)		
SolidWorks	ANSYS	Word/Excel
16	18	12

Taula D.2: Preu de cada programa.

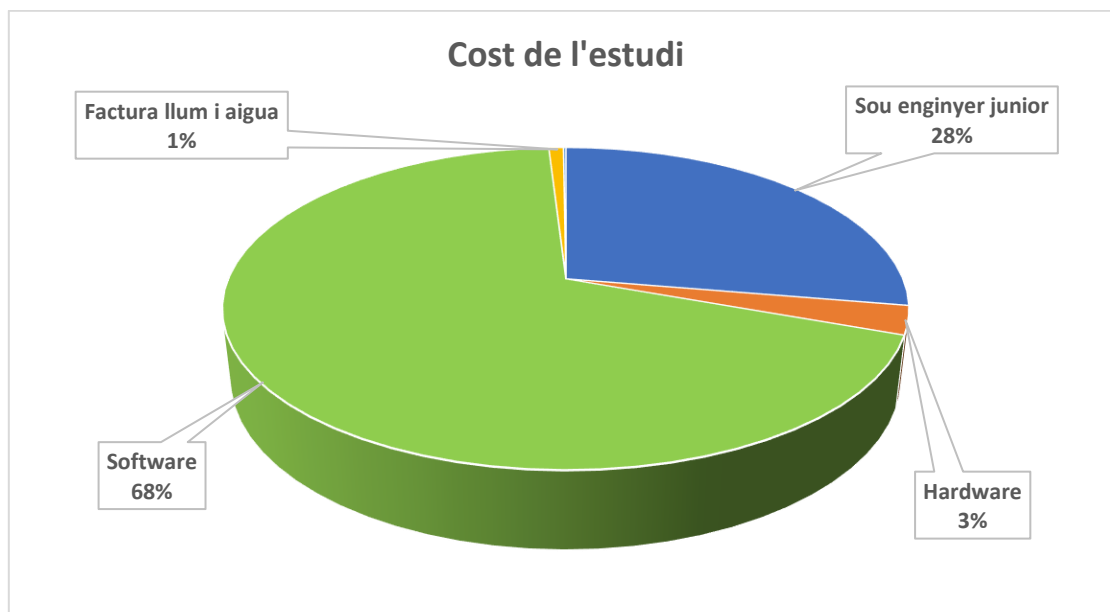
Sou enginyer junior	Cost Març	Cost Abril	Cost Maig	Cost Juny	Subtotal (€)
Word/Excel	168	72	1104	192	<b>1536</b>
SolidWorks	384	160	192	-	<b>736</b>
ANSYS	18	756	828	-	<b>1602</b>
<b>Total</b>	<b>570</b>	<b>988</b>	<b>2124</b>	<b>192</b>	<b>3874</b>

Taula D.3: Subtotal del sou enginyer junior.

Despeses	Cost Març	Cost Abril	Cost Maig	Cost Juny	Total (€)
Sou enginyer junior	570	988	2124	192	<b>3874</b>
Hardware	100	100	100	100	<b>400</b>
Software	2400	2400	2400	2400	<b>9600</b>
Factura llum	35	35	35	10	<b>115</b>
Factura aigua	5	5	5	5	<b>20</b>
<b>Total (€)</b>	<b>3110</b>	<b>3528</b>	<b>4664</b>	<b>2707</b>	<b>14009</b>

Taula D.4: Cost total de l'estudi.

Per tant, el cost total de l'estudi és de 14.009€, que es mostra desglossat en un gràfic per valorar la importància de cada despesa en el total del cost.



Gràfica D.1: Cost total de l'estudi.