



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa



Treball Final de Grau

MILLORA AERODINÀMICA D'UN AUTOMÒBIL MITJANÇANT LA IMPLEMENTACIÓ D'UN ALERÓ POSTERIOR RETRÀCTIL

Universitat Politècnica de Catalunya

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa

Grau en Enginyeria d'Automoció

Curs 2020 – 2021

Autor: Raül Arcos Hidalgo
Director: Jordi Vives Costa
Data: 8 d'Octubre de 2021
Localitat: Manresa



RESUM

El present estudi pretén mostrar la implementació d'un aleró posterior dinàmic per tal de millorar les prestacions aerodinàmiques d'un vehicle esportiu mitjançant l'ús de programes CFD. Aquest treball té dos objectius, el primer augmentar el downforce a altes velocitats mitjançant l'activació de l'aleró amb angles d'atac moderats i, en segon lloc, augmentar el drag juntament amb el downforce de l'eix posterior per aconseguir reduir la distància de frenada, mitjançant l'activació de l'aleró amb angles elevats.

Primer s'han introduït tots els conceptes relacionats amb l'aerodinàmica i la mecànica de fluids necessaris per entendre el comportament del flux. Un cop explicats els diferents conceptes, s'ha dut a terme el disseny del model que s'emprarà en les simulacions mitjançant un programa de disseny assistit en 3D. S'ha escollit un model d'automòbil tipus esportiu, basat en el Lamborghini Gallardo. Seguidament s'ha fet un estudi per obtenir els angles d'atac més eficients d'acord amb els objectius. Posteriorment s'ha dissenyat l'aleró per a dos configuracions d'angle d'atac, un angle d'atac moderat i un angle d'atac elevat.

Un cop dissenyat, s'ha detallat tot el procés necessari per poder dur a terme tres simulacions del model, sense aleró, amb un aleró amb angle d'atac moderat i amb un aleró amb angle d'atac elevat. Amb els resultats de les simulacions es mostra la visualització del flux a diferents zones d'interès del vehicle per poder explicar el comportament d'aquest en cada regió.

Finalment s'han extret uns resultats numèrics i s'ha fet un càlcul per determinar la reducció del temps de frenada del vehicle gràcies a la implementació del sistema dissenyat. Amb els resultats d'aquest treball, s'ha pogut observar com el sistema implementat ha complert amb els objectius marcats al inici de l'estudi.



ABSTRACT

This project aims to show the implementation of a dynamic rear spoiler to improve the aerodynamic performance of a sports vehicle using CFD programs. This study has two objectives, the first one is to increase the downforce at high speeds by activating the spoiler with moderate attack angles and, second, to increase the drag along with the downforce of the rear axle to reduce the braking distance, by activating the spoiler with high attack angles.

First, all the concepts related to aerodynamics and fluid mechanics have been introduced to understand the behaviour of the flow. Once the different concepts have been explained, the design of the model that will be used in the simulations has been carried out using a 3D-assisted design program. A sports car model has been chosen, based on the Lamborghini Gallardo. Then a study has been done to obtain the most efficient angles of attack according to the targets. The spoiler was later designed for two angle of attack configurations, a moderate angle of attack and a high angle of attack.

Once designed, it has been detailed the entire process necessary to be able to perform three simulations of the model, without a spoiler, with a spoiler with a moderate angle of attack and with a spoiler with a high angle of attack. The results of the simulations show the visualization of the flow in different areas of interest of the vehicle to explain its behaviour in each region.

Finally, numerical results have been extracted and a calculation has been made to determine the reduction of the braking time of the vehicle thanks to the implementation of the designed system. With the results of this work, it has been possible to observe how the implemented system has met the objectives set at the beginning of the project.



ÍNDEX

1. INTRODUCCIÓ	11
1.1. Abast del treball.....	11
1.2. Motivació	11
1.3. Objectius del projecte	11
2. MARC TEÒRIC.....	12
2.1. Classificació del flux	12
2.2. Línies de corrent i trajectòria.....	12
2.3. Capa límit	13
2.4. Flux laminar i turbulent	13
2.5. Perfils alars i angle d'atac.....	14
2.6. Principis bàsics aerodinàmics.....	15
2.6.1. Principi de Bernoulli.....	15
2.6.2. Efecte Venturi.....	17
2.6.3. Efecte coanda.....	19
2.7. Forces aerodinàmiques i equacions bàsiques	20
3. L'AERODINÀMICA APLICADA A L'AUTOMOCIÓ	26
3.1. L'aleró.....	26
3.1.1. Tipus d'alerons	28
3.1.2. Perfils aerodinàmics NACA.....	29
3.1.3. Alerons amb més d'un perfil.	29
3.2. Aerodinàmica activa	31
4. CAS D'ESTUDI.....	34
4.1. Elecció del vehicle utilitzat en el estudi	34
4.2. Metodologia.....	35
4.3. Disseny del vehicle.....	36
5. ELECCIÓ I DISSENY DEL PERFIL	40
5.1. Elecció del perfil	40



5.2.	Anàlisi 2D del perfil	46
5.3.	Disseny de l'ala i els elements auxiliars	52
6.	ESTUDI AERODINÀMIC MITJANÇANT CFD	56
6.1.	Procediment	56
6.1.1.	Geometria.....	56
6.1.2.	Configuració del fluid	63
6.1.3.	Domini de control i mallat.....	73
6.1.4.	Solució.....	78
7.	ANÀLISI DE RESULTATS	79
7.1.	Anàlisi gràfic	79
7.1.1.	Distribució de pressions.....	79
7.1.2.	Distribucions de velocitats.	81
7.1.3.	Distribució de vectors	83
7.1.4.	Iso surfaces i streamlines	84
7.2.	Anàlisi numèric	87
7.2.1.	Càlcul de les àrees frontals.....	87
7.2.2.	Càlcul dels coeficients de drag i lift	88
7.2.3.	Càlcul del temps i distància de frenada.....	92
8.	CONCLUSIONS	95
9.	PLANIFICACIÓ TEMPORAL I PRESSUPOST	96
10.	IMPACTE MEDIAMBIENTAL	99
11.	BIBLIOGRAFIA	99
11.1.	Referències bibliogràfiques	99
11.2.	Referències de figures	100

LLISTA DE FIGURES

Figura 1. Línies de corrent d'un fluid [1]	12
Figura 2. Esquema de la capa límit d'un fluid en una placa plana [2]	13
Figura 3. Representació del flux laminar i turbulent [3].....	14
Figura 4. Distribució de velocitats en la capa límit sobre una placa plana [4]	14
Figura 5. Perfil alar [5].....	15
Figura 6. Geometria dels perfils [6]	15
Figura 7. Esquema del principi de Bernoulli [7]	16
Figura 8. Esquema de l'efecte Venturi [8]	17
Figura 9. Efecte Venturi. Quan la secció disminueix, augmenta la velocitat. [9]	18
Figura 10. Efecte terra. [10]	18
Figura 11. Exemple gràfic de l'efecte venturi en el fons pla d'un vehicle. [11]	19
Figura 12. Comportament del corrent del fluid segons l'angle d'atac. [12].....	19
Figura 13. Representació gràfica de la distribució del flux per la carrosseria gràcies a l'efecte coanda. [12].....	20
Figura 14. Distribució de velocitats sobre un perfil alar. [13]	20
Figura 15. Descomposició de la força aerodinàmica. [14]	21
Figura 16. Forces i moments sobre un vehicle. [15].....	22
Figura 17. Àrea frontal d'un vehicle. [15].....	22
Figura 18. Resultant del centre de pressions. [16]	24
Figura 19. Percentatges de corda. [16].....	25
Figura 20. Desplaçament del centre de pressions amb l'angle d'atac. [16]	25
Figura 21. Terminologia d'un aleró. [17].....	26
Figura 22. Influència en el coeficient de sustentació de la relació d'aspecte. [17]	27
Figura 23. Representació gràfica de la variació del coeficient de sustentació en alerons simètrics i asimètrics amb l'angle d'atac. [17].....	28
Figura 24. Aleró amb un flap extern. [17]	30
Figura 25. Aleró de doble pla en el Benetton B197 de Formula 1. Any 1997. [17].....	30
Figura 26. Aplicació de derives a un aleró. [17].....	30
Figura 27. Representació gràfica de les línies de flux amb les obertures frontal obertes. [18]	31
Figura 28. Vehicle circulant sense cap element aerodinàmic activat. [18].....	32
Figura 29. Vehicle circulant a 170 km/h amb l'aleró activat. [18]	32
Figura 30. Situació abans de frenar. [18]	33
Figura 31. Moment en el que el vehicle frena bruscament. [18]	33
Figura 32. Lamborghini Gallardo [19].....	35



Figura 33. Alçat davanter i posterior, perfil i planta del Lamborghini Gallardo. [20]	36
Figura 34. Mides del vehicle. [21].....	36
Figura 35. Esbós de la planta, l'alçat i el perfil.	37
Figura 36. Disseny del contorn.	37
Figura 37. Generació de la superfície.	38
Figura 38. Generació de la superfície completa després de la simetria.....	38
Figura 39. Sòlid del vehicle amb les rodes.....	39
Figura 40. Perfil CH10. [22].....	41
Figura 41. Gràfics CL-alpha CD-alpha. [22]	42
Figura 42. Gràfic CL/CD-alpha.[22].....	43
Figura 43. Perfil E423. [23]	43
Figura 44. Gràfics CL-alpha y CD-alpha. [23]	44
Figura 45. Gràfic CL/CD-alpha. [23].....	45
Figura 46. Pantalla Geometria Java Foil. [24]	46
Figura 47. Pantalla Modificar perfils JavaFoil. [24]	48
Figura 48. Distribucions de velocitat. [24].....	49
Figura 49. Cam de fluid per a 5,25°.	50
Figura 50. Camp de fluid per a 55°.	51
Figura 51. Coordenades del perfil amb un angle de 5,25 °.	52
Figura 52. Coordenades del perfil amb un angle de 55 °.	52
Figura 53. Extrusió del perfil amb l'eina Pad.	53
Figura 54. Sistemes aleró en una posició de 5,25°.	53
Figura 55. Sistemes aleró en una posició de 55°.	53
Figura 56. Vista del conjunt del vehicle amb l'aleró a 5,25°.....	54
Figura 57. Vista posterior del conjunt del vehicle amb l'aleró a 5,25°.....	54
Figura 58. Vista lateral del conjunt del vehicle amb l'aleró a 5,25°.....	55
Figura 59. Vista del conjunt del vehicle amb l'aleró a 55°.....	55
Figura 60. Vista posterior del conjunt del vehicle amb l'aleró a 55°.....	55
Figura 61. Vista lateral del conjunt del vehicle amb l'aleró a 55°.....	56
Figura 62. Importació de geometria.[25].....	56
Figura 63. Geometria importada. [25]	57
Figura 64. Mesurament del sòlid. [25].....	57
Figura 65. Escalat del sòlid. [25]	58
Figura 66. Mesurament del sòlid després del escalat. [25].....	58
Figura 67. Tolerància de la geometria per ser validada. [25].....	59
Figura 68. Validació de la geometria. [25].....	59
Figura 69. Error en la geometria que ha de resolt. [25]	59



Figura 70. Validació del model. [25].....	60
Figura 71. Separació del model en dos meitats. [25].....	60
Figura 72. Eliminació d'una meitat. [25]	61
Figura 73. Creació del recinte. [25]	61
Figura 74. Engrandiment del recinte. [25]	62
Figura 75. Resultat del recinte. [25]	62
Figura 76. Extracció del sòlid del vehicle. [25].....	63
Figura 77. Agrupació de superfícies en grups. [25]	63
Figura 78. Configuració de les físiques. [25]	64
Figura 79. Elecció del model de turbulència. [25].....	64
Figura 80. Assignació del material del recinte. [25]	65
Figura 81. Creació del paràmetre de velocitat d'entrada. [25]	65
Figura 82. Assignació d'un Reference Frame. [25].....	66
Figura 83. Mesurament del radi de la roda.....	67
Figura 84. Assignació de la velocitat de la roda. [25]	68
Figura 85. Configuració de les condicions de contorn. Constant. [25].....	69
Figura 86. Configuració de les condicions de contorn. Slip. [25]	70
Figura 87. Configuració de les condicions de contorn. Outlet. [25].....	70
Figura 88. Configuració de les condicions de contorn. Symmetry. [25]	71
Figura 89. Configuració de les condicions de contorn. Moving. [25].....	71
Figura 90. Configuració de les condicions de contorn. No Slip. [25].....	72
Figura 91. Llista de les condicions de contorn establertes. [25]	72
Figura 92. Mallat de les superfícies del vehicle. [25]	73
Figura 93. Llista de les superfícies mallades i la seva mida del mallat. [25]	73
Figura 94. Configuració de la mida de la capa límit. [25].....	74
Figura 95. Configuració de la zona de refinament del mallat. [25].....	75
Figura 96. Configuració de les opcions del processament del mallat. [25]	75
Figura 97. Mallat de tot el recinte. [25]	76
Figura 98. Imatge ampliada del mallat. [25]	76
Figura 99. Mallat de les zones crítiques del model. [25].....	77
Figura 100. Característiques del mallat. [25].....	77
Figura 101. Apliació de velocitat al model. [25]	78
Figura 102. Finestra del set up de la simulació. [25]	78
Figura 103. Distribucions de pressions per al vehicle sense aleró. [25]	79
Figura 104. Distribucions de pressions per al vehicle amb aleró 5,25 °. [25].....	79
Figura 105. Distribucions de pressions per al aleró 5,25 °. [25].....	80
Figura 106. Distribucions de pressions per al vehicle amb aleró 55 °. [25].....	80



Figura 107. Distribucions de pressions per al aleró 55 °. [25].....	80
Figura 108. Distribucions de velocitats per al vehicle sense aleró. 1.....	81
Figura 109. Distribucions de velocitats per al vehicle amb aleró 5,25 °. 1.....	81
Figura 110. Distribucions de velocitats per al vehicle amb aleró 55 ° 1.....	82
Figura 111. Estela generada sense aleró.....	82
Figura 112. Estela generada aleró 5,25 °.....	82
Figura 113. Estela generada aleró 55 °.....	82
Figura 114. Distribució de vectors per al vehicle sense aleró.....	83
Figura 115. Distribucions de velocitats per al vehicle amb aleró 5,25 ° 1.....	83
Figura 117. Distribucions de velocitats per al vehicle amb aleró 55 ° 1.....	84
Figura 119. Iso surface cas 1.....	84
Figura 120. Iso surface cas 2.....	84
Figura 121. Iso surface cas 3.....	84
Figura 122. Streamline cas 1.....	85
Figura 123. Streamline cas 2.....	85
Figura 124. Streamline cas 2.1.....	85
Figura 125. Streamline cas 3.....	86
Figura 126. Streamline cas 3.1.....	86
Figura 127. Àrea frontal de la carrosseria.....	87
Figura 128. Àrea frontal del aleró a 5,25 °.....	87
Figura 129. Àrea frontal del aleró a 55 °.....	88
Figura 130. Força de drag.....	89
Figura 131. Força de lift.....	89
Figura 132. Força de drag. 5,25 °.....	89
Figura 133. Força de lift. 5,25°.....	90
Figura 134. Força resultant. 5,25 °.....	90
Figura 135 . Força de drag. 55 °.....	90
Figura 136. Força de lift. 55 °.....	91
Figura 137. Força resultant. 55 °.....	91



LLISTA DE TAULES

Taula 1. Coeficients aerodinàmics per a cada angle.....	49
Taula 2. Àrees frontals dels sòlids.	88
Taula 3. Resum de resultats.	91
Taula 4. Distàncies de frenada segons la velocitat del vehicle.[26].....	93
Taula 5. Planificació de l'estudi.	96
Taula 6. Pressupost de l'estudi.	98



1. INTRODUCCIÓ

1.1. Abast del treball

Primerament es recercherà informació sobre els conceptes relacionats amb l'aerodinàmica i la mecànica de fluids necessaris per entendre el comportament del flux.

A continuació es dissenyarà el model 3D en el que es faran la implementació del sistema.

Seguidament es determinarà un perfil d'aleró i els diferents angles d'atac per a cada estudi. Un cop determinades les característiques de l'aleró, es farà el disseny d'aquest.

Un cop es tingui dissenyat tot el conjunt, es simularan tres casos. Un model sense aleró, un model amb un aleró amb un angle d'atac moderat i un model amb un angle d'atac elevat.

Finalment s'introduiran els models a un programa CFD (Computational Fluid Dynamics) per poder dur a terme tres simulacions. Amb els resultats de les simulacions es mostrarà la visualització del flux i s'extrauran resultats numèrics.

Per acabar es farà un càlcul per determinar la reducció del temps de frenada del vehicle gràcies a la implementació del sistema dissenyat.

1.2. Motivació

Com a entusiasta del món del motor he volgut realitzar un projecte en el qual pogués estudiar les dos àrees de l'enginyeria d'automoció que més m'agraden, el disseny i l'aerodinàmica del vehicle. .

1.3. Objectius del projecte

L'objectiu principal que es vol arribar a aconseguir és dissenyar un aleró posterior dinàmic per tal de millorar les prestacions aerodinàmiques d'un vehicle esportiu amb dos objectius, el primer augmentar el downforce a altes velocitats mitjançant l'activació de l'aleró amb angles d'atac moderats i, en segon lloc, augmentar el drag juntament amb el downforce de l'eix posterior per aconseguir reduir la distància de frenada, mitjançant l'activació de l'aleró amb angles elevats.



2. MARC TEÒRIC

2.1. Classificació del flux

Al circular, el vehicle interacciona amb l'aire i això provoca l'aparició de dos tipus de flux que condicionen els efectes aerodinàmics. El flux extern i el flux intern.

- i. Flux extern: Pas de l'aire per la superfície exterior del vehicle. Aquest origina forces de resistència a l'avanç i forces laterals.
- ii. Flux intern: L'aire que passa per les entrades d'aire del vehicle. Aquestes ajuden a la refrigeració del motor però a la vegada perjudiquen l'aerodinàmica del vehicle.

2.2. Línies de corrent i trajectòria

La trajectòria del flux es defineix com aquelles línies imaginàries que mostren la trajectòria o el camí recorregut per les partícules d'un fluid i que a més, cada punt d'aquesta línia és tangent al seu respectiu vector de velocitat.

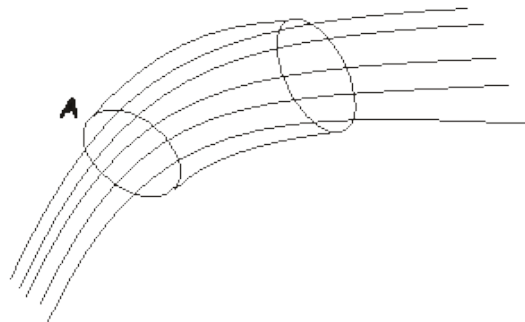


Figura 1. Línies de corrent d'un fluid [1]

Està en règim estacionari quan les condicions externes a les que està sotmès el flux (velocitat, pressió, densitat), no canvien al llarg del transcurs del temps. Si ho fes, el règim es coneix com transitori. Aquest concepte és important tenir-ho present quan es portin a terme les simulacions, ja que el flux serà sempre estacionari en aquest estudi.



2.3. Capa límit

Quan l'aire es desplaça al llarg del aleró, les partícules tendeixen a adherir-se a la superfície del perfil. Això es degut a que l'aire és un fluid viscos, per tant, la capa d'aire que està en contacte amb l'ala s'adhereix, ja que està sent frenat a causa de la fricció que ofereix la superfície de l'aleró a l'aire. D'aquesta manera, es dedueix com a capa límit d'un cos sotmès a un fluid, com la regió compresa entre el contacte amb la superfície que té velocitat zero fins a la velocitat màxima del fluid. Aquesta distribució és deguda a la fricció del fluid viscos sobre la superfície del sòlid provocant una tensió de cisalla proporcional al gradient de velocitat.

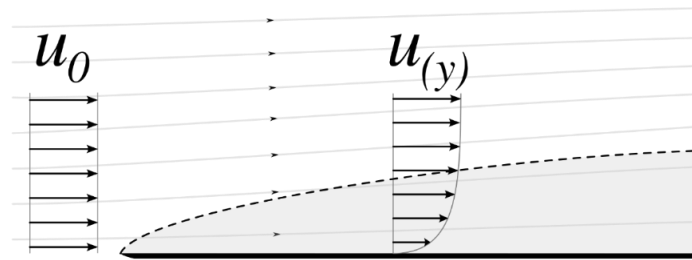


Figura 2. Esquema de la capa límit d'un fluid en una placa plana [2]

2.4. Flux laminar i turbulent

Si volem conèixer de que tipus és el flux amb el que treballem, primer hem de conèixer el Numero de Reynolds (Re). El desenvolupament d'aquest paràmetre s'ha basat en qualsevol classe de fluid transportat. Va ser Osborne Reynolds sobre l'any 1883, quan va començar a diferenciar règims de flux i a establir els seus valors numèrics. Va poder observar com el tipus de flux en una tub depenia de la velocitat, les propietats del fluid y del diàmetre del tub.

Reynolds ens relaciona la densitat (ρ), la viscositat (μ), la velocitat del fluid (v) i la dimensió típica (D) d'un flux en una expressió adimensional.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu}$$

Gràcies a aquest número, podem diferenciar qualsevol tipus de flux en Flux Laminar o Flux turbulent.

- i. Flux Laminar (Re < 2000): es tracta d'un moviment ordenat, estratificat i suau. El fluid es mou en lamines paral·leles, és a dir, formant plans paral·lels entre ells.
- ii. Flux turbulent (Re > 4000): moviment del fluid en forma desordenada, formant petits remolins aperiòdics.



La representació d'aquests fluxos es troba representada en la següent figura.

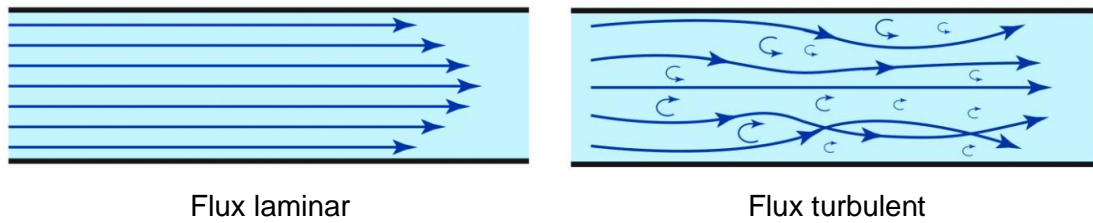


Figura 3. Representació del flux laminar i turbulent [3]

Com es pot observar en els valors numèrics, trobem un salt entre el Flux Laminar i el Flux turbulent, en aquest rang es troba el Flux transicional ($2000 \leq Re \leq 4000$). En aquest flux es produeixen petites ondulacions variables en el temps, perdent estabilitat [1].

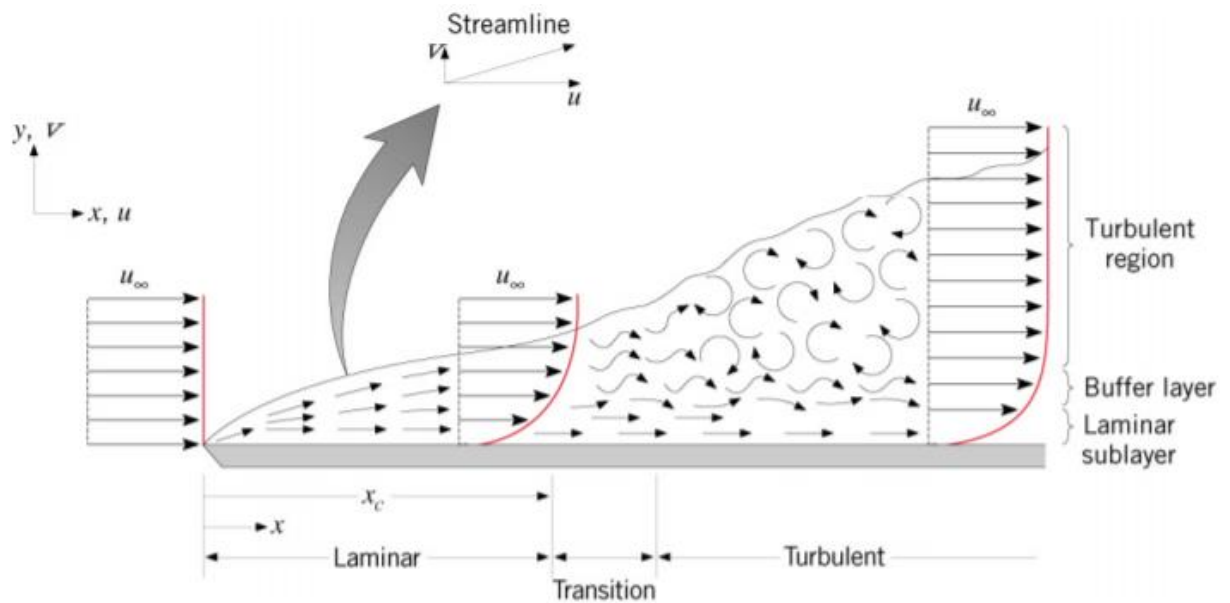


Figura 4. Distribució de velocitats en la capa límit sobre una placa plana [4]

2.5. Perfils alars i angle d'atac

Es considera que un perfil alar és la geometria de la secció transversal d'una ala. Al llarg d'una ala es pot trobar diferents perfils alars, ja que cada secció transversal no ha de ser la mateixa.

Una altra definició utilitzada en el camp aeronàutic és anomenar perfil alar, perfil aerodinàmic o simplement perfil, a la forma plana que al desplaçar-se a través de l'aire és capaç de crear al seu voltant una distribució de pressions que generi sustentació.



Segons el propòsit que es persegueixi en el disseny, els perfils poden ser més fins o gruixuts, corbs o poligonals, simètrics o no, i fins i tot el perfil pot anar variant al llarg de l'ala.

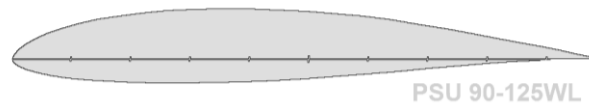


Figura 5. Perfil alar [5]

L'angle d'atac d'un perfil alar no és més que l'angle format per la corda del perfil i la direcció de corrent lliure de l'aire. Les variacions en l'angle d'atac poden ser de caràcter positiu, neutre o negatiu.

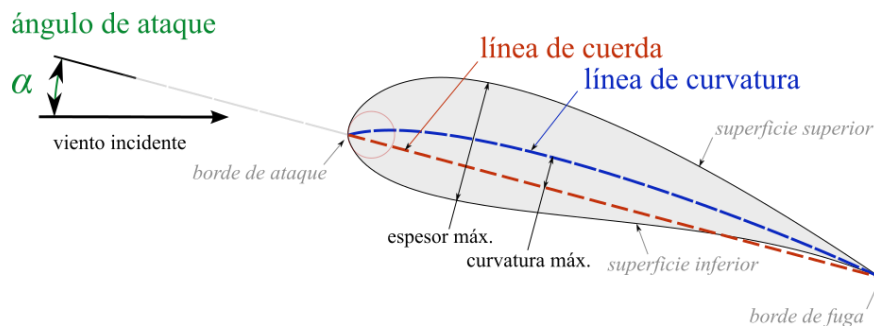


Figura 6. Geometria dels perfils [6]

Depenent de l'angle d'atac que adopti l'aleró, s'obtindrà més o menys sustentació. Com a norma, com més angle d'atac més sustentació, però tenint en compte que hi ha un angle d'atac màxim assolible. Passat aquest angle la capa d'aire es desprèn i el perfil entra en perduda, per tant, aquest deixa de donar sustentació.

2.6. Principis bàsics aerodinàmics.

La aerodinàmica es fonamenta en els següents principis.

2.6.1. Principi de Bernoulli

El principi de Bernoulli, també conegut com a equació de Bernoulli o trinomi de Bernoulli, postula que, per un fluid ideal (sense viscositat ni fregament), un increment en la velocitat del fluid implica una disminució de la seva pressió o energia potencial, mentre



que la seva energia es manté constant al llarg del recorregut. S'anomena així en honor del matemàtic Daniel Bernoulli, qui va anunciar el principi en la seva obra Hydrodinamica, publicada el 1738.

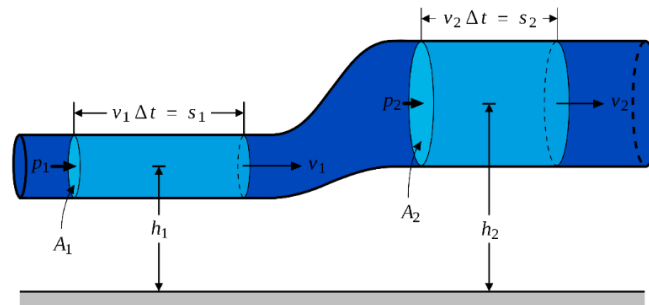


Figura 7. Esquema del principi de Bernoulli [7]

Quan s'origina un estrenyiment en la via de circulació del fluid es genera un increment de la velocitat en el seu flux, però també s'origina un descens de la pressió del fluid. Això és degut a que un fluid està format per infinitat de molècules en constant moviment, produint-se xocs entre si i amb les parets que les envolta al intentar escapar.

La pressió d'un fluid apareix quan les molècules xoquen contra la paret reiterades vegades, aplicant una força contra les parets per cada instant de temps. D'aquesta manera es considera que la pressió és la magnitud que avalua la força que s'exerceix sobre una superfície.

Quan aquestes partícules tenen una velocitat de trànsit lenta pel tub, tenen un període més llarg durant el xoc i es genera una pressió major del conjunt. Per altra banda, quan el moviment de circulació és molt més ràpid, el cicle de xoc és molt més reduït.

Per tant, es dedueix que:

- i. A major velocitat d'un fluid, menor pressió.
- ii. A menor velocitat d'un fluid, major pressió.

En els cotxes, l'aire que circula per sobre dels alerons i de tot el vehicle flueix a menys velocitat que l'aire que passa per sota. Com a conseqüència es produeix una depressió que empeny el vehicle cap a terra.

L'energia total d'un fluid consta de tres components:

- I. Cinètica: Energia deguda a la velocitat del fluid.
- II. Potencial: Alçada a la qual es troba el fluid
- III. Energia de pressió o flux: Pressió que té el fluid.



L'equació de Bernoulli es redueix a una simple relació entre la velocitat i la pressió estàtica.

$$\frac{V^2 \times \rho}{2} + P + \rho \times g \times z = \text{constant}$$

- i. V: velocitat del flux
- ii. ρ : densitat del flux
- iii. P: pressió al llarg de la línia de corrent
- iv. g: gravetat
- v. z: altura des de la cota de referència

2.6.2. Efecte Venturi

L'efecte Venturi, també conegut com a tub de Venturi, es produeix quan un fluid en moviment dins d'un conducte tancat disminueix la seva pressió en augmentar la velocitat després de passar per una zona de secció menor. Si en aquest punt del conducte s'introdueix l'extrem d'un altre conducte, es produeix una aspiració del fluid contingut en aquest segon conducte. Aquest efecte, demostrat el 1797, rep el seu nom del físic italià Giovanni Battista Venturi.

A la inversa, al sortir el flux de l'estrenyiment, augmenta la seva pressió i disminueix la velocitat.

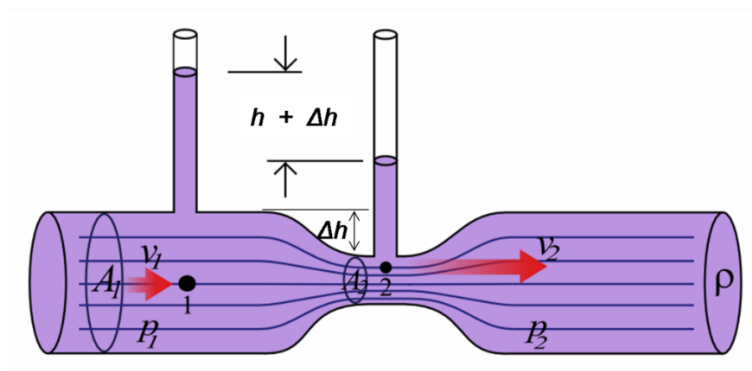


Figura 8. Esquema de l'efecte Venturi [8]

L'efecte Venturi s'explica pel Principi de Bernoulli i el principi de continuïtat de massa. Si el cabal d'un fluid és constant però la secció disminueix, necessàriament la velocitat augmenta després de travessar aquesta secció. Pel teorema de l'energia, si l'energia cinètica augmenta, l'energia determinada pel valor de la pressió disminueix forçosament.



Aquest principi es pot veure representat en la següent figura.

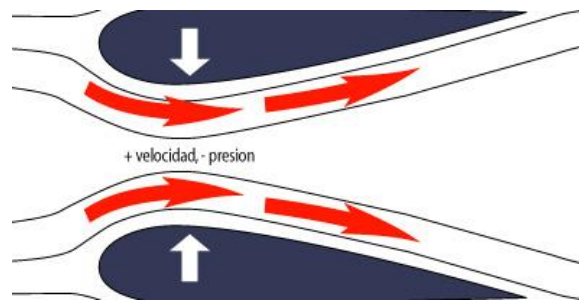


Figura 9. Efecte Venturi. Quan la secció disminueix, augmenta la velocitat. [9]

Si apliquem aquest efecte als automòbils, com indica la figura 10, el fons pla seria l'estrenyiment i el difusor la sortida.

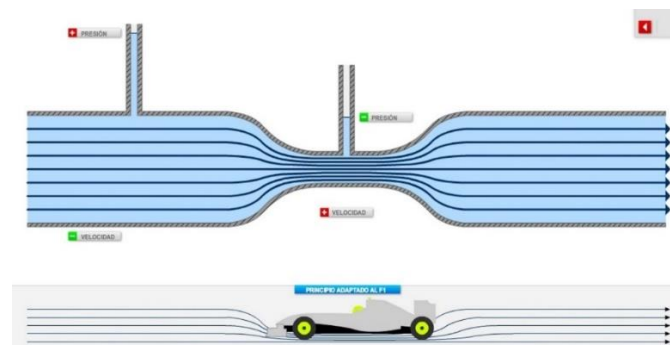


Figura 10. Efecte terra. [10]

L'efecte terra en una carrosseria consisteix en que l'aire que passa per sota del automòbil, és dirigit a la part inferior d'aquest. En aquesta part el flux de l'aire al estar comprimit augmenta la seva velocitat, creant una succió, per tant, es forma una regió de baixes pressions, que empeny el cotxe contra l'asfalt.

No obstant això, a la part superior del cotxe, l'aire circula de forma més pausada, creant una zona d'altres pressions, però segons la Tercera Llei de Newton, aquest fenomen, de la mateixa manera, empeny el vehicle contra la carretera.

Per tant, es pot dir que l'efecte terra, és un fenomen aerodinàmic, resultant d'unes variacions o modificacions re-circulant l'aire per aprofitar els efectes i aconseguir millor rendiment d'un cotxe. Un factor molt important a considerar, és la distància que hi ha entre el cotxe i el terra, ja que com més petita sigui aquesta longitud, es produirà un major efecte.

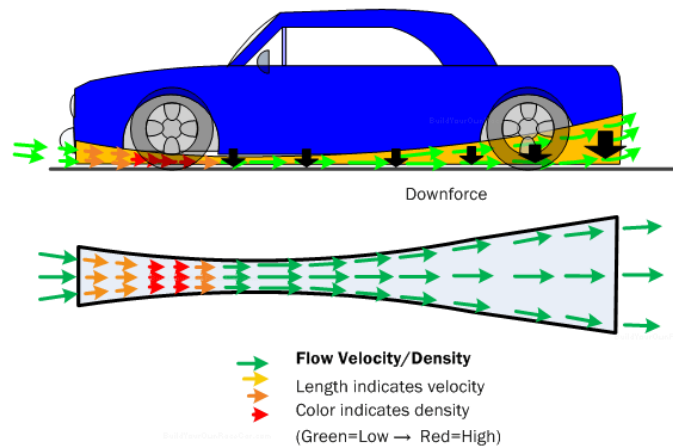


Figura 11. Exemple gràfic de l'efecte venturi en el fons pla d'un vehicle. [11]

2.6.3. Efecte coanda

L'efecte Coanda és un fenomen físic que descriu el comportament d'un corrent de fluid, ja sigui gasós o líquid, ja que tendeix a ser atret per altres superfícies properes a la seva trajectòria. El seu nom es deu a l'enginyer aeronàutic Henri Coanda, qui va descobrir l'efecte en el seu prototip d'un avió a reacció.

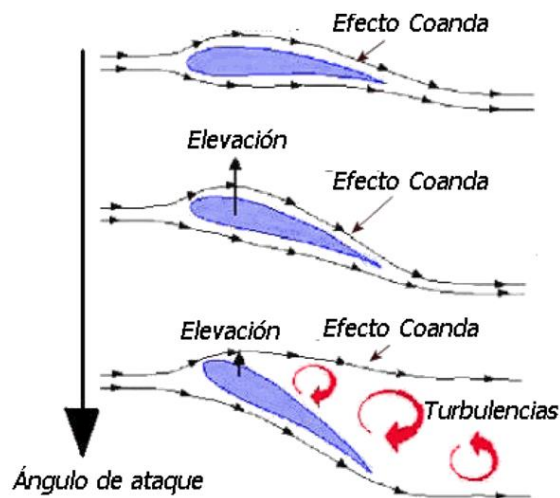


Figura 12. Comportament del corrent del fluid segons l'angle d'atac. [12]

El principal agent de l'efecte Coanda es deu a la viscositat del fluid, que quan xoca amb un cos sòlid corb i suau, aquesta viscositat fa que les partícules romanguin temporalment adherides a la superfície d'aquest cos, establint una làmina paral·lela i uniforme al contorn del sòlid. Les progressives partícules que posteriorment van impactant, generen noves capes aparentment invisibles. Amb aquest procés es forma una progressiva desviació del trajecte del fluid.



L'efecte Coanda és una de les claus de la moderna aerodinàmica, especialment com a aplicació en camps com l'aviació i l'automobilisme, doncs aquest fenomen físic serveix per canalitzar i desviar l'aire en certes zones del vehicle, on els enginyers dissenyen actuacions més eficients.

Com es veu representat en la figura 13, a carrosseria dels vehicles es construeixen amb corbes suaus i uniformes, aprofitant-se de l'efecte Coanda, de tal manera, que es canalitzen la major quantitat de flux d'aire possible cap a determinades zones del vehicle com els alerons, els difusors i el fons pla.



Figura 13. Representació gràfica de la distribució del flux per la carrosseria gràcies a l'efecte coanda. [12]

2.7. Forces aerodinàmiques i equacions bàsiques

Com s'ha explicat anteriorment, gràcies al principi de Bernoulli, al augmentar la velocitat disminueix la pressió i viceversa. La secció d'un perfil alar està pensada per reduir la secció del flux en una de les seves cares de manera que aquest s'accelera. A la cara oposada, segons la geometria del perfil, el flux manté la seva velocitat o la disminueix si la secció del flux augmenta. En la següent il·lustració es pot observar com es generen velocitats diferents sobre el perfil.

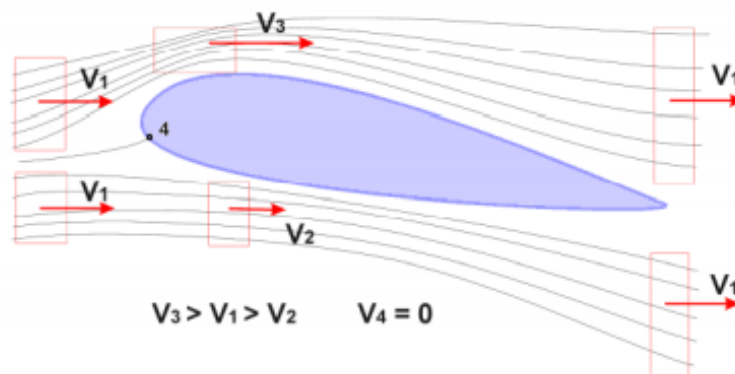


Figura 14. Distribució de velocitats sobre un perfil alar. [13]



Aquesta diferència de velocitats, que gràcies a Bernoulli ara sabem que implica una diferència de pressions, genera una força perpendicular a la direcció del flux que rep el nom de força de 'lift'. La zona del perfil amb major velocitat té menor pressió que l'altra cara i a l'haver-hi una diferència de pressions es genera la força ja comentada.

Aquesta força aerodinàmica no només està formada per la component perpendicular al flux. Hi ha una altra component que posseeix la mateixa direcció del flux i mateix sentit. Aquesta és la força de resistència a l'avanç o força de 'drag'. Aquesta força és la que s'oposa a l'avanç de qualsevol cos a través de l'aire i és deguda al fet que les partícules de fluid viscos s'enganxen a la superfície del cos. En la següent figura es pot observar la descomposició de la força aerodinàmica en els seus dos components i també la força resultant sobre un perfil alar.

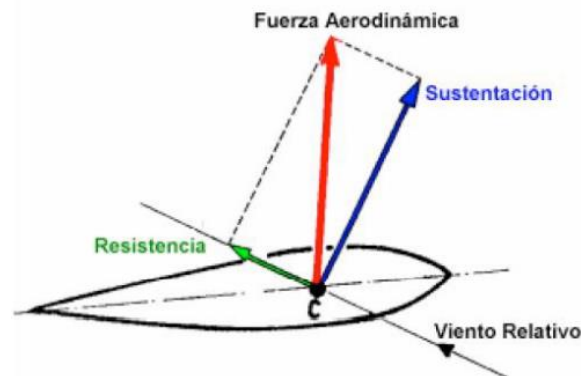


Figura 15. Descomposició de la força aerodinàmica. [14]

La força generada en un aleró té una direcció a terra. Això es degut a que el perfil es posiciona de forma oposada a la del perfil d'una ala d'avió. Per tant, la cara per la qual flueix l'aire a major velocitat és la inferior. Així s'aconsegueix generar anti-sustentació o el que és el mateix, càrrega aerodinàmica.

Modificant l'angle d'atac del perfil s'aconsegueixen variacions de secció més brusques aconseguint una major diferència de pressions sobre el perfil. Aquesta major diferència de pressió es tradueix en una força de sustentació major però consegüentment la força de resistència a l'avanç també augmenta. És fàcil suposar que es buscarà la major sustentació possible però sense que la resistència a l'avanç perjudiqui massa.

En un cotxe circulant per carretera es poden distingir dues forces principals que marquen una sèrie de factors com la velocitat màxima, l'acceleració màxima, la maniobrabilitat o l'estabilitat de la conducció. Els objectius principals de l'aerodinàmica d'automòbils són



reduir la resistència a l'avanç (drag), reduir el soroll de vent, minimitzar l'emissió de soroll i evitar forces de sustentació (lift positiu).

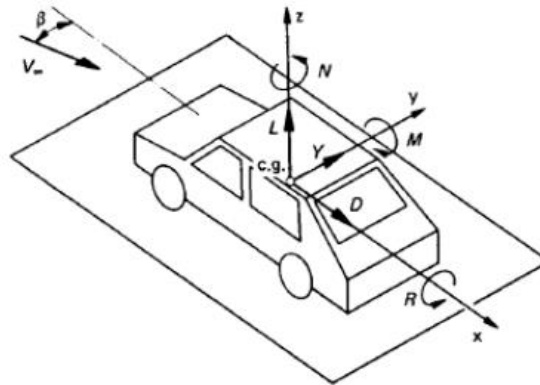


Figura 16. Forces i moments sobre un vehicle. [15]

Observant la figura 16, en el cas particular del vehicle treballant amb simetria, només rep dues forces, la de resistència a l'avanç i la de sustentació, i un moment, el de capcineig.

- i. **Força de drag o d'arrossegament (F_D):** resultant de les forces que es generen sobre el vehicle en l'orientació paral·lela a la direcció d'avanç i de sentit contrari. Pot ser Drag de pressió (a causa del despreniment de capa límit) o de fricció (pel fregament del fluid amb les superfícies de el vehicle). L'equació de drag total és:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2$$

On C_D és el coeficient adimensional de drag, A_f és l'àrea frontal del vehicle, ρ és la densitat de l'aire i V és la velocitat a la qual circula el vehicle

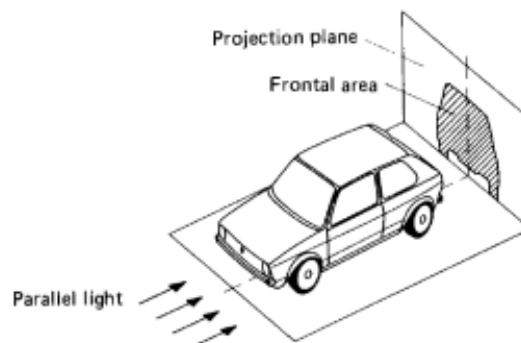


Figura 17. Àrea frontal d'un vehicle. [15]



- ii. **Força de lift o de sustentació (F_L):** resultant de les forces que es generen sobre el vehicle en l'orientació transversal al flux d'aire (vertical). Pot ser en direcció vertical positiva (lift) o en direcció negativa (negative lift o downforce). L'equació del lift total del vehicle és:

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2$$

On C_L és el coeficient adimensional de lift, A_f és l'àrea frontal de el vehicle, ρ és la densitat de l'aire i V és la velocitat a la qual circula el vehicle

- iii. **Moment de capcineig (M):** és el resultant de la diferència de forces presents entre la part davantera i posterior del vehicle, o més concretament, entre l'eix davanter i el posterior.

$$M = \frac{1}{2} \cdot C_M \cdot L \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2$$

On C_M és el coeficient adimensional de moment, L és la dimensió característica del model, A_f és l'àrea frontal del vehicle, ρ és la densitat de l'aire i V és la velocitat a la qual circula el vehicle. [2]

La resistència a l'avanç total d'un vehicle es pot dividir en 5 parts principals:

- i. **Resistència de forma:** la forma del cos determina si el flux d'aire passa al voltant del vehicle amb facilitat o si es desprèn en algunes zones.
- ii. **Resistència de sustentació:** és el resultat de qualsevol força de sustentació que es genera a causa del desplaçament del vehicle. La diferència de pressions entre la part superior i inferior de el vehicle és la causa de la força de lift.
- iii. **Resistència de superfície:** deguda a la fricció de l'aire al passar tangencialment al llarg del vehicle. Aquesta fricció és deguda a la viscositat de l'aire i té lloc en una zona molt propera a la superfície del vehicle que s'anomena capa límit, explicada anteriorment.
- iv. **Resistència d'interferències:** la produeixen les protuberàncies existents en el cos.



- v. Resistència de flux intern: és la resultant de les pèrdues d'energia degudes a la circulació de l'aire per l'interior del vehicle. Aquesta part de la resistència no es tindrà en compte per simplificar els càlculs i es tractarà el vehicle com un cos massís sense forats ni possibilitat de flux intern.

Al existir una distribució de forces, hi ha un punt geomètric on s'apliquen les forces resultants. Per tant, en el cas de les forces aerodinàmiques, aquest punt es denomina centre de pressions, on s'apliquen les forces resultants de drag i de lift. A més, la resultant dels moments aplicats a centre de pressions resulta zero.

En el cas d'un perfil alar invertit, donat que la pressió es dona en tot el perfil alar, considerem que tota aquesta força s'aplica sobre un punt situat just en la línia de la corda. Aquest punt està representat en la figura 18 com a centre de pressions.

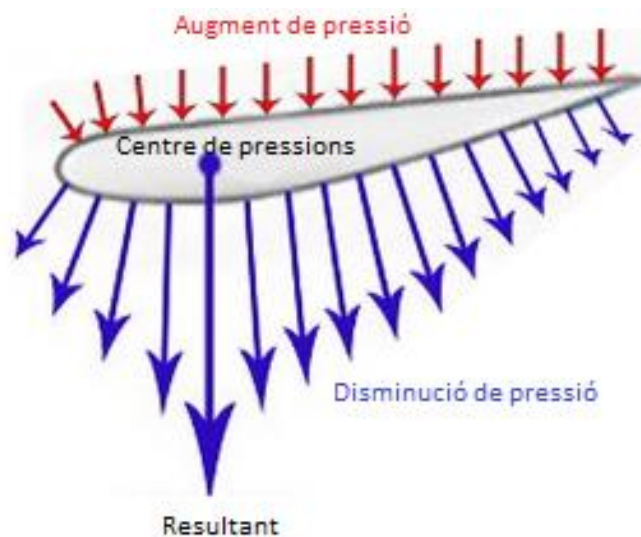


Figura 18. Resultant del centre de pressions. [16]

La posició de centre de pressions es sol expressar en percentatge de la longitud de corda, i varia amb l'angle d'atac. Sol estar entorn el 25% i el 60%, intentant que sigui el menor possible per tal de mantenir sempre una bona estabilitat.

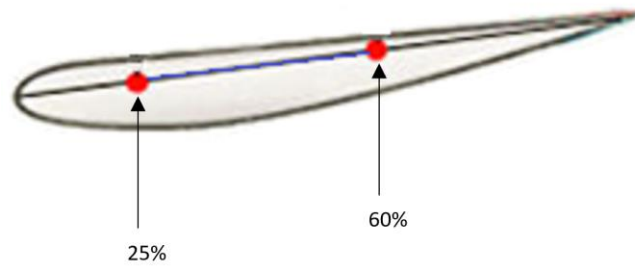


Figura 19. Percentatges de corda. [16]

Com es mostra en la figura 20, si s'augmenta l'angle d'atac, el centre de pressions es desplaça més cap endavant. Si el centre de pressions està situat molt enrere, el perfil entra en pèrdua.

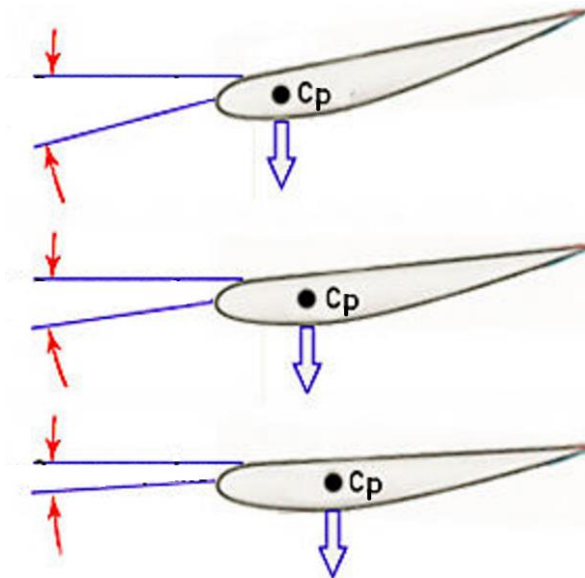


Figura 20. Desplaçament del centre de pressions amb l'angle d'atac. [16]



3. L'AERODINÀMICA APLICADA A L'AUTOMOCIÓ

3.1. L'aleró

Entre la diversa varietat d'alerons existents, en aquest estudi es desenvoluparà l'aleró posterior. Els fonaments teòrics basats per a l'existència de l'aleró són procedents del món de l'aeronàutica on l'aleró es definiria com una ala invertida.

L'aleró, o "ala" en la ciència aeronàutica, és un cos amb tal forma que l'aire passa a través d'ella creant sustentació o, en el nostre cas, càrrega aerodinàmica sense provocar la generació de resistència aerodinàmica. L'aleró es compon de diverses seccions.

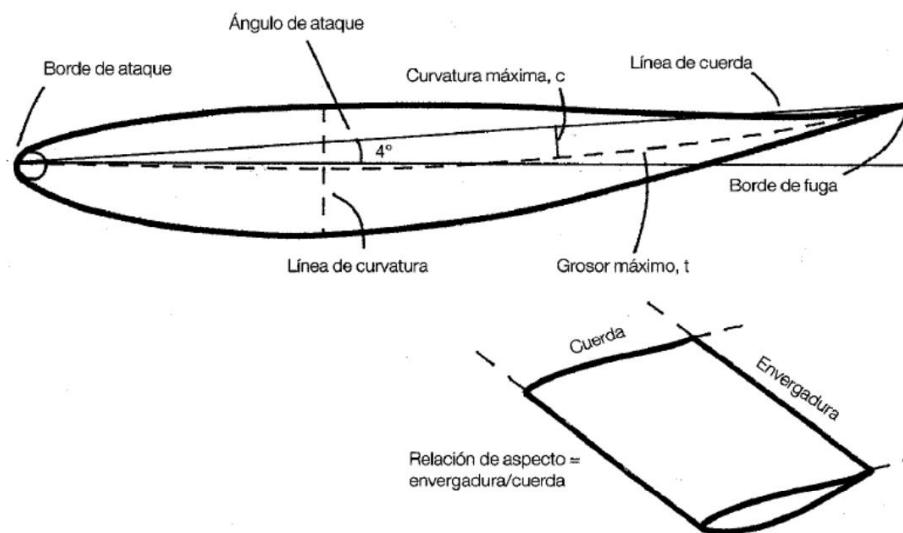


Figura 21. Terminologia d'un aleró. [17]

- i. **Angle d'atac:** Angle entre el flux d'aire i la línia de corda de l'ala.
- ii. **Punta d'atac:** Fa referència a la part davantera d'una ala i normalment té forma radial
- iii. **Bora de fuga:** Ocupa l'altre extrem de l'aleró amb forma estreta.
- iv. **Corda:** Línia recta que uneix la bora d'atac amb la bora de fuga, la seva longitud es defineix com la dimensió de la corda "c"
- v. **Gruix:** Gruix màxim d'un aleró i s'especifica amb la lletra "t". S'expressa com una fracció o percentatge de la dimensió de la corda
- vi. **Curvatura:** La secció d'una ala pot ser simètrica o asimètrica. Si es tracta del segon cas, es diu que el perfil té curvatura, el que significa que la seva superfície (en el context d'un cotxe) està més corbada que la part superior. La línia que passa pels punts mitjans d'una ala, des de la bora d'atac a la bora de fuga.



- vii. **Envergadura:** Es defineix com l'amplada d'una ala, i la relació d'envergadura amb la corda és la relació d'aspecte sent aquesta relació molt alta per a avions i molt baixa per a cotxes. Per millorar la eficiència aerodinàmica es necessiten relacions d'aspecte altes.

Si s'utilitza una relació d'aspecte alta per a un aleró, el coeficient de sustentació C_z , per a un mateix angle d'atac, creix, com es pot veure a la figura 17.

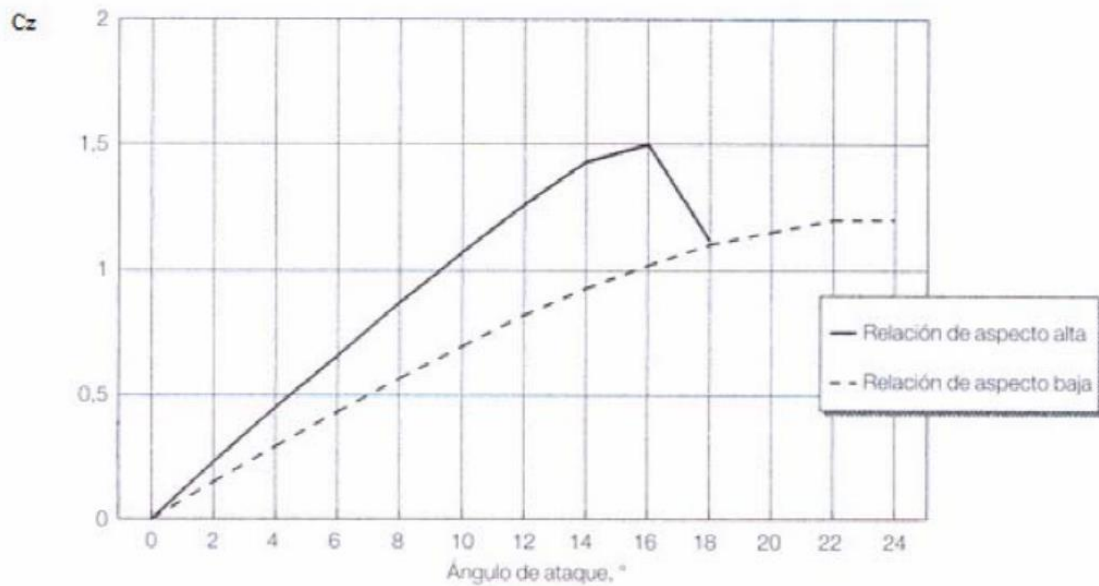


Figura 22. Influencia en el coeficient de sustentació de la relació d'aspecte. [17]

Per diferenciar alerons simètrics dels asimètrics, l'aleró asimètric té un coeficient de sustentació major a l'aleró simètric, en canvi entra abans en pèrdua a angles menors. Aquest fenomen es pot veure representat gràficament en la figura 22.

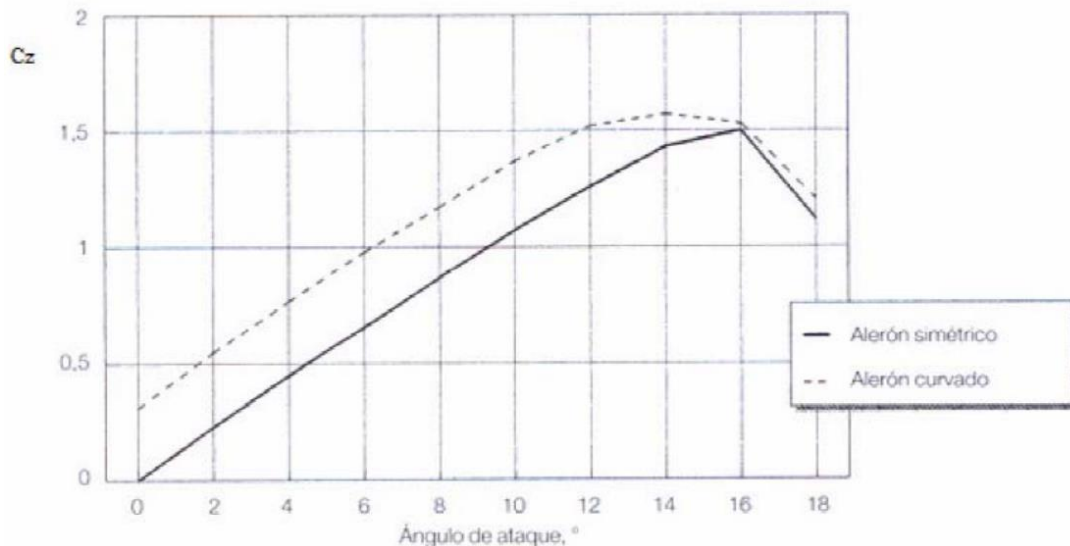


Figura 23. Representació gràfica de la variació del coeficient de sustentació en alerons simètrics i asimètrics amb l'angle d'atac. [17]

3.1.1. Tipus d'alerons

3.1.1.1. Alerons d'un sol perfil alar.

La creació de càrrega aerodinàmica és major quan l'angle d'atac és major fins el punt de l'angle límit. Un aleró d'un sol element no produeix càrrega aerodinàmica quan aquest angle és 0 però es va incrementant la càrrega gradualment mentre s'incrementa aquest angle d'incidència. Ens trobem que l'angle de pèrdua varia depenent del tipus de perfil i les condicions del flux.

Augmentar la curvatura d'un perfil alar permet generar més càrrega aerodinàmica inclús amb un angle d'atac de 0°. L'angle de sustentació nul·la és un angle significatiu. Endarrerir la curvatura té un efecte major en la creació de càrrega i produeix una pèrdua més gradual que si la curvatura màxima s'incrementa.

El radi d'atac és un altre paràmetre en el que es pot trobar contradiccions. Es pot donar el cas de que un radi d'atac afilat produeix una disminució de càrrega a prop de l'angle de pèrdua. En canvi, amb un angle de atac baix, també es pot donar el cas de que el radi d'atac afilat ajudi a mantenir una capa límit més estreta sobre la primera part del perfil.

Per tant, per un aleró d'un sol element, els paràmetres que influeixen són:

- i. **Angle d'atac:** Un baix angle d'atac aconseguirà poca càrrega aerodinàmica i poca resistència, un angle d'atac alt, produeix una major càrrega aerodinàmica i per conseqüència, major resistència.



- ii. **Curvatura:** Petites quantitats de curvatura aconseguen poca càrrega aerodinàmica i una major curvatura una major càrrega.
- iii. **Radi de vora d'atac:** Radi de vora d'atac entre 1-3%.

3.1.2. Perfils aerodinàmics NACA

Els perfils NACA són una sèrie de perfils que varen ser creats per la NACA "National Advisory Committee for Aeronautics" que era l'agència estatunidenca encarregada d'estudiar i dissenyar els perfils per l'aviació. Aquests perfils es distingeixen per característiques següents:

- i. Sèries de quatre dígit
- ii. Sèries de cinc dígit
- iii. Modificats
- iv. 1-series
- v. 6-series
- vi. 7-series
- vii. 8-series

3.1.3. Alerons amb més d'un perfil.

Quan és necessari un increment extra de càrrega aerodinàmica i l'aleró d'un sol perfil no ens és suficient, podem optar per la utilització d'un doble aleró. Aquest estarà format per un aleró general i un aleró més petit tipus "flap". Partint de l'equació bàsica de l'aerodinàmica;

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2$$

Podem observar que deixant el paràmetre de la velocitat constant o variable, si augmentem l'àrea de la planta de l'aleró (A) o el Coeficient de sustentació (CL), estem incrementant la força aerodinàmica (FL).

A més, es produeix un increment en la curvatura del perfil proporcionant una major càrrega aerodinàmica i una interacció dels diferents plans que permet canviar el flux a l'extradós en el flap incrementant la creació de càrrega aerodinàmica.

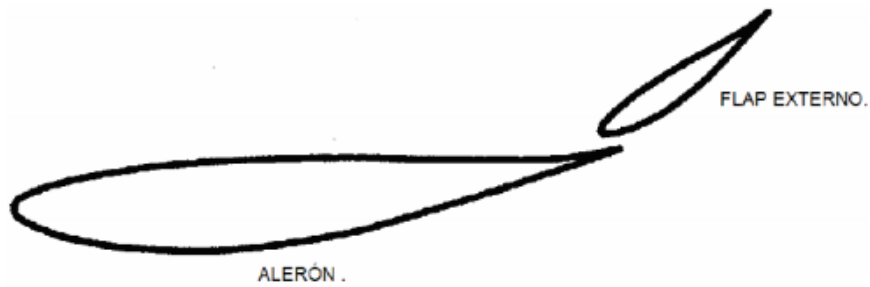


Figura 24. Aleró amb un flap extern. [17]

A més, cal destacar l'existència d'alerons de doble pla, capaços de crear més càrrega aerodinàmica que els alerons simples. Aquest tipus d'aleró ja s'utilitzava a la Formula 1 al 1997.



Figura 25. Aleró de doble pla en el Benetton B197 de Formula 1. Any 1997. [17]

També comentar les derives, situades en els extrems de l'aleró per evitar la creació de vòrtex en les puntes. Aquestes derives són similars als "winglets" d'un avió.

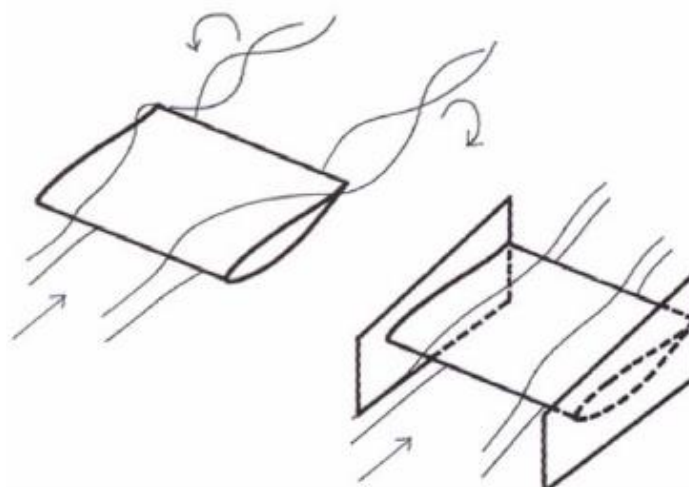


Figura 26. Aplicació de derives a un aleró. [17]



3.2. Aerodinàmica activa

Els superesportius porten ja creant-se des de fa dècades, però la implementació de l'aerodinàmica activa és una cosa més aviat recent. L'aerodinàmica activa permet a certs elements dels vehicles reaccionar davant canvis de velocitat, com una frenada brusca per no perdre el control del cotxe a altes velocitats.

En el Ford GT 2017, l'aleró s'adapta a la manera de conducció seleccionat pel conductor per generar una òptima càrrega aerodinàmica. En el Ferrari LaFerrari, l'aleró posterior es desplega durant la frenada per oferir major resistència a l'aire. El Koenisegg Regera te implementat un sistema d'aportació de carrega retràctil de càrrega aerodinàmica activa. El Pagani Huayra té quatre flaps que pugen o baixen ajustant-se a diversos paràmetres com acceleració, direcció del vehicle o la frenada.

Per explicar com funciona l'aerodinàmica activa en un superesportiu, un clar exemple és el Porsche 911.

Si circulem per sota de 70 km/h, el vehicle obrirà les obertures frontals, dirigint el flux d'aire al voltant de les rodes davanteres, millorant la ventilació. Quan el cotxe supera aquesta velocitat, en lloc d'obrir-se romanen tancades, contribuint a reduir el drag.



Figura 27. Representació gràfica de les línies de flux amb les obertures frontal obertes. [18]

Un altre sistema i el que estudiarem en aquest projecte és l'aleró actiu, el qual es desplega parcialment un cop es superen els 90 km/h. El següent esglauó el trobem a velocitats superiors a 170 km/h, quan el sistema d'aerodinàmica activa obra tant les obertures frontals com l'aleró posterior, proporcionant la millor dinàmica de conducció possible.



Figura 28. Vehicle circulant sense cap element aerodinàmic activat. [18]



Figura 29. Vehicle circulant a 170 km/h amb l'aleró activat. [18]

Altres funcions de l'aleró actiu es desplegar-se quan el vehicle està en mode de pluja, d'aquesta manera el vehicle aplica més carrega a les rodes augmentant el contacte del neumàtic amb la carretera i proporcionant més estabilitat.

Un altre funció es l'activació de l'aleró en frenades fortes amb el mateix objectiu explicat anteriorment. Aplicar més carrega a les rodes per tal de que la frenada sigui més efectiva, d'aquesta manera aquest actua com un fre d'aire.

A les següents imatges es pot veure un exemple gràfic de com actuaria aquest sistema en cas d'haver de fer una frenada d'emergència. Podem observar com el vehicle en



estudi esta circulant a una velocitat elevada pel carril esquerra quan un vehicle decideix avançar al camió. En aquest punt el vehicle amb aerodinàmica activa frena bruscament activant l'aleró posterior disminuint la distancia de frenat i evitant la col·lisió.



Figura 30. Situació abans de frenar. [18]



Figura 31. Moment en el que el vehicle frena bruscament. [18]

Per a que tots aquest elements funcionin i s'adaptin a les condicions dinàmiques, s'ha d'implementar un conjunt de sistemes com sensors i motors elèctrics.



En el cas de Lamborghini, aquest ha creat un sistema de govern anomenat Adaptive Network Intelligent Management (ANIMA). Aquest sistema consisteix en sensors amb tres acceleròmetres i tres giroscopis denominat Lamborghini Piattaforma Inerziale (LPI). Aquests sistemes electrònics s'encarreguen d'analitzar la situació del vehicle i en funció d'aquesta, regulen tots els sistemes susceptibles de ser ajustats per a que proporcionin la resposta ideal.

4. CAS D'ESTUDI

4.1. Elecció del vehicle utilitzat en el estudi

A l'inici de l'estudi, es va plantejar l'opció de dissenyar un vehicle partint des de zero creant un prototip completament nou, el que resultava molt arriscat. El disseny de la carrosseria d'un vehicle és un procés molt costós i presenta certes dificultats, per lo que finalment es va decidir buscar la geometria d'un model real existent en el mercat del qual el seu potencial aerodinàmic presentés unes prestacions òptimes.

S'han plantejat diferents estructures geomètriques. Per fer aquesta elecció, s'ha pensat en un vehicle on es pugui aprofitar aquestes millores al màxim possible. Es per això que el model escollit ha de ser un vehicle d'altres prestacions que pugui assolir velocitats elevades i a la vegada requereixi de frenades fortes i poc temps per aturar el vehicle.

Pel disseny de la carrosseria del vehicle s'han plantejat diferents propostes, buscant un perfil amb una geometria que fos òptima aerodinàmicament, amb bones prestacions, però econòmic i fàcil de construcció per no haver de realitzar moltes iteracions del model, així poder centrar-se en l'anàlisi de l'efecte del aleró.

Per altra banda, un aspecte important que havia de tenir el vehicle era disposar de pocs elements aerodinàmics per, d'aquesta manera, veure un gran canvi amb les implementacions.

Amb totes aquestes premisses, el vehicle que millor s'ajusta a les característiques esmentades és el Lamborghini Gallardo. Un automòbil esportiu d'alta gama fabricat per la marca italiana Lamborghini entre els anys 2003 i 2013. El model equipa un motor V10 de 5,2 litres de cilindrada que genera una potència màxima de 560 cv. Amb tot aquest potencial el vehicle accelera de 0 a 100 en 3,7 segons i arriba a una velocitat màxima de 309 km/h. [4]



Figura 32. Lamborghini Gallardo [19]

4.2. Metodologia.

Per al disseny CAD del vehicle s'utilitzarà el software CATIA V5 (Computer-Aided Three dimensional Interactive Application). Comercialitzat pel fabricant Dassault Systèmes. El programa és ideal per crear sòlids, superfícies, assemblatges, dibuixos, manufactura i anàlisis. Un altra solució del fabricant és Solidworks. Tots dos programes compten amb eines potents de modelatge paramètric i renderitzat fotorealista. No obstant això, CATIA ofereix característiques més avançades per a superfícies, característica molt important per a les necessitats de la modelització, ja que les geometries complexes del vehicle requereixen el disseny amb el mòdul de superfícies.

Per a l'anàlisi 2D i optimització de la posició de l'aleró, es fa ús del programa JavaFoil. Aquest programa permet realitzar de manera ràpida una gran quantitat d'anàlisi de diferents configuracions. Per tant es podran obtenir de manera molt ràpida uns resultats orientatius que són de gran utilitat en la fase inicial del desenvolupament de l'aleró. Aquests resultats serviran com a guia per al posterior estudi de el model en 3D mitjançant l'ús de CFD.

L'estudi aerodinàmic es farà a través de software CFD (Computer Fluid Dynamics). Altair HyperWorks CFD 2020 ha sigut escollit com el software que s'utilitzarà. S'ha escollit aquesta versió ja que l'anterior estava dividida en diferents mòduls per separats. El HyperMesh, Acusolve i Hyperview. D'aquesta manera aquesta nova versió ho unifica tot en el mateix programa fent que sigui tot més intuïtiu i més àgil. Per obtenir els resultats gràfics també s'utilitzarà aquest programa.

En canvi per obtenir els resultats numèrics es farà servir el software Altair Hypergraph. Aquest programa és una potent eina d'anàlisi de dades i representació amb enllaços a molts formats de fitxer populars. El seu motor matemàtic és capaç de processar fins i tot



les expressions matemàtiques més complexes. Hypergraph combina aquestes característiques amb una presentació d'alta qualitat i capacitats de personalització, creant així un sistema complet d'anàlisi de dades per a qualsevol organització.

4.3. Disseny del vehicle.

S'ha empleat la tècnica d'enginyeria inversa per a obtenir la geometria del vehicle. D'aquesta manera s'han buscat les millors imatges del model escollit.

A partir de les fotografies del cotxe a estudiar, s'han capturat les imatges de la planta, alçat i perfil del vehicle. Mitjançant aquesta tècnica, es permet obtenir els plànols del perímetre de la geometria, per obtenir un model tridimensional del disseny i la posterior simulació..

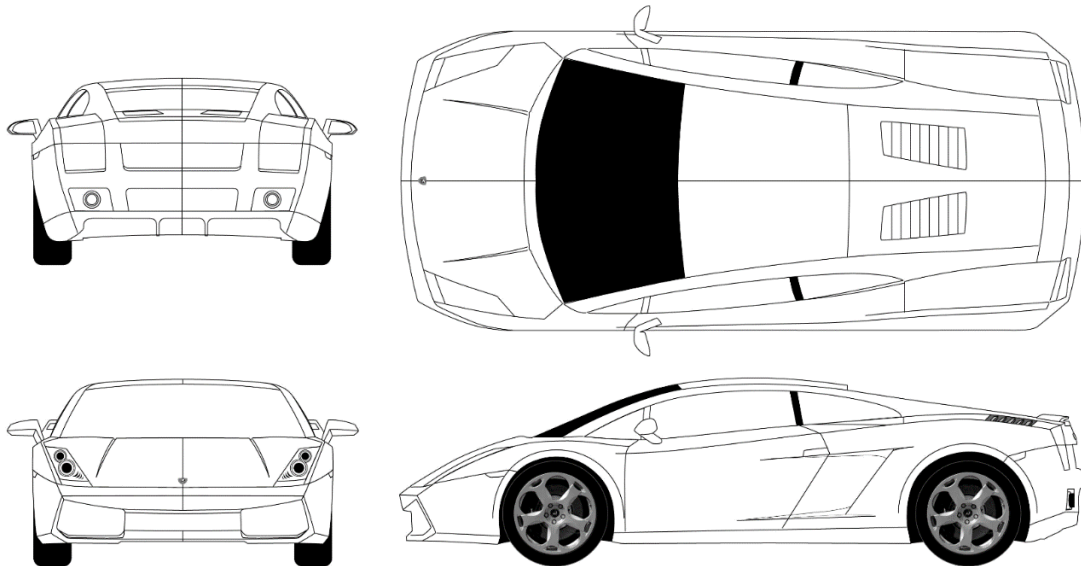


Figura 33. Alçat davanter i posterior, perfil i planta del Lamborghini Gallardo. [20]

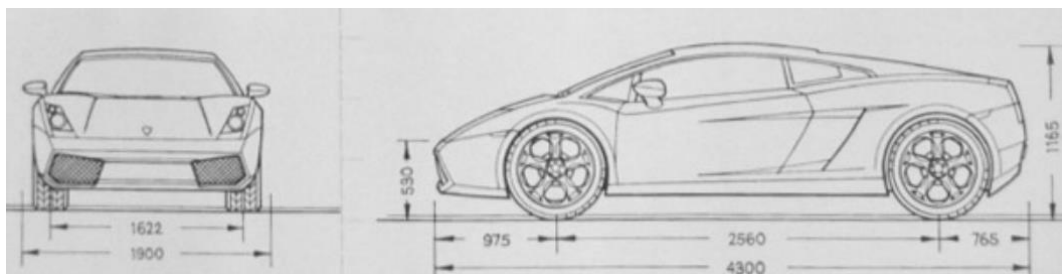


Figura 34. Mides del vehicle. [21]



Per construir la carrosseria, primer de tot s'ha importat la silueta del vehicle en perfil, alçat i planta amb el mòdul "Sketch Tracer" que proporciona Catia.

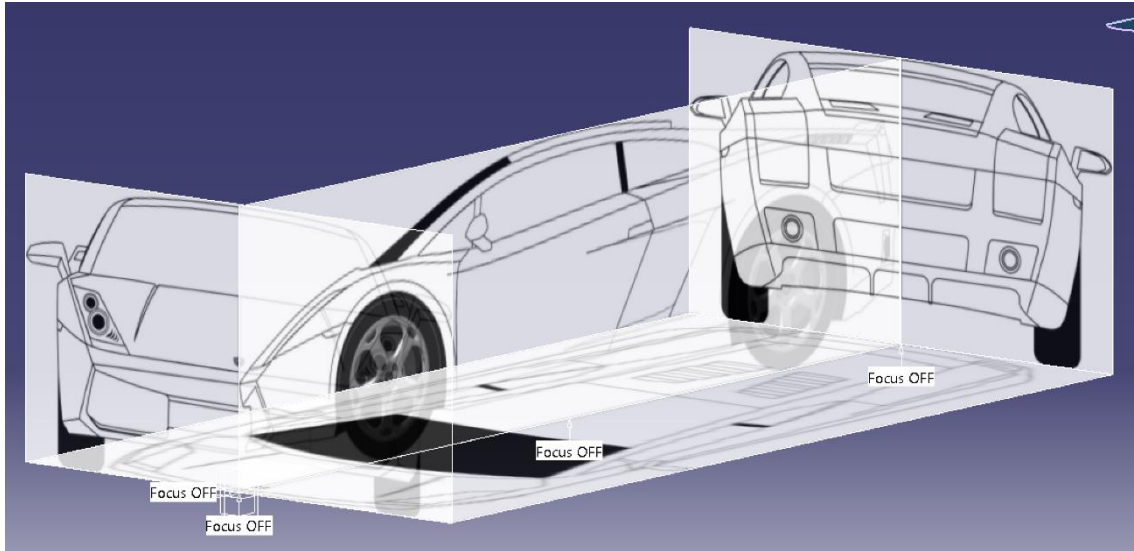


Figura 35. Esbós de la planta, l'alçat i el perfil.

Després de col·locar els esbossos, es comença a treballar sobre ells amb el mòdul "Generative Shape design". Amb les eines "3D curve", "Spline", "Line" i "Combine" es dibuixa el contorn del vehicle seguint la silueta dels esbossos introduïts anteriorment. Obtenint el resultat de la figura 36.

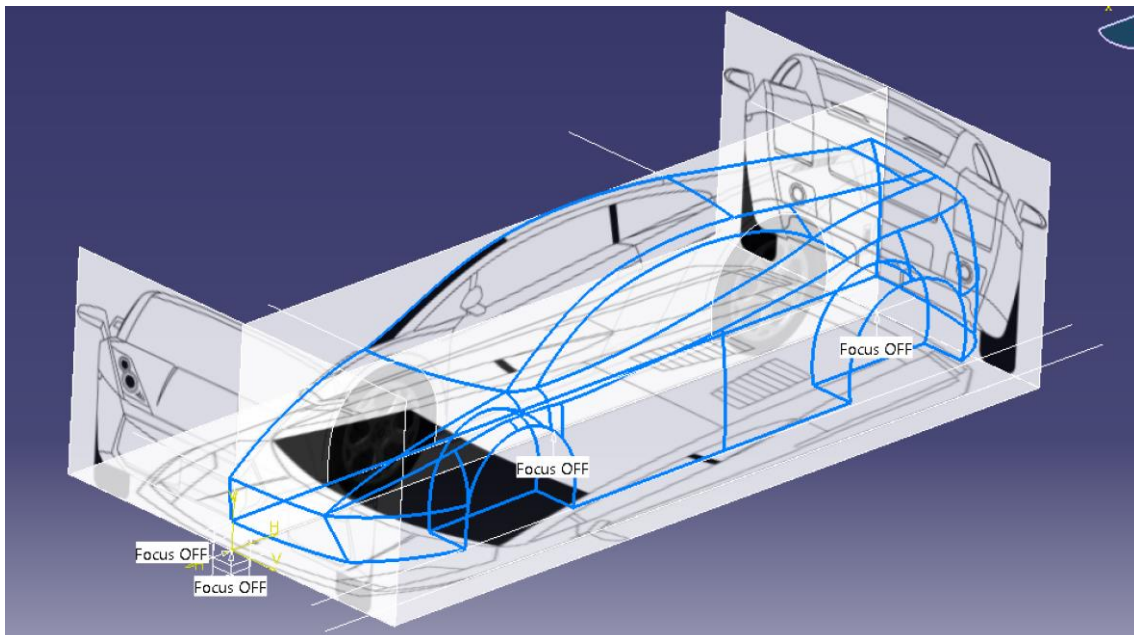


Figura 36. Disseny del contorn.

La silueta s'ha de dissenyar d'una manera intel·ligent per a que la superfície que es generi sigui possible i no s'obtinguin superfícies errònies. És per això que aquesta part



del disseny és molt important per a que en posteriors passos no s'obtinguin errors que no deixarien seguir amb el disseny.

A continuació, amb les eines "Fill" i "Multi-Section Surface" es generaran totes les superfícies obtenint el resultat de la figura 37.

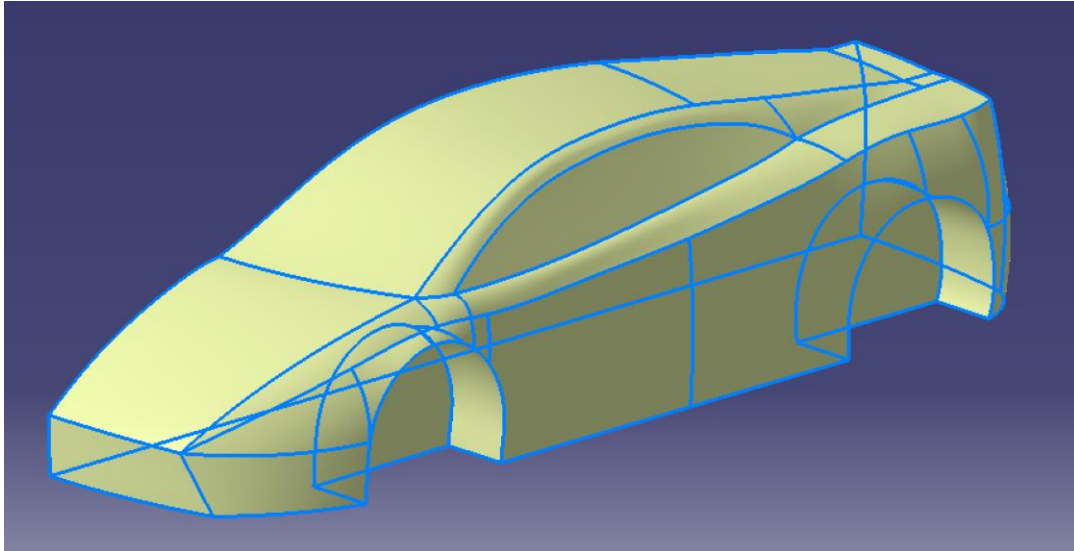


Figura 37. Generació de la superfície.

Per arribar a aquest punt, la silueta s'ha anat retocant cada cop que la superfície no es podia generar. Seguidament s'ha fet una simetria de la superfície per generar la totalitat del vehicle amb les eines "Join" i "Symmetry"

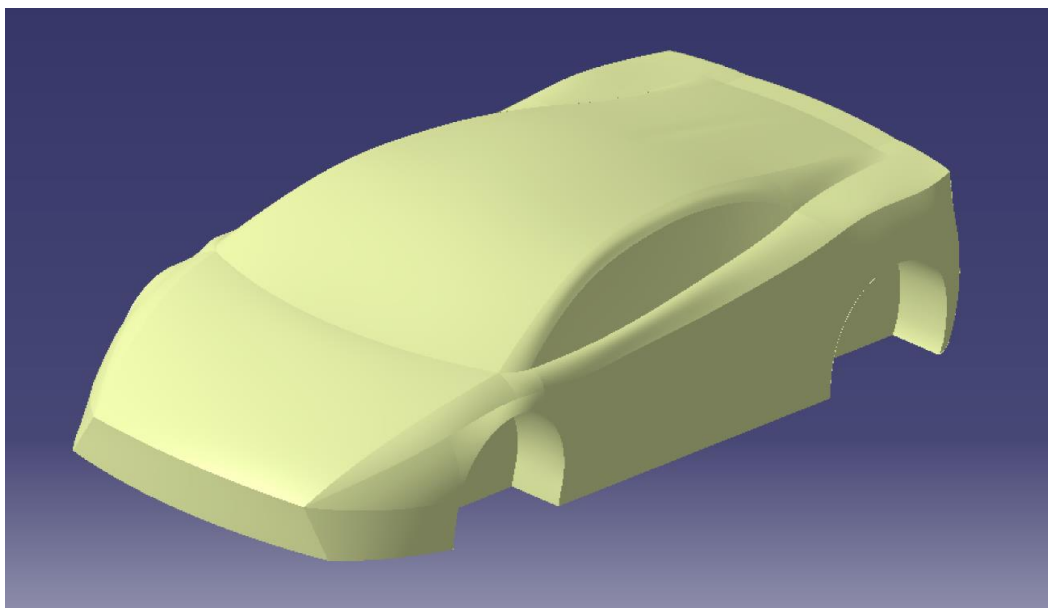


Figura 38. Generació de la superfície completa després de la simetria.



Un cop s'ha dissenyat tota la superfície del vehicle, aquesta s'ha de convertir en sòlid per a que posteriorment pugui ser mallat en el programa de CFD.

Amb l'eina "ThickSurface" s'ha donat un gruix a la superfície generant un sòlid.

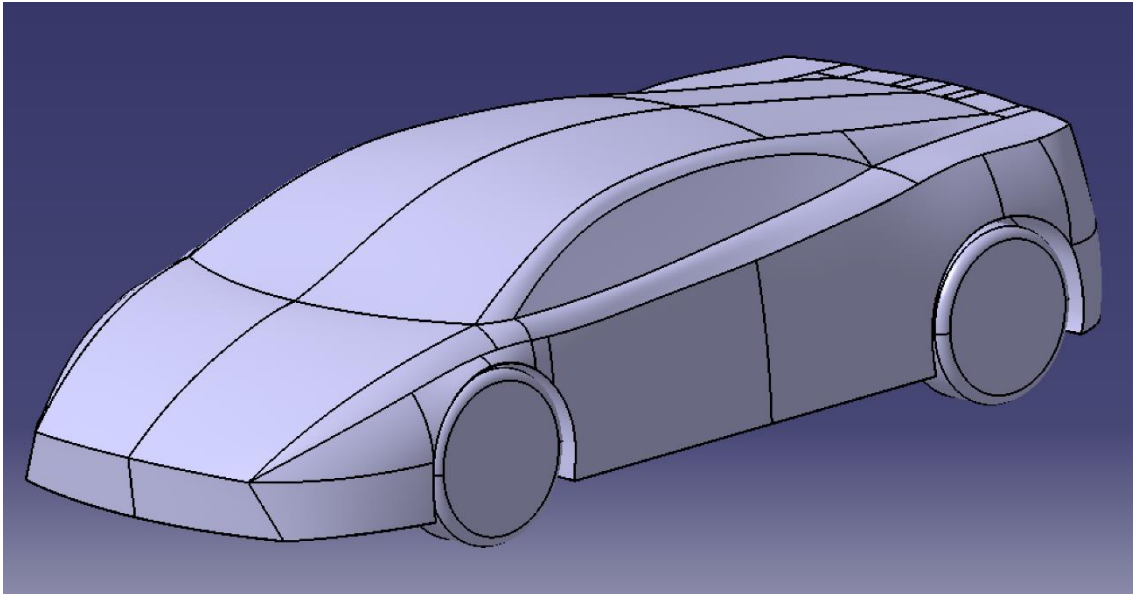


Figura 39. Sòlid del vehicle amb les rodes.

Finalment com es pot veure a la figura 39 s'han dissenyat les rodes.

Per una millor optimització de l'estudi, s'han dut a terme una sèrie de simplificacions en la geometria per facilitar el càlcul de les simulacions i evitar errors en el mallat en superfícies complexes:

- i. El vehicle s'ha tractat com una **massa homogènia**. No es tenen en compte espais buits a l'interior com la cabina de passatgers o al maleter ni altres elements com el motor que puguin afegir massa.
- ii. **Flux intern nul**. No es consideren forats ni espais buits a l'interior del vehicle per on pugui circular el fluid, com ara entrades d'aire per refrigerar el motor o els frens. Només es té en compte el flux extern al vehicle.
- iii. **Eliminació dels retrovisors**. Per a aquest treball no es té en compte els retrovisors ja que aquesta aportació seria una aportació constant en tots els estudis i cap mesura de millora aerodinàmica està enfocada a aquest aspecte. A més la inclusió dels retrovisors pot generar problemes de mallat. Cal comentar



que en un estudi real no es poden menysprear ja que modifiquen d'una manera considerable el flux al voltant del vehicle.

- iv. **Fons pla.** La part inferior del vehicle es considera de forma plana sense irregularitats com podrien ser en un cas real: eixos, barres, dipòsits, etc. Aquesta simplificació repercutirà en els resultats obtinguts, sobretot en el valor del drag, pel fet que aquests provoquen un gran fregament amb el fluid.

5. ELECCIÓ I DISSENY DEL PERFIL

5.1. Elecció del perfil

La competició sempre ha sigut la avantguarda de la indústria de l'automoció. És per això que moltes innovacions en els vehicles de competició s'han aplicat més tard als vehicles comercials. Un exemple d'això, són les peces amb la denominació "performance" que ofereixen les marques de vehicles comercials en els seus models més esportius. Aquestes peces ofereixen un alt rendiment i venen directament de la competició on han sigut introduïdes primerament.

És per això que per a l'elecció del perfil alar es tindrà en compte les característiques d'un aleró de competició.

Per trobar aquests perfils s'ha utilitzat la base de dades 'airfoltools' on es poden trobar tot tipus de perfils alars. Per a cada perfil es poden trobar els coeficients aerodinàmics per a un gran rang d'angles d'atac i també per a diferents números de Reynolds.

Com s'ha dit anteriorment, s'estudiarà quins perfils s'utilitzen en la competició. Dins de la competició, la modalitat on es troben els primers avanços és la Formula 1. Els alerons d'aquesta modalitat són els més desenvolupats a nivell tecnològic i aerodinàmic.

D'aquesta manera, si ens fixem en un aleró de F1 trobem que són alerons compostos, ja que porten un flap extern obtenint un aleró amb molta curvatura o "camber". Recordem que el "camber" s'entén com la distància màxima en perpendicular que existeix entre la línia de corda i la línia de curvatura mitja o "mean camber line". Aquesta mesura s'expressa en percentatge respecte la longitud de corda o longitud característica i es el que podem assimilar a la curvatura. Per tant, es buscarà un perfil amb un percentatge de "camber" elevat.



Per altra banda, els perfils que s'utilitzen en la competició no presenten un gruix elevat, per tant, serà un altra característica a tenir en compte.

Una característica important a tenir en compte és la eficiència aerodinàmica. Es busca un perfil que presenti un rang ampli d'angles d'atac en el que la eficiència es mantingui en valors elevats. D'aquesta manera es descartaran perfils en els que només tinguin un angle d'eficiència elevada ja que si ens allunyem d'aquest, es perdrà eficiència ràpidament.

Dins de la base de dades trobem perfils de diferents famílies. Entre elles destaquen els perfils NACA, GOE, FX o E. Per poder escollir un perfil adequat s'utilitza l'eina de cercador de 'airfoiltools'. Gràcies a aquest cercador podem seleccionar els nivells màxims i mínims tant de curvatura com de gruix. S'introdueixen uns límits d'entre 9% i 11% per a la curvatura i d'entre 10% i 13% pel gruix. D'entre milers de perfils s'aconsegueix reduir la cerca a només 4, el perfil CH10, E423, GOE448 i el RAF19. Analitzant els gràfics d'aquest últim observem que presenta un comportament molt inestable probablement a causa de la seva forma poc suau. El E423 i el GOE448 són pràcticament iguals pel que fa a gruix i curvatura però el primer d'ells ofereix coeficients de sustentació grans. És per això que es descarten tant el RAF19 com el GOE448 i l'estudi es realitzarà amb el CH10 i el E423.

El primer perfil que es presenta és el CH10. Aquest perfil compleix amb les condicions que es busquen ja que presenta curvatura i no és massa gruixut. Té un 'camber' màxim de 10.2% i un gruix de 10.8% referit també a longitud total de la corda del perfil.

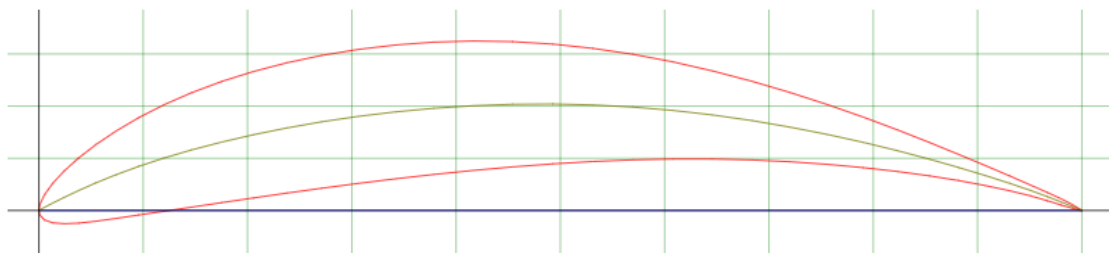


Figura 40. Perfil CH10. [22]

A continuació es mostren tres gràfics diferents que són de gran importància per entendre les prestacions d'aquest perfil. Aquests són el gràfic de C_D i C_L en funció de l'angle i el de l'eficiència, és a dir C_D/C_L , en funció també de l'angle.

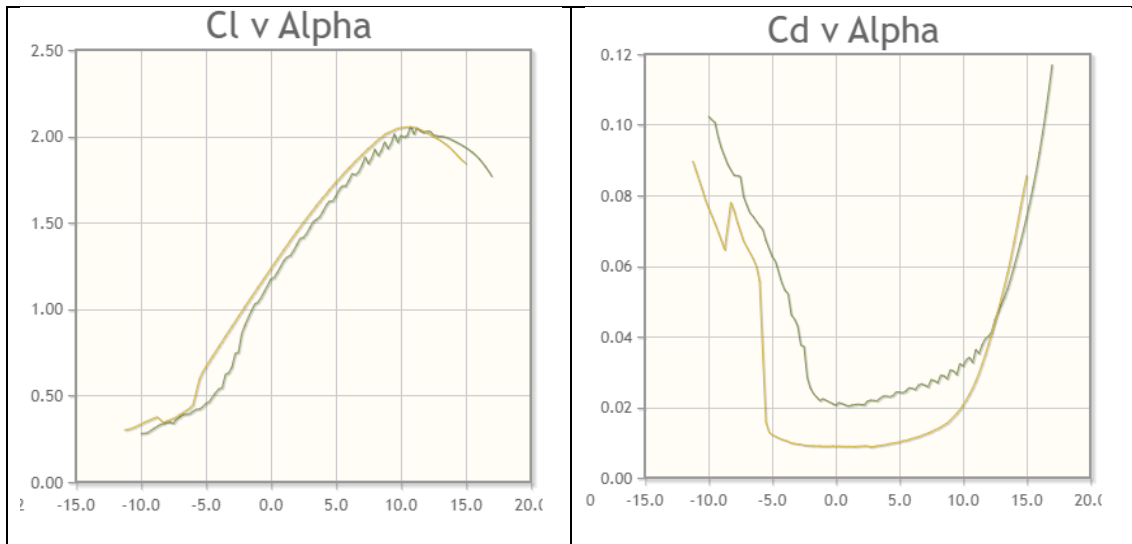


Figura 41. Gràfics CL-alpha CD-alpha. [22]

Pel que fa als gràfics, línia verda correspon a un flux amb un numero de Reynolds de 200.000. D'aquesta manera podem considerar el flux com a laminar. Per altra banda la línia marró representa un flux amb un numero de Reynolds de 1.000.000 considerant un flux turbulent.

Es pot observar que en el cas del CL ambdós fluxos, laminar i turbulent, presenten unes corbes molt similars. Es dedueix llavors que a nivell de coeficient de sustentació es generarà el mateix amb els dos tipus de flux. En tot cas amb un angle de 10° s'obté un coeficient de sustentació per sobre de 2, aquest valor es considera molt elevat. Podem dir llavors que compleix amb el primer requisit ja que serà capaç de generar molta força de sustentació.

On si trobem diferències és en el gràfic del CD en funció de l'angle. En aquest es veu que el flux laminar presenta major CD en tot el rang d'angles el que es tradueix en una major resistència a l'avanç. Sembla que per a angles molt elevats el turbulent arriba a tenir més CD però un aleró no treballa en aquestes condicions de manera que no es té en compte. En qualsevol cas el CD té valors petits al voltant de 0.01 per a tot el rang d'angles de treball comuns i per tant compleix amb el segon requisit també.

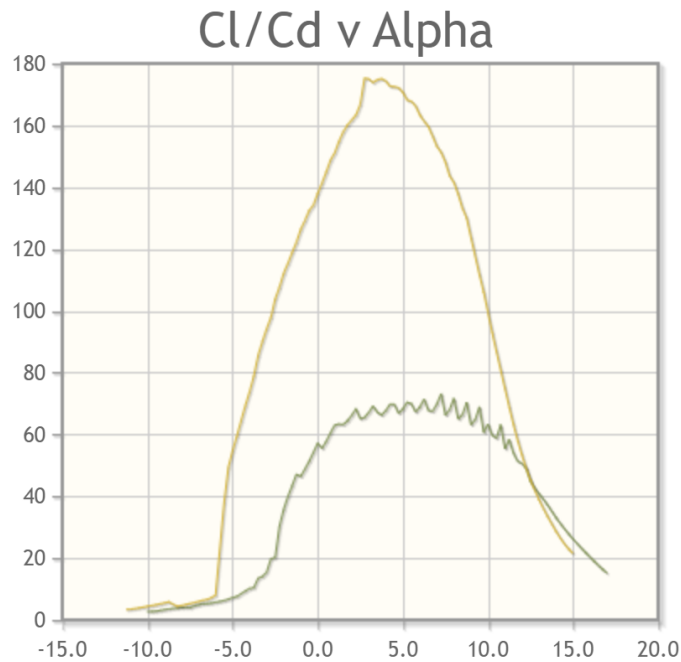


Figura 42. Gràfic CL/CD-alpha.[22]

Aquest major CD del règim laminar fa que quan mirem el gràfic d'eficiència observem diferències tan grans. Mentre el turbulent presenta valors d'eficiència molt alts en tot el rang de 0 a 10 graus, que és el ventall en el qual treballa un aleró, el laminar es queda molt per sota d'aquest assolint valors d'eficiència de com a molt 70. El turbulent per contra es manté per sobre de 100 en tot el rang d'angles comentat anteriorment.

Sembla per tant que el perfil CH10 presenta les característiques adequades per exprémer tot el seu rendiment sota condicions de règim turbulent. Tots els assajos que es duen a terme en aquest projecte són sota aquest mateix règim així que és un perfil adequat. El segon perfil que s'ha escollit és el E423 i és molt similar a l'anterior. Comparteix les característiques tant de curvatura com de gruix sent aquests respectivament de 9.5% i 12.5%. La curvatura és pràcticament igual mentre que aquest supera en gruix a l'CH10 però sense arribar a ser elevat.

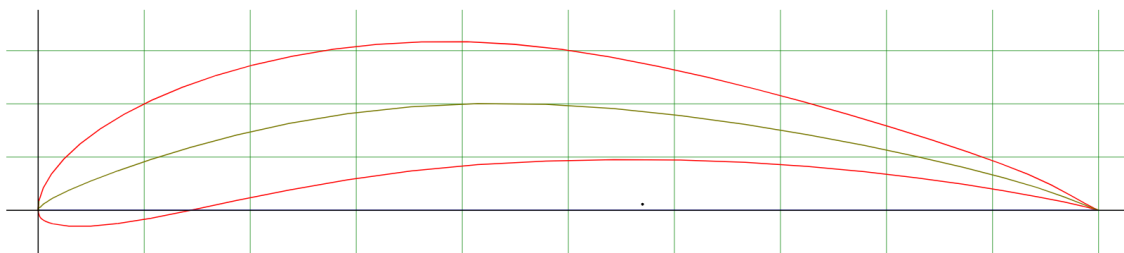


Figura 43. Perfil E423. [23]



A continuació es tornen a mostrar els gràfics per comprendre millor les característiques d'aquest perfil.

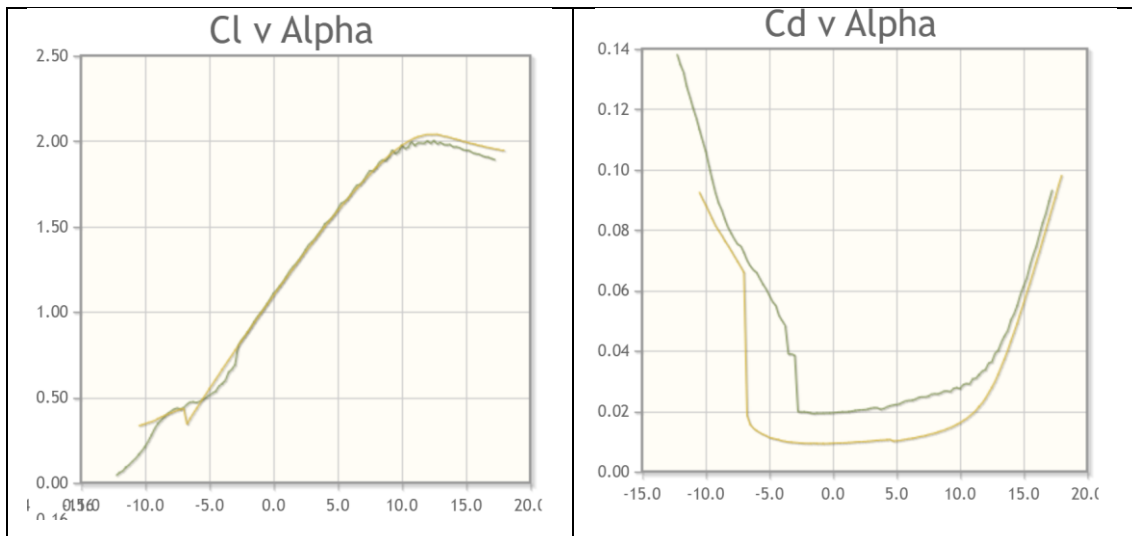


Figura 44. Gràfics CL-alpha y CD-alpha. [23]

Com s'ha vist en el perfil CH10 no es poden apreciar pràcticament diferències entre els dos règims en el gràfic de Cl en funció de l'angle. En aquest cas també s'obté un valor màxim d'aquest coeficient molt elevat arribant pràcticament a 2 amb poc més de 10°. D'aquesta manera es pot determinar que aquest perfil generarà un downforce elevat quan s'utilitzi com aleró i compleix amb el que busquem.

Observant el gràfic del CD es poden veure característiques molt similars. El flux turbulent atorga coeficients de "drag" menors que el laminar. Podem observar com pràcticament des de -5° fins 10° el CD es manté pràcticament constant i de valor molt petit. Aquest fet sorprèn donat que son inclinacions molt diferents però amb coeficients pràcticament iguals.

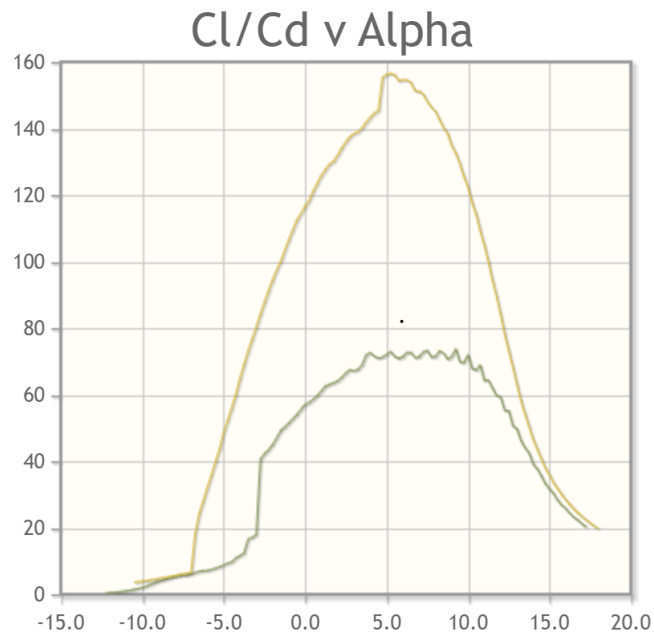


Figura 45. Gràfic CL/CD-alpha. [23]

Finalment el gràfic d'eficiència mostra el que ja intuïm mirant els altres dos. El major coeficient de 'drag' del règim laminar redueix les seves prestacions quant eficiència obtenint en aquest cas un valor màxim al voltant de 75. En canvi, igual que passava amb el CH10, s'obté una eficiència molt gran en tot el rang de 0° a 10° mantenint-se aquesta sempre per sobre d'un valor de 120. Podem observar una lleugera diferència pel que fa a l'angle en què es produeix aquesta màxima eficiència. Pel cas de l'E423 es produeix en 5.25 graus mentre que el CH10 ho fa amb tan sols 2.75 graus.

Arribats a aquest punt tenim perfils alars que compleixen amb tots els requisits que es demanaven i que per tant oferiran unes bones prestacions. D'aquesta manera, sent tots dos perfils vàlids per a l'estudi, s'escollirà el perfil E423 per a la realització del treball. [5]



5.2. Anàlisi 2D del perfil

A continuació es procedeix a explicar l'ús de el programa JavaFoil. Com s'ha comentat en el apartat de metodologia, aquest software és una senzilla aplicació programada en Java, la qual cosa permet la seva utilització en línia sense necessitat d'instal·lar el programa o bé, instal·lar el programa per poder treballar de manera offline sense cap tipus de restriccions.

A mesura que es va fent el procés del anàlisi, s'anirà explicant cadascuna de les pantalles que s'utilitzaran.

La primera pantalla del JavaFoil és en la qual introduïm els punts que representen el perfil a utilitzar en els anàlisis, en el cas en qüestió, s'introduiran les coordenades del perfil NACA E423. Les coordenades son extretes de la biblioteca de "Airfoils".

JavaFoil

Geometría | Modificar | Diseñar | Velocidad | Campo fluido | Capa Límite | Polar | Aircraft | Opciones

Geometría del perfil

Nombre: NACA E423

Coordenadas:

1,00000	0,00000
0,99655	0,00159
0,98706	0,00650
0,97304	0,01434
0,95530	0,02381
0,93358	0,03376
0,90734	0,04400
0,87671	0,05481
0,84221	0,06620
0,80436	0,07803
0,76373	0,09010
0,72090	0,10215
0,67644	0,11391
0,63092	0,12506
0,58491	0,13524
0,53893	0,14410
0,49347	0,15116
0,44870	0,15593

decimal digits: 5

Borrar

Crear un perfil NACA:

Familia: NACA 4 dígitos (e.g. 2412)

Numero de Puntos: 72

Espesor max t/c: 12 [%]

Situación del espesor max x/c: 30 [%]

Curvatura max f/c: 0 [%]

Situación de la curvatura max x/c: 0 [%]

Modificar el perfil NACA cerrando el borde de salida

Es una familia de proposito general

Crear un perfil

NACA 0012

Para los siguientes análisis el borde de salida debería ser cerrado.

Actualizar vista | Copiar (Texto) | Pegar (Texto) | Abrir... | Guardar... | Imprimir... | Compare...

Figura 46. Pantalla Geometria Java Foil. [24]



Seguidament es treballarà amb la pantalla de modificació dels perfils.

En aquesta pantalla es faran tots els canvis necessaris al perfil, dins dels canvis possibles tenim els següents:

- i. **Augmentar el nombre de punts del perfil:** Pot arribar a ser útil per obtenir una representació més exacta del perfil, sobretot a les vores d'atac i de sortida que és on més resolució necessitem en l'anàlisi.
- ii. **Escalar perfil:** Aquesta eina es farà servir per donar la mida adequada als perfils que conformaran l'aleró, l'escalat es produeix respecte a la mida inicial del perfil i en percentatge de corda.
- iii. **Pivotar x i pivotar y:** Aquestes dues opcions es fan servir per situar el punt que farà de pivot en les rotacions que es fan als perfils per canviar el seu angle d'atac.
- iv. **Rotar:** Es farà servir aquesta eina per rotar el perfil l'angle que es necessita en cada assaig, sempre tenint en compte que el perfil rotarà respecte a punt de pivot.
- v. **Translació en x i translació en y:** Aquesta eina s'utilitza per desplaçar el perfil al pla mitjançant augments que es seleccionen manualment a la casella.
- vi. **Flip y:** Aquesta última eina serveix per donar-li la volta al perfil, es farà servir com a pas inicial en el desenvolupament dels anàlisis ja que es vol generar downforce en lloc de sustentació. Com a detall important d'aquesta operació el gir de l'eix Y ho fa respecte a la posició del punt Pivot pel que és important que aquest estigui situat en l'eix X quan es faci l'operació d'inversió.

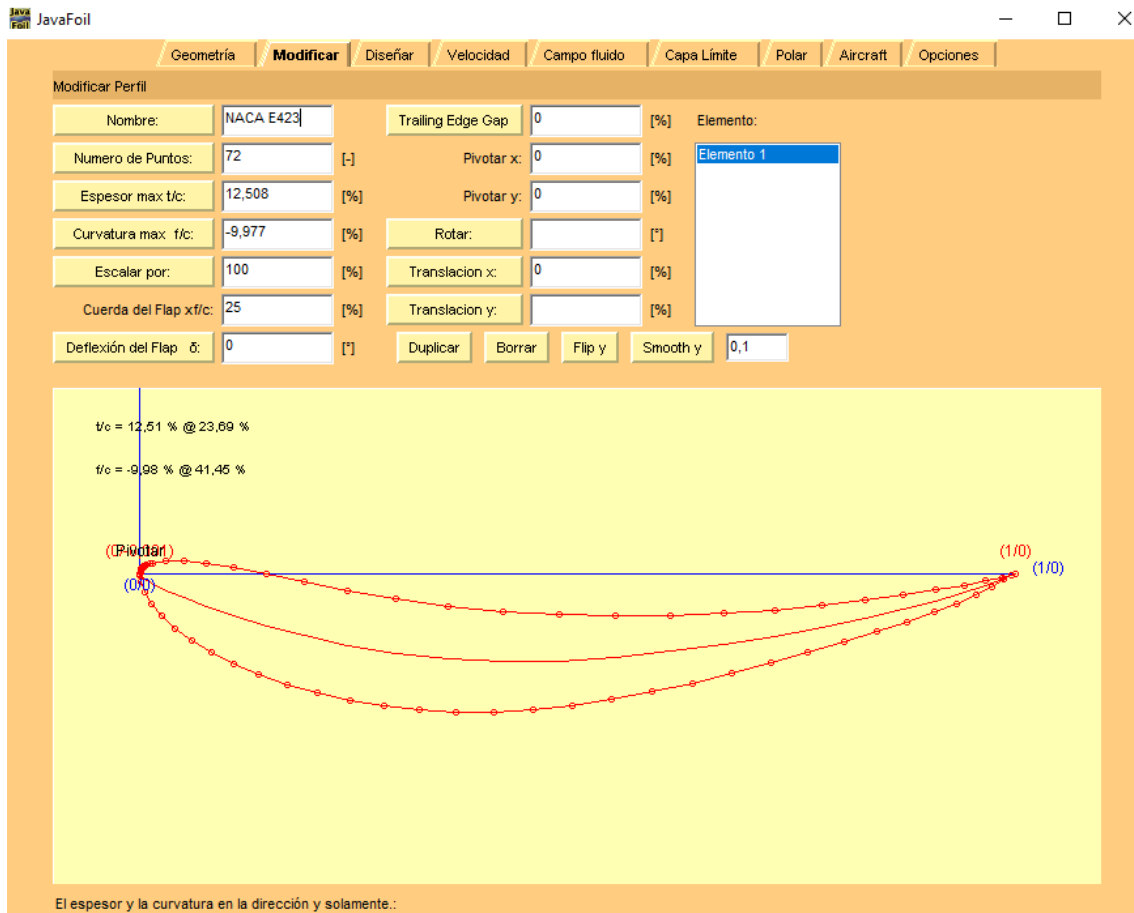


Figura 47. Pantalla Modificar perfiles JavaFoil. [24]

Com es pot veure en la imatge anterior, s'ha aplicat el Flip en l'eix Y per obtenir el perfil desitjat. D'aquesta manera, ara el perfil es troba amb un angle de 0° . Com s'ha esmentat en l'apartat anterior on s'escull el perfil, s'ha determinat que l'angle amb més eficiència aerodinàmica per al perfil E423 és 5.25° . A continuació es passarà a comprovar mitjançant JavaFoil si obtenim el mateix resultat. També es determinarà l'angle amb més downforce. D'aquesta manera establiríem l'angle que tindrà l'aleró per augmentar la carrega aerodinàmica en les frenades.

Per trobar aquests angles es passarà a explicar la següent pantalla. Aquesta pantalla analitza la velocitat. És molt interessant ja que introduint un angle inicial, un angle final i un interval. A partir d'aquests paràmetres es pot extreure la distribució de velocitats i d'aquesta manera no s'han de fer simulacions individuals per a cada angle.

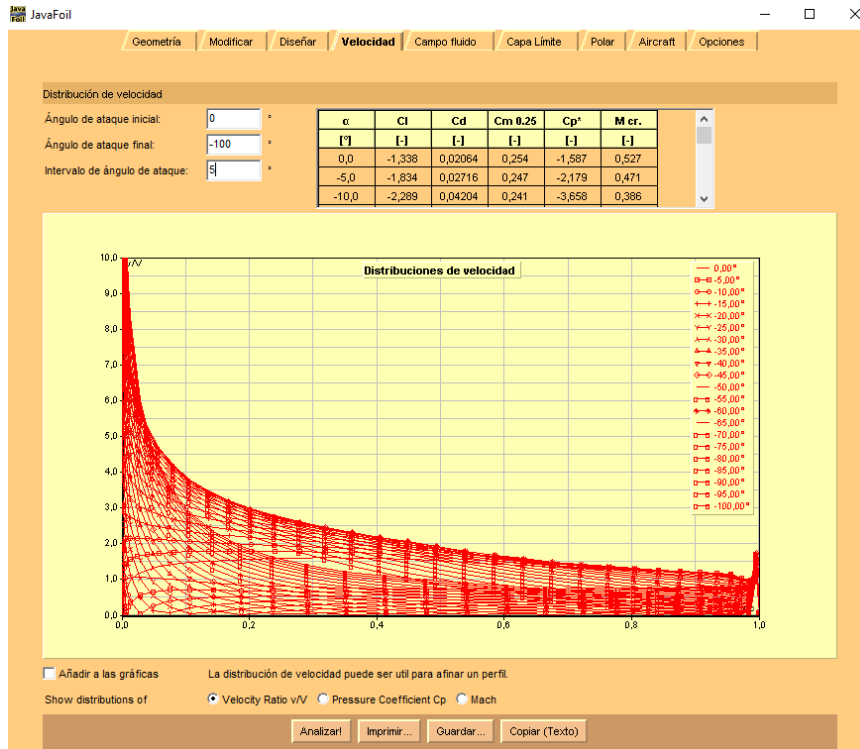


Figura 48. Distribucions de velocitat. [24]

Obtenim els resultats representats a la taula 1.

α	Cl	Cd	Cl/Cd
[°]	[-]	[-]	
0	-1,338	0,02064	64,8255814
-5	-1,834	0,02716	67,5257732
-10	-2,289	0,04204	54,4481446
-15	-2,375	0,08662	27,41861
-20	-1,629	0,20254	8,04285573
-25	-0,939	0,39145	2,39877379
-30	-0,559	0,63112	0,88572696
-35	-0,349	0,93241	0,37429886
-40	-0,232	1,32322	0,17532988
-45	-0,163	1,74426	0,09344937
-50	-0,121	2,28151	0,05303505
-55	-0,094	2,46821	0,03808428
-60	-0,076	2,84741	0,02669092

Taula 1. Coeficients aerodinàmics per a cada angle.



A partir dels resultats obtinguts es pot observar com l'angle més eficient son els 5° que havíem establert anteriorment. Per tant, confirmem que aquesta elecció és la correcte.

Per determinar quin angle utilitzar en la posició d'aerofre, es considerarà 55° com un angle més que suficient. Això és degut a que l'aleró amb aquest angle generà un drag de 2,5. Aquest valor és molt elevat i per tant no caldrà incrementar més aquest angle. També destacar que angles més elevats complicarien la cinemàtica del sistema d'aerodinàmica activa.

Ara es passarà a la següent finestra del programa que permet observar de forma força intuïtiva el camp fluid del perfil que se està assajant. En aquesta finestra "Camp fluid" a més de la representació de camp fluid podem representar el camp de pressions generat i les línies de corrent entre altres coses.

Aquesta finestra és força útil a l'hora d'interpretar qualitativament si els resultats són coherents ja que al mostrar-nos el camp fluid permet veure amb més facilitat si el corrent es comporta de manera coherent.

Camp de fluid per a $5,25^\circ$

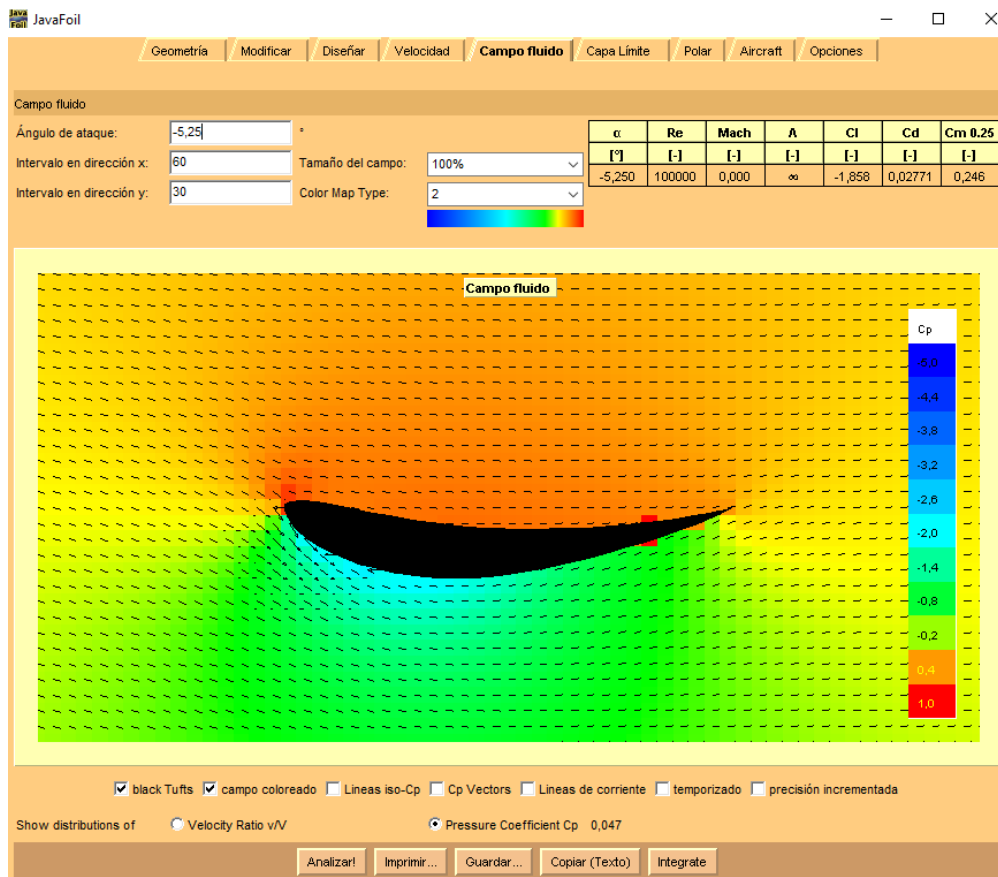


Figura 49. Cam de fluid per a $5,25^\circ$.



Camp de fluid per a 55°

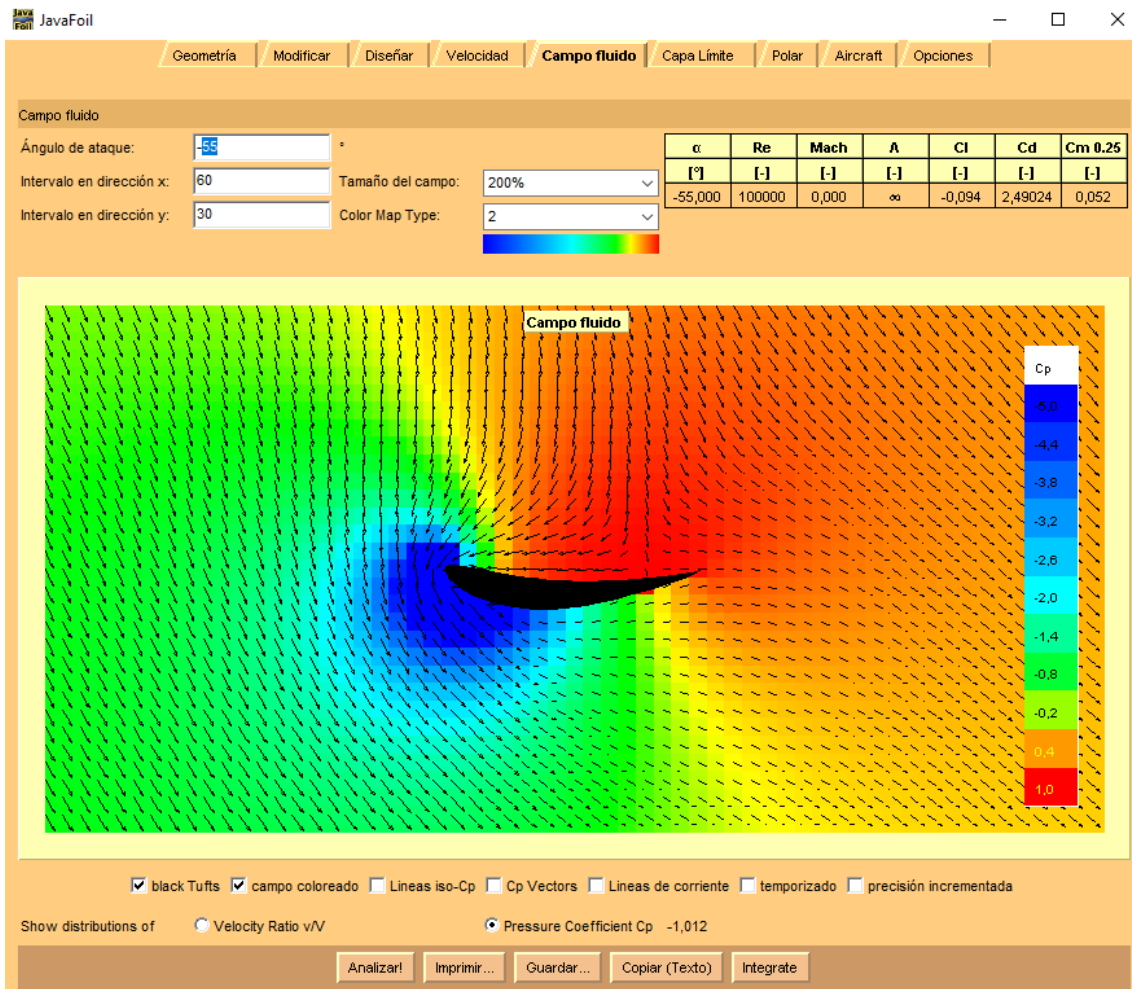


Figura 50. Camp de fluid per a 55°.

Els altres apartats d'aquest programa no s'han entrat en profunditat en el seu ús pel que no s'explicaran.



5.3. Disseny de l'ala i els elements auxiliars

A continuació es mostrarà el disseny tant de l'ala simple com els elements auxiliars necessaris per al funcionament del sistema d'aerodinàmica activa. Com s'ha explicat anteriorment, finalment s'han seleccionat dos perfils vàlids per al disseny de l'ala. D'aquesta manera s'ha escollit el perfil E423.

Les mesures i les dimensions estaran reglamentades per la normativa que regeix les reformes en els vehicles en el "Manual de Reformas de Vehiculos" [6]. Aquest indica que l'aleró no pot tenir arestes ni sobresortir de les mesures del vehicle. Per altra banda no s'haurà d'aplicar cap normativa de competició ja que no estarà destinat per ser aplicat en cap categoria automobilística de competició.

Per al disseny dels components s'ha utilitzat el software CATIA v5.

El primer pas és poder traspasar les dades de posició de perfils de manera senzilla precisa i rapida. Per realitzar aquesta tasca s'utilitzarà una macro Excel que CATIA porta implementada en els seus arxius.

S'obtindran els punts per al perfil E423 per a $5,25^\circ$ i per a 55° .

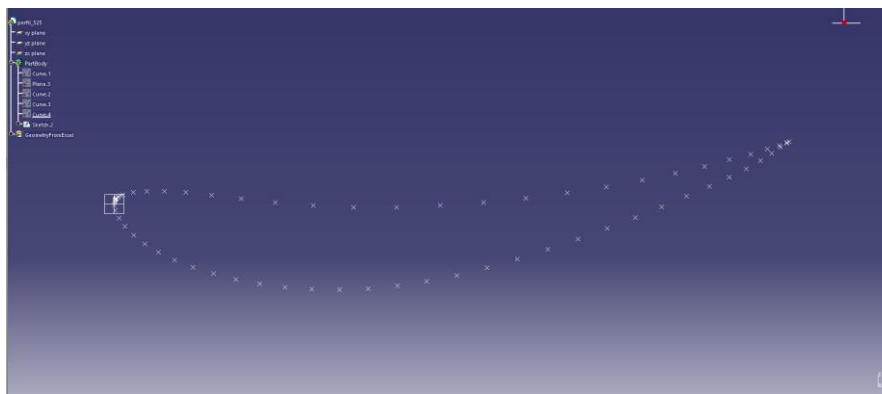


Figura 51. Coordenades del perfil amb un angle de $5,25^\circ$.



Figura 52. Coordenades del perfil amb un angle de 55° .



A partir dels perfils es podrà obtenir l'aleró.

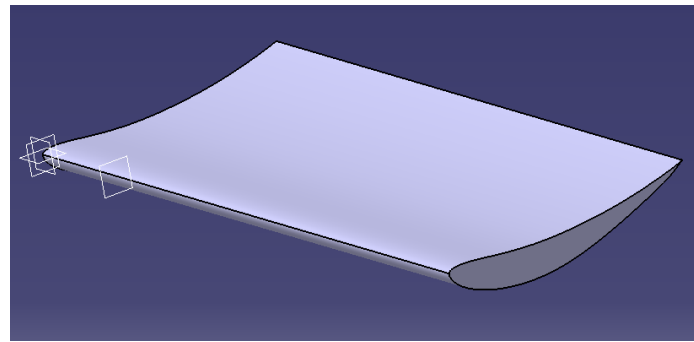


Figura 53. Extrusió del perfil amb l'eina Pad.

Un cop obtingut l'aleró es procedeix a dissenyar tots els sistemes auxiliars per a que aquest sigui mòbil.

Aquest sistema es dissenyarà per a que sigui viable y realista, però no s'estudiarà la seva implementació en el vehicle ja que no és l'objectiu d'aquest projecte.

Per al disseny del sistema s'ha pensat en un actuator hidràulic per la seva velocitat de reacció i la seva força. Com es pot observar en les figures 54 i 55, el sistema treballaria sense problemes en les dues condicions plantejades.

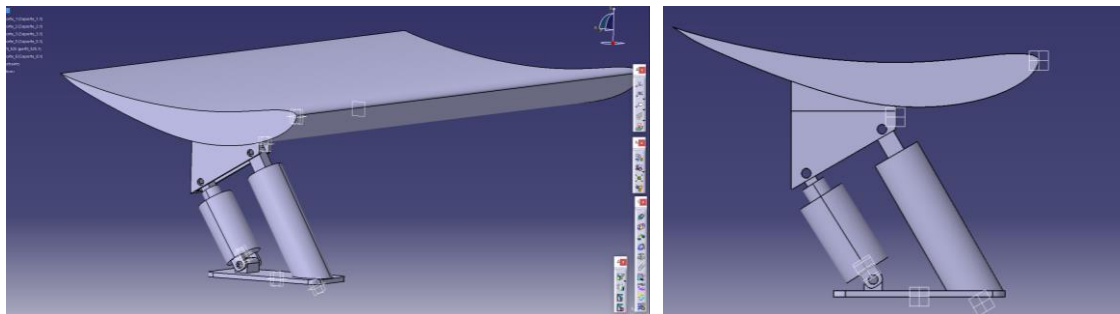


Figura 54. Sistemes aleró en una posició de 5,25°.

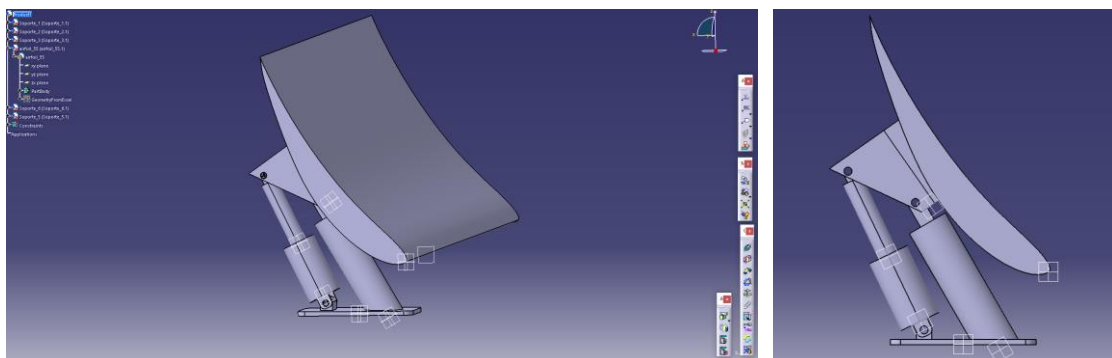


Figura 55. Sistemes aleró en una posició de 55°.



Un cop dissenyat el sistema, s'incorporarà el conjunt al vehicle. El sistema es col·locarà en la part posterior del vehicle, on la superfície d'aquest és completament plana. Aquesta superfície plana ha sigut dissenyada d'aquesta forma prèviament en el disseny del vehicle. Així doncs, la implementació de l'aleró serà més fàcil. A l'hora d'implementar el sistema, s'ha tingut en compte que l'aleró no excedeixi la projecció en planta del vehicle.

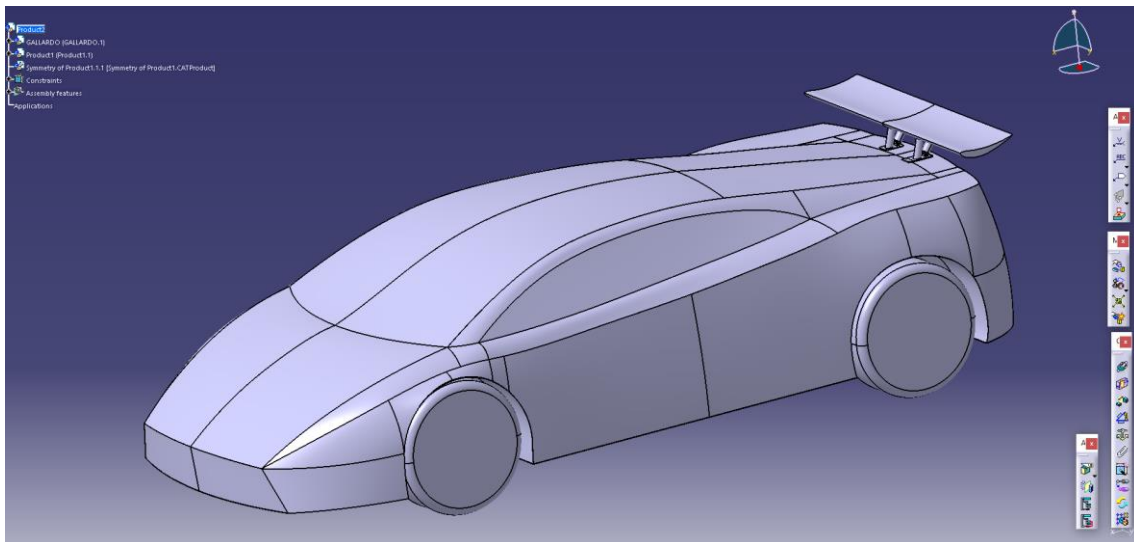


Figura 56. Vista del conjunt del vehicle amb l'aleró a 5,25°.

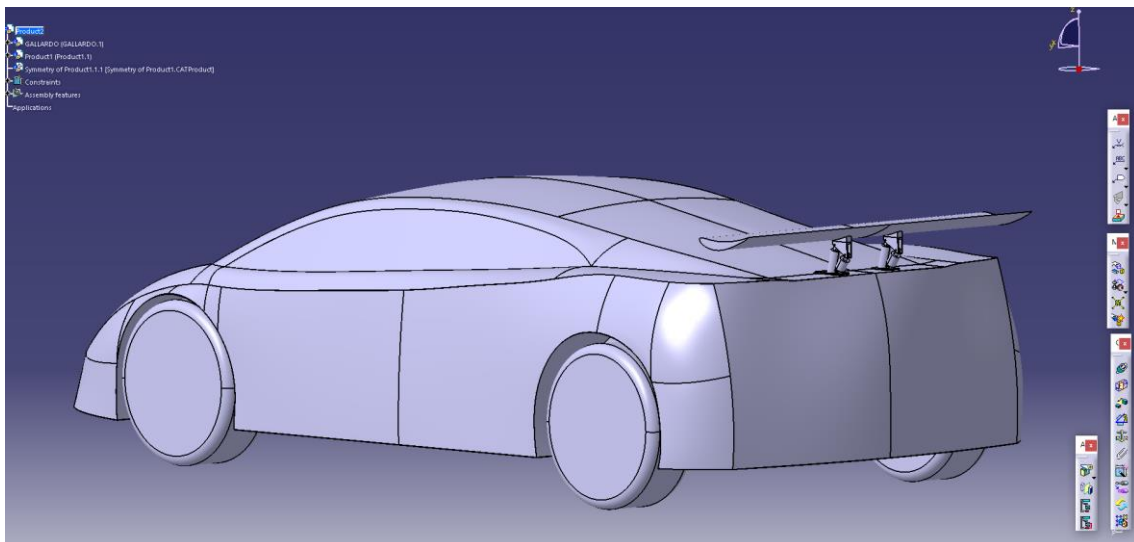


Figura 57. Vista posterior del conjunt del vehicle amb l'aleró a 5,25°.

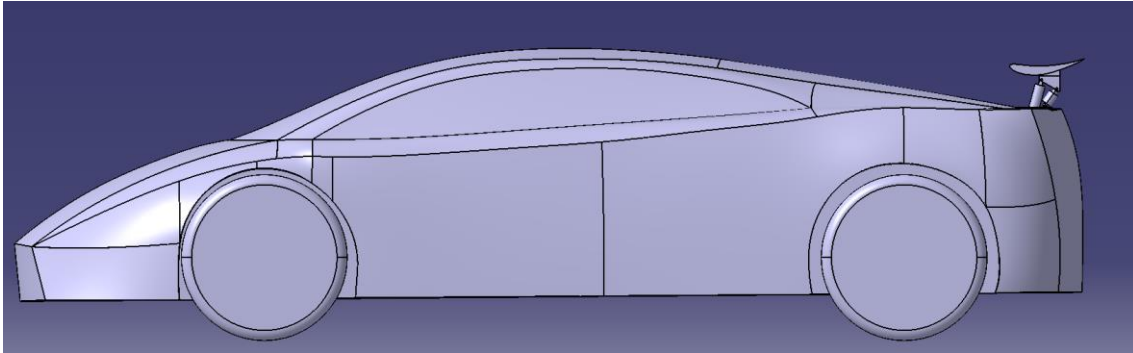


Figura 58. Vista lateral del conjunt del vehicle amb l'aleró a 5,25°.

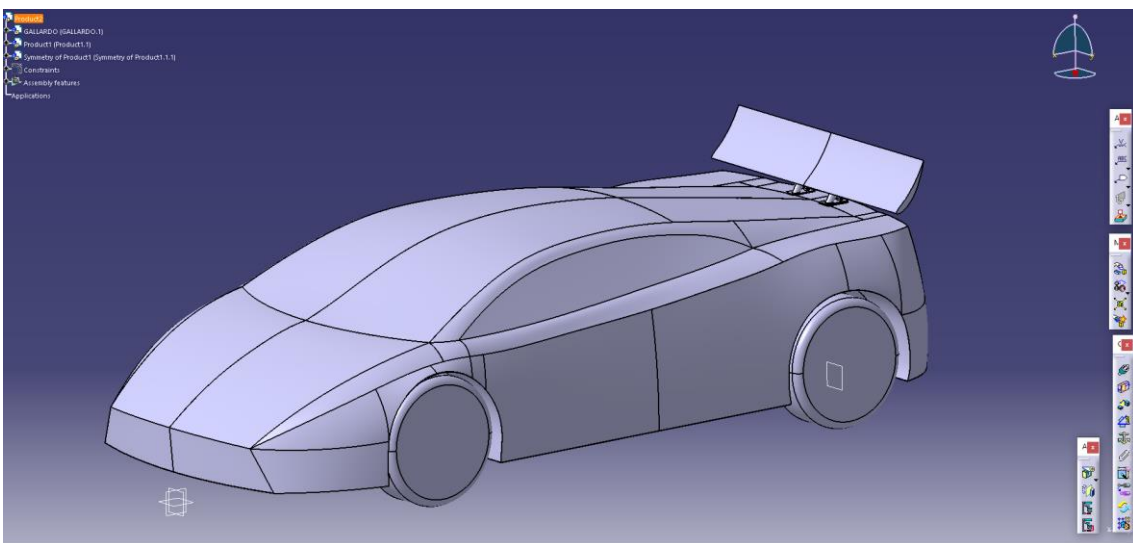


Figura 59. Vista del conjunt del vehicle amb l'aleró a 55°.

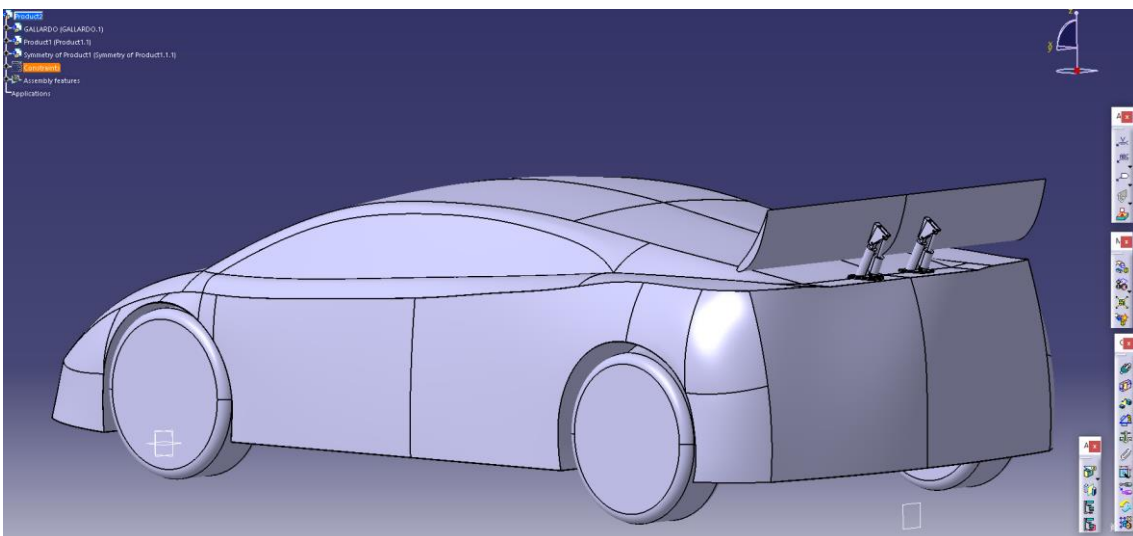


Figura 60. Vista posterior del conjunt del vehicle amb l'aleró a 55°.

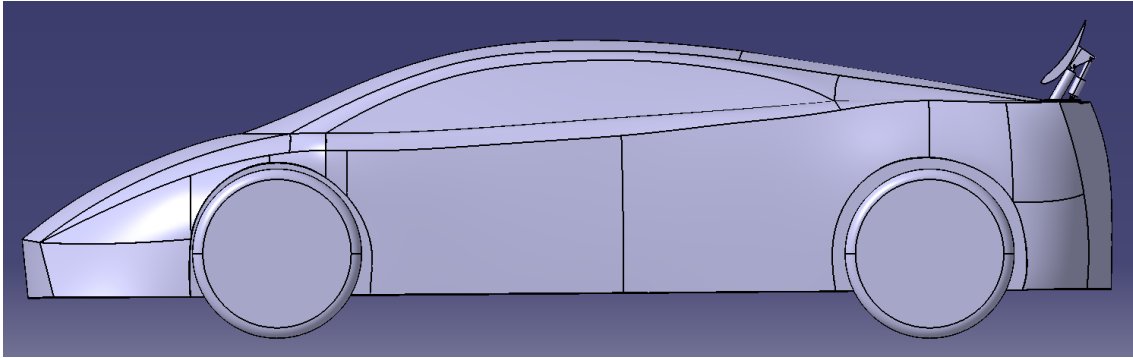


Figura 61. Vista lateral del conjunt del vehicle amb l'aleró a 55°.

6. ESTUDI AERODINÀMIC MITJANÇANT CFD

6.1. Procediment

En aquest apartat s'explicarà tot el procediment que s'ha realitzat per obtenir els resultats. S'explicaran els diferents passos com l'optimització de la geometria per a que pugui ser mallada, s'explicarà el set up fet per a les condicions de contorn, les condicions del mallat i les condicions per a la simulació. Per fer aquesta explicació s'ha escollit el model amb aleró a 5,25°.

6.1.1. Geometria

Primer de tot s'importarà la geometria amb l'eina Import "Geometry model"

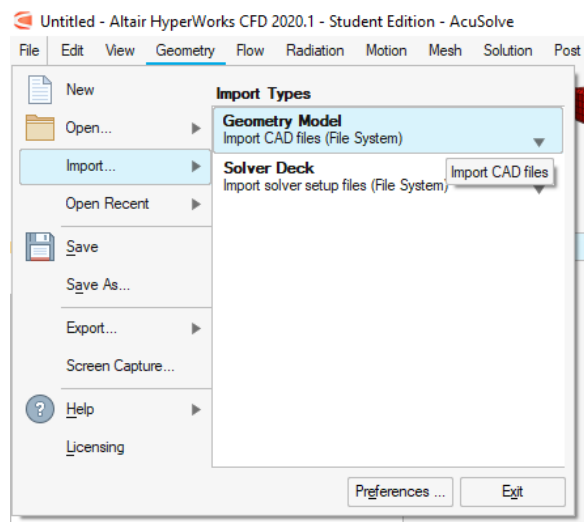


Figura 62. Importació de geometria.[25]

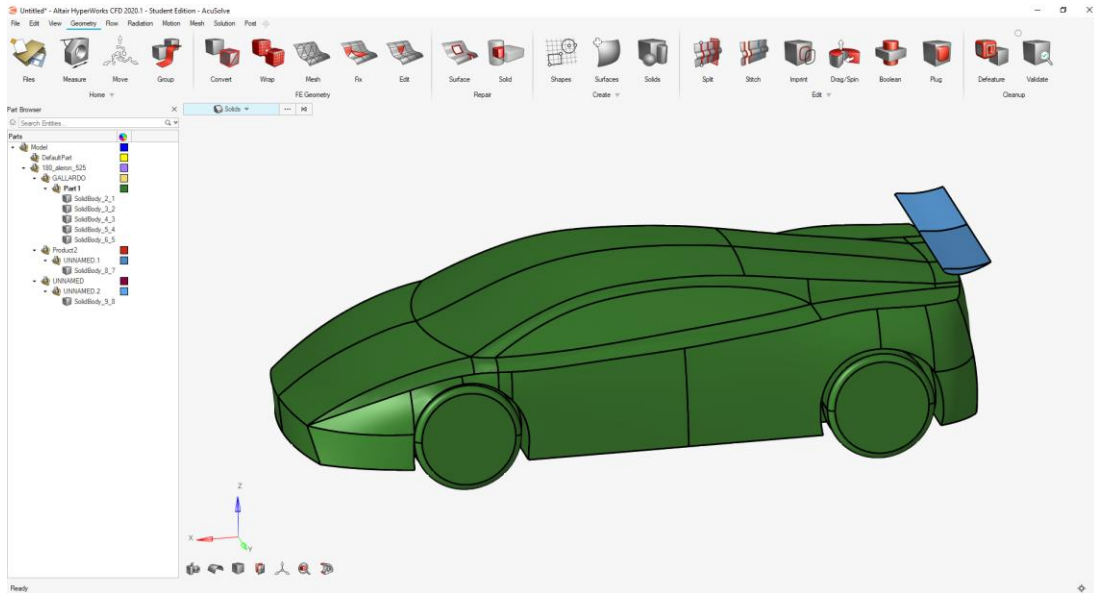


Figura 63. Geometria importada. [25]

Un cop tenim la geometria s'ha de comprovar en quines unitats estem treballant. Es per això que mesurarem el model amb l'eina "Measure".

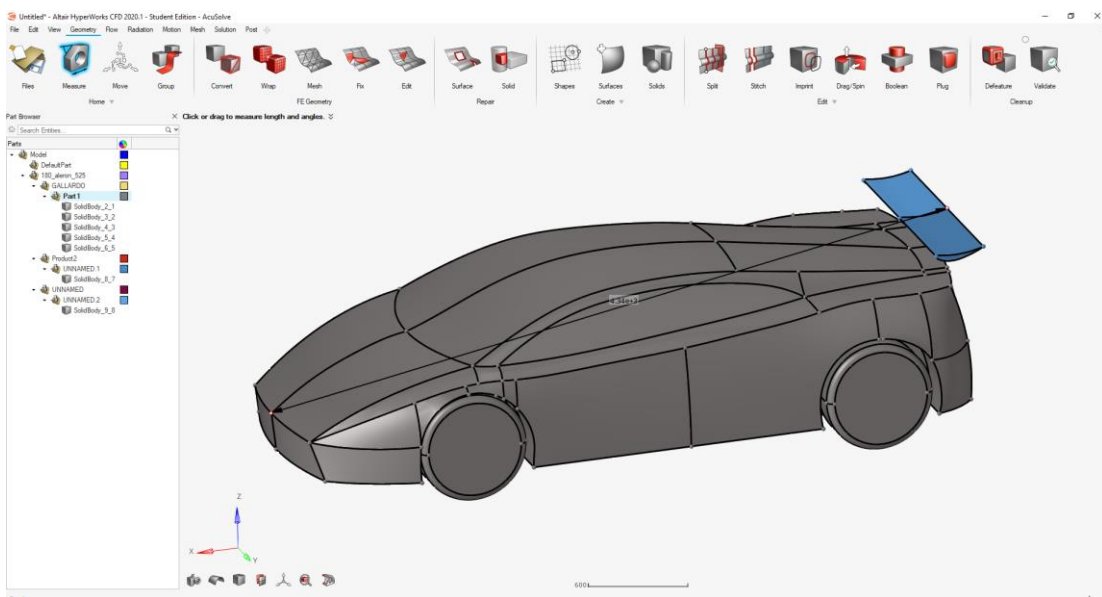


Figura 64. Mesurament del sòlid. [25]

Es pot observar con el model fa 4340. D'aquesta manera es determina que el model esta en mil·límetres. Es per això que es necessita escalar el model.

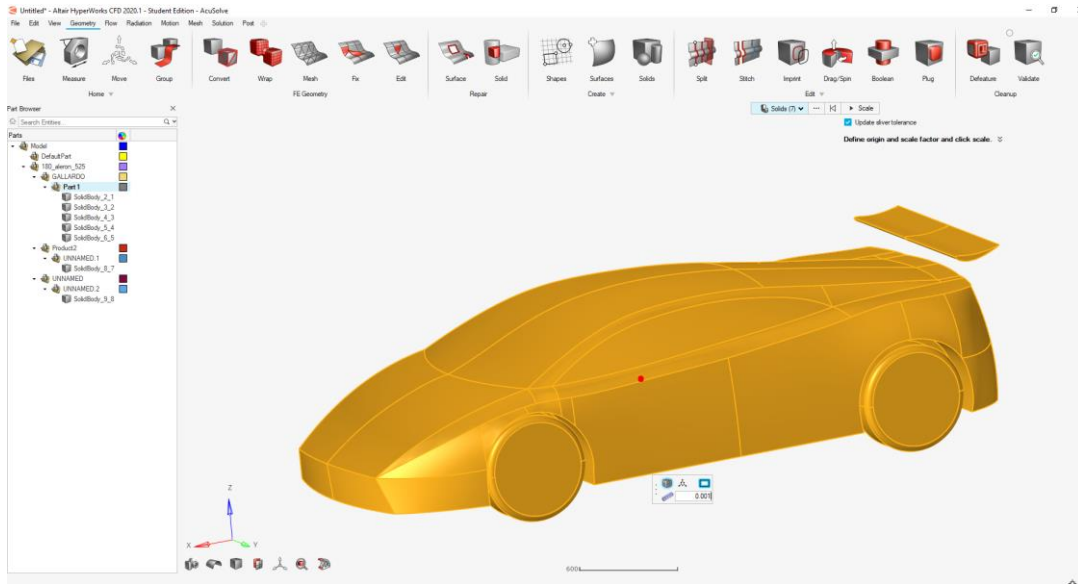


Figura 65. Escalat del sòlid. [25]

A través de l'eina "Scale", es seleccionen tots els sòlids del model aplicant una reducció d'escala en 0.001. D'aquesta manera s'aconsegueix la mesura necessària del model.

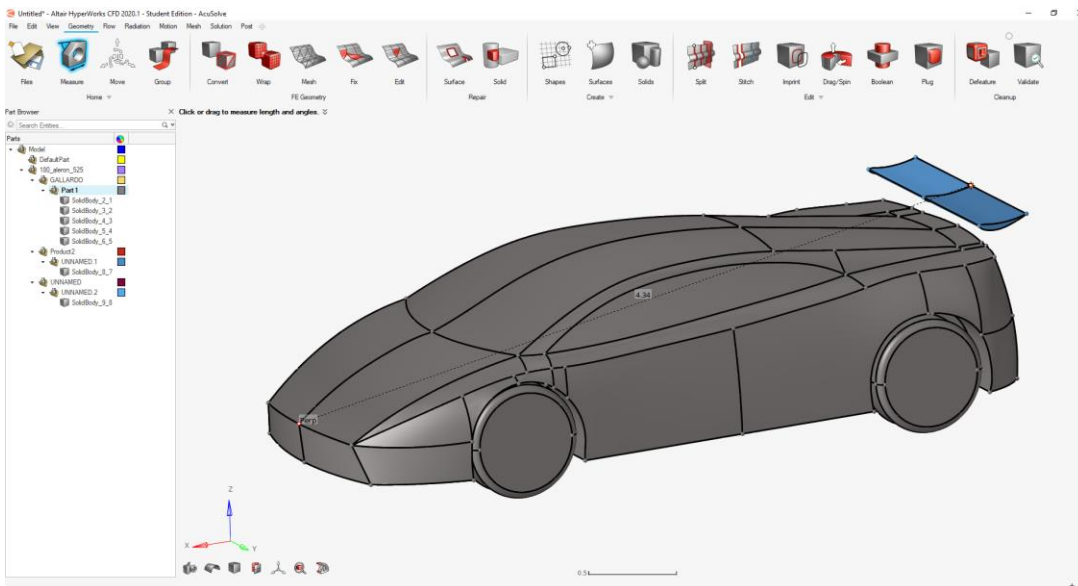


Figura 66. Mesurament del sòlid després del escalat. [25]

En la figura 66 observar com la distància és de 4.34m i per tant ja s'està treballant amb les unitats correctes.

A continuació s'ajustarà la tolerància. El valor que estigui per sota d'aquesta tolerància no serà necessari mallar-lo.

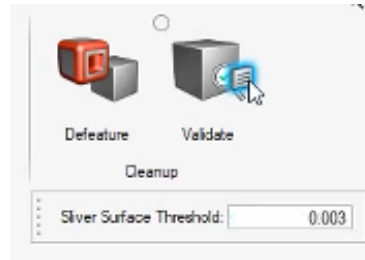


Figura 67. Tolerància de la geometria per ser validada. [25]

Aquest valor serà de 0.003 ja que no es vol mirar a cap tipus de superfície que sigui menor a aquest número.

Seguidament es validarà el sòlid amb l'eina "Validate". Aquesta eina serveix per comprovar que la geometria no te cap error.

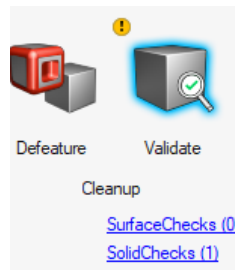


Figura 68. Validació de la geometria. [25]

Es pot veure com hi ha un error en el sòlid. Amb l'eina "SolidChecks" es podrà solucionar.

En aquest cas no s'ha obtingut gairebé cap error ja que la geometria ha sigut dissenyada amb molta cura per a que un cop introduïda en el programa no s'obtinguin errors.

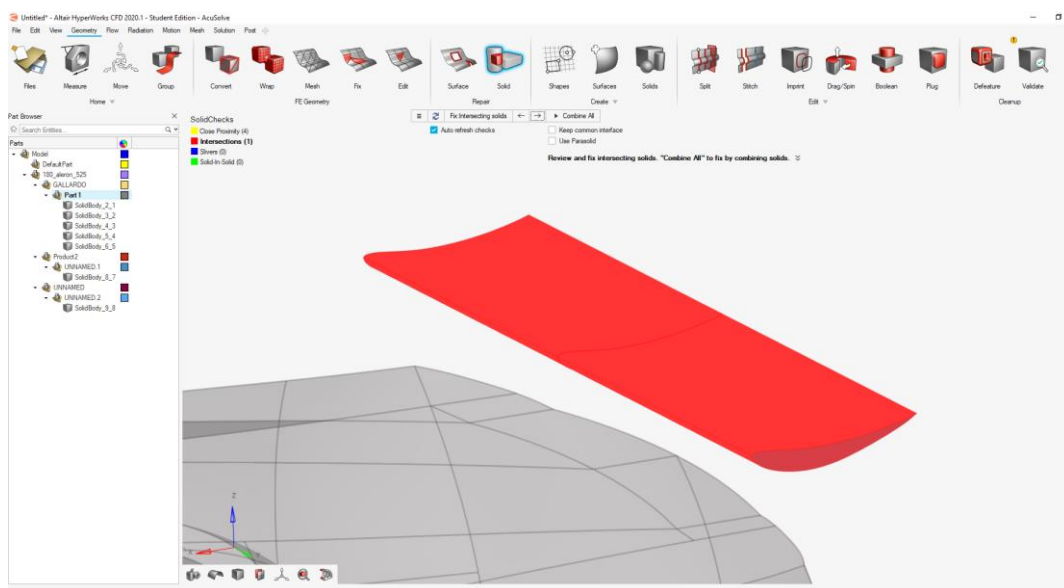


Figura 69. Error en la geometria que ha de resolt. [25]



Es pot observar que és un error de intersecció que amb l'eina "Combine All" es soluciona. Un cop solucionat l'error es torna a validar el model i ja no se'n obté cap, obtenint un tic blau.

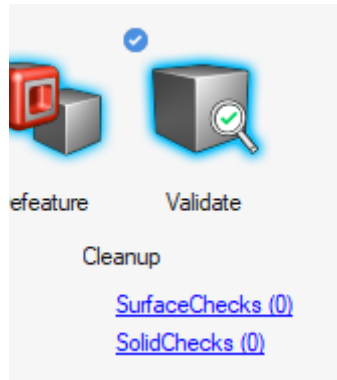


Figura 70. Validació del model. [25]

Ara ja es pot procedir a crear el recinte. El primer que es farà es dividir el model en dos per posteriorment eliminar una meitat i disminuir el temps de processament de la simulació.

D'aquesta manera s'aplicarà una condició de simetria. Per fer això, dins de l'eina Split s'utilitzarà l'opció de Plane. "Split > Plane"

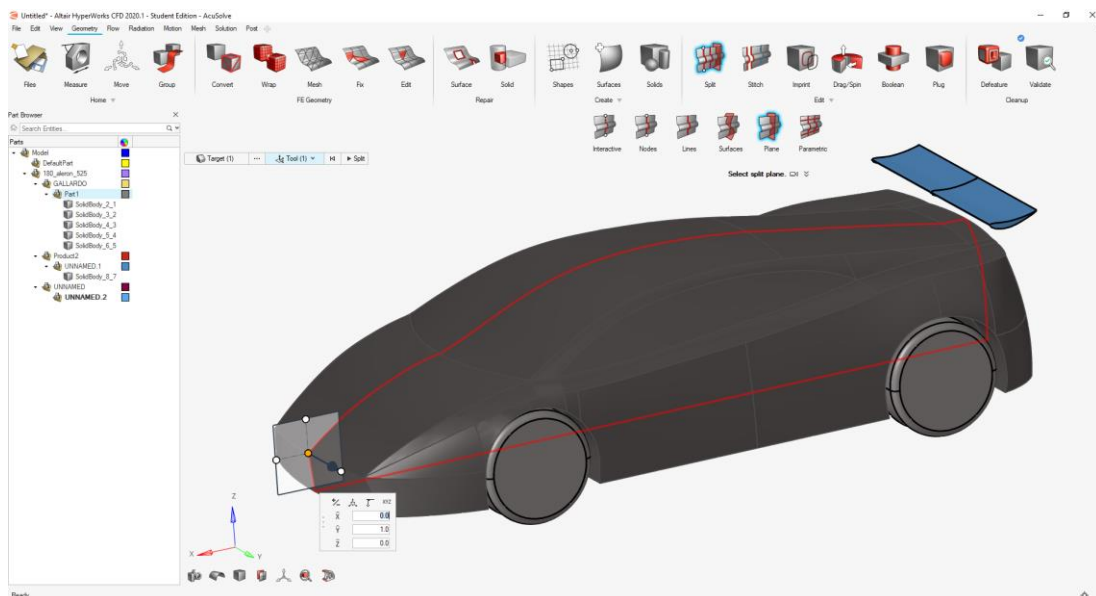


Figura 71. Separació del model en dos meitats. [25]

Un cop es té el model dividit en dos meitats, s'elimina una. Obtenint el següent resultat.

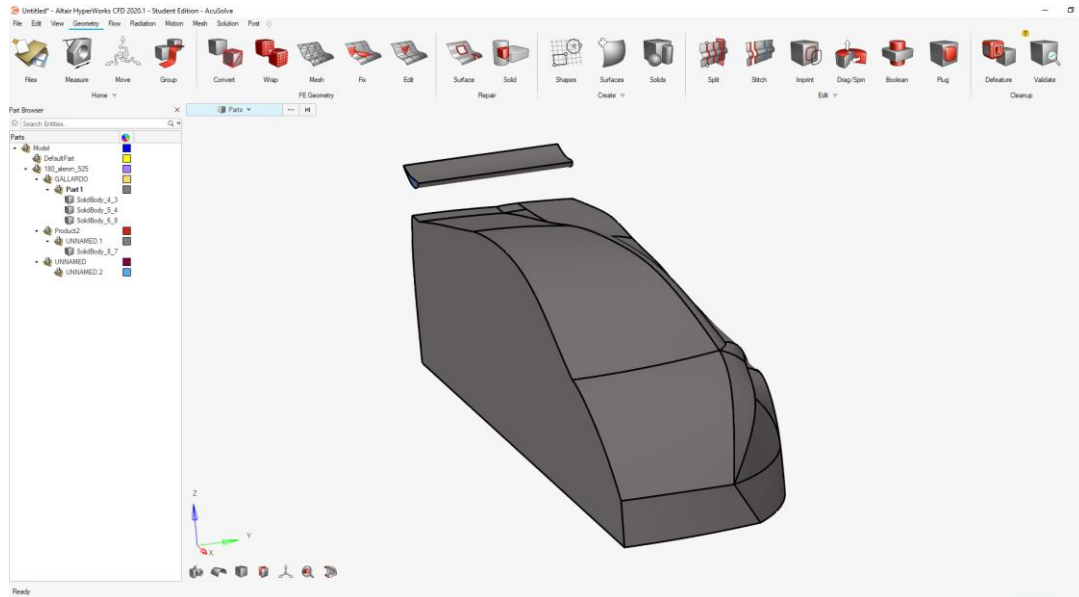


Figura 72. Eliminació d'una meitat. [25]

Sempre que es faci una modificació, s'ha de validar el model per verificar que no surtin errors.

A continuació ja es pot crear el recinte. Es crearà una caixa on es posarà el model a dins amb l'eina Solids i l'opció Box. "Solids > Box"

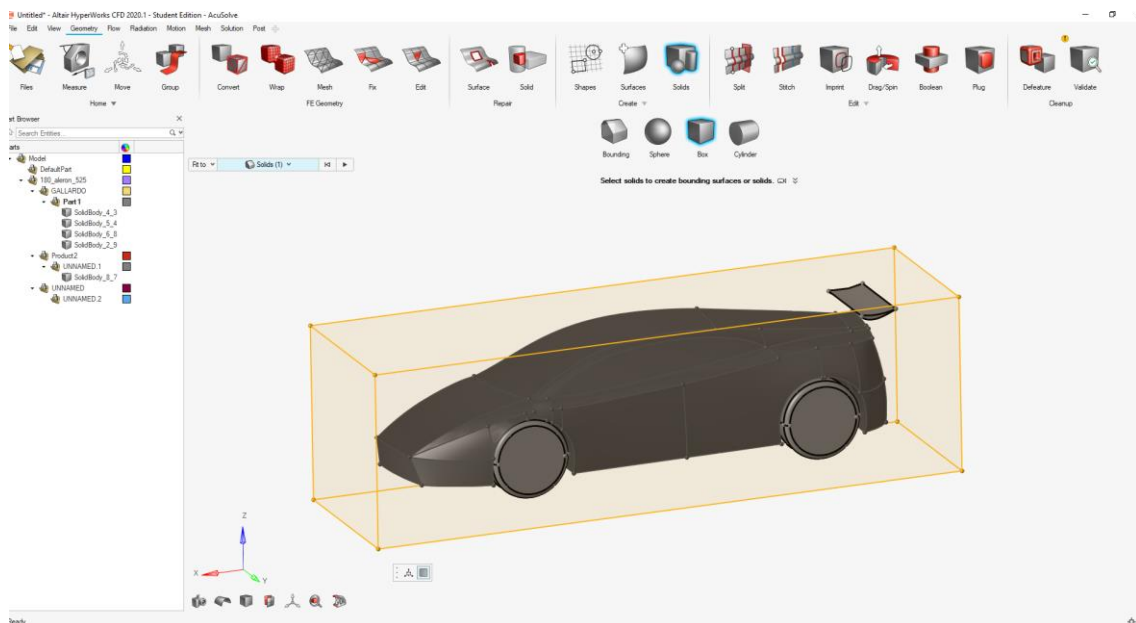


Figura 73. Creació del recinte. [25]

Un cop s'ha general la caixa, es modificaran les dimensions per obtenir la zona d'estudi desitjada. Per fer això s'utilitzarà l'eina "Drag/Spin".

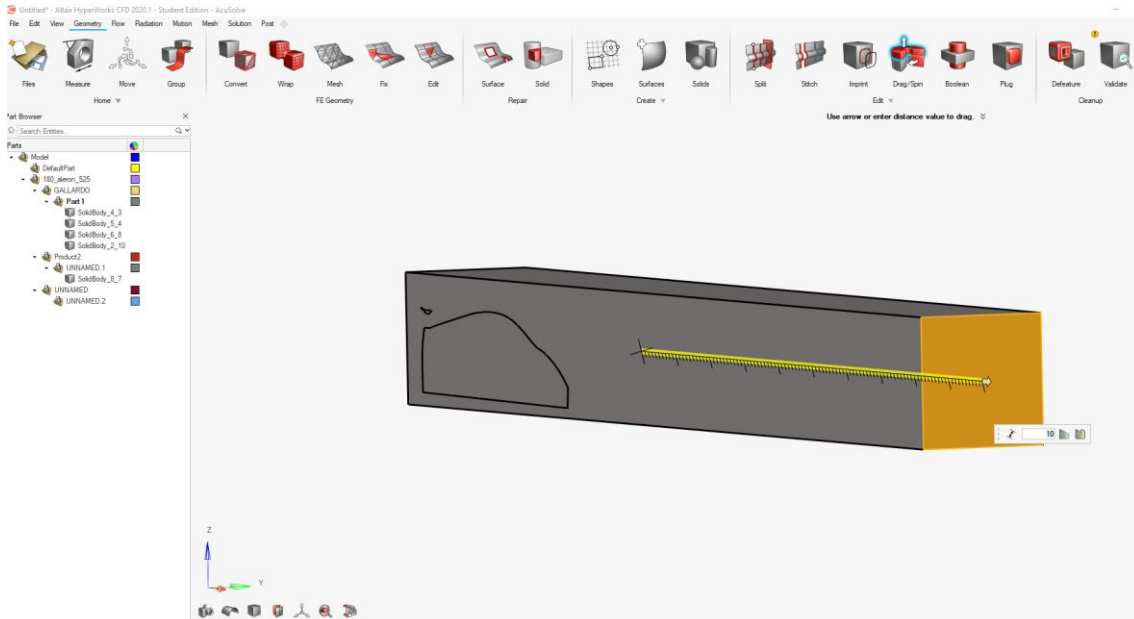


Figura 74. Engrandiment del recinte. [25]

S'allargarà 10 metres per davant, pel costat i per a dalt del prisma. Per la part de darrere s'allargarà 30 metres ja que es necessitarà una gran distància per poder analitzar bé els resultats. Les mesures han de ser grans per acollir tot tipus de variacions i pertorbacions que pateixi el fluid al seu pas, però tampoc ens podem excedir ja que s'allargaria molt el temps de processament.

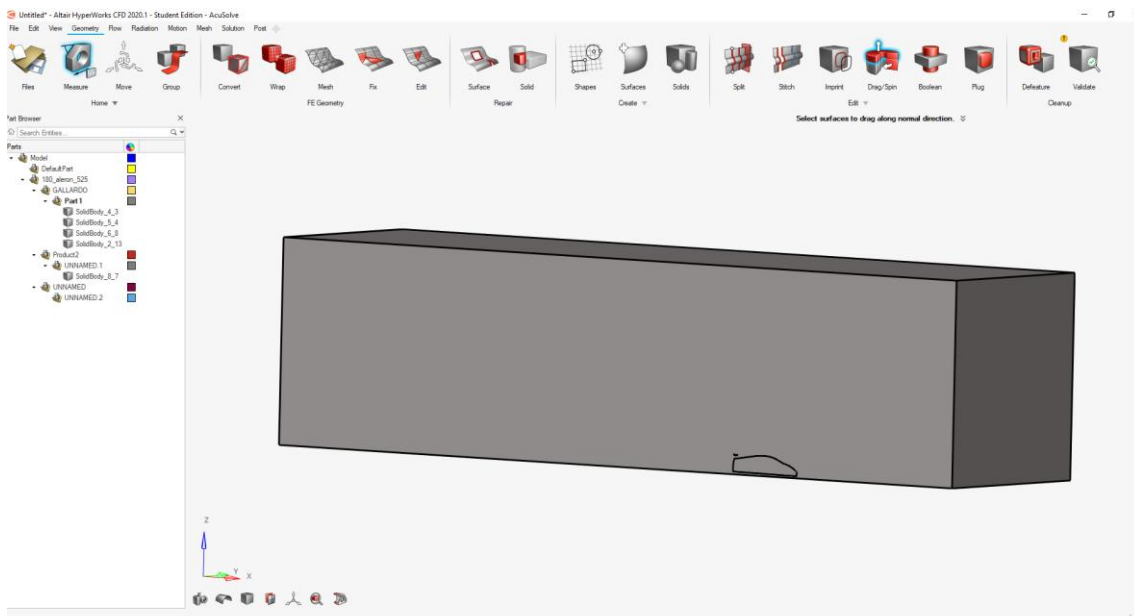


Figura 75. Resultat del recinte. [25]

Un cop es té el sòlid que permetrà veure com es comporta el fluid, el següent pas és extreure el sòlid del vehicle. S'utilitzarà l'eina "Boolean > Subtract"

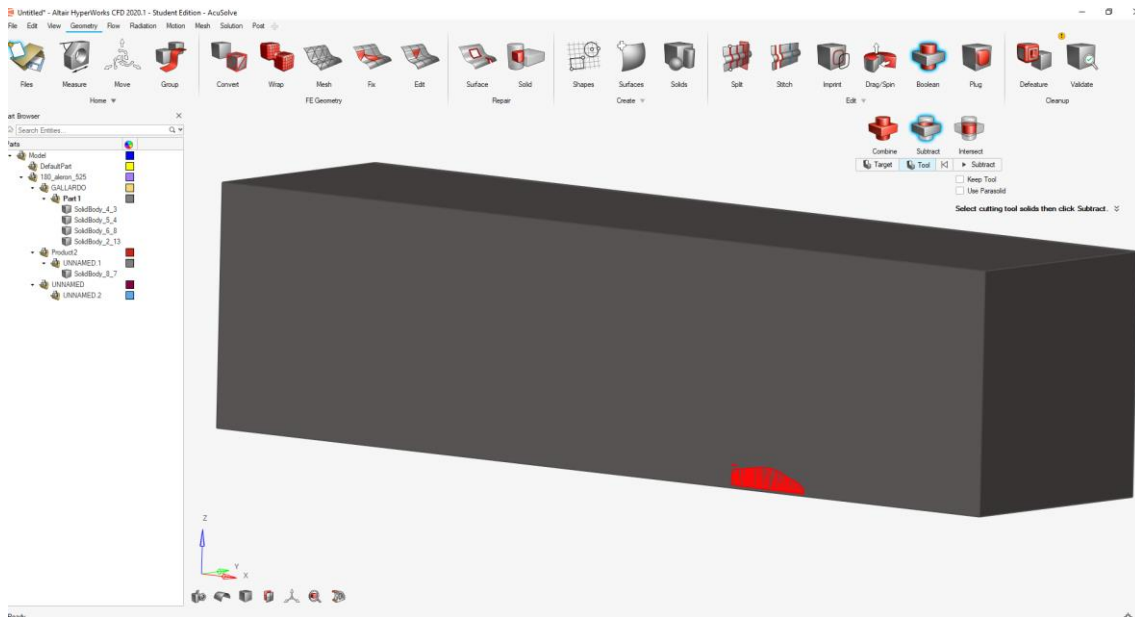


Figura 76. Extracció del sòlid del vehicle. [25]

6.1.2. Configuració del fluid

Un cop es té la geometria completada, es passarà al Flow Set Up. Per facilitar la feina durant els passos següents, es importarà crear grups de superfícies.

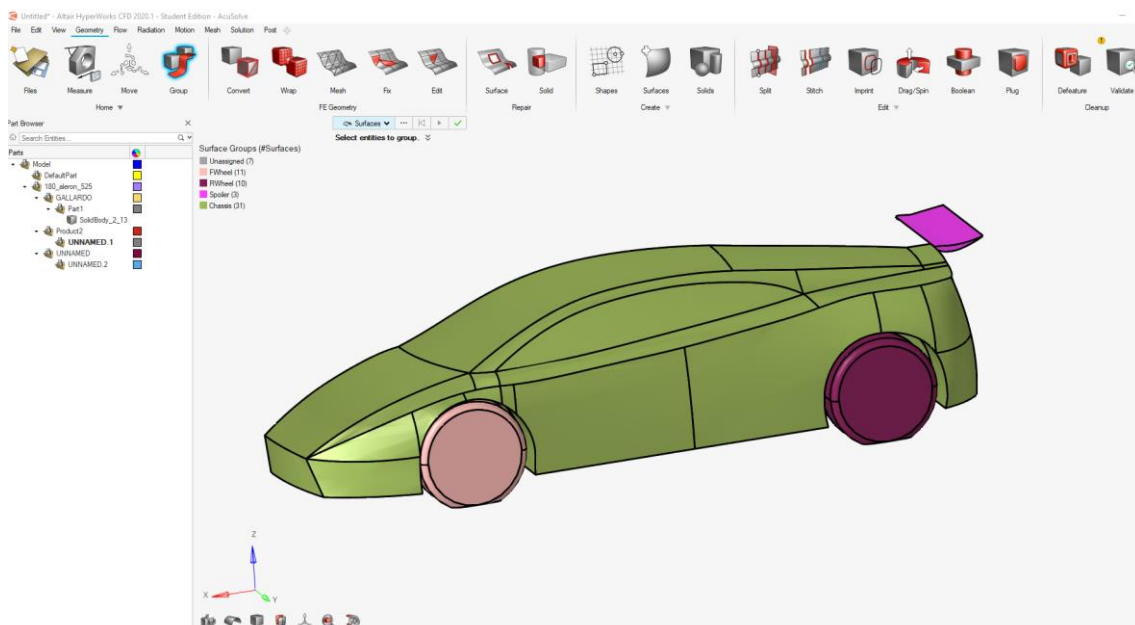


Figura 77. Agrupació de superfícies en grups. [25]

D'aquesta manera es seleccionen les superfícies agrupant-les per classificar-les en diferents parts del vehicle.



Seguidament es definiran les físiques

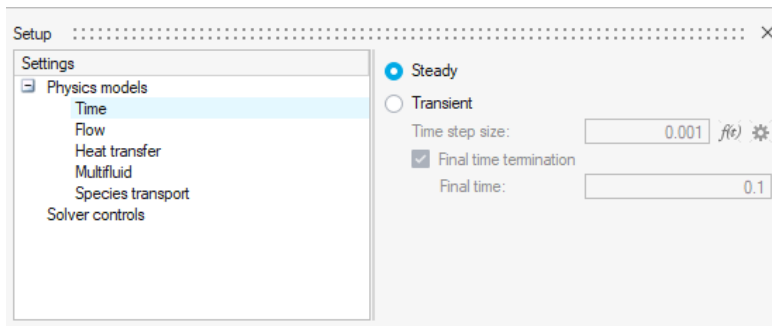


Figura 78. Configuració de les físiques. [25]

La primera decisió serà escollir entre Steady i Transient. S'escollirà la primera opció. Això és degut a que la simulació transitòria calcula els valors instantanis de cada temps i per cada quantitat. És per això que la simulació transitòria encara que poden ser resultats més complets, té requisits molt més elevats en comparació amb l'estat estacionari i fa que augmenti molt el temps de la CPU i el emmagatzematge en disc.

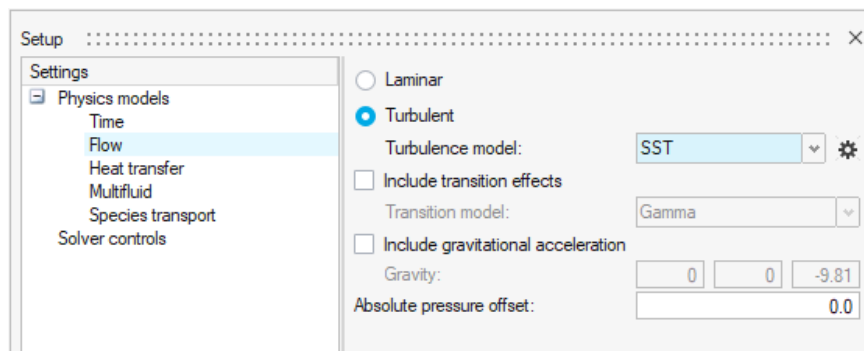


Figura 79. Elecció del model de turbulència. [25]

La següent elecció serà quin model de fluid turbulent escollir. S'escollirà el model SST (Shear Stress transport). Aquest model és un dels més adequats per a simulacions d'aerodinàmica externa. El model SST s'implementa a la majoria de l'aeronàutica. [6]

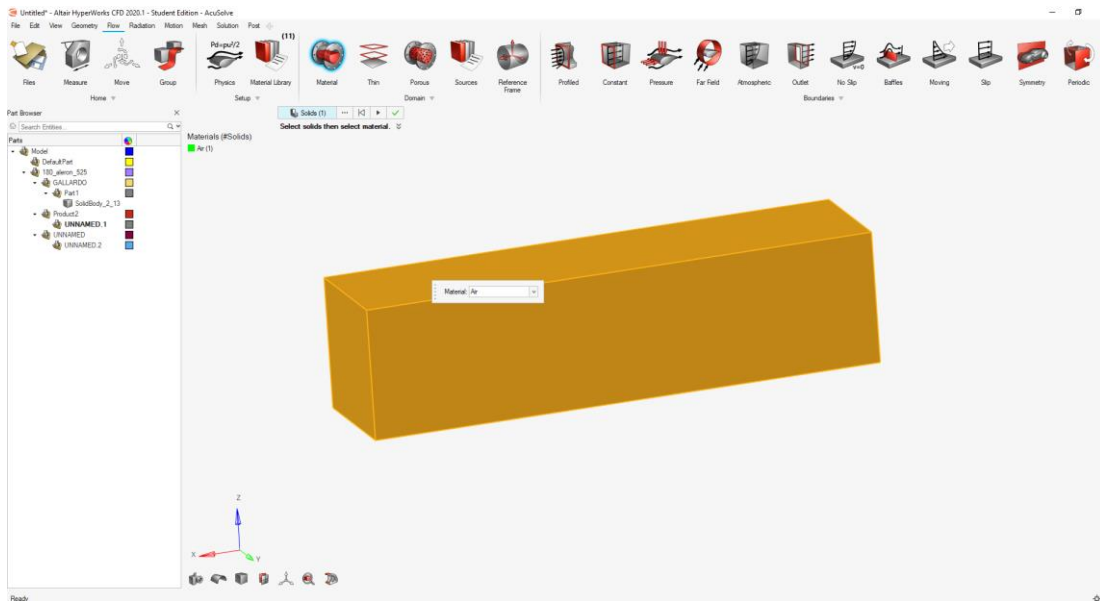


Figura 80. Assignació del material del recinte. [25]

Seguidament s'escollirà el material del sòlid a través de l'eina "Material", el qual serà aire. A continuació crearem un paràmetre per a la condició d'entrada. El paràmetre es crearà a partir de l'opció "Setup>Parameter".

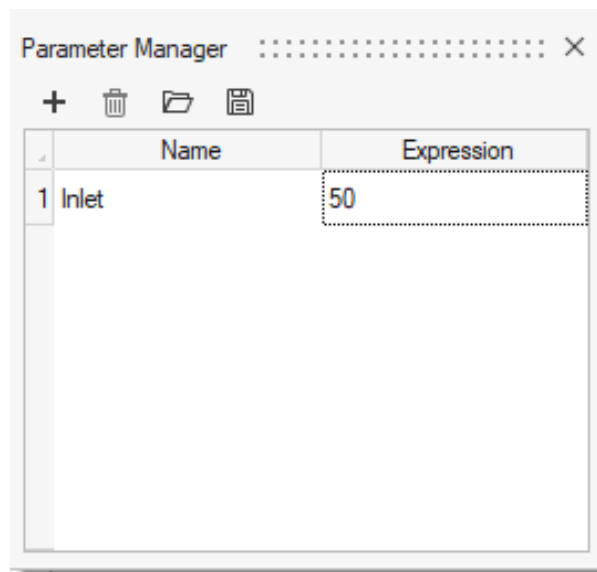


Figura 81. Creació del paràmetre de velocitat d'entrada. [25]

En aquest paràmetre introduïrem la velocitat d'entrada. Aquesta serà de 50m/s, el que equival a 180 km/h.

Ara s'ha d'assignar un Reference Frame.



En alguns casos el mètode més senzill de modelar les rodes seria assignar moviment a una paret amb velocitat tangencial a la superfície de la roda, però en aquest cas s'aplicarà un Reference Frame per lo qual tots el nodes al voltant de la roda seran resolts al voltat d'aquest Reference Frame.

Per fer això, primer s'ha d'assignar un punt en el centre de la roda. "Geometry > Create > Create point". Un cop el punt assignat s'utilitza l'eina "Reference Frame > Advance selection > By group > FWheel"

Com que prèviament s'havien agrupat les superfícies per grups, ara serà molt més fàcil seleccionar totes les superfícies que formen part de la roda.

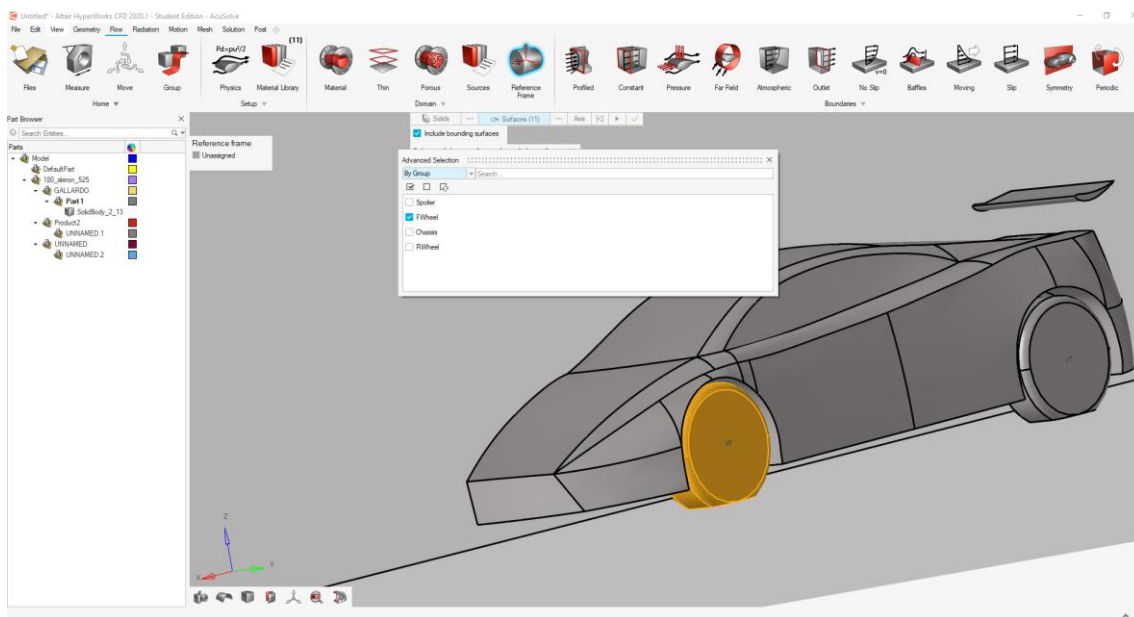


Figura 82. Assignació d'un Reference Frame. [25]

A partir del punt dibuixat es determina l'eix de rotació, la direcció de la rotació i a quina velocitat en rad/s. Per tant, per determinar aquesta velocitat, abans s'haurà calcular.

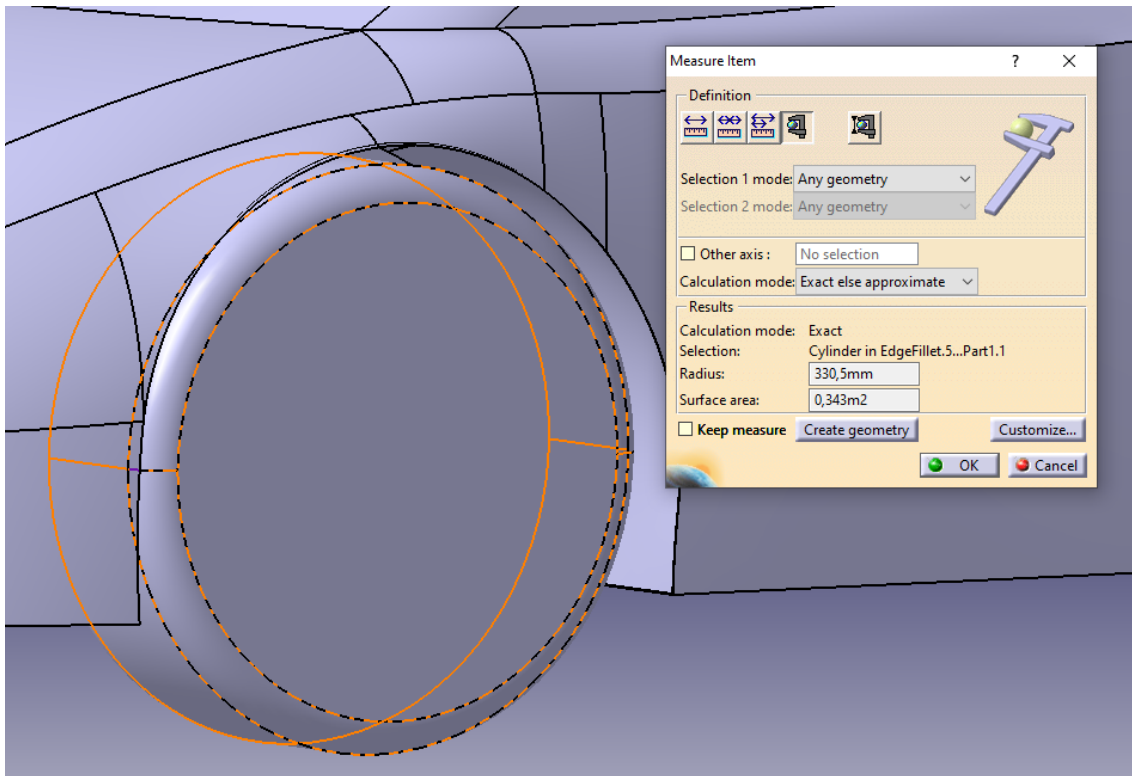


Figura 83. Mesurament del radi de la roda.

Primer es farà una conversió entre km/h i revolucions per minut saben que el radi de la roda es de 330,5mm mostra la figura 77

La velocitat angular de la roda (en rpm) es pot convertir en $m \cdot s^{-1}$ gràcies a la següent fórmula:

$$v_{(m.s^{-1})} = r \times W_{(rad.s^{-1})} = r \times \frac{2\pi}{60} N_{(rpm)}$$

Es fa fàcil convertir aquesta velocitat lineal expressada en $m \cdot s^{-1}$ a $km.h^{-1}$ gràcies a la següent fórmula:

$$v_{(km.h^{-1})} = \frac{3600}{1000} v_{(m.s^{-1})} = 3.6 \times v_{(m.s^{-1})}$$

En combinar les dues equacions anteriors, podem deduir la relació entre revolució per minut (rpm) i kilòmetres per hora (km/h):

$$v_{(km.h^{-1})} = \frac{3600}{1000} \times r \times \frac{2\pi}{60} N_{(rpm)} = \frac{3}{25} \cdot \pi \cdot r \cdot N_{(rpm)}$$



Finalment obtindríem la següent expressió

$$N_{(rpm)} = \frac{25}{3 * \pi * r} * v_{\left(\frac{km}{h}\right)}$$

v: és la velocitat lineal expressada en quilòmetres per hora (km/h)

N: és la velocitat angular expressada en revolució per minut (rpm)

r: és el radi expressat en metres (m)

$$N_{(rpm)} = \frac{25}{3 * \pi * 0,3305} * 180 = 1444,674219 \text{ rpm}$$

Seguidament es convertirà els rpm a rad/s

$$1444,674 \text{ rpm} = \frac{1444,674 \text{ vueltas}}{\text{min}} \times \frac{2\pi \text{ rad}}{1 \text{ vuelta}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} = 151,286 \text{ rad/s}$$

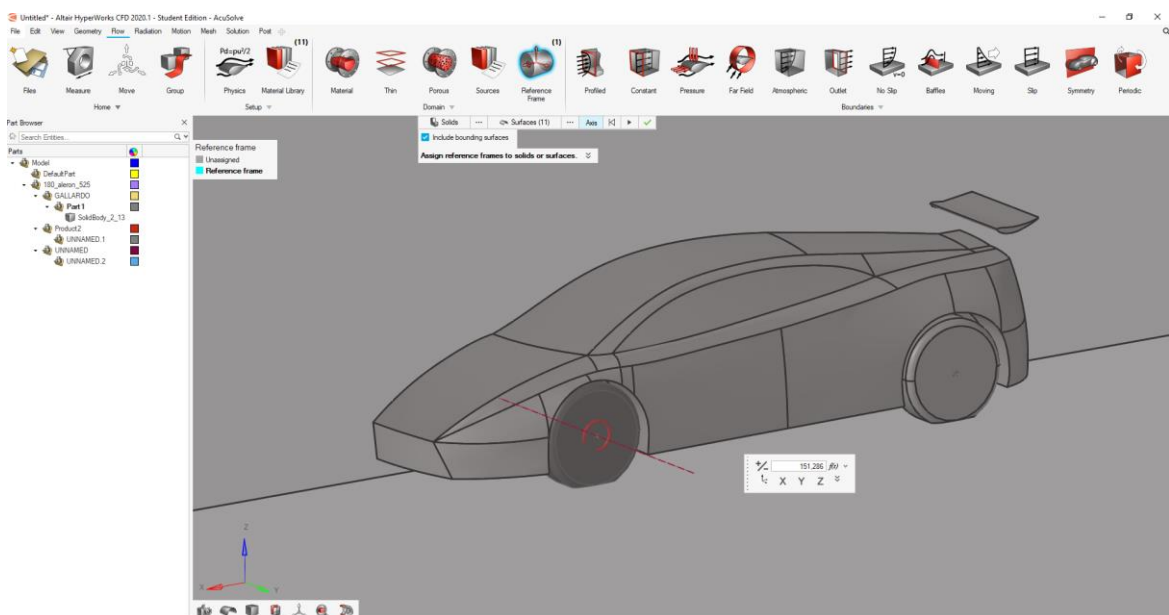


Figura 84. Assignació de la velocitat de la roda. [25]

Es farà el mateix procediment per a la roda de darrere.

Ara es passarà a assignar les Boundary conditions del model. El primer que s'assignarà serà la condició d'entrada amb l'eina "Constant". Sense assignar res ja tenim un default wall function que amb la configuració estandard només correrà com a no slip wall. Per tant, si parlem tècnicament no caldria assignar cap valor, però esta bé assignar certes condicions com l'aleró posterior i no nomes deixant-lo amb els valors predeterminats



perquè d'aquesta forma s'obtidran outputs específics de superfícies. Per tant, si mirem el rendiment del aleró del darrere és molt interessant tenir outputs separats de superfícies. D'aquesta forma es pot extreure els resultats per separats.

“Constant > click dret “ a la superfície que es veu a la imatge.

Anteriorment havíem configurat un paràmetre que indicava la velocitat d'entrada. Ara salpicarà aquest paràmetre a la casella de “Normal velocity”.

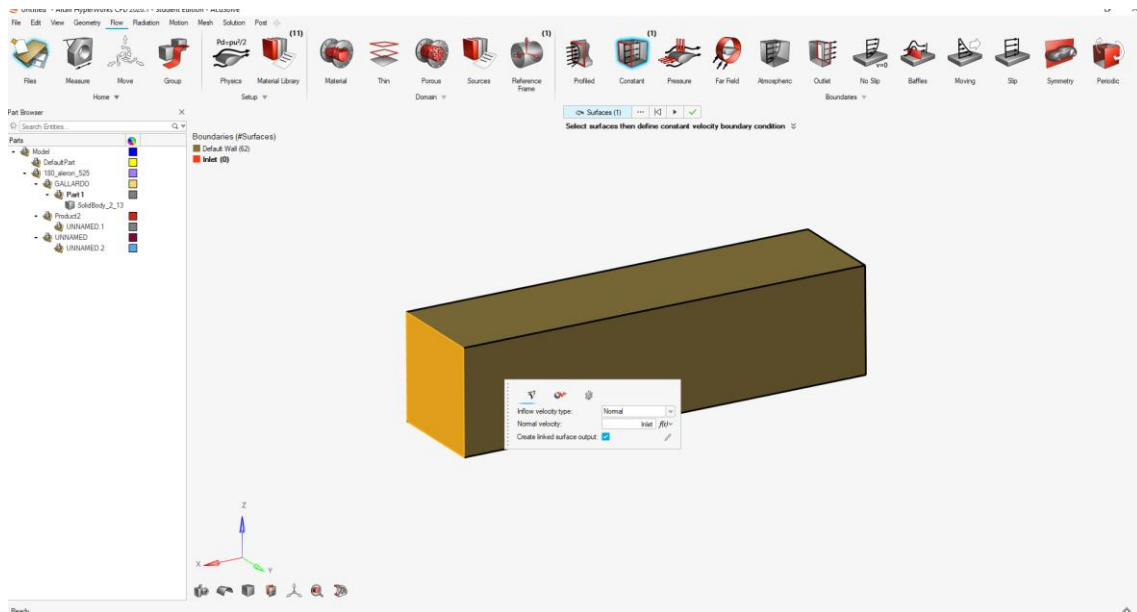


Figura 85. Configuració de les condicions de contorn. Constant. [25]

Aquest paràmetre assignarà la velocitat de 180km/h. D'aquesta manera, si fos necessari canviar la velocitat només caldria canviar el valor del paràmetre i agilitzaria la feina.

A continuació s'aplicarà el Slip condition a la cara de dalt i a la del costat del recinte amb l'eina “Slip > Clic dret”

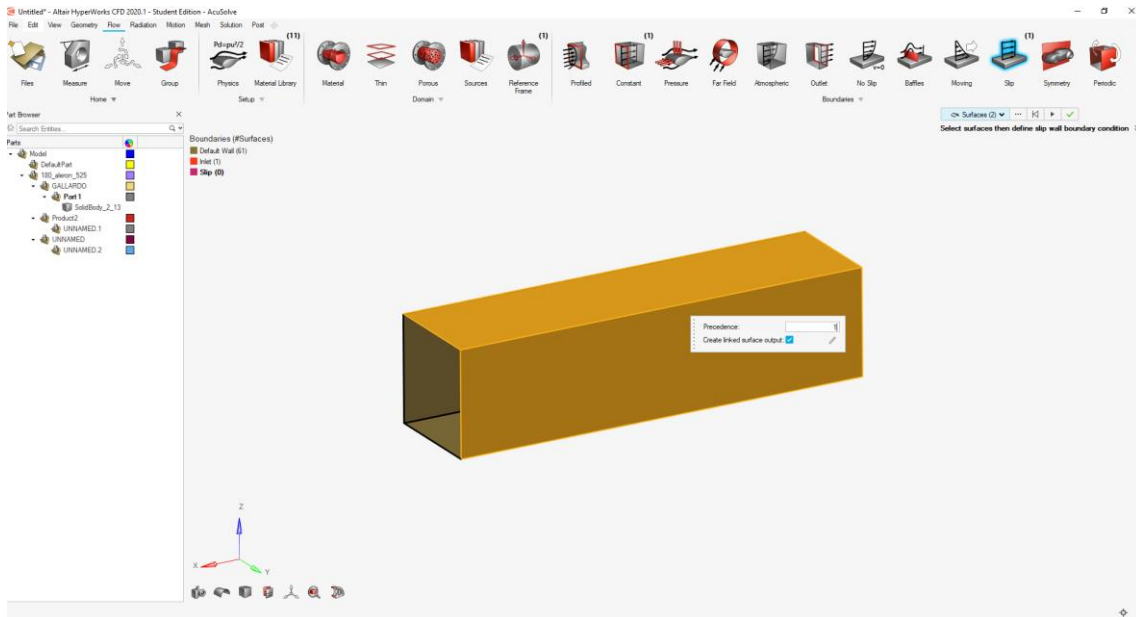


Figura 86. Configuració de les condicions de contorn. Slip. [25]

Seguidament s'assignarà l'Outlet a la cara posterior i es deixarà el Outlet static pressure a 0.

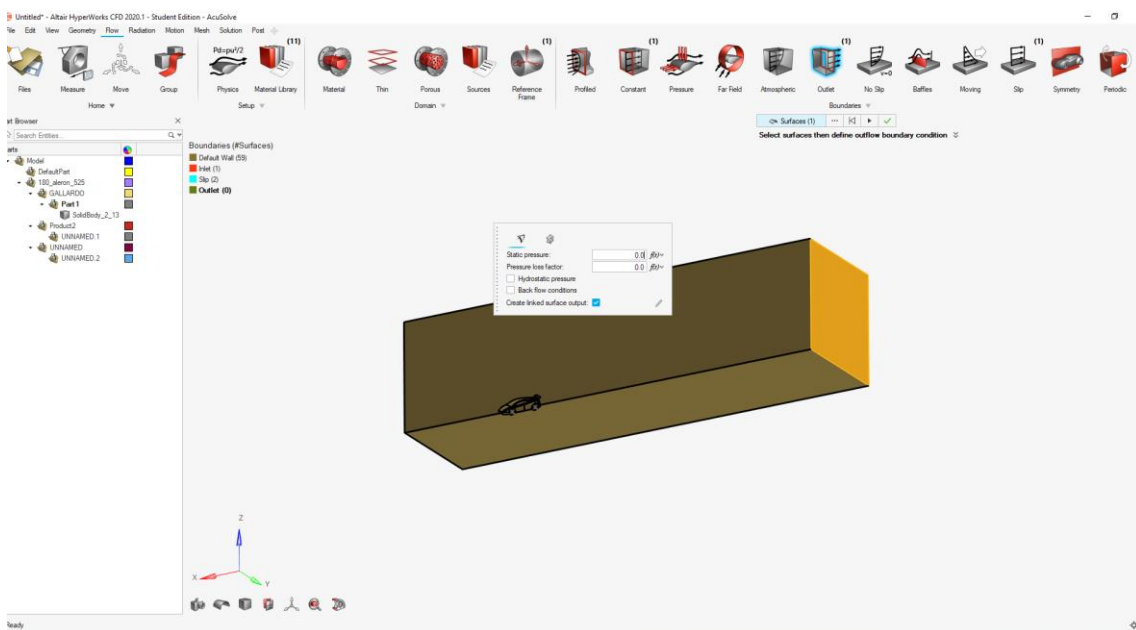


Figura 87. Configuració de les condicions de contorn. Outlet. [25]

S'aplicarà la condició de simetria a la cara seleccionada

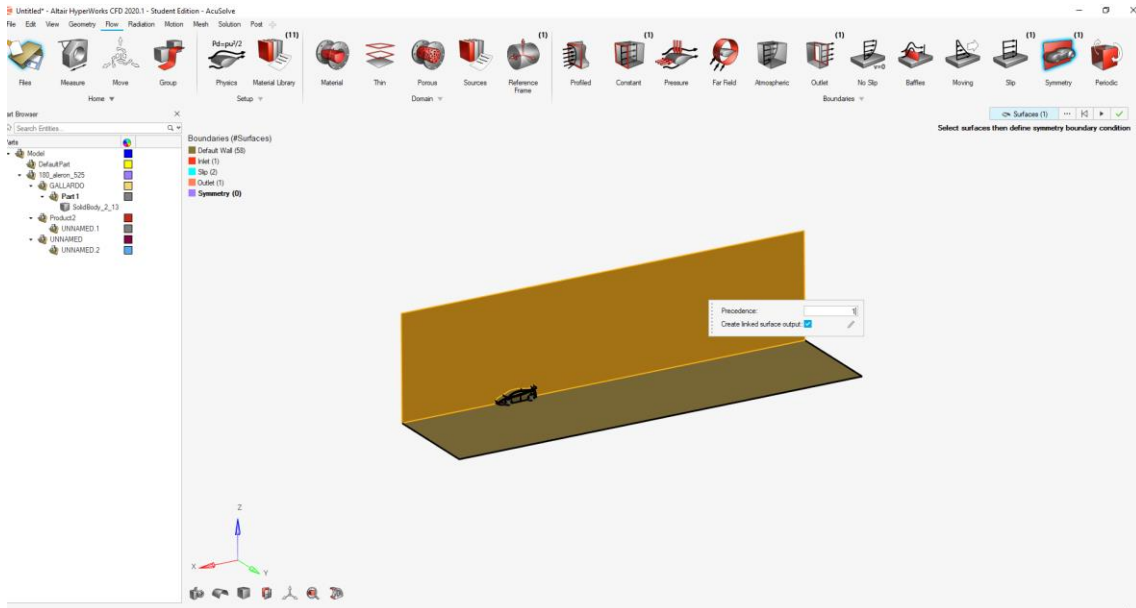


Figura 88. Configuració de les condicions de contorn. Symmetry. [25]

Finalment s'assignarà el terra. Aquest serà una paret amb moviment amb una velocitat de 50 m/s. D'aquesta manera s'escollirà la velocitat de tipus cartesià i introduint el valor de la velocitat en l'eix de les X.

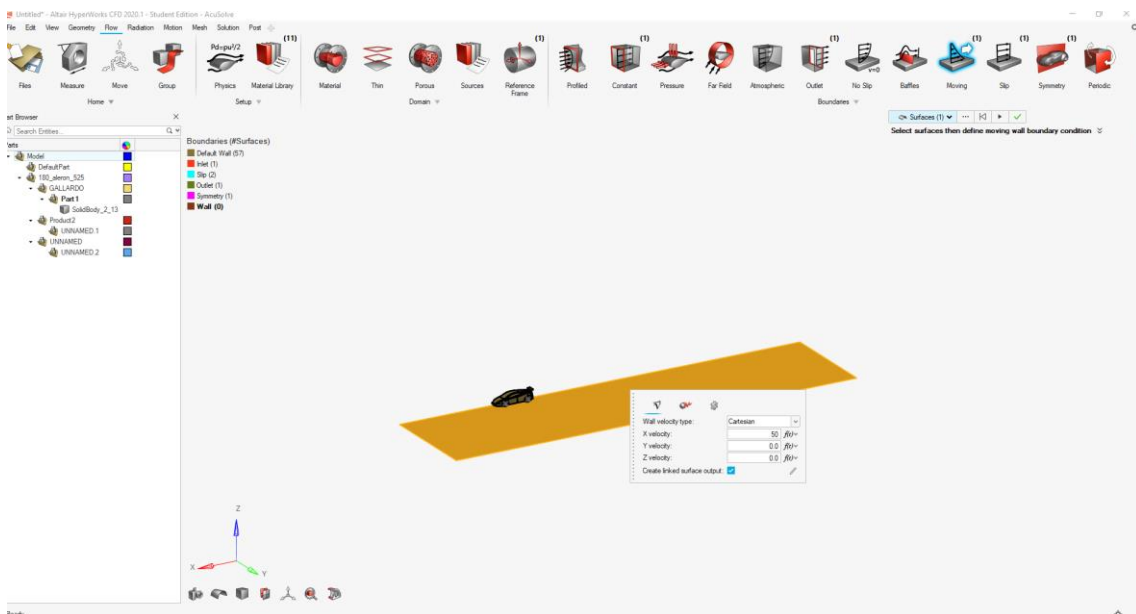


Figura 89. Configuració de les condicions de contorn. Moving. [25]

A continuació es crearan els outputs individuals de cada superfície ja que aquests no son slip walls. Si es volen outputs de superfícies es millor crear les condicions de contorn per a elles o es pot establir outputs de superfícies abans de fer córrer la simulació.



Per tant es crearan els outputs de les superfícies o crear les condicions de contorn i d'aquesta manera tenir els outputs de les superfícies per cada part.

Per fer això s'utilitzarà l'eina "No Slip>By group"

S'aplicarà aquesta condició a totes les parts del vehicle. "Front Wheel", "Rear Wheel", "spoiler" i "chassis".

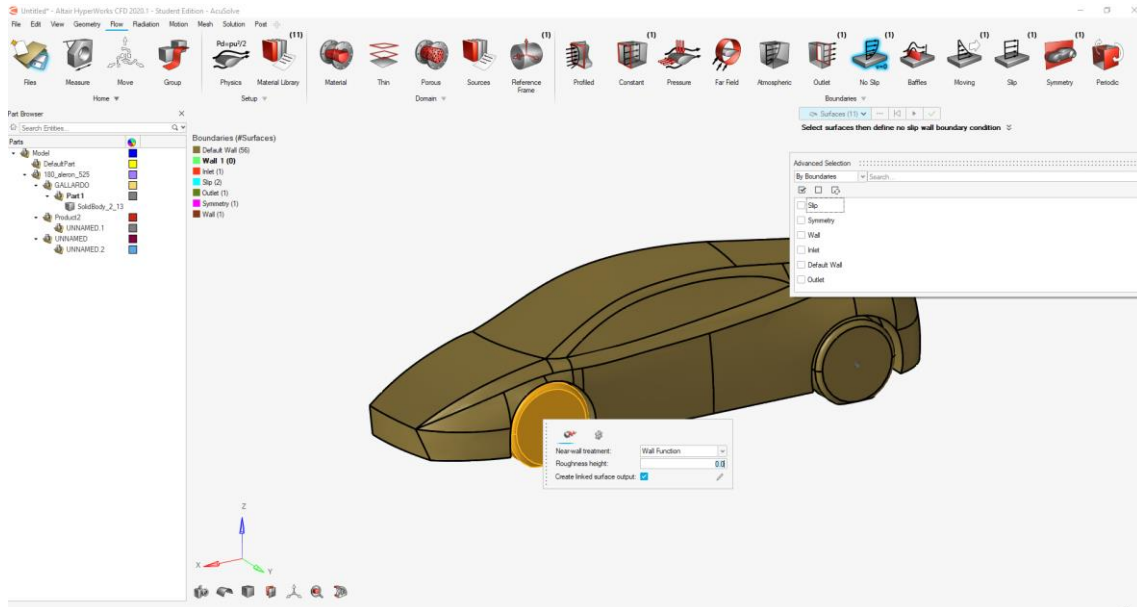


Figura 90. Configuració de les condicions de contorn. No Slip. [25]

Un cop introduïdes totes les condicions quedaria aquesta llista

Boundaries (#Surfaces)	
■	Default Wall (1)
■	Chassis (31)
■	FWheel (11)
■	Spoiler (3)
■	Inlet (1)
■	Slip (2)
■	Outlet (1)
■	Symmetry (1)
■	Ground (1)
■	RWheel (10)

Figura 91. Llista de les condicions de contorn establertes. [25]



6.1.3. Domini de control i mallat

A continuació s'explicarà el set up del mallat. Es començarà aplicant Control de Superfícies. "Mesh > Surface > By Boundaries > Spoiler"

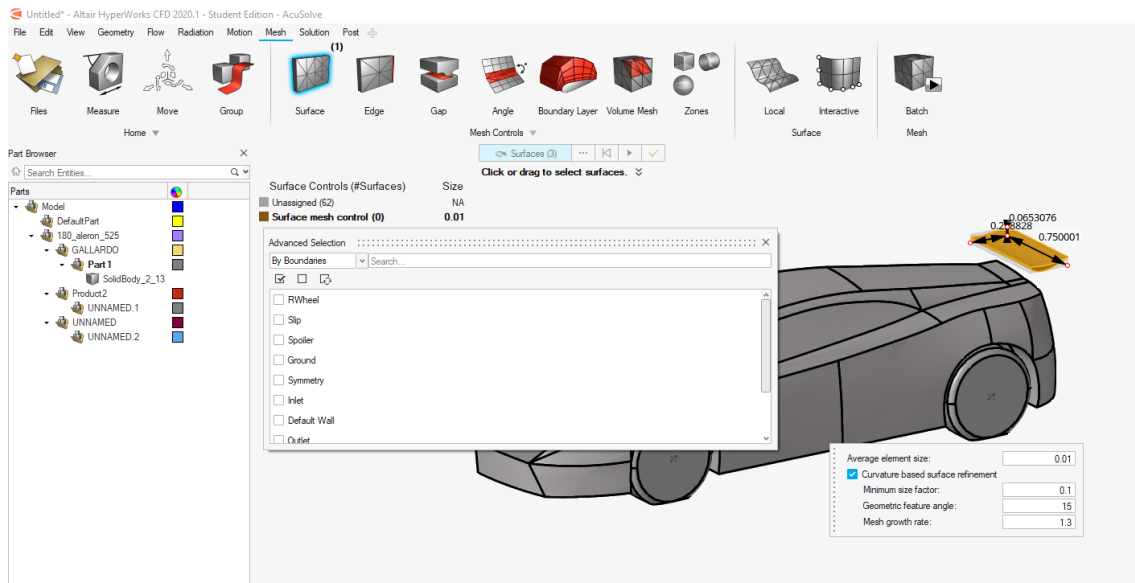


Figura 92. Mallat de les superfícies del vehicle. [25]

El valor de la mida del element i l'angle de característica geomètrica es farà més petit que el valor que ve per determinat. D'aquesta manera aconseguirem uns valors més acurats al refinar la malla i podrem veure millor la curvatura del aleró al disminuir l'angle, sent la mida del element 0.01m i l'angle 15°.

Es farà el mateix procediment per a les rodes aplicant una mida del element de 0.01m i un angle de 15° i per a la carrosseria amb una mida del element de 0.05m i un angle de 22,5°. Per a la carrosseria el mallat no cal que sigui tan detallat i per això s'aprofita fer els elements mes grans i així baixar el temps de computació.

Surface Controls (#Surfaces)	Size
Unassigned (7)	NA
Spoiler (3)	0.01
Wheels (21)	0.01
Chassis (31)	0.05

Figura 93. Llista de les superfícies mallades i la seva mida del mallat. [25]



Finalment obtindríem Superfícies de control de la figura 93.

A continuació es passarà a definir la mida de la capa límit. Aquesta capa límit s'aplicarà al vehicle. El que es faria seria calcular una primera capa amb condicions altes de les diferents parts del vehicle, totes aquelles parts que serien diferents i que estarien basades en el numero de Reynolds i en el valor y^+ que se esta utilitzant. Això dependrà del model de turbulència o del nivell de precisió que s'està buscant.

En aquest cas s'ha considerat un y^+ de 30 i el numero de Reynolds basat en la llargada del vehicle i de les seves propietats dels materials

S'establirà un First layer thickness de 0.0008 per a un y^+ de 30 i un total de 12 capes amb un rati de creixement constatat de 1.3.

Una de les coses que ens hem de fixar quan la malla esta creada es la transició suau entre la malla de la capa límit i la malla del volum.

Per tant aquests valors s'han d'anar modificant fins trobar un bon set up del mallat.

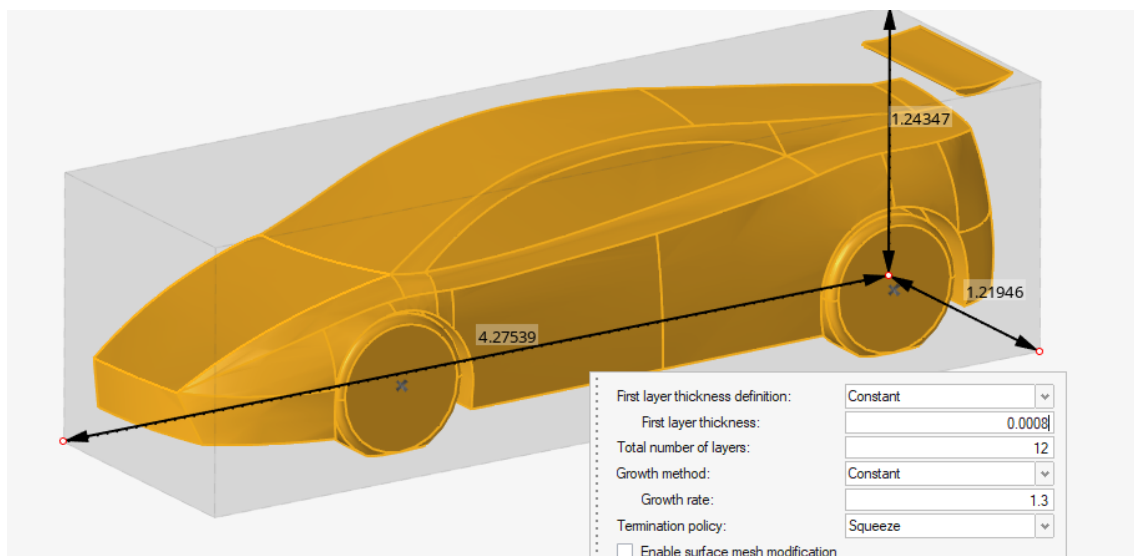


Figura 94. Configuració de la mida de la capa límit. [25]

En aquest cas no s'aplicarà "Volume Mesh" perquè el "Batch Mesher" s'encarregarà de fer això. En cas que hi hagin molts volums en la simulació es necessitaria un refinament final.

Per acabar s'aplicarà una zona de refinament al voltat del vehicle. S'utilitzarà l'eina de refinament creant una caixa i deixant una distancia considerable per darrera del vehicle ja que es considera que el fluid serà molt turbulent darrere del vehicle i es vol procurar que es resolgui les característiques del fluid de la millor manera possible sense utilitzar massa requeriment de computació.

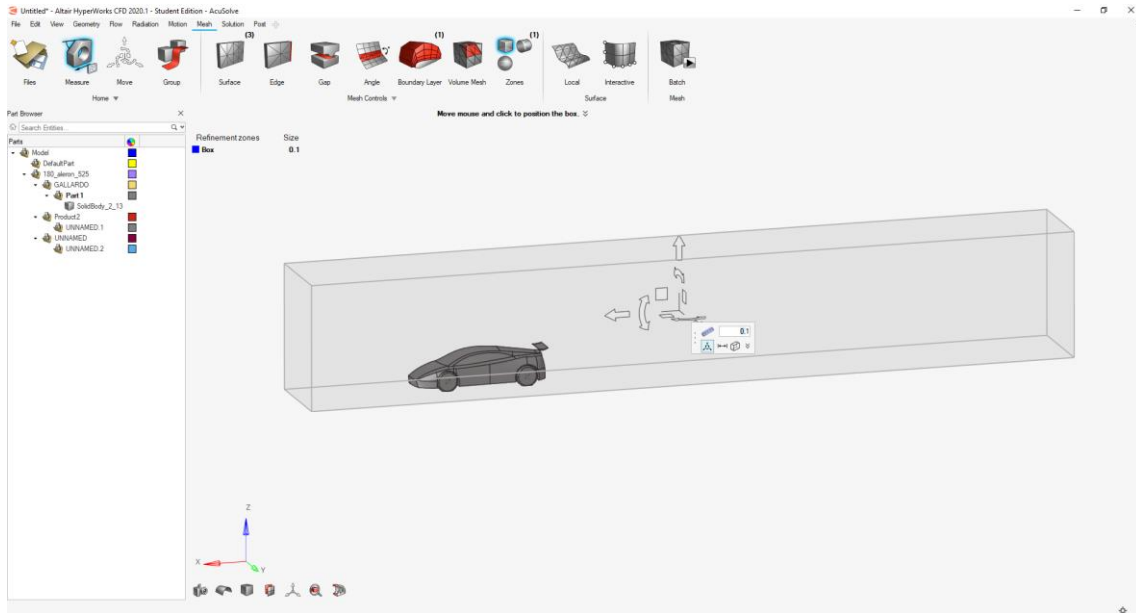


Figura 95. Configuració de la zona de refinament del mallat. [25]

Les dimensions de la zona de refinament del mallat són 24.5m de llargada, 3m d'ample i 4 d'alçada.

Finalment s'aplicarà el "Batch Mesh"

S'escollirà una mida del element de 0.75m i es deixaran totes les configuracions redefinides.

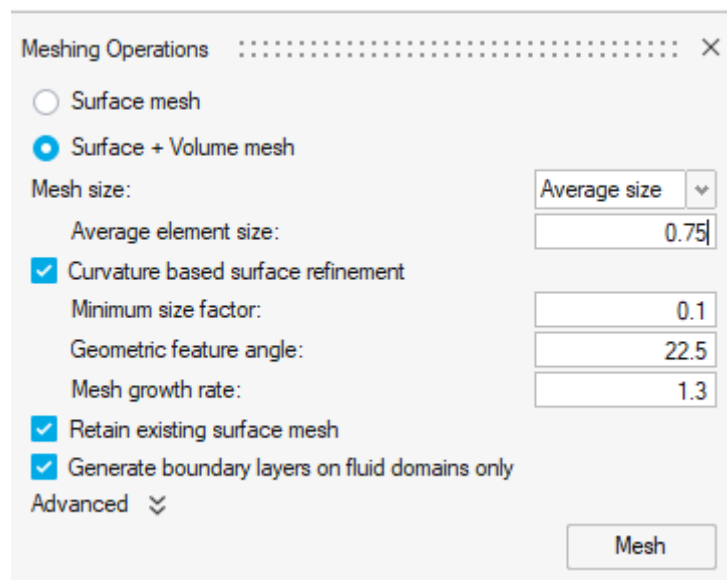


Figura 96. Configuració de les opcions del processament del mallat. [25]



Un cop es té el model mallat, es pot observar com s'han creat els elements i si el Set Up ha sigut el correcte.

En la figura 97 es pot veure la diferència de mallat entre la zona que no esta refinada i la que si.

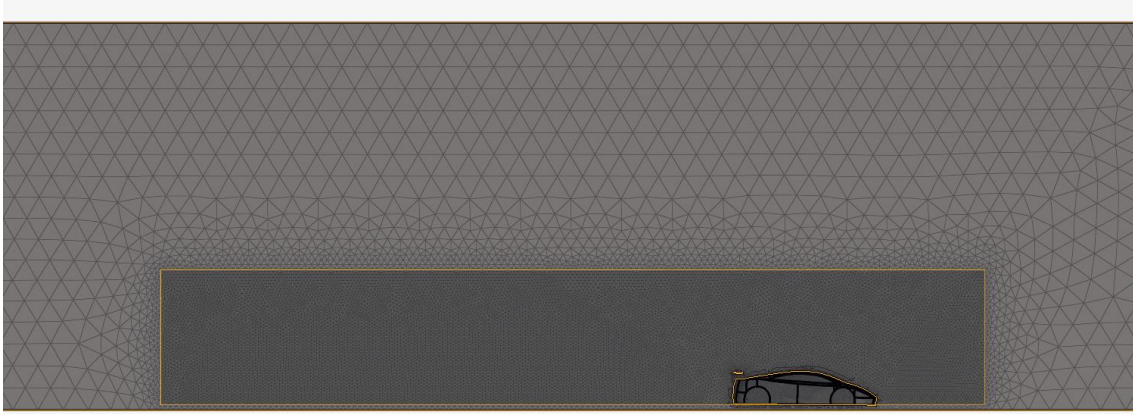


Figura 97. Mallat de tot el recinte. [25]

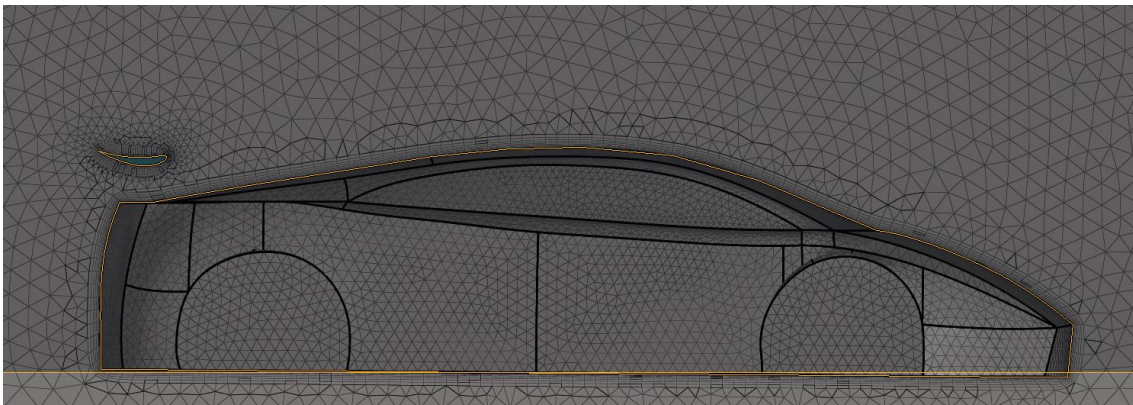


Figura 98. Imatge ampliada del mallat. [25]

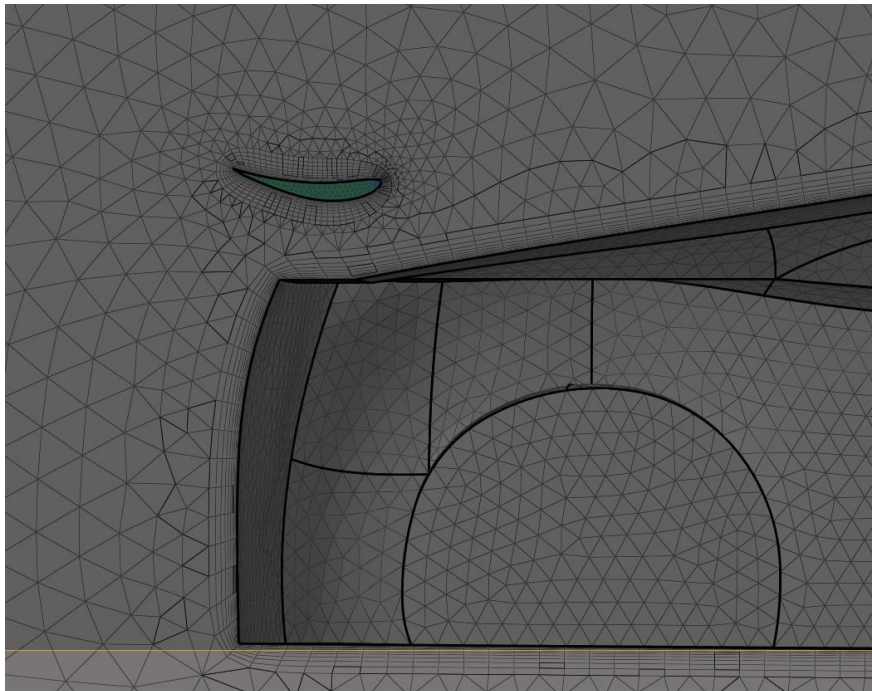


Figura 99. Mallat de les zones crítiques del model. [25]

En la figura 99 pot observar la transició suau entre l'últim element de la capa límit i la primera malla de volum. També es poden veure les 12 capes que s'han configurat per mellar la capa límit. Per tant, es pot confirmar que el mallat es acurat per la simulació.

Entity	Count
Points	87
Lines	137
Surfaces	58
Solids	1
Parts	8
Nodes	526196
2d Elements	132066
3d Elements	927694

Figura 100. Característiques del mallat. [25]



Per veure quants nodes hi ha en el model s'utilitzarà l'eina "Measure>Entity count"

En la figura 100 es poden observar la quantitat de nodes del model, un total de 526196 nodes. Acusolve treballa en base als nodes, d'aquesta manera la mida del model es basa en el numero de nodes.

6.1.4. Solució

Ara es passarà al mòdul de Soluton. Amb l'eina "Part" es donarà una velocitat de 50m/s en direcció de l'eix X a tots els nodes del model.

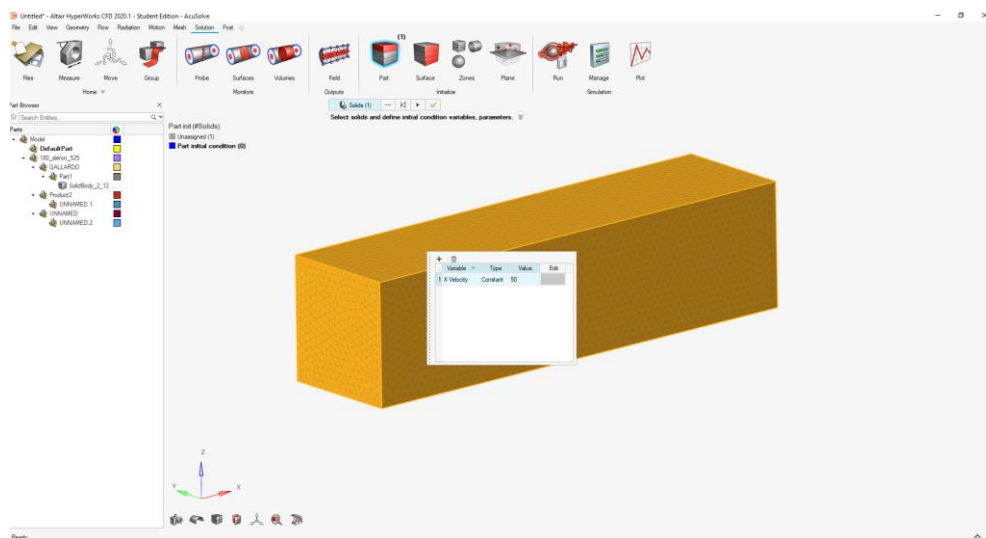


Figura 101. Aplicació de velocitat al model. [25]

Ara el set up esta llest per ser simulat a través de l'eina "Run" deixant la configuració predeterminada que mostra la figura 102 .

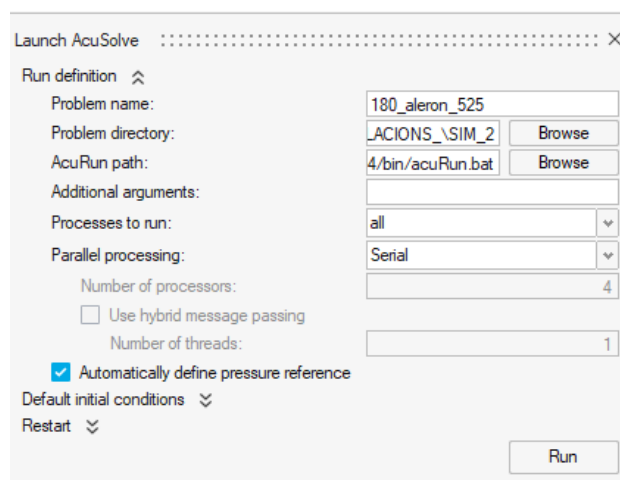


Figura 102. Finestra del set up de la simulació. [25]



7. ANÀLISI DE RESULTATS

7.1. Anàlisi gràfic

En aquest apartat s'explicaran els resultats gràfics obtinguts mitjançant el programa Altair HyperWorks CFD 2020.

7.1.1. Distribució de pressions

Tal i com era d'esperar, com s'observa en la figura 103, en la part davantera del vehicle esta present un punt d'estancament principal del vehicle. Això es degut a que el flux de l'aire és gairebé transversal en aquest punt. També comentar que el disseny del vehicle no compta amb entrades d'aire a la part davantera que distribuïrien el flux i farien que no es generés tanta pressió.

També és destacable els punt d'estancament situat en la inserció del parabrises davanter. Això es degut al canvi bruscat de direcció que obliga al flux a accelerar-se.

A més, s'ha de comentar que s'està estudiant la secció transversal del vehicle on no es veuen representades les rodes, però aquestes també actuarien com punts d'estancament del fluid, sobretot en les davanteres.

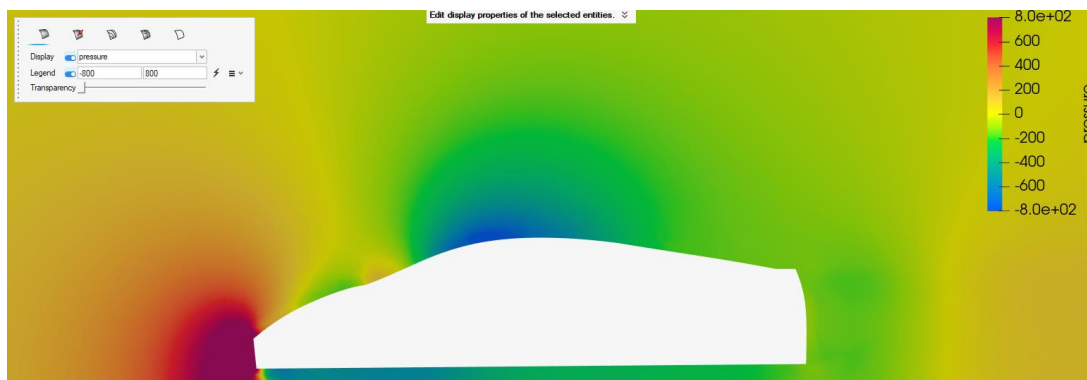


Figura 103. Distribucions de pressions per al vehicle sense aleró.

Per a la implementació de l'aleró amb un angle d'atac de $5,25^\circ$ es pot observar que la carrosseria del vehicle actuarà de la mateixa forma que s'ha comentat anteriorment.

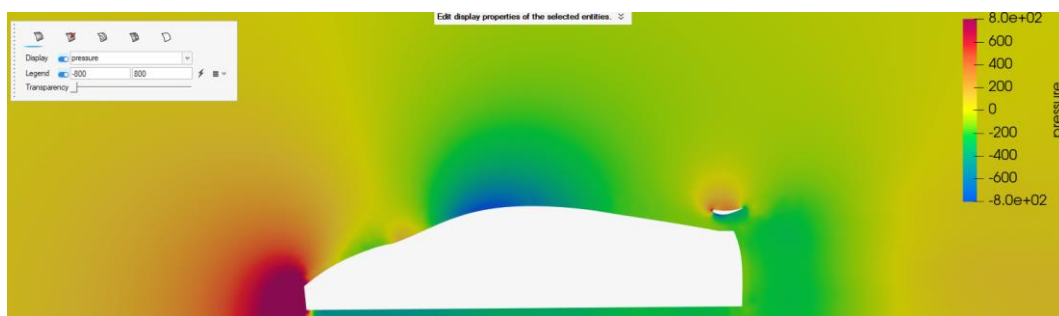


Figura 104. Distribucions de pressions per al vehicle amb aleró $5,25^\circ$.



Si es fa atenció al perfil alar de la figura 105, es poden veure les diferències de pressions entre les dos cares del ala, destacant el punt d'incidència del fluid com la part on el flux es troba amb més pressió. Aquest punt es troba en la part superior del vèrtex d'atac creant una sobrepressió en la cara superior del perfil. Per altra banda, es crea una zona de depressió en la zona inferior del ala degut a que el flux s'accelera.

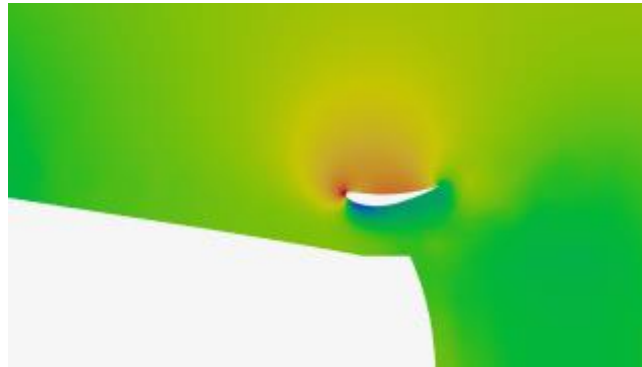


Figura 105. Distribucions de pressions per al aleró 5,25 °.

Per l'angle d'atac de 55° es pot observar a la figura 106 i 107 com es crea una sobrepressió molt elevada en la part superior del perfil, aconseguint d'aquesta manera incrementar molt el drag.

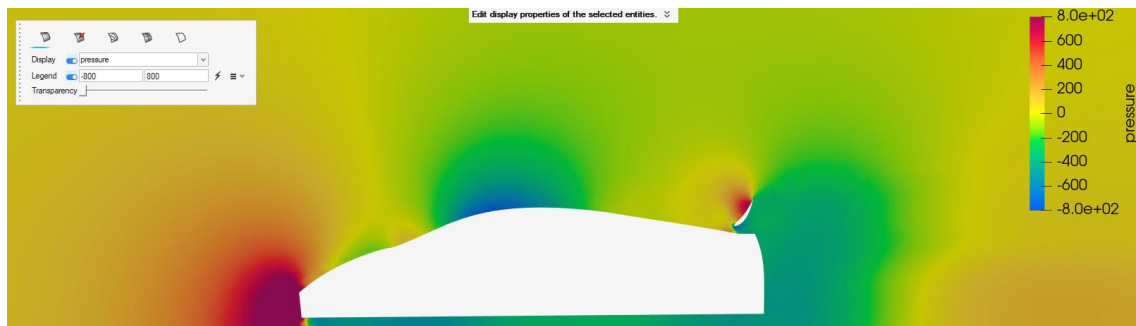


Figura 106. Distribucions de pressions per al vehicle amb aleró 55 °.

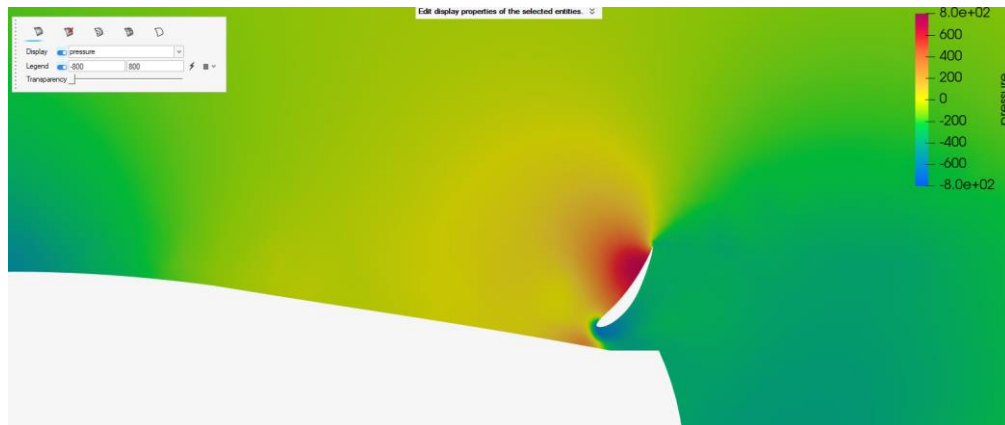


Figura 107. Distribucions de pressions per al aleró 55 °.



7.1.2. Distribucions de velocitats.

La distribució de velocitats es pràcticament inversa a la distribució de pressions. On abans es trobava el punt d'estancament amb la pressió màxima, ara es troba el punt de velocitat mínima. Els punts de velocitat màxima es troben en zones on l'àrea transversal del flux és estreta i en zones on el flux ha de canviar de direcció. En la figura 108 s'observa que els punts de mínima velocitat es troben a la part davantera del vehicle. Per altra banda el punts on el flux té una major velocitat es concentren en el parabrises i el començament del sostre del vehicle. Com s'ha comentat anteriorment, aquest flux s'accelera a causa del canvi de direcció que pateix per la geometria del vehicle. També es pot apreciar el despreniment de la capa límit en la part posterior del vehicle.

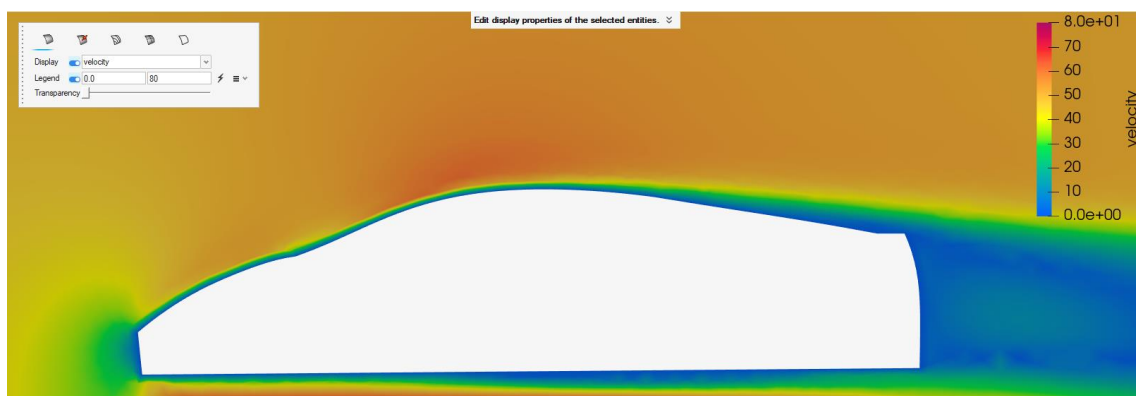


Figura 108. Distribucions de velocitats per al vehicle sense aleró. 1.

Aplicant l'aleró amb un angle d'atac de $5,25^\circ$, es pot observar com el flux que baixa pel sostre es separa abans d'arribar a la part final del vehicle. D'aquesta manera s'aconsegueix reduir la velocitat del flux provocant que es generin pressions més altes i com a conseqüència, es generi un major lift en l'eix posterior.

Per altra banda, el perfil alar mostra com el fluid s'accelera per la part inferior d'aquest, generant una depressió.

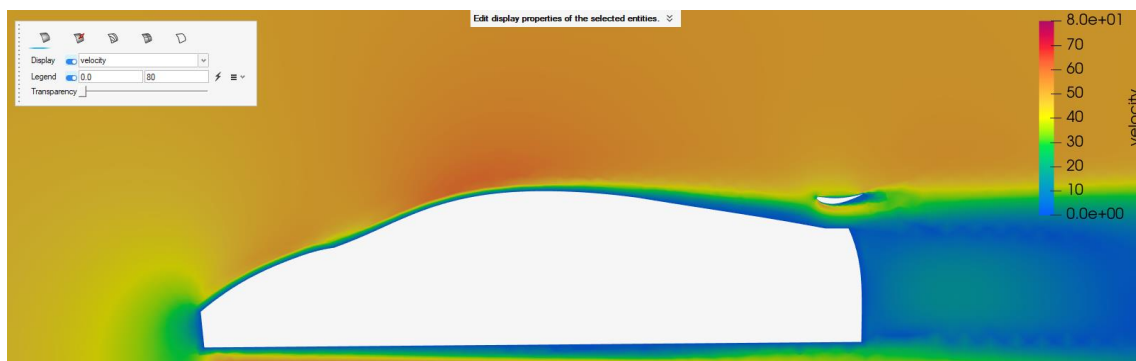


Figura 109. Distribucions de velocitats per al vehicle amb aleró $5,25^\circ$. 1



Aplicant un angle d'atac de 55° , es pot observar com el flux que circula pel sostre del vehicle es separa encara abans que en el cas anterior, provocant d'aquesta forma encara més pressió sobre l'eix posterior. A més a més, aquesta configuració mostra clarament com el flux, al passar pel perfil alar, perd molta velocitat, generant zones de molta pressió darrere del vehicle. Per tant, es generarà molta resistència a l'avanç, complint amb els objectius desitjats.

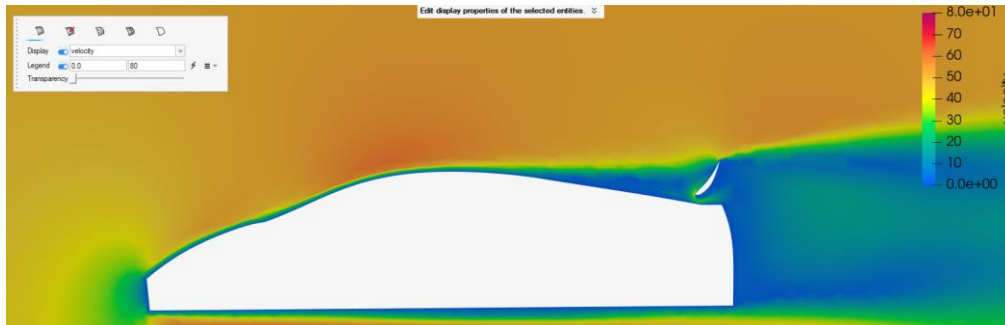


Figura 110. Distribucions de velocitats per al vehicle amb aleró 55° .

Comparació d'esteles

L'estela que es generà en un vehicle es el major causant del drag total del vehicle, ja que es produeix una separació de la capa límit produint zones d'altres pressions i com a resultat, zones elevades de drag.

La aparició d'aquesta estela ve marcada per la forma del model, com més suau sigui l'acabament del vehicle, més tard es produirà la separació de la capa límit i menor estela generarà, reduint d'aquesta manera el drag.

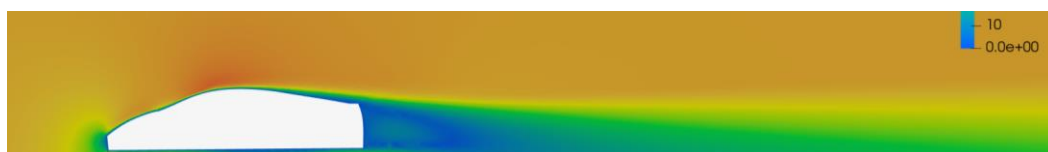


Figura 111. Estela generada sense aleró.

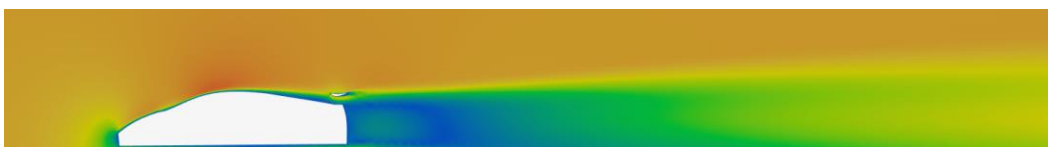


Figura 112. Estela generada aleró $5,25^\circ$.

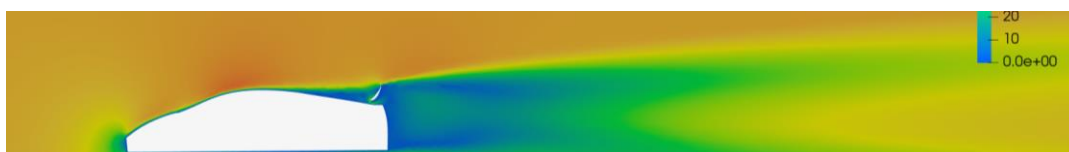


Figura 113. Estela generada aleró 55° .



Com es pot apreciar en la figura 111 el despreniment de la capa límit es suau i retardat, provocant poca resistència a l'avanç. En canvi, en la figura 112, un cop s'implementa l'aleró pel primer angle d'atac, es pot apreciar com la capa límit es desprèn abans. Si observem aquesta estela pel segon angle d'atac en la figura 113, es veu com el despreniment encara es produeix més endavant i d'una forma més brusca, generant molta pressió i conseqüentment molta residència aerodinàmica.

7.1.3. Distribució de vectors

En l'estela generada pel vehicle, es pot observar com el flux és molt turbulent, variant de direcció i sentit, creant d'aquesta forma vòrtex.

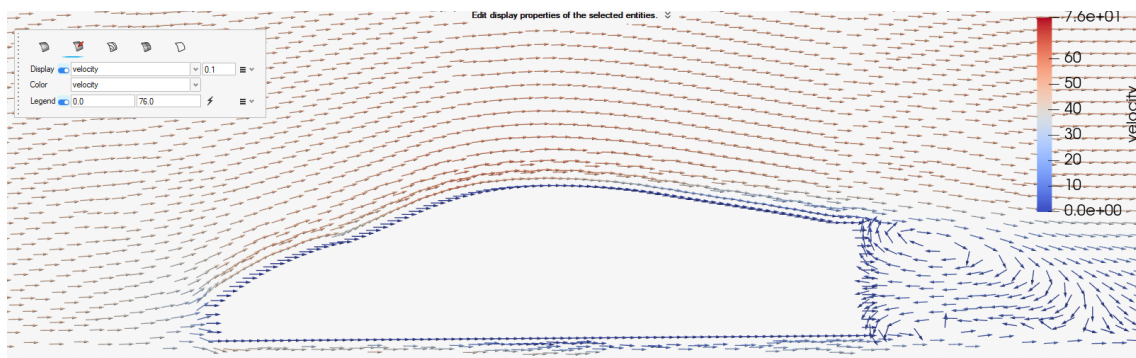


Figura 114. Distribució de vectors per al vehicle sense aleró.

A mesura que el flux es va allunyant del vehicle, el vòrtex va augmentat de mida però disminuint en intensitat.

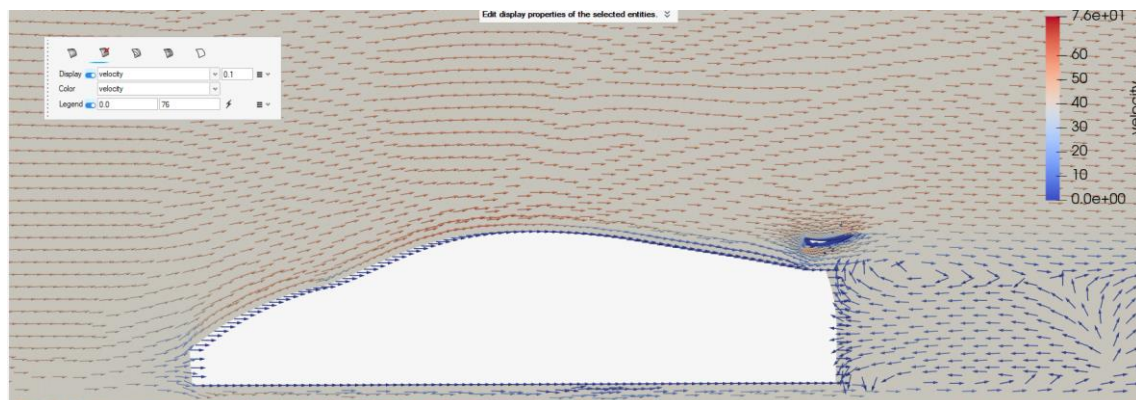


Figura 115. Distribucions de velocitats per al vehicle amb aleró 5,25 ° 1.

En la figura 117 es pot veure com l'estela augmentada per l'angle d'atac elevat genera vòrtexs encara més grans.

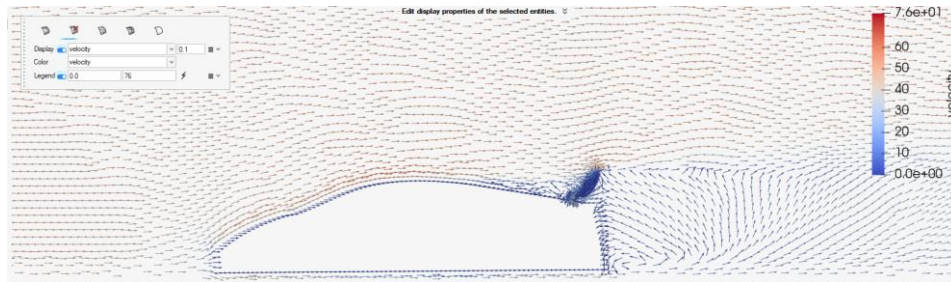


Figura 116. Distributions de velocitats per al vehicle amb aleró 55 ° 1.

7.1.4. Iso surfaces i streamlines

Aquests resultats gràfics estan bé per veure que passa en una superfície però no permeten avaluar com es comporta el fluid.

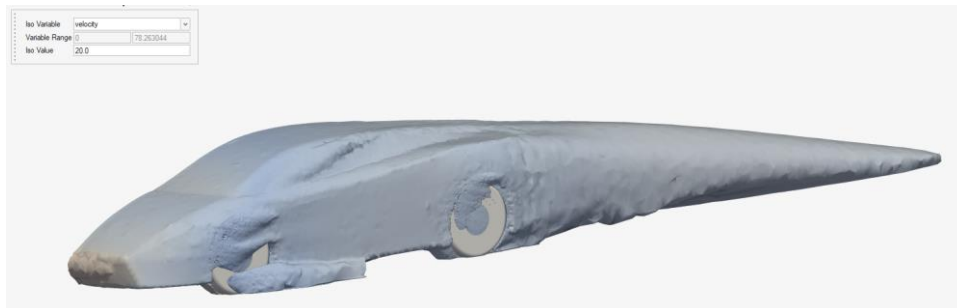


Figura 117. Iso surface cas 1.

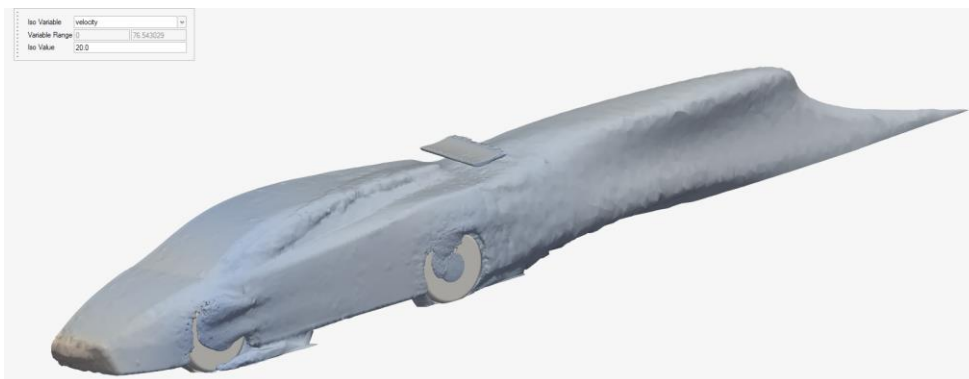


Figura 118. Iso surface cas 2.

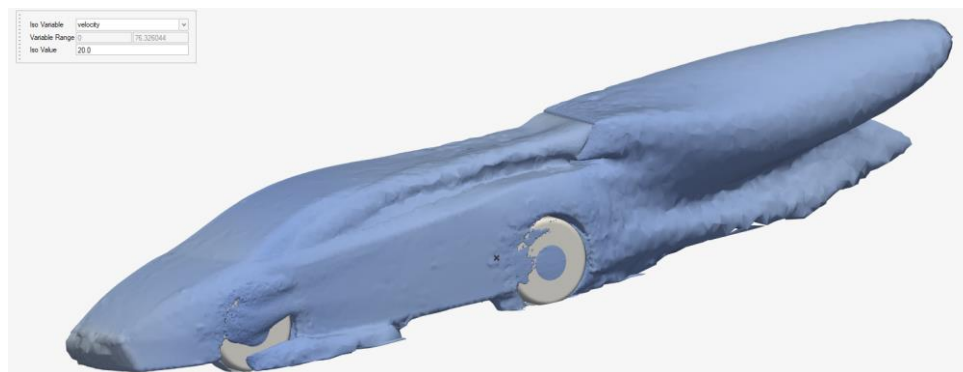


Figura 119. Iso surface cas 3.

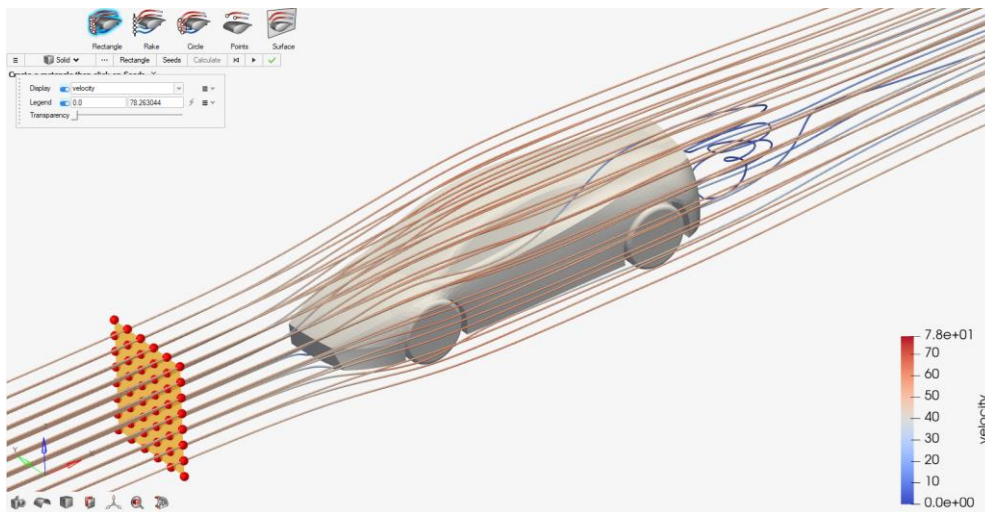


Figura 120. Streamline cas 1.

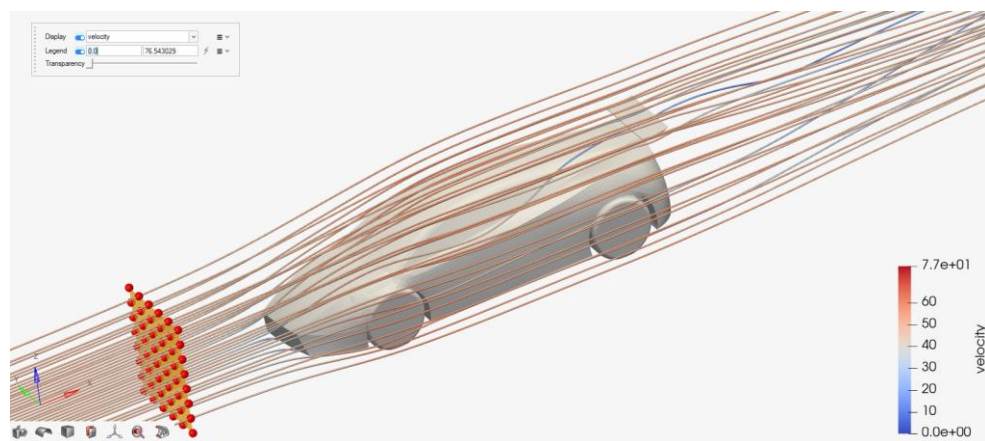


Figura 121. Streamline cas 2.

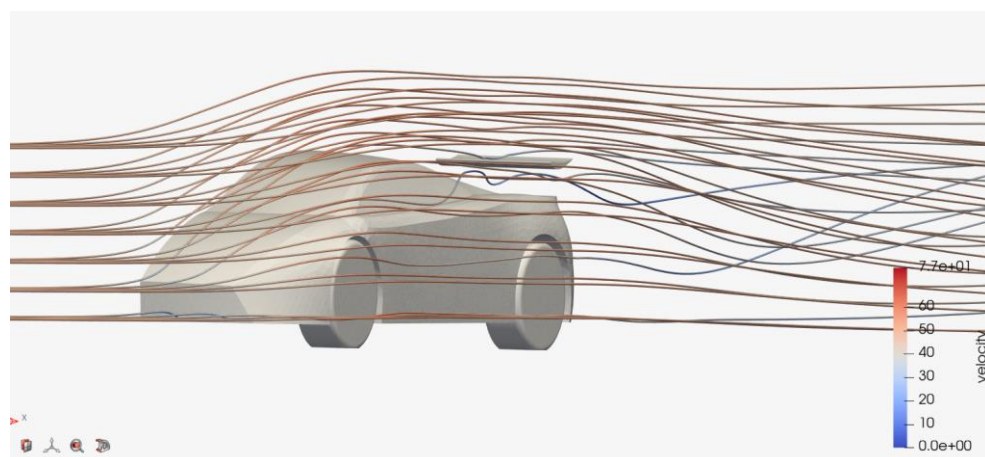


Figura 122. Streamline cas 2.1.

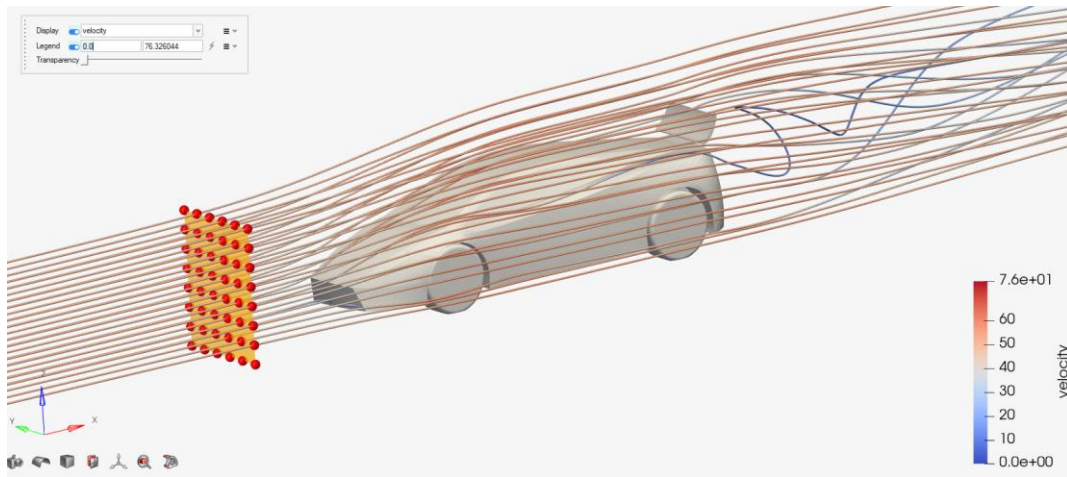


Figura 123. Streamline cas 3

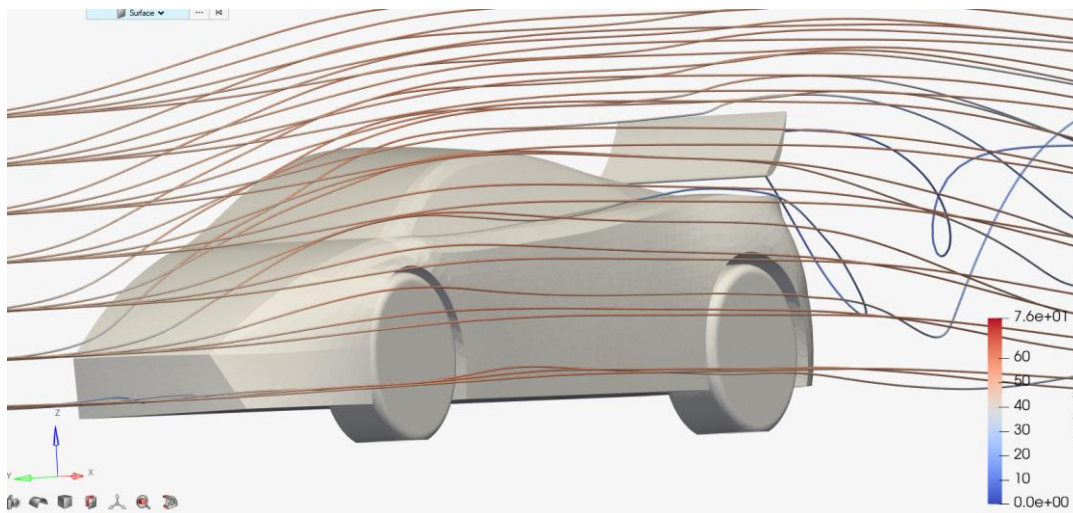


Figura 124. Streamline cas 3.1.



7.2. Anàlisi numèric

7.2.1. Càlcul de les àrees frontals

Com s'ha comentat en l'apartat de metodologia, per extreure els resultats s'ha utilitzat el programa Hypergraph per calcular les forces de drag i de lift que actuen sobre el model.

Primer de tot es recordarà les equacions:

$$F_D = \frac{1}{2} \cdot C_D \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2$$

$$F_L = \frac{1}{2} \cdot C_L \cdot A_f \cdot \rho \cdot V^2$$

On C_D és el coeficient adimensional de drag, C_L és el coeficient adimensional de lift, A_f és l'àrea frontal del vehicle, ρ és la densitat de l'aire i V és la velocitat a la qual circula el vehicle.

Per tant, abans de fer els càlculs, es necessitarà saber les àrees frontals de la carrosseria i del aleró en les dues posicions. Per obtenir aquestes dades, s'utilitzarà l'eina de mesurament de Catia amb la que a través de la projecció de l'àrea dels sòlids, es podrà determinar l'àrea d'aquests. Com es pot observar en les figures, la projecció de l'àrea representa la meitat del sòlid. Per tant, el valor serà el doble del que mostren les figures.

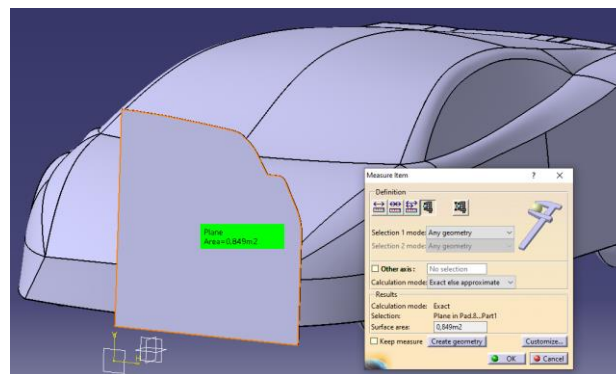


Figura 125. Àrea frontal de la carrosseria.

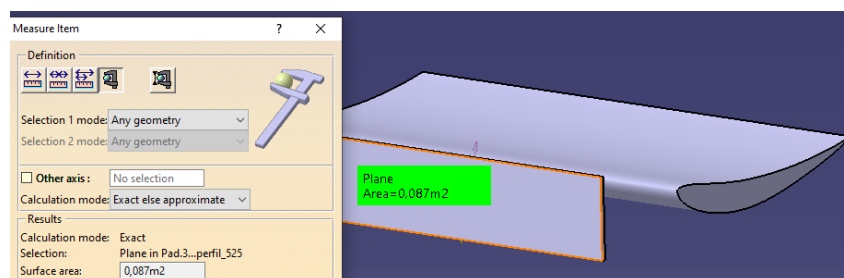


Figura 126. Àrea frontal del aleró a 5,25 °.

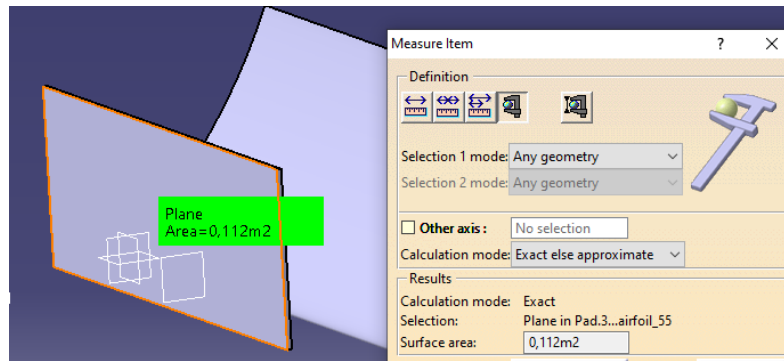


Figura 127. Àrea frontal del aleró a 55 °.

En la taula següent es detallaran les àrees frontals de cada sòlid.

Sòlid	Àrea frontal (m ²)
Carrosseria	1,689
Aleró 5,25°	0,18
Aleró 55°	0,224

Taula 2. Àrees frontals dels sòlids.

7.2.2. Càlcul dels coeficients de drag i lift

Un cop calculades les àrees frontals, es passarà a calcular la força de drag i de lift per finalment determinar els coeficients aerodinàmics.

Mitjançant Hypergraph es mirarà l'últim "time step" per obtenir el valor de la força. En les següents figures es pot observar una oscil·lació petita en el aleró posterior. Basant-nos en els criteris de convergència i la relació de solució (Solution ratio) de la simulació, es pot observar que hi ha molta turbulència provinent de la part posterior del vehicle. Aquest es un fenomen altament transitori i tractar de modelar això en estat estacionari pot ser particularment difícil. Per tant, una forma de resoldre això seria executar la simulació en estat transitori. En aquest projecte no s'ha dut a terme ja que el temps de computació s'allargaria exponencialment, provocant que fos inviable l'estudi.

Per altra banda, Hypergraph mostra els valors de la força de drag com a xTraction i els valors de la força de lift com a yTraction, sent el valor zTraction com la força resultat que s'aplica sobre el vehicle.



Cd i Cl per a la carrosseria sense aleró.

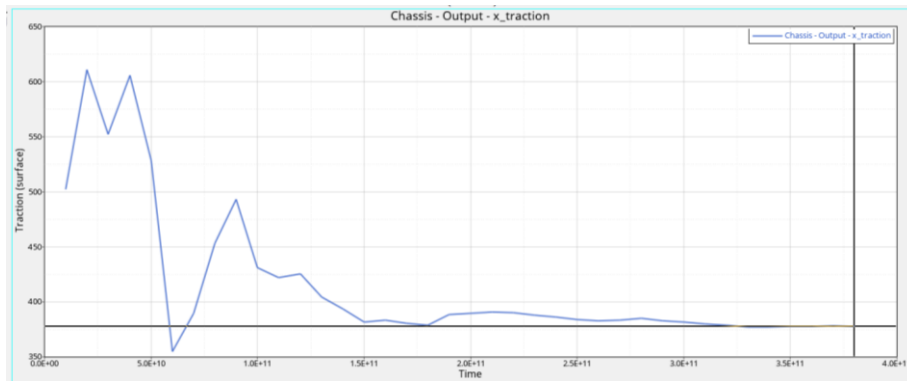


Figura 128. Força de drag.

$$C_d = \frac{2 \times xTraction}{area \times \rho \times refernce\ velocity^2} = \frac{2 \times 370\ N}{1,689m^2 \times 1,225kg/m^3 \times 50^2m/s} = 0,139$$

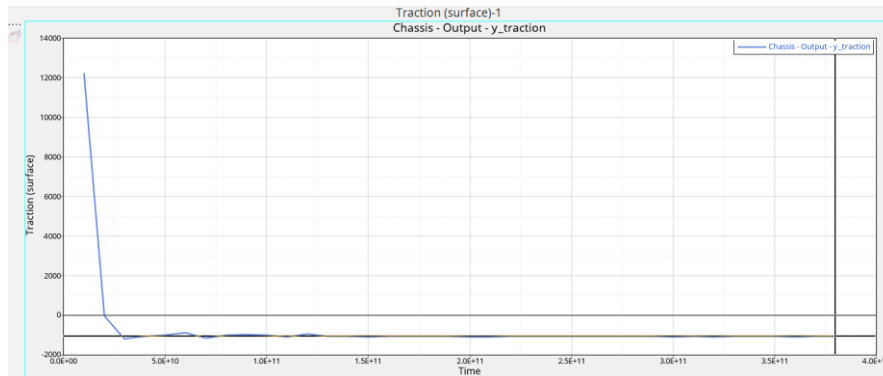


Figura 129. Força de lift.

$$C_l = \frac{2 \times yTraction}{area \times \rho \times refernce\ velocity^2} = \frac{2 \times (-1000\ N)}{1,689m^2 \times 1,225kg/m^3 \times 50^2m/s} = -0,377$$

Cd i Cl per l'aleró col·locat a 5,25°

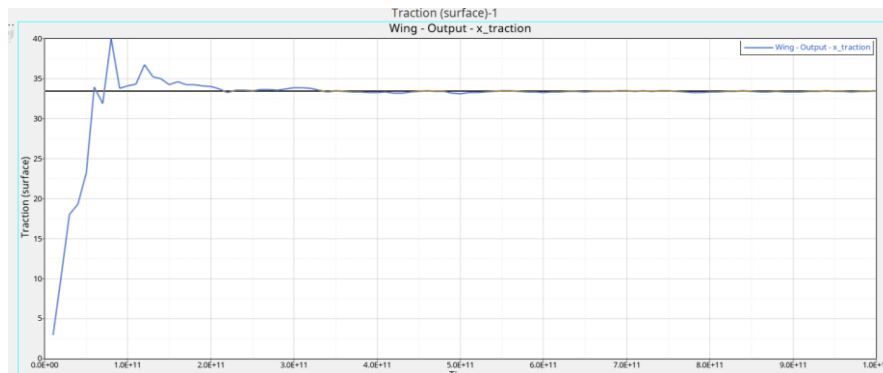


Figura 130. Força de drag, 5,25 °.

$$C_d = \frac{2 \times xTraction}{area \times \rho \times refernce\ velocity^2} = \frac{2 \times 33}{0,18m^2 \times 1,225kg/m^3 \times 50^2m/s} = 0,110$$

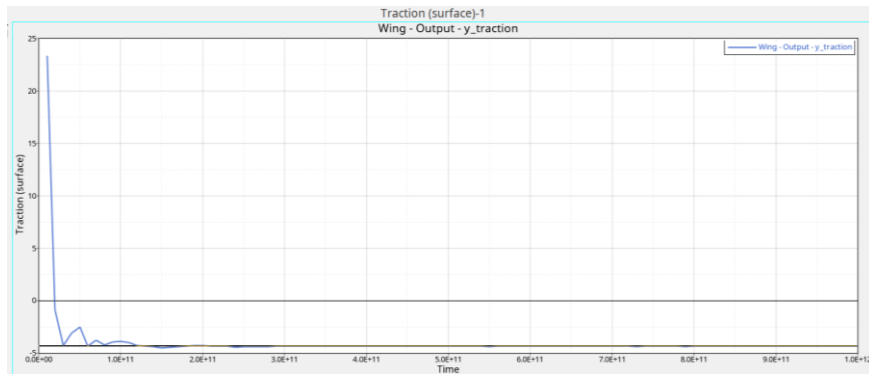


Figura 131. Força de lift. 5,25º.

$$Cl = \frac{2 \times yTraction}{area \times \rho \times refernce\ velocity^2} = \frac{2 \times (-5\ N)}{0,18m^2 \times 1,225kg/m^3 \times 50^2m/s} = -0,032$$

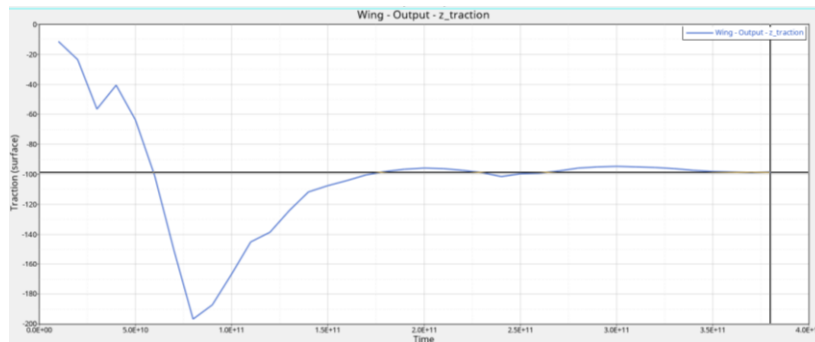


Figura 132. Força resultant. 5,25 º.

El perfil genera una força resultat de -98N

Cd i Cl per l'aleró col·locat a 55º

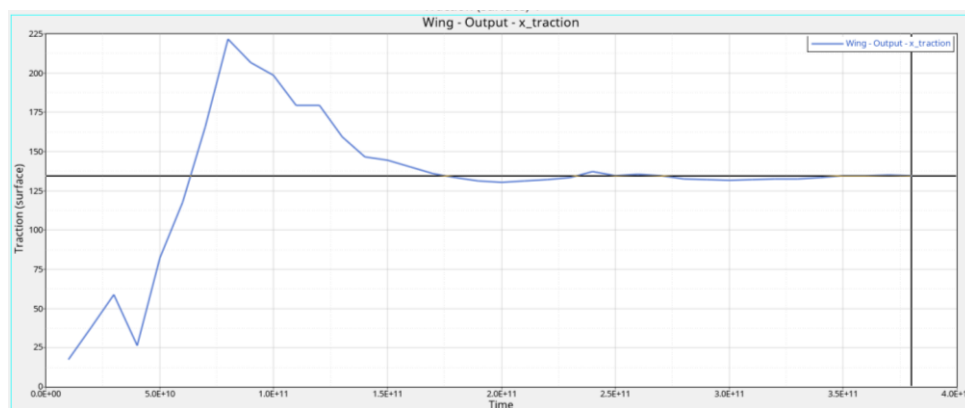


Figura 133 . Força de drag. 55 º.

$$Cd = \frac{2 \times xTraction}{area \times \rho \times refernce\ velocity^2} = \frac{2 \times 137\ N}{0,224m^2 \times 1,225kg/m^3 \times 50^2m/s} = 0,457$$

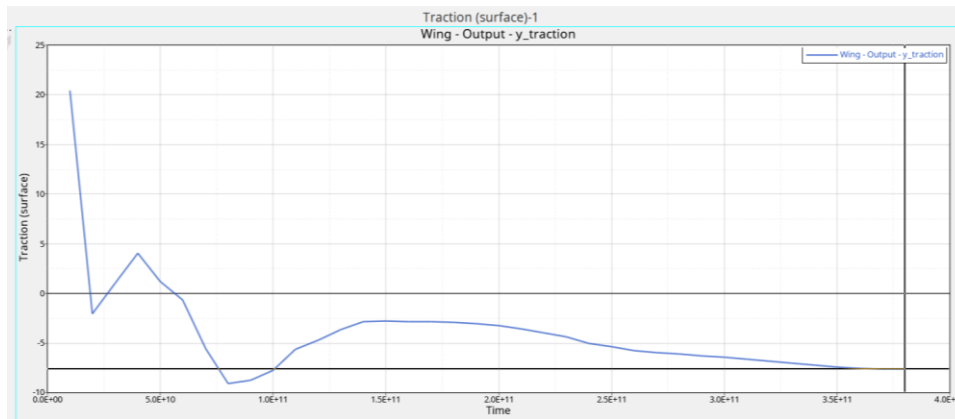


Figura 134. Força de lift. 55 °.

$$Cl = \frac{2 \times yTraction}{area \times \rho \times refernce\ velocity^2} = \frac{2 \times (-7,5N)}{0,224m^2 \times 1,225kg/m^3 \times 50^2m/s} = -0,024$$

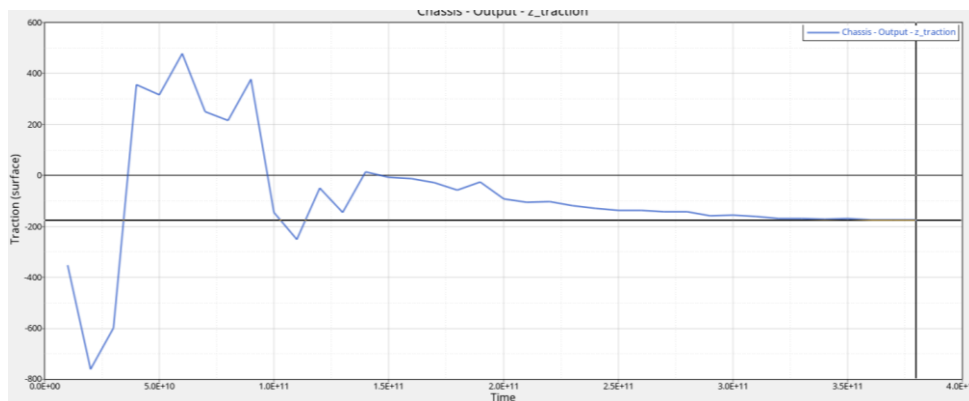


Figura 135. Força resultant. 55 °.

El perfil genera una força resultat de gairebé 200 N.

En la taula 3 es mostra un resum dels resultats obtinguts.

Coeficient	Cd			Cl		
	Cas	Aleró	Total	Model sense aleró	Aleró	Total
	Model sense aleró	Aleró 5,25°	Total	Model sense aleró	Aleró 5,25°	Total
Valor	0,139	0,110	0,249	-0,377	-0,032	-0,409
	Model sense aleró	Aleró 55°	Total	Model sense aleró	Aleró 55°	Total
Valor	0,139	0,457	0,596	-0,377	-0,024	-0,401

Taula 3. Resum de resultats.



7.2.3. Càlcul del temps i distància de frenada

Un cop s'ha obtingut la força que aplica l'aleró en la posició de 55° es pot passar a calcular quin efecte tindrà sobre la frenada del vehicle.

L'objectiu del càlcul es determinar el temps i la distància que trigarà el vehicle en frenar de 180 km/h a 0km/h.

Per fer aquest càlcul, primer s'haurà de calcular quina es la força de frenada del vehicle.

Des de que es trepitja el pedal de fre, el vehicle té un moviment rectilini uniformement accelerat. Per tant, les seves equacions son:

$$\left. \begin{aligned} v &= v_0 + a * t \\ x &= x_0 + v_0 * t + \frac{1}{2} a * t^2 \end{aligned} \right\}$$

On:

x : La posició final del vehicle, per tant, la distància que recorrerà el vehicle durant la frenada. (m)

x_0 : La posició inicial del vehicle. (m)

v : La velocitat del vehicle abans de frenar. (m/s)

V_0 : La velocitat del vehicle un cop s'atura, sent aquesta d'un valor de 0. (m/s)

a : L'acceleració del cos. Serà constant i amb un valor diferent de 0. (m/s²)

t : El temps que trigarà en aturar-se el vehicle. (s)

A més s'ha d'aplicar una força que provoqui una acceleració. Per tant, s'haurà d'utilitzar l'equació fonamental de la dinàmica:

$$F = m \times a$$

On:

F : Força que s'aplica en el vehicle per a que sigui frenat. (N)

m : Massa del vehicle. (m)

A continuació es determinaran els valors de les variables.



Per obtenir la posició del vehicle, s'ha de calcular la distància de frenat de 180km/h a 0km/h que té un Lamborghini Gallardo. Actualment no hi ha dades sobre aquesta situació, per tant es farà una aproximació.

S'ha de tenir en compte que diferents factors poden allargar o escurçar la distància de frenada. Aquests factors són d'una banda les característiques tècniques de el vehicle i per un altre les condicions locals. Considerarem les condicions de la carretera com a òptimes, descartant temperatures baixes, humitat, sorra, etc.

El que si està establert pel fabricant és la distància que recorre el vehicle per aturar-se anant a 100km/h. Aquesta és una distància de 32m.

Per altra banda s'ha obtingut una taula on es poden veure les diferents distàncies de frenat segons la velocitat en el punt de frenada.

Velocidad (km/h)	Distancia de frenado (m) (normal)	Distancia de frenado (m) (peligro)
20 km/h	4 Metros	2 Metros
40 km/h	16 Metros	8 Metros
60 km/h	36 Metros	18 Metros
80 km/h	64 Metros	32 Metros
100 km/h	100 Metros	50 Metros
120 km/h	144 Metros	72 Metros
140 km/h	196 Metros	98 Metros
160 km/h	256 Metros	128 Metros
180 km/h	324 Metros	162 Metros
200 km/h	400 Metros	200 Metros
220 km/h	484 Metros	242 Metros
240 km/h	576 Metros	288 Metros
260 km/h	676 Metros	338 Metros
280 km/h	784 Metros	392 Metros

Taula 4. Distàncies de frenada segons la velocitat del vehicle.[26]

Aquestes dades són aplicables a un turisme de gama mitja-baixa en el mercat. En canvi, el model en estudi és un vehicle d'altres prestacions. Per tant, la frenada serà encara millor que la frenada d'emergència de qualssevol vehicle. Si ens fixem en la dada comentada anteriorment, se sap que el Lamborghini Gallardo recorre 32m iniciant la frenada a 100km/h. D'aquesta manera s'observa que recorre la mateixa distància que un vehicle convencional anant 20 km/h més ràpid que aquest.

Partint d'aquestes dades, es pot fer una aproximació i establir que la frenada d'emergència per a un vehicle convencional anant a 160 km/h equivaldria a la frenada del Gallardo anant a 180km/h. D'aquesta manera s'estableix una distància de frenat de 128m.



Per últim caldria establir la massa del vehicle. Aquesta és de 1.565 kg.

Un cop es coneix la distancia de frenat, ja es coneix la posició inicial del vehicle. Per tat ja es pot fer calcular l'acceleració, el temps de frenada a partir de les equacions esmentades anteriorment.

$$\left. \begin{aligned} 0 &= 50 \text{ m/s} + a * t \\ 128 \text{ m} &= 0 + \frac{50 \text{ m}}{\text{s}} * t + \frac{1}{2} a * t^2 \end{aligned} \right\}$$

A partir de les equacions es determina:

$$t = 5,12 \text{ s}$$

$$a = -9,766 \text{ m/s}^2$$

Seguidament es calcula la força:

$$F = 1.565 \text{ kg} \times \left(-9,766 \frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right) = -15.283,20 \text{ N}$$

A aquesta força calculada se li aplicarà la força que aplica l'aleró amb un angle d'atac de 55°. Aquesta força serà de -200 N.

Per tant la nova força que s'aplicarà al vehicle serà de -15483,20 N

Si s'aplica aquesta nova força, l'acceleració serà -9,858 m/s²

A partir d'aquesta acceleració es podrà obtenir la nova distància de frenada i el nou temps de frenat.

$$\left. \begin{aligned} 0 &= 50 \text{ m/s} + (-9,9 \text{ m/s}^2) * t \\ x &= 0 + \frac{50 \text{ m}}{\text{s}} * t + \frac{1}{2} (-9,9 \text{ m/s}^2) * t^2 \end{aligned} \right\}$$

A partir de les equacions es determina:

$$t = 5,05 \text{ s}$$

$$x = 126 \text{ m}$$

Per tant, el vehicle frenaria 2 metres abans i en gairebé una dècima de segon menys.

A la pràctica, encara s'aconseguirien millors resultats, ja que s'ha de tenir en compte que gràcies al downforce i a la força que aplica l'aleró al vehicle, els pneumàtics tindran



més capacitat de frenada a causa d'augmentar el grip i, per tant, l'ABS entraria més tard. Per comprovar això es necessitaria fer testing.

8. CONCLUSIONS

Amb la realització d'aquest estudi s'ha aconseguit superar els diferents objectius plantejats. Primerament, s'ha aconseguit dissenyar un aleró posterior dinàmic el qual ha millorat les prestacions aerodinàmiques del vehicle augmentant el downforce amb un angle d'atac moderat i augmentant el drag per a un angle d'atac elevat. A més, s'ha millorat el temps i la distància de frenada.

Pel que fa a les millores de frenada, no han sigut molt significatives. Encara que s'han aconseguit valors molt moderats, s'ha millorat el temps i la distància de frenada. Per tant, s'ha assolit l'objectiu. Per poder millorar aquest resultats, s'hauria de realitzar més simulacions CFD i d'aquesta manera optimitzar el sistema dissenyat.

A més s'han posat en pràctica els coneixements de mecànica de fluids en l'àmbit de l'automoció, comprenent i entenent el funcionament d'un aleró en un vehicle i la seva interacció amb el flux d'aire.

Per últim, s'ha dissenyat un vehicle mitjançant un programa de disseny assistit per ordinador. Aquesta tasca m'ha resultat d'una complicació elevada ja que he hagut d'aprendre el disseny amb superfícies. A més, el disseny ha sigut refet varies vegades per problemes en la geometria les quals no permetien obtenir el sòlid del model. Per altra banda, s'ha traslladat el model CAD al software CFD on s'han destinat moltes hores del projecte en la configuració de la simulació.

Una vegada realitzat l'estudi que es presenta en aquest treball, el següent pas es continuar amb la investigació i com s'ha comentat anteriorment, optimitzar el sistema dissenyat per obtenir uns resultats molt més eficients. Penso que l'estudi té molt potencial de millora tant en l'aspecte del disseny del model com en el disseny del sistema d'aerodinàmica activa. Per una banda, el disseny del vehicle es pot ajustar més a la realitat, encara que afegiria dificultat de computació. Per altra banda, es poden realitzar més simulacions per optimitzar la posició del aleró i disminuir encara més el temps i la distancia de frenat.



9. PLANIFICACIÓ TEMPORAL I PRESSUPOST

Un cop finalitzat l'estudi es planteja una planificació temporal que recull el temps dedicat a cada secció del projecte. Per mostrar aquesta informació s'utilitzarà una taula amb les hores aproximades per cada part del treball.

L'estudi s'ha dividit en les següents parts:

- I. Recopilació d'informació.
- II. Estructuració del projecte.
- III. Disseny CAD
- IV. Simulació CFD.
- V. Redacció de la memòria.
- VI. Modificacions finals.
- VII. Altres.

Apartat	Tems de dedicació
<i>Recopilació d'informació</i>	20h
<i>Estructuració del projecte</i>	5h
<i>Disseny CAD</i>	130h
<i>Simulació CFD</i>	150h
<i>Redacció de la memòria</i>	80h
<i>Modificacions finals</i>	10h
<i>Altres</i>	10h
Total	405h

Taula 5. Planificació de l'estudi.

Es pot observar com la major part de l'estudi ha estat destinada al disseny CAD i les simulacions CFD. El disseny del model ha sigut una feina molt costosa. Això ha estat degut al gran coneixement que s'ha de tenir per la modelació de superfícies i la meva falta d'experiència en aquest camp. El model s'ha hagut de refer en un total de 10 cops per a que la geometria de les superfícies permetés convertir el conjunt a sòlid.

Per altra banda la simulació ha sigut encara més costosa. Des del primer moment, el programa ha presentat problemes que han s'han hagut de resoldre per poder començar a simular. A més, el procediment per fer el set up de les simulacions era llarg. Un aspecte important a comentar és que les simulacions han tingut un temps de computació d'entre 8 i 14 hores. Tenint en compte que s'han hagut de fer aproximadament 10 simulacions



diferents abans d'obtenir la correcte, això ha provocat que no pogués avançar amb l'estudi i ha estancat molt la continuació d'aquest.

Un cop s'ha desglossada la planificació, es passarà a calcular el pressupost de l'estudi. En aquest càlcul es tenen en compte els següents aspectes:

- I. Enginyeria
- II. Software
- III. Equips
- IV. Consum elèctric

En l'apartat d'enginyeria es té en compte els honoraris que rebria l'enginyer per a la realització del projecte. Aquests s'han calculat tenint en compte una remuneració de 8€/h. Com s'ha calculat anteriorment, el projecte s'ha desenvolupat en 405h.

L'apartat de Software contempla les llicències dels programes informàtics utilitzats per a la realització del projecte. Per al desenvolupament de la memòria s'ha utilitzat el paquet ofimàtic Office 365 amb llicència vàlida d'un any amb un preu de 69 €. Per a la realització dels dissenys CAD s'ha utilitzat el Software Catia V5 amb llicència vàlida d'un any amb un preu de 3.839,56 €. Per realitzar les simulacions CFD s'ha utilitzat el Software Altair AcuSolve amb llicència d'un any amb un cost de 5000 €. Afegir que també s'ha utilitzat el programa JavaFoil amb un cost de 0 € ja que es un "open source".

Com que el projecte s'ha desenvolupat en un període de 6 mesos, es considerarà la meitat del preu de cada llicència.

Pel que fa als equips utilitzats, s'han hagut de fer servir dos ordinadors diferents. Un ordinador amb un preu de 800€ (Ordinador 1) on s'han desenvolupat les simulacions durant un total de 100 hores de computació i 150 hores de treball amb el Software CFD. A més s'ha fet servir un altre ordinador (Ordinador 2) per realitzar totes les demès tasques amb un preu de 1.500€. Aquest equip ha estat treballant durant un total de 255 hores.

Per considerar el cost dels equips, es tindrà en compte quina és la vida útil d'aquests i quina part d'aquesta vida útil s'ha utilitza. Per tant, si considerem una vida útil de 5 anys treballant a ple rendiment, s'obté que pel primer equip s'ha utilitzat un 0,57% de la seva vida útil mentre que pel segon equip serà 0,58%. Per tant, el preu del primer orinador serà de 4,56€ i el preu del segon serà de 8,7€.



Per comptabilitzar el cost energètic dels equips s'ha tingut en compte una potència mitja de 300 Watts tenint en compte un preu de la llum mig de 0,17€/kWh durant tot el projecte.

Sumant tots aquests aspectes, el cost total del projecte és de **9.357,28 €**.

A continuació es mostra una taula completa de tot el pressupost desglossat i detallat pel que fa a la part econòmica i el temps necessitat en cada activitat:

Enginyeria	Concepte	Preu (€/h)	Temps (h)	Total (€)
	Honoraris	8 €/h	405 h	3.240 €
Total				3.240 €

Software	Concepte	Preu de la llicència (€)
	Office 365	34,5 €
	Catia V5	1.919,78 €
	Altair AcuSolve	2500 €
	Java Foil	0 €
Total		4.454,28 €

Equips	Concepte	Preu (€)
	Ordinador 1	4,56 €
	Ordinador 2	8,7 €
Total		13,26 €

Consum energètic	Concepte	Potència Equip (kW)	Preu unitari (€/kWh)	Temps d'us	Total
	Ordinador 1	0,3 (kW)	0,17 €/kWh	250h	12,75 €
	Ordinador 2	0,3 (kW)	0,17 €/kWh	255h	13,00 €
Total					25,75 €

Costos totals	Concepte	Preu (€)
	Cost total	7.733,29 €
	IVA (21%)	1.624 €
Cost total del projecte		9.357,28 €

Taula 6. Pressupost de l'estudi.



10. IMPACTE MEDIAMBIENTAL

Degut a que l'estudi és merament teòric i s'ha dut a terme íntegrament amb l'ús d'ordinador, no cal un estudi d'impacte ambiental. Però el que sí s'aconsegueix amb la realització d'aquest projecte, en el cas que es volguessin implementar les millores aerodinàmiques exposades, és una reducció tant del consum energètic com econòmica, en comparació amb estudis de túnels de vent. L'ús de tècniques de CFD, permet a les companyies automobilístiques sobretot, l'abaratiment de costos, pel fet que amb el seu ús, no es necessiten tantes proves en túnels de vent.

11. BIBLIOGRAFIA

11.1. Referències bibliogràfiques

- [1] Anderson, John D. Fundamentals of aerodynamics [en línia]. London. MCGRAW-HILL. 1984. ISBN 978-1-259-12991-9. [Citat el 2 de març del 2021]
- [2] Wolf-Heinrich H. Aerodynamics of Road Vehicles, England. Butterworth.1987. ISBN. 9781483102078. [Citat el 4 de març del 2021]
- [3] McBeath, S. Aerodinámica del automóvil de competición. Barcelona: CEAC. 2005. ISBN 8432911674. [Citat el 4 de març del 2021]
- [4] Supercars.net 2003 Lamborghini Gallardo. [Citat el 3 d'abril del 2021] Disponible a: <<https://www.supercars.net/blog/2003-lamborghini-gallardo/>>
- [5] Airfoiltools.com. 2021. Airfoil Tools. [Citat el 3 d'abril del 2021] Disponible a: <<http://airfoiltools.com/>>
- [6] Ministerio de industria, comercio y turismo. MANUAL DE REFORMAS DE VEHÍCULOS REVISIÓN 6ª - Corrección 1. Edició 1.1. Panamá, 1. 28036 Madrid, (2020). [Citat el 8 d'abril del 2021] Disponible a: <<https://www.aeca-itv.com/wp-content/uploads/2021/01/ManualReformasVehiculosRev6Corr1.pdf>>

[7] Menter, F. (2009). Review of the Shear-stress Transport Turbulence Model Experience from an Industrial Perspective. International journal of computational fluid dynamics. 23. [Citat el 21 d'abril del 2021] Disponible a:

<https://www.researchgate.net/publication/239395176_Review_of_the_Shear-stress_Transport_Turbulence_Model_Experience_from_an_Industrial_Perspective>

11.2. Referències de figures

[1] Facultad de Ciencias Marinas (2021). Flujos [Citat el 2 de febrer del 2021] Disponible a: <http://fcm.ens.uabc.mx/~fisica/FISICA_II/APUNTES/FLUJOS.htm>

[2] Wikipedia (2020). Capa límite [Citat el 2 de febrer del 2021] Disponible a: <https://es.wikipedia.org/wiki/Capa_l%C3%ADmite>

[3] Aerodinamica F1 (2019). Flujo laminar y turbulento [Citat el 6 de febrer del 2021] Disponible a: <<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>>

[4] University of Notre Dame (2018). Fluid Dynamics: Boundary Layers [Citat el 8 de febrer del 2021] Disponible a: <https://www3.nd.edu/~sst/teaching/AME60634/lectures/AME60634_F13_lecture18.pdf>

[5] Wikipedia (2021). Air foil [Citat el 8 de febrer del 2021] Disponible a: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil>>

[6] Aerodinamica F1 (2020). Perfiles aerodinámicos: ¿Cómo se diseñan? [Citat el 12 de febrer del 2021] Disponible a: <<https://www.aerodinamicaf1.com/2020/06/perfiles-aerodinamicos-como-se-disenan/>>

[7] Wikipedia (2007). Principio de Bernoulli [Citat el 14 de febrer del 2021] Disponible a: <<https://en.wikipedia.org/wiki/Airfoil>>

[8] Wikipedia (2006). Efecte Venturi [Citat el 14 de febrer del 2021] Disponible a: <https://ca.wikipedia.org/wiki/Efecte_Venturi#/media/Fitxer:Venturifixed2.PNG>



[9] EcoMextreme . Como funciona un ala o una superficie aerodinámica? [Citat el 27 de febrer del 2021] Disponible a: <<http://www.ecomextreme.com/viento.html>>

[10] ComoFunciona. Cómo funciona el efecto Venturi [Citat el 4 de març del 2021] Disponible a: <<https://como-funciona.co/el-efecto-venturi/>>

[11] Build your own race car. Car Aerodynamics Basics and How-To Design [Citat el 7 de març del 2021] Disponible a: <<https://www.buildyourownracecar.com/race-car-aerodynamics-basics-and-design/4/>>

[12] Academia Universitaria Guillermo Soler (2020). La importancia del efecto Coanda en el automovilismo y la aviación [Citat el 7 de març del 2021] Disponible a: <<https://www.academiaquillermosoler.es/efecto-coanda/>>

[13] Zona gravedad(2005). Aerodinámica: Resistencia [Citat el 15 de març del 2021] Disponible a:
<<http://www.zonagravedad.com/modules.php?name=News&file=article&sid=776&mode=thread&order=1&thold=0>>

[14] Grupo15 (2016). Funcionamiento de la turbina [Citat el 27 de març del 2021] Disponible a:
<<https://docplayer.es/56155734-Master-en-ingenieria-de-automocion.html>>

[15] Wolf-Heinrich Hucho, Aerodynamics of Road Vehicles, England. Butterworth.1987. ISBN. 9781483102078. [Citat el 2 d'abril del 2021] Disponible a: <<https://www.elsevier.com/books/aerodynamics-of-road-vehicles/hucho/978-0-7506-1267-8>>

[16] Manual de Vuelo (2020). Principios Básicos. Fuerzas que actuan en vuelo [Citat el 12 d'abril del 2021] Disponible a: <https://www.manualvuelo.es/1pbav/13_fuerz.html>

[17] McBeath, S. Aerodinámica del automóvil de competición. Barcelona: CEAC. 2005. ISBN 8432911674. [Citat el 24 d'abril del 2021]



[18] Car and Driver [2019]. Así funciona el sistema de aerodinámica activa del Porsche 911. [Citat el 24 d'abril del 2021] Disponible a:

<<https://www.caranddriver.com/es/coches/planeta-motor/a58569/asi-funciona-el-sistema-de-aerodinamica-activa-del-porsche-911-992/>>

[19] Coches.com/Noticias (2011). Lamborghini Gallardo 2003. [Citat el 26 d'abril del 2021] Disponible a: <<https://noticias.coches.com/lamborghini-gallardo-2003>>

[20] Outlines. Lamborghini Gallardo Coupe blueprints free. [Citat el 26 d'abril del 2021] Disponible a: <<https://getoutlines.com/blueprints/8808/2006-lamborghini-gallardo-coupe-blueprints>>

[21] smcars. Lamborghini Gallardo (2006). [Citat el 26 d'abril del 2021] Disponible a: <<http://www.smcars.net/threads/lamborghini-gallardo-2006.2252/>>

[22] Airfoil Tools. CH10 (smoothed) (ch10sm-il). [Citat el 26 d'abril del 2021] Disponible a: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=ch10sm-il>>

[23] Airfoil Tools. E423 (e423-li). [Citat el 26 d'abril del 2021] Disponible a: <<http://airfoiltools.com/airfoil/details?airfoil=e423-il>>

[24] Sun Microsystems. JavaFoil — Analysis of Airfoils. (2018). [Citat el 27 d'abril del 2021] Disponible a: <<https://www.mh-aerotools.de/airfoils/javafoil.htm>>

[25] Altair. HyperWorks CFD 2020.1 [Citat el 20 de juny del 2021] Disponible a: <<https://www.altair.com.es/resource/altair-hyperworks-cfd-setup-workflow>>

[26] Experto autorecambios. Calcular la distancia de frenado correctamente – factores que influyen en la distancia de frenado. [Citat el 2 de juliol del 2021] Disponible a: <<https://www.expertoautorecambios.es/magazine/calcular-la-distancia-de-frenado-96>>