



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA  
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria  
de Manresa



---

# MILLORA AERODINÀMICA D'UN MODEL A ESCALA D'UN BUGGY

---

**Treball Final de Grau**

GRAU EN ENGINYERIA D'AUTOMOCIÓ

Juny 2023

Autor:

**JORDI VILA FONTSERÈ**

Director:

JOSE JUAN DE FELIPE BLANCH

**EPSEM - Escola Politècnica Superior d'Enginyeria de Manresa**

Universitat Politècnica de Catalunya

---



*El disseny aerodinàmic és l'art de donar forma a la velocitat.*

*- Ferdinand Porsche.*



# AGRAÏMENTS

---

*Vull expressar el meu profund agraïment a totes aquelles persones que han contribuït de manera significativa a fer aquest treball de fi de grau. El seu suport, orientació i motivació han estat fonamentals en aquest procés.*

*En primer lloc, vull agrair al meu tutor, Jose Juan de Felipe Blanch, per la seva guia i assessorament al llarg d'aquest projecte. El seu coneixement ha estat indispensable per dur a terme aquest projecte.*

*També vull agrair a la família i amics pel seu constant suport. A més, m'agradaria expressar el meu reconeixement als meus companys de classe per compartir coneixements durant els treballs en equip.*

*Finalment, vull agrair a totes les fonts bibliogràfiques i recursos que he fet servir en aquest treball. Especialment al professor de la EPSEM, Jordi Vives. La seva aportació ha estat fonamental per l'estudi.*

*Estic enormement agraït a totes les persones que han estat part d'aquest projecte. Gràcies a tots vosaltres, he pogut culminar el meu treball de fi de grau amb èxit.*

---



J. Vila Fontserè, (2023). *Millora aerodinàmica d'un model a escala d'un buggy*. Treball de final de Grau. Manresa: Universitat Politècnica de Catalunya.

## **RESUM**

La importància de l'aerodinàmica en els buggys ha augmentat aquests darrers anys a causa de la introducció dels vehicles elèctrics, on l'eficiència és un factor que afecta directament a l'autonomia del vehicle. Aquest projecte recull l'estudi aerodinàmic d'un model a escala d'un buggy mitjançant un programa de Dinàmica de Fluids Computacional (CFD Computational Fluid Dynamics) anomenat Autodesk CFD. A la memòria, es descriuen els conceptes bàsics d'aerodinàmica com a introducció del tema i s'identifiquen les principals parts aerodinàmiques dels buggys i del buggy estudiat. Es modela en 3D i s'exposa el model al programari de simulació computacional per fer l'anàlisi aerodinàmica. A continuació s'analitzen els resultats numèrics obtinguts amb el programa per finalitzar amb el plantejament de possibles millores aerodinàmiques que es podrien implementar sobre aquest vehicle.

## **ABSTRACT**

The importance of aerodynamics in buggies has increased in recent years due to the introduction of electric vehicles, where efficiency is a factor that directly affects the autonomy of the vehicle. This project includes the aerodynamic study of a scale model of a buggy using a Computational Fluid Dynamics (CFD) program called Autodesk CFD. In the memory, the basic concepts of aerodynamics are described as an introduction to the subject and the main aerodynamic parts of the buggies and of the buggy studied are identified. The model is modeled in 3D and exposed to computer simulation software for aerodynamic analysis. Next, the numerical results obtained with the program are analyzed to end with the approach of possible aerodynamic improvements that could be implemented on this vehicle.





---

# Índex del TFG

---

<b>1. Introducció.....</b>	<b>13</b>
1.1. Objectius del treball .....	13
1.2. Abast del treball .....	14
1.3. Metodologia .....	14
<b>2. Introducció a l'aerodinàmica .....</b>	<b>15</b>
2.1. Antecedents de l'aerodinàmica en els vehicles .....	15
2.2. Principis de l'aerodinàmica .....	16
2.2.1. Forces aerodinàmiques .....	16
2.2.2. Línies de corrent i distribució de les velocitats. ....	19
2.2.3. Flux laminar i flux turbulent .....	19
2.2.4. La capa límit .....	20
2.2.5. Propietats del fluid .....	21
2.2.6. Número de Reynolds .....	22
2.2.7. Principi de Bernoulli .....	22
2.2.8. Efecte Venturi .....	24
<b>3. Els buggys .....</b>	<b>25</b>
3.1. Introducció als buggys .....	25
3.2. L'aerodinàmica dels buggys.....	26
<b>4. El model a escala .....</b>	<b>27</b>
4.1. Kyosho Inferno MP9E .....	28
4.2. Estudi de velocitats .....	28
<b>5. Elements aerodinàmics del model .....</b>	<b>30</b>
5.1. Aleró .....	30
5.1.1. Les ales múltiples .....	30
5.2. <i>End plates</i> .....	31

5.3. Fons pla.....	32
5.3.1. Efecte terra .....	33
<b>6. El model 3D.....</b>	<b>34</b>
6.1. Carrosseria i xassís .....	35
6.2. Aleró posterior .....	35
6.3. Les rodes.....	36
6.4. Suspensió.....	36
<b>7. Simulació dinàmica de fluids computacional.....</b>	<b>37</b>
7.1. Autodesk CFD 2023.....	37
7.2. La geometria.....	38
7.3. Els materials .....	40
7.4. Les condicions de contorn .....	42
7.4. La malla .....	44
7.5. Anàlisi de resultats.....	47
7.5.1. Estudi a velocitat mitjana de 13,5 km/h .....	47
7.5.2. Estudi a velocitat màxima de 57,7 km/h .....	53
<b>8. Millores aerodinàmiques del model a escala .....</b>	<b>58</b>
<b>9. Conclusions.....</b>	<b>59</b>
<b>10. Bibliografia.....</b>	<b>60</b>
<b>11. Annexos .....</b>	<b>62</b>
01.- Annex I. El model 3D.....	62
02.- Annex II. Estudi a velocitat mitjana de 13,5 km/h.....	68
03.- Annex III. Estudi a velocitat màxima de 57,7 km/h.....	74

---

## Índex de figures

---

Figura 1. Concepte de streamline. ....	15
Figura 2. Un anunci del 1930 que mostrava l'aerodinàmica dels cotxes. ....	16
Figura 3. Forces aerodinàmiques sobre un perfil alar.....	17
Figura 4. Coeficients de drag mesurats.....	18
Figura 5. Distribució de velocitats sobre una placa plana. ....	19
Figura 6. Zones de la capa límit.....	21
Figura 7. Tipus de flux segons el número de Reynolds. ....	22
Figura 8. Concepte del Principi de Bernoulli.....	23
Figura 9. Concepte del principi de la continuïtat. ....	24
Figura 10. Efecte Venturi. ....	24
Figura 11. Volkswagen Buggy.....	25
Figura 12. Red Bull SMG buggy. ....	26
Figura 13. Buggy a escala 1:8. ....	28
Figura 14. Track del recorregut realitzat.....	29
Figura 15. Gràfic de velocitat.....	29
Figura 16. Velocitat mitja i màxima. ....	29
Figura 17. Aleró posterior del model. ....	30
Figura 18. Efecte de l'ala múltiple ....	31
Figura 19. Tipus d'ala múltiple. ....	31
Figura 20. Diferència de pressions end plate.....	31
Figura 21. Reducció de vòrtex end plate. ....	32
Figura 22. Fons pla del model. ....	32
Figura 23. Efecte terra aplicat a un vehicle. ....	33
Figura 24. Model 3D del Efecte terra aplicat a un vehicle.....	34
Figura 25. Carrosseria i xassís.....	35
Figura 26. Aleró posterior.....	36

---

Figura 27. Les rodes.....	36
Figura 28. La suspensió.....	36
Figura 29. Menú SetUp Autodesk CFD.....	37
Figura 30. Dimensions optimes.....	38
Figura 31. Dimensions del volum tancat del model.....	38
Figura 32. Edges to be merged. ....	39
Figura 33. Small object remove.....	39
Figura 34. Model 3D a Autodesk CFD. ....	40
Figura 35. Definició del fluid.....	40
Figura 36. Propietats de l'aire en condicions normals. ....	41
Figura 37. Definició del sòlid.....	41
Figura 38. Material definit. ....	42
Figura 39. Condió de contorn de velocitat. ....	42
Figura 40. Condió de contorn de pressió. ....	43
Figura 41. Condió de contorn de terra lliscant.....	43
Figura 42. Condicions de contorn.....	44
Figura 43. Elements i nodes de la malla. ....	44
Figura 44. La malla.....	45
Figura 45. Malla adaptativa local.....	45
Figura 46. Malla adaptativa a l'aleró.....	46
Figura 47. Resultats iterats per l'estudi de 13,5 km/h.....	46
Figura 48. Resultats iterats per l'estudi de 57,7 km/h.....	46
Figura 49. Vista isomètrica superior pressió total. ....	47
Figura 50. Vista isomètrica inferior pressió total. ....	48
Figura 51. Vista lateral pressió total. ....	49
Figura 52. Vista planta pressió total. ....	49
Figura 53. Vista lateral velocitat de l'aire.....	50
Figura 54. Vista planta velocitat de l'aire.....	50

---

---

<b>Figura 55. Vista lateral punts despreniment capa límit. ....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 56. Vista lateral línies de corrent. ....</b>	<b>51</b>
<b>Figura 57. Vista isomètrica línies de corrent. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 58. Resultats numèrics estudi 13,5 km/h. ....</b>	<b>52</b>
<b>Figura 59. Vista isomètrica superior pressió total. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 60. Vista isomètrica inferior pressió total. ....</b>	<b>53</b>
<b>Figura 61. Vista lateral pressió total. ....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 62. Vista planta pressió total. ....</b>	<b>54</b>
<b>Figura 63. Vista lateral velocitat de l'aire. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 64. Vista planta velocitat de l'aire. ....</b>	<b>55</b>
<b>Figura 65. Vista lateral línies de corrent. ....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 66. Resultats numèrics estudi 57,7 km/h. ....</b>	<b>56</b>
<b>Figura 67. Taula de resultats numèrics. ....</b>	<b>56</b>



# 1. Introducció

## 1.1. Objectius del treball

L'objectiu d'aquest projecte és fer un estudi de les possibles millores aerodinàmiques d'un model a escala d'un buggy de competició en el qual també s'inclouen els següents objectius parcials:

- **Adquirir bases teòriques de l'aerodinàmica:** Obtenir un coneixement sobre els principis bàsics de l'aerodinàmica, incloent-hi conceptes com la resistència aerodinàmica, la sustentació, el flux laminar i el turbulent, entre d'altres. Això proporcionarà la base teòrica necessària per analitzar el comportament aerodinàmic del buggy.
- **Identificar les principals parts aerodinàmiques del buggy:** Identificar les diferents parts i components del buggy que influeixen en el seu comportament aerodinàmic, com el xassís, carrosseria, alerons, entre d'altres.
- **Modelar en 3D un buggy a escala:** L'objectiu principal és desenvolupar el model virtual 3D d'un buggy a escala, tenint en compte els principals elements aerodinàmics i les consideracions tècniques.
- **Aprendre simulació computacional de fluids:** Es pretén adquirir coneixements en l'ús de programari de simulació computacional per fer anàlisis i simulacions aerodinàmiques del buggy.
- **Interpretar els resultats aerodinàmics:** Analitzar i comprendre els resultats obtinguts de les simulacions aerodinàmiques, avaluant l'impacte dels diferents components del buggy.
- **Determinar els coeficients aerodinàmics:** L'objectiu és calcular i determinar els coeficients aerodinàmics del buggy, com el coeficient d'arrossegament ( $C_D$ ), el coeficient de sustentació ( $C_L$ ) i altres paràmetres per avaluar-ne el rendiment aerodinàmic.
- **Comentar possibles millores aerodinàmiques del buggy:** Proposar i discutir possibles millores aerodinàmiques per al buggy, basades en els resultats obtinguts durant l'estudi. Es consideraran aspectes com ara la reducció de la resistència a l'avanç i l'optimització de l'eficiència energètica.

## 1.2. Abast del treball

El treball es centrarà en l'anàlisi aerodinàmic d'un model a escala d'un buggy i en comentar les possibles millores aerodinàmiques basades en els resultats obtinguts que millorin la seva eficiència aerodinàmica. No profunditzarà en els aspectes tècnics del modelatge 3D, ni tampoc s'hi inclourà l'anàlisi aerodinàmica d'altres aspectes com l'efecte de l'aerodinàmica sobre el comportament del vehicle o l'extrapolació dels resultats a un buggy d'escala real. L'anàlisi avaluarà els coeficients de sustentació i d'arrossegament a diferents velocitats i el comportament del flux d'aire en entrar en contacte amb el model. No es realitzaran modificacions als components del vehicle, les propostes de disseny es basaran en millores teòriques i en les simulacions ja que es disposa d'un pressupost i uns recursos baixos i un temps limitat.

## 1.3. Metodologia

Per aquest projecte s'utilitzarà una metodologia basada en l'elaboració d'un model 3D seguit d'una simulació de fluids computacional, seguint els següents punts:

1. Recerca i estudi dels principis teòrics de l'aerodinàmica en articles, blocs i llibres.
2. Estudi dels elements aerodinàmics dels buggys i del model estudiat.
3. Preparació del model CAD 3D del buggy utilitzant el programari de disseny assistit per ordinador CATIA-V5.
4. Realització de simulacions computacionals utilitzant el programari de dinàmica de fluids computacional Autodesk CFD.
5. Anàlisi de resultats de les simulacions per identificar àrees de millora aerodinàmica.
6. Presentació de millores aerodinàmiques basades en els principis teòrics de l'aerodinàmica i els resultats obtinguts de les simulacions.



## 2. Introducció a l'aerodinàmica

L'aerodinàmica és l'àrea de la mecànica de fluids que es dedica a analitzar el moviment i les interaccions dels gasos sobre els cossos estacionats o que es mouen a través d'ell.

L'objectiu principal de l'aerodinàmica és l'estudi del comportament de l'aire o de diferents masses de gasos quan entren en moviment amb objectes sòlids com una ala d'un avió o un aleró. Aquest estudi permet conèixer informació sobre fenòmens com ara la velocitat, la densitat de l'aire, la temperatura, la pressió, la gravetat, etc.

Les primeres formes d'estudi sobre els fenòmens aerodinàmics ens porten a l'antiguitat (segle XVIII), on principalment s'aplicava a l'aviació. En aquesta època, els primers matemàtics i físics van aconseguir establir les principals característiques d'alguns fenòmens de l'aerodinàmica. Posteriorment, personatges com Leonardo da Vinci, Galileu i Isaac Newton van col·laborar a comprendre el moviment de l'aire al voltant d'objectes.

Tots aquests avenços han permès perfeccionar el comportament aerodinàmic en una multitud d'aplicacions que s'utilitzaran de base per a la realització d'aquest TFG.

### 2.1. Antecedents de l'aerodinàmica en els vehicles

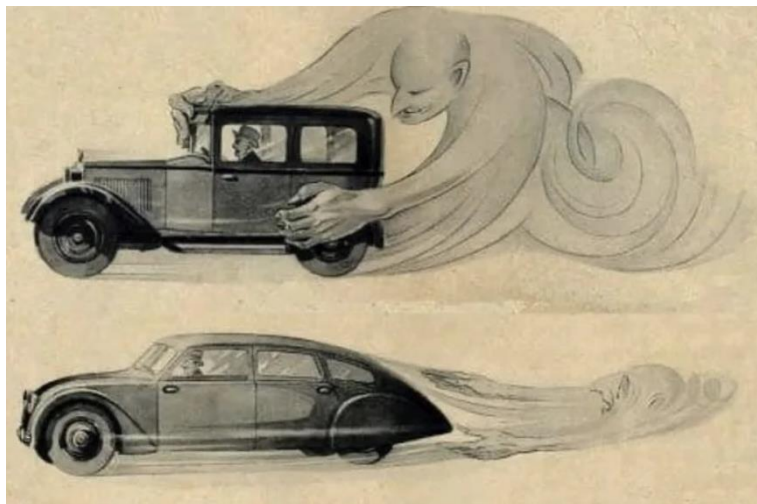
A principis del segle XX es van començar a construir vehicles en massa, on els principals objectius eren un muntatge fàcil i una ràpida capacitat de producció, ja que estava relacionat directament amb el preu de venda.

No va ser fins a principis de la dècada dels anys trenta, quan científics i enginyers van començar a replantejar-se la importància de l'aerodinàmica en els dissenys, i com això influïa directament en el rendiment dels vehicles, millorant-ne les prestacions i el consum. En aquesta època va sorgir el concepte de *streamline*, que amb formes futuristes i arrodonides permetien construir vehicles més refinats i de formes elegants.



**Figura 1.** Concepte de *streamline*.

Gràcies a aquests avenços es va començar a utilitzar l'aerodinàmica no només per un tema estètic, sinó que també va permetre reduir la resistència a l'avanç, el consum de combustible i també variar la càrrega que s'aplicava sobre les rodes, millorant la seguretat i el maneig dels automòbils així com les condicions acústiques de l'habitacle.



*Figura 2. Un anunci del 1930 que mostrava l'aerodinàmica dels cotxes.*

Finalment, entre les dècades dels anys 1950 i 1960, els investigadors van aconseguir comprendre que les mateixes forces generades per un perfil alar que eren capaces de sostenir un avió a l'aire, si s'invertia la geometria, eren capaços d'enganxar un vehicle a terra, dotant-lo d'una subjecció extra. Així també s'evitava la sustentació positiva que produïen els vehicles a altes velocitats i que, en alguns casos, provocava que els cotxes perdessin adherència fins a arribar a elevar-se de l'asfalt.

## **2.2. Principis de l'aerodinàmica**

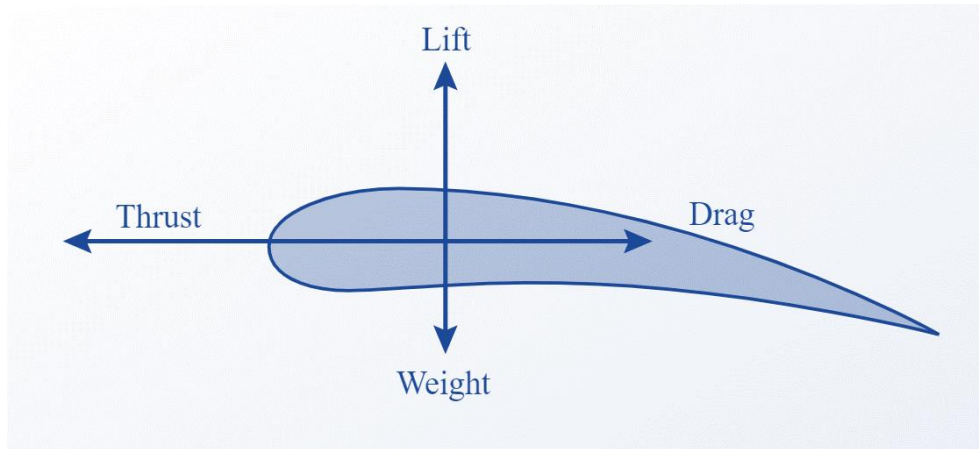
Els principis físics fonamentals que regeixen els comportaments aerodinàmics estan basats principalment en el camp de l'aviació i és tal com es descriuran en aquests punts. Més endavant es definirà la seva aplicació al camp de l'automobilisme.

### **2.2.1. Forces aerodinàmiques**

Les principals forces que actuen sobre un cos a causa de l'aire que passa a través d'ell són les següents:

- Força de sustentació (sustentació o *lift*): és el component de la força perpendicular a la direcció del moviment relatiu.
- Força de resistència (arrossegament o *drag*): el component de la força paral·lela a la direcció del moviment relatiu.

- Força d'empenta (empenta o *thrust*): és la força generada per l'acceleració del perfil.
- Força gravitatòria (pes o *weight*): és la força deguda al pes del perfil.



**Figura 3.** Forces aerodinàmiques sobre un perfil alar.

Tant la força de sustentació com la força de resistència són forces que es basen en la tercera llei de Newton o principi d'acció i reacció, que estableix que quan dos cossos interaccionen apareixen forces iguals i de sentits oposats. En el nostre cas, la força amb què impacten les partícules d'aire contra el perfil d'una ala crea les reaccions en sentit contrari anomenades resistència i sustentació, com s'ha dit anteriorment.

#### **- Drag coefficient:**

En dinàmica de fluids, el coeficient d'arrossegament ( $C_D$  – *Drag coefficient*) és una quantitat adimensional que s'utilitza per quantificar la resistència d'un objecte en un fluid, com l'aire o l'aigua. Un coeficient d'arrossegament baix indica que l'objecte tindrà menys resistència aerodinàmica.

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

On:

- $F_D$ : és la força d'arrossegament en la direcció de la velocitat del flux.
- $\rho$ : és la densitat del fluid.
- $u$ : és la velocitat del fluid.
- $A$ : és l'àrea de referència.

El coeficient d'arrossegament va lligat a una superfície determinada. Aquesta àrea de referència depèn del tipus de coeficient d'arrossegament que s'està mesurant. Per als automòbils i la majoria objectes, l'àrea de referència és l'àrea frontal projectada. Per als perfils aerodinàmics, l'àrea de referència és l'àrea nominal de l'ala. Com que aquesta tendeix a ser gran, els coeficients d'arrossegament resultants solen ser baixos.

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

**Figura 4.** Coeficients de drag mesurats.

### **- Lift coeficient:**

El coeficient de sustentació ( $C_L$  – *Lift coeficient*) és una quantitat adimensional que descriu la quantitat de sustentació generada per un perfil aerodinàmic o una ala. És la relació entre la força de sustentació, la densitat del fluid al voltant, la velocitat del fluid i l'àrea de referència. Es pot expressar matemàticament com:

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

On:

- $F_L$ : és la força de sustentació perpendicular a la direcció del flux.

El coeficient de sustentació varia amb l'angle d'atac de l'ala. Amb angles d'atac baixos, el coeficient de sustentació és petit i a mesura que augmenta l'angle d'atac, el coeficient de sustentació augmenta fins al punt de sustentació màxima. A partir d'aquest punt, el coeficient de sustentació disminueix dràsticament produint una pèrdua de sustentació.

### 2.2.2. Línies de corrent i distribució de les velocitats.

Una línia de corrent és una corba imaginària descrita a través d'un flux en moviment i que indiquen la seva direcció en els diversos punts del flux. La tangent en un punt de la corba representa la direcció i la velocitat instantània de la partícula que flueix en aquest punt.

Quan un objecte es mou a través d'aire en repòs, la seva forma altera les partícules d'aire de tal manera que la velocitat no és la mateixa a tots els punts del flux. La magnitud d'aquestes velocitats es descriuen en els diagrames de distribució de velocitats.

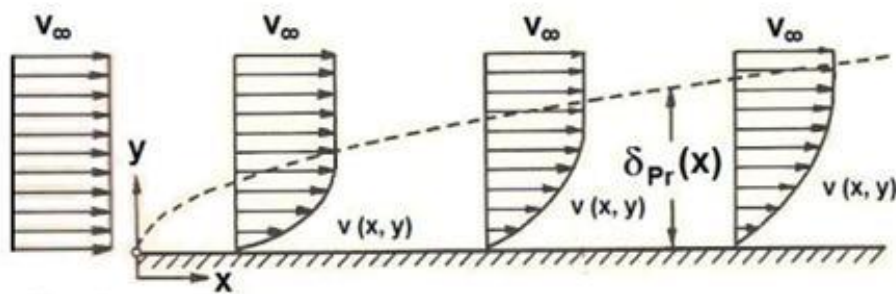


Figura 5. Distribució de velocitats sobre una placa plana.

En el diagrama de distribució de velocitats es pot observar com la velocitat del flux es redueix a mesura que s'acosta a la placa fins a arribar a zero. En aquest punt s'obté la condició de no lliscament, on el fluid té una velocitat nul·la respecte a l'objecte, és a dir, les partícules d'aire viatgen enganxades al cos. En allunyar-nos, l'aire va incrementant la velocitat fins a igualar la del flux que no és pertorbat per l'objecte. Aquesta zona de transició rep el nom de capa límit, que es descriurà amb més detall seguidament.

### 2.2.3. Flux laminar i flux turbulent

Tots els fluxos es poden caracteritzar en flux laminar o turbulent. La diferència entre tots dos ve determinada pel comportament de la seva distribució de velocitats i les seves línies de corrent. Les forces aerodinàmiques poden canviar dràsticament entre aquests dos tipus de flux. Per norma general, si un vehicle es mou en un flux d'aire sense pertorbar, es considera que és un flux laminar. Encara que és possible que si hi ha vents o altres vehicles en moviment, el flux pot canviar a turbulent i això pot afectar el rendiment del vehicle.

#### - Flux laminar:

En la dinàmica de fluids, el flux laminar es caracteritza per trajectòries suaus i regulars de les partícules que segueixen la direcció de la velocitat mitjana del flux. El fluid flueix en capes paral·leles, sense gairebé barrejar-se entre les capes.

- Flux turbulent:

El flux turbulent es distingeix pel moviment irregular de les partícules del fluid, i que es pot descriure com a caòtic. A diferència del flux laminar, hi ha interrupcions entre les capes i la barreja entre elles és molt significativa. En un flux turbulent, la velocitat del fluid en un punt experimenta canvis continus tant en magnitud com en direcció, i això fa que la turbulència es caracteritzi per la recirculació, els remolins i una aleatorietat aparent.

Comprendre amb detall el comportament del flux turbulent és crucial en enginyeria, ja que la majoria dels fluxos són turbulents. Malauradament, el caràcter irregular de la turbulència complica totes les anàlisis. L'eina principal per a l'anàlisi de la turbulència és l'anàlisi CFD, que mitjançant anàlisi numèrica i algorismes és capaç de mostrar solucions turbulentes.

#### **2.2.4. La capa límit**

La capa límit és la zona on el moviment del fluid és pertorbat per la presència del sòlid amb què està en contacte. Per exemple, la placa plana, el llit d'un riu o la paret d'una canonada, són cossos en el qual el fluid que toca la superfície s'atura per l'esforç tallant que té l'objecte. La capa límit s'entén com aquella zona en què la velocitat del fluid varia de zero respecte del sòlid, fins al 99% de la velocitat del fluid sense pertorbar.

Aquesta pot ser laminar o turbulenta, o les dues de manera simultània en la zona de transició. Molt sovint, resulta beneficiós que la capa límit esdevingui turbulenta, ja que permet que aquesta continuï adherida al perfil alar quan té un angle d'atac més gran que el que tindrà en la capa límit laminar, evitant així que el perfil entri en pèrdua pel fet que deixa de generar sustentació aerodinàmica pel desprendiment de la capa límit. D'altra banda, una capa límit turbulenta genera un comportament caòtic que produeix vòrtexs i, per tant, augmenta la fricció entre el fluid i el cos.

El gruix de la capa límit depèn de la velocitat i la viscositat del fluid, i la rugositat de la superfície. A velocitats baixes i amb fluids altament viscosos, la capa límit serà més gruixuda, igual que si la superfície és rugosa. En aplicacions pràctiques, el gruix és important perquè afecta la resistència al moviment del cos. Així, si es pot reduir el gruix de la capa límit, també es reduirà la resistència al moviment, cosa que pot ser molt important per a aplicacions com el disseny d'aeronaus o de vehicles de carreres.

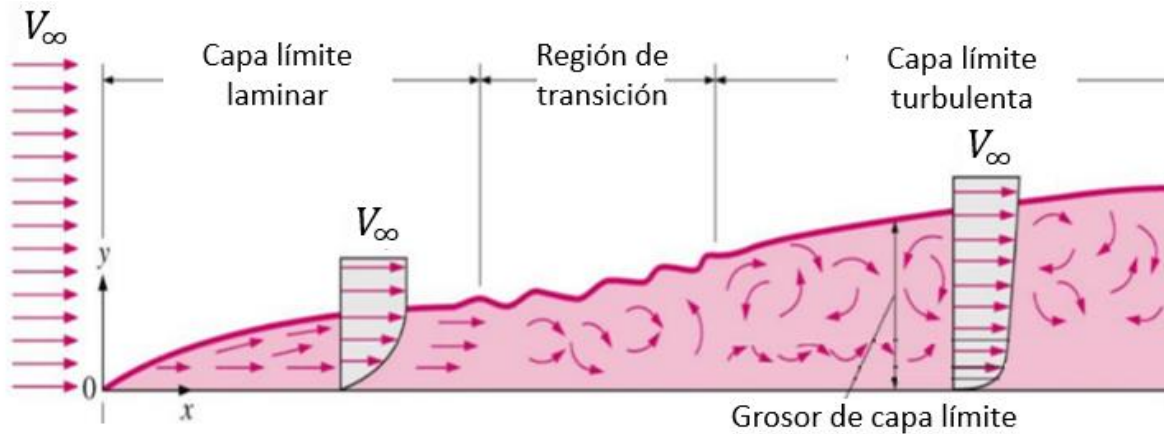


Figura 6. Zones de la capa límit.

### 2.2.5. Propietats del fluid

Les propietats del fluid són les característiques físiques que defineixen el seu comportament i, per tant, les forces experimentades per un cos en moviment a través d'ell. Les més importants són la temperatura, la pressió, la densitat, la viscositat, etc.

- Velocitat: És la quantitat de desplaçament del fluid que experimenta en un temps determinat. Se sol mesurar en metres per segon (m/s) o quilòmetres per hora (km/h) i pot variar en funció de les propietats del fluid i altres factors externs.
- Pressió: És la força per unitat de superfície i es mesura en Pa (Pascals). La pressió d'un fluid es transmet en totes les direccions i augmenta amb la profunditat.
- Temperatura: Quan augmenta, les molècules del fluid es mouen més ràpidament i, per tant, la seva energia cinètica augmenta. Les unitats de temperatura en l'estudi de fluids són els graus Celsius ( $^{\circ}\text{C}$ ).
- Densitat: És la massa per unitat de volum i es mesura en quilograms per metre cúbic ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ). Varia en funció de la temperatura i la pressió del fluid.
- Viscositat: És la resistència interna del fluid. Es pot mesurar en Pascal per segons (Pa·s). Els fluids amb alta viscositat flueixen més lentament que els fluids amb baixa viscositat, ja que requereix més energia per fluir.

### 2.2.6. Número de Reynolds

Aquest concepte deu el seu nom a l'enginyer i físic Osborne Reynolds (1842-1912), és un dels números adimensionals més utilitzats en la mecànica de fluids que permet descriure el comportament d'un fluid en moviment.

L'expressió general del número de Reynolds es defineix com la relació entre les forces inercials i les forces viscoses presents en un fluid, relacionant la densitat, la viscositat, la velocitat i la dimensió típica d'un determinat flux. S'expressa matemàticament com:

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

On  $\rho$  és la densitat del fluid,  $v$  la velocitat del flux,  $L$  la longitud característica (per exemple, la corda d'un perfil alar) i  $\mu$  la viscositat dinàmica del fluid. El seu valor s'encarrega d'indicar el tipus de moviment que adquireix, si és de tipus laminar o turbulent:

Règim	Velocitat mitja	Nº de Reynolds
Laminar	$V < V_{crítica}$	< 2000
Transitori	$V \approx V_{crítica}$	2000 - 3000
Turbulent	$V > V_{crítica}$	> 3000

*Figura 7. Tipus de flux segons el número de Reynolds.*

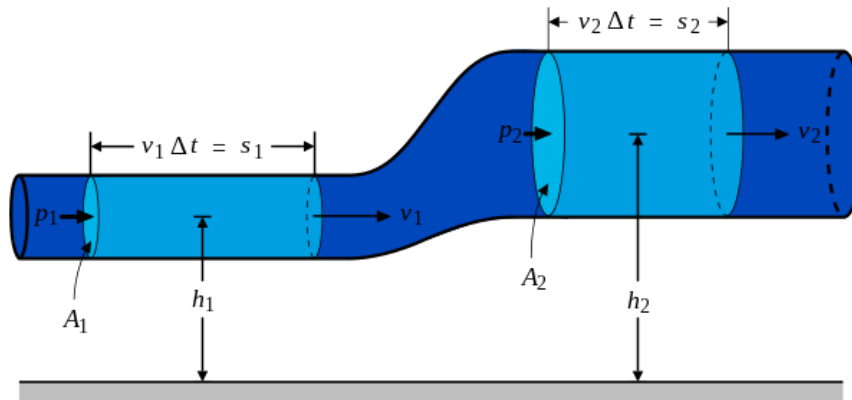
Una altra de les característiques del número de Reynolds és que dos fluxos es poden considerar equivalents si el número de Reynolds és igual. Això permet fer experiments sobre models més petits.

### 2.2.7. Principi de Bernoulli

És el teorema exposat per Daniel Bernoulli (1700-1782), matemàtic, físic i estadista holandès. Aquest principi descriu el comportament d'un fluid movent-se al llarg d'una línia de corrent i expressa que, l'energia que posseeix un fluid ideal (sense viscositat ni fregament) en circulació per un conducte tancat, roman constant al llarg de tot el recorregut.



L'equació de Bernoulli estableix que la pressió d'un fluid en moviment disminueix a mesura que augmenta la seva velocitat i viceversa, mantenint la suma de la pressió estàtica, la pressió dinàmica i l'energia del fluid constant al llarg d'una línia de corrent.



**Figura 8.** Concepte del Principi de Bernoulli.

La fórmula matemàtica del principi de Bernoulli consta dels termes següents.

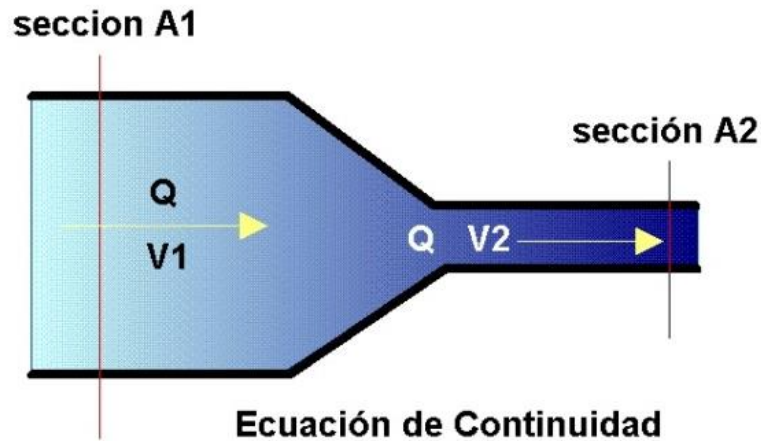
$$P_1 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_1^2 + \rho \cdot g \cdot h_1 = P_2 + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_2^2 + \rho \cdot g \cdot h_2$$

On:

- P = Pressió al llarg de la línia de corrent (MPa)
- $\rho$  = Densitat del fluid ( $\text{kg/m}^3$ )
- v = Velocitat del fluid (m/s)
- g = Acceleració de la gravetat ( $\text{m/s}^2$ )
- h = Alçada (m)

Assumint un flux de densitat constant (incompressible), es pot veure que la pressió disminueix amb el quadrat de la velocitat. Un exemple pràctic del principi de Bernoulli és que per crear sustentació negativa en un vehicle, cal crear un flux més ràpid a la part inferior del cotxe respecte de la part superior. Això provocarà una menor pressió a la part inferior fet que provocarà una força neta cap avall.

De l'anterior teorema també se'n deriva el comportament d'un fluid dins d'un conducte. Quan un fluid circula per un conducte de diàmetre variable, la velocitat és inversament proporcional a la superfície de la secció transversal del conducte.



**Figura 9.** Concepte del principi de la continuïtat.

La següent equació descriu el que s'observa a la imatge anterior

$$A_1 \cdot v_1 = A_2 \cdot v_2 = cte.$$

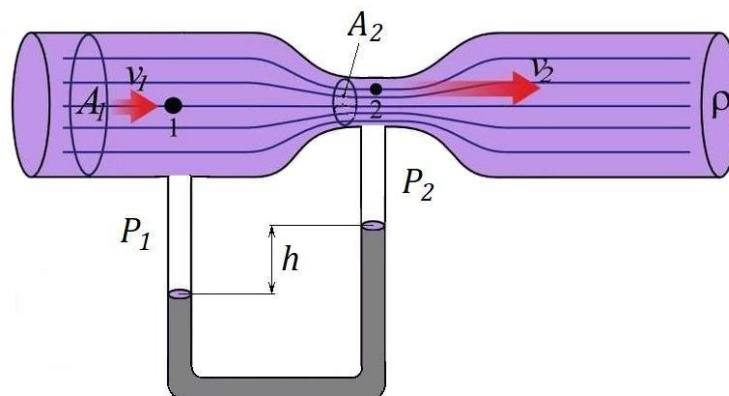
On el cabal  $Q$  és igual a la velocitat del fluid  $v$  per l'àrea  $A$  del conducte per on circula:

$$Q = A \cdot v$$

### 2.2.8. Efecte Venturi

L'efecte Venturi és un fenomen físic que involucra els dos principis esmentats anteriorment, ja que relaciona la pressió i la velocitat del fluid quan aquest passa a través d'un conducte de secció variable, causant una disminució de la pressió i un augment de la velocitat en les seccions més estretes del conducte.

Això es deu al fet que, quan el fluid es mou a través de la secció més estreta del conducte, la velocitat del fluid augmenta (principi de Bernoulli), cosa que fa disminuir la pressió en aquesta secció (efecte Venturi), i oposadament.



**Figura 10.** Efecte Venturi.

### 3. Els buggys

#### 3.1. Introducció als buggys

Un buggy és un vehicle tot terreny lleuger (*off-road*), dissenyat per conduir-se en terrenys irregulars de sorra com dunes, platges, camins rocosos i altres terrenys accidentats. El primer buggy va ser construït el 1965 pel jove Bruce F. Meyers sobre la base del vehicle Volkswagen Escarabat. El model s'anomenava *bug* (bestiola en anglès), el qual el seu diminutiu és buggy. Avui hi ha buggys de tots tipus, des de models de producció fins a vehicles totalment artesanals. Aquests vehicles són molt populars tant per la part lúdica o competitiva, com pels exèrcits i el seu ús en treballs al camp, gràcies a la seva maniobrabilitat i capacitat en tot terreny.



*Figura 11. Volkswagen Buggy.*

Un buggy té quatre rodes grans en proporció al vehicle i una carrosseria minimalista, amb una suspensió elevada i un motor potent. Solen estar equipats amb gàbies de protecció, cinturons de seguretat i altres dispositius de seguretat per al conductor i els passatgers. Per norma general, la disposició del motor és al darrere igual que la tracció, tot i que actualment també s'estan creant models amb tracció a les quatre rodes.

Al Dakar, històricament, els buggyes han tingut una bona presència, ja que són vehicles tot terreny lleugers i ràpids molt adequats per aquest tipus de terrenys per la seva agilitat i capacitat de circular per terrenys sorrencs o rocosos a altes velocitats.

### 3.2. L'aerodinàmica dels buggys

L'aerodinàmica en un buggy, tot i ser un factor que pot semblar que no s'ha de tenir molt en compte, és un element important en el disseny, ja que pot afectar la seva eficiència i l'estabilitat al terreny. A més a més, la importància de l'aerodinàmica ha augmentat aquests darrers anys, ja que la introducció de vehicles elèctrics és un factor que afecta directament l'eficiència energètica del vehicle, cosa que pot augmentar l'autonomia del cotxe elèctric.

En els buggys, l'aerodinàmica se centra en tres punts. El primer és l'estudi de la resistència de l'aire (o *drag*), el segon la sustentació (o *lift*) i per últim el coeficients aerodinàmics ( $C_D$  i  $C_L$ ) per aconseguir un disseny que permeti una major velocitat i un millor rendiment. Aquests tres punts seran els que es tindran en compte a l'hora de fer l'estudi aerodinàmic del model a escala.

Una de les principals estratègies que s'adopten per millorar l'aerodinàmica d'un buggy i reduir la resistència de l'aire, és utilitzar un disseny aerodinàmic i de perfil baix que redueixi la superfície total frontal del vehicle, així com components que s'ajustin bé i no creïn protuberàncies innecessàries, tant en la carrosseria com en els components mecànics. També es poden afegir difusors per redirigir el flux d'aire al voltant del vehicle i aletes i deflectors per millorar la sustentació i l'estabilitat a altes velocitats.



**Figura 12.** Red Bull SMG buggy.

## 4. El model a escala

Els models a escala s'utilitzen en enginyeria, disseny i investigació per provar i millorar els dissenys abans de produir l'objecte definitiu a gran escala, ja que permet estudiar-ne el comportament en condicions similars a les reals. Això permet ajudar a estalviar temps i diners, ja que és possible provar dissenys i solucions, i identificar possibles problemes i riscos abans que passin a la realitat.

Existeixen molts tipus de models a escala com poden ser maquetes, prototips, simulacions en 3D o models matemàtics. L'elecció del tipus de model depèn de l'objectiu i de les eines disponibles per a la construcció i l'anàlisi.

Pel que fa a la construcció, per aquest estudi es disposa d'un prototip d'un buggy a escala 1:8. Tot i això, també és important realitzar una taula ponderada per saber quin és el tipus de model que s'ajusta més a les nostres capacitats a l'hora de realitzar l'anàlisi aerodinàmic, ja que en funció del model, s'hauran d'aplicar anàlisis aerodinàmiques diferents i això pot suposar un cost elevat i/o recursos dels quals no es disposen.

Anàlisis de:	Cost	Recursos	Temps	Precisió	Total
<b>Model 3D</b>	1 (Molt Baix)	2 (Baix)	3 (Mig)	4 (Alt)	10
<b>Maqueta</b>	4 (Alt)	3 (Mig)	4 (Alt)	4 (Alt)	15
<b>Prototip</b>	5 (Molt Alt)	4 (Alt)	5 (Molt Alt)	5 (Molt Alt)	19

Observant la taula es pot veure que un prototip és el model que requereix de més recursos a l'hora de l'anàlisi, ja que al ser un model físic, l'anàlisi s'hauria de realitzar en un túnel de vent i això encareix molt el procés. Per tant, el model 3D, és el model a escala que s'ajusta més a les necessitats del projecte, ja que es disposa d'un pressupost i uns recursos baixos i un temps limitat. A més al ser un primer estudi, una precisió alta és suficient perquè els resultats siguin concloents.

En aquest cas el model a escala escollit és un prototip d'un buggy a escala 1:8 del qual se n'extrauran les dades per determinar un model 3D, que permetrà fer una simulació computacional aerodinàmica. Aquestes dades extretes d'un model a escala podrien implementar-se en un model real posteriorment, però aquest estudi no és l'objectiu del treball.

#### 4.1. Kyosho Inferno MP9E

Kyosho Inferno MP9E és un model a escala 1:8 d'un automòbil de carreres tot terreny elèctric dissenyat per a competicions d'alt nivell de RC (radiocontrol). És un model dissenyat per córrer en terrenys accidentats i amb obstacles, fet que fa que s'ajusti perfectament a les característiques i necessitats del model a estudiar, a més a més, compta amb una carrosseria aerodinàmica dissenyada per maximitzar el flux d'aire i millorar el rendiment del vehicle en les competicions. També inclou un motor elèctric *brushless* que tot i que és un element que no influeix directament a l'estudi aerodinàmic, s'apropa més a les característiques de les noves tecnologies elèctriques que van adoptant els buggys en l'actualitat.



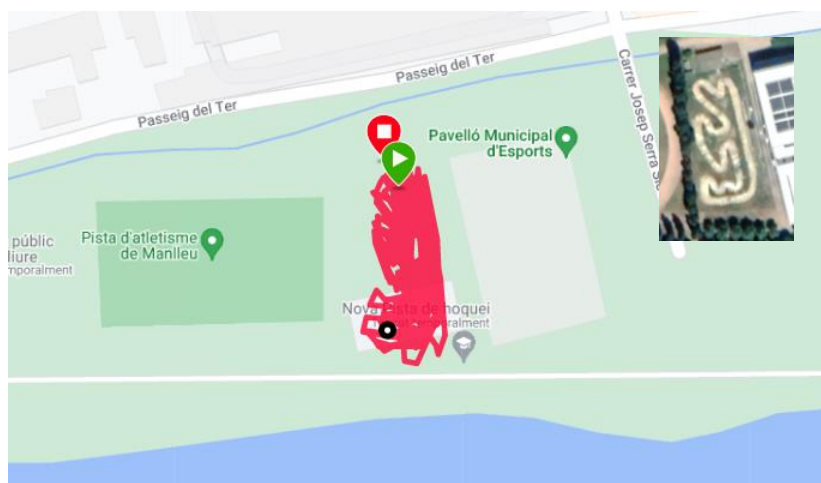
*Figura 13. Buggy a escala 1:8.*

#### 4.2. Estudi de velocitats

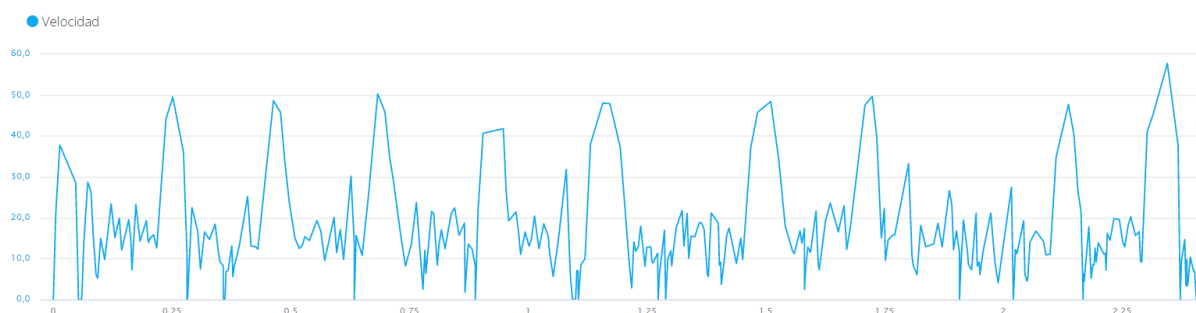
Una de les variables més importants a definir a la hora de realitzar l'estudi aerodinàmic del model a escala és la velocitat en la que circula el vehicle a través de l'aire, o dit d'una altra forma, la velocitat en la qual l'aire circula a través dels elements aerodinàmics que es volen estudiar del vehicle.

Per tal de conèixer aquestes dades, s'ha introduït un GPS en el model a escala 1:8 i s'han realitzat un total de 10 voltes en un circuit *off road* de competició, en el temps que dura la càrrega de la bateria (20 min aprox.).

Els resultats obtinguts són els següents:



**Figura 14.** Track del recorregut realitzat.



**Figura 15.** Gràfic de velocitat.

Del gràfic es pot extreure molta informació, com per exemple la distància total recorreguda pel vehicle durant els 20 minuts de 2,5 km o els 10 pics de velocitat, els quals concorden amb els 10 passades per la recta d'uns 80 metres. Es pot veure que la velocitat màxima s'ha obtingut a l'última volta.

13,5 km/h  
Velocidad media en movimiento

57,7 km/h  
Velocidad máxima

**Figura 16.** Velocitat mitjana i màxima.

De la telemetria es pot extreure la següent informació: la velocitat mitjana en moviment ha sigut de 13,5 km/h i la velocitat màxima en la recta de 57,7 km/h. Aquesta diferència tan gran és degut a que és un circuit molt revirat amb moltes corbes lentes. Aquestes dues dades de velocitat seran les que s'utilitzaran per realitzar l'estudi aerodinàmic del model a escala.

## 5. Elements aerodinàmics del model

Els elements aerodinàmics són components units a un objecte per millorar-ne l'aerodinàmica i reduir la resistència a l'aire. Existeixen infinitat d'elements aerodinàmics i gràcies a l'avanç de la tecnologia cada dia se'n descobreixen de nous. En els següents punts es detallaran quins són els principals elements aerodinàmics que incorpora el model estudiat.

### 5.1. Aleró

L'aleró és l'element aerodinàmic més comú que es pot trobar tant a la part anterior del cotxe, com a la part posterior i que ajuda a controlar el flux d'aire i millorar l'estabilitat a altes velocitats. En generar una força descendent a l'automòbil, els alerons ajuden a mantenir el vehicle en contacte amb la carretera i redueixen la possibilitat que s'aixequi per l'aire com ho faria una ala d'un avió.

Els alerons poden ser fixos o mòbils, i la forma i el disseny poden variar segons l'aplicació i l'objectiu de millorar l'aerodinàmica i l'estabilitat. Són elements que es troben a la part posterior d'un objecte, com a l'ala d'un avió o a la carrosseria d'un automòbil, que ajuden a controlar el flux d'aire i a millorar l'estabilitat. Com s'observa, el buggy en el qual es realitza l'estudi disposa d'aleró posterior que compleix totes aquestes característiques.



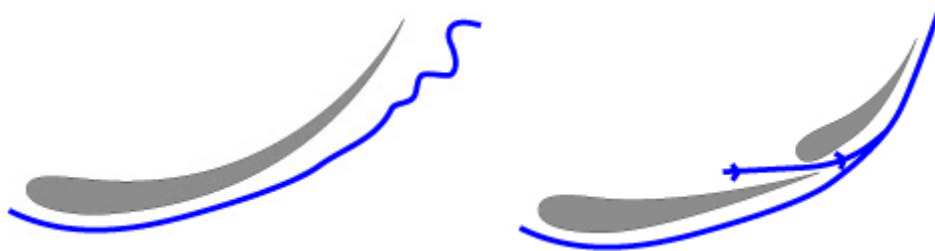
*Figura 17. Aleró posterior del model.*

#### 5.1.1. Les ales múltiples

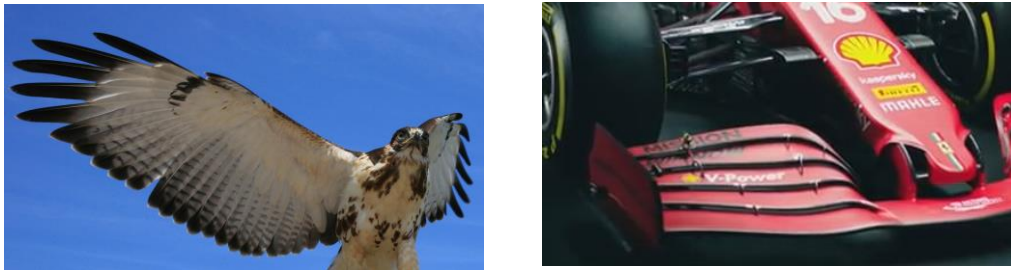
Com s'observa, l'ala està configurada per dos perfils, i per tant es considera una ala múltiple. Aquest mètode s'utilitza degut a que, quan a un perfil se li augmenta l'angle d'atac, aquest provoca un augment del flux d'aire que circula per la part inferior del perfil. Això causa una major pressió a la part superior, cosa que genera una força descendent, o *down force*. No obstant això, també produeix un augment de la resistència a l'avanç o *drag* pel fet que es produeix un despreniment de la capa límit en un punt més avançat del perfil alar. Per evitar aquest despreniment tan prematur, se situen un o més perfils alars a continuació de l'existent deixant una petita escletxa entre ells, que té la funció d'accelerar l'aire i disminuir la seva



pressió en aquest punt, retardant així el despreniment de la capa límit. Per tant, es pot augmentar l'angle d'atac del perfil, arribant a un angle d'atac més alt, sense tenir una pèrdua de sustentació i reduint el *drag*.



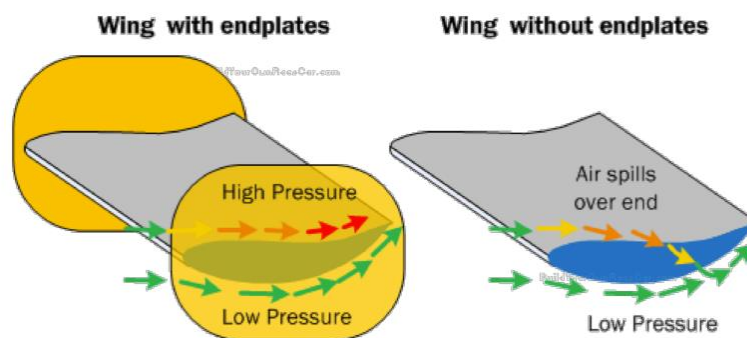
**Figura 18.** Efecte de l'ala múltiple



**Figura 19.** Tipus d'ala múltiple.

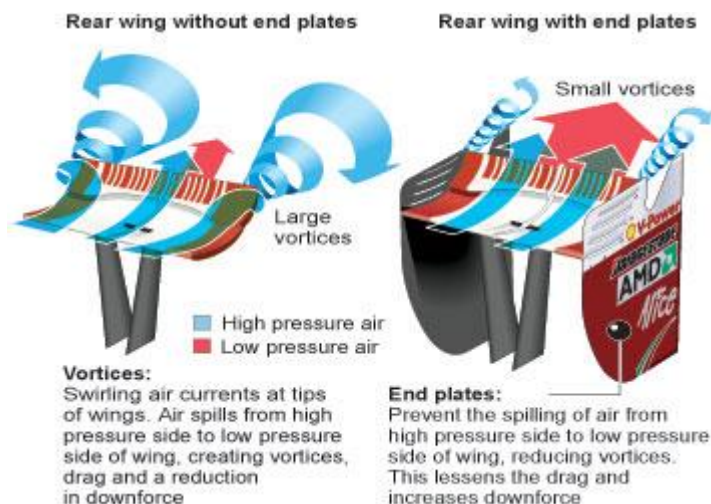
## 5.2. End plates

Els *end plates* (o *winglets*) són dispositius aerodinàmics que s'uneixen a les puntes d'una ala o d'un aleró per millorar el rendiment aerodinàmic i reduir el consum del vehicle. Aquests, són els encarregats de minimitzar la formació dels vòrtexs que es generen als extrems d'un aleró degut a la diferència de pressions entre la part superior i la part inferior de l'aleró. Tenen diferents formes i mides, depenent dels requisits de disseny.



**Figura 20.** Diferència de pressions end plate.

Al tenir una pressió alta a la part superior de l'ala i una pressió baixa a la part inferior, produeix que les partícules d'aire, per tal de compensar les pressions, circulin de la part superior cap a la part inferior, reduint la seva superfície efectiva de l'aleró i creant un remolí d'aire a l'extrem, que provoca una pèrdua d'energia i un augment de la resistència a l'aire.

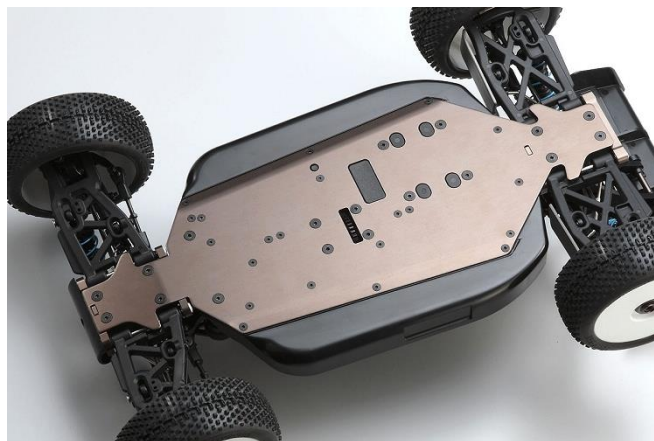


**Figura 21.** Reducció de vòrtex end plate.

Els *end plates* estan dissenyats per reduir els efectes d'aquest augment de resistència d'arrossegament i la pèrdua de sustentació generada pels vòrtexs, millorant l'eficiència general. Col·locant-los en els extrems dels alerons, fan de barrera entre la zona d'alta pressió i la zona de baixa pressió de l'ala fent que les partícules d'aire no puguin recircular entre aquests dos punts i, per tant, augmentant la superfície efectiva de l'aleró i la seva eficiència.

### 5.3. Fons pla

En aerodinàmica, el terme fons pla descriu la superfície plana de la part inferior d'un vehicle. Aquest, és un element que és troba en vehicles de competició i automòbils esportius.

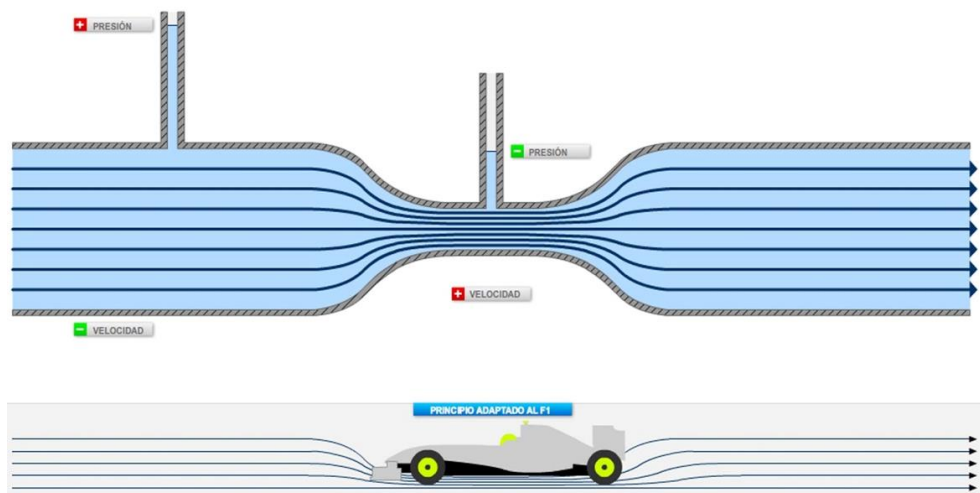


**Figura 22.** Fons pla del model.

El fons pla té com a objectiu principal millorar l'aerodinàmica reduint la resistència a l'avanç i augmentant l'estabilitat del vehicle. Al tenir una superfície plana a la part inferior del vehicle, es redueix la resistència aerodinàmica, ja que es minimitza la generació de turbulències. A més a més, permet generar *down force* gràcies al fenomen de l'efecte terra que es descriurà en el següent punt. El seu disseny pot incloure difusors i altres elements aerodinàmics addicionals per optimitzar el flux d'aire i maximitzar l'efecte de succió. En aquest cas, no disposa de cap element aerodinàmic addicional.

### 5.3.1. Efecte terra

L'efecte terra és un fenomen aerodinàmic vessat en l'efecte Venturi i que es produeix quan un vehicle circula proper al terra. L'efecte Venturi, descrit anteriorment, diu que quan un fluid circula a través d'una secció estreta d'un conducte, el fluid s'accelera, fet que fa disminuir la pressió en aquesta zona. Per tant, quan un flux d'aire circula per sota el vehicle, s'accelera en passar per la zona estreta que queda entre el terra i el fons pla, generant una baixa pressió a la zona inferior del vehicle. Això crea una diferència de pressió entre la part inferior i la part superior del vehicle, generant sustentació negativa o *down force*. Com més estret és aquest espai entre el terra i el fons pla, més s'accelera el fluid i més baixa la pressió, creant més sustentació negativa.



**Figura 23.** Efecte terra aplicat a un vehicle.

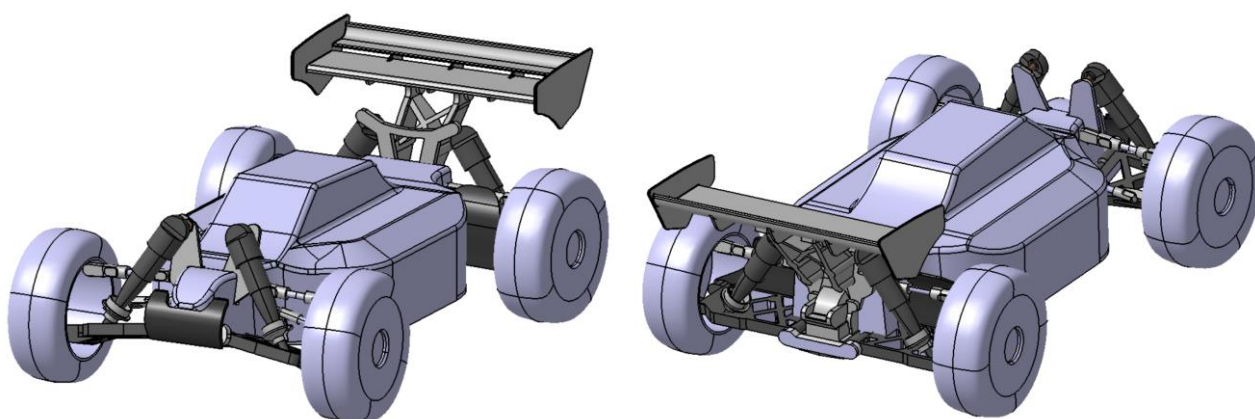
## 6. El model 3D

El modelatge 3D és la part més laboriosa d'un estudi, ja que implica la creació d'un model 3D des de zero, utilitzant un programa de modelatge 3D. En aquest cas el programa emprat ha sigut el CATIA V5, perquè és el que s'ha fet servir a la universitat per fer treballs en diferents assignatures.

Per començar el modelatge és important tenir una comprensió completa de la forma i les proporcions de l'objecte que s'està creant, realitzant una investigació detallada i recopilant fotografies i dimensions detallades per evitar problemes i errors en les simulacions posteriors. Tots aquests passos s'han facilitat al tenir el model real físic, que ha permès poder prendre mides i imatges al detall per tal de poder dur a terme un model 3D acurat (**01.- Annex I. El model 3D.**).

Tot i això, crear un model 3D amb excés de detall també pot suposar un obstacle en l'estudi, ja que al fer servir programari de simulació, que divideix el model en milions de petits elements de malla, pot requerir un excés de recursos en l'ordinador i temps de càlcul que no es disposa, si aquesta malla generada és massa complexa. Per tant, simplificar el model reduint el nombre d'elements de la malla, pot fer que la simulació sigui molt més ràpida, a més d'ajudar a identificar les parts del vehicle que són més importants des del punt de vista aerodinàmic i que requereixen una especial atenció en el disseny.

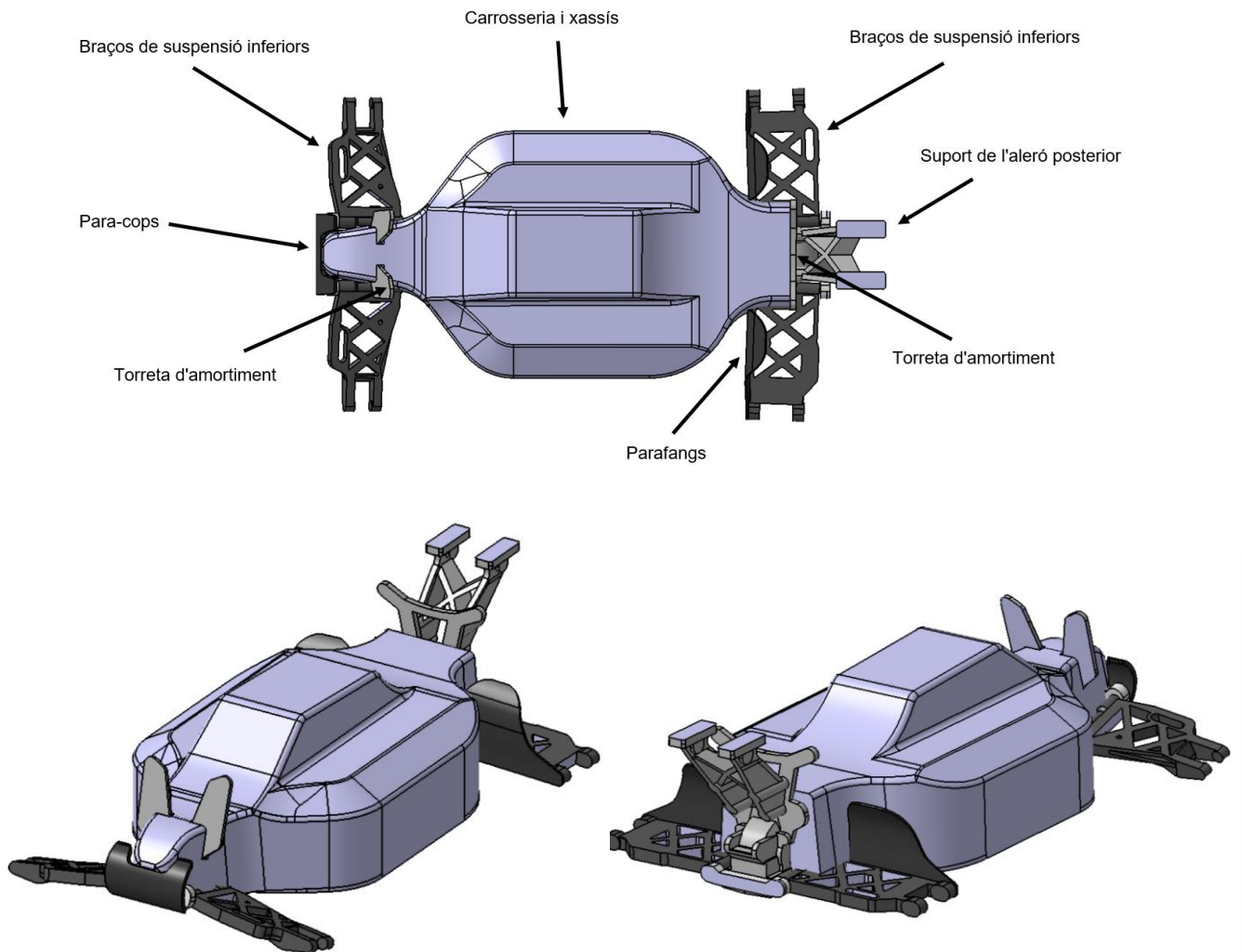
La selecció de les parts del buggy a modelar per la simulació s'ha d'escollir amb cura per obtenir resultats precisos i representatius sense requerir un excés de recursos. En general, se seleccionen les parts principals que tenen l'impacte més gran en l'aerodinàmica del vehicle i que s'han descrit anteriorment, i que es detallen tot seguit.



**Figura 24.** Model 3D del Efecte terra aplicat a un vehicle.

## 6.1. Carrosseria i xassís

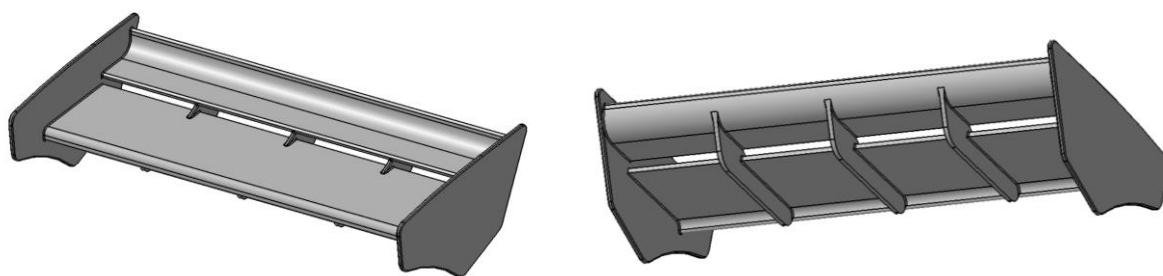
La carrosseria juntament amb el xassís configuren la major part d'elements que afecten aerodinàmicament un buggy, ja que són els elements més voluminosos del vehicle. Entre aquests, a la part frontal es pot trobar: els braços de suspensió inferiors, el para-cops i la torreta d'amortiment. A la part central la carrosseria i el xassís. I a la part posterior: els braços de suspensió inferiors, els parafangs, la torreta d'amortiment i el suport de l'aleró posterior. Tots aquests elements en conjunt tenen gran impacte en l'aerodinàmica del vehicle.



*Figura 25. Carrosseria i xassís.*

## 6.2. Aleró posterior

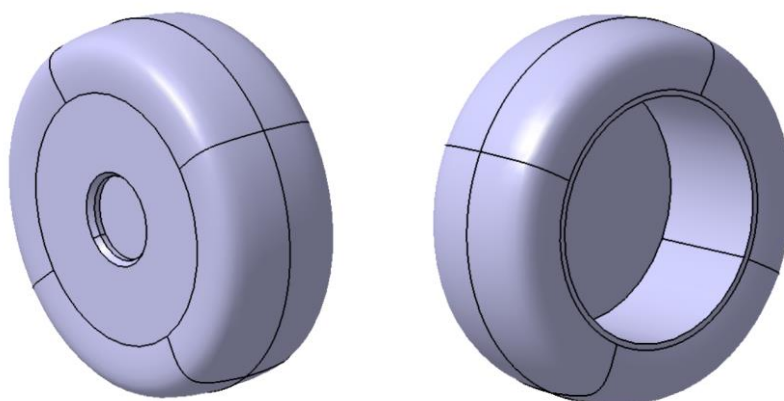
L'aleró posterior és l'element aerodinàmic més important, ja que té una funció exclusivament aerodinàmica, per tant, el seu estudi és necessari per saber quin és el comportament aerodinàmic del vehicle.



*Figura 26. Aleró posterior.*

### 6.3. Les rodes

Encara que no ho pugui semblar, les rodes tenen un impacte significatiu a l'aerodinàmica d'un vehicle, tot i que no tant com els elements descrits anteriorment. Degut al seu moviment de rotació són una de les fonts principals de creació de turbulència del vehicle i, per tant, contribueixen en la resistència aerodinàmica, l'estabilitat i l'eficiència del vehicle. A més, les llantes amb forats grans poden crear més resistència al vent que les llantes llises i tancades. Per tant, les rodes s'han de considerar en el disseny per aconseguir un equilibri entre tots els elements aerodinàmics.



*Figura 27. Les rodes.*

### 6.4. Suspensió

En la majoria dels vehicles la suspensió no és un element aerodinàmic molt important, ja que es troba sota la carrosseria. En els buggys, però, és un element exposat aerodinàmicament que pot tenir una influència en el flux de l'aire a través del vehicle, sobretot els amortidors davanters que són un dels primers elements que reben el flux d'aire.



*Figura 28. La suspensió.*

## 7. Simulació dinàmica de fluids computacional

Per tal d'estudiar aerodinàmicament els dissenys elaborats en 3D es realitzarà una simulació numèrica computacional de dinàmica de fluids.

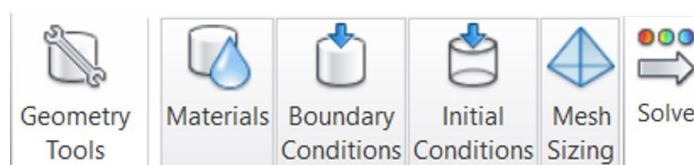
### 7.1. Autodesk CFD 2023

Autodesk CFD (Computational Fluid Dynamics) és un software de simulació numèrica de dinàmica de fluids que permet als enginyers i dissenyadors analitzar el comportament dels fluids i la transferència de calor en sistemes i productes en diferents indústries, com l'aeronàutica, l'automotriu, l'energètica, etc. El programari busca la resolució de problemes físics relacionats amb el moviment dels fluids per mitjà de la implementació en ordinadors de mètodes numèrics que permeten predir com funcionaran els líquids i els gasos, permetent així reduir els costos dels models físics.

Les equacions de Navier-Stokes són les encarregades de descriure el moviment dels fluids. A l'hora de resoldre un problema de fluids mitjançant CFD, es parteix d'un sistema d'equacions diferencials parcials, que posteriorment es transformen en un sistema d'equacions algebraiques aproximades utilitzant la discretització. Això consisteix en convertir una funció continuada en una llista discreta de valors, que permet obtenir una solució a cadascun dels punts que componen el domini (mètode de volums finits). D'aquesta manera, després de trobar la solució a la primera, es troben la resta de solucions per un procés iteratiu.

El mètode de volums finits, és un mètode que realitza una partició del volum en volums de control més petits, on es calculen les variables en aquests volums, constituint el que es coneix com a malla. La malla numèrica és l'encarregada d'emmagatzemar tota la informació del domini i és sobre la qual es resol el problema.

Autodesk CFD disposa d'un menú de SetUp que permet anar avançant pel programa per tal de preparar l'arxiu per a la simulació. Seguidament s'explica detalladament tots els passos seguits durant el procés de preparació de l'arxiu a simular aerodinàmicament en el programa Autodesk CFD:



**Figura 29.** Menú SetUp Autodesk CFD.

## 7.2. La geometria

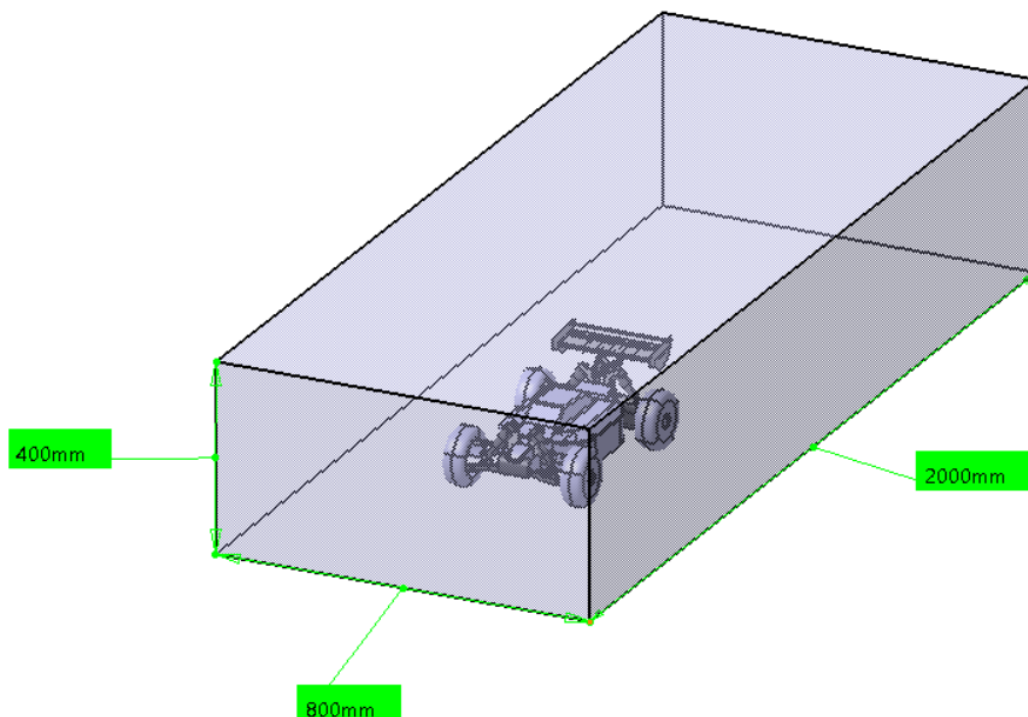
El primer pas és la preparació de la geometria, es comença per la definició d'un volum tancat el qual serà la delimitació de volum d'aire simulat numèricament. Aquest volum ha de tenir unes dimensions concretes per tal de no influir en els resultats degut a una proximitat de les parets a l'objecte, o que per altra banda, sigui massa gran i provoqui la necessitat d'un excés de recursos i temps de càlcul. Per tant, un volum ajustat al model 3D redueix el nombre d'elements de la malla i fa que la simulació sigui molt més ràpida.

Aquestes dimensions òptimes són:

Amplada	Aproximadament una vegada l'amplada del model 3D per cada banda del model estudiat
Llargada	Aproximadament una vegada la llargada del model 3D per davant i dues vegades per darrera del model estudiat
Alçada	Aproximadament una vegada l'alçada del model 3D per sobre del model estudiat

*Figura 30. Dimensions òptimes.*

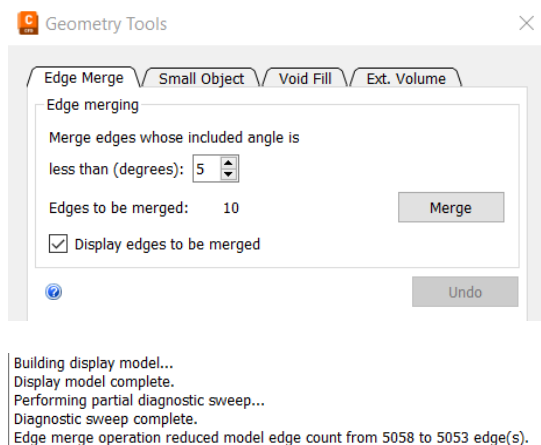
Per tant, les dimensions del volum d'aire estudiat pel model són 400 X 800 X 2000 mm.



*Figura 31. Dimensions del volum tancat del model.*

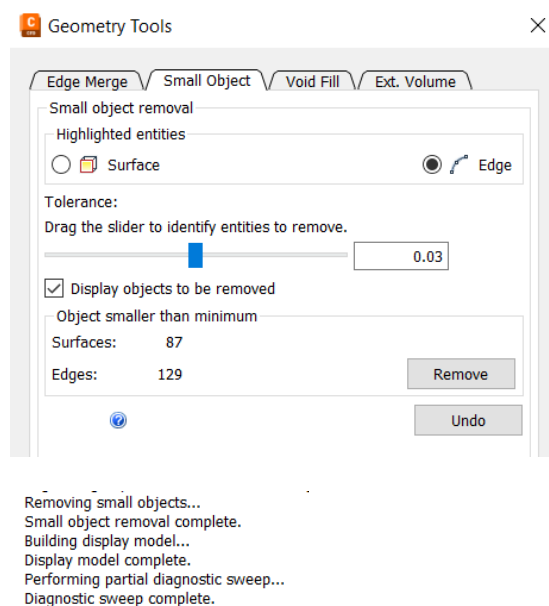


Un cop carregat el model 3D creat anteriorment amb el volum d'aire corresponent, el programa CFD Autodesk proporciona una eina de geometria per tal de simplificar la geometria i fusionar vores de dibuix que estan duplicades i que podrien donar certs problemes a l'hora de crear la malla. En aquest cas el programa detecta 10 vores les quals es poden fusionar, es dona l'ordre que ho apliqui i s'aconsegueix fusionar les vores en parelles, eliminant 5 vores i passant de 5.058 a 5.053.



**Figura 32.** Edges to be merged.

El següent pas és semblant a l'anterior, el programa dona l'opció d'eliminar petites superfícies i vores que poden crear problemes a l'hora de crear la malla, però que no influiran en els resultats per les seves petites dimensions. En aquest cas es pot veure que el programa detecta 87 petites superfícies i 129 petites vores a eliminar.



**Figura 33.** Small object remove.

Se li dona l'ordre d'eliminar i la geometria està a punt per obrir-se.

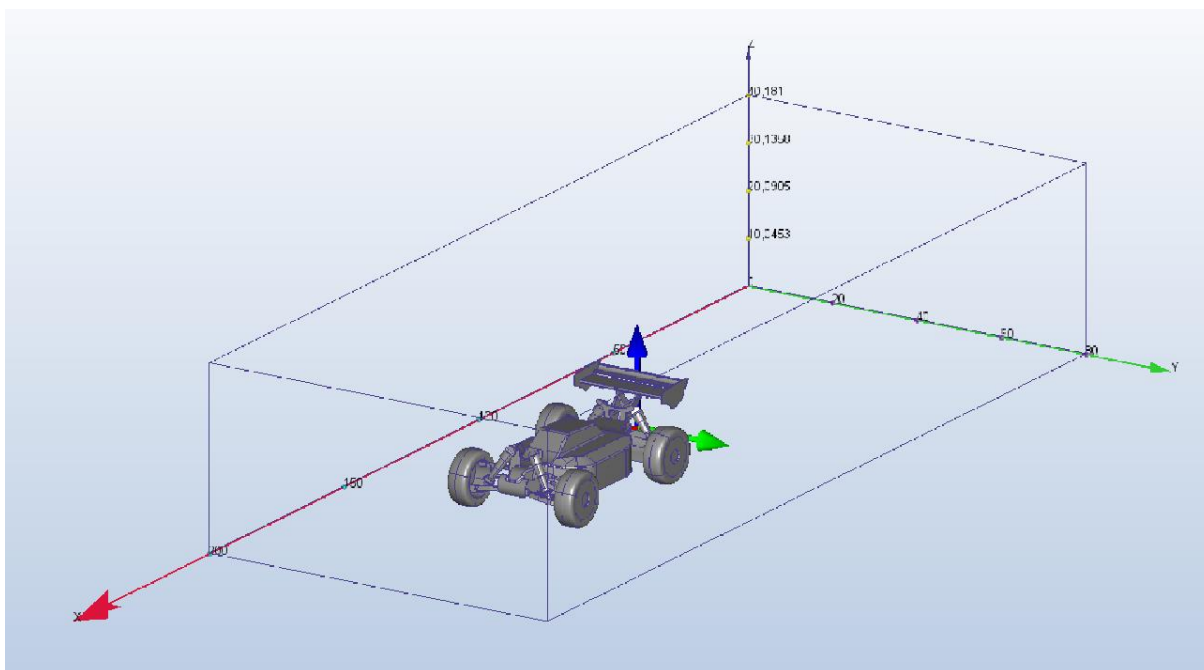


Figura 34. Model 3D a Autodesk CFD.

### 7.3. Els materials

El segon punt és la definició dels materials, el qual és un pas molt senzill. Primer de tot es selecciona el volum d'aire a estudiar generat anteriorment i es defineix com a tipus de material fluid - aire.

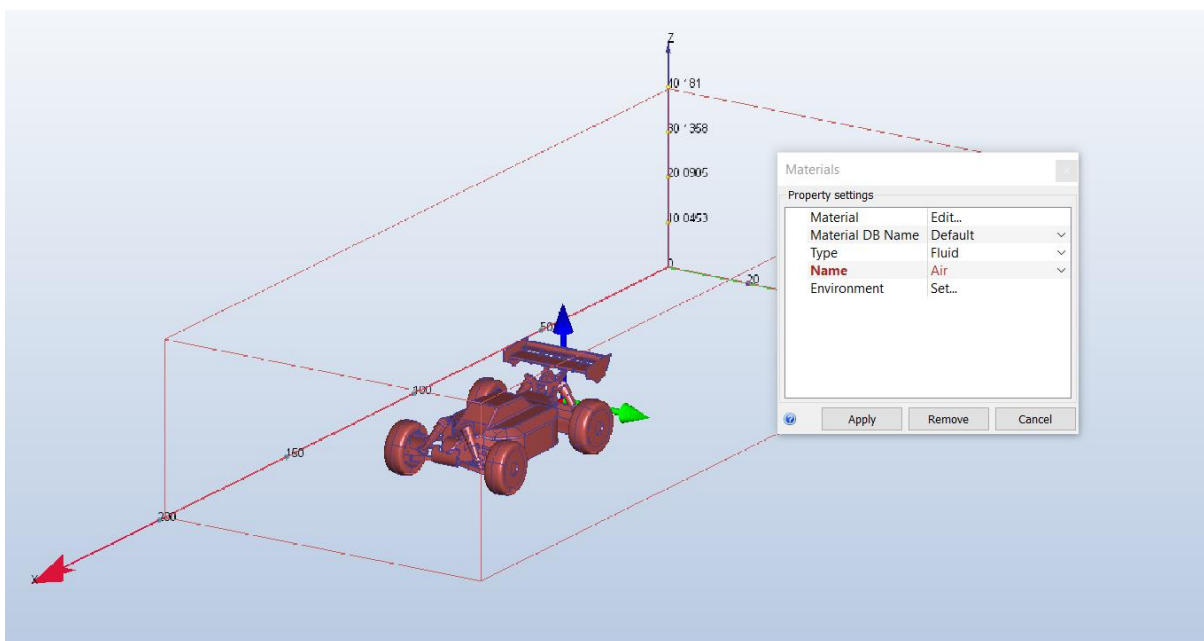


Figura 35. Definició del fluid.

Observant a les característiques, es pot veure que el material ja té definides les propietats de l'aire en condicions normals a 19,85 °C com són la densitat, la viscositat, etc.

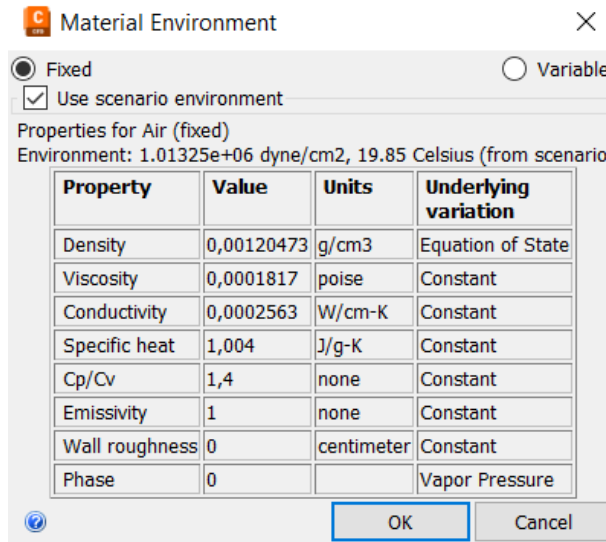


Figura 36. Propietats de l'aire en condicions normals.

Per a la definició del material del model se segueix el mateix procés, se seleccionen les parts restants que no tenen material definit i es defineixen com a material de tipus sòlid - PVC (un derivat del plàstic molt versàtil).

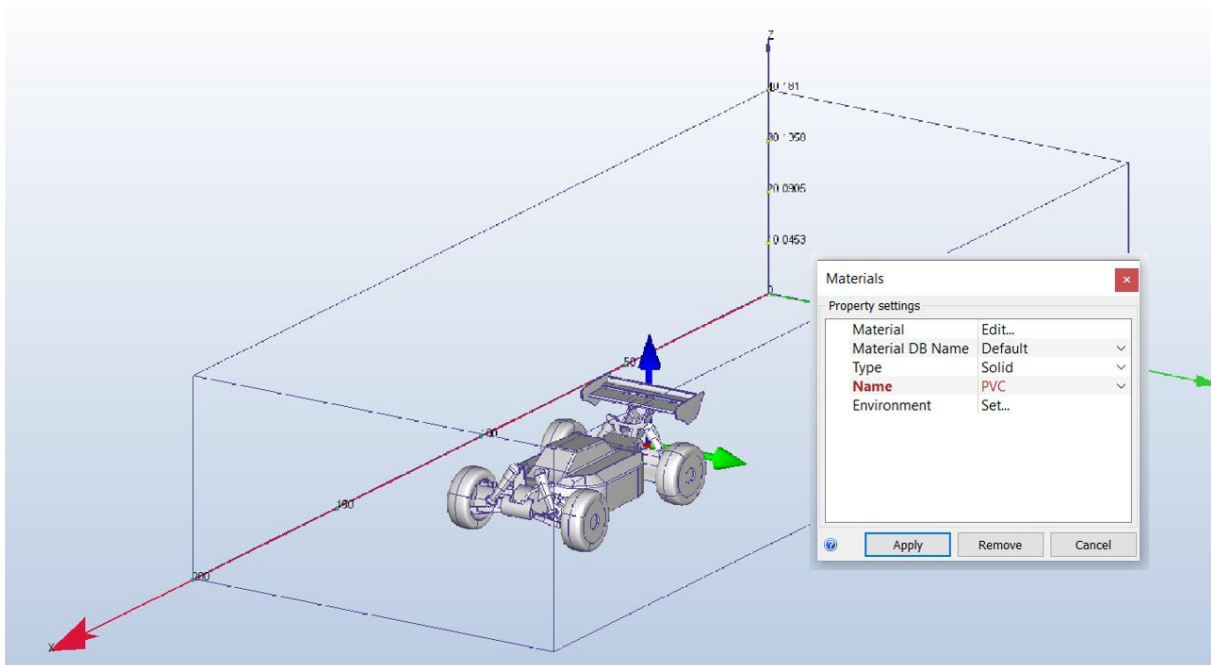


Figura 37. Definició del sòlid.

Finalment, a l'arbre esquemàtic de navegació lateral que proporciona el programa, es pot veure com totes les parts que componen el model ja tenen el material definit:

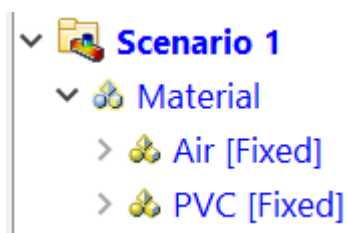


Figura 38. Material definit.

#### 7.4. Les condicions de contorn

Les condicions de contorn són les restriccions que s'imposen als límits del sistema per poder definir el seu comportament dins d'aquests límits. En aquest cas, les condicions de contorn imposades en el sistema són els següents:

En primer lloc, a la part frontal del volum d'aire estudiat, es defineix una entrada d'aire en la direcció del moviment del vehicle, de la velocitat definida al punt 4.2. **Estudi de velocitats** la qual simularà la circulació del vehicle a través de l'aire. En el primer estudi el valor serà la velocitat mitjana de 13,5 km/h i en el segon la velocitat màxima de 57,7 km/h.

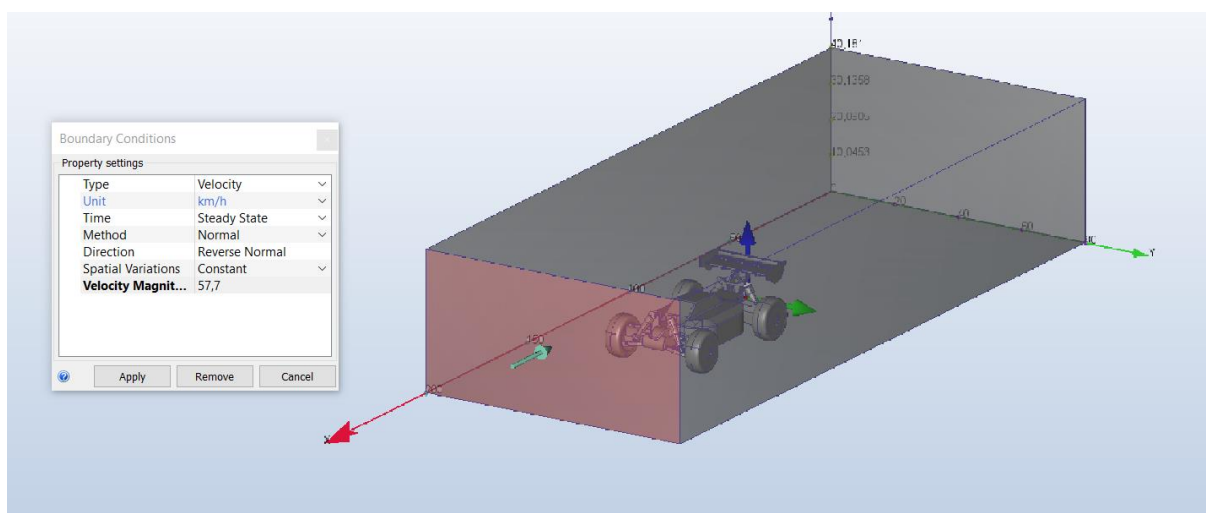
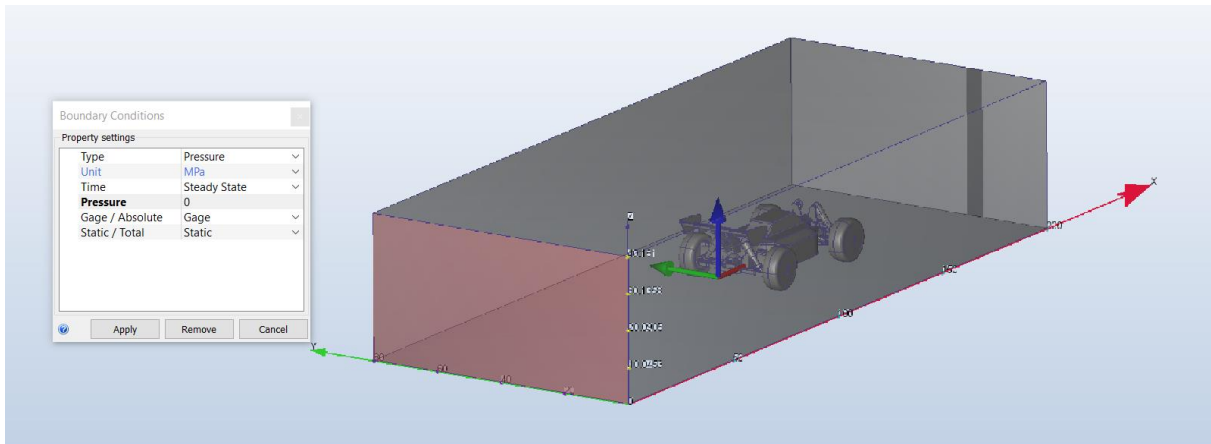


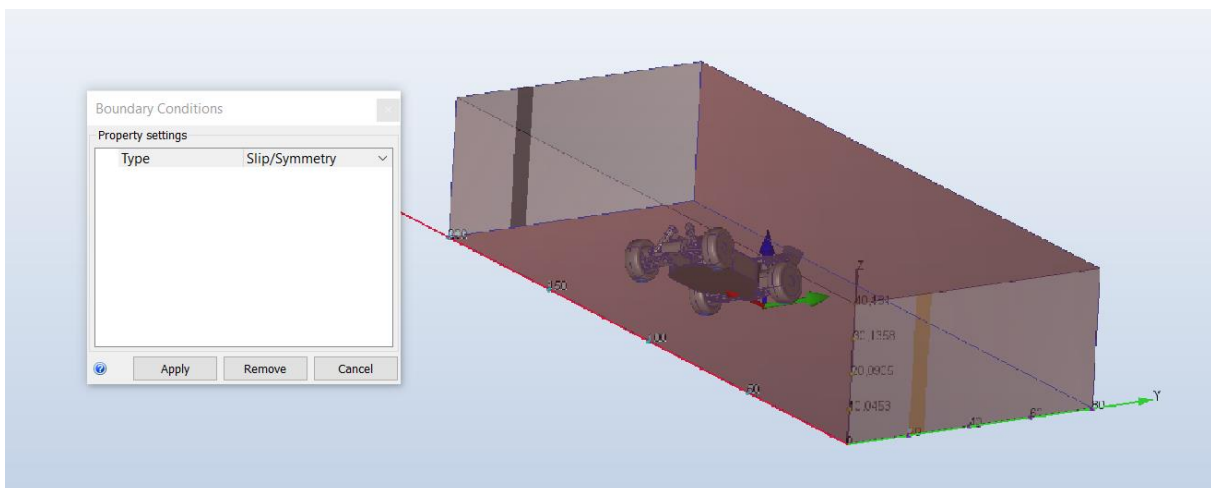
Figura 39. Condió de contorn de velocitat.

El segon pas és definir una sortida d'aire, aquesta, se situarà en la part posterior del vehicle i es definirà com a pressió 0 MPa, ja que simularà una sortida a l'exterior de volum al buit i permetrà que totes les partícules d'aire es dirigeixin cap aquest punt.



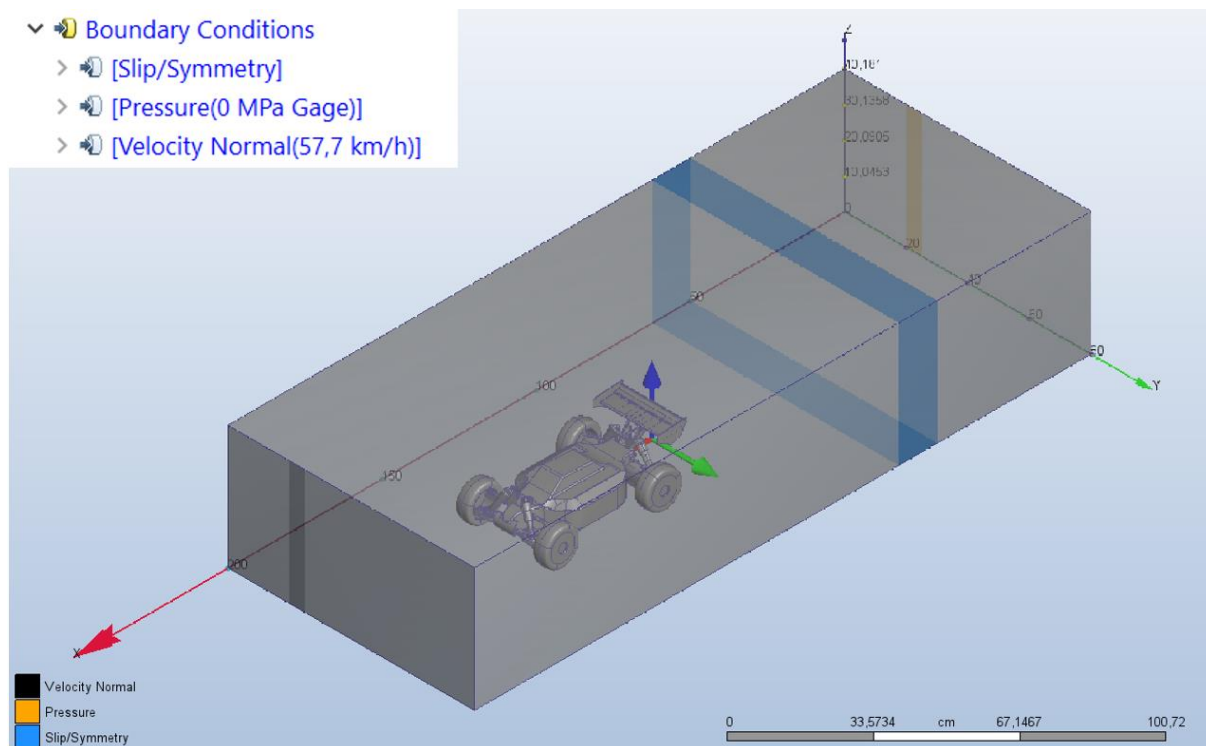
**Figura 40.** Condició de contorn de pressió.

La tercera i última condició de contorn és la de terra lliscant. Aquesta permetrà que en la simulació es vegi reflectit l'efecte terra descrit anteriorment, que genera el vehicle en circular a prop del terra. També es definiran les altres cares com a lliscants per evitar friccions a les parets que puguin donar resultats erronis en la simulació.



**Figura 41.** Condició de contorn de terra lliscant.

Finalment, es poden veure aplicades totes les condicions de contorn al model. Les línies de colors situades a les cares indiquen les condicions de contorn que s'han aplicat en funció del color.



**Figura 42.** Condicions de contorn.

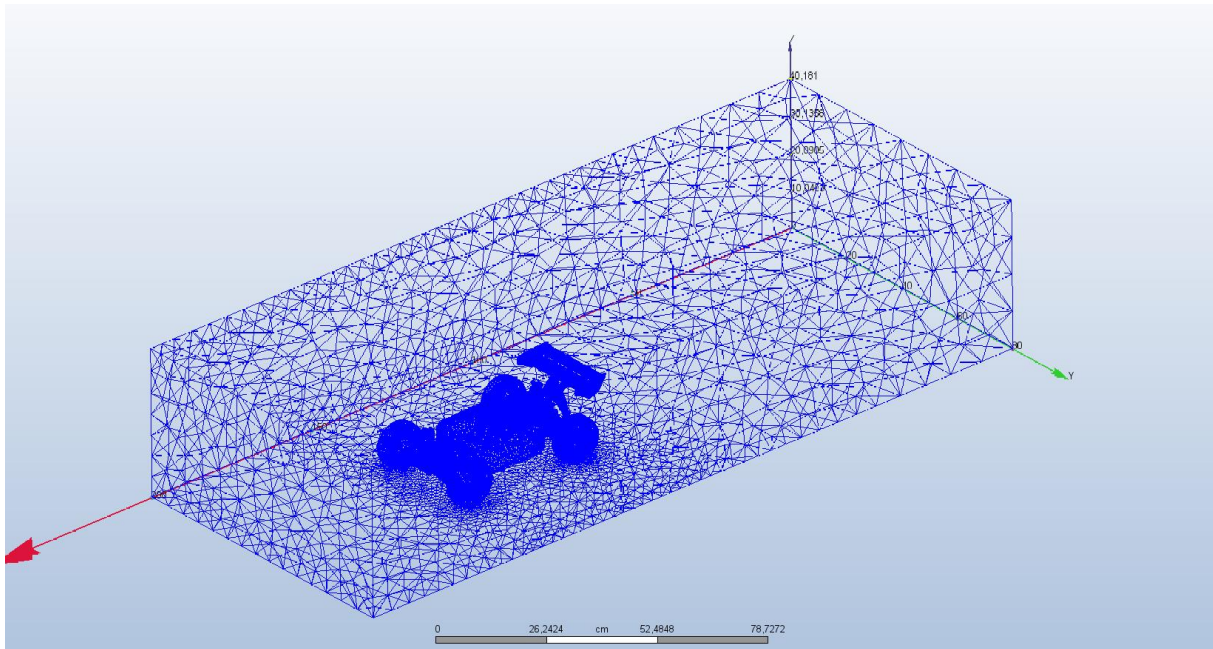
## 7.4. La malla

La malla és l'últim pas abans de la simulació. Aquesta es genera per primera vegada automàticament abans d'iniciar la simulació i es va refinant a través de l'anàlisi numèric de refinament de malla adaptativa local. Aquest és un mètode per adaptar la precisió de les solucions en regions sensibles o turbulentes de la simulació, de manera dinàmica i durant el temps en que s'està calculant la solució.

En la primera malla s'obté un total de 47.319 nodes i 2.010.256 elements:

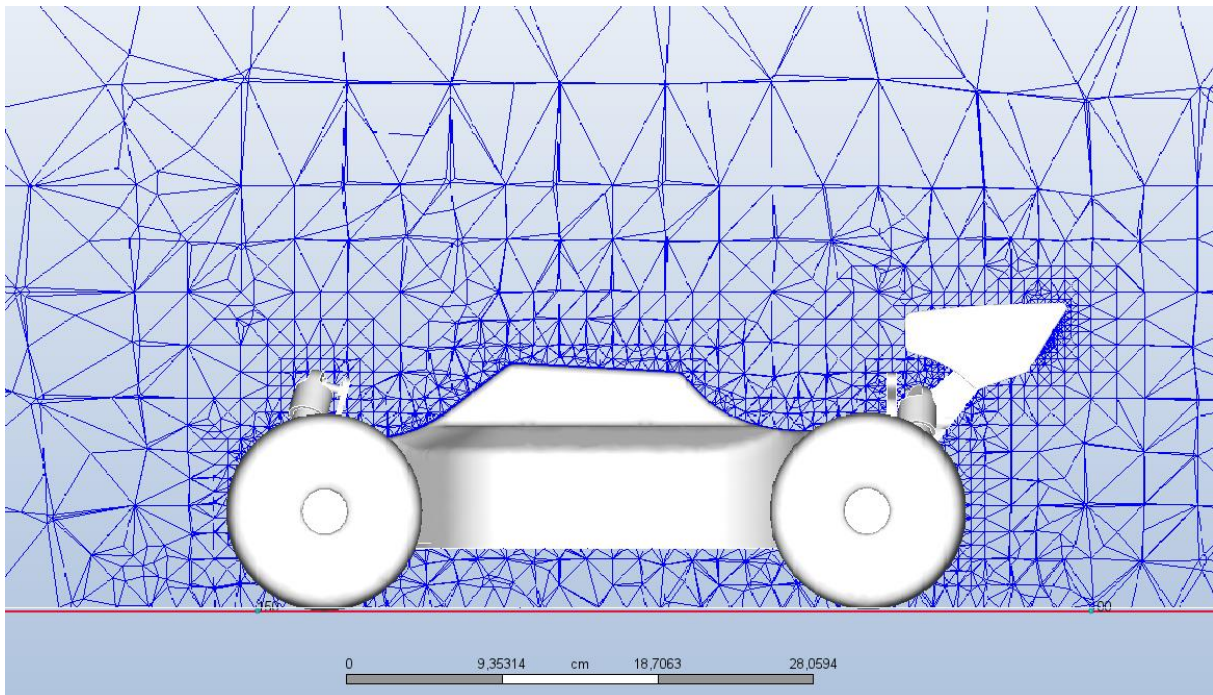
```
Mesh process started...
Loading model...
Loading mesh sizes and constraints...
Meshing...
Surface meshing... generating surface mesh
Surface meshing... smoothing surface mesh
Volume meshing... creating volume mesh
Volume meshing... optimizing volume mesh
Volume meshing... smoothing volume mesh
Mesh contains 473119 nodes and 2010256 elements.
```

**Figura 43.** Elements i nodes de la malla.

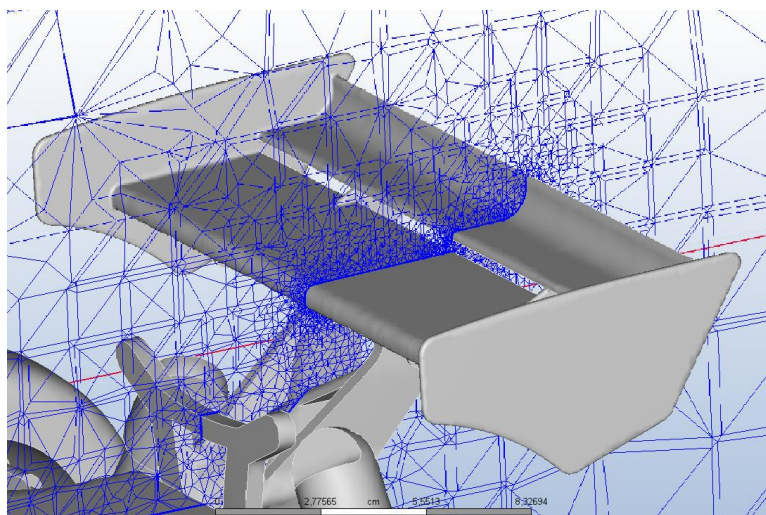


**Figura 44.** La malla.

La malla final obtinguda gràcies a l'anàlisi numèric de refinament de malla adaptativa local és el següent: Es pot observar que en les zones més pròximes al model els elements s'han refinat i, per tant, són més petits. Això permet tenir una precisió més exacta i uns resultats més acurats, ja que aquestes zones on hi ha la interacció amb el model, són regions més sensibles i turbulentes, i un petit canvi pot ser determinant en l'estudi aerodinàmic.

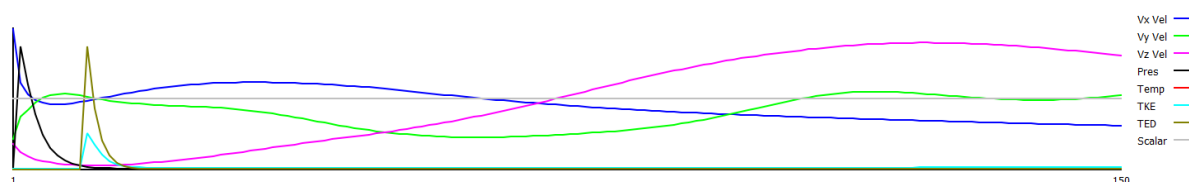


**Figura 45.** Malla adaptativa local.

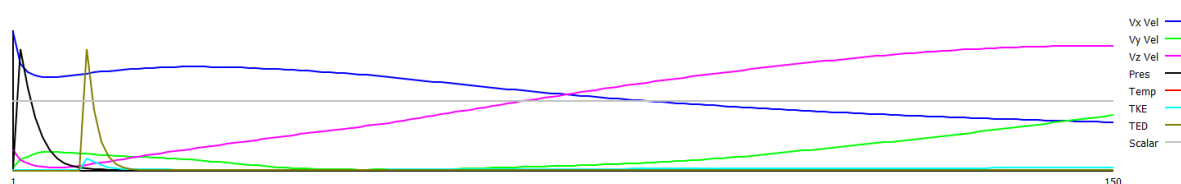


**Figura 46.** Malla adaptativa a l'aleró.

També és important fer referència al nombre d'iteracions necessàries de refinament i ajustament de la solució numèrica per aconseguir uns resultats fiables. Autodesk CFD proporciona aquesta informació a través d'un gràfic en el qual es projecten els resultats obtinguts de la simulació en cada iteració. El nombre d'iteracions necessàries per obtenir uns resultats correctes es determina en el punt que s'observa que la gràfica passa d'un estat caòtic a establir-se. En aquest punt es pot determinar que els resultats romandran constants fins a un temps infinit si no hi ha cap canvi que alteri el sistema.



**Figura 47.** Resultats iterats per l'estudi de 13,5 km/h.



**Figura 48.** Resultats iterats per l'estudi de 57,7 km/h.

Es pot observar que a les primeres iteracions els resultats són molt imprecisos ja que varien molt d'un càlcul a l'altre, però es pot concloure que les iteracions necessàries per aconseguir uns resultats fiables són aproximadament unes 150, tant per l'estudi de 13,5 km/h com pel de 57,7 km/h.

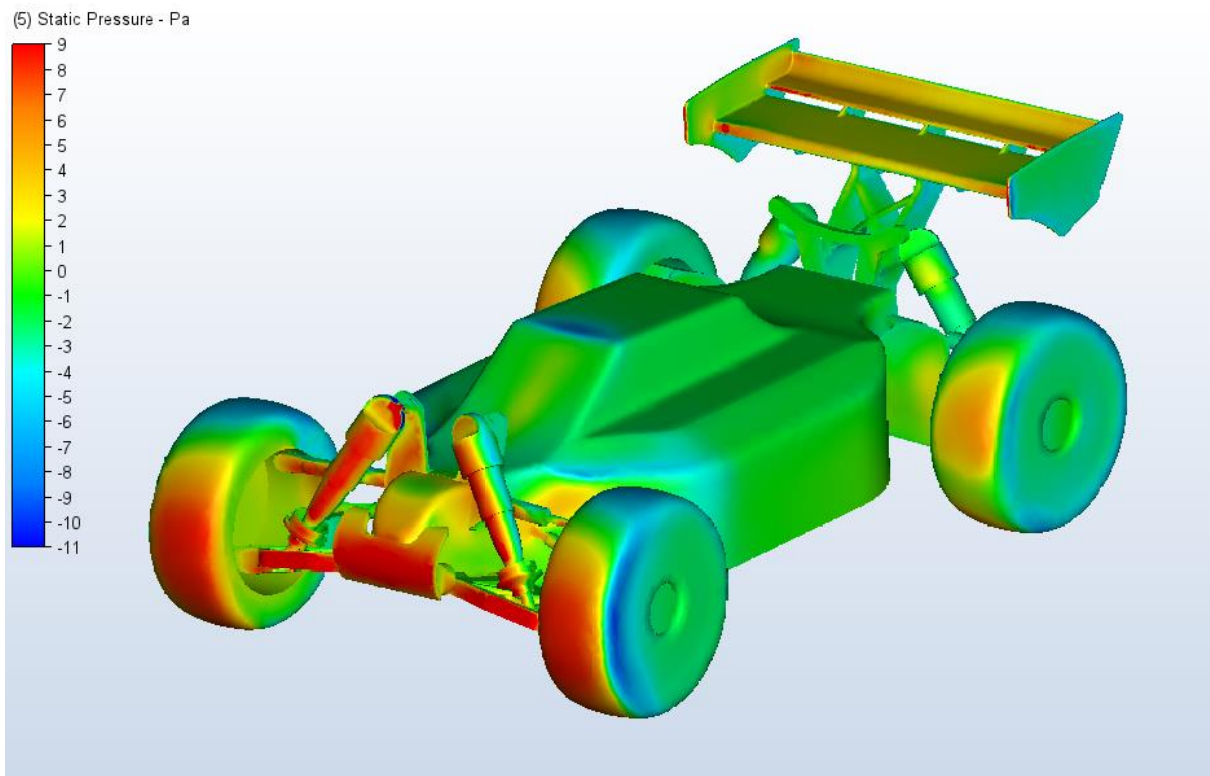


## 7.5. Anàlisi de resultats

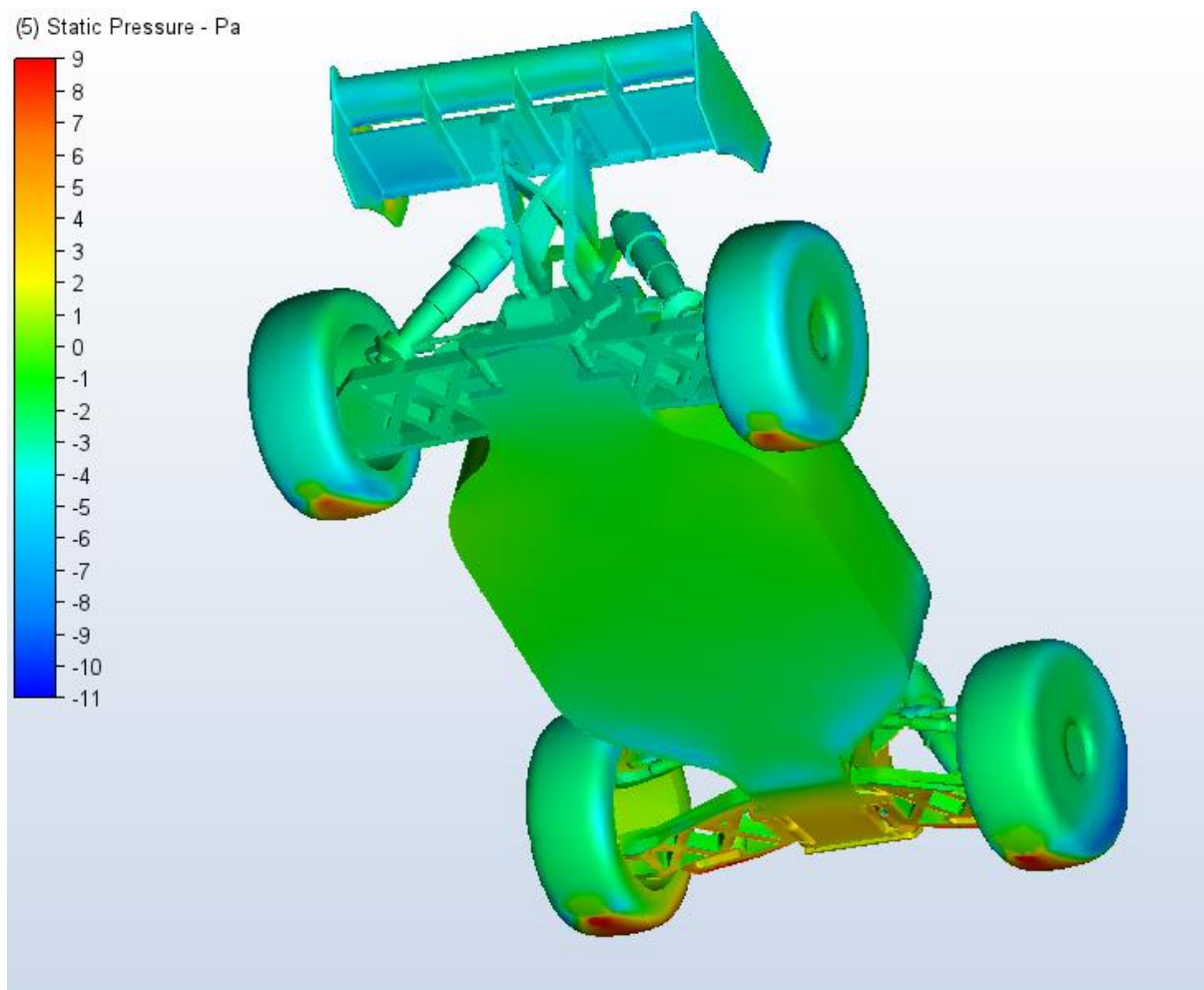
A continuació, es presenta la anàlisi dels resultats numèrics obtinguts de les simulacions. Per poder visualitzar els paràmetres el programa mostra dades de velocitat, pressió i les línies de corrent per observar la influència que té el flux d'aire en el vehicle. L'estudi s'analitzarà en dues parts. Primer, l'estudi a velocitat mitjana de 13,5 km/h i després l'estudi a velocitat màxima de 57,7 km/h i finalment se'n trauran les conclusions.

### 7.5.1. Estudi a velocitat mitjana de 13,5 km/h

En el primer estudi, on el model circula a una velocitat mitjana de 13,5 km/h, les següents figures mostren, segons l'escala de colors, els valors de la pressió total exercida sobre les superfícies del vehicle.



**Figura 49.** Vista isomètrica superior pressió total.



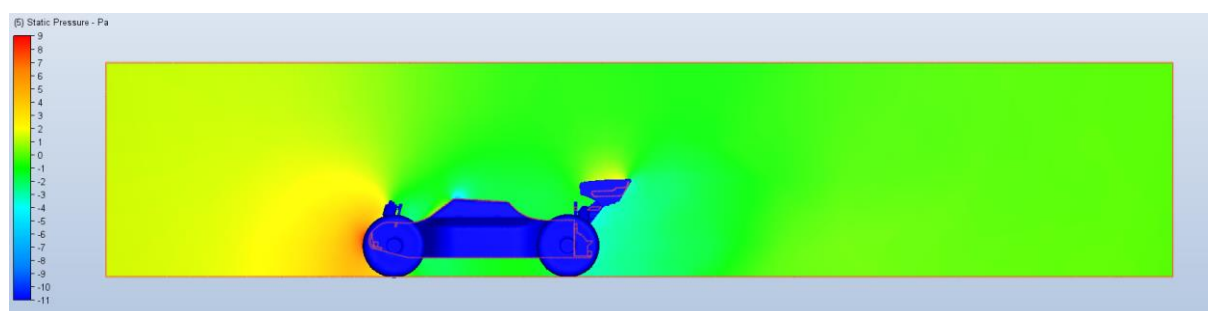
**Figura 50.** Vista isomètrica inferior pressió total.

A les figures anteriors, es pot observar en quines zones del vehicle s'exerceix més pressió degut a l'aire segons l'escala de colors. El valor màxim de pressió total és de 9 Pa i es troba a la zona frontal, concretament a les rodes, el para-cops i els amortidors. Això és degut a que són les parts del vehicle més exposades a la incidència del vent, ja que són les primeres en topiar amb l'aire completament perpendiculars a la direcció del fluid. El valor mínim de pressió total exercida és de -11 Pa, és a dir, a certes zones del vehicle on es crea depressió. Aquestes són per general, les parts de sota del vehicle i de l'aleró, així com en algunes petites zones laterals de les rodes o alguns punts superiors de la carrosseria i de les rodes.

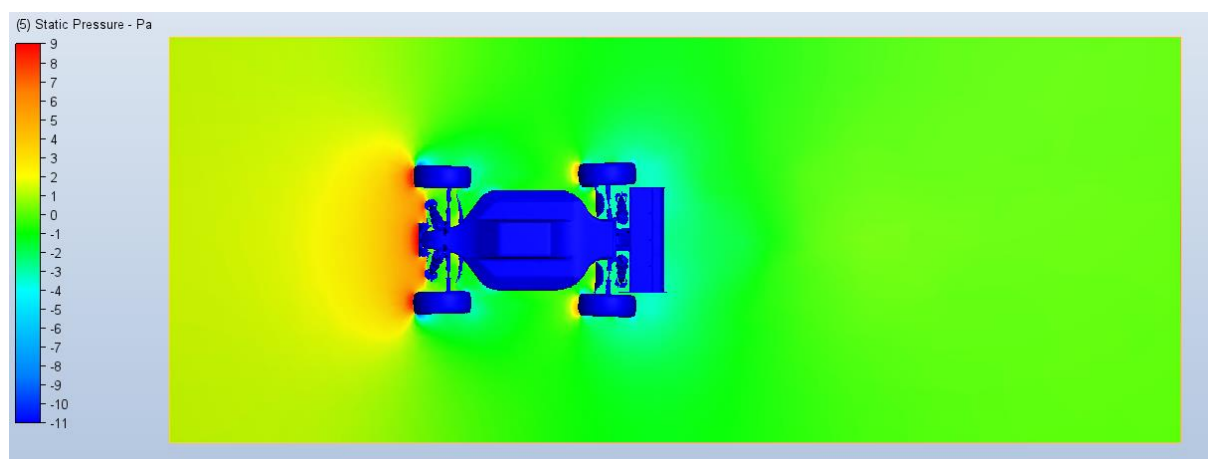
Pel que fa a l'aleró, es pot observar que compleix amb la seva finalitat de generar *down force*, ja que es pot veure que en la part superior hi ha zones on la pressió exercida sobre la superfície de l'aleró és de fins a 5 Pa i en la part inferior es crea una succió de també uns -5 Pa aproximadament. Aquesta diferència de pressions genera una succió que intenta enganxar el vehicle a terra generant *down force*.

També, com es pot observar, les rodes són un gran inconvenient pel que fa a l'aerodinàmica dels vehicles, per això sempre que és possible s'intenten amagar sota la carrosseria. Com s'observa, al llarg de la superfície de la roda, hi ha un gran canvi de pressions, passant de la pressió màxima a la part frontal – inferior a pressió mínima a la part superior i posterior. Això genera tant *drag*, degut a la pressió frontal, com *lift*, ja que la distribució de pressions fa que actuï al contrari que ho fa l'aleró. A més a més, aquest canvi de pressions genera turbulències en l'aire que es propaguen al llarg de la resta d'elements aerodinàmics del vehicle. Com a detall també es pot observar que en la part superior del parabrisa frontal també es genera una zona de baixes pressions que podria generar *lift* si l'efecte terra no és suficient com per contrarestar aquesta baixa pressió.

Les següents figures, mostren els valors de la pressió total de l'aire que envolta el vehicle.



**Figura 51.** Vista lateral pressió total.



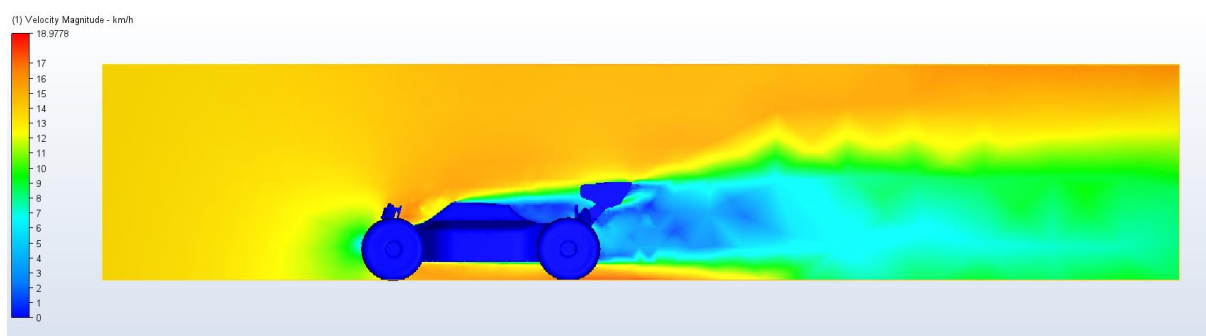
**Figura 52.** Vista planta pressió total.

Es pot observar que els valors màxims i mínims de pressió continuen sent 9 Pa i -11 Pa, respectivament, ja que aquestes pressions s'apliquen sobre la superfície del vehicle. El que crida més l'atenció és l'alta pressió que es genera en la part frontal del vehicle degut a la incidència de l'aire, com ja s'ha comentat. Aquest factor és la principal causa de generació de

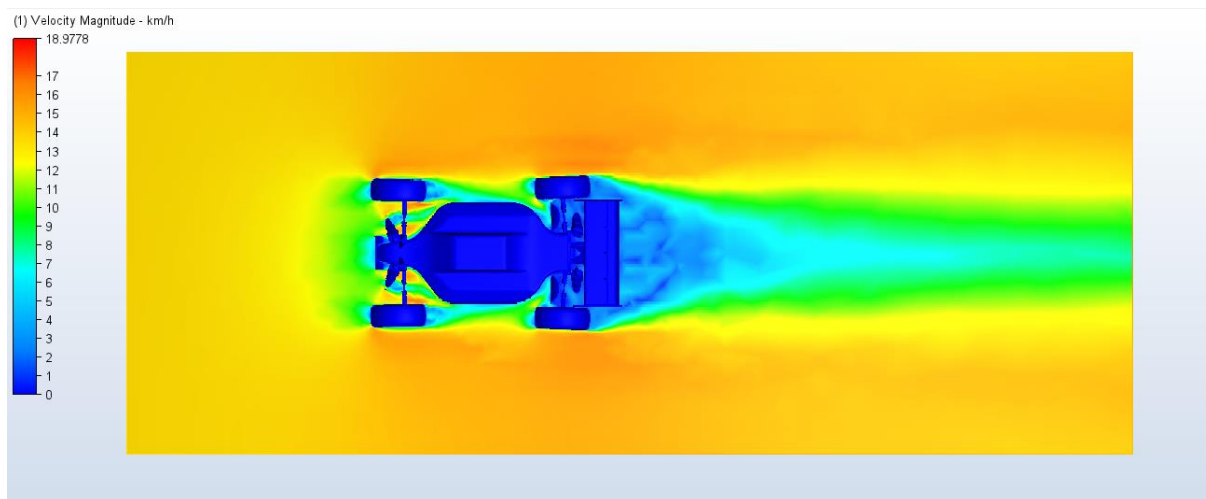
*drag*, ja que suposa una resistència a l'avanç. A més, les baixes pressions de la part posterior del vehicle, que generen succió, encara incrementen més aquest *drag*.

Un altre punt a observar és que no es genera efecte terra, ja que no es veu una disminució gaire important de la pressió en la part inferior del vehicle. A més a més, la pressió tant en la part superior del vehicle com a la part inferior és similar, això vol dir que al no haver-hi diferència de pressions, el *down force* que genera la carrosseria gràcies a l'efecte terra és nul.

Pel que fa a la velocitat, les següents figures mostren, segons l'escala de colors, els valors de la velocitat en l'aire que envolta el vehicle.



**Figura 53.** Vista lateral velocitat de l'aire.

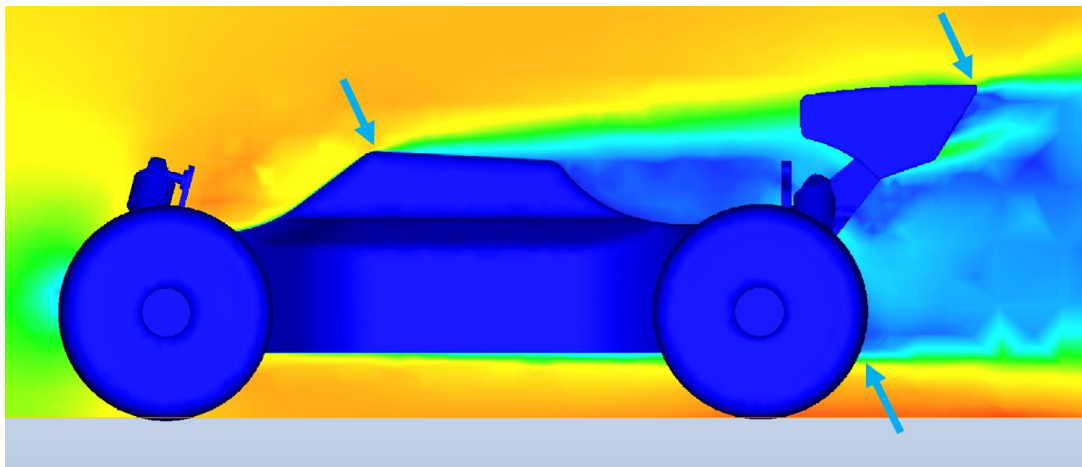


**Figura 54.** Vista planta velocitat de l'aire.

Es pot observar que la velocitat màxima que adquireix el fluid és de gairebé 19 km/h i es produeix a la zona tant de sota com de sobre el vehicle seguint l'efecte Venturi descrit anteriorment. Aquesta acceleració de l'aire a la part inferior podria provocar una succió que generés efecte terra, però com que l'acceleració és equivalent a la part superior del vehicle, no hi ha diferència de pressions i per tant no es genera *down force*.

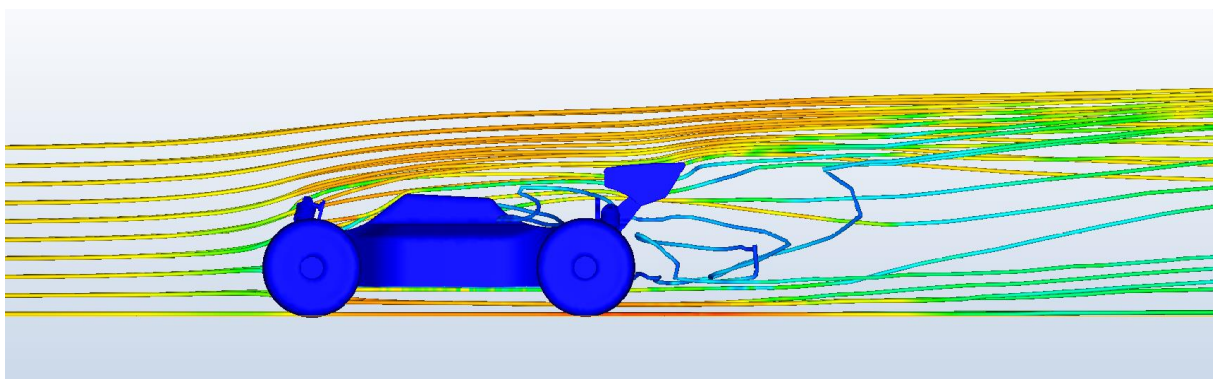
Un altre punt a destacar és la baixa velocitat de l'aire a la part frontal del vehicle. Les partícules d'aire que topen amb el vehicle queden frenades i això és la causa de que augmenti la pressió en aquesta zona ja que al disminuir la velocitat, augmenta la pressió del fluid.

Un altre punt important que es pot observar és el desprendiment de la capa límit que es produeix en la part superior del parabrisa frontal i la part posterior de les rodes i del vehicle. Aquest desprendiment també és una causa molt important de generació de *drag*. A més a més, el desprendiment de la capa límit de la part superior del parabrisa frontal fa que l'aire que li arriba a l'aleró posterior li arribi a molt baixa velocitat i per tant redueix molt els efectes d'aquest.

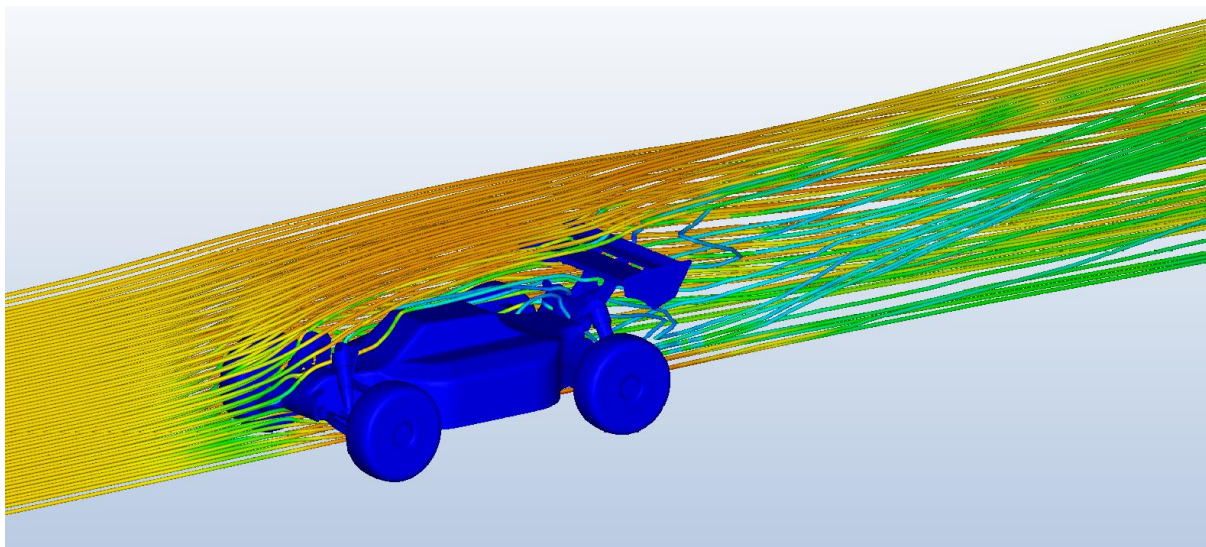


**Figura 55.** Vista lateral punts desprendiment capa límit.

Les línies de corrent són una forma de poder visualitzar com flueixen les partícules d'aire al voltant del vehicle. Es pot observar que en els punts on es redueix l'espai entre partícules per la presència de l'objecte, l'aire s'accelera seguint l'efecte Venturi, i en els punts on s'ha després la capa límit, es generen turbulències degut a les baixes pressions.



**Figura 56.** Vista lateral línies de corrent.



**Figura 57.** Vista isomètrica línies de corrent.

A continuació es presenten els resultats numèrics obtinguts que proporciona el software i que serviran per fer una comparativa de valors numèrics entre els dos estudis:

Summary

-----

Total area, 342.95, cm<sup>2</sup>

TOTAL FX, -0.0731925, Newton

TOTAL FY, -0.00119995, Newton

TOTAL FZ, -0.0588425, Newton

Center of Force about X-Axis (Y-Z), 2.43592, 6.15992, cm

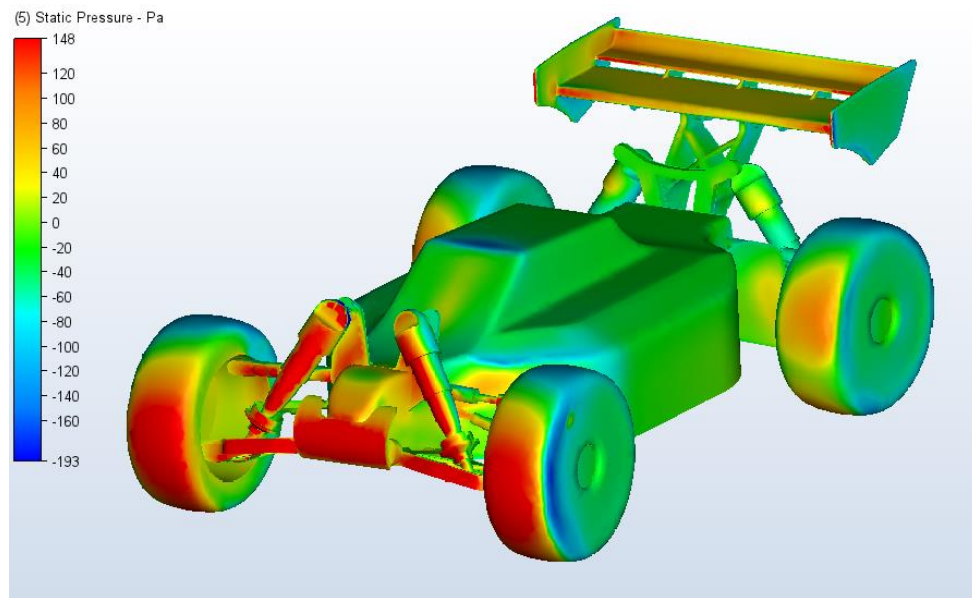
Center of Force about Y-Axis (X-Z), 39.5707, -4.08541, cm

Center of Force about Z-Axis (X-Y), -5.45128, 2.43017, cm

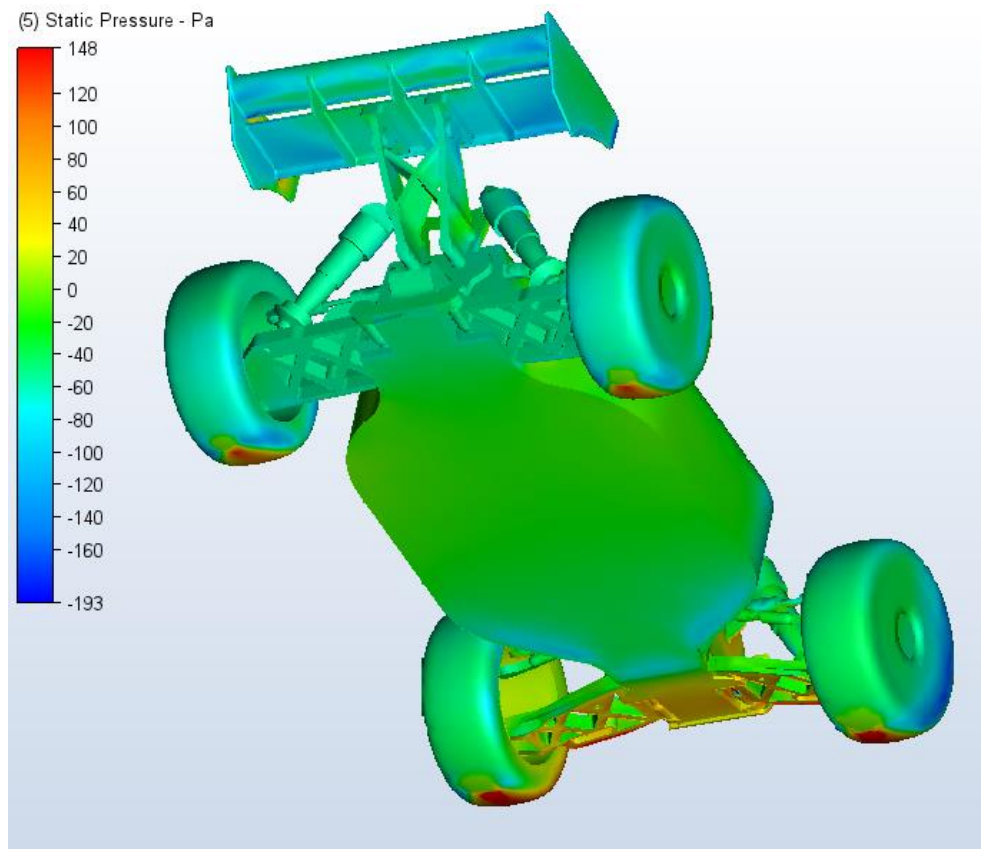
**Figura 58.** Resultats numèrics estudi 13,5 km/h.

### 7.5.2. Estudi a velocitat màxima de 57,7 km/h

En el segon estudi, on el model circula a una velocitat màxima de 57,7 km/h, les següents figures mostren, segons l'escala de colors, els valors de la pressió total exercida sobre les superfícies del vehicle.



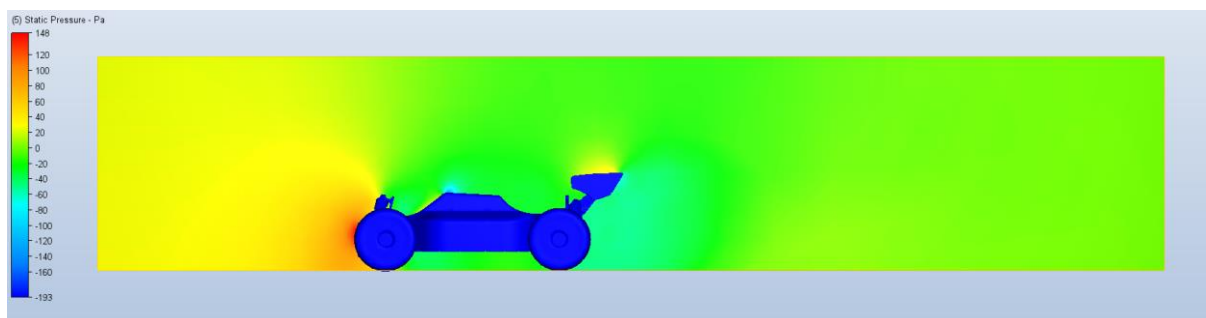
*Figura 59. Vista isomètrica superior pressió total.*



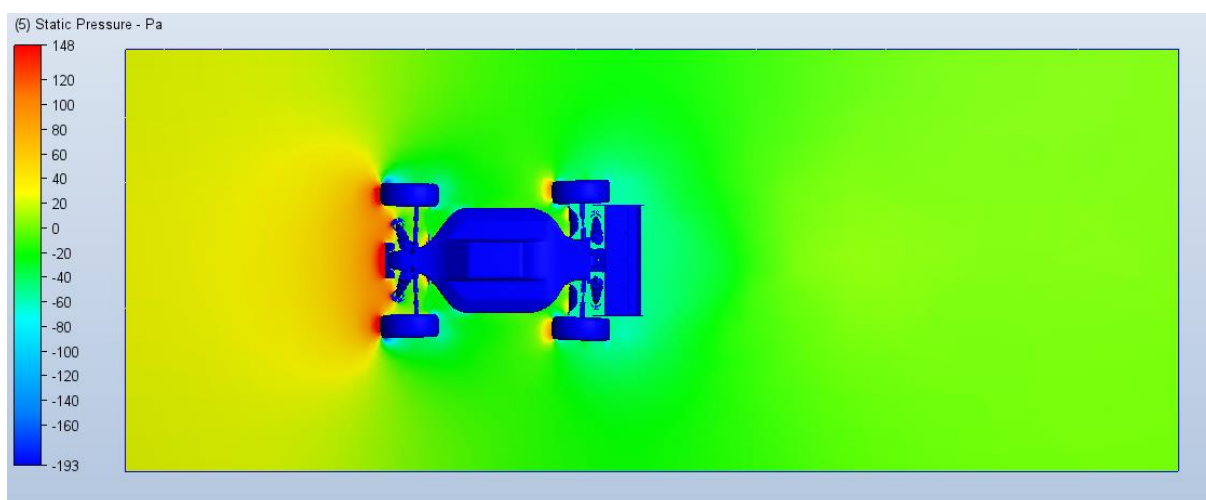
*Figura 60. Vista isomètrica inferior pressió total.*

A les figures, igual que en l'estudi anterior, es pot observar a quines zones del vehicle s'exerceix més pressió degut a l'aire. Es pot veure que la pressió ha augmentat molt significativament fins a un valor de pressió màxima de 148 Pa i es troba a la zona frontal, igual que en l'estudi anterior. El valor mínim de pressió total exercida és de -193 Pa a zones del vehicle on es crea depressió, que també és en els mateixos punts.

Les següents figures, mostren els valors de la pressió total de l'aire que envolta el vehicle.



**Figura 61.** Vista lateral pressió total.

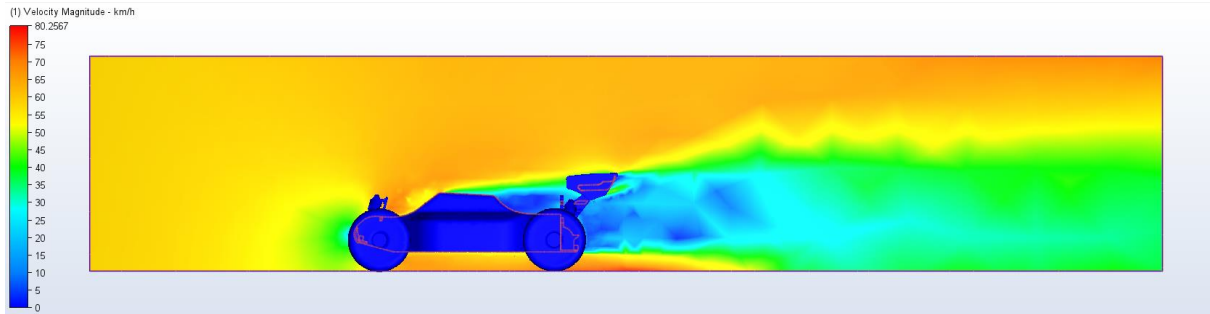


**Figura 62.** Vista planta pressió total.

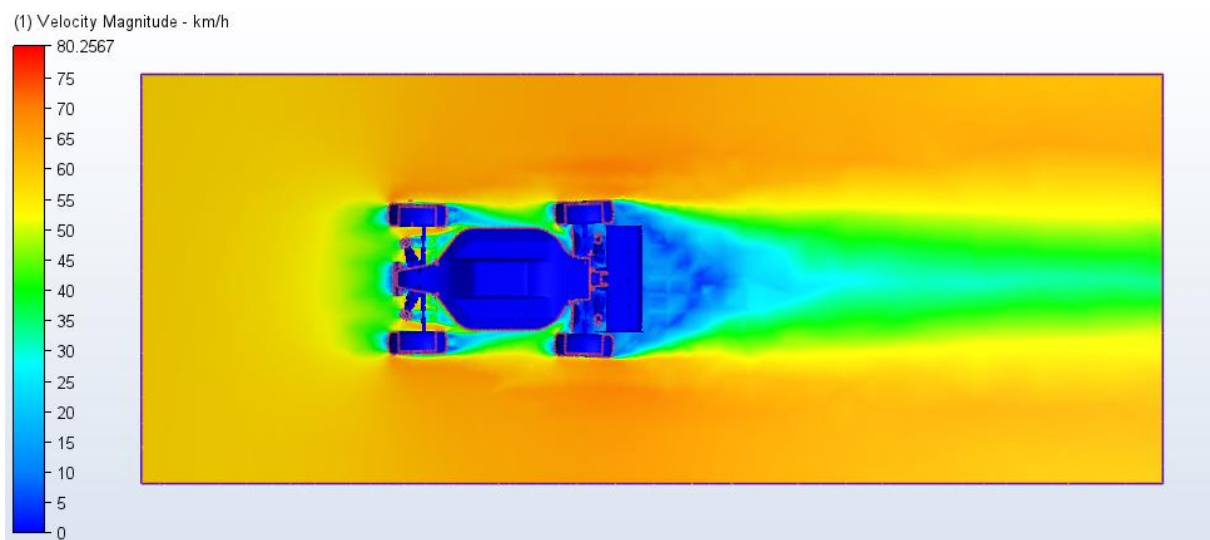
S'observa que es continua generant una alta pressió a la part frontal del vehicle degut a la incidència de l'aire i que fa que sigui la principal causa de generació de *drag*. I l'efecte terra continua sent gairebé nul, ja que no es veu una disminució gaire important de la pressió en la part inferior del vehicle respecte la part superior.



Pel que fa a la velocitat, les següents figures mostren, segons l'escala de colors, els valors de la velocitat en l'aire que envolta el vehicle.



**Figura 63.** Vista lateral velocitat de l'aire.

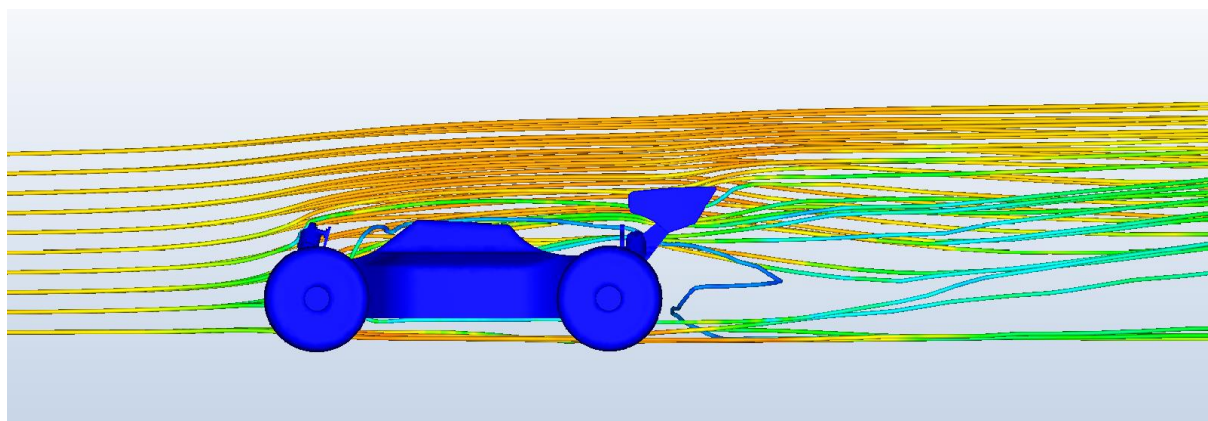


**Figura 64.** Vista planta velocitat de l'aire.

Es pot observar que la velocitat màxima que adquireix el fluid és d'uns 80 km/h i es produeix a la zona tant de sota com de sobre del vehicle i als laterals, seguint l'efecte Venturi. Aquesta acceleració de l'aire a la part inferior continua sense generar efecte terra i per tant *down force*.

Es pot observar que el desprendiment de la capa límit que es produeix en els mateixos punts i per tant l'aire que li arriba a l'aleró continua sent a molt baixa velocitat i per tant en redueixen els efectes. També es pot observar els vòrtex de pressió que es generen en l'aire posterior del vehicle degut a les altes i baixes pressions que es generen en aquesta zona.

En la següent figura s'observen les línies de corrent per poder visualitzar com flueixen les partícules d'aire al voltant del vehicle:



**Figura 65.** Vista lateral línies de corrent.

A continuació es presenten els resultats numèrics obtinguts que proporciona el software i que serviran per fer una comparativa de valors numèrics entre els dos estudis:

Summary

-----  
 Total area, 342.95, cm<sup>2</sup>  
 TOTAL FX, -1.27682, Newton  
 TOTAL FY, 0.0136365, Newton  
 TOTAL FZ, -1.15848, Newton  
 Center of Force about X-Axis (Y-Z), 2.46753, 6.48505, cm  
 Center of Force about Y-Axis (X-Z), -19.4402, 16.3595, cm  
 Center of Force about Z-Axis (X-Y), -3.79344, 2.03451, cm

**Figura 66.** Resultats numèrics estudi 57,7 km/h.

Es pot observar que, tot i que visualment els resultats dels dos estudis són molts similars, els valors numèrics s'eleven molt en el segon estudi. Per tant, per poder comparar millor els resultats numèrics s'elabora una taula aplicant les bases teòriques de l'aerodinàmica explicades anteriorment:

Velocitat	Area frontal (m <sup>2</sup> )	Pressió màx (Pa)	Pressió min (Pa)	Velocitat (km/h)	F <sub>D</sub> (N)	C <sub>D</sub>	Nº Reynolds	F <sub>L</sub> (N)	C <sub>L</sub>	Nº Reynolds
13,5 km/h	0,034	9	-11	18,98	0,0732	0,1271	127224	-0,0588	-0,2043	46735
57,7 km/h	0,034	148	-193	80,26	1,2768	0,1213	543839	-1,1585	-0,2201	199777

**Figura 67.** Taula de resultats numèrics.

A la taula es pot observar els valors tant de pressió com de velocitat a més de les forces i coeficients de sustentació i arrossegament. S'ha de tenir en compte que el valor de força de sustentació que interessa és el valor negatiu, ja que és el que generarà *down force*. Per a cadascun dels casos, també s'ha calculat el nombre de Reynolds tenint en compte la longitud característica en cada cas.

S'observa que, en valor absolut, la força d'arrossegament sempre és lleugerament més alta que la força de sustentació, augmentant molt significativament els dos valors en el segon estudi. El fet que la força d'arrossegament augmenti amb la velocitat significa que, a més velocitat, més gran és la força de resistència a l'aire. D'altra banda, el vehicle també genera més càrrega aerodinàmica quan augmenta la velocitat, ja que augmenta el valor del *down force*. Pel que fa als coeficients, es pot observar que el d'arrossegament ( $C_D$ ) es manté gairebé constant a 0,12, mentre que el de sustentació ( $C_L$ ) augmenta de -0,2 a -0,22 generant aquest augment de *down force*, mencionat anteriorment. Pel que fa al nombre de Reynolds, a mesura que la velocitat augmenta, també augmenten, prenent valors de fins a  $5,4 \times 10^5$  i mantenint-se sempre en la regió de flux turbulent.

## 8. Millores aerodinàmiques del model a escala

Observant els resultats obtinguts de l'estudi del model a escala d'un buggy, es pot afirmar que clarament hi ha quatre punts de millora de l'aerodinàmica per augmentar el rendiment i l'eficiència del vehicle. En els següents apartats es descriuran aquests quatre punts:

- Reduir la resistència al vent amb un nou disseny de la carrosseria a la zona frontal del vehicle per tal que tots els elements que reben la incidència del vent directe; com les rodes, el para-xocs i els amortidors, i que són la principal causa de *drag*, quedin protegits a través d'una carrosseria aerodinàmica de línies suaus que redueixi la resistència de l'aire.
- Un parabrisa frontal més inclinat, pot ajudar a redirigir el flux d'aire de la part superior del vehicle, retardant el despreniment de la capa límit que es produeix a la part en l'extrem superior d'aquest. El despreniment fa que l'aire que arriba a l'aleró posterior, hi arribi a molt baixa velocitat, i per tant es redueix dràsticament la seva eficiència a més d'augmentar el *drag*.
- Millorar l'eficiència de l'aleró posterior a través d'un estudi específic d'aquest, que permeti redefinir les seves característiques utilitzant altres perfils aerodinàmics o un angle d'atac més pronunciat. Aquests canvis permetran generar un *downforce* més alt per augmentar l'adherència de les rodes i millorar l'estabilitat del buggy.
- Millorar l'efecte terra utilitzant un difusor a la part posterior del vehicle per accelerar el flux d'aire a la zona inferior el vehicle i crear una diferència de pressions entre la part superior i la part inferior, que permetin generar *downforce*. Els faldons laterals també són un element que pot ajudar a millorar aquest efecte a més de reduir la turbulència generada per les rodes.

## 9. Conclusions

Aquest Treball de Fi de Grau ha tingut com a objectiu estudiar els punts de millora aerodinàmica d'un model a escala d'un buggy per tal d'augmentar el rendiment i l'eficiència del vehicle. Actualment, l'aerodinàmica és un factor que afecta directament l'eficiència energètica del vehicle, i per tant una millora del rendiment permet augmentar l'autonomia sobretot en els vehicles elèctrics. A través d'una combinació d'anàlisi teòrica dels principis bàsics de l'aerodinàmica i les posteriors simulacions computacionals de fluids, s'han pogut assolir tots els objectius plantejats al començament del treball i s'han obtingut uns resultats satisfactoris.

Després de la realització d'aquest treball s'han pogut comprendre més específicament els principis pels quals es regeix l'aerodinàmica i s'han pogut estudiar els elements que intervenen aerodinàmicament en l'eficiència i l'estabilitat del buggy i del model a escala estudiat. En el modelatge 3D a partir del prototip, s'ha utilitzat el programa CATIA V5 i ha esdevingut una part força laboriosa de l'estudi.

S'ha detallat el funcionament del programa Autodesk CFD aprofundint en tots els aspectes a tenir en compte a l'hora d'elaborar la simulació aerodinàmica del model. També s'han analitzat els resultats obtinguts, tant per l'estudi a velocitat mitjana de 13,5 km/h com per l'estudi a velocitat màxima de 57,7 km/h per tal de detectar possibles punts de millora. L'anàlisi dels resultats s'ha centrat en tres punts. El primer ha sigut l'estudi de les pressions exercides sobre les superfícies del vehicle i en l'aire que l'envolta. Aquest, ens ha permès determinar que el valor màxim de pressió es troba a la zona frontal del vehicle, concretament a les rodes, el para-cops i els amortidors i que aquest factor és la principal causa de generació de *drag*, degut a la resistència a l'avanç. El segon anàlisi ha sigut l'estudi de velocitats de l'aire que ha permès determinar que la succió que genera l'efecte terra és gairebé nul, ja que no hi ha diferència de pressions entre la part superior i la part inferior del vehicle, i per tant, no es genera *down force*. En aquesta anàlisi també s'han pogut determinar els punts on es desprèn la capa límit i que per tant, generen *drag*. Per últim, s'ha fet un càlcul de resultats numèrics per tal de fer una comparativa de valors entre els dos estudis, determinant els coeficients de la resistència de l'aire (*drag*), la sustentació (*lift*) i per últim els coeficients aerodinàmics ( $C_D$  i  $C_L$ ) així com el nombre de Reynolds en cada cas.

Per tant, després de l'anàlisi s'ha pogut concloure que les millores aerodinàmiques que ens permetran obtenir una millora del rendiment i l'eficiència del vehicle són: un nou disseny de la carrosseria a la zona frontal i un parabrisa més inclinat per reduir el *drag*, a més de un aleró posterior més optimitzat i la implementació d'un difusor per augmentar el *down force*. Aquestes millores són importants per al disseny i el desenvolupament de buggys més eficients aerodinàmicament en l'actualitat.

## 10. Bibliografia

[1] RAE, Definició aerodinámico/ca [en línea]. [Consulta: 23/02/2023] Disponible a: <<https://dle.rae.es/aerodin%C3%A1mico>>.

[2] La enciclopedia lliure wikipedia, Aerodinámica del automóvil [en línea]. [Consulta: 23/02/2023] Disponible a: <[https://es.wikipedia.org/wiki/Aerodin%C3%A1mica\\_del\\_autom%C3%B3vil](https://es.wikipedia.org/wiki/Aerodin%C3%A1mica_del_autom%C3%B3vil)>.

[3] Wikimedia commons, Aeroforzas [en línea]. [Consulta: 25/02/2023] Disponible a: <<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Aeroforzas.svg>>.

[4] J. Vives, Apunts del curs Fluidodinàmica al Grau en Enginyeria d'Automoció (Principis d'Aerodinàmica / Aerodinàmica aplicada a l'automoció). [Consulta: 02/03/2023] Disponible a: <<https://www.epsem.upc.edu/ca>>

[5] I. Rivas de la Cavada, Aerodinamica [en línea]. [Consulta: 02/03/2023] Disponible a: <<https://oa.upm.es/13758/1/C14.pdf>>.

[6] L. Miguel Ortego, La aerodinámica y la eficiencia: historia [en línea]. [Consulta: 18/03/2023] Disponible a: <<https://www.diarimotor.com/tecmovia/2013/03/31/aerodinamica-y-eficiencia/>>.

[7] M. Fernández, La capa límite [en línea]. [Consulta: 19/03/2023] Disponible a: <<https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/la-capa-limite/>>.

[8] R. Khorta, Control de capa límite sobre alas a bajo número de Reynolds [en línea]. [Consulta: 19/03/2023] Disponible a: <<https://www.interempresas.net/Aeronautica/Articulos/378589-Control-de-capa-limite-sobre-alas-a-bajo-numero-de-Reynolds-mediante-bombas-eyectoras.html>>.

[9] C. Sánchez, Qué es y cómo funciona el efecto suelo [en línea]. [Consulta: 10/04/2023] Disponible a: <<http://planetadelmotor.com/efecto-suelo-f1-que-es/>>.

[10] D. Robinson, Red Bull SMG Buggy: la máquina perfecta para Dakar [en línea]. [Consulta: 15/04/2023] Disponible a: <<https://www.redbull.com/es-es/red-bull-smg-buggy-la-m%C3%A1quina-perfecta-para-dakar>>.

[11] V. Marcelo. Aerodinámica de perfiles con múltiples superficies de control de flujo [en línea]. [Consulta: 20/04/2023] Disponible a: <<https://ri.conicet.gov.ar/handle/11336/89530>>.

[12] Autodesk CFD, Simulation software for engineering complex liquid, gas, and air systems [en línea]. [Consulta: 25/04/2023] Disponible a: <https://www.autodesk.com/products/cfd/overview>.

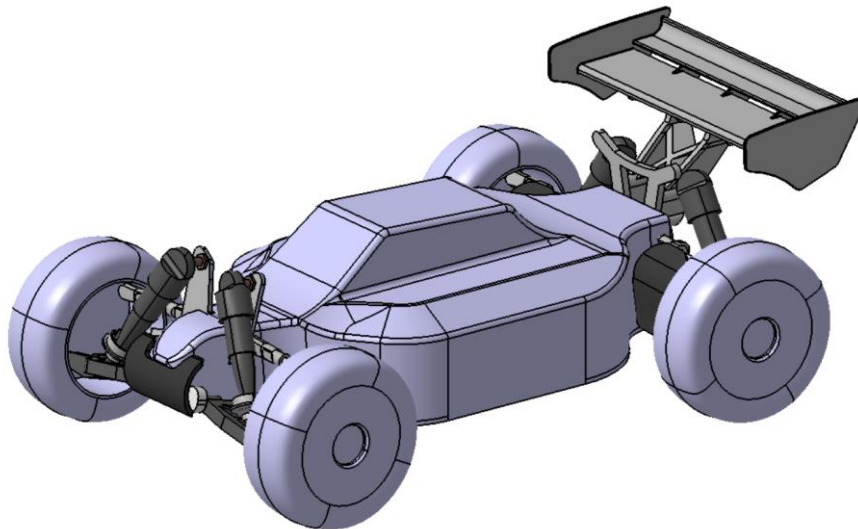
[13] S. Iglesias, Validación de un modelo numérico CFD para el análisis de vehículos lanzadores [en línea]. [Consulta: 25/04/2023] Disponible a: <https://riunet.upv.es/bitstream/handle/10251/185181/Iglesias%20-%20Validacion%20de%20un%20modelo%20numerico%20CFD%20para%20el%20analis%20de%20vehiculos%20lanzadores.pdf?sequence=1>.

[14] CFD Online. Spalart-Allmaras model. systems [en línea]. [Consulta: 25/04/2023] Disponible a: [https://www.cfd-online.com/Wiki/Standard\\_k-epsilon\\_model](https://www.cfd-online.com/Wiki/Standard_k-epsilon_model).

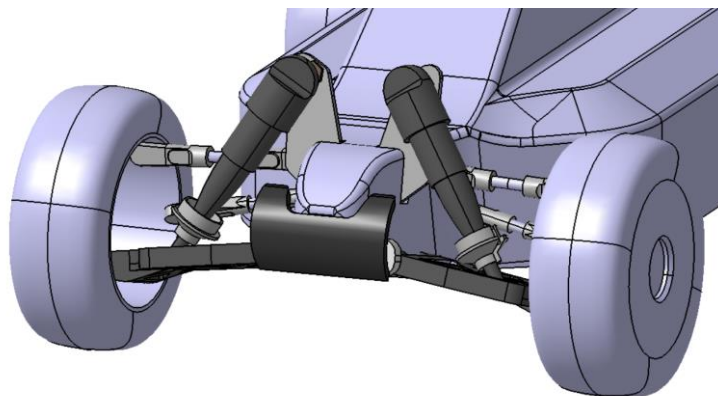
## 11. Annexos

---

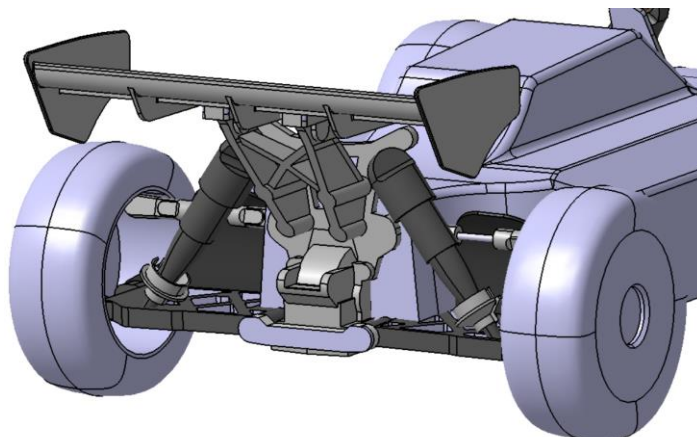
### 01.- Annex I. El model 3D.



*Vista isomètrica.*

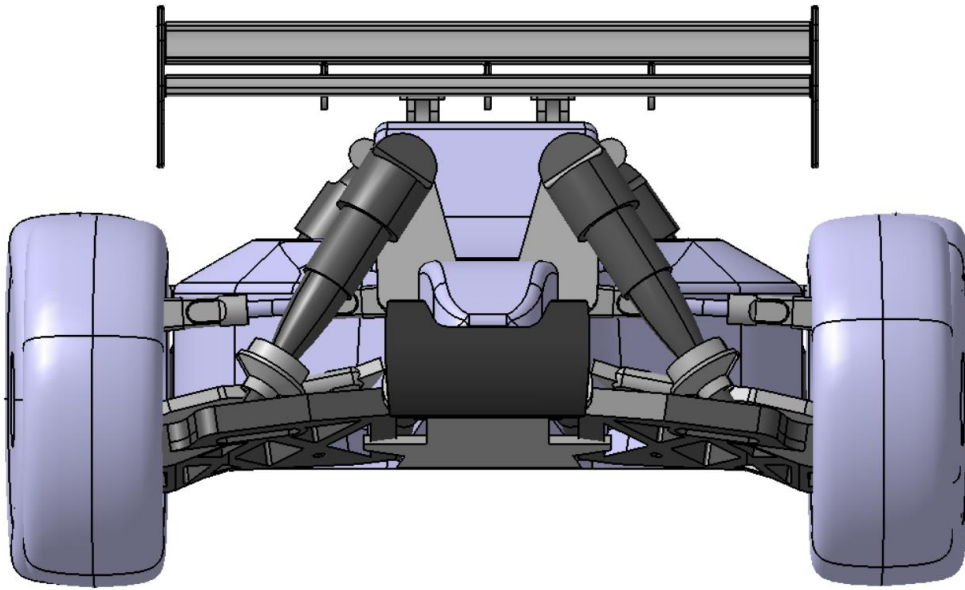


*Vista detall frontal.*

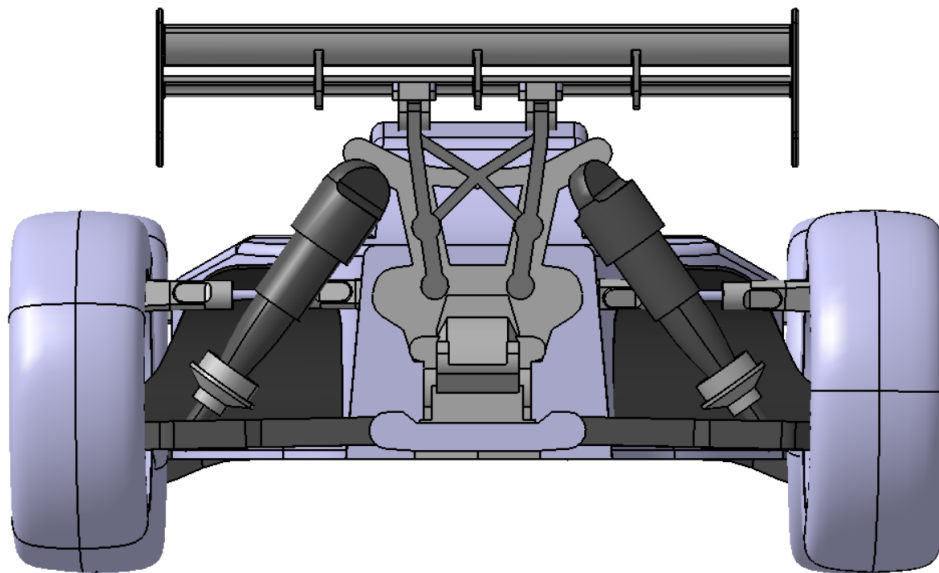


*Vista detall posterior.*

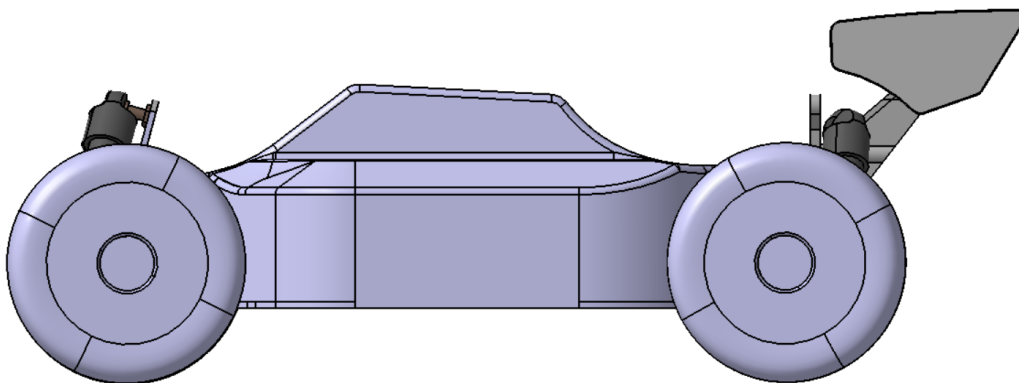




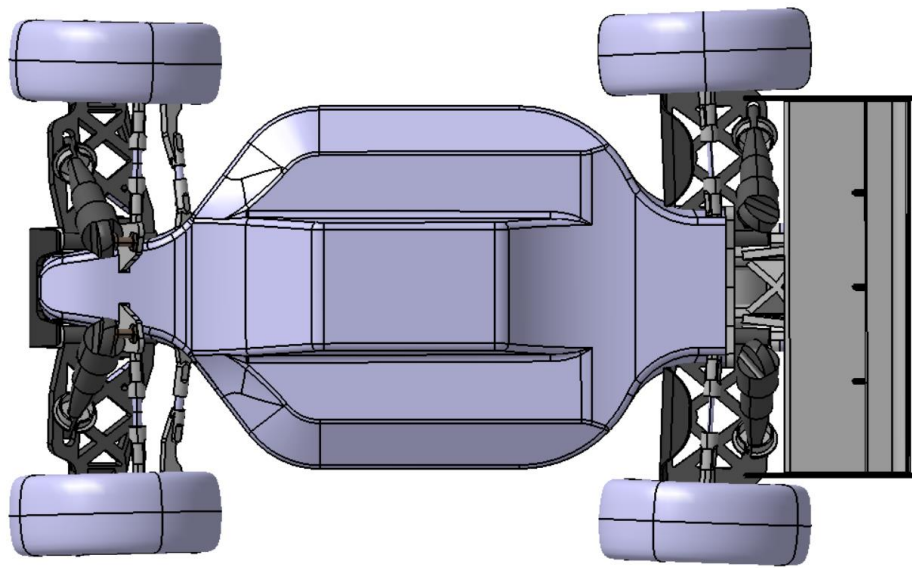
*Vista frontal.*



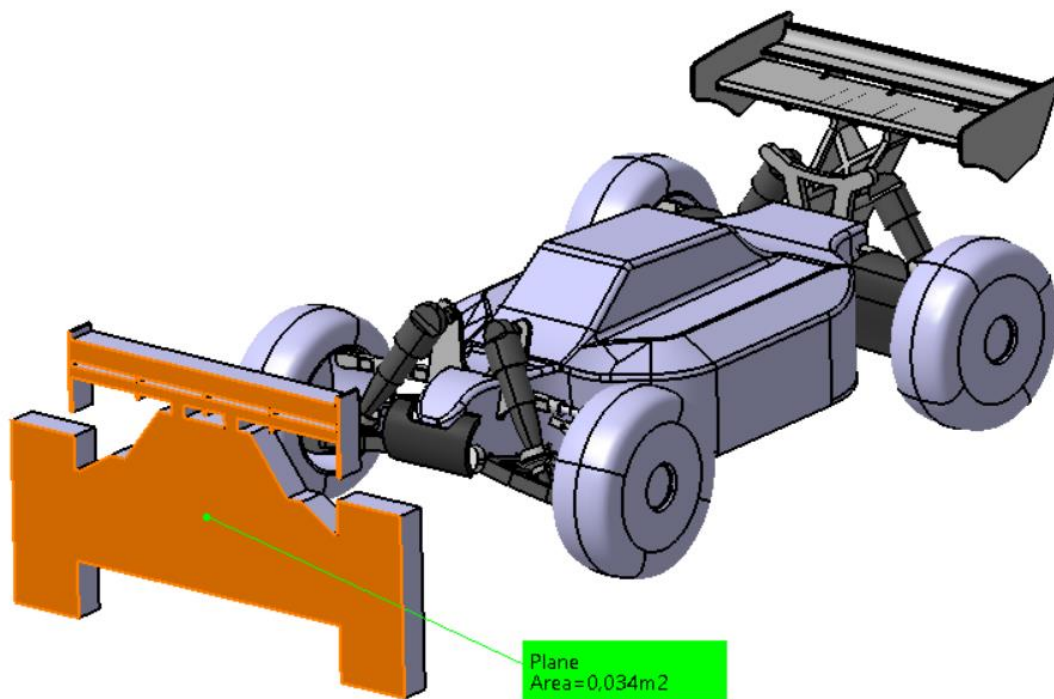
*Vista posterior.*



*Vista lateral.*



*Vista superior.*



*Àrea frontal d'incidència.*

D

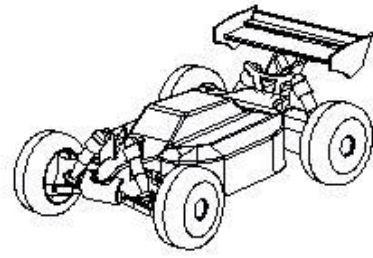
C

B

A

4

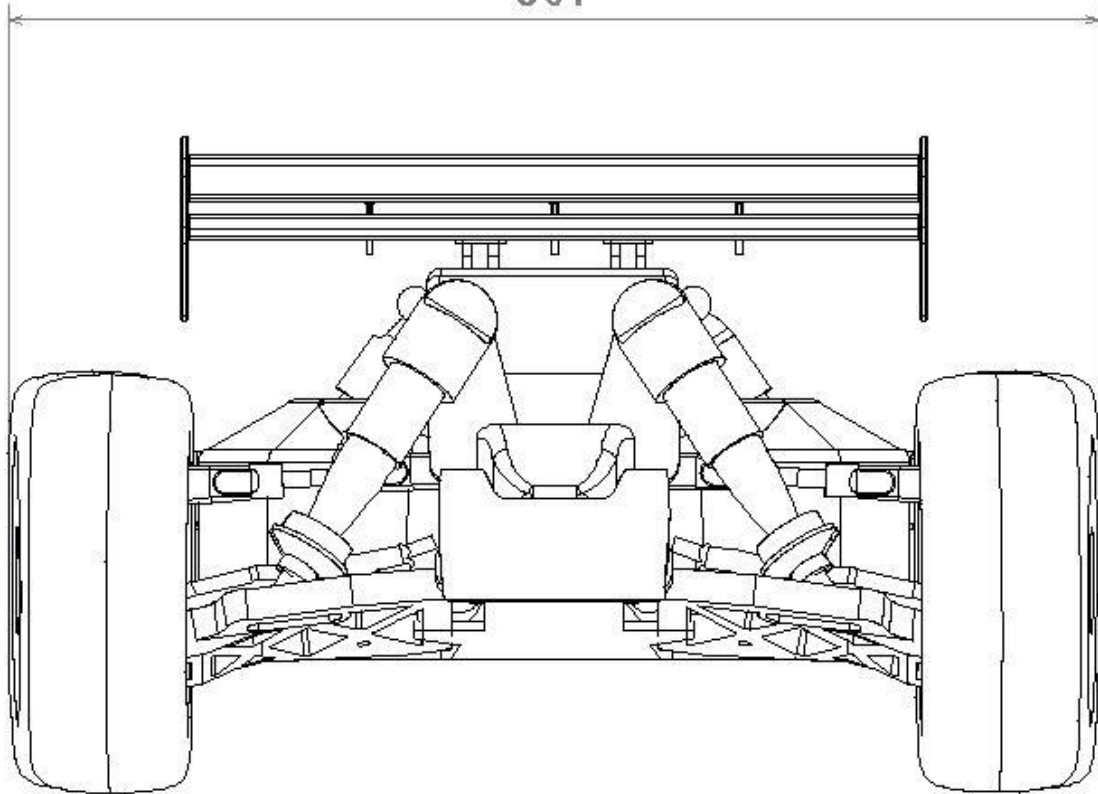
4



307

3

3



2

2

Front view  
Scale: 1:2

1

1

DESIGNED BY:  
**Jordi**  
DATE:  
**08/04/2023**  
CHECKED BY:  
DATE:

# MODEL 3D

SIZE  
**A4**

# DASSAULT SYSTEMES

SCALE  
**1:1**

WEIGHT (kg)  
DRAWING NUMBER

SHEET  
**1/1**

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A

D

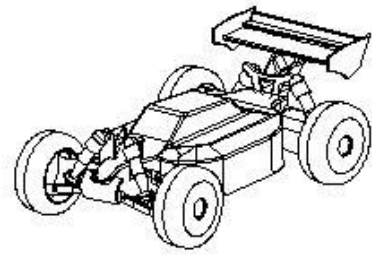
C

B

A

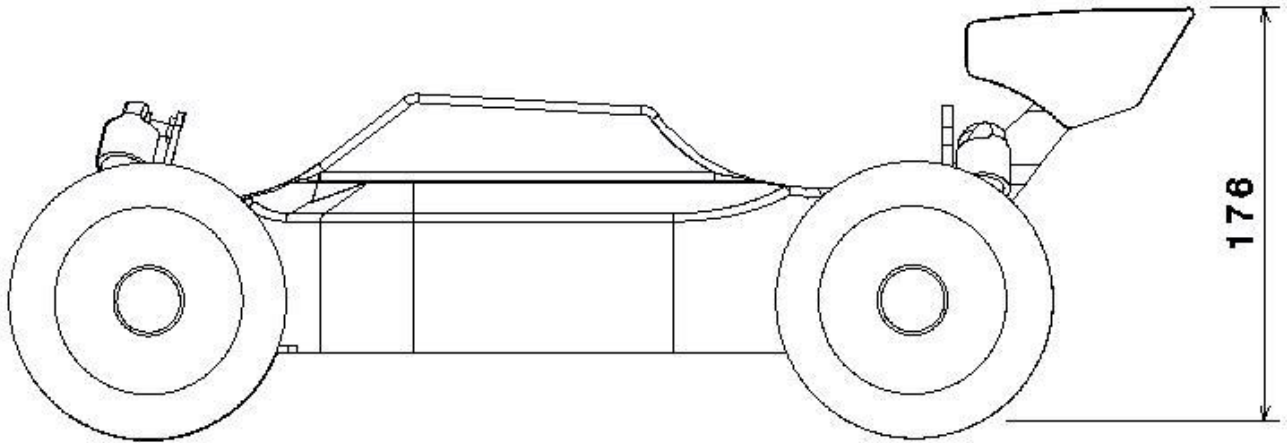
4

4



3

3



2

2

Lateral view  
Scale: 1:3

1

1

DESIGNED BY:  
**Jordi**  
DATE:  
**08/04/2023**  
CHECKED BY:  
DATE:

**MODEL 3D**

SIZE  
**A4**

**DASSAULT SYSTEMES**

SCALE  
**1:1**

WEIGHT (kg)  
DRAWING NUMBER

SHEET  
**1/1**

I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

D

A

D

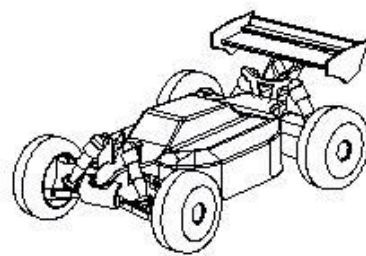
C

B

A

4

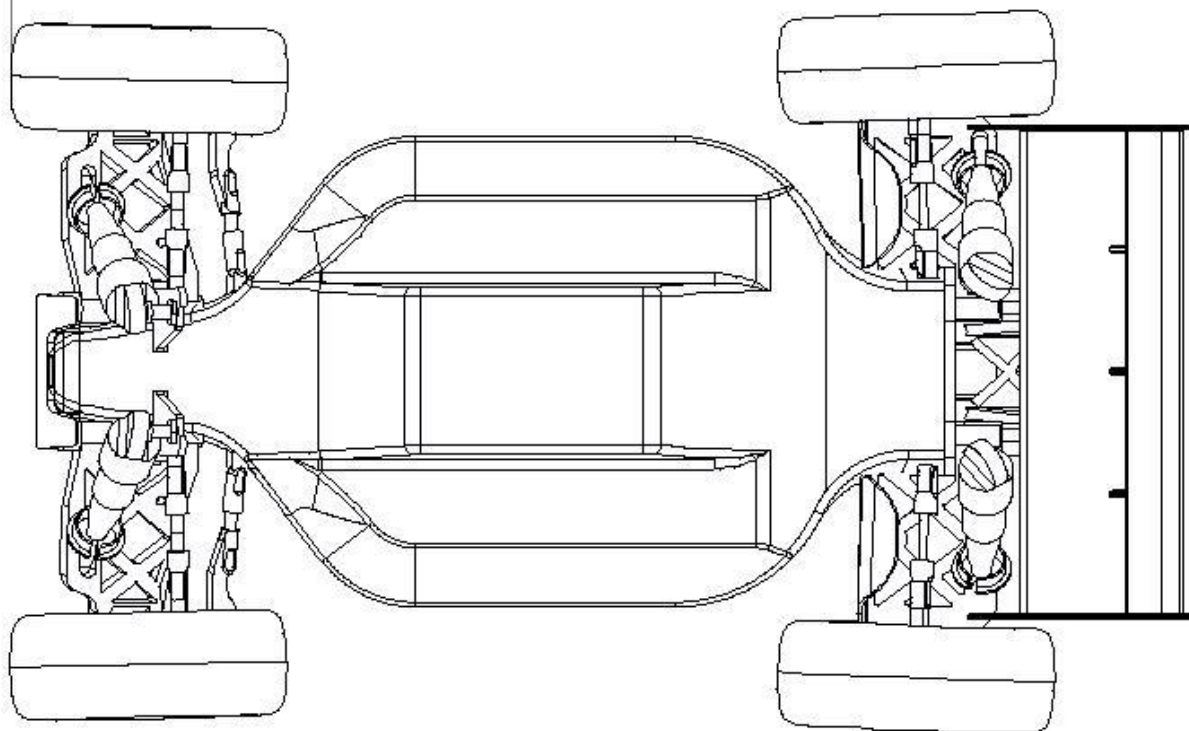
4



504

3

3



2

2

Top view  
Scale: 1:3

1

1

DESIGNED BY:  
**Jordi**  
DATE:  
**08/04/2023**  
CHECKED BY:  
DATE:

# MODEL 3D

SIZE  
**A4**

# DASSAULT SYSTEMES

SCALE  
**1:1**

WEIGHT (kg)

DRAWING NUMBER

SHEET

**1/1**

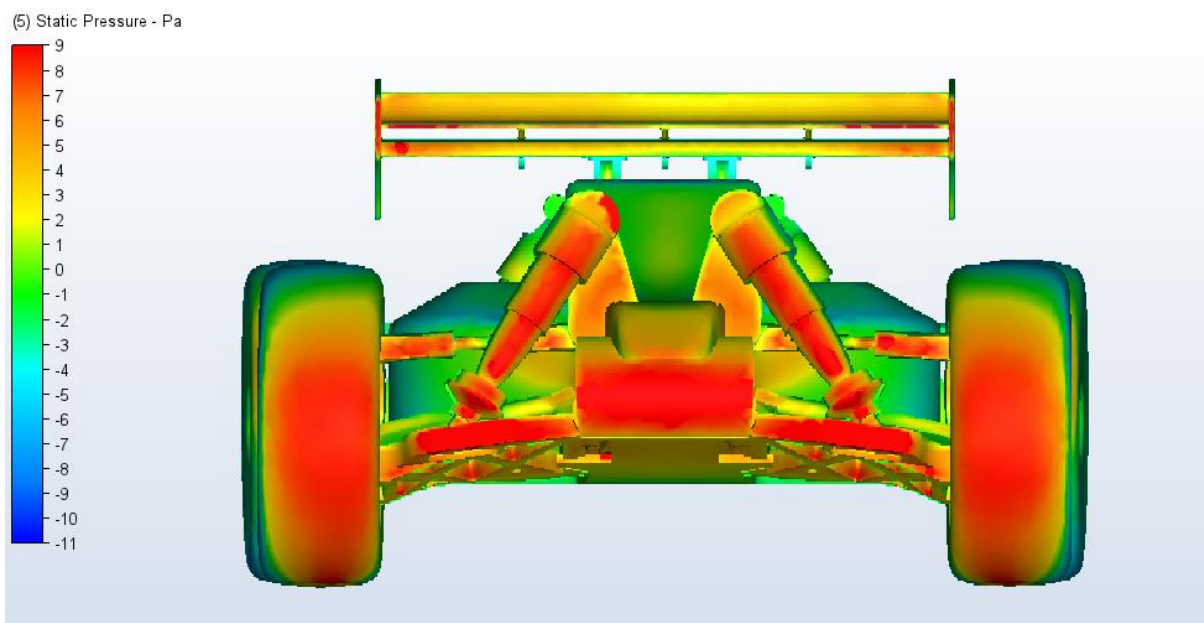
I	-
H	-
G	-
F	-
E	-
D	-
C	-
B	-
A	-

This drawing is our property; it can't be reproduced or communicated without our written agreement.

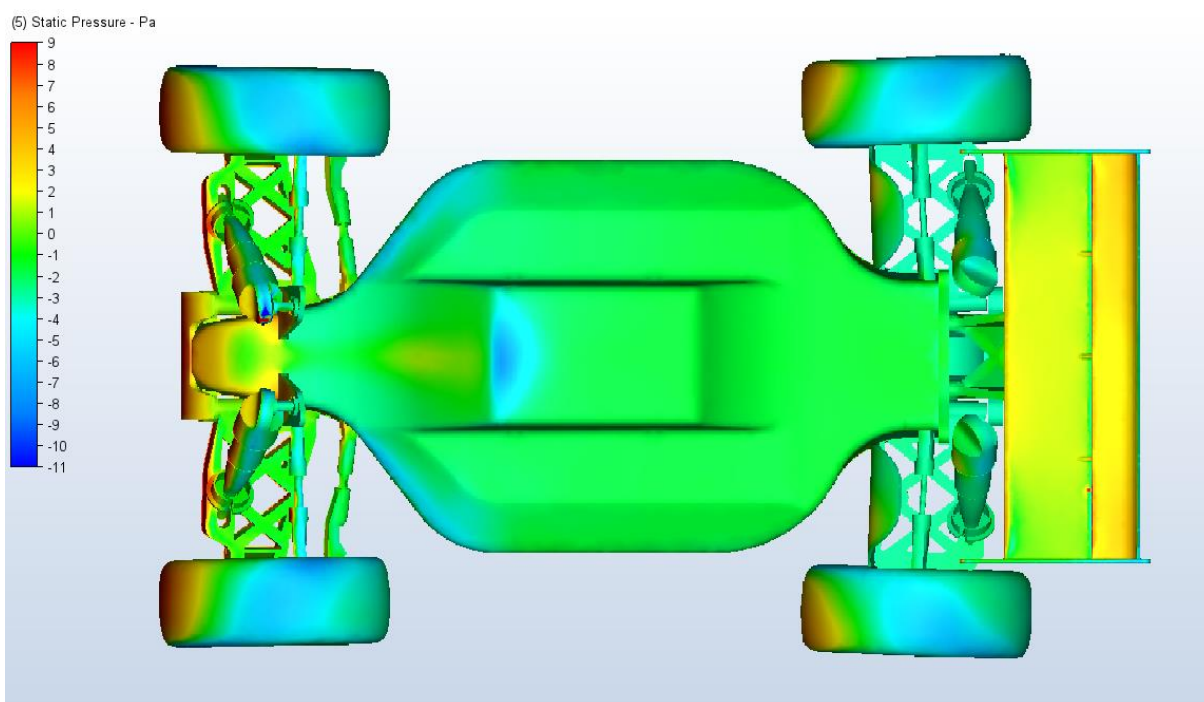
D

A

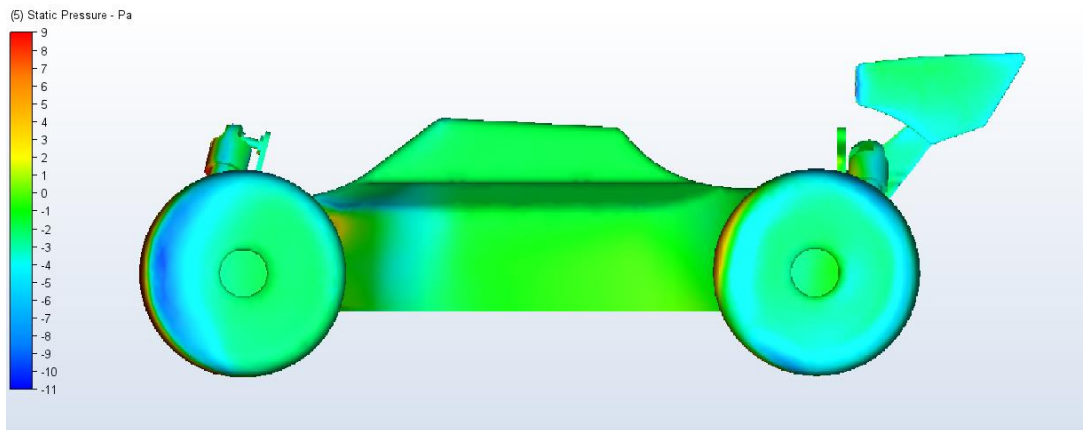
## 02.- Annex II. Estudi a velocitat mitjana de 13,5 km/h.



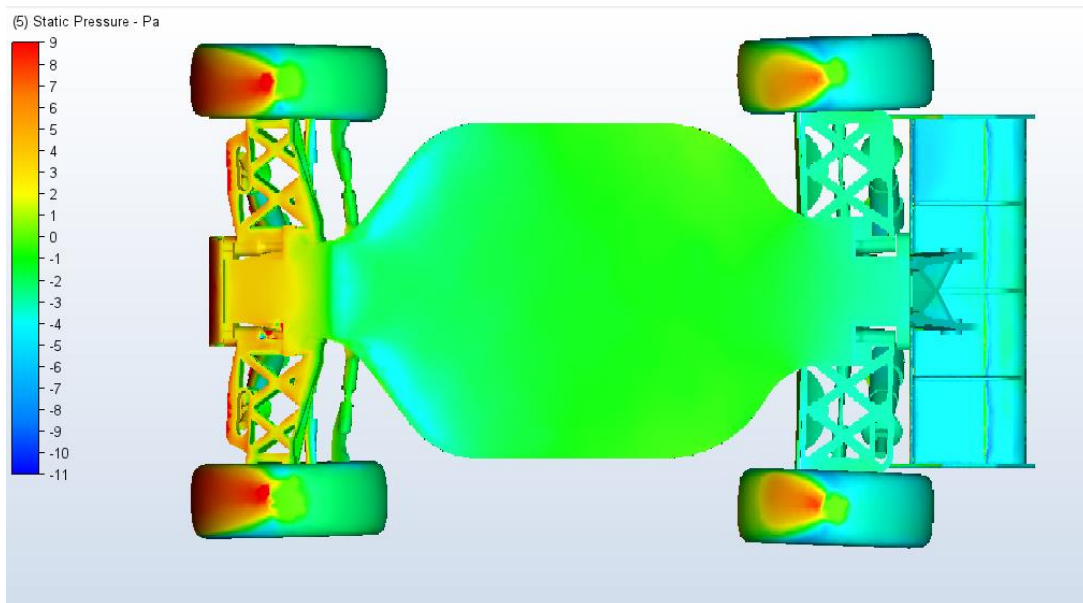
*Vista frontal pressió total.*



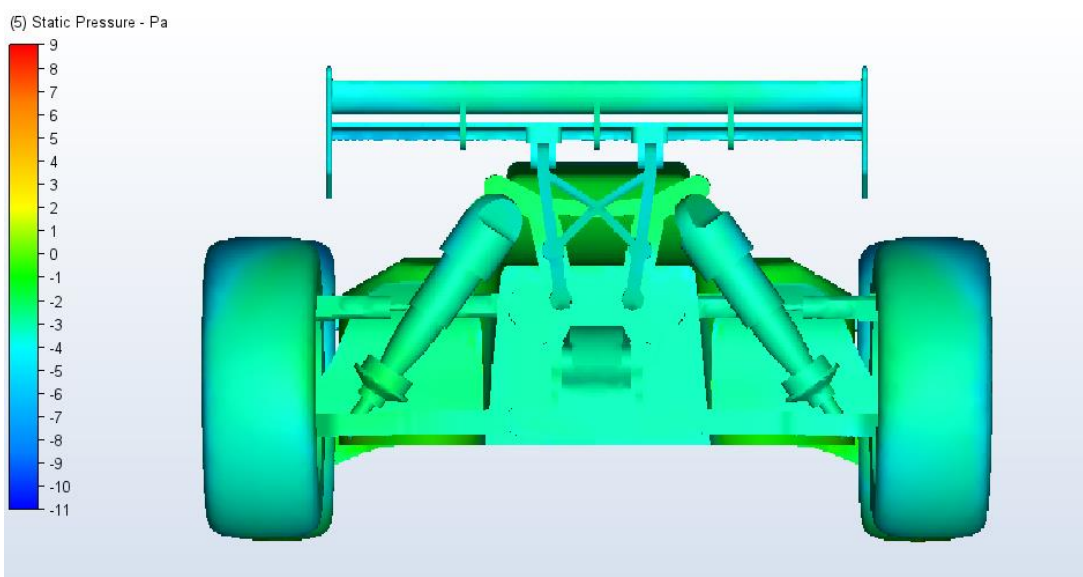
*Vista planta pressió total.*



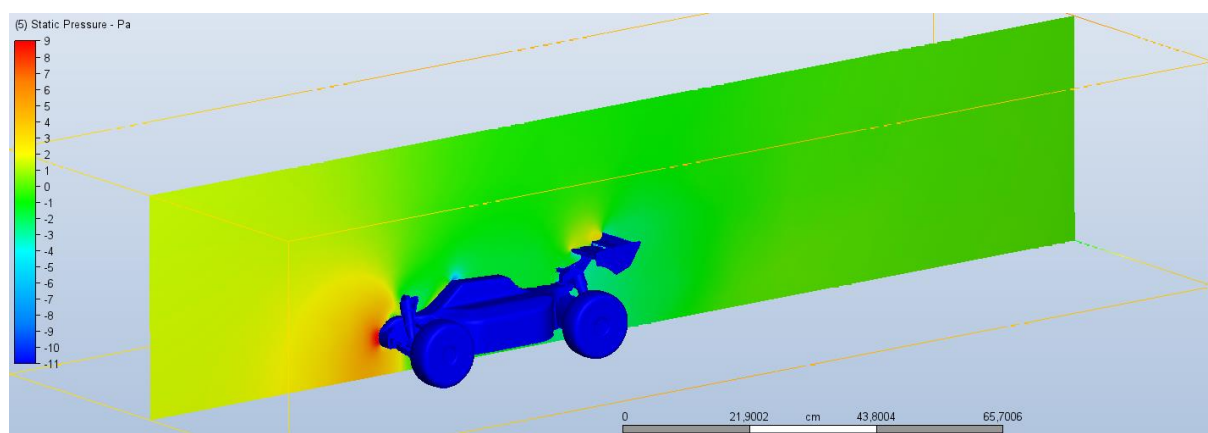
*Vista lateral pressió total.*



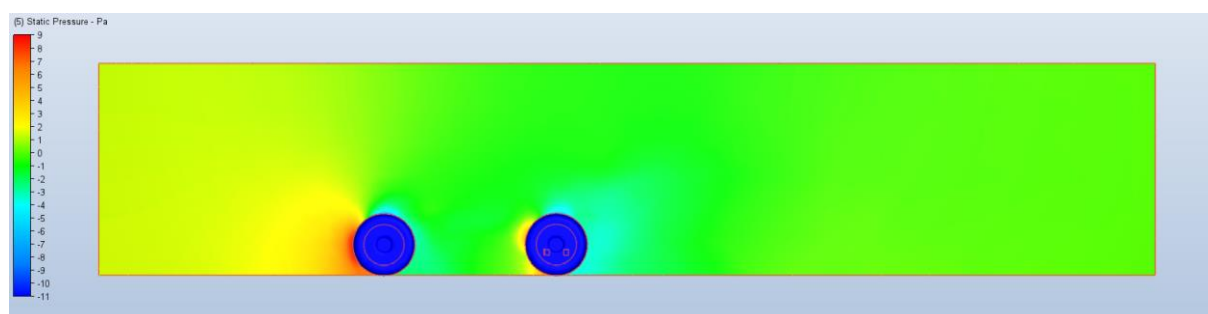
*Vista inferior pressió total.*



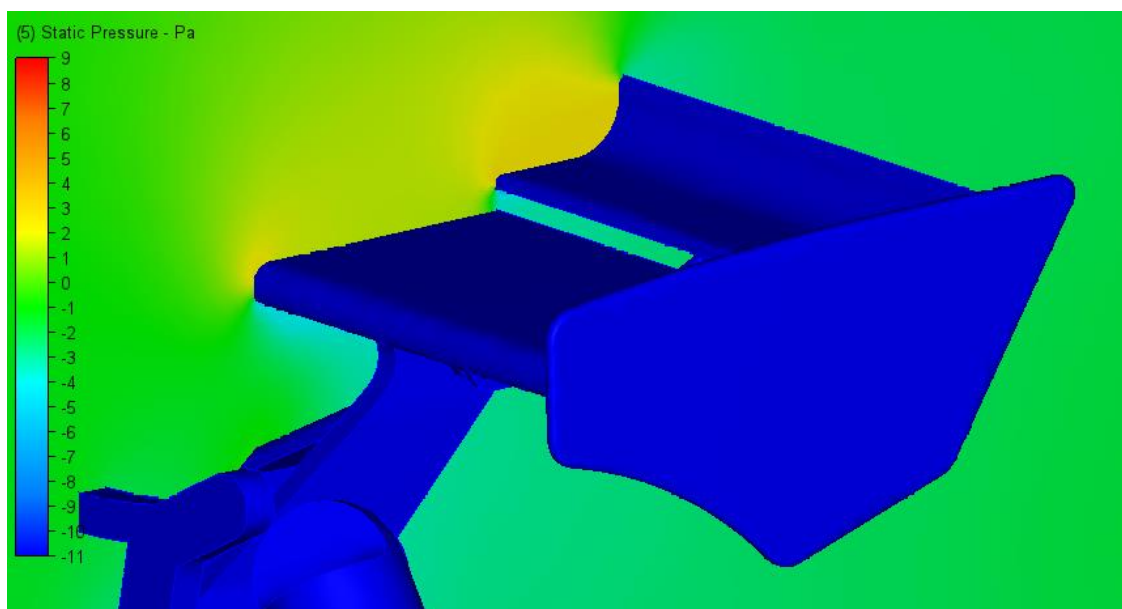
*Vista posterior pressió total.*



*Vista isomètrica pressió total.*

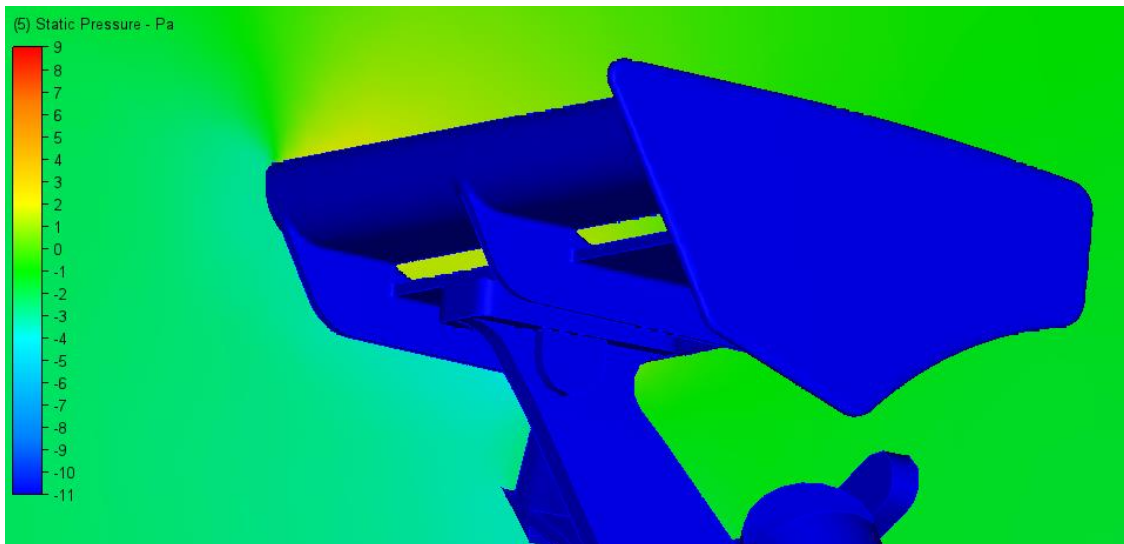


*Vista detall lateral pressió rodes.*

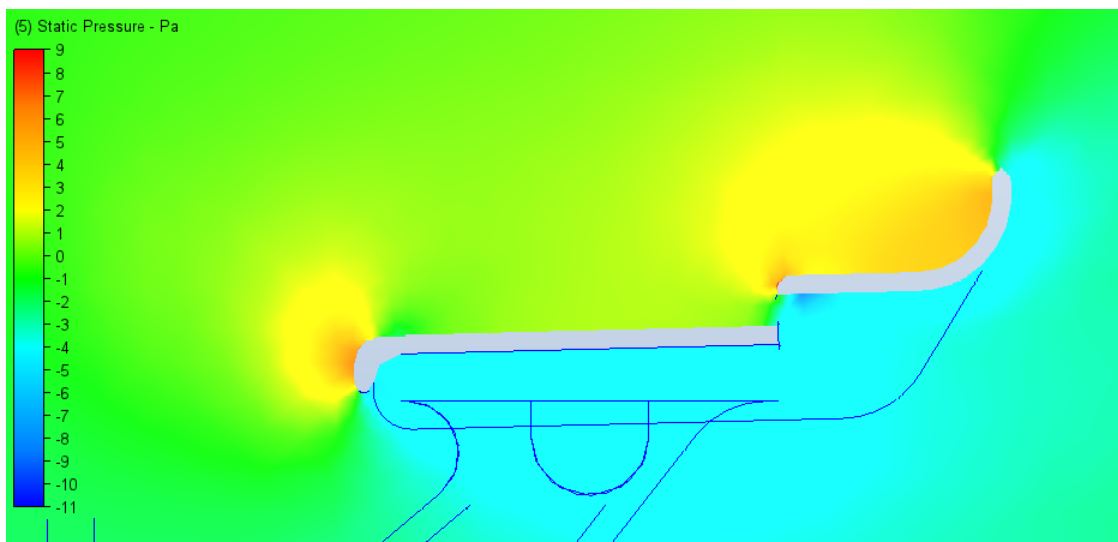


*Vista detall pressió aleró.*

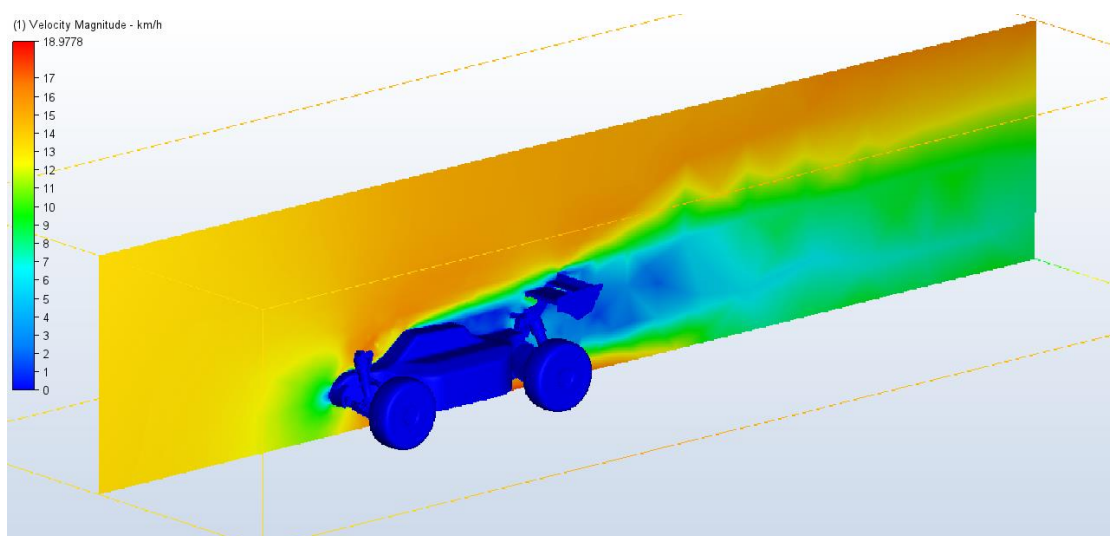




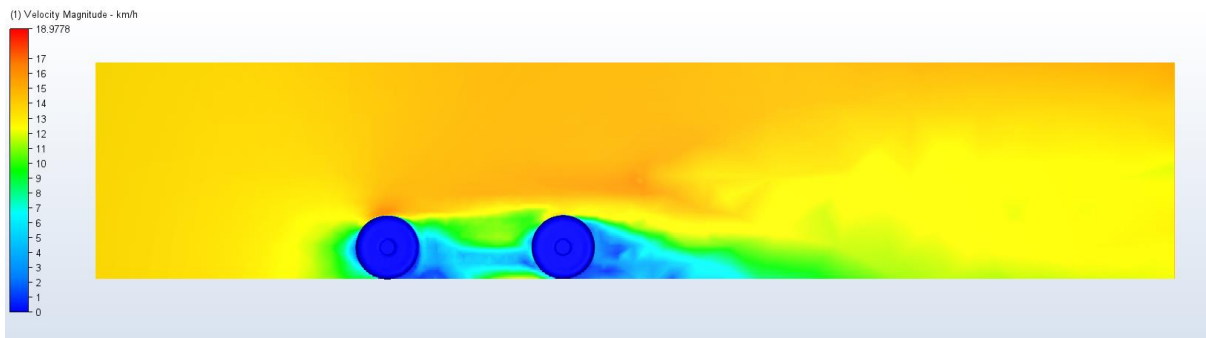
*Vista detall pressió aleró.*



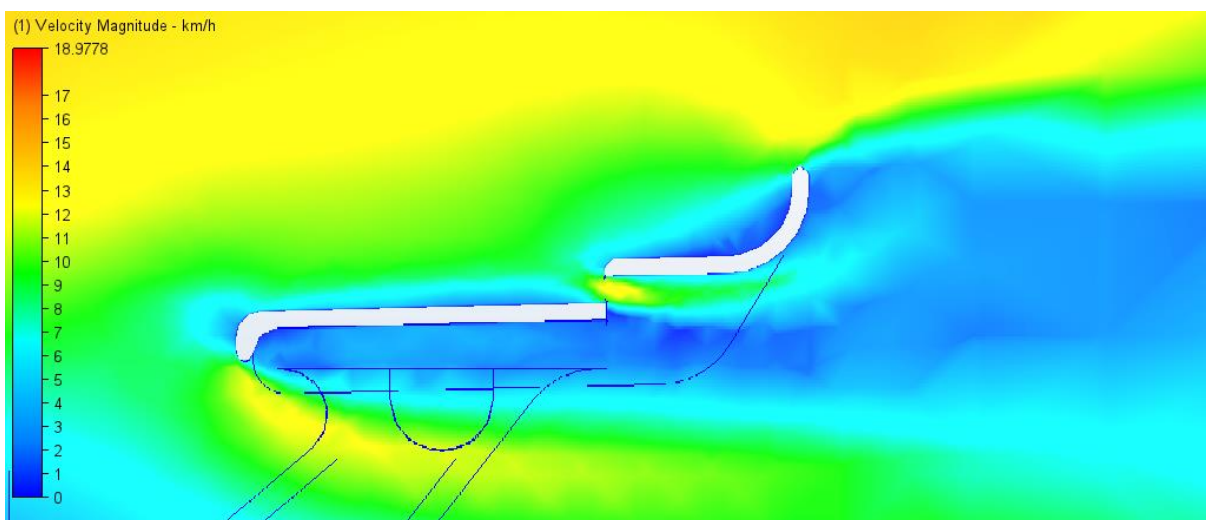
*Vista detall lateral pressió aleró.*



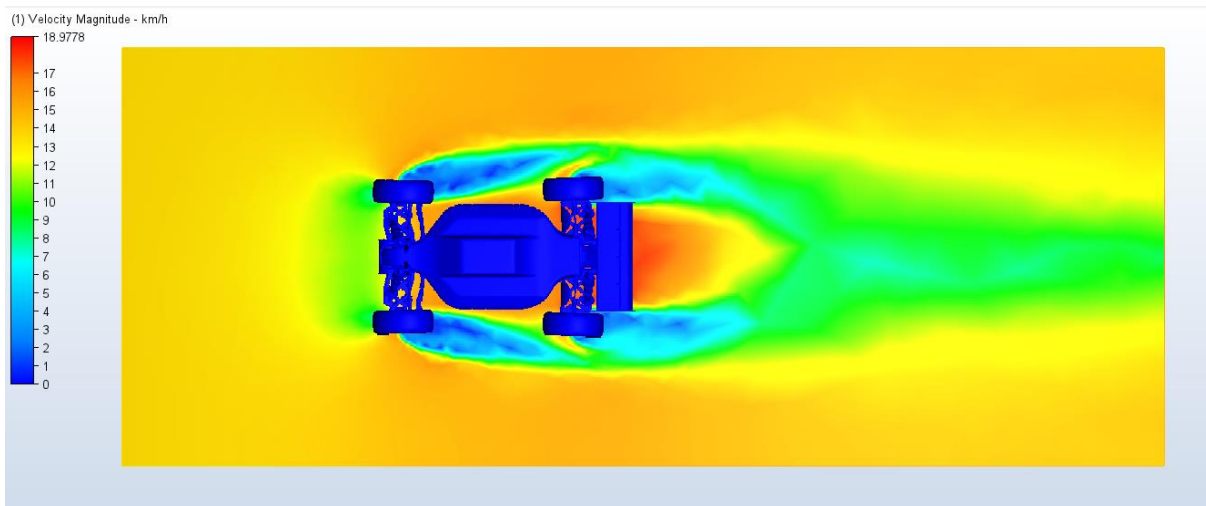
*Vista isomètrica velocitat de l'aire.*



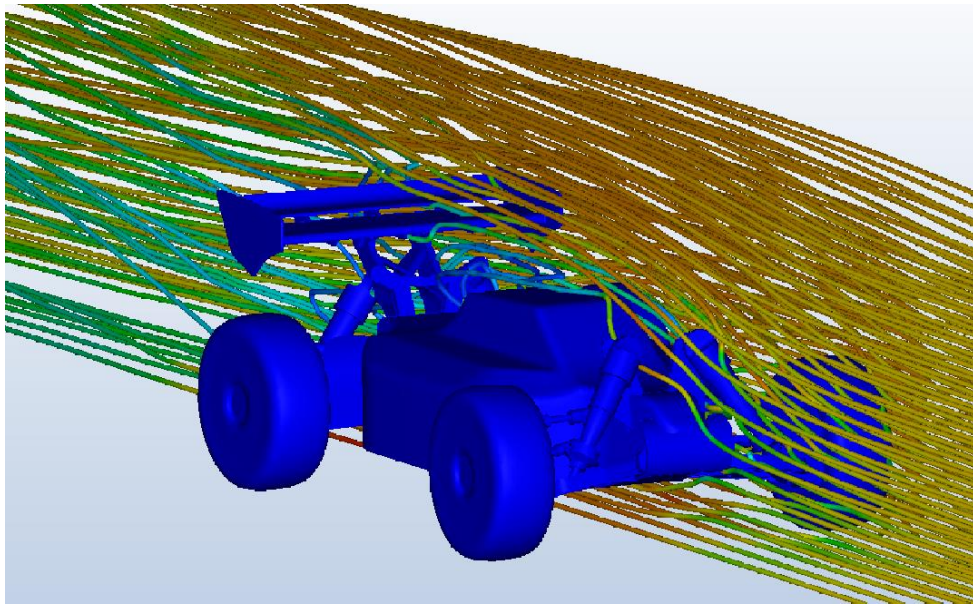
*Vista detall velocitat de l'aire a les rodes.*



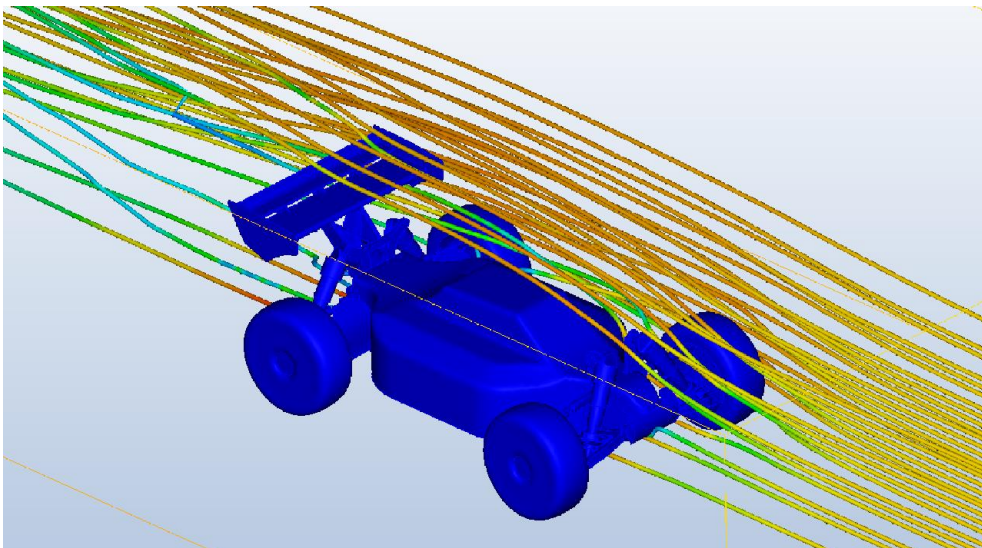
*Vista detall velocitat de l'aire a l'aleró.*



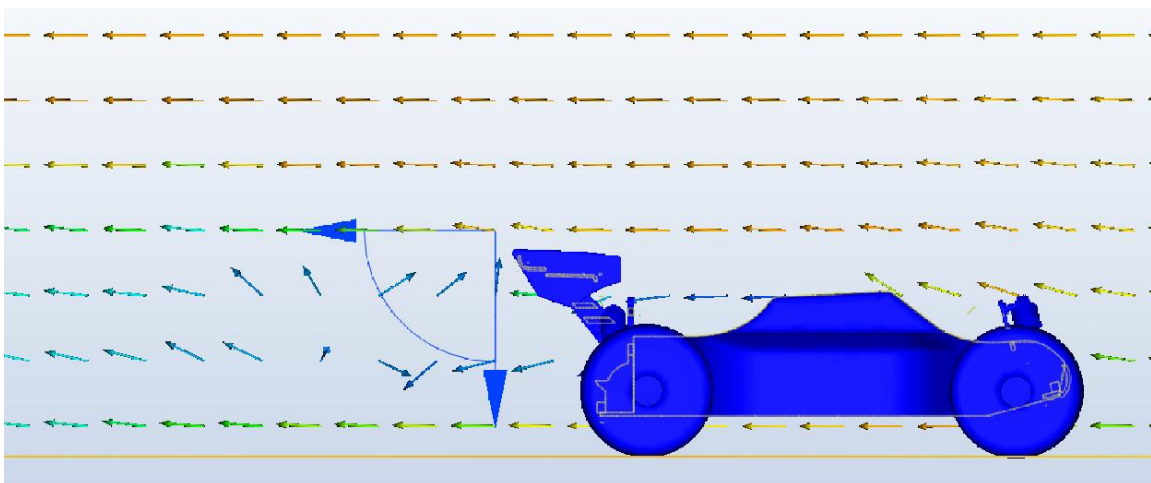
*Vista planta velocitat de l'aire al terra.*



*Vista isomètrica línies de corrent.*

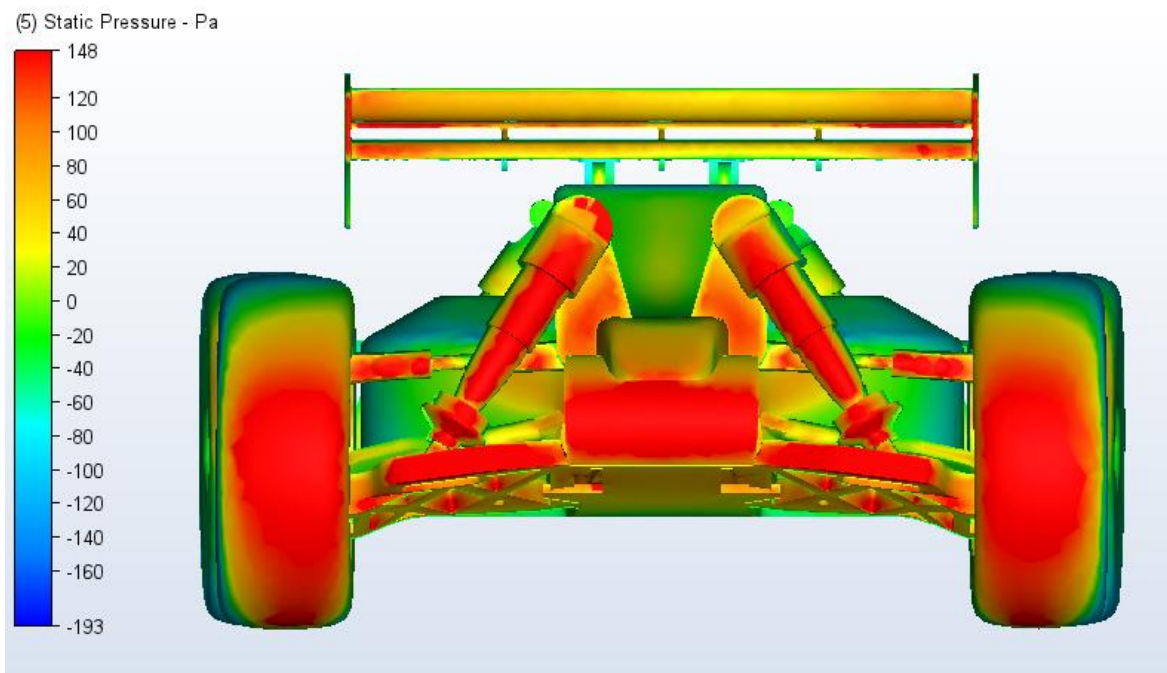


*Vista isomètrica línies de corrent.*

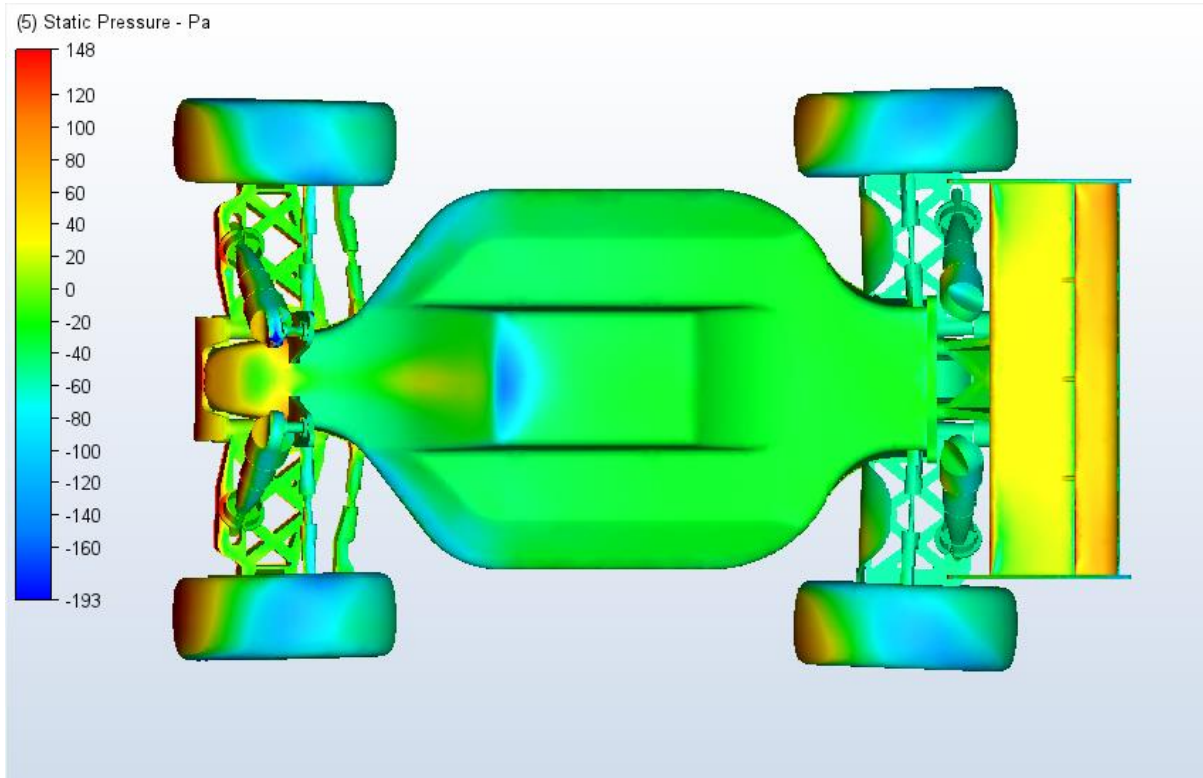


*Vista lateral vectors de velocitat.*

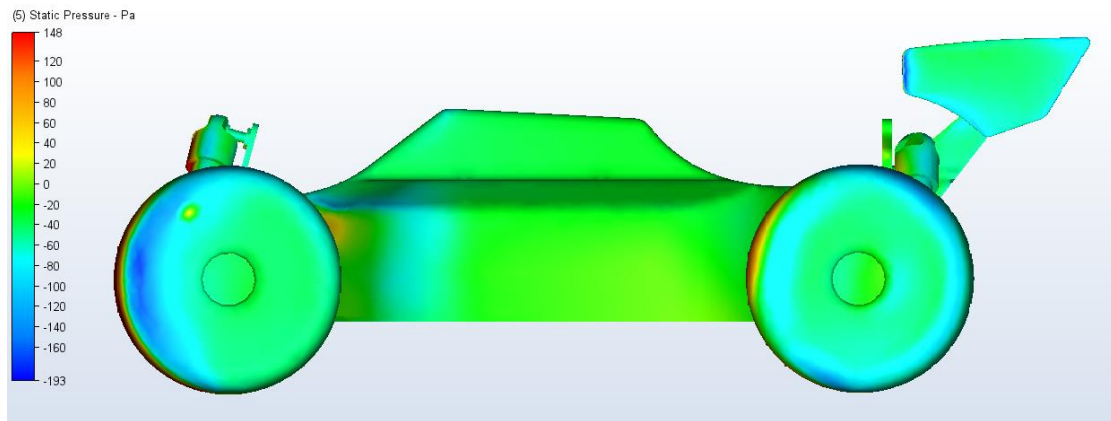
### 03.- Annex III. Estudi a velocitat màxima de 57,7 km/h.



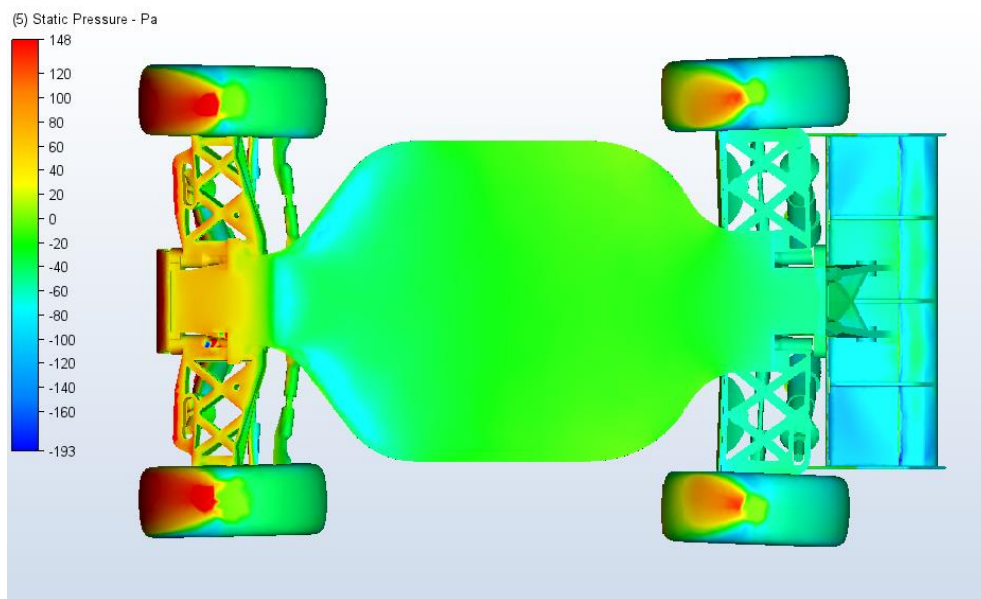
*Vista frontal pressió total.*



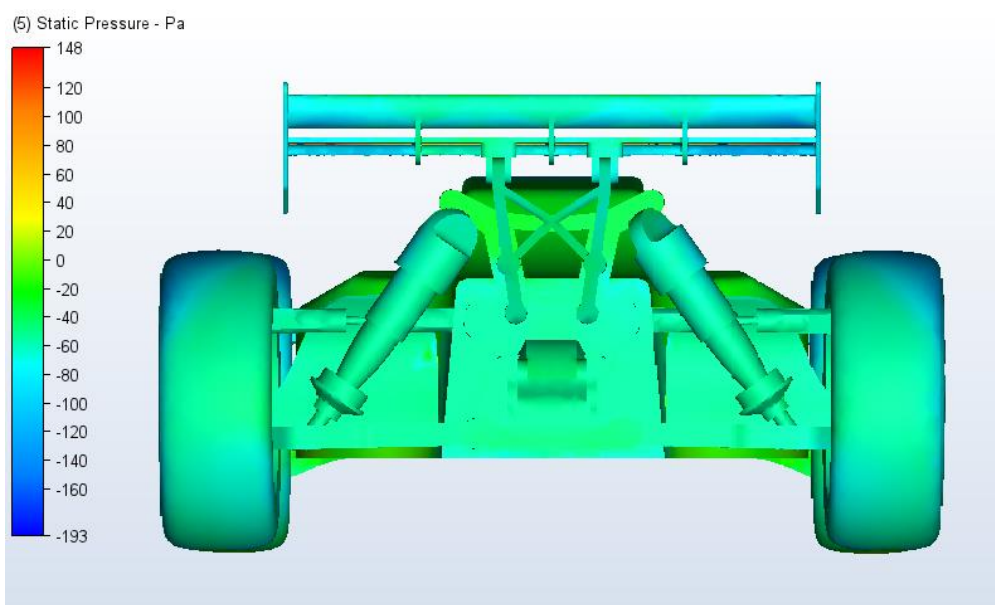
*Vista planta pressió total.*



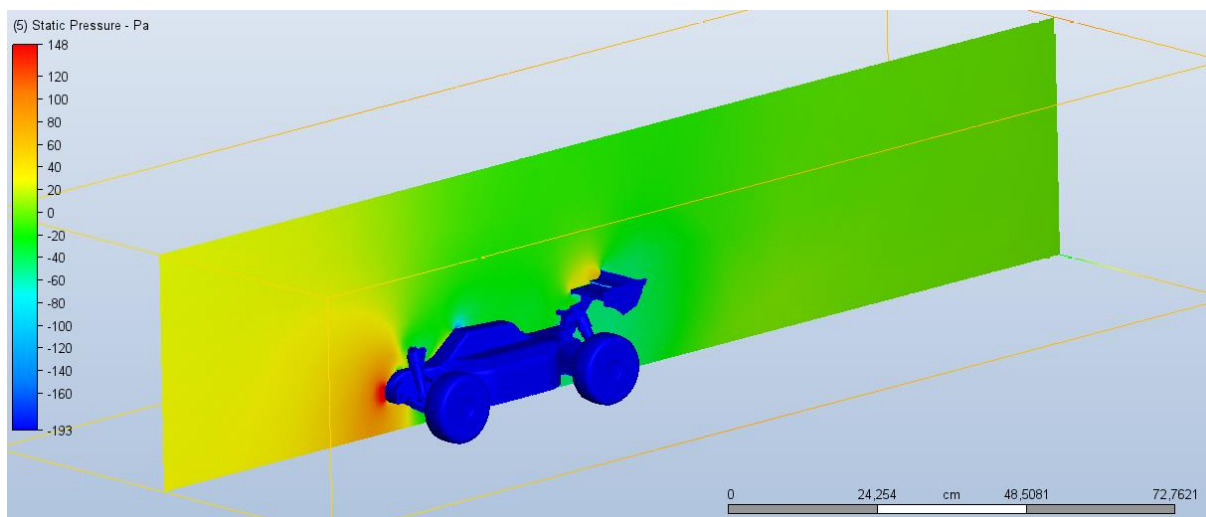
*Vista lateral pressió total.*



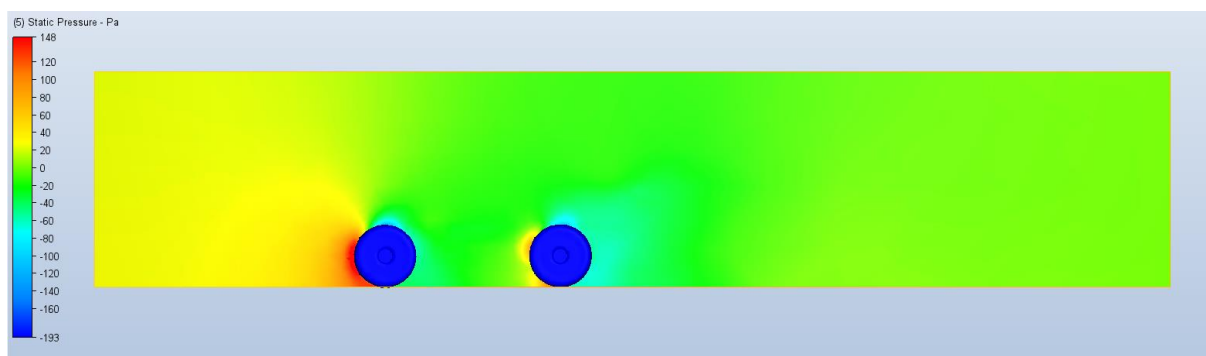
*Vista inferior pressió total.*



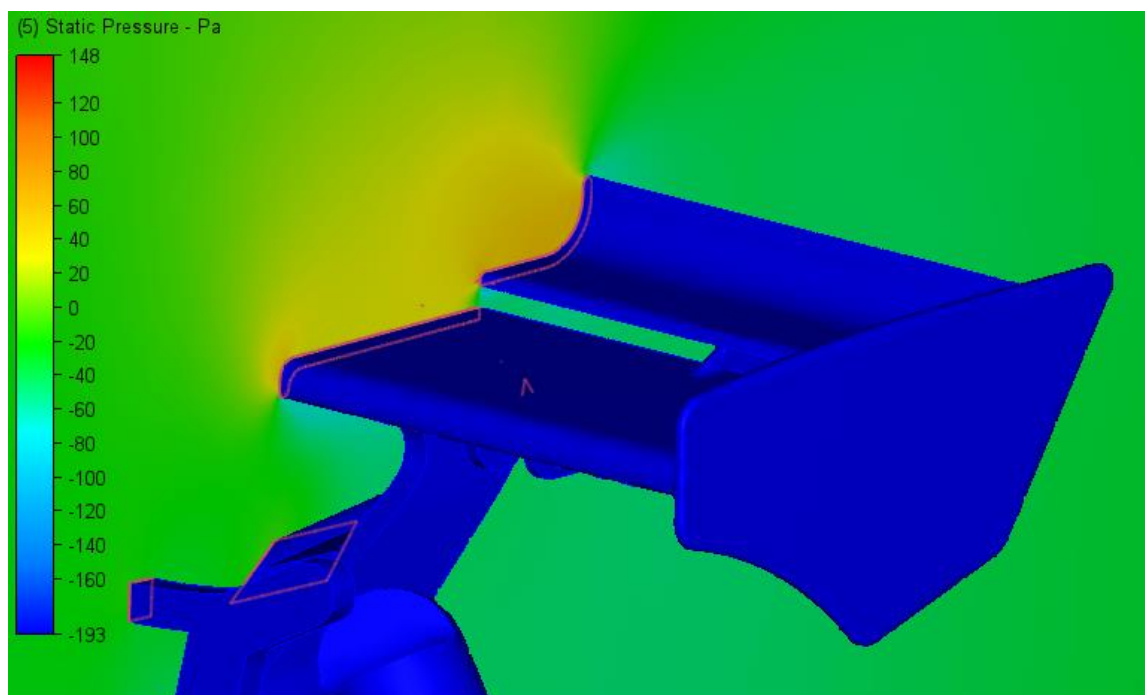
*Vista posterior pressió total.*



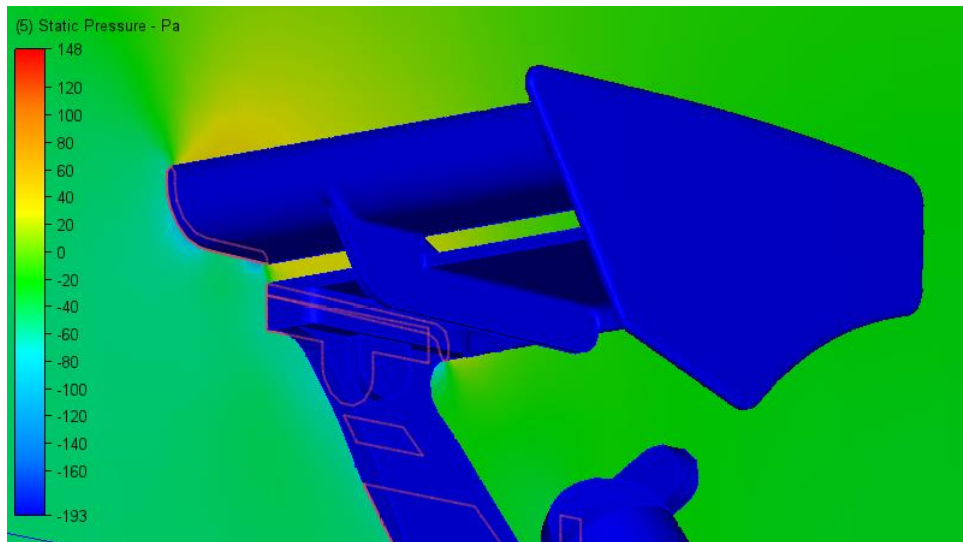
*Vista isomètrica pressió total.*



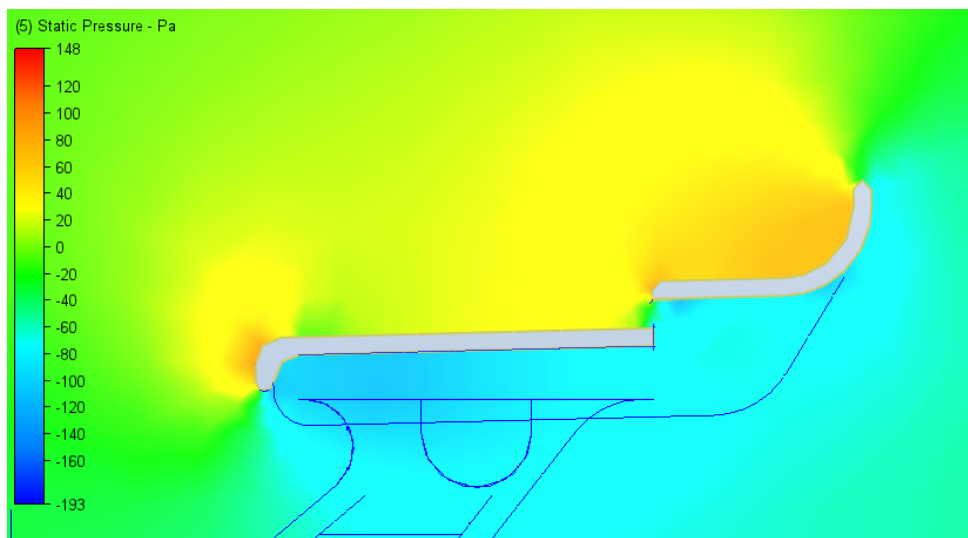
*Vista detall lateral pressió rodes.*



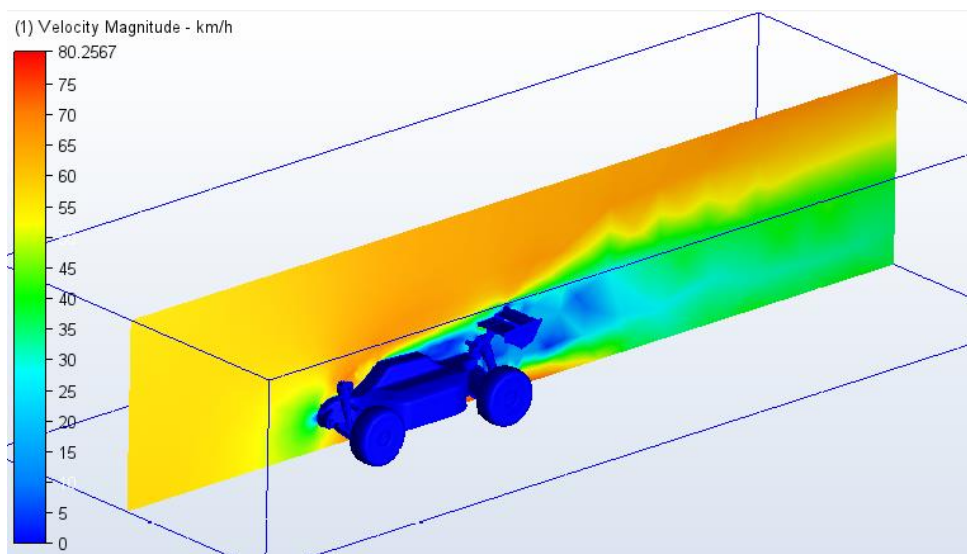
*Vista detall pressió aleró.*



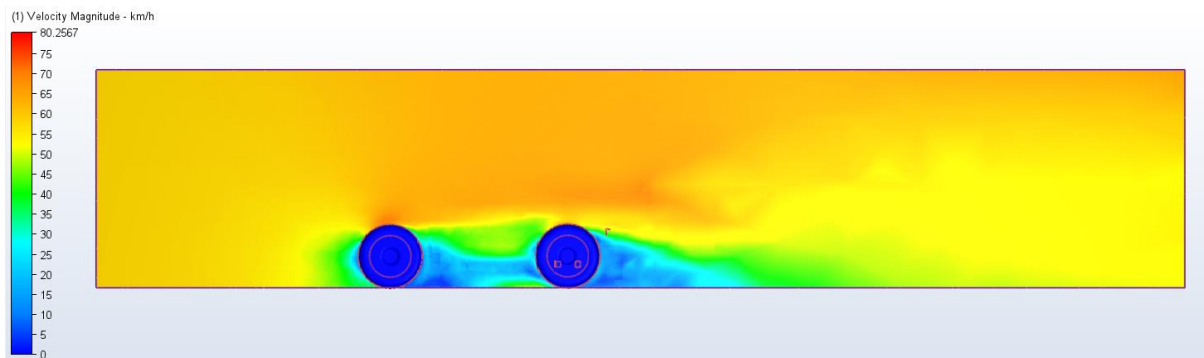
*Vista detall pressió aleró.*



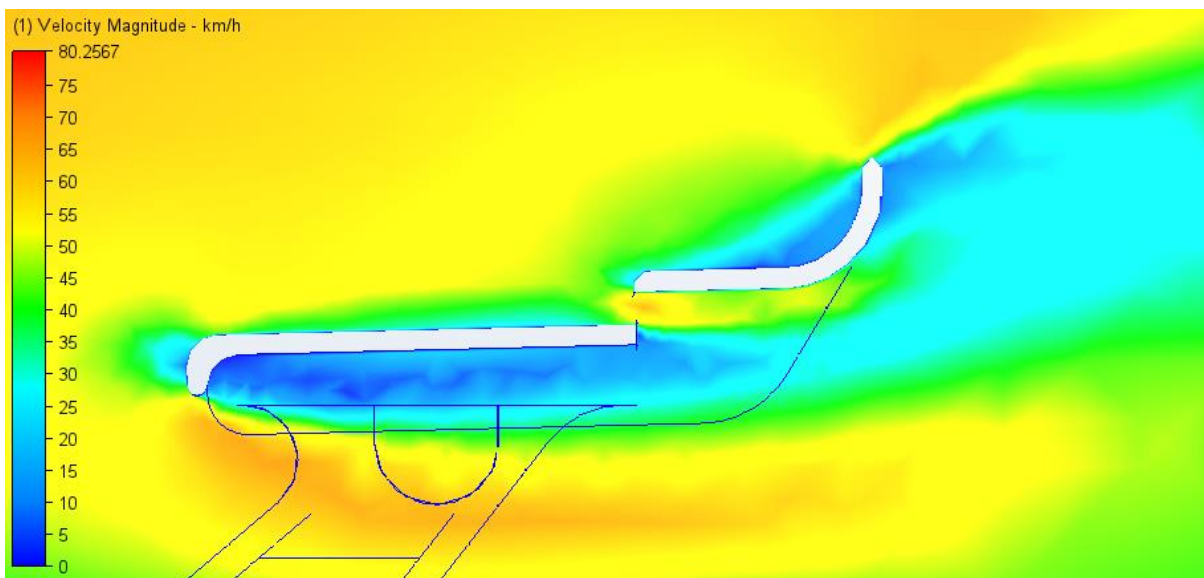
*Vista detall lateral pressió aleró.*



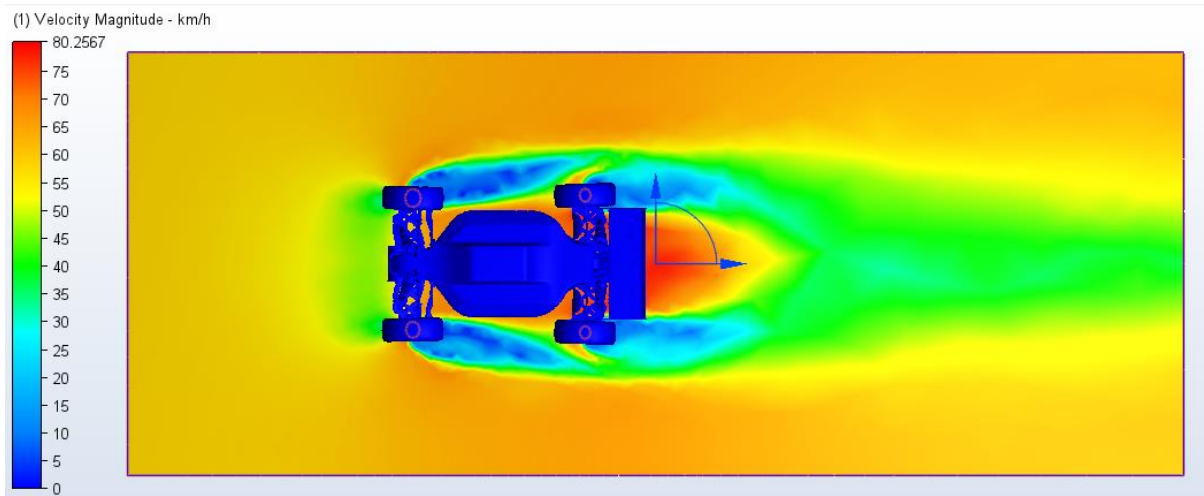
*Vista isomètrica velocitat de l'aire.*



*Vista detall velocitat de l'aire a les rodes.*

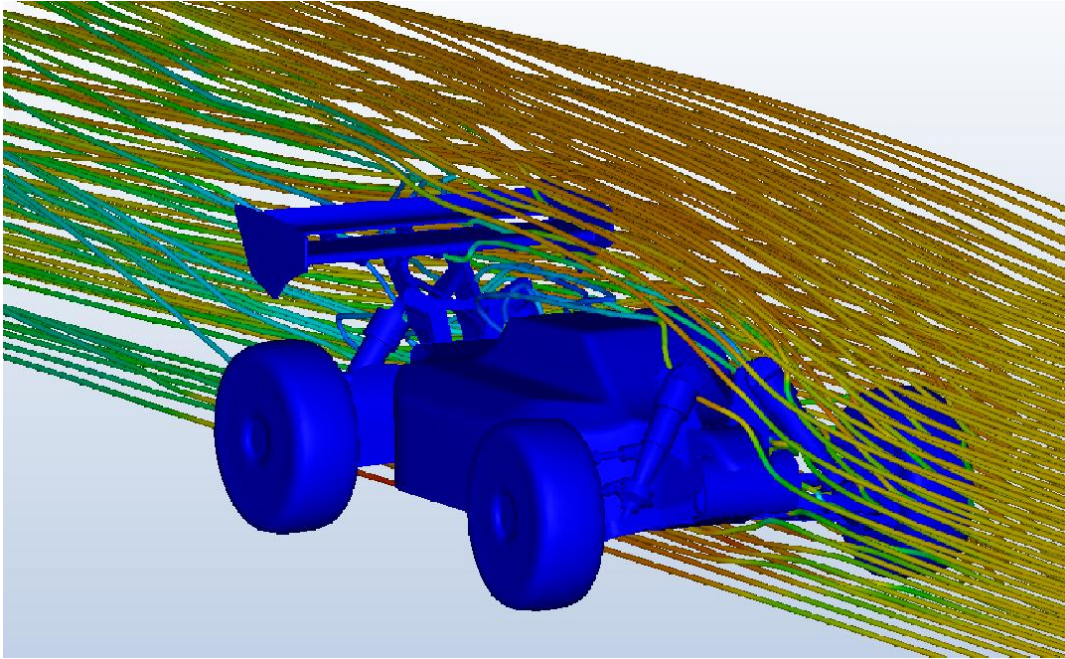


*Vista detall velocitat de l'aire a l'aleró.*

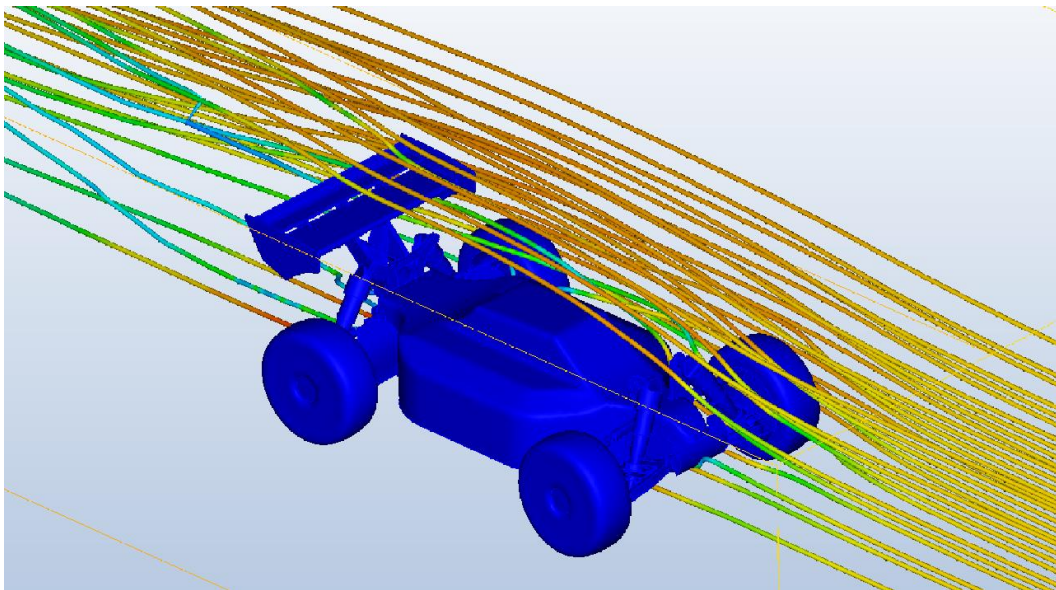


*Vista planta velocitat de l'aire al terra.*

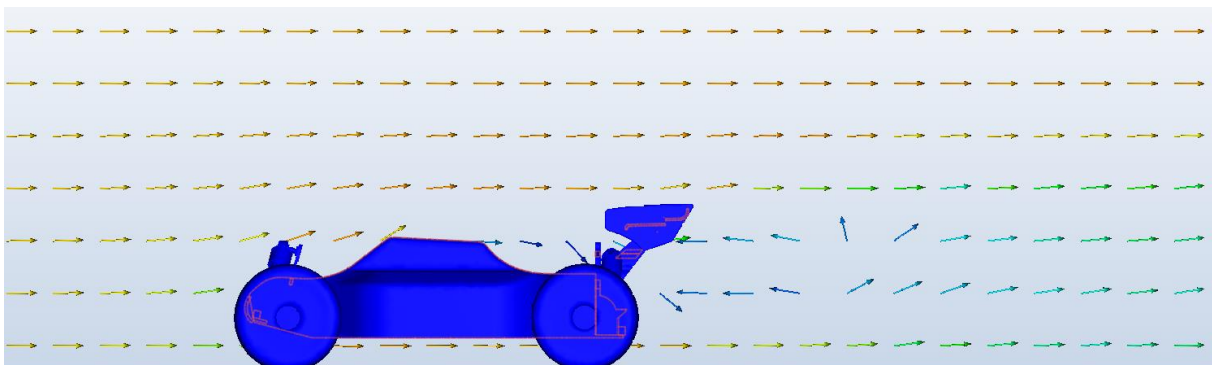




*Vista isomètrica línies de corrent.*



*Vista isomètrica línies de corrent.*



*Vista lateral vectors de velocitat.*

