

Treball de Fi de Grau

Grau en Enginyeria en Tecnologies Industrials

**Simulació aerodinàmica Tesla S model i Tesla
Cybertruck**

MEMÒRIA

Autor: Judit Villanueva
Director: Esteve Jou
Convocatòria: Abril 2023



Escola Tècnica Superior
d'Enginyeria Industrial de Barcelona



Resum

En aquest treball es realitza un estudi aerodinàmic amb una simulació CFD de dos models de vehicle de la marca Tesla, sent aquests el Tesla S model i el Tesla Cybertruck. L' objectiu principal en l'estudi aerodinàmic és la comparació dels dos models i l'anàlisi dels resultats. Altres objectius importants són la representació fidel a la realitat dels models CAD dels vehicles, l'obtenció de la malla més optima possible i aconseguir resultats pròxims als oficials.

Per realitzar l'anàlisi aerodinàmic dels vehicles s'ha realitzat el treball amb el programa ANSYS Fluent. Un cop trobades les geometries i realitzats els dominis computacionals, s'ha realitzat l'anàlisi de sensibilitat per trobar la malla optima. La simulació de ambdós vehicles s'ha realitzat amb una velocitat d'entrada de 40 m/s i el model de turbulència utilitzat ha estat el k-Epsilon.

El resultat del coeficient de drag de Tesla S model ha estat de 0,2886 i el del Tesla Cybertruck de 0,4335, aquest resultat són de l'ordre de magnitud correcte però disten del resultat oficials. La geometria del Tesla S model permet tenir un millor rendiment aerodinàmic en comparació amb el Tesla Cybertruck. Tot i així l'aerodinàmica del Cybertruck és millor de l'esperat considerant la seva geometria angular.

Resumen

En este trabajo se realiza un estudio aerodinámico con una simulación CFD de dos modelos de vehículos de la marca Tesla, siendo estos el Tesla S model y el Tesla Cybertruck. El objetivo principal en el estudio aerodinámico es la comparación de los dos modelos y el análisis de los resultados. Otros objetivos importantes son la representación fiel a la realidad de los modelos CAD de los vehículos, la obtención de la malla óptima posible y conseguir resultados cercanos a los oficiales.

Para realizar el análisis aerodinámico de los vehículos se ha utilizado el programa ANSYS Fluent. Una vez encontradas las geometrías y realizados los dominios computacionales, se ha realizado el análisis de sensibilidad para encontrar la malla óptima. La simulación de ambos vehículos se ha realizado con una velocidad de entrada de 40 m/s y el modelo de turbulencia utilizado ha sido el k-Epsilon.

Los resultados del coeficiente de arrastre del Tesla S model han sido de 0,2886 y el del Tesla Cybertruck de 0,4335, estos resultados están en el orden de magnitud correcto, pero difieren de los resultados oficiales. La geometría del modelo Tesla S permite tener un mejor rendimiento aerodinámico en comparación con el Tesla Cybertruck. Sin embargo, la aerodinámica del Cybertruck es mejor de lo esperado considerando su geometría angular.

Abstract

In this work, an aerodynamic study is carried out using CFD simulation of two Tesla vehicle models, namely the Tesla S model and the Tesla Cybertruck. The main objective of the aerodynamic study is to compare the two models and analyse the results. Other important objectives include the realistic representation of the CAD models of the vehicles, obtaining the most optimal mesh possible, and achieving results close to the official ones.

To perform the aerodynamic analysis of the vehicles, the ANSYS Fluent software has been used. Once the geometries are found and the computational domains are set up, sensitivity analysis on the mesh has been conducted to find the optimal mesh. The simulation of both vehicles has been performed with an inlet velocity of 40 m/s, using the k-Epsilon turbulence model.

The results of the drag coefficient for the Tesla S model were 0.2886, and for the Tesla Cybertruck, it was 0.4335. These results are in the correct order of magnitude but differ from the official results. The geometry of the Tesla Model S allows for better aerodynamic performance compared to the Tesla Cybertruck. However, the aerodynamics of the Cybertruck are better than expected considering its angular geometry.

Sumari

RESUM	4
RESUMEN	5
ABSTRACT	6
SUMARI	7
1. GLOSSARI	9
2. PREFACI	11
2.1. Origen del projecte	11
2.2. Motivació	11
2.3. Requeriments previs	12
3. INTRODUCCIÓ	13
3.1. Objectius del projecte	13
3.2. Abast del projecte	13
4. FONAMENTS TEÒRICS	15
4.1. Aerodinàmica de vehicles	15
4.1.1. Conceptes bàsics	15
4.1.1.1. Nombres adimensional	15
4.1.1.2. Equacions	18
4.1.1.3. Capa límit	19
4.1.2. Història	20
4.1.2.1. Flux al voltant d'un vehicle	21
4.1.2.2. Elements aerodinàmics d'un vehicle	22
4.2. Dinàmica computacional de fluids	26
4.2.1. Procés de simulació amb CFD	28
4.2.2. Equacions de transport	30
4.2.3. Mètode de volums finits (MVF)	32
4.2.3.1. Tipus de malla	34
4.2.3.2. Qualitat de la malla	36
4.2.4. Models de turbulència	37
5. METODOLOGÍA	42
5.1. Plantejament del problema	42

5.2. Geometria	45
5.3. Domini Computacional.....	49
5.4. Mallat	52
5.4.1. Anàlisi de sensibilitat de la malla.....	54
5.5. Configuració simulació.....	62
5.5.1. Condicions de contorn	63
6. RESULTATS	65
6.1. Tesla S model.....	65
6.2. Tesla Cybertruck.....	71
6.3. Comparació dels models	78
7. PLANIFICACIÓ DEL PROJECTE	80
8. IMPACTE SOCIAL I DE GÈNERE	82
9. IMPACTE AMBIENTAL	83
10. ANÀLISI ECONÒMIC	84
11. RECOMANACIONS PER PROJECTES FUTURS	86
CONCLUSIONS	87
BIBLIOGRAFIA	90
Referències bibliogràfiques	90
Bibliografia complementària	91

1. Glossari

Re	Nombre de Reynolds
Ma	Nombre de Mach
C_{fluid}	Velocitat del fluid
C_{so}	Velocitat del so
C_D	Coefficient de drag
$A_{D, \text{fricció}}$	Area drag fricció
$A_{D, \text{pressió}}$	Area drag pressió
C_L	Coefficient de Lift
$A_{L, \text{fricció}}$	Area lift fricció
$A_{L, \text{pressió}}$	Area lift pressió
$F_{D, \text{fricció}}$	Força de drag fricció
$F_{D, \text{pressió}}$	Força de drag pressió
$F_{L, \text{fricció}}$	Força de Lift fricció
$F_{L, \text{pressió}}$	Força de Lift pressió
ρ	Densitat
P	Pressió
Γ	Coefficient difusió
S	Font
μ	Viscositat
CFD	Dinàmica computacional de fluids
RMS	Root Mean Square

DNS	Direct Numerical Simulation
LES	Large Eddy Simulation
RANS	Reynolds Average Navier-Stokes
EVM	Eddy Viscosity Model
B	Cos domini computacional
BI	Cos d'influència
S	Superfície del vehicle
PS	Proximity Size

2. Prefaci

2.1. Origen del projecte

La assignatura de mecànica de fluids em va agradar i vaig decidir cursar optatives que estiguessin relacionades, com van ser l'assignatura de sistemes de canonades i aerodinàmica.

Quan vaig realitzar les practiques de mecànica de fluids les vaig gaudir molt, sobretot utilitzar el programa ANSYS per realitzar un estudi aerodinàmic senzill. Per això també vaig decidir es collir assignatures on pogués realitzar més treballs en ANSYS. Per aquesta raó vaig decidir que volia fer una simulació en ANSYS Fluent com a treball de fi de grau.

Un cop decidit l'objectiu de realitzar una simulació en ANSYS Fluent, faltava per determinar l'objecte d'estudi. Inicialment vaig pensar en fer una simulació d'un avió, ja que sempre he tingut curiositat per comprendre els principis físics que permeten la sustentació i el vol dels avions. Al final vaig descartar aquesta opció per les dimensions del model CAD i per la necessitat d'una modelació detallada per obtenir una solució.

Finalment vaig escollir simular un vehicle i fent la recerca dels vehicles més aerodinàmics i del models CAD que podia trobar a Internet em va cridar l'atenció el Tesla S model. L'objectiu del treball encara no el tenia del tot clar; no tenia clar el propòsit de la simulació ni que tenia que analitzar en un model. Cercant per les webs de geometries CAD vaig trobar el model Tesla Cybertruck. La geometria d'aquest model en particular em va cridar l'atenció i vaig decidir fer una comparació dels dos models.

Al mateix temps que hem vaig matricular del treball de fi de grau vaig cursar l'assignatura d'aerodinàmica. La idea inicial era cursar aquesta assignatura per aprendre més detalladament sobre l'aerodinàmica de vehicles alhora que realitzava el treball. En l'assignatura d'aerodinàmica s'havia de realitzar una simulació en ANSYS com a part practica del temari. Gran part dels coneixements previs d'ANSYS provenen d'aquesta assignatura

2.2. Motivació

Sempre he trobat interessant l'aerodinàmica i des de que vaig saber que podia cursar-la a la carrera vaig voler matricular-me. Les assignatures que expliquen el comportament dels cossos, com la mecànica, la termodinàmica o la mecànica de fluids sempre són les que m'han agradat més. En especial la mecànica de fluids i l'aerodinàmica, entendre el comportament

dels fluids o les forces que fan volar un avió sempre m'han fascinat i he volgut entendre bé els fenòmens que permeten el vol.

La motivació principal d'aquest projecte era aprendre més sobre l'eina ANSYS. Tot i que a la carrera hi ha varies assignatures on pots realitzar un estudi o una simulació amb aquesta eina, volia indagar més sobre la utilització d'aquest programa i el procés de realitzar una simulació.

2.3. Requeriments previs

Aquest projecte requereix d'uns coneixements tècnics previs generals que s'obtenen al grau d' Enginyeria en Tecnologies Industrials. Els conceptes bàsics de càlcul, mètodes numèrics, mecànica dels medis continus, mecànica de fluids i aerodinàmica són necessaris per poder realitzar aquest estudi.

En particular els coneixements de mecànica de fluids i aerodinàmica són els primordials per poder realitzar l'anàlisi de resultats i entendre tot el procediment del treball. Tant entendre els conceptes generals de la mecànica de fluids, com les equacions que estableixen el comportament en els fluids o el concepte de la capa límit, com l'aerodinàmica dels vehicles i el comportament del flux al voltant del vehicle, son necessaris per poder analitzar els resultats.

Per poder importar les geometries al programa ANSYS, tenint en compte que es molt probable que hi hagin erros en aquesta o problemes, s'ha de tenir uns coneixements basics de programes CAD per tal de poder solucionar-los. En el meu cas després d'haver realitzat la assignatura d'Expressió Gràfica al grau, tinc els coneixements suficients del programa SOLIDWORKS per poder resoldre aquests problemes. També es necessari tenir accés a aquest programa per tal de solventar-los.

Els estudi aerodinàmic de qualsevol objecte mitjançant una eina de CFD no es trivial. Realitzar un estudi aerodinàmic en ANSYS sense tenir experiència tant en el programa com en l'àmbit de la dinàmica computacional de fluids és un treball molt complex. En haver cursat l'assignatura d'aerodinàmica i haver realitzat un treball similar em va ajudar molt a saber quin és el procediment d'una simulació i com configurar el programa.

3. Introducció

3.1. Objectius del projecte

L'objectiu principal del projecte es comparar el rendiment aerodinàmic de dos models de vehicle de la marca Tesla, sent aquests el Tesla S model i el Tesla Cybertruck. Per comparar aquests dos models es realitzarà una simulació amb ANSYS Fluent, on s'importaran dues geometries trobades en diferents webs CAD. Es realitzarà l'anàlisi de la malla en els dos dominis per trobar la malla òptima i s'analitzaran els resultats individuals de la simulació. Finalment es compararan els resultats dels dos models.

Altres objectius serien els següents:

- Aconseguir geometries CAD suficientment fidels a la realitat.
- Generar una malla amb la major qualitat possible per realitzar la simulació.
- Obtenir resultats del c_d pròxims als oficials.

3.2. Abast del projecte

L'abast d'aquest treball engloba totes les etapes del procés per realitzar una simulació en ANSYS fluent, sense incloure el disseny dels models CAD.

El disseny de les geometries dels dos vehicles no entra en aquest treball. Les geometries han estat trobades en pàgines web de CAD on els seus autors ja les han preparat per realitzar una simulació en programes de CFD. Només s'han realitzat petites modificacions en aquestes com escalar-les o fer un tall per la meitat.

L'anàlisi de la malla s'ha realitzat tenint en compte la limitació del nombre d'elements de la versió per estudiants del programa. Per tant els resultats es veuen afectats per aquesta limitació.

4. Fonaments teòrics

La mecànica de fluids es una branca de la física, que deriva de la mecànica de medis continus, on s'estudia el moviment dels fluids i els processos d'interacció amb els sòlids. Es defineix com un fluid un medi continu que no pot resistir un esforç tallant τ i es deforma contínuament en el temps. La mecànica de fluids compren l'estudi dels principis que regeixen els fluids, les equacions de conservació de la massa, energia i moment així com els fenomen de viscositat, turbulència entre d'altres.

La mecànica de fluids és un camp d'estudi molt ampli abastant diverses àrees com la termodinàmica de fluids, hidrodinàmica, aerodinàmica i la dinàmica computacional de fluids. Per l'enteniment d'aquest projecte només es necessari explicar els conceptes relacionats amb l'aerodinàmica de vehicles i la dinàmica computacional de fluids.

4.1. Aerodinàmica de vehicles

L'aerodinàmica deriva de la mecànica de fluids i s'enfoca en l'estudi del comportament del fluid al voltant d'objectes sòlids, com avions i automòbils. Els conceptes de l'aerodinàmica s'apliquen en els estudis d'automòbils per entendre millor el rendiment aerodinàmic, la estabilitat i la eficiència.

Per poder realitzar aquest estudis des de fa uns anys s'apliquen les tècniques de CFD per resoldre les equacions que governen els fluids i analitzar els resultats.

En aquest apartat s'explicaran els conceptes basics relacionats amb l'aerodinàmica de vehicles i el comportament del flux al voltant d'un automòbil. També s'explicarà la dinàmica computacional de fluids.

4.1.1. Conceptes basics

En l'aerodinàmica s'utilitzen sovint els números adimensionals per descriure i caracteritzar el comportament del flux d'aire al voltant de l'objecte d'estudi. Seguidament s'explicaran els paràmetres adimensionals més rellevants per l'estudi de l'aerodinàmica d'un vehicle.

4.1.1.1. Nombres adimensional

Reynolds

El nombre de Reynolds és un paràmetre adimensional que mesura la importància entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses. Aquest parametre descriu el comportament del fluid en

funció de la densitat, la velocitat, la longitud característica i la viscositat del fluid permeten predir el regim del fluid.

$$Re = \frac{\rho C L}{\mu} \quad (\text{Eq 4.1})$$

On:

ρ : densitat del fluid

L : Longitud característica

C : velocitat del fluid

μ : viscositat del fluid

- $Re < 2000$: es produeix el flux laminar on el moviment de les partícules és lent i els efectes d'inèrcia són negligibles. Les partícules del fluid es mouen en capes paral·leles sense barrejar-se entre elles. Aquest regim apareix quan els efectes viscosos són dominants, això permetent atenuar qualsevol tipus de pertorbació.
- $2000 < Re < 4000$ es tracta del regim transitori on el flux es inestable.
- $Re > 4000$: el flux turbulent es caracteritza pel moviment irregular i caòtic de les partícules. Les propietats físiques en el fluid presenten valors instantanis impredecibles. Les inestabilitats del flux generen vòrtex que en forma de cascada es van dissipant per l'acció de la viscositat.

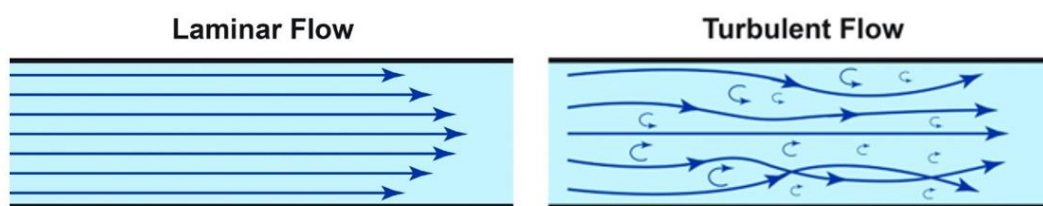


Figura 4.1-1 Flux laminar i flux turbulent

Mach

El nombre de Mach és un paràmetre adimensional que proporciona una mesura de la importància relativa entre les forces elàstiques del fluid i les d'inèrcia. Es defineix com el coeficient entre la velocitat del fluid i la velocitat del so.

$$M = \frac{C_{fluid}}{C_{so}} \quad (\text{Ec. 4.2})$$

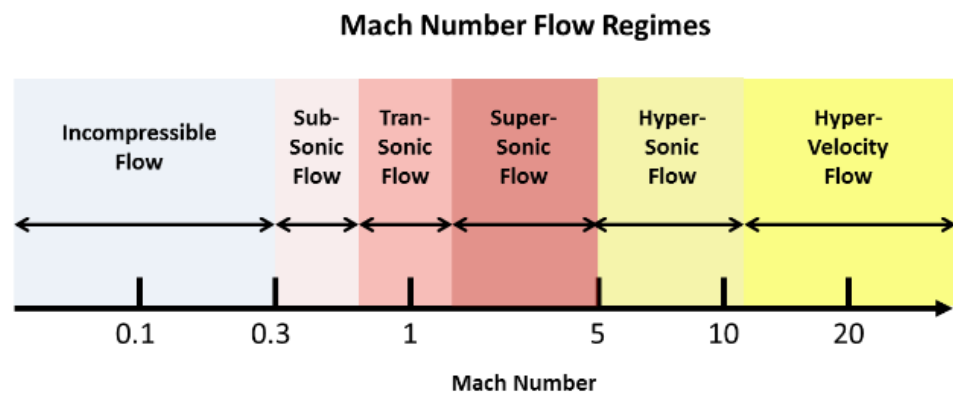
On:

C_{fluid} : velocitat del fluid

C_{so} : 340 m/s velocitat del so

El flux segons el nombre de Mach es pot classificar segons la compressibilitat.

- $M < 0,3$ es tracta de flux incompressible és a dir la densitat del fluid és constant. Aquest cas es dona en vehicles a poca velocitat com en el cas dels cotxes.
- $M > 0,3$ es tracta de flux compressible és a dir la densitat del fluid varia en el temps. Aquest cas succeeix en vehicles a alta velocitat com avions i coets.



Dintre del flux compressible es pot classificar de la següent manera.

- $M < 0,8$ es considera flux subsònic
- $0,8 < M < 1,2$ es considera flux transsònic
- $1,2 < M < 5$ es considera supersònic
- $M > 5$ hipersònic

Quan el nombre de $M=1$ es crea una situació inestable per això es defineix la zona de flux transsònic on una petita pertorbació farà que el cos canviï a subsònic o supersònic.

Coefficient aerodinàmic de resistència a l'avanç

El coeficient de drag o C_D quantifica la resistència a l'avanç que experimenta un cos en moviment a través d'un fluid. Aquest paràmetre adimensional que s'utilitza per avaluar la eficiència aerodinàmica està relacionat amb les propietats de les capes límits on els efectes de la viscositat són dominants. [4] El coeficient de drag es pot dividir en dos components la resistència de fricció i la resistència de pressió sent el drag total la suma d'aquests. La resistència de fricció o de fregament és la resultant de l'esforç tallant causat pels esforços viscosos sobre la superfície del cos en contacte amb el flux. Els cossos on la capa límit no es

després i que viatgen a velocitats subsòniques el $C_{D,fricció}$ es dona en funció de la pressió. Per altre banda la resistència de pressió o de forma és la resultant de les pressions que actuen sobre la superfície del cos. Els cossos amb la capa límit despresa el $C_{D,pressió}$ sol ser dominant independentment de la forma del cos.

$$C_D = C_{D,fricció} + C_{D,pressió} = \frac{F_{D,fricció}}{\frac{1}{2}\rho \cdot A_{D,fricció} \cdot U^2} + \frac{F_{D,pressió}}{\frac{1}{2}\rho \cdot A_{D,pressió} \cdot U^2} \quad (\text{Eq 4.3})$$

Es considera que per tenir un bon rendiment aerodinàmic s'ha de tenir un coeficient de resistència a l'avanç baix. Els objectes amb CD reduït són més eficients ja que requereixen menys energia per moure's, poden anar a velocitats més elevades sense consumir energia de més.

Coeficient aerodinàmic de sustentació

El coeficient de lift o C_L quantifica la capacitat d'un cos per generar la força de sustentació. Aquest coeficient varia amb l'angle d'atac, la rugositat de la superfície, la viscositat del fluid i la presència de turbulències. Per l'aparició de sustentació cal que hi hagi una diferència de pressions entre la part superior i l'inferior. El coeficient de lift també es pot dividir en forces de fricció i forces de pressió.

$$C_L = C_{L,fricció} + C_{L,pressió} = \frac{F_{L,fricció}}{\frac{1}{2}\rho \cdot A_{L,fricció} \cdot U^2} + \frac{F_{L,pressió}}{\frac{1}{2}\rho \cdot A_{L,pressió} \cdot U^2} \quad (\text{Eq 4.4})$$

4.1.1.2. Equacions

El comportament d'un fluid és descriu mitjançant l'equació de Navier Stokes, juntament amb l'equació de continuïtat.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Eq 4.5})$$

L'equació de Navier Stokes per un flux incompressible en coordenades cartesianes es troba a continuació.

$$\rho g_x - \frac{\partial P}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (\text{Eq 4.6})$$

$$\rho g_y - \frac{\partial P}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right) \quad (\text{Eq 4.7})$$

$$\rho g_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \left(\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right) \quad (\text{Eq 4.8})$$

Aquesta equació no té una solució analítica en general, només es pot solucionar en geometries senzilles com plaques planes i cilindres, per això es necessita l'ús de mètodes numèrics per obtenir el camp de pressions i de velocitats.

4.1.1.3. Capa límit

La capa límit és la regió propera a la superfície d'un objecte on els efectes viscosos són importants en la transferència de la quantitat de moviment i calor i on es produeixen canvis significatius en les propietats del flux. Quan el flux d'aire entra en contacte amb la superfície del objecte la velocitat és zero en la superfície. La velocitat augmenta gradualment segons el perfil de velocitats, segons la zona de la capa límit, fins que arriba a la velocitat del flux lliure a una distància de la superfície δ .

A l'inici de la superfície la capa límit no té gruix però a mesura que el flux es mou sobre la superfície aquest gruix es va incrementant. El gruix de la capa límit varia amb el tipus de fluid i les condicions del flux, quan més gruixuda és la capa límit més resistència a l'avanç es crea.

La capa límit es pot dividir en tres zones d'acord amb la Figura 4.1-2 : la zona laminar a l'inici de la placa, la zona de transició i al final la zona turbulenta.

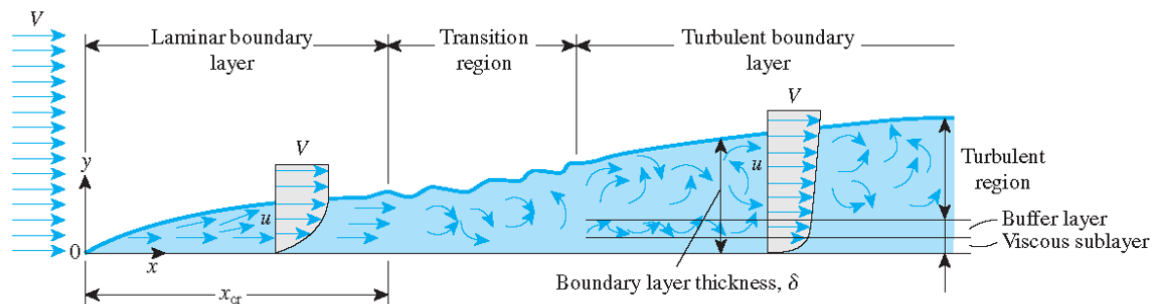


Figura 4.1-2 Capa límit [25]

La capa límit a la zona laminar es regeix per un perfil de velocitats parabolídic. La velocitat del fluid canvia uniformement a mesura que s'allunya de la paret. El flux laminar crea menys resistència per fricció a la superfície. La capa límit de transició és on produeix el canvi de capa laminar a capa turbulenta.

En la capa límit turbulenta existeixen tres regions en funció de la distància a la paret. A prop de la superfície es troba la subcapa viscosa (viscous sublayer) en la Figura 4.1-2. Aquesta és una capa molt fina on els efectes viscosos són dominants i es troben grans gradients de velocitat. A sobre d'aquesta capa es troba la capa de transició o buffer layer on el flux comença a ser turbulent però encara els efectes viscosos són significatius. La última capa correspon a la capa turbulenta que ocupa la resta del gruix de la capa límit on els efectes

turbulents tenen més presència.

4.1.2. Historia

L'aerodinàmica dels vehicles es remunta a principis del segle XX. A l'inici de l'estudi de l'aerodinàmica no existien els programes de CFD, per tant l'estudi es realitzava experimentalment amb models reals, amb dissenys basats en geometries simples o provinents de l'aviació.

Paul Jaray va ser un dels primers en utilitzar l'aerodinàmica en el disseny d'automòbils, va descobrir que el flux al voltant d'un cos no es simètric quan està a prop del terra, per aquest motiu va incorporar un model de carrosseria més suau i arrodonida per reduir la resistència a l'aire. En el 1930 es va fer un estudi relacionant el flux en la part frontal i de la part posterior, una part posterior allargada disminuïa el drag sempre i quan el flux es mantingues unit a la superfície del vehicle. També va veure que el drag incrementava quan el flux es separava en un parabrisa més inclinat. Però el descobriment més important d'aquesta investigació va ser que no calia allargar la part posterior del vehicle ja que resultava en una disminució molt petita del drag en comparació amb una part posterior arrodonida, això reduïa els costos en material.

En la segona guerra mundial es va interrompre l'estudi de la aerodinàmica en vehicles, on només Citroën i Panhard van prosseguir amb els estudis, però després d'aquesta la indústria va sorgir l'aerodinàmica en la competició automobilística. No va ser fins als 70s amb la crisi de del petroli que es van tornar a realitzar estudis per millorar l'aerodinàmica dels vehicles, aconseguint millorar el coeficient de drag.

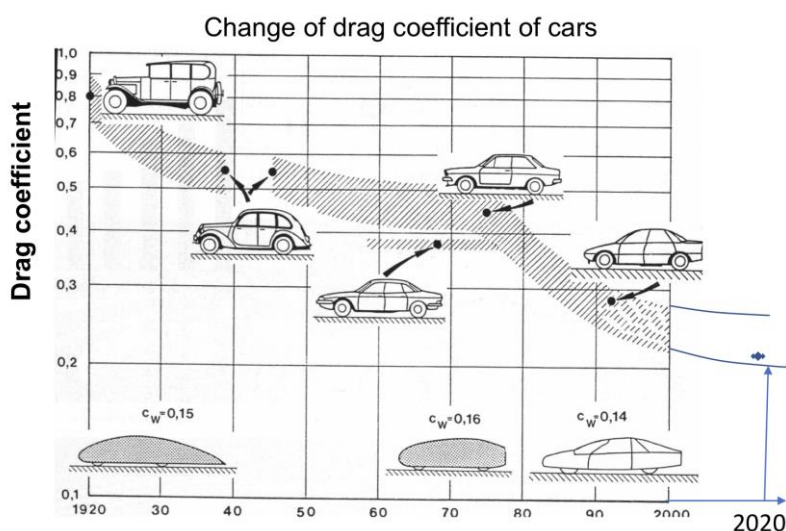


Figura 4.1-3 Evolució del C_d [1]

L'estudi de l'aerodinàmica en els vehicles es important ja que pot ajudar a millorar diverses característiques del vehicle i també reduir costos. En invertir el temps a estudiar l'aerodinàmica es poden millorar aspectes com la reducció del consum de combustible, la millora de l'estabilitat del vehicle, la seguretat i aspectes de confort com la ventilació del compartiment dels passatgers.

4.1.2.1. Flux al voltant d'un vehicle

El flux al voltant d'un automòbil es un fenomen complexa que involucra la interacció de l'aire i el vehicle en moviment. L'aire es separa i es mou seguint el perfil del vehicle generant diferents patrons de flux i zones d'altres i baixes pressions. El flux d'aire que es mou al voltant del vehicle es viscos i turbulent; aquest és influenciat per fenòmens com el desprendiment de la capa límit, la formació de vòrtexs i la interacció del fluid amb les diferents parts del vehicle.

El flux al voltant d'un vehicle en realitat és asimètric per l'acció del vent però per tal de simplificar es considera simètric en la direcció longitudinal del vehicle. El flux al voltant d'un vehicle te dos tipus de separació, es descriuran a continuació.

Quasi-bidimensional: Aquest tipus de separació al voltant del vehicle consisteix en la separació del flux a les cantonades formant dos vòrtexs en la part de darrere del vehicle. Aquest vòrtex es entorn l'eix paral·lel de la línia de separació. Aquest tipus de flux pot succeir en la part frontal del capó, en el parabrises, al costats dels parafangs i al spoiler frontal. En la Figura 4.1-4 es pot veure com es produeix aquets tipus de separació en les parts del vehicle mencionades.

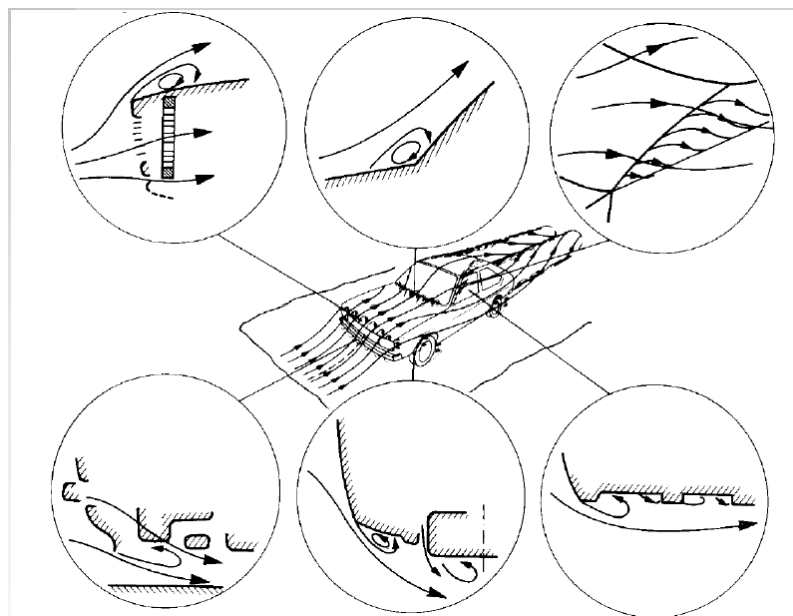


Figura 4.1-4 Detalls de la separació quasi-bidimensional [1]

Tridimensional: Aquest tipus de separació es forma en tres dimensions i succeeix a la part posterior del vehicle. A causa de la forma similar d'un vehicle amb un perfil d'ala, l'aire es mou més ràpid a la part superior que a la part inferior per tant hi ha una zona de baixa pressió a la part superior i amb menor pressió a la part inferior. Aquestes dues regions estan connectades per les parets laterals del vehicle on l'aire tendeix naturalment a anar des de la part inferior fins a la part superior del vehicle. D'aquesta manera es generen dos vòrtex on el flux tendeix a enroscar-se on es troba el flux central. Aquests vòrtex posteriors interactuen amb el camp de flux extern i amb l'estela quasi bidimensional. [1]

4.1.2.2. Elements aerodinàmics d'un vehicle

La forma i disseny de les parts del vehicle tenen un impacte significatiu en la resistència a l'avanç. A continuació s'explicarà el comportament del flux en les diferents parts dels vehicles i la seva contribució a la generació o reducció de la resistència a l'avanç.

- Part frontal: La part frontal del vehicle és la primera que rep l'impacte de l'aire, per tant és un part important a estudiar el seu efecte aerodinàmic.

El primer factor important és el punt d'estacament, ja que la posició d'aquest determinarà com es divideix el flux i quina quantitat segueix el perfil aerodinàmic per dal i quina passa pel l'inferior del vehicle. El flux en vehicles tendeix a anar per dalt degut a la proximitat del vehicle al terra i la poca àrea de pas que hi ha entre el cotxe i el terra. Per reduir el coeficient de drag el més òptim es que el punt d'estancament estigui a prop del terra.

El segon factor depèn de la pendent del capó, la pendent de la part frontal i el radi de curvatura entre elles. L'augment del radi de curvatura disminueix el drag fins que s'arriba a un punt de saturació on ja no disminueix més. Aquesta variació permet al fluid seguir el perfil del vehicle més fàcilment. L'angle d'inclinació del capó quant més inclinat cap amunt, més resistència a l'avanç genera, generant turbulències i la separació del flux en la part davantera. Amb la reducció del angle d'inclinació succeeix el mateix que amb el radi de curvatura es pot reduir fins que s'arriba a un punt on ja no sorgeix efecte en el coeficient de drag.

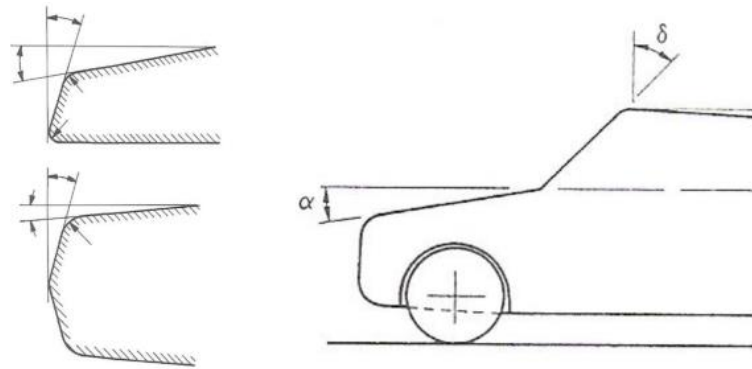


Figura 4.1-5 Radi de curvatura i l'angle d'inclinació del cap [2]

- Parabrises: La mida dels vòrtex bidimensionals que es formen en la base del parabrises ve determinant per l'angle d'inclinació del parabrises. La reducció d'aquest angle, aplanant el parabrises, redueix la resistència a l'avanç.
- Sostre: Els sostres es dissenyen amb un forma convexa per tal d'assegurar la rigidesa necessària del vehicle. L'arquejament del sostre pot reduir la resistència a l'avanç però s'ha de tenir en compte no augmentar l'àrea frontal ja que si no es produirà l'efecte contrari. En el sostre generalment es crea un pic de baixa pressió, per poder reduir-lo el radi de curvatura entre el sostre i el parabrises ha de ser suficient gran obtenint un gradient de pressions menor en la zona. Reduint la pressió s'aconsegueix que el despreniment de la capa límit es retardi reduint el deixant.

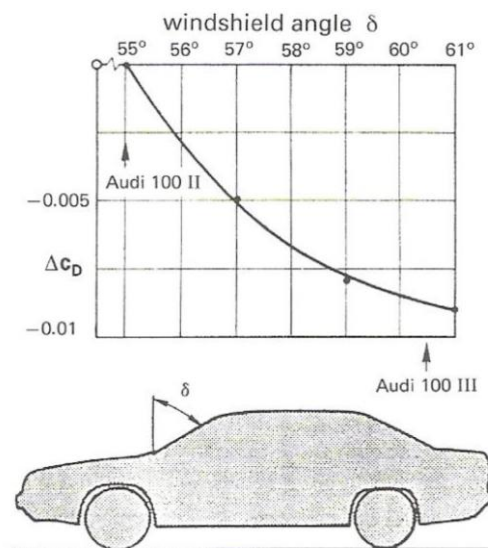


Figura 4.1-6 Variació Cd en funció de l'angle del parabrises.[1]

Part posterior: A la part posterior del vehicle succeeixen dos tipus de separació del fluid descrits anteriorment; la separació bidimensional i la separació tridimensional.

El paràmetre que afecta a la separació bidimensional és el boat tailing; aquest paràmetre varia els angles del sostre, laterals i panel inferior amb l'objectiu d'augmentar la pressió a la zona de darrere per reduir el deixant. Amb la inclinació de la part inferior cap a dalt s'aconsegueix millorar el coeficient de drag.

Els vòrtexs tridimensionals que es formen a la part del darrere del vehicle depenen de la geometria de la part posterior del vehicle. Hi ha tres tipus de geometria de la part posterior vehicle el notchback, fastback i squareback, a la Figura 4.1-7 es poden visualitzar amb detall.

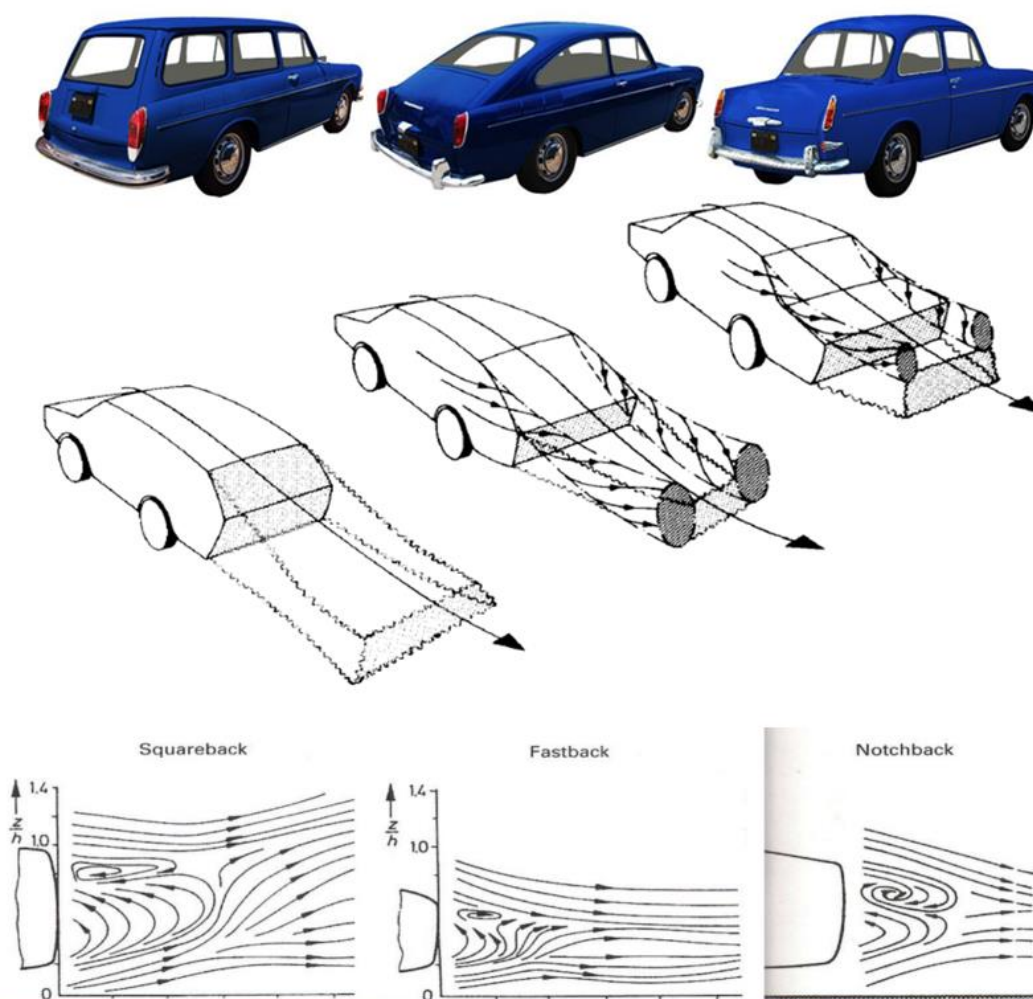


Figura 4.1-7 Vòrtex Squareback, Fastback i Notchback [2]

Es pot veure com al Squareback es el tipus on es generen més turbulències i un deixant

bastant ample. El notchback és millor que l'anterior però es creen forces turbulències encara que el flux es torna a reenganxar abans. Per últim el fastback és el més aerodinàmic ja que es generen vòrtex petits i amb poques turbulències i el flux es reenganxa ràpidament.

- Part inferior: Aquesta part pot ser molt rugosa, augmentant el valor del drag. Allisar aquesta superfície pot ajudar a reduir el coeficient de drag -0,0045. La instal·lació de difusors en la part posterior ajuda a forçar la sortida de l'aire pot reduir el coeficient de resistència a l'avanç fins a -0.07.
- Rodes: Les rodes afecten considerablement al drag total del vehicle. L'aerodinàmica d'una roda estacionària no es la mateixa que la d'una roda en moviment. La roda en estar estacionària la separació de la capa límit es produeix abans produint una estela major. En canvi la roda en moviment, el flux segueix el perfil de la roda més temps reduint el coeficient de drag.

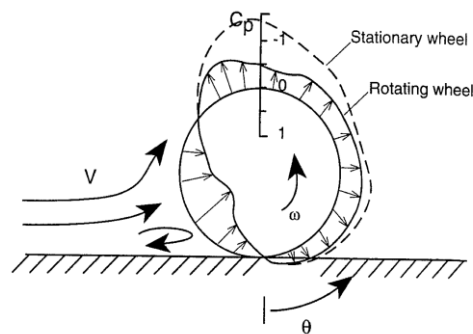


Figura 4.1-8 Valors C_p roda estacionària i mòbil [1]

L'espai entre el pou de la roda i la pròpia també afecta al drag, quan aquest es reduït disminueix el drag tant de la roda com del pou de roda.

- Elements exteriors: els elements exteriors a la carrosseria del vehicle que sobresurtin poden afectar a la resistència a l'avanç del vehicle. Alguns d'aquests elements serien els retrovisors, antenes, portaequipatges entre d'altres.

En el cas dels retrovisors l'àrea frontal d'aquests pot representar el 0,5% de l'àrea frontal del vehicle. La contribució dels dos retrovisors en el drag total seria aproximadament del 2%.

4.2. Dinàmica computacional de fluids

La Dinàmica computacional de fluids en anglès Computational Fluid Dynamics (CFD) és un àmbit de la mecànica de fluids que s'encarrega de la simulació numèrica de la dinàmica de fluids resolent les equacions que descriuen el comportament del fluid mitjançant programes amb una alta capacitat de càlcul. El CFD també pot resoldre problemes d'altres fenòmens com la transferència de calor i reaccions químiques entre d'altres.

Anteriorment la resolució numèrica de les equacions de Navier-Stokes no era viable degut a la complexitat de les equacions i a la naturalesa no lineal del flux per obtenir una solució analítica única. Per aquest motiu la experimentació i els anàlisis dimensionals eren els mètodes utilitzats per validar els resultats. Amb l'aparició dels ordinadors es va obrir la possibilitat de resoldre les equacions ràpidament per obtenir les solucions aproximades.

Avui dia, gracies a la tecnologia, existeixen diversos programes que ajuden als enginyers a realitzar estudis de dinàmica computacional de fluids. Alguns CFD disponibles en el mercat són Autodesk CFD, ANSYS FLUENT, ANSYS CFX, SOLIDWORKS entre d'altres. L'interès de la indústria per aquestes eines a provocat un increment en els preus de les llicències i en contraposició donant lloc a l'aparició de nous codis de distribució lliure com el software OpenFOAM.

Els programes de CFD utilitzen mètodes numèrics per solucionar les equacions del comportament del fluid. La linealització i discretització de les equacions diferencials de la mecànica de fluids és necessària per tal d'obtenir les equacions algebraiques. Per solucionar el problema de tancament d'aquestes s'ha de modelitzar la turbulència per obtenir els resultats mitjançant un procés iteratiu.

Els mètodes de discretització consisteixen en transformar un domini continu en un domini discret. En el domini discret les variables del flux estan definides en els nodes de la malla. Per discretitzar el domini existeixen tres metodologies principals el mètode de diferències finites (FDM), el mètode d'elements finits (FEM) i el mètode de volums finits (MVF) sent l'última la més utilitzada en la computació de fluids. En el cas de que les equacions tinguin un comportament dependent del temps caldrà realitzar una discretització temporal però en aquest estudi es considera un regim quasi-estacionari per tant no s'aprofundirà en l'explicació d'aquesta.

Aquesta nou àmbit sorgeix de la combinació de dues disciplines la mecànica de fluids i el càlcul numèric. Amb els mètodes de discretització provinents del càlcul numèric s'intercanvia

el domini continu del model pel domini discret aconseguint una malla del model. Gracies a la discretització del domini en elements més petits, es poden resoldre les equacions diferencials de conservació de la massa, energia i moment en cadascun dels volums de control mitjançant un software amb la capacitat de solucionar el sistema d'equacions ràpidament i amb precisió.

En l'àmbit de la enginyeria el CFD es una eina potent i versàtil que permet estudiar problemes complexes mitjançant simulacions numèriques però això comporta unes certes limitacions. La precisió del resultat depèn de les dades d'entrada, tant en el model CAD escollit com en el disseny de la malla, així mateix la validesa de les suposicions i simplificacions utilitzades en la modelització del sistema. Cal afegir que, segons el problema, per obtenir bons resultats el temps de computació és elevat amb el requeriment d'un alt nivell de recursos computacionals.

La mecànica de fluids computacional té una ampla gama d'aplicacions dintre de la indústria i es pot emprar en les diferents etapes d'un projecte. Des de la fase conceptual en el disseny d'avions, vaixells, canonades fins les etapes de producció permetent la simulació de l'objecte d'estudi en diverses condicions. En la fase de disseny s'empra per provar diversos dissenys, avaluar el rendiment i optimitzar el model abans de la fabricació, permeten estalviar temps i costos. Aquest "modus operandi" es podria replicar per exemple en el disseny d'un intercanviador de calor. Una aplicació molt freqüent és l'anàlisi de l'aerodinàmica del flux al voltant d'objectes complexes com automòbils i edificis. També es possible la simulació de processos químics com la combustió o l'estudi de fluxos reactius complexes.

L'aplicació de l'eina CFD en l'àmbit automobilístic és molt útil i rentable tenint en compte les seves avantatges. L'estudi de l'aerodinàmica dels automòbils en la fase de disseny no es merament per dotar d'un aspecte atractiu i elegant al vehicle. Un disseny eficient determinarà característiques tècniques i de seguretat sent una d'elles el consum de combustible o el comportament de l'estabilitat en els girs. Quant el vehicle esta en moviment es crea una resistència de l'aire que dificulta l'avanç; la intensitat d'aquesta afecta a l'esforç mecànic del cotxe per mantenir la velocitat consumint més combustible. En el cas dels vehicles elèctrics és encara més important el rendiment aerodinàmic degut a la autonomia de la bateria.

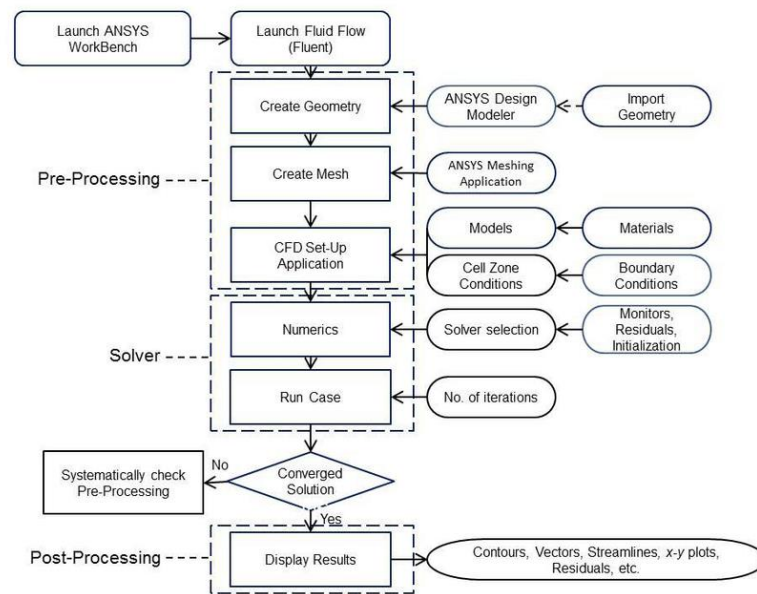
Un dels avantatges de fer un estudi aerodinàmic és l'estalvi en temps i costos abans de la fabricació del vehicle ja que amb CFD es poden estudiar diverses geometries que afavoreixin el rendiment sense fer experiments reals de tots els models. Certament aquesta eina té els seus inconvenients com la dependència de resultats correctes i precisos amb la qualitat de les dades d'entrada, el temps de computació elevat i el cost de disposar de programes de CFD. La geometria del vehicle ha de ser el més fidel a la realitat possible i la malla. No obstant una simulació en CFD no substitueix la validació del vehicle en proves experimentals previ a la fabricació.

4.2.1. Procés de simulació amb CFD

Per realitzar un estudi amb CFD cal seguir unes etapes que son universals en tots els softwares que permeten la resolució numèrica de les equacions que governen el moviment del fluid. En aquest apartat es centrarà en explicar aquest procés més detalladament per realitzar una simulació en el programa ANSYS FLUENT.

- **Preprocessament:** Permet introduir les dades d'entrada al programa per convertir-los en el format adequat per solucionar les equacions a l'etapa de processament. En aquesta primera etapa es defineix la geometria d'estudi i es genera la malla on es determina la mida dels elements de la malla. La malla ha de tenir el malla de la capa límit per obtenir resultats més propers a la realitat i si escau un refinament en les parts de la geometria més complexes. Cal fer un anàlisi de sensibilitat de la malla per determinar la malla més òptima per la simulació. Finalment es defineixen les condicions de contorn i s'escull el model de turbulència pel qual es solucionaran les equacions.
- **Processament :** Consisteix en la resolució del sistema d'equacions de tots els elements de la malla mitjançant el procés iteratiu. Aquesta etapa es on el software realitza tots els càlculs necessaris, prèviament s'ha de inicialitzar la simulació i definir el nombre d'iteracions.
- **Post-processament :** s'obtenen les gràfiques i els resultats de la simulació per poder realitzar l'anàlisi dels resultats més detalladament. En aquesta etapa és on es pot obtenir els valors del coeficient d'arrossegament i el coeficient de sustentació conjuntament amb els gràfics de mapes de contorn, el gràfic de vectors, línies de corrent, animacions entre d'altres.

En l'Esquema 4.2-1 s'il·lustra gràficament les diferents etapes d'una simulació en ANSYS Fluent amb els passos que has de realitzar en cadascuna.



Esquema 4.2-1 Etapes simulació amb CFD [24]

El preprocessament es l'etapa més important de tota la simulació ja que la veracitat dels resultats dependrà de la qualitat de la geometria i la qualitat de la malla en gran mesura. Aquesta etapa es divideix en tres blocs principals la creació de la geometria, la creació de la malla i la configuració de la simulació.

La creació de la geometria es realitza amb el component ANSYS Design Modeler on s'importarà la geometria del model en un dels formats compatibles amb ANSYS. També permet crear des de zero la geometria de l'objecte i geometries auxiliar com el domini computacional i els cossos d'influència, en cas de necessitar-los. Aquesta aplicació conté moltes eines d'anàlisi a més de les eines per crear les geometries.

En el component Ansys Meshing un cop importada la geometria es crea el mallat. S'ha de definir la mida apropiada en tots els cossos i superfícies pertanyents a la geometria. Un element important de mallar és la capa límit que es pot obtenir amb l'eina inflation. ANSYS Meshing també incorpora eines per analitzar la qualitat de la malla; els paràmetres de qualitat com la asimetria, la ortogonalitat o el rati d'aspecte es poden visualitzar amb gràfics de barres o en la pròpia malla.

És important fer un anàlisi de sensibilitat de la malla per tal de garantir la seva qualitat, ja que aquesta pot afectar significativament als resultats de la simulació. La malla ha de ser suficientment fina per poder capturar la geometria de l'objecte i les característiques del flux al voltant amb precisió, però sempre tenint en compte el cost computacional.

Per últim en l'aplicació del Set up es defineixen les condicions de contorn i el model de turbulència adequats segons el tipus de problema que s'estudia. Primer cal seleccionar quin tipus de solucionador és més adient pel problema. El pressure-based és més correcte utilitzar-lo per fluxos incompressibles de baixes velocitats i el density-based per el fluxos compressibles per altes velocitats. També cal definir si la simulació és en regim transitori o en regim estacionari. Tot seguit s'ha d'escollir el material del fluid i de l'objecte d'estudi per defecte aquests són l'aire i l'alumini.

En el processament el programa s'encarrega de solucionar les equacions de transport però abans s'ha de configurar alguns detalls. És important seleccionar el mètode de solució per resoldre el sistema. Per tal de comprovar la convergència correcta de la malla es recomana definir un paràmetre adimensional com el coeficient de drag per veure la seva evolució al llarg de la simulació. Aquest paràmetre ha elecció personal s'ha de definir juntament amb el gràfic corresponent que permetrà monitoritzar la simulació. També es poden configurar els gràfics de residus per personalitzar el valor de tolerància del residu si s'escau. Després es pot inicialitzar la simulació de dues formes amb la inicialització estàndard on s'agafen els valors d'entrada o amb la inicialització híbrida on s'obtenen els valors inicials de la solució de les equacions sense viscositat. Aquest últim procediment disminueix considerablement el nombre d'iteracions. Finalment és selecciona el nombre d'iteracions i es comença el procés de càlcul.

Per últim en el postprocessament un cop la solució ha convergit es pot realitzar l'anàlisi de resultats mitjançant les eines del programa. En l'aplicació de CFD-post es poden veure els mapes de contorn de pressions i velocitats, les línies de corrent i fins i tot animacions.

4.2.2. Equacions de transport

Equació general de conservació o transport representada per la variable d'interès ϕ . Aquesta variable genèrica, segons el valor substituït a l'equació general, retorna l'equació corresponent al valor substituït; sent aquestes la equació de conservació de la massa, la quantitat de moviment i la energia. Per representar adequadament les diferents equacions a més de la variable s'ha de modificar el coeficient de difusió Γ i la font S .

$$\underbrace{\frac{\partial(\rho\phi)}{\partial t}}_{\text{Temporal}} + \underbrace{\nabla \cdot (\rho\phi\vec{v})}_{\text{Convectiu}} = \underbrace{\nabla \cdot (\Gamma\nabla\phi)}_{\text{Difusiu}} + \underbrace{\sum}_{\text{Font}} \quad (\text{Eq 4.9})$$

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho\phi dV}_{\text{Temporal}} + \underbrace{\oint_A \rho\phi\vec{v} d\vec{A}}_{\text{Convectiu}} = \underbrace{\oint_A \Gamma\nabla\phi d\vec{A}}_{\text{Difusiu}} + \underbrace{\int_V S_\phi dV}_{\text{Font}} \quad (\text{Eq 4.10})$$

En aquesta equació integral es tenen en consideració els termes temporals, convectius, difusius i de generació. El temporal representa la variació local en el temps a l'interior del volum de control. El terme convectiu representa amb la velocitat del flux el moviment de la variable en el domini. El terme difusiu correspon a el fenomen de transport que succeeix segons el problema d'estudi com per exemple la llei de Fourier per la difusió de calor. Finalment el terme de la font compta amb la generació en el volum de control. [5]

En la Taula 4-1 estan indicats quin valor ha de prendre les variables de la equació de transport per convertir-se en l'equació de conservació corresponent.

Equació	Variable ϕ	Γ	S
<i>Continuïtat</i>	1	0	0
<i>Quantitat de moviment en x</i>	u	μ	$\left(\frac{-\partial p}{\partial x}\right) + S_x$
<i>Quantitat de moviment en y</i>	v	μ	$\left(\frac{-\partial p}{\partial y}\right) + S_y$
<i>Quantitat de moviment en z</i>	w	μ	$\left(\frac{-\partial p}{\partial z}\right) + S_z$
<i>Energia</i>	h	$\frac{k}{C_p}$	S_h

Taula 4-1 Equacions de transport amb variables corresponents

On $\vec{v} = (u, v, w)$ és el camp de velocitats, μ la viscositat, i el terme S conté el gradient de pressions en la direcció corresponent més altres forces com la gravetat o parts del tensor de tensions que pertanyen al terme difusiu. El terme h correspon a la entalpia, k la conductivitat tèrmica, C_p la capacitat tèrmica del material i S_h el terme font de entalpia.

Equació de conservació de la massa

L'equació de conservació de la massa o també coneguda com l'equació de continuïtat estableix que la variació de massa d'un fluid depèn del flux net entrada, és a dir que la el flux d'entrada en un element de control ha de ser igual que el de sortida. En substituir els valors de la Taula 4-1 de les variables d'interès, el coeficient de difusió i la font queda l'equació

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (\text{Eq 4.11})$$

En el flux incompressible la densitat del fluid es constant per això el terme en funció del temps s'anul·la i la divergència de la velocitat ha de ser igual a zero quedant com a formula final la

equació 4.12.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (\text{Eq 4.12})$$

Equació de conservació del moment

L'equació de conservació de moment descriu el comportament dels fluids en moviment. Aquesta equació defineix la variació del vector de velocitats varia en funció del temps, la convecció del flux, els efectes de la viscositat, les forces de pressió i la gravetat. En substituir els valors de la Taula 4-1 de les variables d'interès, el coeficient de difusió i la font queda l'equació, considerant un flux incompressible i un fluid newtonià.

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{v}) - \nabla p + \rho \vec{g} \quad (\text{Eq 4.13})$$

Equació de conservació de l'energia

L'equació de conservació de l'energia descriu com l'energia es transporta i es conserva en un fluid. Aquesta equació defineix l'energia total en funció del temps, del flux de massa, la conducció tèrmica i la presència de fonts. En substituir els valors de la Taula 4-1 de les variables d'interès, el coeficient de difusió i la font queda l'equació, considerant un flux a baixa velocitat, incompressible i depreciant la dissipació viscosa.

$$\frac{\partial(\rho h)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} h) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{c_p} \nabla h \right) + S_h \quad (\text{Eq 4.14})$$

4.2.3. Mètode de volums finits (MVF)

El mètode de volums finits és el més utilitzat en la dinàmica computacional de fluids per la seva generalitat, simplicitat conceptual i la seva facilitat per ser implementat en qualsevol tipus de mallat [5]. Aquest mètode consisteix en la discretització del domini en un número finit de cel·les, sense solapar-se, on s'associa a cadascuna d'elles el valor mitjà de la variable d'interès ϕ . La equació general diferencial es transforma en un conjunt d'equacions algebraïques que relacionen el valor de la variable d'interès ϕ en un volum de control, amb el valor d'aquest en les cel·les veïnes.

En la Figura 4.2-1 tenim tres volums de control on P és el node actual i W i E els nodes veïns.

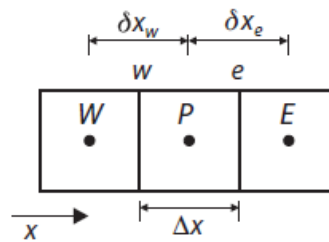


Figura 4.2-1 Discretització unidimensional per MVF [5]

Integrant l'equació en el volum de control de P i suposant una variació lineal entre els nodes de les cel·les s'obté l'equació 4.15. Reorganitzant l'equació en funció de la variable d'interès en els nodes s'obté l'equació 4.16

$$\frac{\phi_E - \phi_P}{\Delta x} - \frac{\phi_P - \phi_W}{\Delta x} + \bar{\phi} \Delta x = 0 \quad (\text{Eq 4.15})$$

$$a_P \phi_P = a_E \phi_E + a_W \phi_W + b \quad (\text{Eq 4.16})$$

On a_P , a_E , a_W són els coeficients de les variables on estan les relacions entre les distàncies, àrees i coeficients constants depenent de la variable del problema. Apareix el terme b que es relaciona amb les fonts que entren o surten del volum de control. L'equació 4.16 s'obté per cadascuna de les cel·les, obtenint el conjunt d'equacions algebraiques. Amb aquest mètode s'avaluen els fluxos d'entrada i sortida de cada volum de control garantint la conservació de la variable en cada cel·la independentment de la mida d'aquesta.

$$A \phi = B \quad (\text{Eq 4.17})$$

Aquestes equacions es resoldran de forma matricial, on en els nodes que es troben en els límits se'ls definirà el terme de la condició de contorn. En la resolució iterativa del sistema abans d'arribar a la solució final, es calculen les solucions aproximades on la conservació de la variable no succeeix. Això vol dir que els fluxos d'entrada i de sortida no són iguals i per tant hi ha una part de l'energia que falta. En aquest punt és on apareixen els residus r que representen el desequilibri d'energia en el volum de control.

$$A \phi - B = r \quad (\text{Eq 4.18})$$

Quan el valor del residus s'apropa més a zero, més precisa és la solució. Per cada equació de transport que es resolgui per CFD es tindrà un equació matricial com la equació 4.18. Això és podria fer manualment quan el nombre de nodes es molt reduït i el problema és senzill, però els programes de CFD no poden resoldre el sistema matricial amb un domini de milions de nodes.

Quan el nombre de nodes creix excessivament la inversió de la matriu no és viable per tant s'han desenvolupat diferents algorismes per optimitzar la inversió. Per resoldre la no linealitat de les equacions de Navier-Stokes és linealitzada l'equació entorn un valor estimat i s'inicia un procés iteratiu fins que satisfaci el criteri de convergència segons l'indicador r . El residu és la mitjana del RMS de la diferència entre la solució actual i l'anterior en cada cel·la de la malla. D'aquest valor s'ha de fer la mitjana de tota la malla per obtenir un valor representatiu de tot el domini. També cal escalar aquest valor per la mitjana de la variable d'interès ja que depèn del valor mitjà de la solució en cada iteració.

$$r = \frac{\sqrt{N \sum_{i=1}^N (\phi_i - \phi_{0i})^2}}{\sum_{i=1}^N \phi_i} \quad (\text{Eq 4.19})$$

En l'equació anterior ϕ_i és la variable d'interès en el node $i = 1, 2, 3, \dots, N$ i ϕ_{0i} és el valor de la solució anterior en el node $i = 1, 2, 3, \dots, N$. Els residus es representen en un gràfic on es veu l'evolució de r en funció del nombre d'iteracions. En l'eix d'ordenades on es troben els valors del residu es troba en escala logarítmica i en l'eix d'abscisses el nombre d'iteracions.

4.2.3.1. Tipus de malla

La generació de la malla és extremadament important en una simulació amb CFD. Les propietats de la malla es veuen reflectides en els resultats en termes de precisió i la fidelitat dels resultats a la realitat del problema; per això s'han desenvolupat mètodes per tal de generar malles més òptimes.

Les malles discretitzen el domini en un nombre finit de cel·les; cadascuna d'elles està associada a un centroide i limitada per un nombre de superfícies anclades als nodes. Les malles es poden classificar en tres tipus de malla segons la seva connectivitat i la geometria d'estudi.

- **Malla estructurada:** es caracteritza per una connectivitat regular la cel·les seran quadrilàters en el cas 2D i hexaedres en el cas 3D tenint cada cel·la i als seus costats el nombre corresponent de cel·les segons la seva geometria i guardant la informació de la posició ordenadament. La connectivitat entre les cel·les s'obté directament de la posició en memòria dels vectors en els que es guarda la informació. Només es poden utilitzar en geometries senzilles on es pot adequar elements paral·lelepípedes amb malles ortogonals.

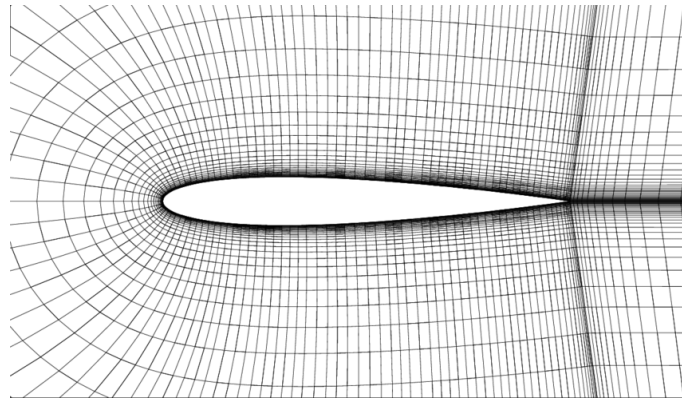


Figura 4.2-2 Malla estructurada [26]

- **Malla no estructurada:** es caracteritza per la connectivitat de la malla no trivial. Degut a això es necessari calcular la informació de connectivitat entre les cel·les i emmagatzemar-la fent el càlcul menys eficient. Aquestes malles són més flexibles i s'adapten a la geometria del domini, són les més adequades per simular geometries complexes i variades. També permeten el refinament d'una zona sense afectar la distribució de cel·les veïnes incrementant la precisió i estalviant el cost computacional de les cel·les òptimes.

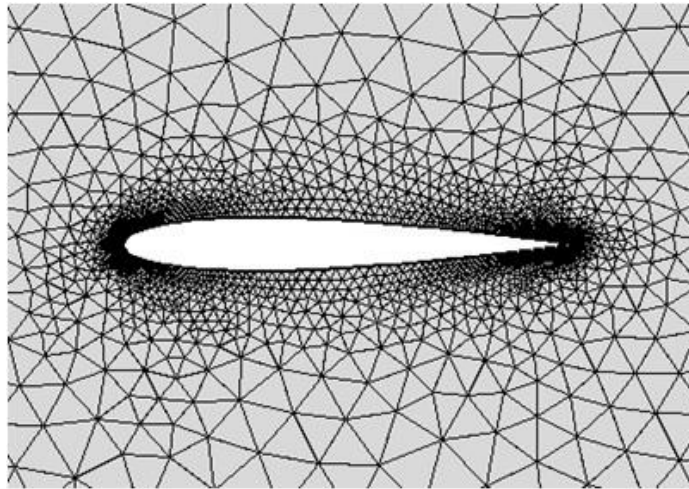


Figura 4.2-3 Malla no estructurada [27]

- **Malles híbrides:** consisteix en la combinació de malla estructurada i malla no estructurada segons la zona a mallar. Normalment en la regió propera a l'objecte a estudiar es defineix la malla estructurada per definir millor les cel·les.

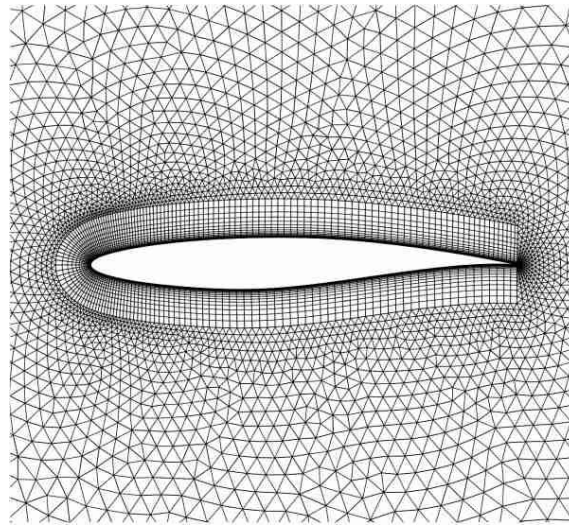


Figura 4.2-4 Malla híbrida [28]


4.2.3.2. Qualitat de la malla

Abans de procedir amb la solució de les equacions cal assegurar-se de que la malla dissenyada satisfà uns criteris de qualitat per tal que els resultats siguin precisos. De no ser així els resultats no es podrien considerar vàlids ja que no representarien la realitat del problema.

A nivell general es aconsellable que la mida de les cel·les canviï suaument amb un rati de creixement que no superi el 20% ja que un salt inesperat entre cel·les pot produir una reducció considerable de la precisió dels resultats. El creixement de la distancia entre nodes consecutius ha de ser lent i continu en totes les direccions i les cel·les no poden estar distorsionades. Els elements haurien d'estar orientats segons la direcció del flux en la regió propera a l'objecte. Cal fer un refinament o un mallat més fi en les zones on el flux presenta gradients importants. Les dimensions globals dels elements de la malla s'han d'ajustar a la potencia de càlcul dels equips on es resol la simulació.

Per tal de garantir la qualitat de la malla de volums finits en CFD existeixen els paràmetres de qualitat per determinar la precisió i la confiabilitat dels resultats de la simulació. Els paràmetres de qualitat determinen la relació entre la cel·la ideal i la de la simulació. Els paràmetres principals per definir la qualitat de la malla són els següents:


- **Asimetria o Skewness** quantifica la deformació que sofreixen les cel·les alhora d'adaptar-se al contorn de la geometria. La deformació es basa en la comparació de la cel·la òptima amb la cel·la existent respecte la seva geometria equilàtera o equiangular. El rang d'asimetria és de 0 a 1, sent 0 la cel·la ideal.



Excellent	Very good	Good	Acceptable	Bad	Unacceptable
0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.94	0.95-0.97	0.98-1.00

Taula 4-2 Escala valors Skewness [14]

- **La qualitat ortogonal (Orthogonal Quality):** es defineix a partir dels angles entre el vector del centre de propietat al de les cel·les adjacents i el del vector normal a la cara passant per el centre de propietat. El rang és de 0 a 1, sent 1 el valor ideal.[14]



Unacceptable	Bad	Acceptable	Good	Very good	Excellent
0-0.001	0.001-0.14	0.15-0.20	0.20-0.69	0.70-0.95	0.95-1.00

Taula 4-3 Escala valors Orthogonal Quality [14]

- **Rati d'aspecte (Aspect ratio)** és la relació entre la longitud més llarga i la més curta en una cel·la. El aspecte ideal és de 1, el valor per un tetraedre perfecte, quan més petit és millor qualitat té la malla.

4.2.4. Models de turbulència

La turbulència és el moviment d'un fluid de forma aleatòria i caòtica on les propietats físiques presenten valors instantanis impredecibles en el temps i en l'espai. Aquest flux es caracteritza per la presència de vòrtexs i la seva pròpia inestabilitat. La turbulència s'origina per petites pertorbacions en el flux laminar que no s'estabilitzen, aquestes s'amplifiquen i generen noves pertorbacions fins que es supera el nombre de Reynolds crític passant a un flux turbulent.

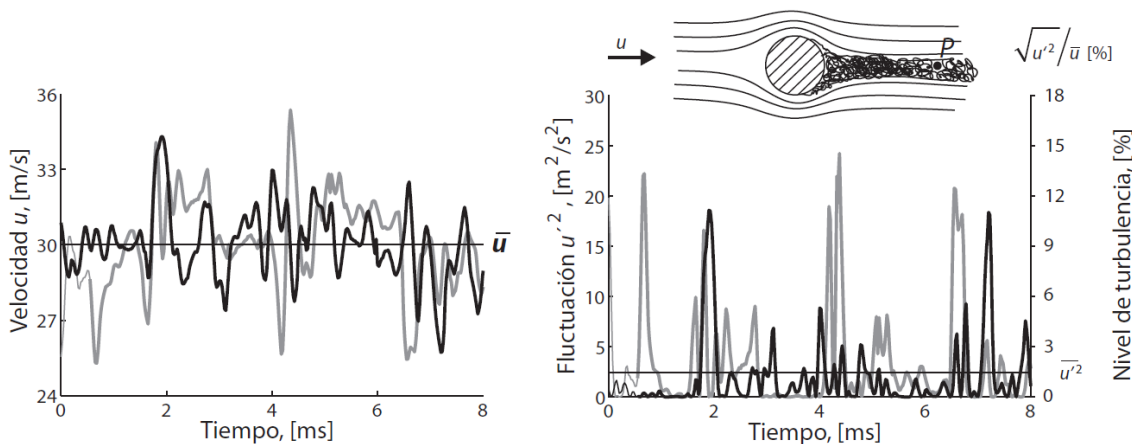


Figura 4.2-5 Esquerra :Traça de velocitat flux turbulent Dreta: Nivell de turbulència instantània [5].

Els programes de simulacions CFD, apliquen les equacions d'estat i les equacions de transport per resoldre els diferents problemes. Per poder resoldre les equacions de govern s'ha de resoldre el problema de tancament de la turbulència. Aquest problema es refereix a la generació de més incògnites que equacions deguda a aplicar el filtre espacial o la mitjana temporal, segons l'aproximació (LES o RANS). L'aplicació d'aquests operadors estadístics es necessita perquè la turbulència només es pot descriure amb variables estadístiques com la mitjana del camp de velocitats o la fluctuació quadràtica de la velocitat.

Per obtenir una solució numèrica es poden realitzar aproximacions de diverses maneres. El nivell de detall de les aproximacions s'aconsegueix en funció del nombre d'escala de la turbulència que es vulguin resoldre dit d'una altra manera en funció de la quantitat d'energia cinètica turbulenta que es transporti en les equacions constitutives [5]. A continuació s'explicaran les aproximacions numèriques per el tractament de la turbulència ordenades de major a menor complexitat.

- **Direct Numerical Simulation (DNS):** Aquest mètode resol les equacions instantànies completes utilitzant simulacions numèriques detallades sense fer servir cap aproximació. El cost de resoldre les equacions es molt elevat per això es adequat utilitzar el model en malles senzilles.
- **Large Eddy Simulation (LES):** Aquest model redueix la complexitat de les equacions de transport resolent els remolins més grans i modelant els petits reduint el cost computacional. Per eliminar les escales petites es realitza una operació de filtratge i el

seu efecte es modela mitjançant un model que considera de forma aproximada la seva influència en la variació general dels paràmetres del flux.[14] Els recursos computacionals segueixen sent excessius sent només recomanable per geometries simplificades o remolins grans en comparació a la mida de la malla.

- **Reynolds Average Navier-Stokes (RANS):** Aquest model fa una promig temporal sobre les equacions de transport permetent descompondre la variable d'interès en el seu valor mitja i la seva part fluctuant. En realitzar la mitjana temporal apareixen les tensions de Reynolds a la equació de Navier Stokes. Aquestes tensions turbulentes es modelitzen per poder assegurar el tancament del sistema. Aquesta aproximació és la més utilitzada ja que requereix menys cost computacional que l'aproximació LES.

Models de turbulència

Per substituir les tensions de Reynolds que apareixen en l'aproximació per RANS, s'han desenvolupat una gran quantitat de models de turbulència. Els models de turbulència busquen solucionar el problema de tancament amb diferents tipus d'hipòtesi que simulin el comportament del flux turbulent.

$$\underbrace{\frac{\partial \bar{v}_i}{\partial t}}_{\text{Temporal}} + \underbrace{\nabla(\bar{v}_i \bar{v}_j)}_{\text{Convectiu}} = -\underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla \bar{p}}_{\text{Font}} + \underbrace{\nabla(v \nabla \bar{v}_i)}_{\text{Difusiu}} - \underbrace{\frac{1}{\rho} \nabla(\rho \overline{v'_i v'_j})}_{\text{Tensions de Reynolds}} \quad (\text{Eq 4.20})$$

Si apliquem el promig temporal a l'equació de conservació de moment 4.13 i reorganitzant l'equació s'obté la equació de transport general 4.20. El subíndex i indica cadascuna de les components espacials. Amb les tensions de Reynolds s'afegeixen sis noves incògnites, tensor simètric, de les quals s'hauran de relacionar amb les variables existents per tal de resoldre el sistema d'equacions. Les tensions de Reynolds es poden expressar també de la següent manera: $\tau_{ij} = -\rho \overline{v'_i v'_j}$

$$\underbrace{\frac{\partial \rho \bar{\phi}}{\partial t}}_{\text{Temporal}} + \underbrace{\nabla(\bar{\phi} \bar{v}_j)}_{\text{Convectiu}} = \underbrace{\nabla(\Gamma_\phi \nabla \bar{\phi})}_{\text{Difusiu}} - \underbrace{\nabla(\rho \overline{\phi' v'_j})}_{\text{Tensions de Reynolds}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Font}} \quad (\text{Eq 4.21})$$

Els models RANS estan basats en la hipòtesi de Boussinesq en la que s'assumeix que les tensions turbulentes es poden expressar amb un mecanisme similar al de les tensions laminars, introduint el concepte de viscositat turbulenta μ_t . [3]

$$\tau_t = \mu_t \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} \quad (\text{Eq 4.22})$$

En aparèixer el terme de les tensions turbulentes en la equació de Navier Stokes es van desenvolupar nous models que assignen a μ_t una nova expressió. Aquests models es poden dividir en dos grups: els models lineals de viscositat turbulenta, Eddy Viscosity Models(EVM) i els models de tensions.

Els models de tensions s'utilitza quan la hipòtesi de Boussinesq no és vàlida com per exemple en fluxos tridimensionals. En aquest cas per resoldre el sistema s'utilitza un model de segon ordre definit una equació per cada una de les sis tensions de Reynolds. Un exemple de model de tensions seria el Reynolds Stress Model (RSM). Al augmentar el nombre d'equacions a resoldre aquest model augmenta molt el cost computacional de la simulació.

Eddy Viscosity models es basen en la hipòtesi de Boussinesq on la viscositat turbulenta és isotròpica. Els EVM es poden diferenciar segons el nombre d'equacions algebraiques que afegeixen per resoldre el sistema d'equacions. Aquests són els models algebraic o de 0 equacions, els models 1 equació i els models de 2 equacions.

Models Algebraic: Els models de 0 equacions no necessiten afegir una equació, aquests es calculen directament de les variables del fluid. Com a conseqüència, aquests models no són capaços de tenir en compte els efectes històrics en la turbulència, com la convecció i la difusió de la energia turbulenta. [6] Aquests models són útils per geometries senzilles o per les fases inicials de càlcul, per a geometries complexes no es recomana ja que aquest model es molt simple per obtenir resultats precisos.

Models 1 equació: Els models de turbulència d'una sola equació afegeixen al sistema una equació de transport per resoldre el problema de tancament. Un exemple d'això seria el model Spalart-Allmaras, on es resol una equació de transport per estimar la viscositat cinemàtica turbulenta i una equació algebraica per especificar una escala de longitud. Aquest model va ser originalment dissenyat per aplicacions aerodinàmiques com el flux al voltant de perfils aerodinàmics.

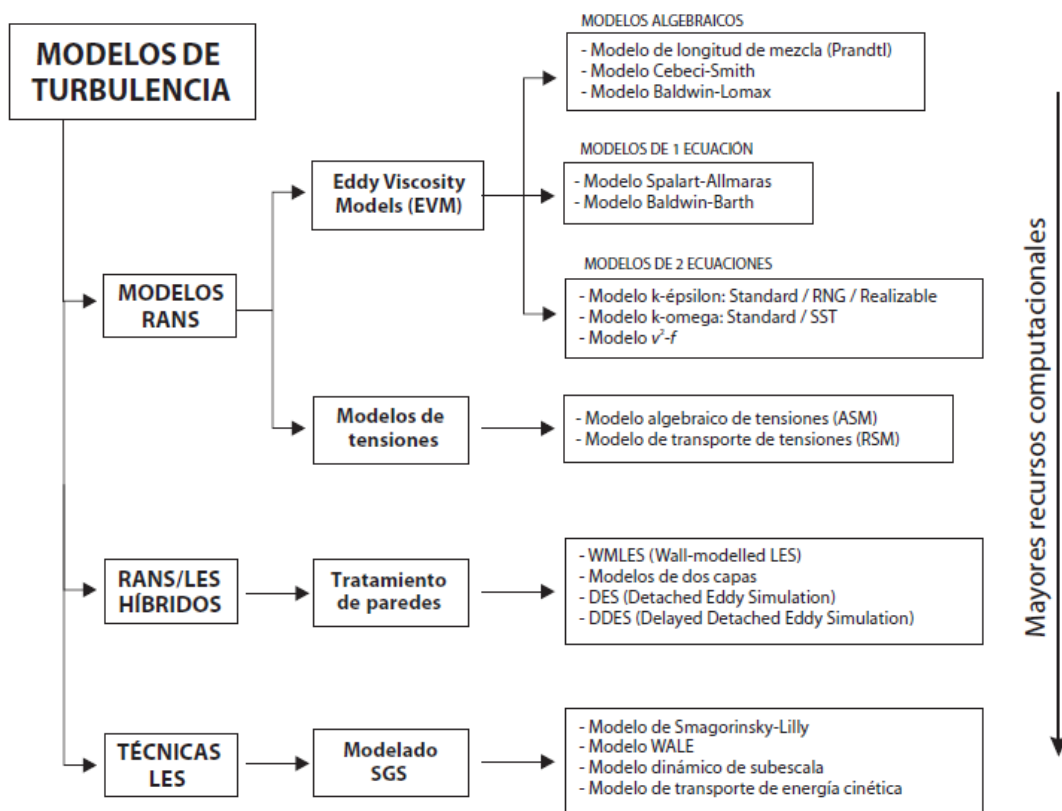
Models de 2 equacions: Entre aquest models es troben els models més utilitzats com el $k-\omega$ i el $k-\epsilon$. Aquests models de turbulència incloent dues equacions addicionals, aquestes variaran segons el model escollit. La primera variable normalment és la energia cinètica turbulenta k . La segona variable varia més segons el model però representarà l'escala de la turbulència. D'aquests models sorgeixen variants per intentar millorar l'aproximació de la viscositat turbulenta.

- Model $k-\omega$: Aquest model té dos equacions de transport addicionals sent aquestes per la energia cinètica turbulenta i per la dissipació específica ω . És un model per números de Reynolds baixos i es pot utilitzar combinant-lo amb funcions de paret. Usualment dona millors resultats i és més apropiat que el $k-\epsilon$ en regions amb recirculació, a prop de parets sòlides, fluxos interns, separació del flux. [7]
- Model $k-\epsilon$: estàndard és un dels models turbulents més utilitzats, ja que és el més

senzill però alhora el més complert. Incorpora dues equacions de transport addicionals una per la energia cinètica turbulenta k i l'altre per la taxa de dissipació, ϵ . La primera variable de transport és l'energia cinètica turbulenta k , aquesta determina l'energia en la turbulència. La segona variable de transport és la dissipació turbulenta ϵ que determina l'escala de la turbulència. Es modelitza la viscositat segons l'equació següent:

$$\mu_t = \bar{\rho} C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{Eq 4.23}$$

Aquest model funciona en molts problemes, excepte per fluxos rotatius, fluxos al voltant de superfícies corbes i fluxos amb canvis bruscos en el gradient de creixement del nombre d'elements.



Esquema 4.2-2 Classificació models de turbulència [5]

Com a resum en el esquema anterior es pot veure la classificació dels models de turbulència sense tenir en compte el model DNS, ja que aquest resol les equacions completament.

5. Metodología

En aquest apartat es descriu tot el procés per fer la simulació amb ANSYS Fluent. Primer es preparen els models per l'estudi aerodinàmic i es crea el domini computacional per la simulació del fluid al voltant del vehicle. Posteriorment es realitza l'anàlisi de sensibilitat de les dues malles per determinar la malla més òptima segons la potència computacional disponible. Un cop la malla ha estat seleccionada es procedeix a configurar la simulació escollint el model de turbulència i les condicions de contorn aptes per que els resultats siguin correctes.

Cal esmentar que el procés de simulació es va començar amb el model Tesla S model i es on es van fer més proves de simulació i diferents dimensions pel domini. Els coneixements apresos es van aplicar més ràpidament en el model Tesla Cybertruck.

5.1. Plantejament del problema

Es realitzarà l'estudi aerodinàmic de dos models d'automòbil de la marca Tesla sent aquests el S model i el Cybertruck. L'objectiu és analitzar els resultats de la simulació per veure el comportament aerodinàmic tenint en compte el contrast entre les geometries.

Seguidament s'explicaran els dos models Tesla que es simularan en el programa ANSYS Fluent. Es donaran els detalls tècnics obtinguts a la pagina web de Tesla i els coeficients de drag. Pel Tesla Cybertruck no hi ha un coeficient de drag oficial ja que el vehicle esta en desenvolupament i encara no es troba en el mercat.

Tesla S model

El Tesla S model és un vehicle elèctric d'alta gama fabricat per la empresa Tesla Inc. Va ser comercialitzat per primer cop l'any 2012 convertint-se en l'automòbil elèctric referent fins a l'actualitat. Això es degut a que aposta per les ultimes novetats tecnològiques, com el sistema de pilot automàtic o la pantalla tàctil de 17 polzades al quadre de comandament, a més del seu disseny innovador i la seva gran autonomia.

El disseny elegant i esportiu compta amb una carrosseria amb línies suaus i el xassís més ample que proporciona una aerodinàmica millorada. L'interior del sedan es ample, dissenyat amb detalls de fusta i cinc places en acabat de pell amb un maleter espaiós.



Figura 5.1-1 Tesla S model[9]

Respecte a les seves prestacions, el Tesla S model compta amb un motor dual elèctric amb tracció integral que proporciona una potència de 670 CV, una acceleració de 0 a 100 km/h en només 3,2 s i una velocitat màxima de 250 km/h. La bateria d'ions de liti ofereix una autonomia de 634 km amb una única carrega, permetent-li recorre grans distàncies. A més el nou mòdul redissenyat i la arquitectura tèrmica permeten una carrega més ràpida, proporcionant més potència i resistència en totes les condicions [8].

El Tesla S model compta amb tres nivells de suspensió neumàtica permetent adaptar-se a les condicions de carretera, proporcionar una major estabilitat en les corbes i a altes velocitats. Això permet millorar la eficiència aerodinàmica aportant una experiència de conducció més suau i una disminució en el consum de la bateria.

Una de les característiques més rellevants és el sistema de pilot automàtic avançat que permet funcions tals com l'estacionament automàtic en línia, canvi de carril automàtic, navegar en pilot automàtic entre d'altres. Aquesta tecnologia disposa de càmeres i sensors en diverses parts del vehicle per tal de garantir la seguretat.



Figura 5.1-2 Línies de corrent Tesla S model [8]

El S model esta dissenyat per la eficiència aerodinàmica presenta un coeficient de resistència a l'avanç C_D de 0,208 un dels més baixos en comparació amb altres models de cotxe. La innovadora plataforma del vehicle completament llisa, el disseny de la carrosseria i la optimització dels detalls exteriors com els tiradors permeten maximitzar el rendiment aerodinàmic i en conseqüència millorar la eficiència energètica. Els nivells de suspensió permeten regular l'altura del vehicle aconseguint reduir l'àrea frontal i en conseqüència la resistència a l'avanç.

Tesla Cybertruck

El model Tesla Cybertruck va ser presentat el novembre de 2019 amb un disseny futurista i innovador. Aquest model té millor funcionalitat que un camió i més rendiment que un vehicle esportiu, sent un model totalment elèctric amb una autonomia de 800 km. La potent transmissió i baix centre de gravetat proporcionen un major control de tracció i parell de torsió, permeten una acceleració de 0 a 96,5 km/h en només 2,9 segons. [9]

El disseny del Tesla Cybertruck destaca en comparació amb els altres models de pickups del mercat. La seva geometria angular amb una carrosseria d'acer inoxidable ultra resistent amb els cristalls blindats donen un aspecte militar al model. En el punt més elevat es produeix un descens cap al maleter on es pot carregar fins a 2.831 l de capacitat volumètrica. L'interior del model disposa de capacitat per sis persones amb emmagatzemant disponible sota els seients. També disposa de la pantalla tàctil de 17 polzades com en el model Tesla S model.



Figura 5.1-3 Tesla Cybertruck[9]

Aquest model estarà disponible amb diferents sistemes de propulsió, bateries i autonomia donant lloc a tres opcions disponibles. La primera és amb un únic motor amb propulsió en les rodes de darrera, la segona compta amb dos motors i tracció total i la tercera disposa de tres motors amb tracció total.

Models Cybertruck	Acceleració 0 a 96 km/h	Tracció	Autonomia [km]
<i>1 motor</i>	6,5 s	Propulsió posterior	400
<i>2 motors</i>	4,5	Tracció total	480
<i>3 motors</i>	2,9 s	Tracció total	800

Taula 5-1 Característiques Models Cybertruck [11]

La aerodinàmica dels camions es més complexa per tant tenen un coeficient de drag d'un 15% més elevat que un cotxe esportiu i un 25% més elevat que un sedan. La forma trapezoidal no afavoreix el rendiment aerodinàmic en comparació amb altres models de cotxe. El coeficient de drag és més elevat en comparació amb el Tesla S model, sent aquest de 0,39.

5.2. Geometria

Per poder realitzar aquest estudi, es va trobar un model CAD dels dos models de Tesla per Internet per poder dedicar-li més temps a l'estudi aerodinàmic en si mateix i no pas a la realització de les figures en programes de CAD. Les geometries s'han obtingut de diferents

webs, la del vehicle Tesla S model en Fetch CFD i la geometria final del Tesla Cybertruck en GrabCAD.

En tots dos models la geometria ha estat simplificada pels seus creadors per poder simular els models sense tenir problemes en el mallat. Les llantes de les rodes han estat eliminades en els dos vehicles simplificant el disseny de la roda. El Tesla S model té les rodes aplanades per la facilitar la simulació.

En comparació amb els dos models la geometria del tesla s model ha estat menys simplificada en canvi la geometria del model final del Cybertruck ha patit més simplificacions sobretot en les rodes. Inicialment es volia que les dues figures fossin el més fidedigne als models reals per poder obtenir resultats propers als donats per Tesla. El Tesla S model aconsegueix ser bastant fidel a la realitat però el model escollit per la simulació del Tesla Cybertruck no tant.

Pel Tesla Cybertruck es van provar tres geometries diferents per poder fer la simulació. La primera geometria és la més fidel al model original i la més detallada. Com es pot veure en la Figura 5.2-1 els neumàtics estan excessivament detallats i amb les llantes. Aquesta geometria es troba en un arxiu STL però donava problemes alhora d'importar-ho, de molts intents d'importar aquesta geometria al Design Modeler i de provar altres formats d'arxiu com IGES o STEP es va decidir buscar una altra geometria també tenint en compte que les rodes tan detallades donarien problemes en el mallat. La segona geometria que es va provar consisteix en la Figura 5.2-2 com es pot veure té les rodes més simplifiades tot i que inclou les llantes al disseny. Aquest model es va poder importar al Design Modeler però alhora de realitzar el mallat donava errors en les rodes.

Finalment es va decidir cercar una geometria on generalment el disseny estigues simplificat el màxim i preparat per fer una simulació. Principalment es va buscar un disseny on les rodes estiguessin el més simplifiades possible ja que aquestes eren les que estaven donant problemes en les darreres geometries. El model, Figura 5.2-3, es va trobar a la web GrabCAD en format STEP i es va poder importar sense cap problema al ANSYS.

A continuació es troben les tres geometries mencionades anteriorment. Es pot veure l'evolució de la simplificació del model per la simulació en les imatges comparatives dels tres models provats.

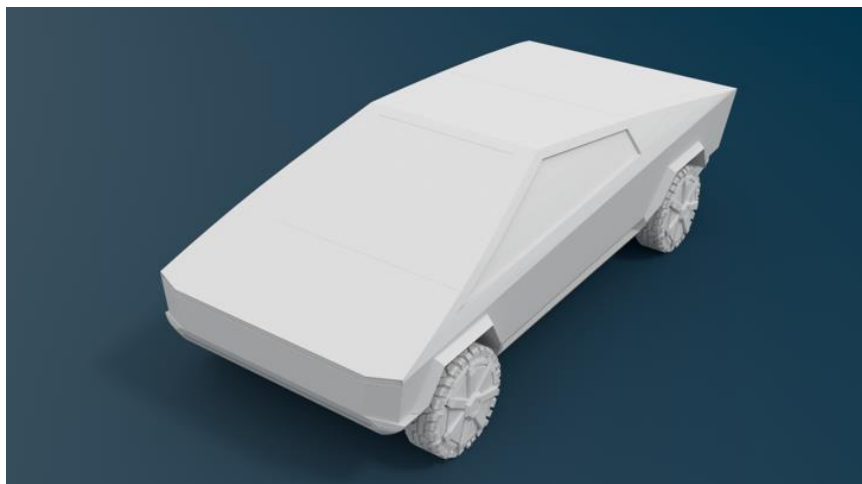


Figura 5.2-1 Primera geometria Tesla Cybertruck

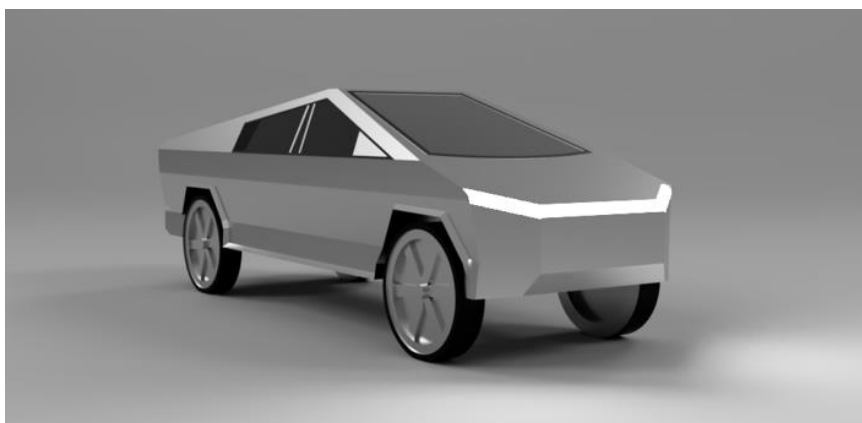


Figura 5.2-2 Segona geometria Tesla Cybertruck

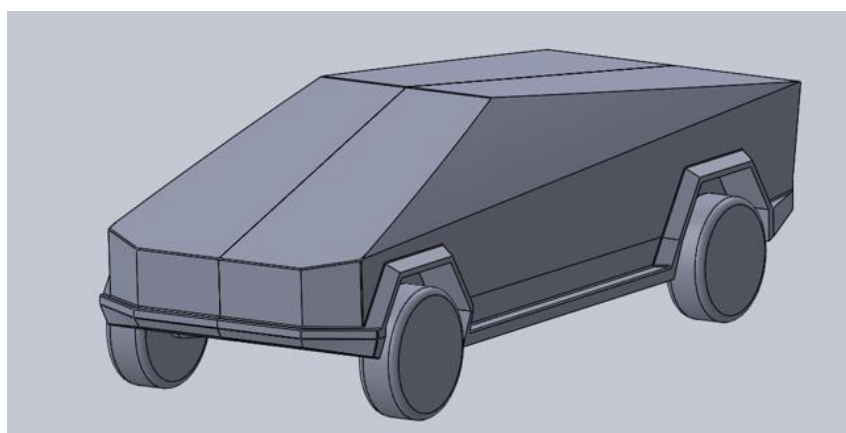


Figura 5.2-3 Geometria final Tesla Cybertruck

Per poder obtenir la geometria final primer s'han de realitzar uns passos generals per

ambdues figures. Primerament s'ha d'obtenir l'arxiu de la geometria CAD del model de cotxe desitjat per la simulació en un dels formats que ANSYS Design Modeler permet importar. Aquests poden ser arxius de format CAD com .step, .iges, o arxius de format de models matemàtics com .stl. Un cop tens l'arxiu s'ha de comprovar que s'importa correctament i que la geometria importada és un sòlid. Això es important ja que si hi ha una superfície no es realitzarà correctament la resta de volums per obtenir el túnel de vent. Finalment s'ha de comprovar que les dimensions de la geometria corresponen a les del model real en cas contrari s'ha d'escalar la geometria per que siguin iguals.

A continuació s'explicarà més detalladament els passos que es van realitzar particularment per cada geometria i les dimensions les geometries finals de cadascun dels models de cotxe.

Tesla S model

La geometria escollida per realitzar la simulació és el model en format STP tret de la pagina web FetchCFD tot i que aquest no es l'arxiu importat a l'ANSYS. En aquest arxiu la carrosseria s'importava com a superfície i alhora de realitzar la resta de volums d'aquesta superfície no s'executava. Per solucionar aquest problema es va importar l'arxiu a SOLIDWORKS per poder obtenir un sòlid de la carrosseria. El procediment va consistir en reparar la geometria tancant els forats que tenia la superfície i exportant la geometria en format IGES.

Un cop s'ha importat la geometria al Design Modeler es va mesurar les dimensions del cotxe i es van escalar a les mesures del model real. Aquestes es van obtenir del manual d'usuari del Tesla S model [12] que es troben a la Taula 5-2. En l'amplitud del cotxe s'inclouen els retrovisors i l'altura del vehicle s'ha escollit la que correspon al nivell de suspensió intermèdia.



Figura 5.2-4 CAD Tesla S model

	Longitud [m]	Altura [m]	Amplitud [m]
<i>Tesla S model</i>	5,021	1,431	2,189

Taula 5-2 Dimensions Tesla S model

Tesla Cybertruck

La geometria final del Tesla Cybertruck es va trobar a la web de GrabCAD en format STEP i es va importar al Design Modeler sense cap problema. Després es va comprovar les dimensions i es van escalar a les del vehicle real. Aquestes es van obtenir de la web Tesla Cybertruck Dimensions & Drawings [13], ja que no es troba disponible el manual d'usuari. Les dimensions es poden veure a la Taula 5-3.

	Longitud [m]	Altura [m]	Amplitud [m]
<i>Tesla Cybertruck</i>	5,885	1,905	2,027

Taula 5-3 Dimensions Tesla Cybertruck

5.3. Domini Computacional

El domini computacional s'ha generat per simular el flux d'aire al voltant de la geometria del projecte. Consisteix en crear un regió a l'espai envoltant la geometria que es vol estudiar per a continuació extreure el volum de la geometria quedant només el domini per on circula l'aire. La mida del domini computacional es un element important en la simulació pel seu impacte tant en la precisió dels resultats com en el temps de computació. Les dimensions d'aquest espai han de ser prou grans en comparació amb el vehicle sobretot on es forma el deixant.

Primer, es va generar un domini computacional al voltant de tot el vehicle, utilitzant l'eina Enclosure de Design Modeler. Un cop mallat es va observar que per obtenir un mallat fi i precís, tant el cos del domini computacional com en la superfície del vehicle, el numero d'elements augmentava considerablement passant el numero màxim d'elements permès per la versió d'estudiants d'ANSYS.

Amb el model complet es va realitzar una simulació de prova però apareixien volums negatius. Per tal de no obtenir volums negatius al importar la malla a la configuració del càlculs es va posicionar la geometria en el primer octant. La direcció longitudinal del vehicle es va orientar paral·lelament a l'eix x però en sentit contrari per tal que la direcció del flux sigui positiva.

Com aquesta geometria compta amb una simetria en la direcció longitudinal i no es realitza un estudi amb vent lateral, es va optar per simular la meitat del domini computacional de la versió anterior. Per tal d'obtenir la meitat del model es va utilitzar l'eina Mid-Surface per dividir la geometria per la meitat, creant una superfície. Després es va crear un pla de simetria en aquesta superfície i es va utilitzar l'eina Symmetry per fer el tall, deixant la meitat esquerra del domini. Amb la meitat del model ja es pot realitzar un anàlisi de la malla tenint en compte la limitació del nombre d'elements.

Per obtenir resultats més precisos es va afegir al model un cos d'influència al voltant del vehicle. Aquest cos és una eina per obtenir un mallat més fi entorn al vehicle, sense augmentar excessivament el nombre d'elements de la malla. Les dimensions d'aquest cos es poden veure a la Taula 5-4. Per poder simular el deixant correctament s'ha deixat una distància L darrere corresponent a la longitud de cada model en el seu corresponent cos d'influència.

Finalment es va augmentar l'àrea frontal del domini per tal que les parets no produeixin cap interferència. Es recomana que el percentatge de l'àrea de la secció frontal del vehicle entorn l'àrea de pas sigui inferior al 5%. [14] En el Tesla S model el percentatge de l'àrea de la secció s'ha aconseguit reduir fins al 4.9%, en canvi pel Tesla Cybertruck l'ampliació del domini computacional donava problemes en la simulació, amb la limitació del número d'elements, i s'ha deixat en 8.43%.

Cal esmentar que tot el procés d'obtenir el domini computacional final es va realitzar primer en el model Tesla S i un cop obtingut la geometria amb l'àrea de pas corresponent, la meitat de la geometria i amb la incorporació del cos d'influència es va començar la geometria per l'anàlisi de malla en el model Tesla Cybertruck. A continuació es poden veure les dimensions del domini computacional per ambdós models en la taula adjunta.

	Cos	Longitud [m]	Altura [m]	Amplitud [m]
<i>Tesla S model</i>	Domini computacional	20,021	7,441	4,0945
	Cos d' influència	12	3	2
<i>Tesla Cybertruck</i>	Domini computacional	20,885	6,915	3,0135
	Cos d' influència	14	3	1,5

Taula 5-4 Dimensions Domini

Tot seguit es troben les imatges dels dominis finals de ambdós models.

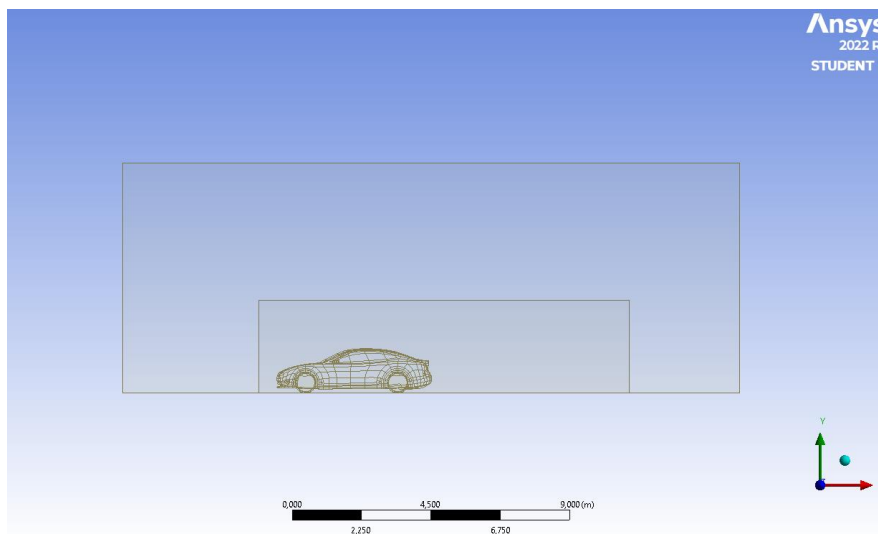


Figura 5.3-1 Domini Tesla S model pla XY

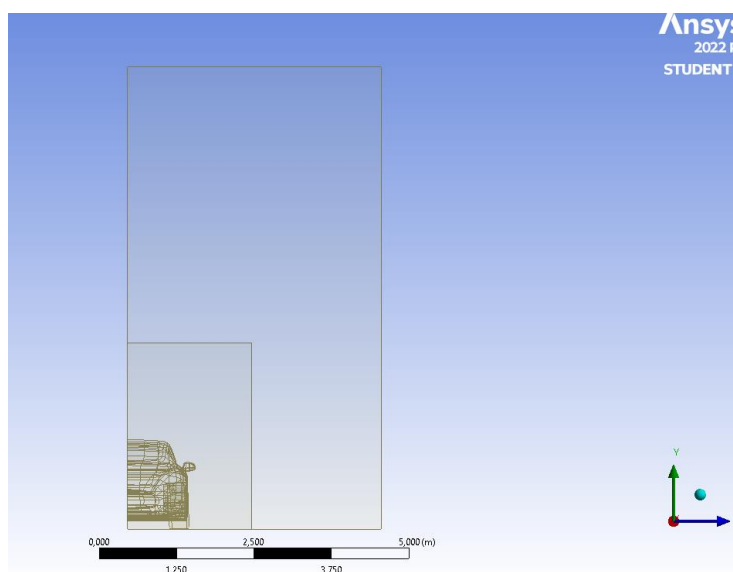


Figura 5.3-2 Domini Tesla S model pla ZY

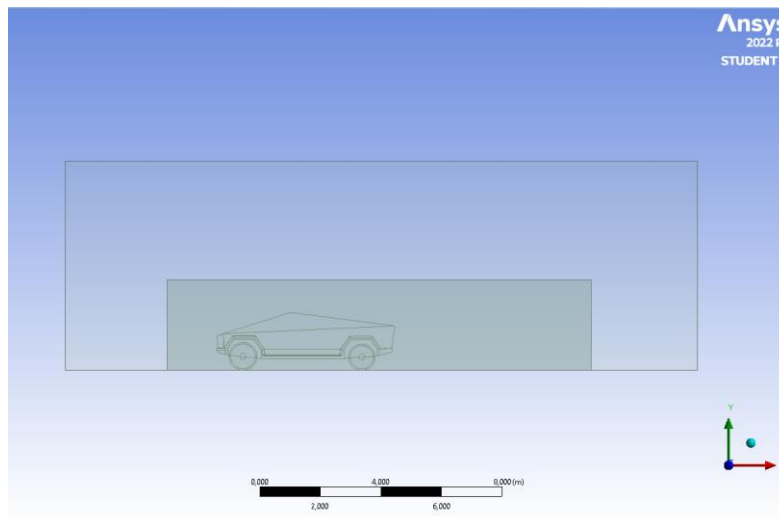


Figura 5.3-3 Domini Tesla Cybertruck pla XY

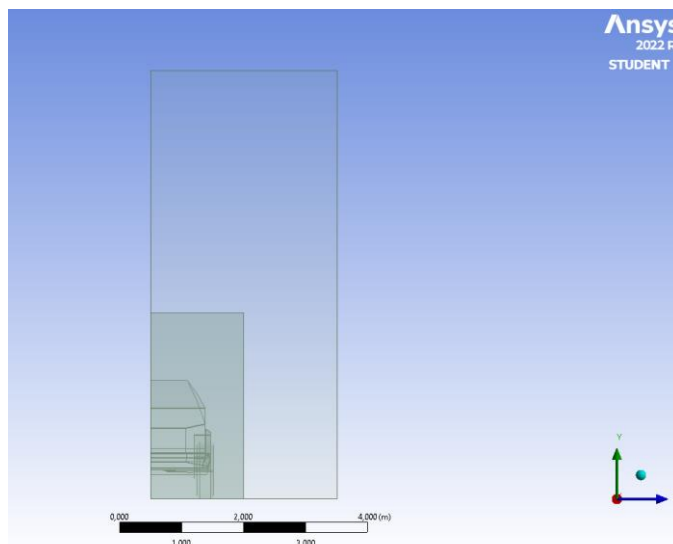


Figura 5.3-4 Domini Tesla Cybertruck pla ZY

5.4. Mallat

El mallat és el procés més important de tota la simulació. Seleccionar la mida dels elements correctament i en relació a les dimensions de les superfícies o volums. La malla ha de ser suficient fina per tal de captar el comportament del fluid entorn del vehicle, però sense excedir-se en el numero d'elements per tal de no sobrecarregar la simulació. El plantejament per

aquest problema és trobar un equilibri entre la qualitat de la malla i el cost computacional de la simulació.

Aquest projecte té una limitació afegida ja que s'utilitza la versió d'ANSYS per estudiants que només permet mellar fins a 512.000 elements. Tenint en compte que els dominis computacionals a simular són grans i que la reducció de la mida de l'element en el cos d'influència és la que fa augmentar més el nombre de cel·les no es pot realitzar una malla fina i precisa.

En ambdós dominis s'han mellar els mateixos cossos. Primer s'ha utilitzat l'eina Sizing per mellar el volum del domini computacional gran (B), la superfície del vehicle (S) i el cos d'influència (BI). Amb aquesta eina pots mellar controladament una part concreta del domini escollint la mida de l'element segons els criteris desitjats. Pel mellar de la superfície i del volum computacional gran es classifica el mellar com un element propi, en canvi pel volum més petit al voltant del vehicle s'ha de definir com a cos d'influència. Per últim s'ha utilitzat l'eina Inflation per mellar la capa límit, s'ha utilitzat la opció del gruix de la primera capa. Aquesta opció permet definir la malla de la capa límit amb els valors del gruix de la primera capa, el nombre de capes i el rati de creixement.

La capa límit és molt important mellar-la adequadament ja que és on es troben les cel·les més properes a la superfície del vehicle. Cal mellar la regió que correspon amb el gruix de la capa límit. Les cel·les més estructurades que permet generar l'eina Inflation ajuden a garantir la resolució adequada per captar els efectes viscosos del flux, mellant seguint la direcció del flux, obtenint resultats més precisos.

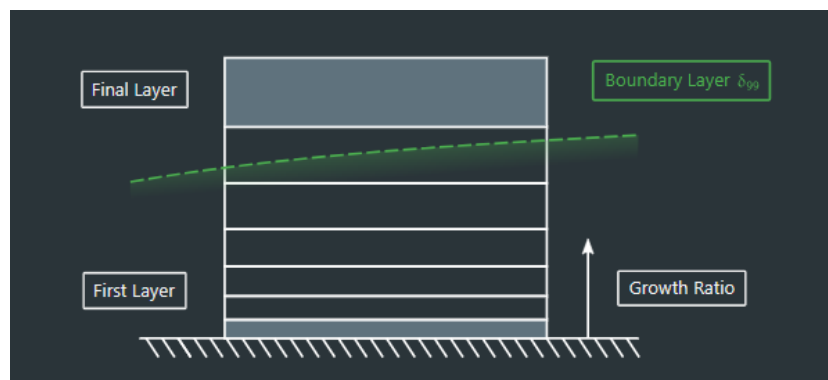


Figura 5.4-1 Malla capa límit[15]

Per calcular el gruix de la primera cel·la s'ha utilitzat la calculadora de Fluid Mechanics 101 [15] on definint els paràmetres de velocitat, longitud del vehicle, viscositat i densitat del fluid, y^+ i el nombre de capes; estima el gruix de la capa límit, el gruix de la primera cel·la i de la última i el rati de creixement.

S'ha definit el paràmetre y^+ a 50 per poder obtenir una malla fina sense augmentar massa el nombre de cel·les per la limitació del nombre de cel·les. Amb la y^+ en 50 fa necessari un model de paret que és el que necessitem per la simulació.

Un cop s'ha completat el mallat del domini s'han d'anomenar les superfícies que definiran les condicions de contorn. Sent aquestes el Inlet, Outlet, Symmetry, Walls i Car. Les superfícies que corresponen a cada selecció anomenada s'explicaran en l'apartat 5.5 més exhaustivament.

Després de la definició de les entitats que requereixen ser mallades, cal començar el procés de trobar la malla més precisa possible amb la millor qualitat viable amb les limitacions esmentades. A continuació s'explicarà l'anàlisi de sensibilitat de la malla realitzat a cada model de vehicle i la malla seleccionada per cadascun.

5.4.1. Anàlisi de sensibilitat de la malla

L'anàlisi de sensibilitat de la malla es clau alhora de proporcionar resultats precisos i fiables. Aquest mètode consisteix en canviar la mida dels elements en les diferents entitats mallades i anar avaluant quins canvis son necessaris per millorar la precisió i qualitat dels resultats. A continuació es realitza una gràfica amb el valor del Cd en funció del nombre d'elements per tal de veure la convergència d'aquest valor. Quan la variació del cd amb l'anterior és menor al 5% es pot prendre aquest valor com l'òptim per la simulació.

Per optimitzar la malla les variables que es parametritzaran són els valors de la mida d'elements del domini computacional gran, el cos d'influència i la superfície del cotxe. El nombre de capes per simular la capa límit romandrà constant en totes les simulacions de l'anàlisi de sensibilitat.

L'avaluació de la qualitat de la malla mitjançant els paràmetres de qualitat es important per la comprovació de l'evolució de la malla a més del paràmetre adimensional que s'hagi definit, en aquest cas el coeficient de drag i la força de drag. El valors que s'han anotat en cada simulació són les variables, el coeficient de drag, la força de drag, el nombre d'elements mallats, la ortogonalitat mitjana, la asimetria mitjana.

L'anàlisi de la sensibilitat de la malla es realitzarà per ambdues geometries ja que no es pot extrapolar un anàlisi d'una geometria a l'altre. A continuació s'explicarà com s'ha realitzat el anàlisi en cadascuna.

Tesla S model

L'anàlisi de malla s'ha realitzat amb el domini de la Taula 5-4 però també s'ha dut a terme un petit anàlisi amb diferents dominis que es troba al final d'aquest apartat.

Per el procés de l'anàlisi de sensibilitat de la malla tots els mallats tenen el mateix nombre de capes per la capa límit. El gruix de la capa límit pel Tesla S model a una velocitat de 40 m/s és de $7,14e-02$. La capa límit s'ha mallat amb l'opció de First Layer Thickness sent el gruix de la primera capa de $1,05e-03$, el nombre de capes 9 i amb un rati de creixement de 1,48.

S'ha decidit que el rati de creixement seria del 48% perquè mantenir un creixement del 20% suposa un nombre d'elements elevat en la capa límit, augmentant el nombre d'elements de la malla per sobre del valor màxim permès per la versió de estudiants d'ANSYS, 512000.

Per analitzar el mallat s'ha procedit en parametritzar les variables del domini computacional (B), el cos d'influència (BI) i la superfície del vehicle (S). Els paràmetres més importants alhora d'obtenir un mallat fi i precís són la superfície del vehicle i el cos d'influència, per aquest motiu s'ha enfocat l'anàlisi en reduir el màxim possible aquests valors. Tenint en compte la limitació del nombre d'elements el mínim per la superfície és de 0,04 i en el cos d'influència de 0,15. Per valors de la mida de superfície més gran que 0,1; la superfície del vehicle no queda suficientment mallada per convergir. Per valor de 2 i 0,8 per cos gran i el cos d'influència succeeix el mateix.

Durant tot el procés d'anàlisi de sensibilitat de la malla s'ha realitzat un nombre considerable d'iteracions. Les malles que no han convergit en la simulació s'han descartat com a possible solució bona encara que la malla tingués més nombres d'elements.

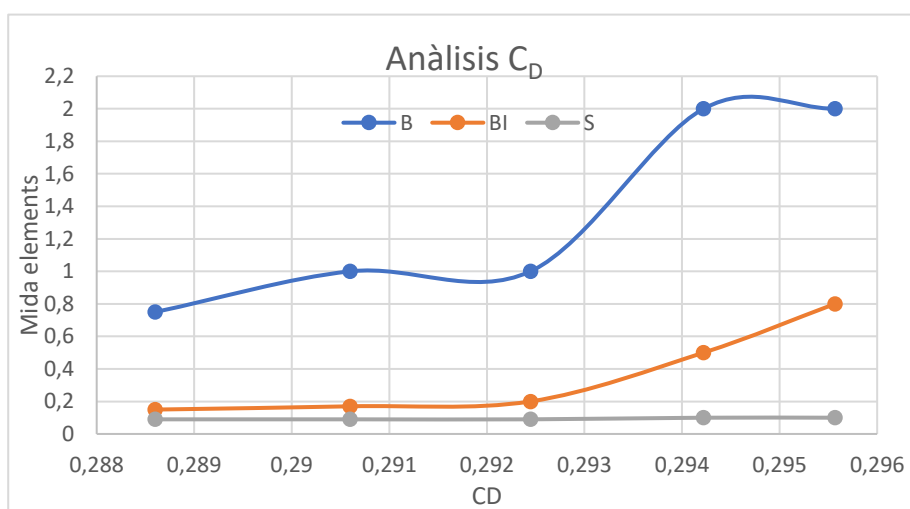
Nº Malla	B	BI	S	CD	Nº elements	Orthogonal Quality	Skewness
1	2	0,8	0,1	0,2956	90906	0,5917	0,3526
2	2	0,5	0,1	0,2942	94983	0,5992	0,3476
3	1	0,2	0,09	0,2924	199207	0,6904	0,2787
4	1	0,17	0,09	0,2906	254564	0,7121	0,2631
5	0,75	0,15	0,09	0,2886	322657	0,7283	0,2519

Taula 5-5 Anàlisi malla Tesla S model

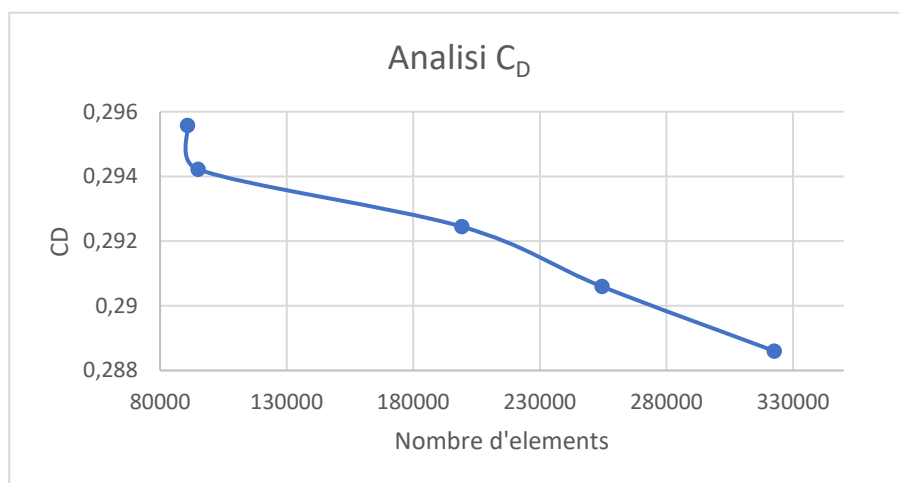
En la Taula 5-5 es pot veure l'anàlisi de sensibilitat pel model Tesla S model. El procediment

consistia en definir primer la mida de la malla a la superfície i un cop el valor era suficientment petit per convergir és disminuïa el valor del cos d'influència. Aquest procediment es repetia entre el cos d'influència i el domini gran. En el procés d'iteració també s'anotaven els valors mitjans dels paràmetres de qualitat per tal de veure l'evolució de la malla. Com es pot veure a mida que la malla és més fina els valors dels paràmetres s'apropen als valors ideals. La qualitat ortogonal acaba tenint un valor bastant bo igual que el skewness.

A la Gràfica 5.4-1 es pot veure l'evolució del C_d segons es canvia la malla. La corba blava correspon al mallat del túnel de vent, la corba taronja és el mallat del cos d'influència i la gris la del mallat de la superfície del vehicle. Es pot veure com a mesura que es va reduint la mida dels elements els resultats convergeixen a la solució final.



Gràfica 5.4-1 Malles en funció del C_d Tesla S mod



Gràfica 5.4-2 C_d en funció del nombre d'elements

En la Gràfica 5.4-2 es pot veure com el coeficient de drag disminueix a mesura que el nombre d'iteracions augmenta fins a arribar a la malla numero 5. En aquesta gràfica no es pot dir que la solució ha convergit ja que la pendent és molt inclinada, però s'ha escollit aquesta solució perquè és la malla més fina que convergia.

A continuació es poden veure imatges il·lustratives de la malla seleccionada per la simulació.

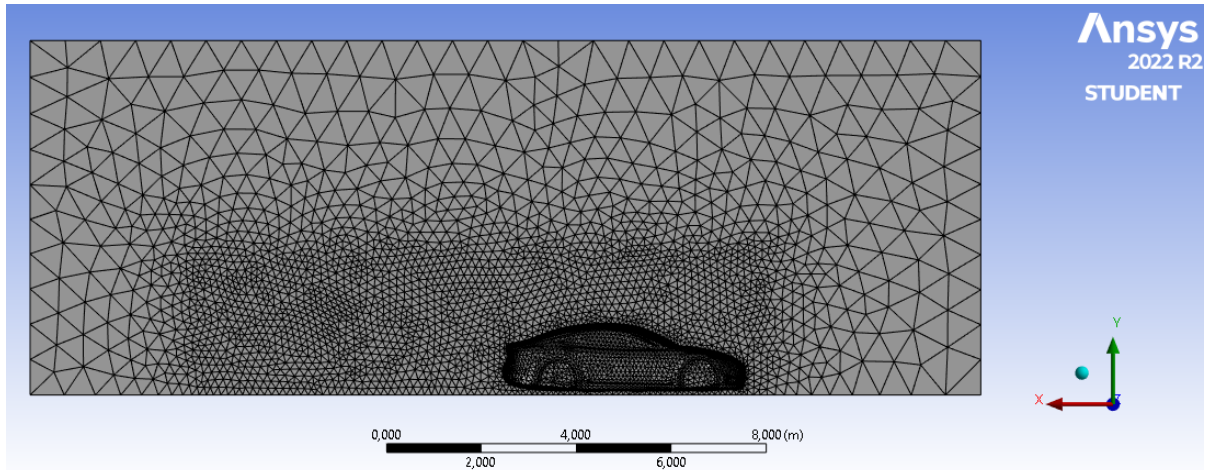


Figura 5.4-2 Vista lateral malla

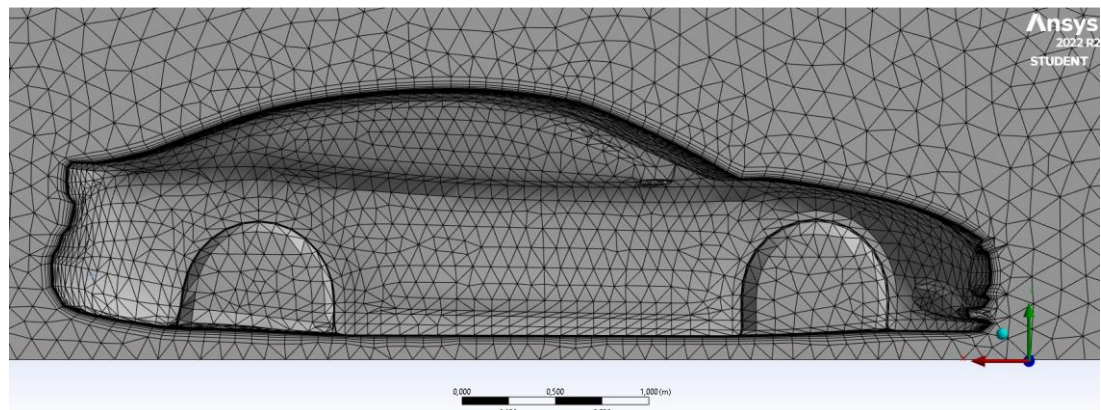


Figura 5.4-3 Vista lateral vehicle

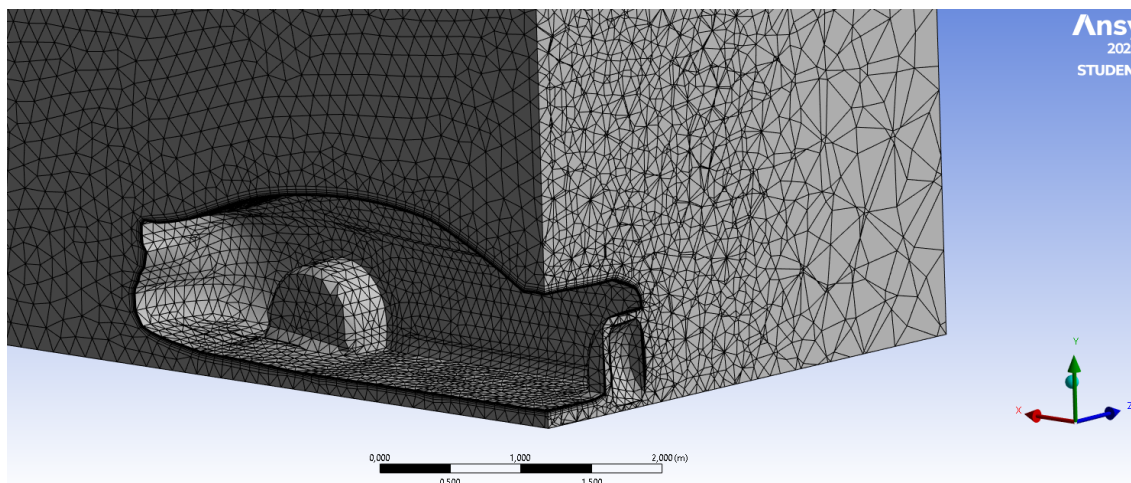


Figura 5.4-4 Vista lateral i frontal vehicle

En el model Tesla S model s'ha realitzat un anàlisi de malla més exhaustiu ja que es van fer simulacions per el mallat del primer domini (A), del primer domini incloent el cos d'influència (B) i després pel mallat del domini ampliat. En el domini A i el domini B el nombre de capes de la capa límit és de 14 i el rati de creixement de 1,2, pel anàlisi de sensibilitat del domini ampliat el nombre de capes es va reduir a 9 amb un rati de creixement de 1,47.

	Nº Malla	Mida element B	Mida element BI	Mida element S	C _D
Domini àrea pas 7,43%	A	0,4	no	0,07	0,3205
Domini àrea pas 7,43% amb BI	B	0,6	0,1	0,09	0,3016
Domini àrea pas 4,99%	Final	0,75	0,15	0,09	0,2886

Taula 5-6 Anàlisi Cd en diferents dominis

Com es pot comprovar a la Taula 5-6 l'ampliació del domini, i en conseqüència el percentatge de reducció de l'àrea de pas del vehicle, juntament amb la disminució del nombre de capes milloren el resultat del C_D.

Tesla Cybertruck

Per el procés de l'anàlisi de sensibilitat de la malla tots els mallats tenen el mateix nombre de capes per la capa límit. El gruix de la capa límit pel Tesla Cybertruck a una velocitat de 40 m/s és de $8,11e-02$. La capa límit s'ha mallat amb l'opció de First Layer Thickness sent el gruix de la primera capa de $1,06e-03$, el nombre de capes 15 i amb un rati de creixement de 1,21.

Per analitzar el mallat s'ha procedit en parametritzar les variables del domini computacional(B), el cos d'influència (BI) i la superfície del vehicle (S) i s'ha utilitzat el Capture Proximity (PS) per solucionar l'error que es produïa sense aquest. Del Capture Proximity el valor que es parametritzarà serà la seva mida. Seguint el mateix procediment que en el Tesla S model els paràmetres més importants alhora d'obtenir un mallat fi i precís són la superfície del vehicle i el cos d'influència, per aquest motiu s'ha enfocat l'anàlisi en reduir el màxim possible aquests valors. Tenint en compte la limitació del nombre d'elements el mínim per la superfície és de 0,07 i en el cos d'influència de 0,15 i per el proximity size de 0,04.

Durant tot el procés d'anàlisi de sensibilitat de la malla s'ha realitzat un nombre considerable d' iteracions. Les malles que no han convergit en la simulació s'han descartat com a possible solució bona encara que la malla tingués més nombres d'elements.

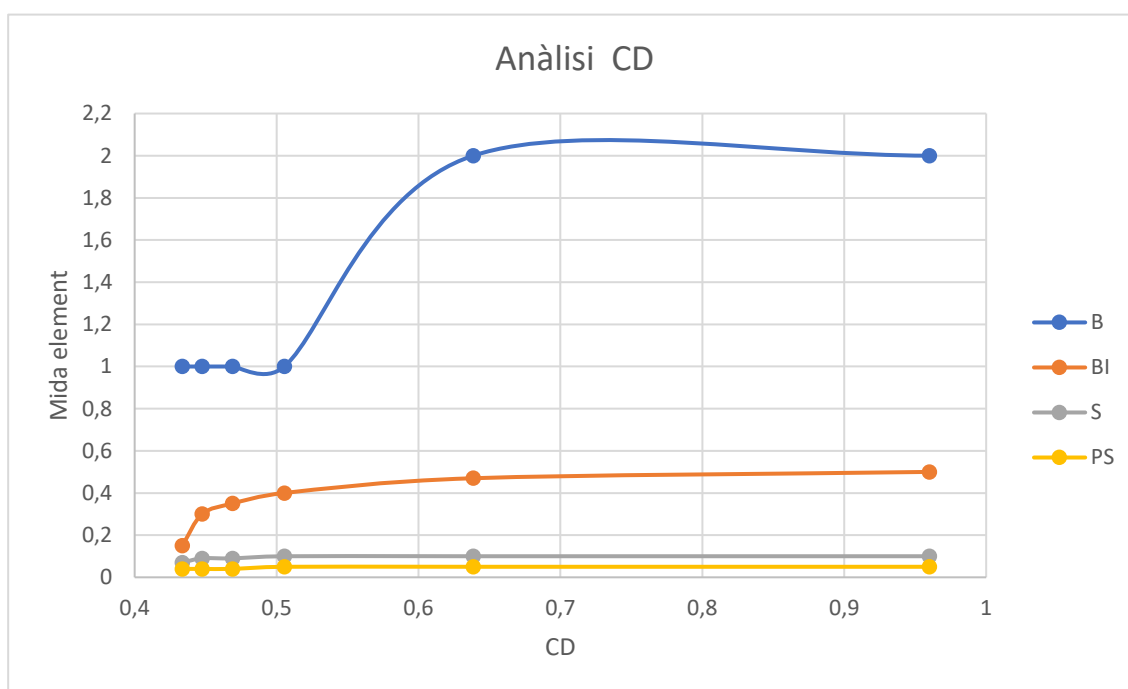
Nº Malla	B	BI	S	PS	C _D	Nº elements	Orthogonal Quality	Skewness
1	2	0,5	0,1	0,05	0,9599	208940	0,5881	0,3413
2	2	0,47	0,1	0,05	0,6385	209389	0,5891	0,3405
3	1	0,4	0,1	0,05	0,5055	214160	0,5939	0,3373
4	1	0,35	0,09	0,04	0,4690	302170	0,6284	0,3107
5	1	0,3	0,09	0,04	0,4476	493492	0,6654	0,3043
6	1	0,15	0,07	0,04	0,4335	498092	0,6927	0,2721

Taula 5-7 Anàlisis malla Tesla Cybertruck

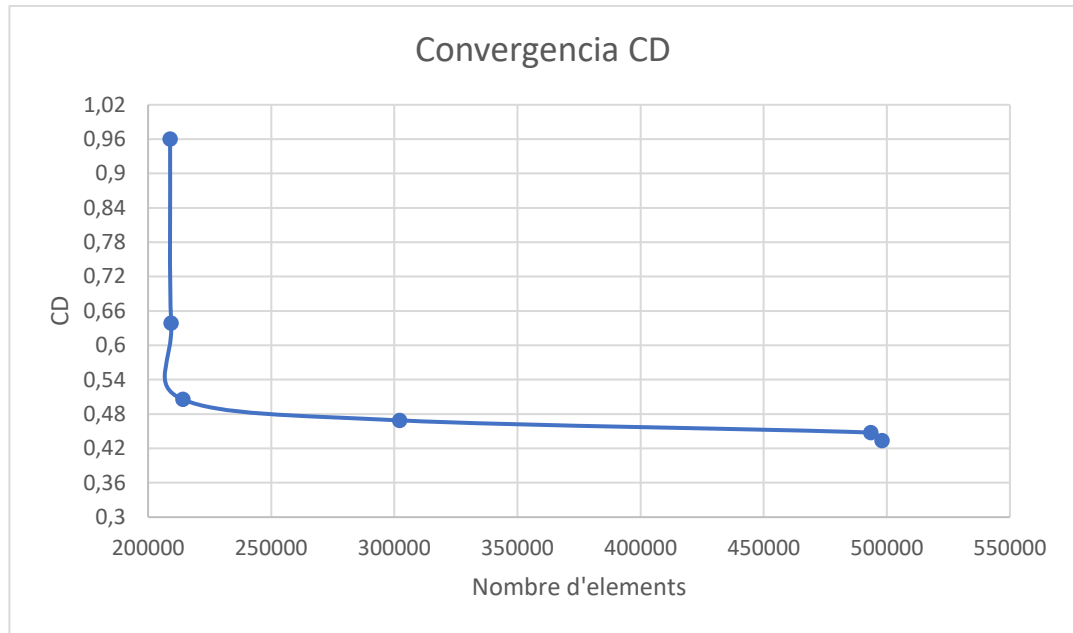
En la Taula 5-7 es pot veure l'anàlisi de sensibilitat pel model Tesla Cybertruck. El procediment consistia en definir primer la mida de la malla a la superfície i un cop el valor era suficientment petit per convergir és disminuïa el valor del cos d'influència i si es podia el valor del Proximity size. Aquest procediment es repetia entre el cos d'influència i el túnel de vent. En el procés

d'iteració també s'anotaven els valors mitjans dels paràmetres de qualitat per tal de veure l'evolució de la malla. Com es pot veure a mida que la malla és més fina els valors dels paràmetres s'apropen als valors ideals. La qualitat ortogonal es suficientment bo per considerar-lo acceptable i el valor del skewness també és correcte. El paràmetre de rati d'aspecte es bastant elevat però s'ha de considerar que es una mitjana i mentre que la majoria d'elements estiguin entre 0 - 1 seria acceptable.

A la Gràfica 5.4-1 es pot veure l'evolució del C_D segons es canvia la malla. La corba blava correspon al mallat del túnel de vent, la corba taronja és el mallat del cos d'influència, la gris la del mallat de la superfície del vehicle i la groga és el Proximity size. Es pot veure com a mesura que es va reduint la mida dels elements els resultats convergeixen a la solució final.



Gràfica 5.4-3 Malles en funció del C_D Tesla Cybertruck



Grafica 5.4-4 Convergència Tesla Cybertruck

En la Grafica 5.4-4 es pot veure com el coeficient de drag disminueix a mesura que el nombre d'iteracions augmenta fins a arribar a la malla número 6. La convergència de la malla s'assoleix en la malla 6 per això s'escull aquesta.

A continuació es poden veure imatges il·lustratives de la malla seleccionada per la simulació.

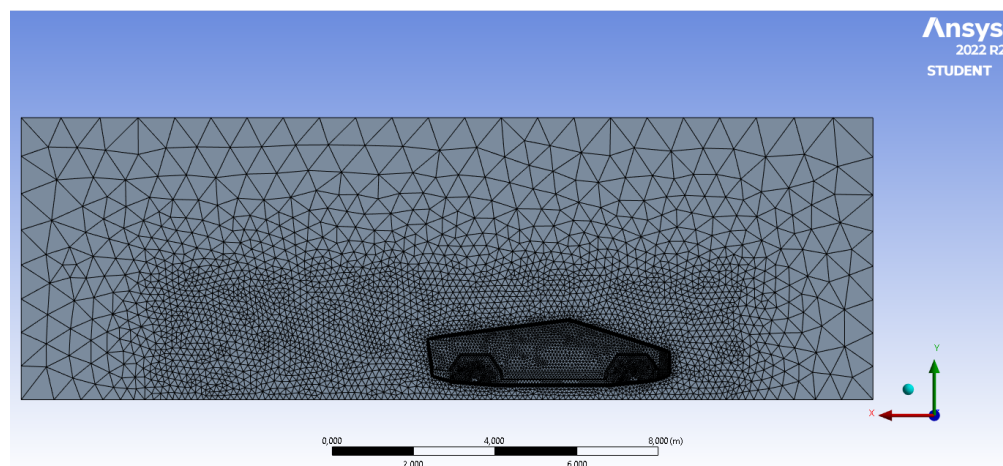


Figura 5.4-5 Vista lateral malla

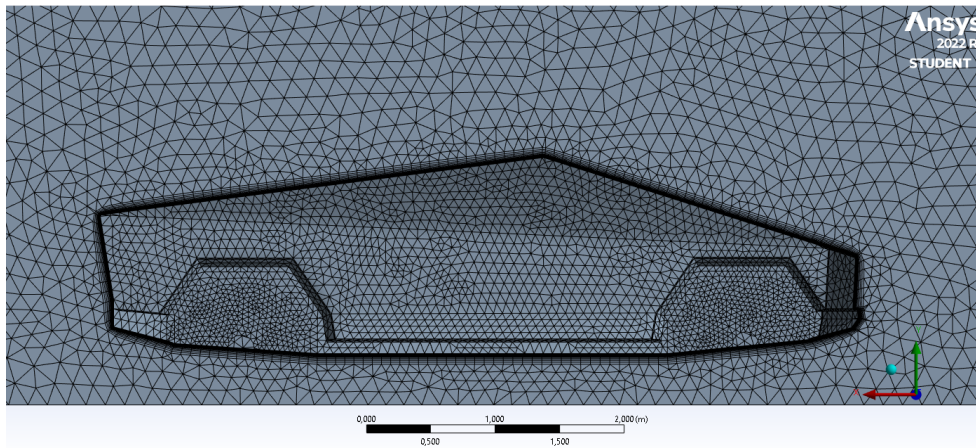


Figura 5.4-6 Vista lateral vehicle

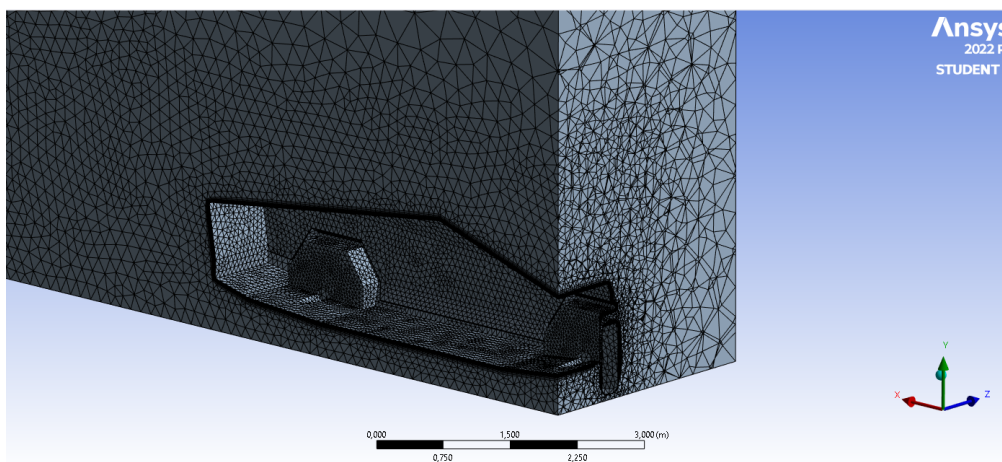


Figura 5.4-7 Vista lateral i vista frontal

5.5. Configuració simulació

La configuració del set up es defineix un cop definida la primera malla i ha de ser la mateixa per tot el anàlisi de sensibilitat de la malla. Es simularà el flux del aire amb la velocitat relativa al vehicle

El pressure-based s'escull perquè aquets model es per fluxos incompressibles de baixa velocitat que és el cas d'estudi. La simulació es realitzarà en estat estacionari ja que el regim es pot considerar quasi-estacionari. Per modelitzar la turbulència s'ha escollit el model k-Epsilon Standard amb el tractament de paret Standard (SWF), ja que aquest model és un model general que serveix per aquest projecte .Després es selecciona el material que en

aquets cas es l'aire amb una densitat de 1.225 per el fluid i alumini com a material per el vehicle.

Per tal d'obtenir el valor del coeficient d'arrossegament cal posar el valor de l'àrea frontal del vehicle i la longitud del vehicle. Caldrà repetir el procediment per obtenir el valor del coeficient de sustentació amb l'àrea corresponent.

Finalment s'ha de configurar el coeficient de drag i la força de drag per tal de monitoritzar la simulació. Ambdós paràmetres es defineixen en direcció positiva de l'eix de les x com la velocitat d'entrada. Després s'inicialitza la simulació amb les dades de la velocitat d'entrada i es determina el nombre d'iteracions que en totes les simulacions serà sempre de 1000.

Un cop tens la malla optima decidida has de tornar a realitzar un altre simulació per tal d'obtenir el valor del coeficient de sustentació i la força corresponent. El coeficient de lift s'ha definit en la direcció positiva de l'eix de les y.

5.5.1. Condicions de contorn

Establir les condicions de contorn conforme al tipus de problema que es vol simular és essencial per que els resultats siguin fiables. Aquestes s'apliquen en els límits del domini computacional i subministren informació al programa de les entrades i sortides del fluid i el comportament de cada superfície en contacte amb el fluid.

Com s'ha mencionat a l'apartat 5.4 s'han anomenat les superfícies segons les condicions de contorn corresponents a cadascuna. Les condicions de contorn són les mateixes en els dos models de vehicle.

- Velocitat d'entrada: es defineix la velocitat d'entrada a 40 m/s amb el vector de direcció (1,0,0).
- Pressió de sortida: es defineix la condició de pressió atmosfèrica a la paret posterior. També indica al programa quina és la sortida del flux de l'aire.
- Pla de simetria: A la paret que correspon al tall de simetria se li imposa aquesta condició.
- Paret mòbil (Slip wall): Les parets mòbils són el terra, la paret lateral del domini i la paret de dalt. Aquestes s'ha definit amb una condició de paret mòbil per tal de simular el vehicle en moviment. La velocitat de les parets es defineix de 40 m/s com a la velocitat d'entrada.
- Paret fixa (Wall_Law): la condició de paret fixa s'ha definit en la superfície del vehicle per tal de simular el flux d'aire al voltant del vehicle ja que les parets i el fluid són les que tenen velocitat.

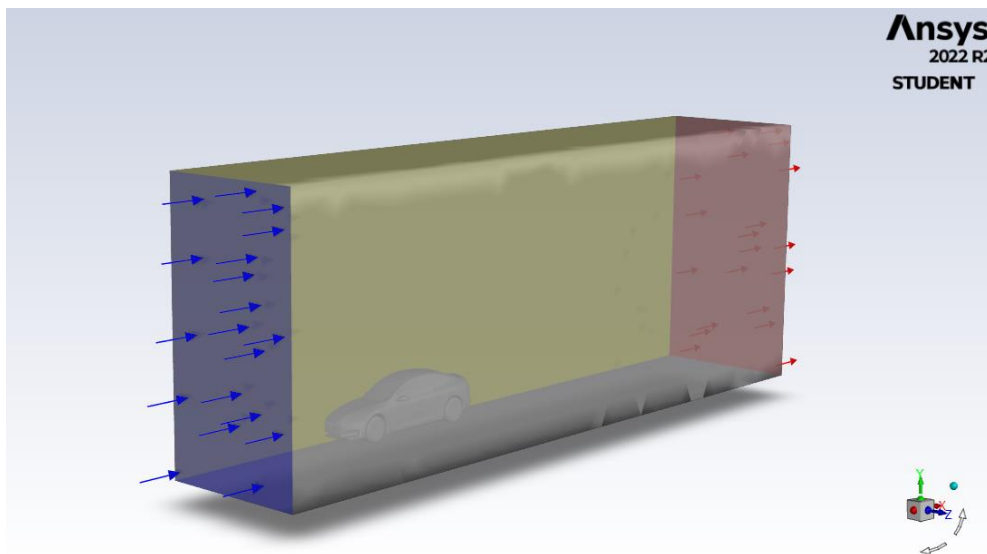


Figura 5.5-1 Condicions de contorn

En la Figura 5.5-1 es poden veure les condicions de contorn imposades a cada paret. La paret blava és el inlet amb l'entrada de velocitat, la paret vermella correspon a la sortida de pressió atmosfèrica i la paret groga és la paret de simetria. Les parets grises corresponen a les condicions de contorn de paret sent el cotxe i les tres parets restants. Aquestes condicions de contorn són les mateixes en els dos models de vehicle.

6. Resultats

En aquest apartat es mostraran els resultats de les simulacions del vehicles Tesla S model i Tesla Cybertruck per separat. S'analitzaran els valors numèrics trobats i les gràfiques. Posteriorment es realitzarà una comparació dels dos models.

6.1. Tesla S model

En aquets apartat s'analitzaran els resultats de la simulació i es compararan amb els valors de referència pel Tesla S model.

En la taula Taula 6-1 es poden veure els resultats obtinguts corresponents a la resistència d'avanç i la sustentació. Per la resistència d'avanç obtenim el coeficient de drag (C_D), la area de la projecció del vehicle en la direcció del flux (A_D) i la força de resistència a l'avanç (F_d). Per la sustentació obtenim el coeficient de lift (C_l), l'àrea de la projecció del vehicle en la direcció vertical (A_l) i la força de sustentació (F_l).

	C_D	A_D	F_d	C_l	A_l	F_L
<i>Tesla S model</i>	0,2886	1,521	430,22	-0,03907	5,362	-205,32

Taula 6-1 Resultats Tesla S model

En la configuració de la monitorització de les variables del coeficient de drag i del coeficient de lift s'ha configurat en el sentit positiu dels eixos de coordenades. El coeficient de drag s'ha orientat en la direcció del flux que és l'eix positiu de les x; el resultat també es positiu ja que el coeficient de drag indica la resistència a l'avanç del vehicle. El coeficient de lift s'ha orientat també en la direcció positiva de l'eix de les y. En aquest cas el coeficient de lift ha donat un valor negatiu això indica que va en el sentit contrari i que esta efectuant una carga aerodinàmica en el vehicle (downforce).

A continuació es troben les gràfiques de contorns de pressió i de velocitat, també es visualitzarà el camp de velocitats al voltant del vehicle i les línies de corrent. S'analitzarà el flux al voltant del vehicle i es donaran els valors màxims i mínims.

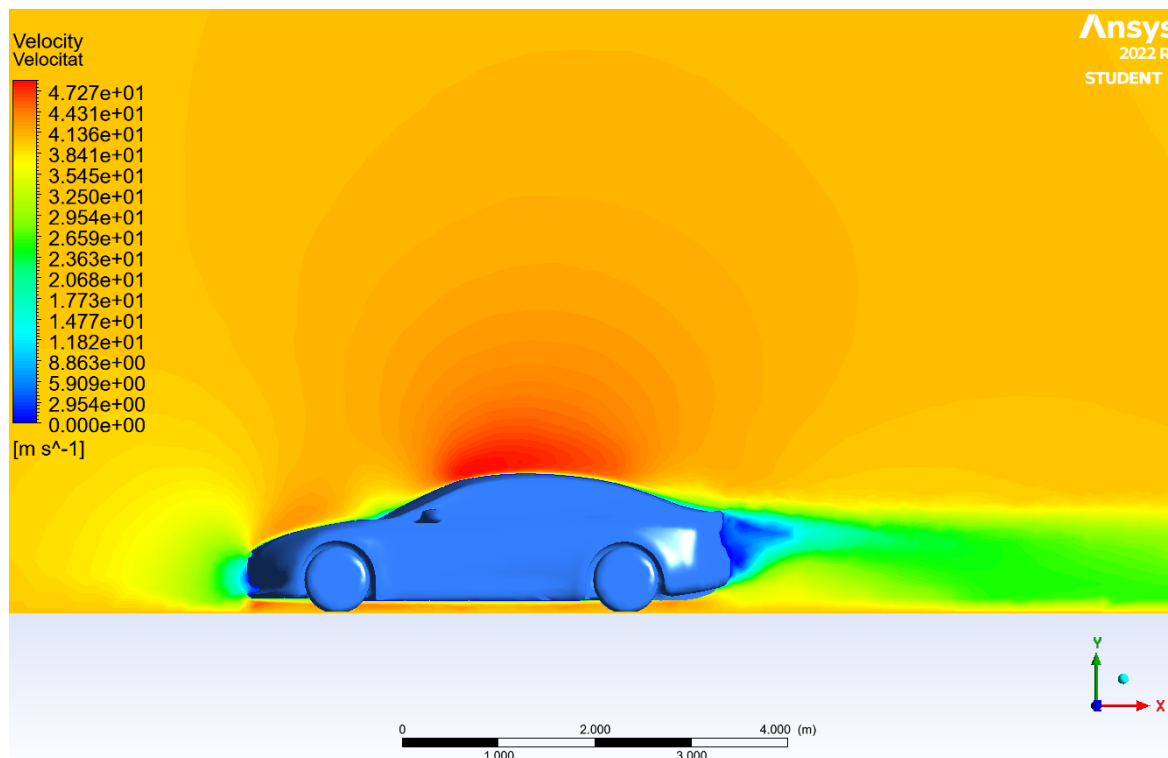


Figura 6.1-1 Contorn de velocitat

En la Figura 6.1-1 es pot veure la distribució de velocitats en la meitat del vehicle. La velocitat del flux lliure a l'entrada es de 40 m/s fins que impacte amb la superfície frontal del vehicle. En aquest procés la velocitat disminueix fins arribar a zero en el punt d'estancament en la part central del para-xocs. El fluid es divideix en dos una part segueix el perfil del vehicle per dalt i l'altre per baix. El flux que segueix el perfil del capó s'accelera pel gradient favorable de pressions fins arribar al punt de velocitat màxima situat en el sostre del vehicle. Degut a la diferencia de pressions a darrera es produeix el gradient de pressions desfavorable disminuint la velocitat i produint-se la separació de la capa límit. Es pot visualitzar darrere del vehicle el deixant format i l'estela que deixa. El flux que passa per sota del xassís del vehicle també s'accelera per el principi de Bernoulli; l'àrea entre el asfalt i el xassís és molt més reduïda que a l'entrada per tant la velocitat augmenta creant una zona de baixes pressions. Si la velocitat per sota del vehicle és més elevada que la velocitat per sobre, la pressió a al sostre és més elevada que abaix exercint la força de downforce, millorant la seva adhesió al terra.

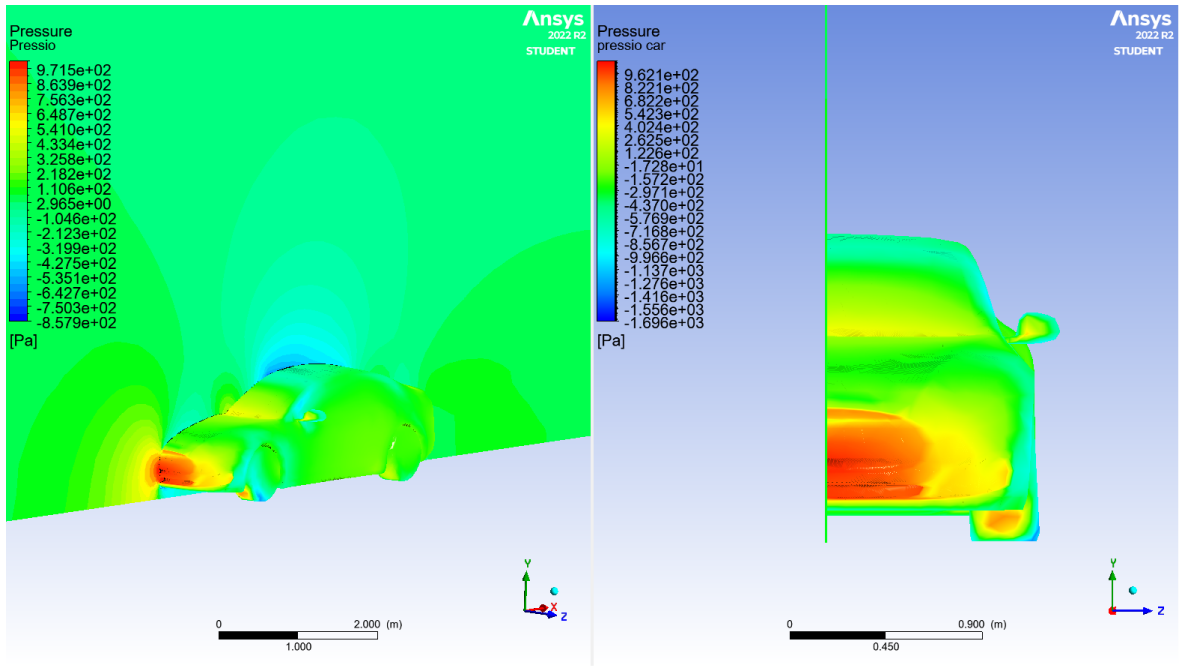


Figura 6.1-2 Contorn de pressió

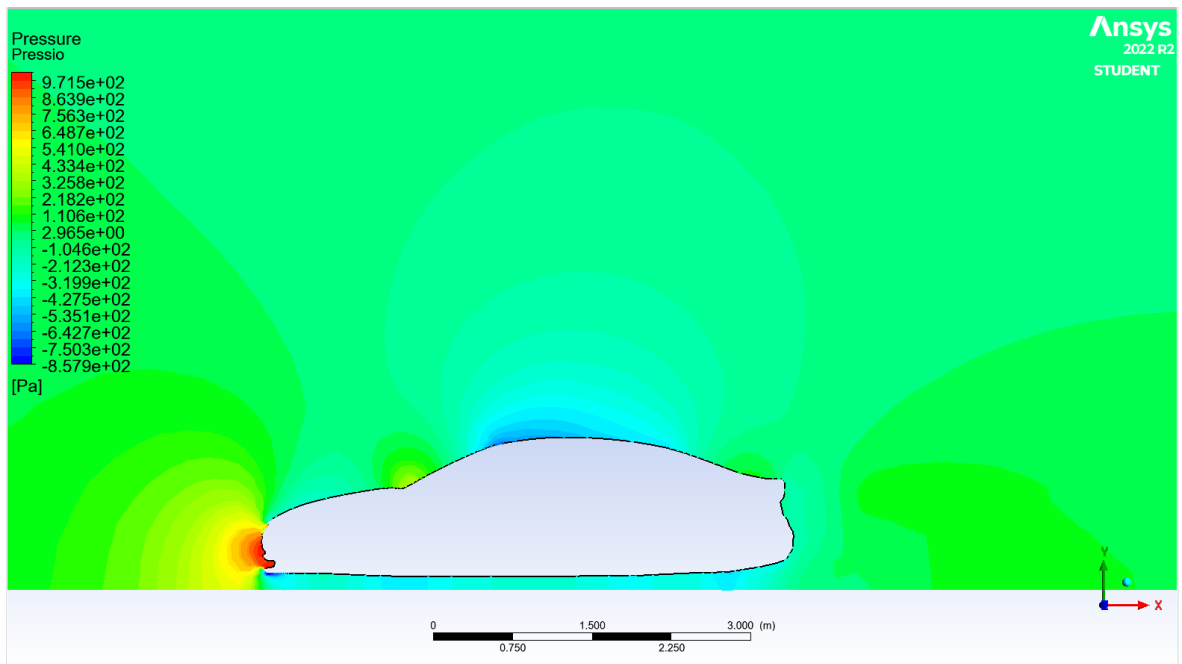


Figura 6.1-3 Contorn de pressió

En la Figura 6.1-2 i Figura 6.1-3 es poden veure les distribucions de pressions en l'eix de simetria del vehicle i en el propi vehicle. Com s'esperava la zona de pressions més elevades

és la part frontal del vehicle això es degut a que es on rep el impacte del flux de l'aire. La pressió màxima és de 971,5 Pa i la pressió mínima de -857,9 Pa. Els gràfics de pressió estan relacionats amb els gràfics de velocitat per el principi de bernoulli. La pressió màxima correspon a la part frontal del vehicle que es on es troba el punt d'estancament on la velocitat és zero.

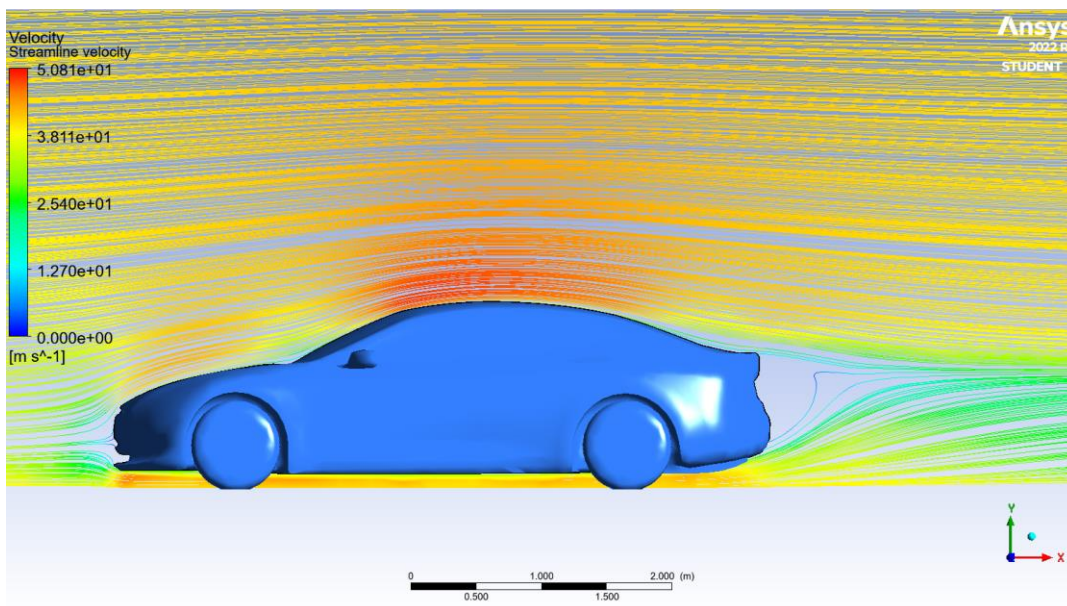


Figura 6.1-4 Línies de corrent

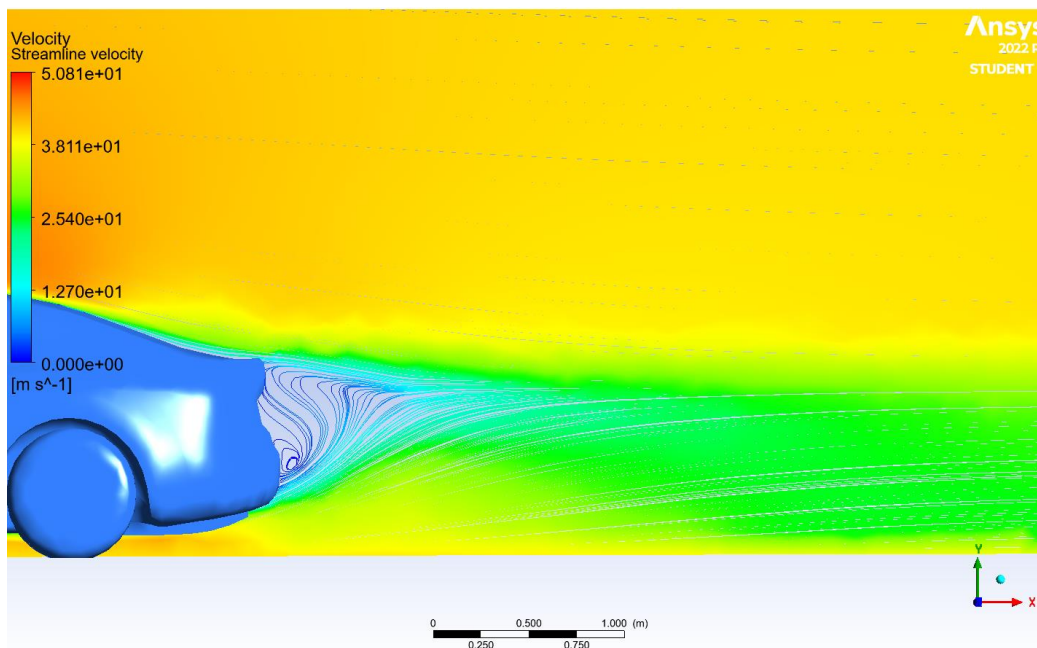
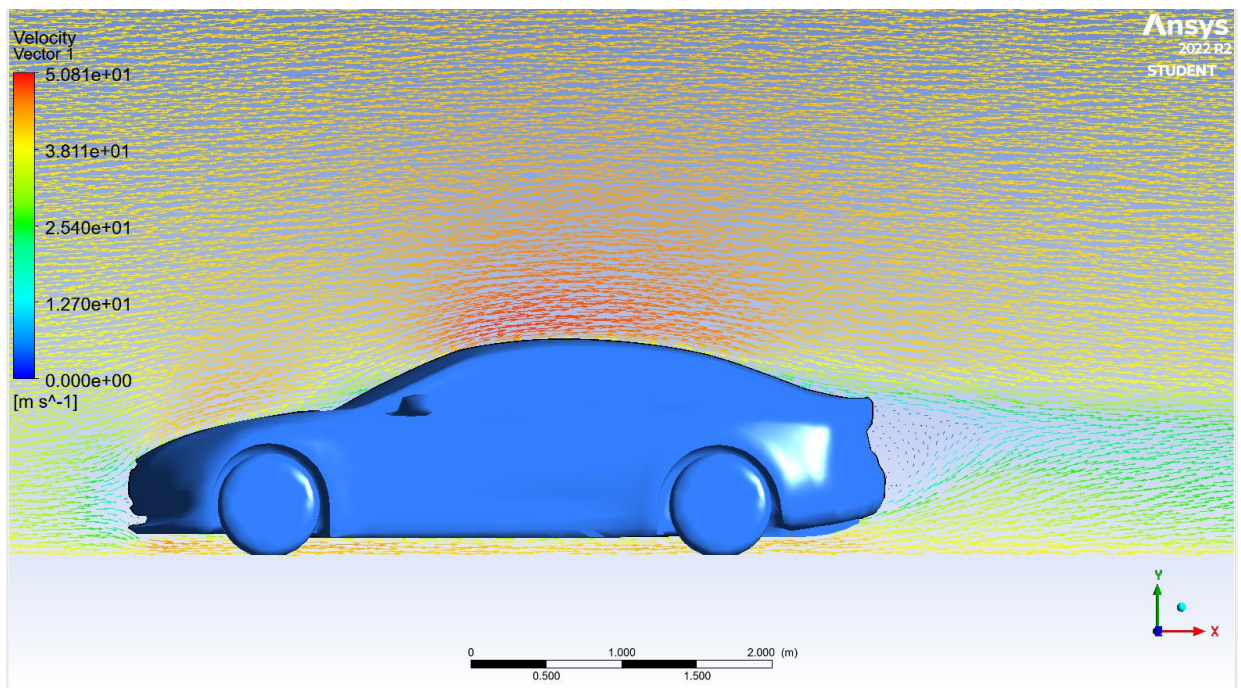


Figura 6.1-5 Línies de corrent al deixant

En els gràfics de les línies de corrent al vehicle Figura 6.1-4 i Figura 6.1-5 es pot veure el camí que segueixen les partícules del fluid al voltant del vehicle considerant l'estat estacionari. Com s'ha vist en el grafic del contorn de la velocitat la velocitat maxima és troba al sostre i la minima al punt d'estancament. En aquest grafic es pot veure més clarament el deixant i la separació del flux del vehicle, es pot veure la zona de velocitats baixes just al darrere del vehicle i el camí que segueix el flux. Es pot observar que les turbulències són menys estructurades i no s'arriben a formar gaires vortex. Es pot apreciar com la geometria del vehicle permet que el flux es torna a juntar a poca distancia del vehicle i amb poques turbulències, permetent tenir una millor aerodinàmica.

*Figura 6.1-6 Camp de velocitats*

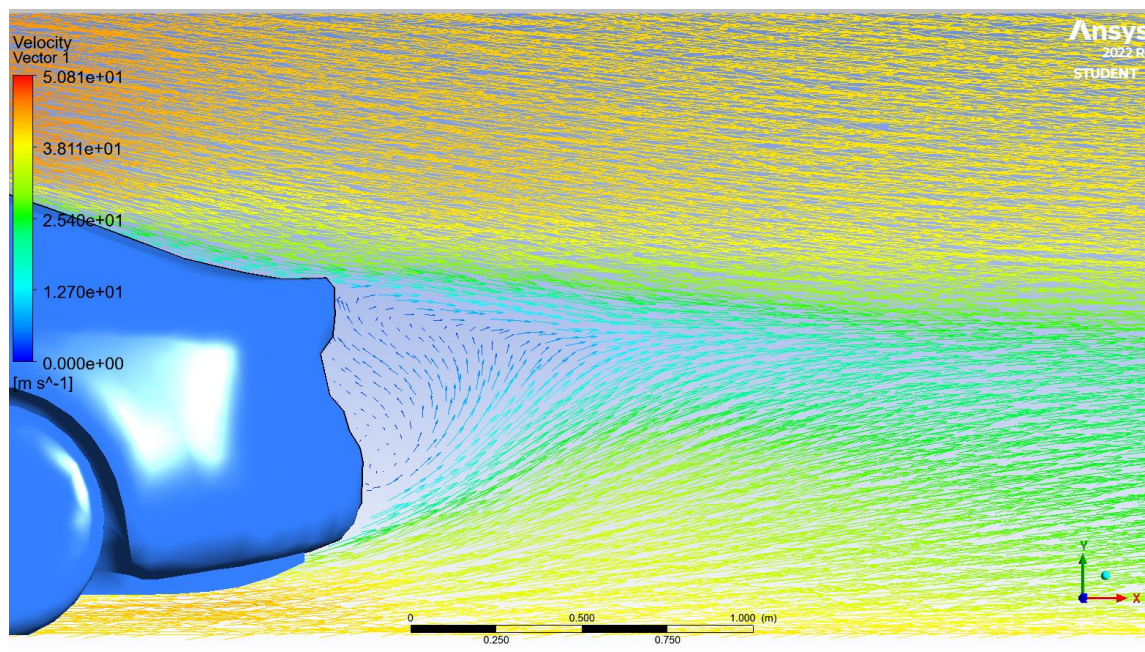


Figura 6.1-7 Camp de velocitats al deixant

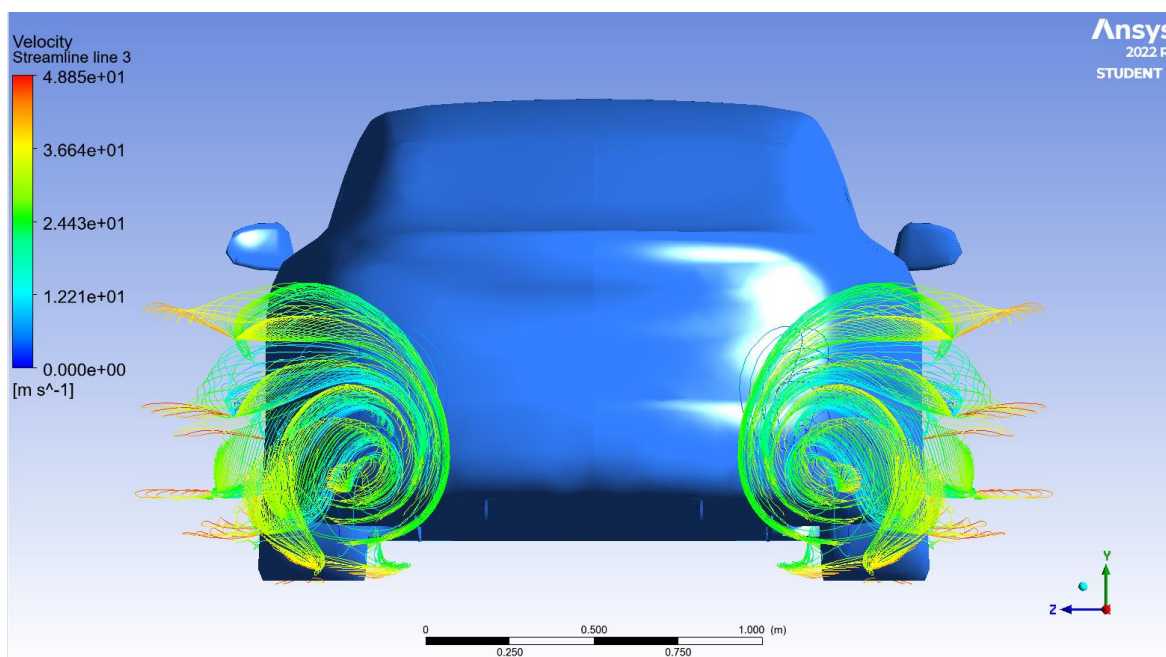


Figura 6.1-8 Vòrtex tridimensional

En la Figura 6.1-8 es pot veure el vòrtex tridimensional que es forma al darrere del vehicle.

Per últim es comparant els resultats obtinguts a la simulació amb els valors oficials i els trobats en altres estudis aerodinàmics. La marca Tesla només ha proporcionat el valor oficial del coeficient de drag per tant el coeficient de lift es compararà amb un estudi aerodinàmic.[16]

C_D simulació	C_D oficial	C_D estudi	C_L simulació	C_L estudi
0,2886	0,208	0,235	-0,03907	0,039

Taula 6-2 Comparació C_D i C_L Tesla S model

Es pot veure que el coeficient de drag dista bastant del coeficient de drag oficial, no obstant del coeficient de drag proporcionat en un estudi és més pròxim al valor simulat. Per altre banda el valor del coeficient de lift amb el de l'estudi es pràcticament el mateix. L'error entre el C_D de la simulació entorn l'oficial és del 38,75% i l'error entre el de la simulació i el d'estudi és un 22,80%.

La diferencia entre el coeficient de drag obtingut en la simulació i el oficial és considerable aquest error pot ser degut a diversos factors. Primerament la geometria que s'utilitza en la simulació no es proporcionada per la companyia Tesla per tant pot ser que la geometria no sigui completament fidel al model real. Es pot comprovar que altres estudis utilitzant diferents models de turbulència o programes de CFD tampoc obtenen els resultats oficials. Una part molt important en l'obtenció de resultats acurats és la malla, tenint en compte la limitació per part de la versió de estudiant d'ANSYS no s'ha pogut modelar la malla més precisa, es pot comprovar amb el valor mitja del paràmetres de qualitat de la malla. Tot i així no significa que s'hagués obtingut un valor de C_D igual però si que seria més pròxim.

Finalment la simulació s'ha realitzat amb el model de turbulència k- ϵ que si bé es un model bastant general que funciona en molts problemes, potser en aquesta simulació un altre model hauria estat més adient. Això es podria comprovar en estudis posteriors.

6.2. Tesla Cybertruck

En aquets apartat s'analitzaran els resultats de la simulació i es compararan amb els valors de referència pel Tesla Cybertruck. En la Taula 6-1 es poden veure els resultats obtinguts corresponents a la resistència d'avanç i la sustentació. Per la resistència d'avanç obtenim el

coeficient de drag (C_D), la area de la projecció del vehicle en la direcció del flux (A_D) i la força de resistència a l'avanç (F_d). Per la sustentació obtenim el coeficient de lift (C_l), l'area de la projecció del vehicle en la direcció vertical(A_l) i la força de sustentació (F_l).

	C_D	A_D	F_d	C_l	A_l	F_L
Tesla Cybertruck	0,4335	1,7587	747,15	0,009922	5,9643	57,99

Taula 6-3 Resultats Tesla Cybertruck

En la configuració de la monitorització de les variables del coeficient de drag i del coeficient de lift s'ha configurat en el sentit positiu dels eixos de coordenades igual que en el model anterior. El coeficient de drag s'ha orientat en la direcció del flux que és l'eix positiu de les x; el resultat també es positiu ja que el coeficient de drag indica la resistència a l'avanç del vehicle. El coeficient de lift s'ha orientat també en la direcció positiva de l'eix de les y. En aquest cas el coeficient de lift ha donat un valor positiu indicant que exerceix una força de sustentació.

A continuació es troben les gràfiques de contorns de pressió i de velocitat també es visualitzarà el camp de velocitats al voltant del vehicle i les línies de corrent. S'analitzarà el flux al voltant del vehicle i es donaran els valors màxims i mínims.

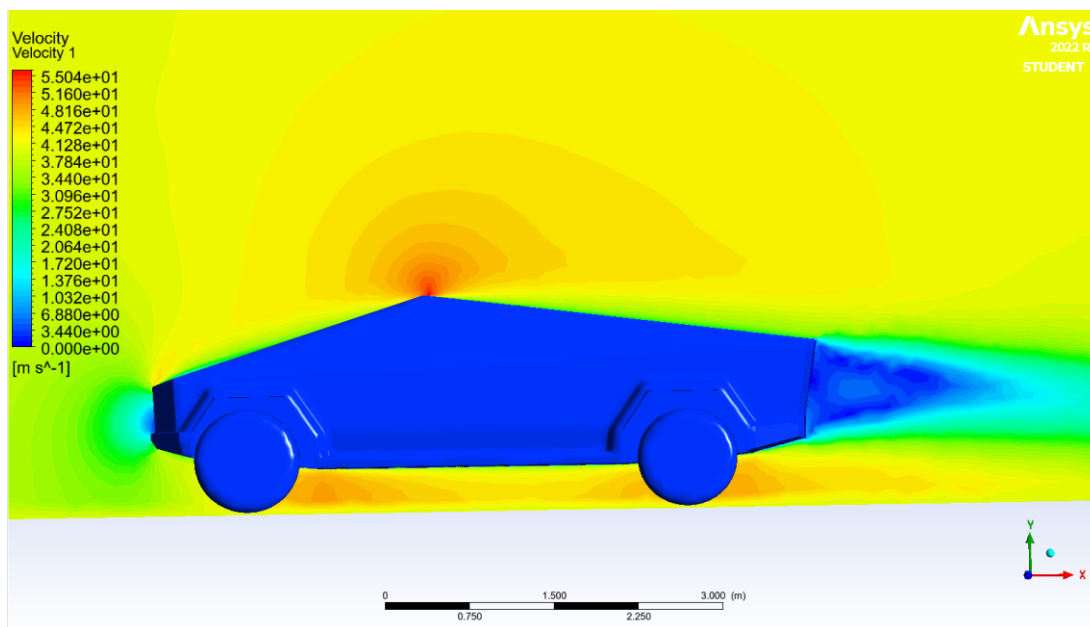


Figura 6.2-1 Contorn de velocitat

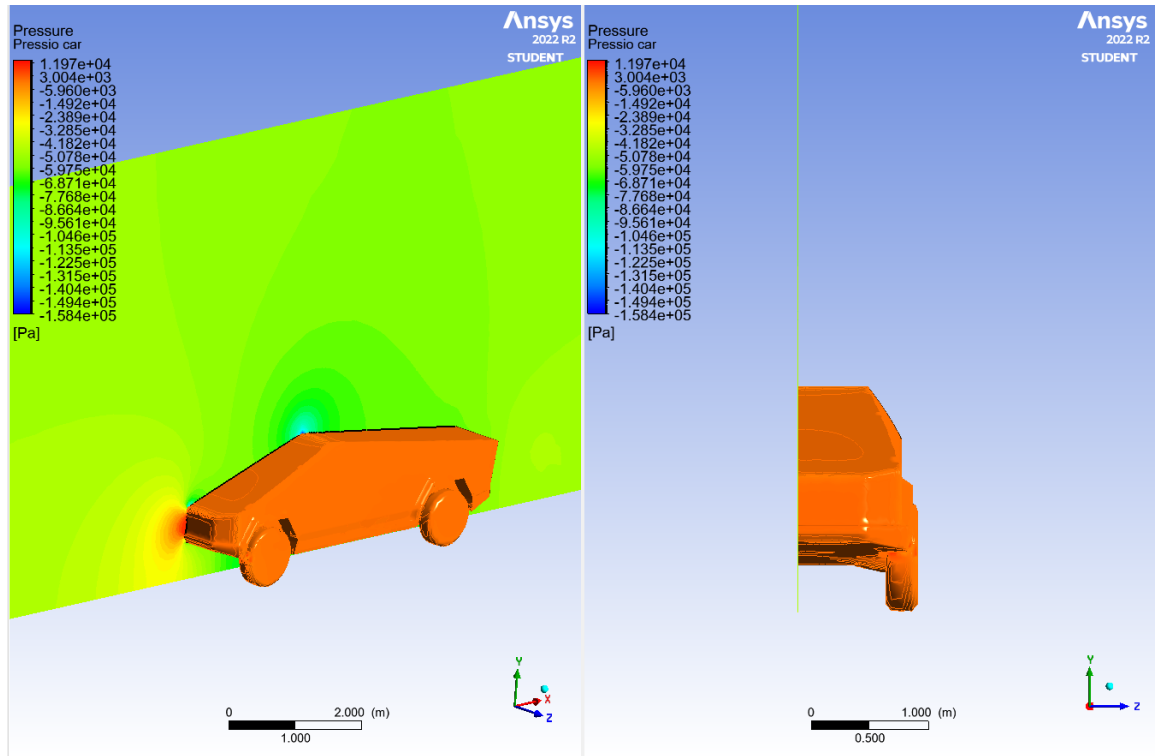


Figura 6.2-2 Contorn de pressió al vehicle

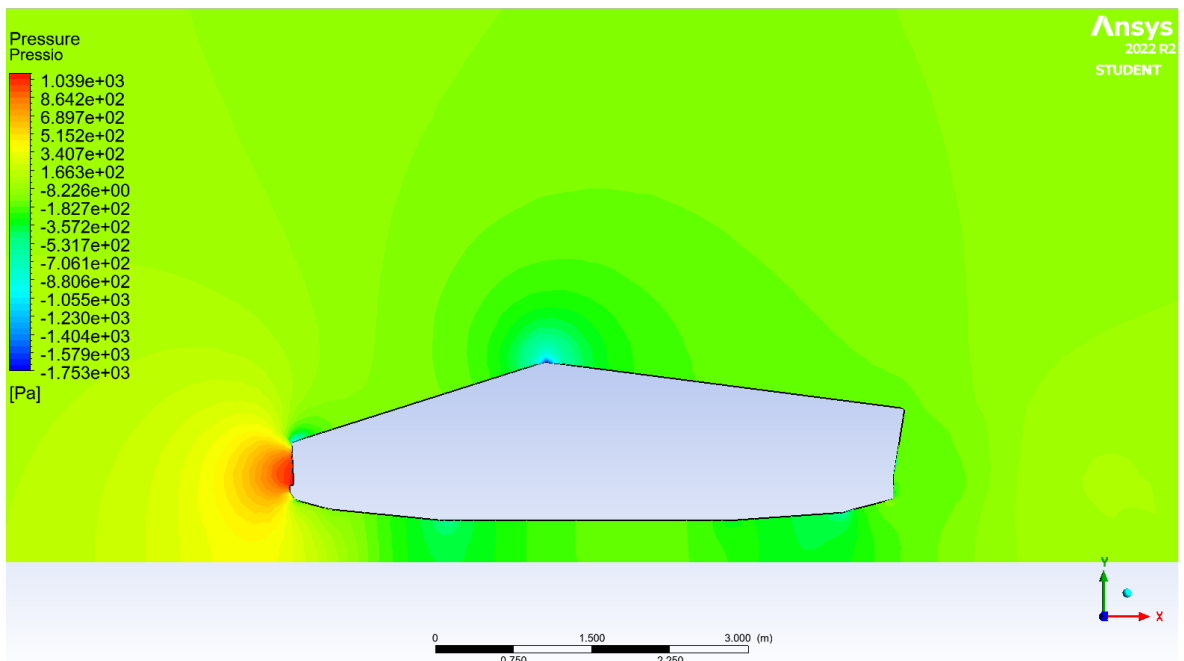


Figura 6.2-3 Contorn de pressió

En la Figura 6.2-2 i Figura 6.2-3 es poden veure les distribucions de pressions en l'eix de simetria del vehicle i en el propi vehicle. Com s'esperava la zona de pressions més elevades

és la part frontal del vehicle això es degut a que es on rep el impacte del flux de l'aire. La pressió màxima és de 1039 Pa i la pressió mínima de -1753 Pa. Els gràfics de pressió estan relacionats amb els gràfics de velocitat per el principi de Bernoulli, la pressió màxima correspon a la part frontal del vehicle que es on es troba el punt d'estancament on la velocitat és zero.

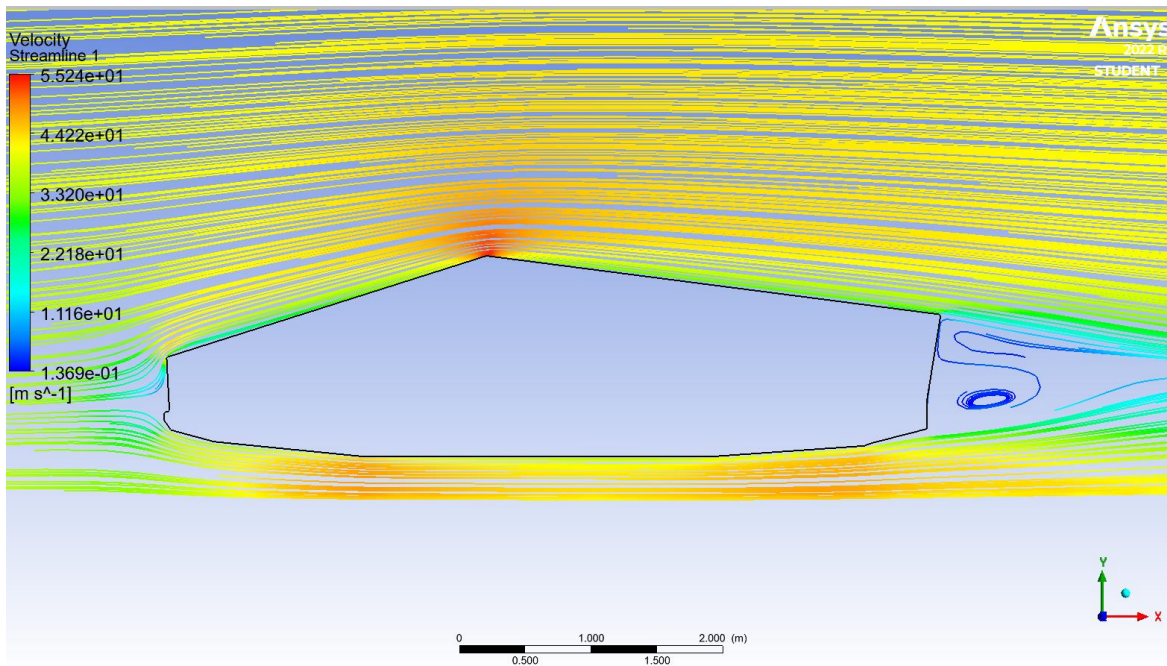


Figura 6.2-4 Línies de corrent

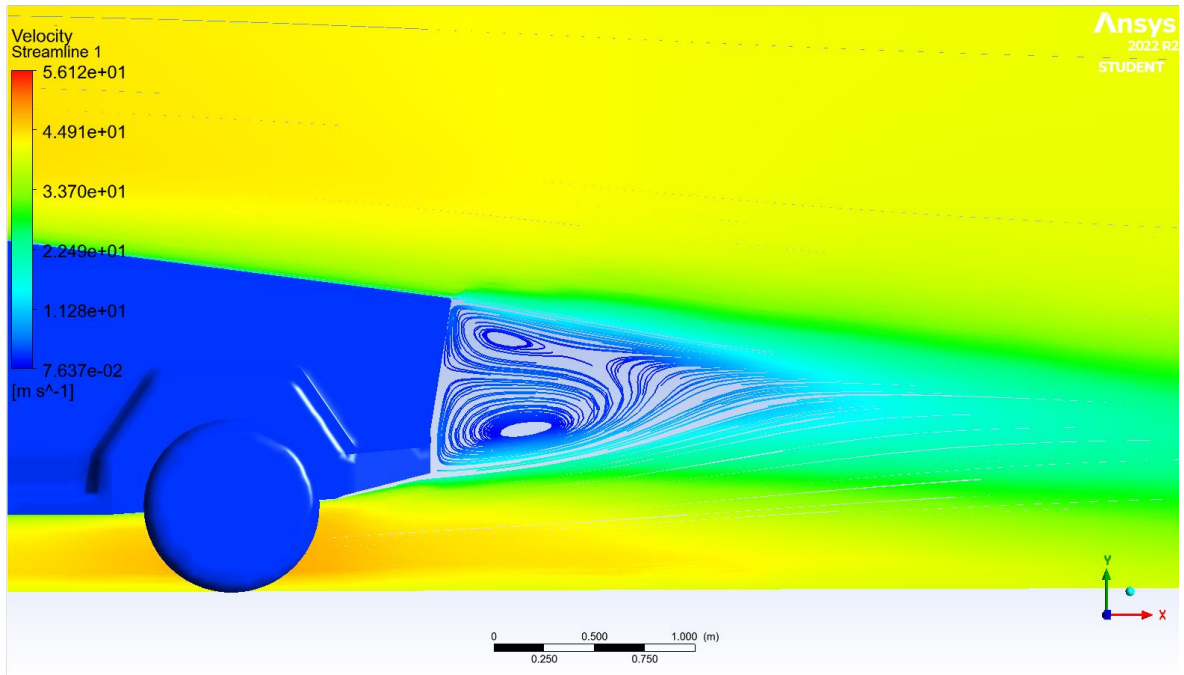


Figura 6.2-5 Línies de corrent al deixant

En els gràfics de les línies de corrent al vehicle Figura 6.2-4 i Figura 6.2-5 es pot veure el camí que segueixen les partícules del fluid al voltant del vehicle Tesla Cybertruck, considerant l'estat estacionari. Com s'ha vist en el gràfic del contorn de la velocitat la velocitat màxima és troba en el punt d'inflexió del sostre i la mínima al punt d'estancament. En aquest gràfic es pot veure més clarament el deixant i la separació del flux del vehicle, es pot veure la zona de baixes velocitats just al darrere del vehicle i el camí que segueix el flux. Es pot observar que les turbulències són grans amb la creació clara de dos vortexs. La geometria del vehicle és bastant aerodinàmica ja que no deixa el deixant esperat, el flux s'adhereix bé a la superfície del vehicle permetent endarrerir el desprendiment de la capa límit. El flux es torna a juntar a més distància del vehicle, afectant en el coeficient de drag.

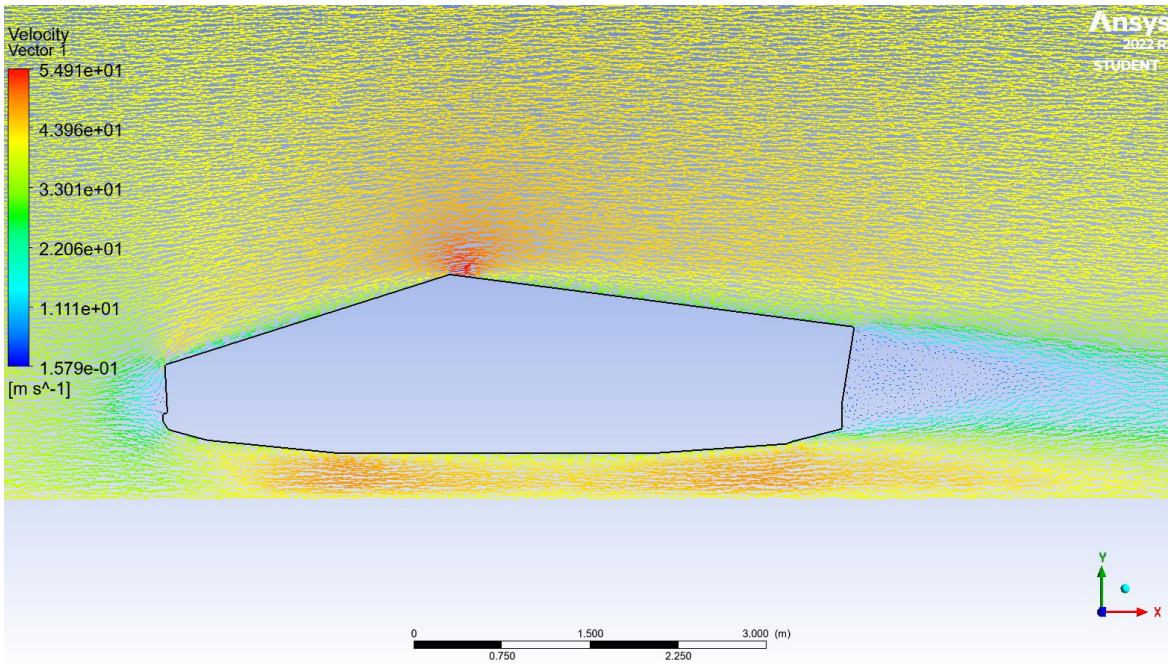


Figura 6.2-6 Camps de velocitats

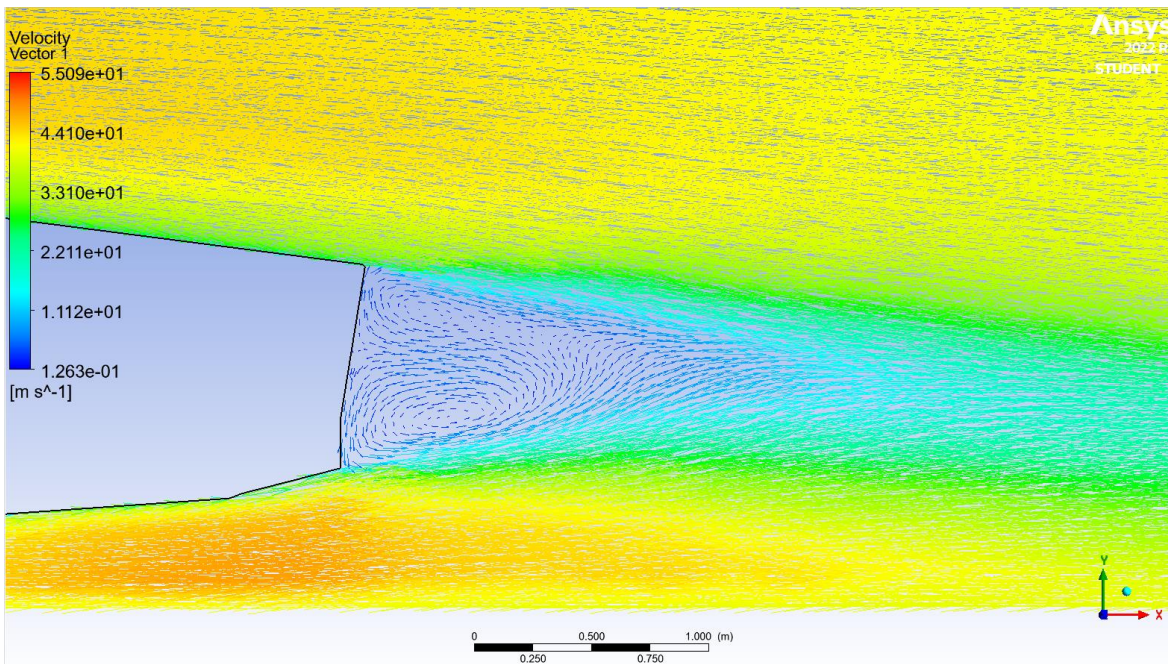


Figura 6.2-7 Camp de velocitats al deixant

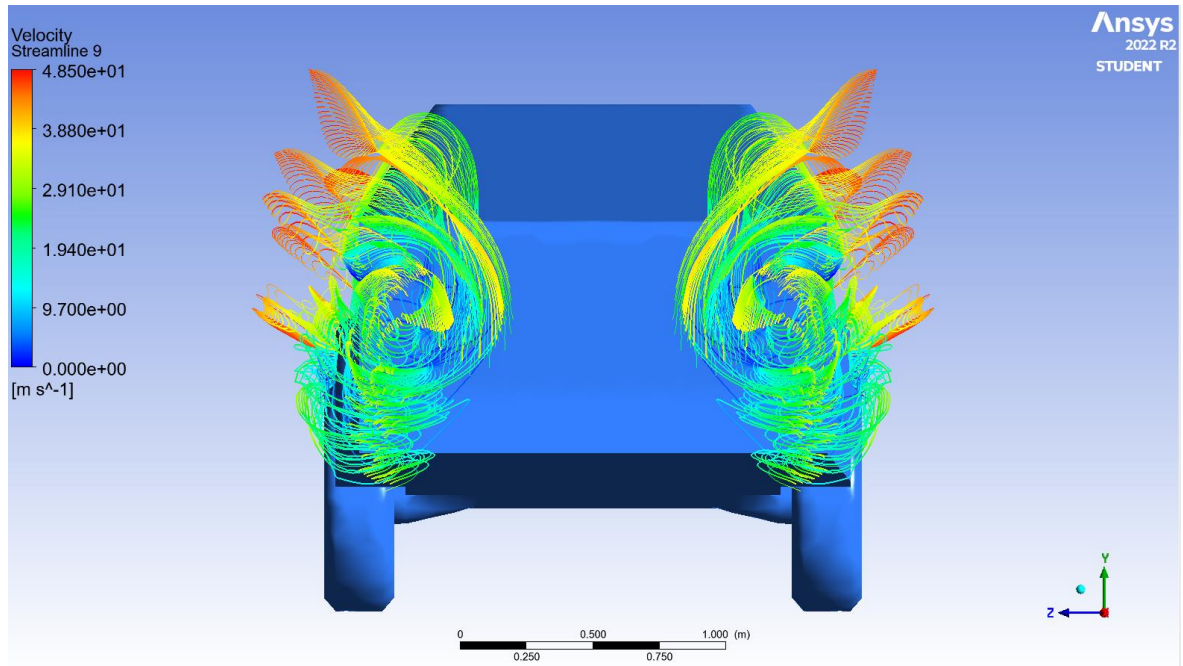


Figura 6.2-8 Vòrtex tridimensional

En la Figura 6.2-8 es poden observar els vòrtex tridimensionals que es formen darrere el vehicle.

Per últim es comparant els resultats obtinguts a la simulació i els trobats en altres estudis aerodinàmics. La marca Tesla no ha proporcionat el valor oficial del coeficient de drag ni del coeficient de lift per tant es compararà amb un estudi aerodinàmic. [17] i [18].

C_D simulació	C_D estudi	C_L simulació	C_L estudi
0,4335	0,39	0,009922	0,11

Taula 6-4 Comparació valors C_D i C_L Tesla Cybertruck

Es pot veure que el coeficient de drag no dista tant del coeficient de drag oficial, no obstant del coeficient de drag proporcionat en un estudi és més pròxim al valor simulat. Per altre banda el valor del coeficient de lift amb el de l'estudi té un ordre de magnitud superior al simulat. L'error entre el C_D de la simulació i el del estudi és del 11,15%. L'error entre el C_L simulat i el trobat en l'estudi és del 9,8%.

La diferencia entre el coeficient de drag obtingut en la simulació i el estudi és considerable aquest error pot ser degut a diversos factors. Primerament la geometria que s'utilitza en la simulació no es proporcionada per la companyia Tesla per tant pot ser que la geometria no sigui completament fidel al model real. Tesla no ha proporcionat un valor oficial del coeficients

de drag i de lift per aquest model, per tant només es pot comparar amb altres estudis no oficials. Una part molt important en l'obtenció de resultats acurats és la malla, tenint en compte la limitació per part de la versió de estudiant d'ANSYS no s'ha pogut modelar la malla més precisa, es pot comprovar amb el valor mitja del paràmetres de qualitat de la malla. Tot i així no significa que s'hagués obtingut un valor de C_D igual però si que seria més pròxim.

L'aerodinàmica del model Cybertruck es bastant millor del que es podria pensar. Els models pickups solen ser poc aerodinàmics degut a l'àrea frontal i la part de darrera oberta. El model de pickup de Tesla tancat per darrere i amb l'angle d'inclinació de la pendent poc pronunciat, redueixen el drag en comparació a altres pickups o camions.

6.3. Comparació dels models

En aquest apartat es comparant els resultats obtinguts de la simulació en ANSYS Fluent per el Tesla S model i el Tesla Cybertruck. Es realitzarà una comparació des de les seves geometries fins els resultats trobats i els gràfics obtinguts.

	C_D	A_D	F_d	C_l	A_l	F_L
<i>Tesla S model</i>	0,2886	1,521	430,22	-0,03907	5,362	-205,32
<i>Tesla Cybertruck</i>	0,4335	1,7587	747,15	0,009922	5,9643	57,99

Taula 6-5 Comparació Tesla S model i Tesla Cybertruck

Es pot veure a la Taula 6-5 que el coeficient de drag del Tesla S model és molt més baix que en el model Tesla Cybertruck. Aquests resultats eren els esperats ja que la forma de l'àrea frontal del Tesla S model és menor que la forma plana l'àrea frontal del Cybertruck. El coeficient de lift pel Tesla S model es crea una força de downforce i en el Tesla Cybertruck no. Això és degut a que l'àrea entre el terra i la part inferior del vehicle és més petita en el S model, per tant es produeix l'efecte terra per la disminució de la pressió. En canvi en el Cybertruck no s'arriba a produir la suficient diferencia de pressions per que el coeficient de lift sigui negatiu. L'àrea del coeficient lift també és més gran en el Cybertruck que en el S model influint en el C_l .

Comparant els contorns de velocitat Figura 6.1-1 i Figura 6.2-1 es pot veure que l'estela del Tesla Cybertruck és molt més intensa que l'estela del Tesla S model sent proporcionals als seus valors de C_D . Les turbulències darrere del Tesla S model son més reduïdes que en el

Cybertruck. També s'originen menys vortex, reduint la resistència induïda, en el S model que en el Cybertruck i el flux en el S model es torna a juntar a poca distància del vehicle mentre que en el Cybertruck es torna a reenganchar a més distància.

7. Planificació del projecte

La planificació eficient d'un projecte és fonamental per arribar als objectius marcats en el termini fixat. En aquest projecte en particular s'ha de tenir en compte el temps que comporta fer cada simulació i la corba d'aprenentatge en relació a l'emprament destre del programa ANSYS. Per aquest motiu l'aprenentatge i el procés de simulació es van iniciar el més aviat possible per tal de tenir temps a realitzar la simulació numèrica. La duració total del projecte ha estat de 7 mesos des de la concepció del treball a l'octubre fins la redacció de la memòria.

En la Taula 7-1 es mostra el diagrama de Gantt del projecte per poder visualitzar de manera gràfica les etapes del projecte i quant de temps s'ha dedicat a cadascuna.

Etapas	Mesos							
	Octubre	Novembre	Desembre	Gener	Febrer	Març	Abril	
Elecció treball /Objectius	[Barra groga: Octubre]							
Recerca CAD	Tesla S model	[Barra verda: Octubre, Novembre]						
	Tesla Cybertruck	[Barra verda: Octubre, Novembre, Desembre]						
Aprenentatge	Investigació inicial	[Barra taronja: Octubre, Novembre]						
	ANSYS Fluent	[Barra taronja: Octubre, Novembre, Desembre, Gener]						
	Marc teòric				[Barra taronja: Gener, Febrer, Març, Abril]			
Pre procés	Tesla S model	[Barra rosa: Novembre, Desembre, Gener, Febrer]						
	Tesla Cybertruck				[Barra rosa: Desembre, Gener, Febrer, Març]			
Simulació	Tesla S model				[Barra blava: Desembre, Gener, Febrer, Març]			
	Tesla Cybertruck					[Barra blava: Febrer, Març, Abril]		
Post procés	Tesla S model						[Barra blava: Març, Abril]	
	Tesla Cybertruck							[Barra blava: Abril]
Memòria					[Barra blava: Febrer, Març, Abril]			

Taula 7-1 Diagrama de Gantt del projecte

La primera etapa consisteix en la elecció del treball i en definir els objectius principals del projecte. En aquest període es va escollir quin model de cotxe simular i un cop escollit el model Tesla S va sorgir la idea de fer una comparació amb un altre cotxe de la marca, sent finalment el Tesla Cybertruck l'escollit per la seva geometria particular.

La recerca de les figures CAD va durar més del temps previst; el tesla S model es va trobar fàcilment però el Tesla Cybertruck va donar problemes alhora d'importar-ho al Design Modeler. Es van testar tres models del Tesla Cybertruck i això va endarrerir el procés per aquest.

En tot el projecte es pot afirmar que l'aprenentatge es continuu, en el qual han tingut lloc tres tipus diferents. Primer hi ha la investigació inicial on es recerca sobre les figures CAD, els model de cotxe i el seu rendiment aerodinàmic, a més del procés de realitzar una simulació. Al mateix temps també succeeix l'aprenentatge del programa ANSYS on s'investiga com s'importen les figures i en quin format, com es dissenyar el domini computacional, el procés de mallat i com realitzar la simulació. Finalment el marc teòric on es van cerca tots els coneixements fonamentals de la mecànica de fluids i l'aerodinàmica per tal de redactar la memòria.

Cal esmentar que alhora que realitzava el projecte cursava l'assignatura d'aerodinàmica en la qual es realitzava un treball amb simulació d'ANSYS. Gran part dels coneixements bàsics per utilitzar ANSYS els vaig assolir en aquesta assignatura.

Les tres etapes de la simulació són el gruix del projecte i al que li he dedicat més temps. En el pre-procés es realitza el túnel de vent, el mallat i l'anàlisi de sensibilitat de la malla. Cal dir que el pre procés es va iniciar amb el Tesla S model realitzant totes les proves en aquest i posteriorment es van exercir en el Tesla Cybertruck amb les conclusions correctes. La simulació correspon a la selecció dels paràmetres de la simulació i el procés d'iteració del programa. Aquesta etapa junt amb el preprocés són dependents l'una de l'altre ja que per realitzar l'anàlisi de sensibilitat de la malla cal realitzar varies simulacions. Finalment el post procés es va realitzar en l'últim més ja que un cop finalitzat l'anàlisi de la malla només cal obtenir les solucions i els gràfics corresponents .

Per últim la redacció de la memòria es va redactar en els últims mesos del projecte per tal de començar la redacció havent assolit coneixements tant del marc teòric com del funcionament del programa ANSYS. En aquesta etapa s'inclou l'anàlisi i la comparació dels resultats de la simulació.

8. Impacte social i de gènere

L'estudi de l'aerodinàmica en automòbils té un impacte social important a continuació es detallen diversos impactes socials:

Primerament es molt important la seguretat vial en les carreteres i els estudis aerodinàmics podrien contribuir a millorar la estabilitat i la seguretat del vehicle

La realització d'estudis aerodinàmics requereix els software de eines CFD i de gent qualificada per realitzar aquests estudis. Si cada cop es realitzen més estudis de simulacions per optimitzar la aerodinàmica és crearà demanda d'enginyers especialitzats i llocs de treball. Això tindrà un impacte en la generació de treball i la economia en països on es troben les companyies d'automòbils importants.

Invertir en tecnologia i investigació a nivell social sempre es important ja que generalment millora la qualitat de vida. A més la inversió en tecnologia promou el desenvolupament científic i cultural en la societat.

En relació a l'impacte de gènere en aquest projecte no hi ha una discriminació a homes ni a dones en la realització d'aquest treball.

Per altre banda en la bibliografia si que es pot veure que la majoria d'autors són de gènere masculí.

9. Impacte ambiental

En aquest projecte l'impacte ambiental es baix tenint en compte que és un projecte de recerca i de simulació amb l'ordinador que no es necessari desplaçar-se. Es considera que l'impacte ambiental només depèn de l'energia elèctrica consumida pel ordinador.

L'ús de equips informàtics per realitzar la simulació requereix el consum d'energia elèctrica. Aquest consum pot tenir un impacte ambiental en termes de la generació d'emissions de gasos d'efecte hivernacle. Tenint en compte que un ordinador portàtil consumeix aproximadament 50 W i se li ha dedicat al treball unes 280 h i que les emissions corresponents a la xarxa elèctrica en Espanya són de 0,25 kg CO₂/kWh el consum d'aquest projecte és de 3,5 kg de CO₂.

En realitzar l'estudi aerodinàmic amb el programa ANSYS s'estalvien els costos i l'impacte ambiental d'utilitzar un túnel de vent. El desplaçament que comporta anar a la ubicació del túnel de vent i els recursos energètic que comporten les proves aerodinàmiques s'estalvien completament.

L'estudi aerodinàmic d'un vehicle pot contribuir a la reducció de consum de combustible, tenint un impacte ambiental positiu. També si es promociona els estudis aerodinàmics en vehicles elèctrics, podria tenir un impacte positiu en el medi ambient.

10. Anàlisi Econòmic

En aquest apartat es realitzarà l'anàlisi econòmic del estudi aerodinàmic complet. Per realitzar l'anàlisi s'ha dividit el pressupost en quatre parts: el personal, el tècnic, el software, i el consum elèctric.

El pressupost personal consisteix en el temps invertit en el procés de realitzar l'estudi aerodinàmic pel autor. El cost és divideix en les 6 etapes del procés i es multiplica pel nombre d'hores dedicat a cada etapa sent aquestes la recerca de les figures CAD, l'aprenentatge del programa ANSYS Fluent, les tres etapes de l'estudi aerodinàmic i la redacció de la memòria. EL preu per hora del personal s'ha establert de 15 € que seria el cost d'un enginyer en practiques.

El pressupost tècnic és l'equip informàtic per realitzar la simulació en aquest s'inclou l'ordinador i la pantalla per poder visualitzar els resultats. A aquests dispositius se'ls hi ha aplicat la amortització corresponent estimant el temps de vida útil en 8 anys. El preu de l'ordinador és de 1000 € i la pantalla de 200 €.

El software és la part del pressupost que inclou tots els programes utilitzats i les seves llicències, sent aquests el Pack Office el ANSYS i el SOLIDWORKS. Les llicències dels dos últims programes són de la versió d'estudiant i s'han utilitzat en els 7 mesos de la duració del projecte.

El pressupost del consum elèctric consisteix en el consum de l'ordinador personal de potencia de 50 W. El preu de la llum és de 0,13 €/kWh i el total d'hores dedicades al projecte és de 280.

S'han sumat el cost total dels quatre apartats del pressupost i s'ha aplicat l'impost de valor afegit (IVA) donant un preu final de 5084,2 €.

A continuació es pot veure la taula de pressupost amb el pressupost final.

Personal	Cost [€/h]	Temps [h]	Total
Recerca CAD	15	30	450
Documentació	15	50	750
Preprocés	15	80	1200
Simulació	15	60	900
Postprocés	15	15	225
Memòria	15	45	675
Total		280	4200
Tècnic	Preu	Amortización	Total
Ordinador	1000	125	750
Pantalla	200	25	175
Total			925
Software	Cost anual [€/any]	Utilització[anys o mesos]	Total
Pack Office	69	7	9,857
llicència ANSYS	8000	7	1142,86
llicència SOLIDWORKS	99	7	14,14
Total			1166,85
Consum Electric	Cost [€/KWh]	temps [h]	Total
Ordinador	0,13	280	1,82
Total			1,82
Cost Total			Total
Abans impost			4201,82
I.V.A	21%		882,38
Total final			5084,20

Taula 10-1 Pressupost

11. Recomanacions per projectes futurs

Aquest projecte s'ha realitzat amb unes condicions determinades que han permès obtenir un primer anàlisi del comportament dels dos vehicles estudiats . Un cop realitzat aquest projecte es podrien realitzar millores en la simulació o modelitzar el problema d'un altre manera. Algunes opcions per tal de simular els vehicles de forma més propera a la realitat es troben a continuació:

- Les geometries es podrien simular sense simplificacions a les rodes per poder comprovar clarament quin efecte en el drag tindrien.
- Tenint en compte que aquest estudi ha estat limitat per el nombre d'elements totals de la malla, caldria veure amb la malla més optima possible la diferencia del resultats i quant s'aproximarien als comparats en aquest estudi.
- La simulació es podria modelitzar amb un altre model de turbulència com per exemple el k-Omega per tal de comprovar si es millorarien els resultats obtinguts en aquest projecte.
- Per obtenir resultats fidels al comportament del flux al voltant del vehicle en la realitat, caldria tenir en compte la rotació de les rodes en la simulació. També es podria comparar amb aquest estudi i quantificar la variació en el drag que suposaria.
- Es podria realitzar un estudi aerodinàmic per simular l'efecte de cada element del vehicle i veure la contribució del drag en funció del total.

Conclusions

En general es pot dir que els objectius s'han complert en la mesura de lo possible. Les geometries si que representen adequadament el models de vehicle però cal tenir en compte que estan simplificades i els detalls són els més importants en relació a obtenir resultats vàlids i fidels a la realitat, per això es pot comprovar que hi ha un error significat en els valors dels coeficients de drag i lift. L'anàlisi de sensibilitat de la malla esta limitat pel nombre d'elements màxim de la versió d'estudiants d'ANSYS, aquest fet no permet l'obtenció de la malla més optima ni de dimensionar el domini computacional en les dimensions necessàries per obtenir resultats precisos. No obstant, els resultats obtinguts en la simulació es troben en l'ordre de magnitud corresponent i es poden considerar bons per un primer estudi del problema. A continuació s'explicarà més detalladament per cada vehicle els objectius i els resultats.

En el cas del Tesla S model l'error és més gran amb el valor oficial que amb altres estudis. Tenint en compte que la geometria no ha estat proporcionada per Tesla, no es pot assegurar que el model sigui plenament fidel a la realitat i pot comportar un error en els resultats finals. El criteri de selecció de la malla ha estat la convergència de la solució, juntament amb la limitació del nombre d'elements de la versió de estudiants. En el cas del Tesla S model, el nombre d'elements de la malla final no s'aproxima al límit permès, però s'ha seleccionat la malla més fina que convergia. En les definicions de la configuració de la simulació el model de turbulència seleccionat ha estat el k-Epsilon per ser un model complet i robust. Per realitzar un primer anàlisi del comportament del flux aquest model és adequat. Un cop realitzat aquest estudi es podria comprovar si els resultats s'aproximarien als oficial si es simules amb un altre model com per exemple el k-Omega. En les condicions de contorn no s'ha definit el moviment de les rodes, per tal de simplificar la simulació, però això pot provocar a un augment del coeficient de drag.

En el cas del Tesla Cybertruck s'ha de considerar que Tesla no ha proporcionat els valors oficials del coeficient de drag ni del coeficient del lift per tan s'han comparat amb un estudi independent. El error entre els valors obtinguts en la simulació i els de l'estudi és menor que amb el model anterior. Això pot ser degut al nombre d'elements de la simulació ja que en aquest cas s'ha aconseguit una malla més fina que convergeixi. Tot i que la malla té un nombre d'elements pròxim a la limitació, si no fos per aquesta es podrien haver obtingut resultats més precisos i propers al valor comparat. Cal tenir en compte que la geometria d'aquest model tampoc ha estat proporcionada per Tesla i ha estat simplificada pel seu creador, per tant pot contribuir a l'error donat en els resultats. En aquest model també es dona l'augment del coeficient de drag degut a les rodes sense moviment.

En la comparació es pot comprovar que el Tesla S model és més aerodinàmic, ja que té un coeficient menor que el Tesla Cybertruck. Aquests resultats eren els esperats per la geometria

dels vehicles i per la forma de l'àrea frontal de cadascun. L'anàlisi de les gràfics de línies de corrent, contorns de pressió i velocitat entre d'altres corroboren els resultats, podent observar, la separació del flux, els deixants i turbulències que es donen en els vehicles i que afecten al coeficient de drag. Tot i que s'esperava un millor rendiment aerodinàmic del S model, el Cybertruck ha superat les expectacions inicials. El seu disseny té en compte l'aerodinàmica del vehicle i el flux segueix el perfil del vehicle millor de l'esperat.

En conclusió s'ha realitzat un estudi aerodinàmic comparant els dos models de vehicle, sent el resultat de la comparació l'esperat. Amb les geometries trobades s'han obtingut uns resultats suficientment bons considerant la limitació del nombre d'elements i la pròpia geometria.

Bibliografia

Referències bibliogràfiques

- [1] VALERO, M^a DEL CARMEN .Transparencias Aerodynamics. Drag and cars.
- [2] JOU, ESTEVE. Transparencias Aerodinámica Tema 4.-Vehiculos de turismo.Barcelona 2018
- [3] JOU, ESTEVE. Transparencias de Mecànica de Fluids.Barcelona.CPDA-ETSEIB,2012
- [4] MESEGUER, JOSÉ. Algunas consideracions sobre la aerodinámica de los automóviles de carreras.UPM.2010
- [5] FERNÁNDEZ ORO, J.M. *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos. Introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos. Editorial Reverté, S.A, 2012.*
- [6] CFD Online https://www.cfd-online.com/Wiki/Algebraic_turbulence_models
- [7] RICHMOND, GUSTAVO. *Modelos de turbulencia introductorio*, Costa Rican Institute of Technology (ITCR) Septiembre 2019
https://www.researchgate.net/publication/335611158_Modelos_de_turbulencia_introductorio
- [8] TESLA. Models. Tesla S model https://www.tesla.com/es_es/models
- [9] TESLA. Cybertruck https://www.tesla.com/es_es/cybertruck
- [10] AL-GARNI, A., Bernall, L, and Khalighi, B., *Experimental investigation of the near wake of a Pickup truck.*, SAE Technical Paper 2003-01-0651, 2003, <https://doi.org/10.4271/2003-01-0651>.
- [11] [Tesla Cybertruck 2023: descripció https://www.autobild.es/coches/tesla/cybertruckn-general-precios-y-fichas-tecnicas. -- Autobild.es](https://www.autobild.es/coches/tesla/cybertruckn-general-precios-y-fichas-tecnicas.--Autobild.es)
- [12] TESLA MANUAL D'USUARI. Tesla S model 2021. Dimensiones, 2021.
https://www.tesla.com/ownersmanual/models/en_us/GUID-91E5877F-3CD2-4B3B-B2B8-B5DB4A6C0A05.html .
- [13] TESLA CYBERTRUCK DIMENSIONS & DRAWINGS.

[<https://www.dimensions.com/element/tesla-cybertruck>],

- [14] JOU, ESTEVE. *Transparencies Aerodinàmica Tema 8.-Introducción CFD.2018*
- [15] FLUID MECHANICS 101. Calculators and tools.
<https://www.fluidmechanics101.com/pages/tools.html>
- [16] QI-Liang WANG, Zheng WU , Xian-Liang ZHU , Li-Li LIU , Ying-Chao ZHANG, *Analysis of Aerodynamic Performance of Tesla Model S by CFD.*
- [17] HORTELANO-CAPETILLO, Juan Gregorio, MARTÍNEZ-VÁZQUEZ, J. Merced , BAÑOS LOPEZ, Esperanza and ALFARO-AYALA J. Arturo. *Análisis de fuerzas de arrastre y sustentación para el vehículo Tesla Cybertruck.2021*
- [18] NEDELEA ANDREI. *Though Tesla Cybertruck was not Aerodynamic?Simulation says otherwise.2022*<https://insideevs.com/news/600765/tesla-cybertruck-aerodynamic-simulation/>

Bibliografía complementària

- [19] <https://greatbustardsflight.blogspot.com/2015/02/numero-mach-y-leccion-magistral.html>
- [20] <https://www.esss.co/es/blog/dinamica-de-fluidos-computacional-que-es/>
- [21] [Aerodinàmica Del Automóvil, El Estudio De La Perfección \(mundicoche.com\)](http://mundicoche.com)
- [22] <https://sunglass.io/tutorial-de-ansys-fluent-todo-lo-que-necesitas-saber/#configuracion>
- [23] [\(PDF\) Modelos de turbulencia introductorio \(researchgate.net\)](http://researchgate.net)
- [24] https://www.researchgate.net/publication/262922897_Building_on_a_Traditional_Chemical_Engineering_Curriculum_Using_Computational_Fluid_Dynamics
- [25] https://www.researchgate.net/figure/13-Air-boundary-layer-development-on-a-flat-plate-A-laminar-air-boundary-layer_fig4_326145686
- [26] https://www.researchgate.net/figure/Computational-grid-of-NACA-0012-airfoil_fig1_299645082
- [27] https://www.researchgate.net/figure/Body-fitted-left-and-embedded-right-meshes-used-for-the-simulations-of-the-flow_fig12_337533319
- [28] https://www.researchgate.net/figure/Unstructured-grid-for-the-RAE2822-airfoil-Navier-Stokes-flow-the-total-geometrical_fig38_260722415

