



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Escola Politècnica Superior d'Enginyeria
de Manresa



TREBALL FI DE GRAU

Grau en Enginyeria d'Automoció

Curs 2021-2022

Estudi de la funció aerodinàmica d'un casc de protecció de motociclisme

Autor: Jofre Serra Vall

Director: Jordi Vives Costa

Data: 13 de maig del 2022

Localitat: Manresa

Resum del projecte

El treball de fi de grau present té la intenció d'estudiar la funció aerodinàmica d'un casc de protecció de motociclisme. Partint d'un model base convencional en format CAD o STEP i amb l'ajuda del software CFD (computational fluid dynamics), concretament el "Hyperworks CFD 2021" de la companyia Altair, es farà la simulació aerodinàmica.

El propòsit és que amb l'aplicació d'un conjunt d'idees i retocs en el model base sense modificar l'estructura del casc, és a dir sense retocar la forma bàsica del casc, aconseguir la reducció de la resistència aerodinàmica (drag), reducció de vòrtexs que causen soroll i vibracions, i millora del flux aigües avall.

Es realitzaran diferents propostes de CAD i per cada una d'elles es farà una simulació amb el programa HyperWorks CFD 2021, analitzant quins termes han millorat i quins han empitjorat en comparació amb els altres models i sobretot pel que fa al model base.

Al final s'escollirà el model definitiu que segons l'anàlisi hagi sigut el més bo en termes aerodinàmics, fent una comparació final amb el model base plantejat inicialment. A partir de l'estudi propi en CFD es realitzarà un llistat de propostes finals que es puguin aplicar per millorar encara més el casc.

Project abstract

The following final degree project is intended to study the aerodynamic function of a motorcycle helmet. Starting from a conventional base model in CAD or STEP format, the aerodynamic simulation will be performed using the help of CFD (computational fluid dynamics) software, specifically the "Hyperworks CFD 2021" from Altair company.

The purpose is to apply a set of ideas and tweaks in the base model, without modifying the structure of the helmet, that is, without retouching the basic shape of the helmet, achieve the reduction of aerodynamic drag, achieve reduction of vortices that cause noise and vibration, and improve downstream flow.

Different CAD proposals will be made and for each one, a simulation will be done with the HyperWorks CFD 2021 program. The terms that have improved and the terms that have gotten worse will be analysed in comparison with the other models, especially compared to base model.

At the end, a final model will be chosen, according to the analysis that has been taken, taking into account the best improvement in terms of aerodynamics. A final comparison will be done with the basic model initially proposed. Then, from the CFD's own study, a list of final proposals will be made that can be applied to further improve the helmet.

Índex

Resum del projecte	2
Project abstract	3
Índex.....	4
Índex de figures part teòrica	6
Índex de figures i gràfiques part pràctica.....	8
1- Introducció	11
2- Antecedents	13
2.1 Factors principals de l'aerodinàmica.....	14
2.1.1 Forces en un cos a l'entrar en contacte amb un fluid	15
2.1.2 Moments en un cos a l'entrar en contacte amb un fluid.....	20
2.2 Tipus de flux i teoria de la capa límit.....	21
2.2.1 Principi de Bernoulli	21
2.2.2 Efecte venturi	22
2.2.3 Efecte Coanda	24
2.2.4 Teoria capa límit.....	25
2.2.5 Diferències entre règims	28
2.2.6 Vòrtexs, causa de sorolls i vibracions.....	29
2.3 Mètodes per evitar el despreniment de la capa límit aplicat als cascs de motociclisme .	30
2.3.1 Mètodes de generadors de vortex.....	30
2.3.2 Mètodes de reducció de drag	31
2.4 Importància de la posició del pilot i la forma del casc en rectes	36
2.4.1 Angle de visió i inclinació d'un pilot en rectes	36
2.4.2 Comparació de la posició de dos pilots en recta.....	38
2.4.3 Estudi real de les pressions i velocitats de l'aire d'un pilot de moto GP en recta	38
2.5 Tipus túnel de vent.....	40
3- Selecció de models CAD per a la realització de l'estudi.....	43
3.1 Model seleccionat en 3D i característiques	46
4- Anàlisi CDF.....	51
4.1 Validació del model i condicions de contorn	51
4.2 Mallat del casc.....	53
4.3 Paràmetres túnel de vent.....	54
4.3 Anàlisi dels resultats.....	55
4.3.1 Gràfiques pressió i velocitat model base	55
4.3.2 Càlcul coeficient de drag i lift model base	57

4.4 Comparació anàlisis dels resultats amb angle òptim dels pilots en recta (20°).....	60
4.4.1 Gràfiques de pressió i velocitats model base inclinat	61
4.4.2 Càlcul coeficient de drag i lift model base inclinat.....	63
5- Millores aplicades en el model Base	65
5.1 Anàlisi CFD 1r model	66
5.1.1 Gràfiques pressió i velocitat 1r model	67
5.1.2 Càlcul coeficient de drag i lift 1r model.....	68
5.2 Anàlisi CFD 1r model millorat.....	70
5.2.1 Gràfiques pressió i velocitat model millorat	72
5.2.2 Càlcul coeficient de drag i lift model millorat	73
5.3 Comparació anàlisi CFD 1r model millorat a un angle de 20°.....	75
5.3.1 Gràfiques pressió i velocitat model millorat inclinat	75
5.3.2 Càlcul coeficient de drag i lift model millorat inclinat.....	77
6-Conclusions	79
7- Bibliografia	81

Índex de figures part teòrica

Imatge 1: Diagrama de forces i moments en un vehicle pesat	13
Imatge 2: Descripció de les parts principals d'un perfil alar	14
Imatge 3: Representació de l'angle d'atac i forces en un perfil alar	15
Imatge 4: Taula de coeficients de drag de figures senzilles	16
Imatge 5: Taula de coeficients de drag de diferents perfils alars	16
Imatge 6: Gràfic relació del drag amb l'angle d'atac.....	17
Imatge 7: Representació de 2 perfils alars amb diferents angles d'atac i les seves línies de flux respectives	17
Imatge 8: Representació de la força de lift i descripció de les zones en un perfil alar	18
Imatge 9: Perfil alar on es produeix downforce.....	18
Imatge 10: Distribució de les forces de downforce en un Formula 1	18
Imatge 11: Representació força lateral d'un vehicle en una corba a esquerres.....	19
Imatge 12: Representació de la força resultant de les tres forces esmentades, anomenada també força aerodinàmica	19
Imatge 13: Vista aèria monoplaça amb la representació de l'angle de Yaw	20
Imatge 14: Vista aèria monoplaça amb la representació dels eixos principals i moment de rotació i força de drag	20
Imatge 15: Representació vehicle en recte amb els eixos i moment de roll	20
Imatge 16: Representació real d'un vehicle a velocitat alta en un revolt on es produeix moment de roll.	20
Imatge 17: Comparació d'un vehicle accelerant i en frenada així com forces d'acceleració, fregament i frenada.	21
Imatge 18: Representació d'un vehicle amb les forces principals de Drag moment de Pitch i Lift, així com l'angle de pitch o com se'l coneix millor angle d'atac.	21
Imatge 19: Tuberia de diferents diàmetres on es produeix el principi de Bernoulli quan hi circula un fluid per l'interior.....	22
Imatge 20: Aleró posterior del monoplaça Ferrari del 2017.....	23
Imatge 21: Aleró davanter del monoplaça Racing Point del 2018.....	23
Imatge 22: Representació gràfica de un Fons pla d'un monoplaça de fórmula 1 amb les parts principals definides	23
Imatge 23: Fons pla del monoplaça Ferrari.....	23
Imatge 24: Difusor d'un monoplaça de F1 situat en la part baixa de la zona posterior del vehicle entre les dues rodes.....	23
Imatge 25: Representació efecte Venturi en un tràiler i una motocicleta a altes velocitats i direccions contraries	24
Imatge 26: Il·lustració comparativa d'un element sòlid i un element líquid on s'aprecia l'efecte Coandai.....	25
Imatge 27: Gràfic de velocitats en la capa límit d'un element.....	26
Imatge 28: Direcció d'un flux laminar	26
Imatge 29: Direcció d'un flux turbulent	26
Imatge 30: Etapes de la capa límit	28
Imatge 31: Generació de vòrtex per a l'aleró davanter de un McLaren F1	29
Imatge 32: Generació de vòrtex en la part final del camió que repercuteix en el motociclista que va al darrere	29
Imatge 33: Incorporació de un turbulador frontal amb el disseny de 3 esgraons pronunciats. 30	
Imatge 34: Turbulador frontal.....	30

Imatge 35: Turbuador frontal i en els costats, dues entrades d'aire que surten per la part posterior del casc	31
Imatge 36: Anàlisi amb CFD d'un casc com el de la imatge 37 on es veuen les zones de més pressió (marcades amb Vermell) i menys pressions (marcades en blau)	31
Imatge 37: Casc de bicicleta real on s'empra el mètode de la rugositat per obtenir un flux més uniforme en tot el recorregut del fluid per el casc	31
Imatge 38: Vista isomètrica del casc de Nicky Hayden	32
Imatge 39: Vista posterior del casc de Hayden on es veuen les sortides d'aire, unes més petites a la part de sobre i les principals a sota	32
Imatge 40: Casc de la marca Arai amb la incorporació d'un turbulador a la part frontal i una entrada d'aire curta a la part posterior.....	33
Imatge 41: Model de casc Arai on incorpora les entrades d'aire i a la vegada el flux d'aigües avall	33
Imatge 42: Entrada d'aire curta mòbil	34
Imatge 43: Entrada d'aire llarga mòbil.....	34
Imatge 44: Entrada d'aire mòbil incorporada a un casc de motociclisme.....	34
Imatge 45: Casc de bicicleta totalment aerodinàmic per a curses de cronorrelotge	34
Imatge 46: Perfil alar molt similar a la forma del casc de bicicleta.....	34
Imatge 47: Casc de Jorge Lorenzo on es busca la incidència del flux aigües avall	35
Imatge 48: Casc de Valentino Rossi en un altre color en vista posterior.....	35
Imatge 49: Casc de Valentino Rossi en vista lateral	35
Imatge 50: Casc de Marc Màrquez en vista lateral.....	36
Imatge 51: Casc de Marc Màrquez temporada 2021 en vista lateral	36
Imatge 52: Angle de visió del pilot en recta	37
Imatge 53: Posició idònia del pilot en recta	37
Imatge 54: Cal Crutchlow en posició al pas per recta	38
Imatge 55: Valentino Rossi en posició al pas per recta.....	38
Imatge 56: Esbós en 2D de la posició del pilot en recta.....	39
Imatge 57: Vista 3D del diagrama de pressions	39
Imatge 58: Diagrama de pressions de la posició conflictiva de Jorge Lorenzo en la moto RSW250	39
Imatge 59: Diagrama de vectors de flux amb les dues zones de vòrtex encerclades en vermell	40
Imatge 60: Diagrama de flux després de la incorporació de l'apèndix en el casc	40
Imatge 61: Túnel de vent real de tipus Eiffel de circuit obert.....	41
Imatge 62: Esquema parts i direcció del flux en un túnel de vent de tipus Eiffel obert	41
Imatge 63: Túnel de vent real de tipus tancat (retorn simple)	41
Imatge 64: Esquema parts túnel de vent tancat (retorn simple).....	41
Imatge 65: Esquema de un túnel de vent de circuit tancat de doble retorn	41

Índex de figures i gràfiques part pràctica

FIGURES

Figura 1: Vista isomètrica 1r model de casc trobat a Grabcad	43
Figura 2: Vista lateral 1r model de casc trobat a Grabcad	43
Figura 3: Vista frontal model 2 trobat a Grabcad	44
Figura 4: Vista posterior 2n model	44
Figura 5: Vista isomètrica del 3r model.....	44
Figura 6: Vista isomètrica 4t model	45
Figura 7: Vista frontal 5è i últim model.....	45
Figura 8: : Vista lateral 5è model.....	45
Figura 9: Vista lateral 1 del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA.....	46
Figura 10: Vista lateral 2 del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA.....	46
Figura 11: vista frontal del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA.....	46
Figura 12: Vista posterior del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA	46
Figura 13: vista des de Dalt del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA	47
Figura 14: Vista des de sota del casc a estudiar extret del model en cad amb CATIA.....	47
Figura 15: Vista isomètrica model propi base a estudiar.....	48
Figura 16: Vista lateral model propi base	48
Figura 17: Vista frontal model propi base.....	48
Figura 18: Vista superior model propi base	48
Figura 19: Llargada exterior casc propi base.....	49
Figura 20: Llargada interior casc propi base	49
Figura 21: Amplada exterior casc propi base	49
Figura 22: Alçada exterior casc propi base.....	49
Figura 23: Mides estàndards casc de competició	50
Figura 24: Casc AGU per verificar mides d'un casc de competició	50
Figura 25: Casc base llest per a simular amb visera i forats tapats.....	51
Figura 26: Casc base, llest per a simular amb visera i forat tapats	51
Figura 27: Dimensions túnel de vent.....	52
Figura 28: Condicions de contorn aplicades en el túnel de vent	52
Figura 29: Condicions de contorn part posterior del túnel de vent.....	53
Figura 30: Paràmetres 1 mallat del casc	53
Figura 31: Paràmetres 2 mallat del casc	53
Figura 32: Paràmetres 3 mallat del casc	53
Figura 33: Malla obtinguda del casc base	54
Figura 34: Velocitat de l'aire per el túnel de vent.....	54
Figura 35: Càlcul de l'àrea frontal amb el software de disseny (CATIA V5)	58
Figura 36: Malla obtinguda del casc base en posició inclinada.....	61
Figura 37: Vista des de sobre del casc base modificat	65
Figura 38: Vista lateral del casc base modificat	65
Figura 39: Vista isomètrica del spoiler generat en el casc base.....	65
Figura 40: Malla obtinguda de la 1ª modificació del casc.....	66
Figura 41: Vista lateral del casc amb el spoiler millorat.....	70
Figura 42: Vista des de sobre del casc amb el spoiler millorat	70
Figura 43: Vista isomètrica del spoiler millorat.....	71

Figura 44: Malla obtinguda del casc amb spoiler millorat	71
Figura 45: Malla obtinguda del casc amb spoiler millorat en posició inclinada	75
Figura 46: Pilot de Ducati en posició al pas per recta on amaga el cap per sota el paraxocs perquè només quedi exposada en l'aire, la part de sobre del casc.	78

GRÀFIQUES

Gràfica 1: Mapa de pressions del casc base.....	55
Gràfica 2: Mapa pressions casc base amb zona groga marcada de pressions mitjes	56
Gràfica 3: Mapa de velocitats casc base	56
Gràfica 4: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc base amb zona de vòrtex marcada	57
Gràfica 5: Valor de la força de drag en funció del temps de simulació.....	58
Gràfica 6: Valors de la força de drag (en SI) del casc base en funció del nº de steps en el càlcul	59
Gràfica 7: Valors de la força de lift (en unitats de SI) del casc base en funció del nº de steps en el càlcul.....	59
Gràfica 8: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc base en funció del temps de simulació	59
Gràfica 9: Mapa de pressions del casc base en posició inclinada	61
Gràfica 10: Mapa de velocitats del casc base en posició inclinada.....	62
Gràfica 11: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc base en posició inclinada	62
Gràfica 12: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc base en posició inclinada en funció del nº de steps en el càlcul.....	63
Gràfica 13: Valors de la força de lift (en unitats de SI) del casc base en posició inclinada en funció del nº de steps en el càlcul.....	63
Gràfica 14: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc base en funció del temps de simulació	63
Gràfica 15: Mapa de pressions del casc amb la 1ª modificació	67
Gràfica 16: Mapa de velocitats del casc amb la 1ª modificació	67
Gràfica 17: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc amb la 1ª modificació	68
Gràfica 18: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc amb la 1ª modificació, en funció del nº de steps en el càlcul.....	68
Gràfica 19: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc amb la 1ª modificació, en funció del nº de steps en el càlcul.....	69
Gràfica 20: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc base en funció del temps de simulació	69
Gràfica 21: Mapa de pressions del casc amb spoiler millorat.....	72
Gràfica 22: Mapa de velocitats del casc amb spoiler millorat	72
Gràfica 23: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc amb spoiler millorat.....	73
Gràfica 24: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat, en funció del nº de steps en el càlcul.....	73
Gràfica 25: Valors de la força de lift (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat, en funció del nº de steps en el càlcul.....	74
Gràfica 26: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat en funció del temps de simulació	74
Gràfica 27: Mapa de pressions del casc amb spoiler millorat en posició inclinada	75
Gràfica 28: Mapa de velocitats del casc amb spoiler millorat en posició inclinada.....	76

Gràfica 29: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc amb spoiler millorat en posició inclinada	76
Gràfica 30: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat en posició inclinada, en funció del nº de steps en el càlcul	77
Gràfica 31: Valors de la força de lift (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat en posició inclinada, en funció del nº de steps en el càlcul	77
Gràfica 32: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat en posició inclinada, en funció del temps de simulació	78

1- Introducció

Origen del projecte i motivació

El present projecte sorgeix de la proposta del departament de fluidodinàmica en l'estudi de un casc de motocicleta, per veure de quina manera afecta en termes aerodinàmics i en la conducció de una motocicleta a velocitats semblants a les de competició professional.

L'interès de l'autor en les motocicletes, la competició en sí de moto GP i la matèria de l'aerodinàmica ha portat a desenvolupar l'estudi d'aquest treball enfocant-se en tot moment en la repercussió que poden tenir les diferents formes d'un casc i la comparació de diferents estils i elements, comprovant quina és la millor elecció.

Objectiu que es pretén assolir

Molts dels espectadors i aficionats del motociclisme no tenen present la importància que té la forma d'un casc i el disseny d'aquest en termes de l'aerodinàmica. Molts dels dissenys i formes adquirides en els casc de protecció de motociclisme de l'àmbit professional d'avui en dia, pensem que són fruit d'una finalitat totalment estètica però moltes de les formes són amb l'objectiu de millorar la resistència aerodinàmica.

I és que en l'àmbit del motociclisme professional és molt important el fet d'optimitzar i buscar les millors formes i dissenys tant pel que fa a la motocicleta com per el casc de protecció, que com la motocicleta, és un element directament exposat al flux d'aire i molt important pel fet d'obtenir unes dècimes menys com també obtenir una velocitat màxima més elevada.

Aquest fet s'ha vist a mesura que han passat els anys on cronològicament, a part de les millores en altres àmbits com transmissió, motor, xassís, frens, etc, en aerodinàmica, també han estat molt significatius els canvis, tant en Formula 1 com Moto GP, on aquest últim s'ha donat major importància al disseny del casc a part de la motocicleta en sí.

Fet aquest apunt, l'objectiu del treball és el següent: a partir d'un model CAD base d'un casc de protecció de motociclisme, proposar un seguit de millores i modificacions del model base però sense retocar la forma del casc, per tal d'aconseguir una reducció del drag i vòrtexs que poden originar sorolls i vibracions, molt molestes en la conducció d'una motocicleta, i una millora en el flux d'aigües avall (millorant la part posterior del casc).

Un dels objectius a assolir és la interpretació dels resultats, gràfics i mapes de calor obtinguts del programa de CFD que es farà servir en el treball.

Finalitat del projecte

La finalitat és aconseguir una millora en funció de l'aerodinàmica del model definitiu a partir del model base, mostrant les millores específiques en cada proposta i demostrant que l'aerodinàmica en el casc és un aspecte molt important en el motociclisme professional el qual s'ha de tenir en compte.

Abast del projecte

Hi ha nombroses formes per tal d'aconseguir una millora considerable en el drag d'un casc de motocicleta, moltes d'elles passen per obtenir una forma en concret en el disseny per mitjà de formes molt fines i allargades que facin que el flux d'aire sigui molt constant i que comporti un drag molt petit.

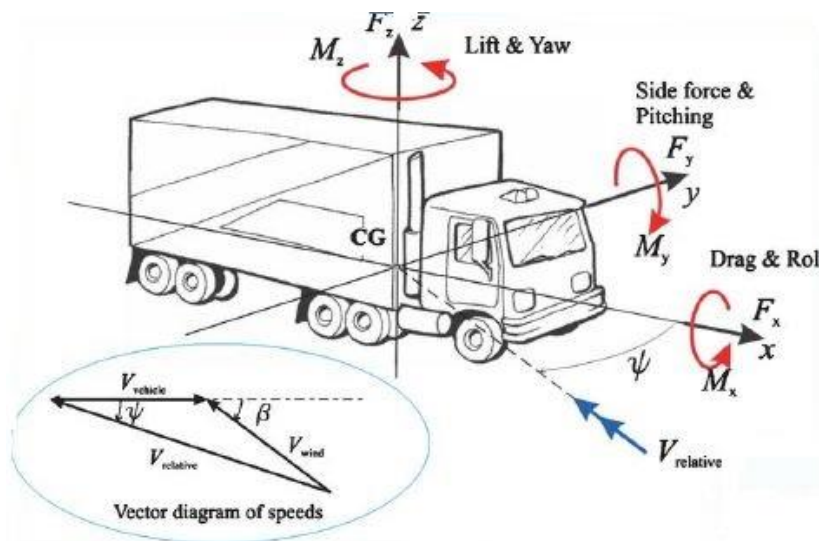
L'abast d'aquest projecte, però, no es centra en canvis radicals de formes en el disseny sinó que aplicant spoilers, turbuladors, rugositats, entrades d'aire, etc, s'aconsegueixi un canvi positiu sense la necessitat de presentar formes molt extremes.

2- Antecedents

Abans d'entrar en matèria i començar a desenvolupar l'estudi fent la comparació de diversos models, retocs en el model base, anàlisi i explicacions, cal posar en context la part teòrica que es treballarà referent a l'aerodinàmica.

Per entrar en matèria, abans de tot cal definir el terme "aerodinàmica", la base que engloba el desenvolupament del treball. L'aerodinàmica consisteix en el moviment de l'aire i altres gasos i les forces que actuen sobre objectes en moviment a través de l'aire.

Quan parlem d'aerodinàmica s'ha de tenir clar els eixos de moviment i rotació de l'element a estudiar així com les forces principals de cada eix. En la imatge següent, agafant un camió com a cos, queden perfectament representades:



Imatge 1: Diagrama de forces i moments en un vehicle pesat

Així doncs la figura queda resumida per la taula següent:

Direcció	Força	Moment
Longitudinal	Drag (resistència)	Roll (Balanceig)
Lateral	Side force (Força lateral)	Pitch (capcineig)
Vertical	Lift (Força sustentació)	Yaw (guinyada)

En la mateixa figura veiem un diagrama de velocitats on n'hi ha 3 de representatives:

- Velocitat del vehicle (u): velocitat amb la qual es desplaça el vehicle
- Velocitat relativa (w): diferència entre la velocitat d'un cos i la velocitat del vent
- Velocitat del vent (c): velocitat amb la qual va el vent

On es relacionen per la següent fórmula:

$$w = u - c$$

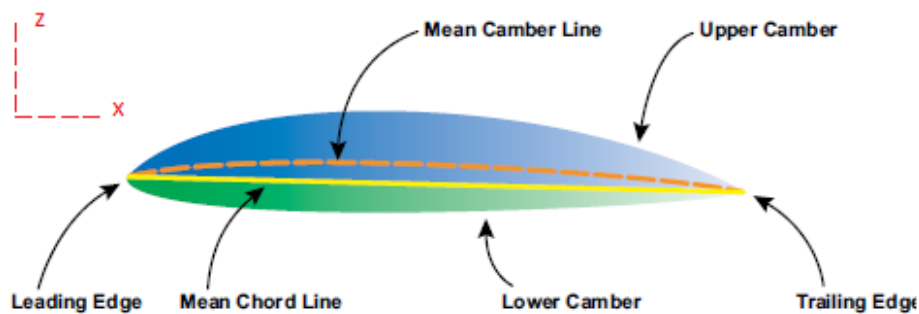
*Per a les simulacions del present projecte prendrem com a valor 0 la velocitat de l'aire, per tant la velocitat de la motocicleta serà igual a la velocitat relativa.

2.1 Factors principals de l'aerodinàmica

Alhora de posar un cos en contacte amb l'aire, apareixen diferents termes, forces, angles i distàncies que són factors bàsics en el moment d'estudiar aerodinàmicament un element.

Per veure aquests conceptes, es prendrà com a element un perfil alar "airfol" (perfil amb una certa àrea transversal, que al desplaçar-se a través de l'aire és capaç de crear al seu voltant una distribució de pressions que generi forces de sustentació, més conegut com a "lift", que és la força perpendicular a la corrent de l'aire generada sobre un cos. D'aquesta manera s'entendran amb més facilitat els factors que apareixen al aplicar un fluid a un perfil aerodinàmic.

Abans de veure els factors esmentats, es presenta en la imatge següent un exemple de "airfol" representat en 2 D (en els eixos X i Z) per veure la forma característica que tenen (tot i que n'hi ha de molts tipus i diferents formes) amb les parts senyalades en el dibuix.



Imatge 2: Descripció de les parts principals d'un perfil alar

Aquests doncs són els factors que apareixen en els eixos X i Z quan hi ha un cos que es desplaça a través d'un fluid (aire o gas):

- ✚ **Vent relatiu:** és la direcció del flux d'aire respecte la posició del "airfol".
- ✚ **Angle d'atac (α):** és l'angle de la direcció del vent relatiu respecte la corda principal ("Mean chord line")
- ✚ **4 forces:** si col·loquem el cos en un simulador i apliquem una certa velocitat veurem que degut el flux d'aire apareixen 4 forces. Aquestes són:
 - Lift** → força de sustentació definida prèviament, la component de la qual és perpendicular a la direcció del vent relatiu.
 - Weight (pes)** → força del cos des del centre de gravetat (CG) a causa de la gravetat en direcció el terra (negatiu en Z).
 - **Thrust (empenta)** → és la força en direcció oposada al vent relatiu, és a dir, la força proporcionada pel mateix cos a estudiar que es troba en moviment. Es mesura en unitats de potència (la més comuna és en CV si parlem de vehicles) (negatiu en X).

-**Drag (resistència a l'aire)** → conegut també com a resistència aerodinàmica. Força que s'oposa a l'avanç del cos a través de l'aire, depèn principalment de la densitat del flux, la forma i la velocitat del cos a estudiar (positiu en X).

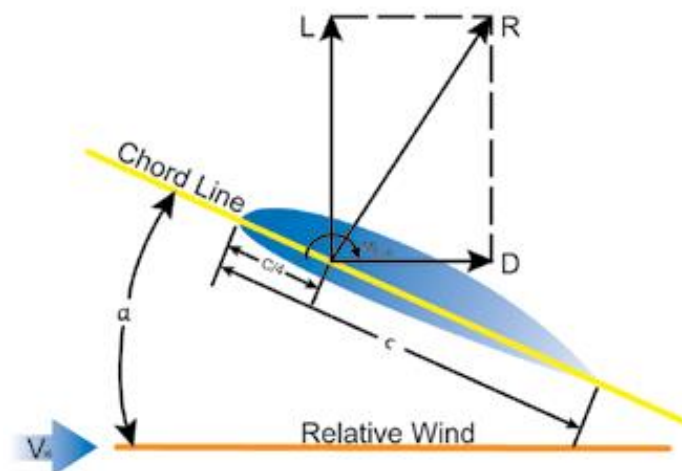
-**Side force (força lateral)** → força en l'eix y que actua quan el vent va en direcció lateral. (representada en la *imatge 1*)

En la *imatge 3* veiem representats els factors esmentats, on:

L = lift **D** = drag **R** = força resultant **C** = longitud de la corda α = angle d'atac

Vrel = velocitat relativa

*Apuntar que en tots els *airfols* la distancia del CG respecte el punt inicial és C/4



Imatge 3: Representació de l'angle d'atac i forces en un perfil alar

2.1.1 Forces en un cos a l'entrar en contacte amb un fluid

En l'apartat anterior s'ha presentat de forma breu les forces i moments que apareixen quan posem en contacte un cos amb un fluid. Ara es presentarà aquests termes de forma més desenvolupada, amb les respectives fórmules per trobar les forces i amb informació gràfica addicional:

Forces

Com s'ha mostrat en els apartats anteriors, les forces principals que actuen en un cos sòlid quan s'aplica un fluid són:

- ✚ **Drag:** component en la mateixa direcció del flux, si agafem com a eixos de referència els de la *imatge 1* es troba sempre en l'eix X. Actua sempre en la direcció oposada la qual va el cos a estudiar i en la mateixa direcció del flux, és la resistència de l'aire que s'oposa al moviment del cos.

Per trobar la força de drag (D) en Newtons (N) s'ha de desenvolupar la següent fórmula:

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cd$$

On:

D = Drag (resistència aerodinàmica) en [N]








P = densitat de l'aire [Kg/m^3]

V = velocitat del cos [m/s] = velocitat relativa (considerant $c = 0 \text{ m}/\text{s}$)

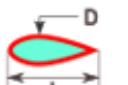
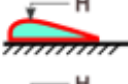
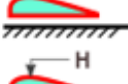
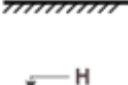

A_f = àrea frontal del cos

C_d = coeficient de drag (depèn de la forma del cos) anomenat també C_w o C_x

La força de drag és un terme molt important per determinar quina és la quantitat de força que s'oposa al avanç del cos. Els factors més importants que el determinaran són el C_d que depèn totalment de la forma del cos. En les figures següents es mostren uns exemples de diferents coeficients segons formes variades:

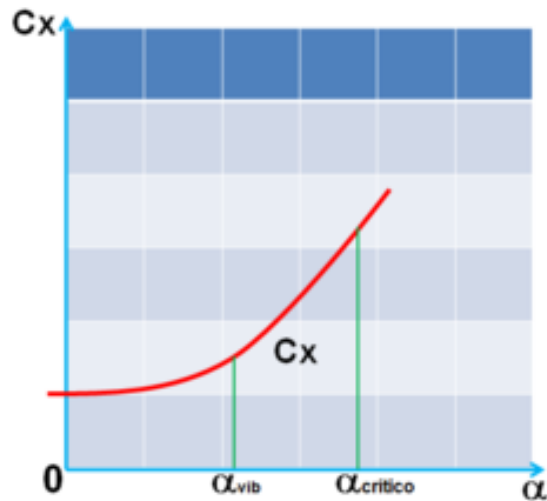
Forma		Coeficiente de arrastre frontal C_x
Esfera		0.47
Semiesfera		0.42
Cono		0.50
Cubo		1.05
Cubo inclinado		0.80
Cilindro largo		0.82
Cilindro corto		1.15

Imatge 4: Taula de coeficients de drag de figures senzilles

Forma		Coeficiente de arrastre frontal C_x
Cuerpo ahusado $L/D=2.5$		0.04
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ en el suelo		0.09
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ elevado del suelo		0.13
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ elevado del suelo frontal redondeado		0.09
Semicuerpo ahusado $L/H=5$ elevado del suelo frontal redondeado y ruedas		0.15

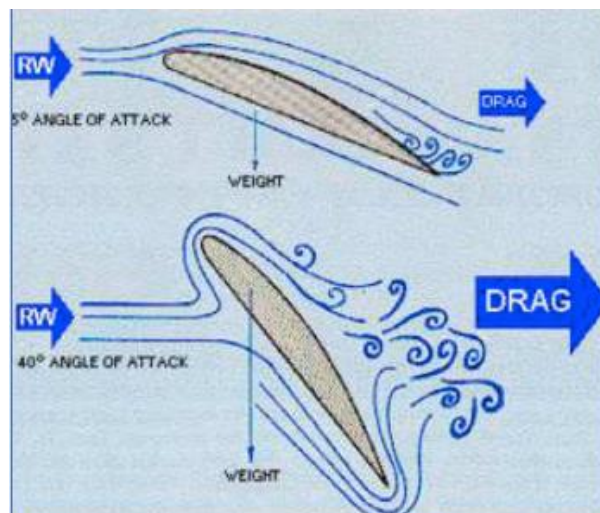
Imatge 5: Taula de coeficients de drag de diferents perfils alars

Directament relacionat amb aquest coeficient trobem la relació amb l'angle d'atac (anteriorment esmentat), on es pot veure en el gràfic següent (imatge 6). Com més augmentem α (angle d'atac), major A_f tindrem i per tant el D i el C_d (C_x en la imatge) augmentaria.



Imatge 6: Gràfic relació del drag amb l'angle d'atac

Un exemple aplicat en un airfol per veure aquesta relació entre l'angle d'atac i la força de drag és el següent, vist en la *imatge 7*:



Imatge 7: Representació de 2 perfils alars amb diferents angles d'atac i les seves línies de flux respectives

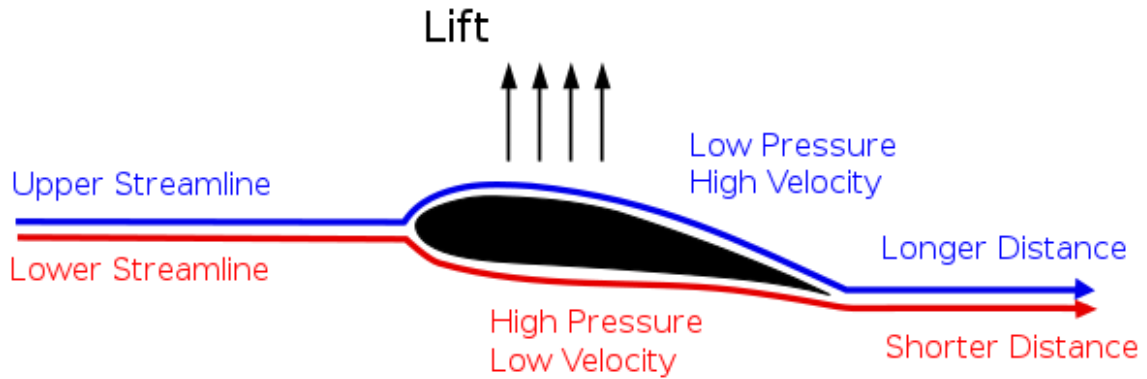
En la figura es veu fàcilment aquesta relació. Per un mateix airfol amb un angle d'atac de 5° es veu com el flux és constant en gairebé tot el recorregut, en excepció de la cua final on es creen uns vòrtex (explicat en l'apartat 2.2.6) així doncs quan el flux circula d'una forma lineal durant el recorregut del cos, el drag és petit.

En el segon dibuix de la *imatge 7*, aplicant un angle d'atac de 40° es veu a simple vista que l'àrea frontal augmenta i les línies de flux ja no són constants sinó que cada vegada es creen més vòrtex en diferents zones i les pressions en aquestes localitzacions són més elevades. El drag per tant augmenta considerablement.

- ✚ **Lift:** component perpendicular a la direcció del flux, si agafem com a eixos de referència els de la *imatge 1* es troba sempre en l'eix Z i és contrastada per la força de drag.

Així doncs actua convencionalment en sentit ascendent per contrarestar la força de la gravetat, però pot actuar en qualsevol direcció perpendicular al flux el qual està sotmès l'element a estudiar.

En la *imatge 8* es veu com queda la força de lift, representada en un airfol, on es pot veure també les pressions exercides pel flux en tota la superfície del airfol.



Imatge 8: Representació de la força de lift i descripció de les zones en un perfil alar

Per trobar la força de Lift (L) en Newtons (N) s'ha de desenvolupar la següent fórmula:

$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cl$$

On:

L = Lift (força sustentació) en [N]

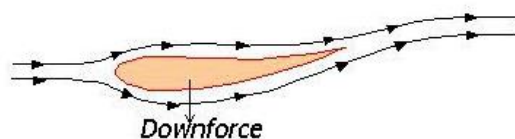
P = densitat de l'aire [Kg/m³]

V = velocitat del cos [m/s]

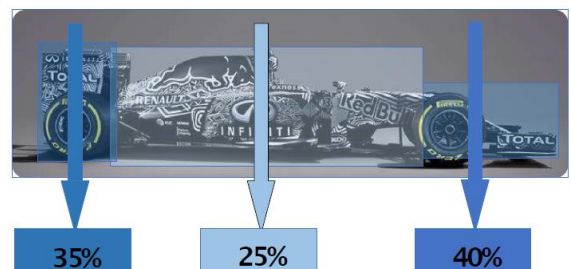
Af = àrea frontal del cos [m²]

Cl = coeficient de lift (depèn del nº de Mach i el nº de Reynolds) [adimensional]

La força en direcció contrària el lift és el **downforce**, o càrrega aerodinàmica que en un perfil alar es dona en perfils asimètrics similars al de la *imatge 9*, i en altres elements, com per exemple un monoplaça es dona quan el flux no és uniforme i es busca la generació de vòrtexs, que es produeixen en bona part per el disseny dels alerons davanters, fons pla, difusor i alerons posteriors amb la següent distribució representada en la *imatge 10*.



Imatge 9: Perfil alar on es produeix downforce



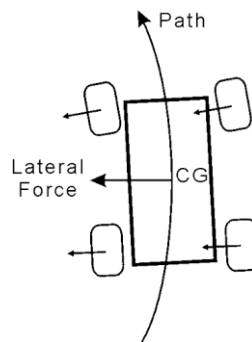
Imatge 10: Distribució de les forces de downforce en un Formula 1

- Side force:** component en l'eix Y si agafem com a eixos de referència els de la *imatge 1*. És una força que apareix degut el lliscament. Força important ja que en un vehicle pot interferir en la seva estabilitat. En un monoplaça, apareix amb més força quan el vehicle es troba en una corba degut a les forces d'inèrcia i el mateix pes propi del vehicle. Per altra banda, també té lloc en rectes llargues i a velocitats altes quan el vent bufa amb força de forma lateral. Per trobar la força lateral (Y) en Newtons (N) s'ha de desenvolupar la següent fórmula:

$$Y = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cy$$

On:

Cy = coeficient de força lateral [adimensional]

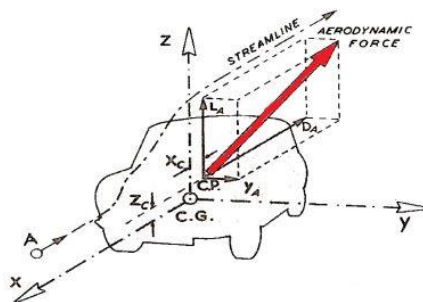


Imatge 11: Representació força lateral d'un vehicle en una corba a esquerres

- Força resultant:** és la suma de les tres forces.

$$FR = D + L + Y$$

En la *imatge 12* veiem representades les 3 forces (L_A , D_A , Y_A) i la força resultant, també anomenada força aerodinàmica.

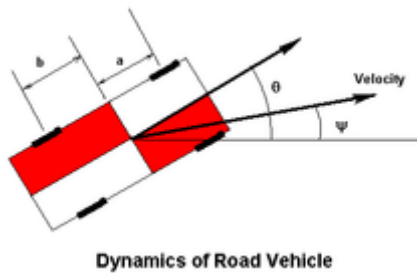


Imatge 12: Representació de la força resultant de les tres forces esmentades, anomenada també força aerodinàmica

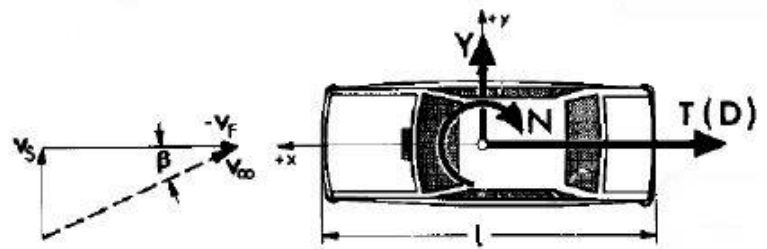
2.1.2 Moments en un cos a l'entrar en contacte amb un fluid

Els moviments de rotació que creen moments d'inèrcia són factors molt importants i que es donen sovint en casos reals. Aquests són els M_z (yaw), M_x (roll) i M_y (pitch)

- ✚ **Yaw:** moment de gir sobre l'eix vertical, per tant sobre l'eix Z. Pot ser ocasionada per un fort vent lateral que faci desestabilitzar el vehicle i es produeixi un moviment tal hi com es veu en les *imatges 13 i 14* representat en un vehicle, tot i que aquest fenomen és més freqüent que vingui donat per agafar una corba amb massa velocitat i que es produeixi sobre viratge.



Imatge 13: Vista aèria monoplaça amb la representació de l'angle de Yaw

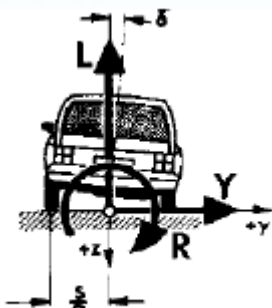


Imatge 14: Vista aèria monoplaça amb la representació dels eixos principals i moment de rotació i força de drag

- ✚ **Roll:** moment de gir sobre l'eix horitzontal, per tant sobre l'eix X. Com l'anterior cas pot ser ocasionada per vent lateral fort que pugui desestabilitzar el vehicle i es produeixi un moviment tal hi com es veu en la *imatge 15* (on es veu un petit desplaçament del cotxe en l'eix X creat pel moment).

Aquest fenomen és més freqüent quan un vehicle circula per un camí amb diverses irregularitats (forats i sotracs), corbes i peraltes que fan que el moment es produeixi amb més força.

L'exemple real es veu en la *imatge 16* on es veu el comportament del vehicle exposat a gran velocitat en un revolt. Al girar a una gran velocitat, les rodes de la part exterior reben una força de càrrega major i es crea un angle de balanceig respecte el centre del vehicle. Es veu també com apareix una força centrífuga (força lateral en la direcció exterior) provocada en aquest cas per la inèrcia del vehicle quan està donant el revolt.

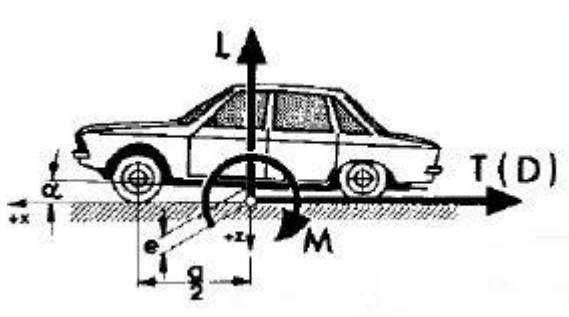


Imatge 15: Representació vehicle en recte amb els eixos i moment de roll

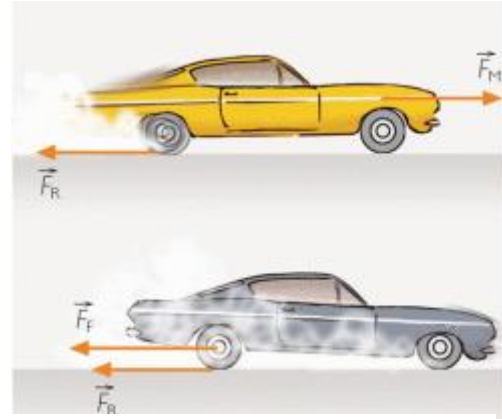


Imatge 16: Representació real d'un vehicle a velocitat alta en un revolt on es produeix moment de roll.

- ✚ **Pitch:** moment de gir sobre l'eix lateral, per tant sobre l'eix Y. En termes d'aerodinàmica es pot donar en vents frontals o posteriors forts. En la majoria de casos, però, el fenomen es dona en frenades pronunciades (l'angle d'atac és lleugerament negatiu) i acceleracions grans (angle d'atac és lleugerament positiu).



Imatge 18: Representació d'un vehicle amb les forces principals de Drag moment de Pitch i Lift, així com l'angle de pitch o com se'l coneix millor angle d'atac.



Imatge 17: Comparació d'un vehicle accelerant i en frenada així com forces d'acceleració, fregament i frenada.

2.2 Tipus de flux i teoria de la capa límit

El flux d'aire o gasos (fluids) al que està sotmès un cos es pot classificar en tres grups:

- ✚ Flux extern
- ✚ Flux intern
- ✚ Flux extern (velocitat relativa)

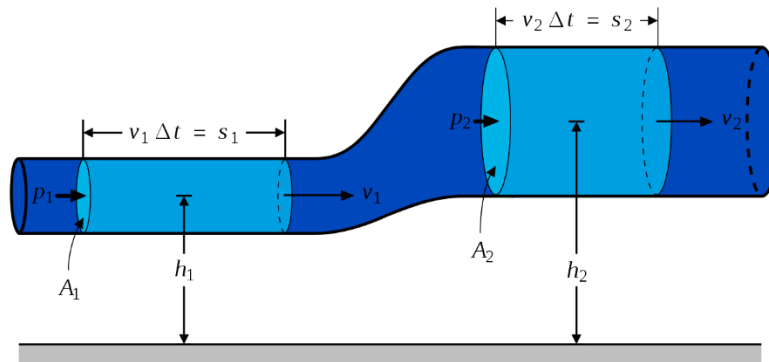
En aquest treball s'estudia el comportament aerodinàmic d'un casc que està exposat sempre a un flux extern, l'aire, on la velocitat relativa és igual a la velocitat del cos a estudiar. No obstant, no s'ha de deixar de banda les teories de Bernoulli ni Venturi ocasionades per un flux intern que són bases alhora d'estudiar la dinàmica de fluids i alguns conceptes aplicables a fluxos externs. També s'explica l'efecte Coanda, efecte que té lloc en un flux extern degut a la viscositat.

2.2.1 Principi de Bernoulli

Per entendre la dinàmica de fluids i com es comporta un fluid en un entorn tancat és essencial conèixer i entendre el principi de Bernoulli, que relaciona la velocitat del fluid amb la seva pressió (pressió interna del fluid).

El principi diu així: el comportament d'un flux de fluid és tal que en els punts de velocitat de fluid més alta, la pressió serà més baixa que els punts de velocitat de fluid més lenta.

Per tant, posant com a exemple una canonada com la de la *imatge 19*, on circula un flux tancat ideal, el primer tram de la canonada on el diàmetre és més petit, la velocitat del fluid serà més gran i per tant la pressió més baixa; i en la segona part on el diàmetre és més gran succeirà el contrari, velocitat més baixa i pressió més alta.



Imatge 19: Tuberia de diferents diàmetres on es produeix el principi de Bernoulli quan hi circula un fluid per l'interior

Per tant l'equació de Bernoulli es pot expressar de la següent manera:

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

On:

P_1 / P_2 = Pressió en la primera zona / segona zona

ρ = densitat del fluid

v_1 / v_2 = velocitat del fluid zona 1 / zona 2

g = gravetat

h_1 / h_2 = Altura des d'un punt arbitrari respecte la zona 1 / zona 2

Un altre teorema imposat per Bernoulli és que expressa que en un fluid ideal (sense viscositat ni fregament) en règim de circulació per un conducte tancat, l'energia que posseeix el fluid roman constant al llarg del seu recorregut.

2.2.2 Efecte venturi

L'efecte venturi és un fenomen directament relacionat amb el principi de Bernoulli i el principi de conservació de la massa (tota la massa que entra per un tub és la mateixa que la que surt per l'altre extrem).

Es produeix quan un fluid ideal, sense viscositat, es troba en moviment dins d'un conducte tancat, aleshores quan passa per una zona de secció menor a la que es trobava, disminueix la seva pressió i augmenta la velocitat del fluid.

Aquest fenomen té lloc molt sovint en els automòbils, inclòs les motocicletes. Pel que fa als automòbils, més concret en la Fórmula 1, aquest principi es troba aplicat en els alerons (afavoreix a la càrrega aerodinàmica) provocant downforce (força en la direcció cap el terra que provoca que el vehicle no es desestabilitzi i en situacions de corbes ràpides el vehicle es mantingui en la trajectòria desitjada).

També en els cotxes de competició de F1 el fons pla (planxa de fibra de carboni totalment plana que es troba sota el cotxe i és la part que està més a prop de l'asfalt) i en els difusors (element ubicat en la part posterior inferior del vehicle enllaçat amb la part final del fons pla).

En les *imatges 20 i 21*, es veu els dissenys dels alerons davanters i posteriors en cotxes de competició de F1, que per la seva forma, es basen en l'efecte venturi:

✚ Alerons davanters i posteriors



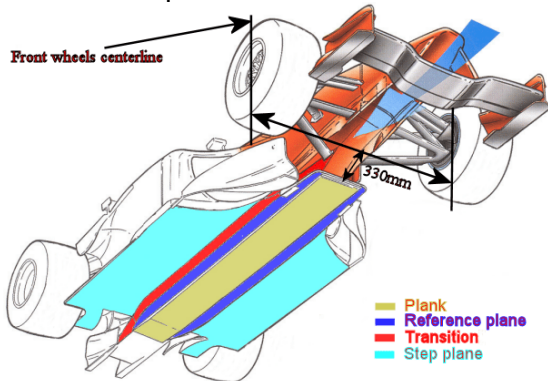
Imatge 21: Aleró davanter del monoplaça Racing Point del 2018



Imatge 20: Aleró posterior del monoplaça Ferrari del 2017

Altres zones del vehicle on es busca aquest fenomen són en la part baixa i en la part posterior, tal hi com s'aprecia en les *imatges 22, 23 i 24*.

✚ Fons pla



Imatge 22: Representació gràfica de un Fons pla d'un monoplaça de fórmula 1 amb les parts principals definides



Imatge 23: Fons pla del monoplaça Ferrari

✚ Difusor

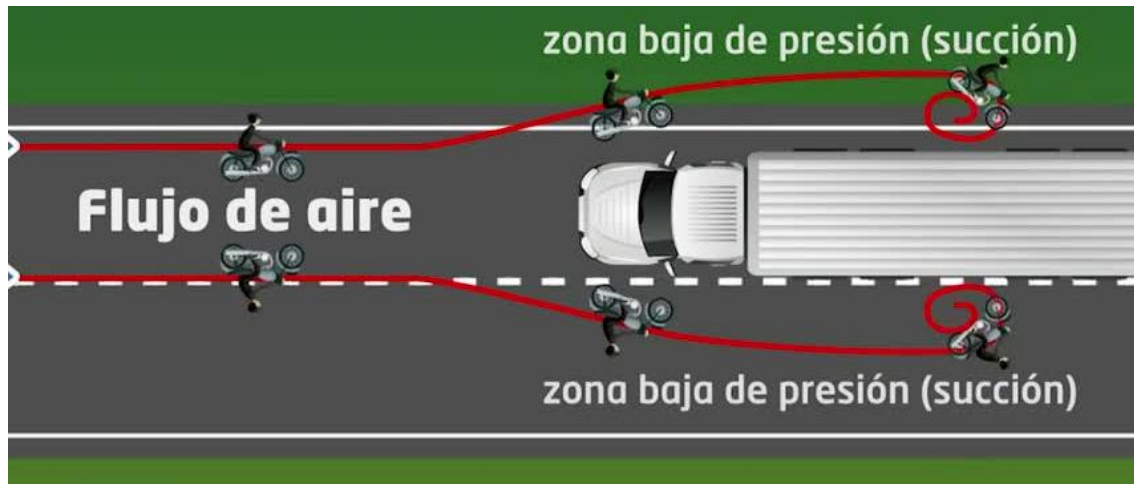


Imatge 24: Difusor d'un monoplaça de F1 situat en la part baixa de la zona posterior del vehicle entre les dues rodes

Per aquests elements el que es busca és precisament el que s'ha comentat en l'efecte Venturi, es busca augmentar les velocitats del flux reduint la pressió en aquestes zones, això permet que es creï una succió degut al fluid (en aquest cas l'aire) que d'alguna forma empenca el vehicle cap el terra creant downforce.

En situacions quotidianes també es dona aquest fenomen en les carreteres, que pot ser especialment perillós en les motocicletes degut a que el pes és molt més reduït que un vehicle i té lloc la inestabilitat.

En la *imatge 25* es pot apreciar aquesta circumstància.



Imatge 25: Representació efecte Venturi en un tràiler i una motocicleta a altes velocitats i direccions contràries

Per a dos vehicles en diferents direccions i a altes velocitats amb una diferència de tamany i massa considerables, aquest fenomen es troba agreujat.

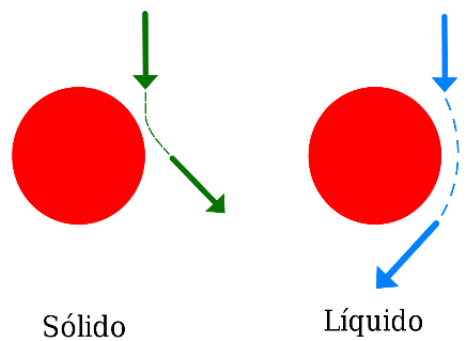
El fenomen, en el cas concret de la imatge anterior, quan una moto passa vora de un tràiler, en la zona intermitja fins al final del camió es troben les pressions més baixes i com a conseqüència velocitats de l'aire molt elevades que causen una succió cap endins del camió provocant en alguns casos accidents en motocicletes per no controlar la motocicleta.

És per això, la insistència des de la direcció general de tràfic amb la distància de seguretat, tant com per frenades brusques com per l'efecte comentat, a prop de qualsevol superfície plana l'aire agafa velocitats més altes que provoquen la turbulència en objectes propers, i encara més si es troben en velocitats contràries on la turbulència es multiplica.

2.2.3 Efecte Coanda

Fenomen físic que es produeix en qualsevol fluid ja que aquest tendeix a ser atret per una superfície que es troba a la seva trajectòria.

Aquest efecte es produeix a causa de la viscositat (fregament que provoca una resistència al seu moviment) del fluid el qual s'estudia (ja pot ser líquid o gasós) que tendeix a quedar enganxat a la superfície si aquesta té una forma arrodonida o amb radis petits. (*veure imatge 26*)



Imatge 26: Il·lustració comparativa d'un element sòlid i un element líquid on s'aprecia l'efecte Coandai.

L'efecte Coanda és un fenomen que es té molt en compte alhora de dissenyar les formes de un monoplaça, motocicleta o fins i tot en els cascs. On es busquen formes arrodonides perquè el fluid (l'aire) no es desprengui de les superfícies per aconseguir un fluid constant.

Les aplicacions més comuns en competició són:

-Alerons de la Fórmula 1: es busca que l'aire que passa per la zona inferior es pugui adherir a la superfície i generar càrrega aerodinàmica extra (downforce).

-Redirecció dels fluxos d'aire: l'objectiu és aconseguir que l'aire passi per el lloc desitjat, això es pot fer amb formes arrodonides on el flux s'enganxi i redirigir-lo a una altra zona.

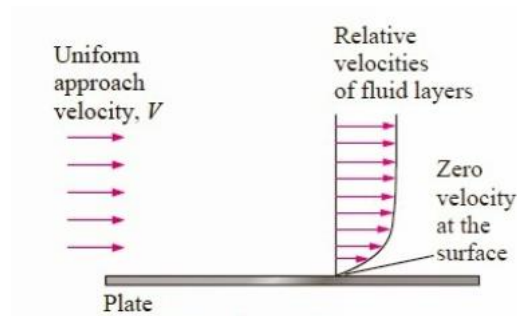
-Aplaçar els vòrtex: amb formes més arrodonides s'aconsegueix que el vòrtex ocorri en un altre lloc més llunyà al sentit de l'aire.

2.2.4 Teoria capa límit

-2.2.4.1 Fenomen de la capa límit

Quan un fluid es mou lliurement sense obstacles ni parets que intervinguin en el seu transcurs, la velocitat en tots els seus punts és la mateixa. No obstant, i com és lògic quan entra en contacte amb un objecte, com ja pot ser un vehicle, motocicleta o en el nostre treball un casc, la velocitat de l'aire es veu afectada, apareixent el fenomen de la capa límit, més coneguda com a "boundary layer" en anglès.

En la *imatge 27* es mostra el diagrama de perfils de velocitats. A la part esquerra hi ha la velocitat uniforme del fluid (V), mentre que a mesura que avança el fluid per la superfície aniran apareixent diferents velocitats relatives depenent de la forma d'aquesta superfície. Apuntar que en la zona de la superfície la velocitat del fluid és 0 i en zones properes a aquesta la velocitat és reduïda. Això és degut a que el fluid té una certa viscositat i aquesta viscositat genera forces de fregament a l'entrar en contacte amb l'element exposat al flux, provocant que la velocitat del fluid sobre la superfície sigui nul·la o quasi nul·la.



Imatge 27: Gràfic de velocitats en la capa límit d'un element

El fluid el qual està exposat a l'element a estudiar, pot ser laminar o turbulent. Abans de seguir amb l'explicació de la capa límit cal saber diferenciar cadascun d'aquests 2 règims. Depenent de les característiques, de la direcció i de la velocitat del fluid tindrem un tipus de flux o altre.

2.2.4.2 Flux laminar

És el fluid que es desplaça amb un mateix volum i direcció de forma ordenada movent-se en làmines paral·leles sense entremesclar-se entre elles. Cada partícula de flux segueix una trajectòria suau denominada també línia de corrent. En la *imatge 28* es pot apreciar la forma del fluid.

Laminar Flow

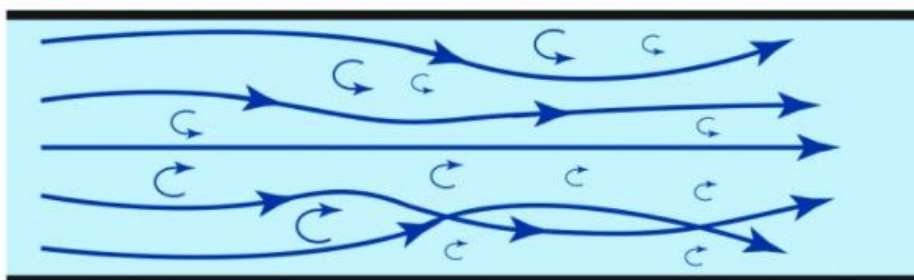


Imatge 28: Direcció d'un flux laminar

2.2.4.3 Flux turbulent

És el fluid que es desplaça en diferents direccions de forma clarament desordenada on les trajectòries de les partícules formen remolins, o més conegut en termes aerodinàmics com a vòrtexs, al llarg del recorregut. A la *imatge 29* es pot apreciar la forma del flux.

Turbulent Flow



Imatge 29: Direcció d'un flux turbulent

Perquè es produeixi el canvi entre un flux laminar i un de turbulent, depèn en gran part de la velocitat a la que es troba el fluid, a part d'altres factors com la densitat, la viscositat o la distància que recórrer el fluid. Aleshores si s'augmenta la velocitat del fluid serà més probable que el flux passi de l'estat laminar a turbulent passant sempre per l'etapa de transició (explicada en l'apartat 2.2.4.5) i quan succeeix el contrari, al baixar la velocitat el fluid passarà de turbulent a laminar.

El factor que ens determina si el flux es troba en un règim o altre és el número de Reynolds, que mitjançant una fórmula matemàtica permetrà saber el règim en tot moment del flux que està exposat el cos a estudiar.

2.2.4.4 Número Reynolds

El nombre de Reynolds és un dels nombres adimensionals més importants de la mecànica de fluids i, a la vegada, dels més bàsics. Permet, com s'ha dit anteriorment determinar si un flux és laminar o turbulent, per fer-ho es basa en la relació entre les forces d'inèrcia i les forces viscoses d'un fluid.

-Forces d'inèrcia: forces que té un cos que pateix una acceleració o un desacceleració. Es pot expressar com el producte de la massa i l'acceleració:

$$F_i = m \cdot a^2$$

Aplicant aquesta definició a un fluid, es pot expressar com:

$$F_i = \rho \cdot v^2 \cdot L^2$$

On:

ρ és la densitat

v és la velocitat de el fluid

L és una longitud característica

-Forces viscoses:: forces que s'oposen a el moviment lliure de el fluid pel fregament intern de les seves partícules. Es pot expressar com:

$$F_v = \mu \cdot v \cdot L$$

Així doncs fent el quocient entre ambdós forces obtenim Reynolds Re :

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

Obtenint un Re petit, les forces viscoses són més importants que les forces d'inèrcia. Això implica que la viscositat del fluid provocarà que el moviment de les partícules sigui ordenat. És a dir, les trajectòries de les seves partícules no es creuaran ni es mouran per "capes", propi d'un **flux laminar**.

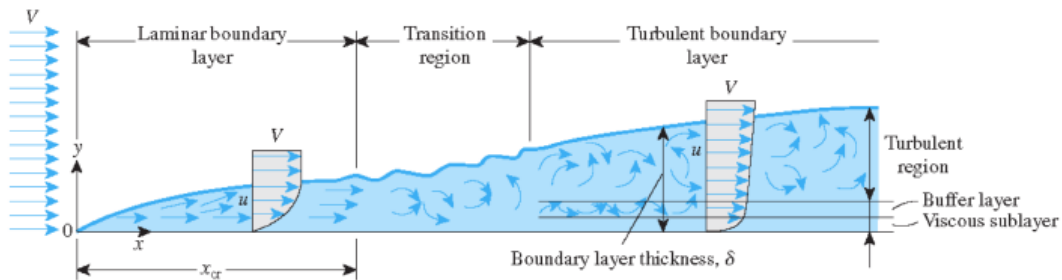
Si per el contrari obtenim un Re gran, les forces d'inèrcia dominaran sobre les forces viscoses. Significa que la velocitat de el fluid és tan alta que la viscositat no és suficient per impedir que les partícules de el fluid es moguin de forma desordenada i caòtica. En efecte, tenim un **flux turbulent**.

Aleshores tenim el valor de transició entre flux laminar i flux turbulent anomenat número de Reynolds límit, crític o *Rec*. Corresponent a un flux dins de la etapa de transició.

2.2.4.5 Fases capa límit

Així doncs extraient conclusions de les figures i les explicacions anteriors, una capa límit laminar presentarà un flux ordenat, el que originarà una menor fricció entre fluid i superfície. No obstant, el fluid exposat en una capa límit turbulenta presentarà un comportament caòtic, on s'observarà l'aparició de vòrtex que incrementaran la fricció entre el fluid i element.

Entre tots dos tipus de capa límit apareixerà una etapa de transició, on es barrejaran els fenòmens típics de cada model de capa límit provocant un comportament mixta. Les etapes de la capa límit es poden veure en la *imatge 30*



Imatge 30: Etapes de la capa límit

2.2.5 Diferències entre règims

Règim laminar

Quan l'aire en estat laminar circula sobre un cos, per exemple un cotxe, com que el fluid es mou en làmines paral·leles, exerceix poca força en direcció perpendicular a la superfície (downforce) i poca força de drag. A causa del poc downforce, quan un vehicle es troba amb una corba en la carrosseria, pot ser que el fluid no tingui la capacitat de mantenir-se enganxat a ella, produint-se el que es coneix com a "**desprendiment**" de la capa límit". Quan es dona aquesta situació, es genera una zona de baixa pressió i per tant velocitat del flux alta (efecte venturi) que fa que la resistència aerodinàmica a l'avanç (drag) augmenti, no pel fet que augmenti la velocitat, sinó pel fet del desprendiment del fluid en la superfície.

Règim turbulent

En règim turbulent succeeix justament el contrari, les trajectòries irregulars del fluid que formen vòrtex fan que es generin forces en direcció perpendicular a la superfície.

Això té dues conseqüències. D'una banda, si estem estudiant un monoplaça, el fregament amb el monoplaça s'incrementa, creixent el drag causa de la fricció. No obstant això, aquest tipus de flux té més facilitat per mantenir-se enganxat al cos del cotxe quan aquest es troba en corbes o revolts forts.

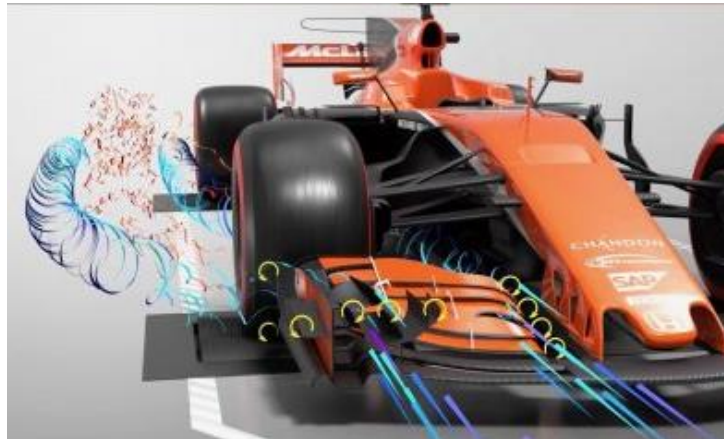
En resum, si la turbulència s'incrementa en gran mesura, la capa límit tendirà a desprendre's del cos, generant una zona de menor pressió, que contribuirà a l'increment de drag o resistència aerodinàmica a l'avanç i augment de força de downforce. Si per el contrari la turbulència disminueix el flux seguirà la capa límit i el drag disminuirà així com el downforce.

Per tant en cotxes de competició l'aerodinàmica pren molta importància i es busca un equilibri entre aquests 2 fenòmens, per una banda a rectes guanyar velocitat disminuint drag i a corbes trobar elements generadors de vòrtex per buscar l'augment de forces de downforce.

2.2.6 Vòrtexs, causa de sorolls i vibracions

Com s'ha explicat en els apartats anteriors, els vòrtexs són fluxos d'un fluid turbulent, en aquest cas el fluid és l'aire que es troba en rotació formant espirals.

Un exemple el podem veure en la *imatge 31* on es representa en CFD la part d'aleró davanter de un monoplaça de F1 que està sotmès a un cert vent on es veu representat només la part inferior esquerra, enfocant-se en els vòrtex que genera l'aleró davanter.

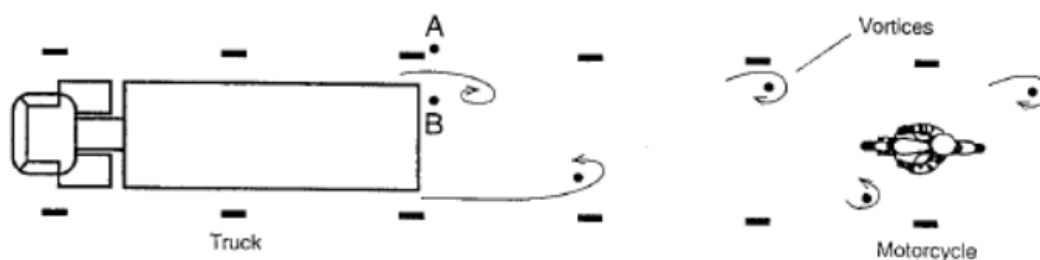


Imatge 31: Generació de vòrtex per a l'aleró davanter de un McLaren F1

Els vòrtex a part de ser generadors de forces perpendiculars en direcció el terra (downforce) són la causa de sorolls i vibracions quan un cos és situat darrere d'aquests corrents de vent.

Això passa sovint en el motociclistes quan es col·loquen darrere d'un cos gran, generador de vòrtex com és el cas de tràilers de grans dimensions. Es pot veure representat en la *imatge 32* on un motociclista es troba darrere d'un tràiler.

La situació és la següent, a més velocitat del vehicle davanter, més velocitat de l'aire que impactarà amb el camió, aleshores tindrem grans diferències de pressions i velocitats en diverses zones. Pel que fa a la zona lateral del camió, la pressió és mínima i per tant la velocitat de l'aire serà molt gran i el flux acostumarà a ser laminar. Pel que fa a la part posterior del camió tal hi com veiem en el dibuix es comencen a generar uns vòrtex, el que significa que el flux passa de laminar a turbulent i la velocitat de l'aire disminueix i conseqüentment la pressió al darrere del camió és molt forta, fet que provoca vibracions i soroll en la motocicleta que està situada al darrere. Aleshores com més a prop estigui situada la motocicleta de la part posterior del camió més fortes seran tant les vibracions com els sorolls molestos que poden perjudicar a la conducció del motociclista.



Imatge 32: Generació de vòrtex en la part final del camió que repercuteix en el motociclista que va al darrere

2.3 Mètodes per evitar el despreniment de la capa límit aplicat als cascs de motociclisme

Els enginyers del departament de Innovació & Disseny dedicat a la aerodinàmica són els encarregats de trobar formes per millorar el màxim possible la eficàcia del casc en termes d'aerodinàmica. En alguns casos es busca evitar el despreniment de la capa límit i a vegades, quan no hi ha cap altra forma es busca retardar aquest moment. A continuació s'expliquen els mètodes més utilitzats amb exemples.

2.3.1 Mètodes de generadors de vòrtex

En aerodinàmica els generadors de vòrtex s'utilitzen per retardar el despreniment de la capa límit, estan situats en localitzacions estudiades on es comença a desprendre's la capa i d'aquesta manera, col·locant aquests generadors s'aconsegueix obtenir uns centímetres més de flux laminar abans que es transformin en fluxos turbulents.

Per tant, tot i que en principi el seu objectiu és el de crear vòrtex, obtenir un flux dispers i turbulent, el que s'aconsegueix és allargar el flux laminar i de cop generar petits vòrtex i obtenir pressions més baixes a velocitats del fluid més altes (a les que hi havia anteriorment sense el generador de vòrtex). És a dir, el generador de vòrtex es col·loca estratègicament en la posició, on per la forma del cos es comença a desprendre's la capa límit i d'aquesta manera es creïn petits vòrtex més controlats que minimitzen la turbulència.

Com a mètodes generadors tenim 2 grans grups:

-Turbuladors: és el més freqüent i el més utilitzat per la generació de vòrtex i el despreniment de la capa límit en qualsevol cos que ho requereixi.

Aplicat al treball, existeixen varis models de casc de motociclisme amb turbuladors, la seva forma estètica capta la atenció (tant per bo com per dolent) donant una visió diferent en els cascs convencionals.

En la *imatge 33 i 34* tenim un exemple de models del mercat amb un turbulador afegit i en la *imatge 35* el model de casc de Jorge Lorenzo pilot de motociclisme que va fer servir durant unes carreres amb la incorporació també de turbuladors en la part frontal i dues entrades d'aire als costats.



Imatge 33: Incorporació de un turbulador frontal amb el disseny de 3 esgraons pronunciats



Imatge 34: Turbulador frontal



Imatge 35: Turbuador frontal i en els costats, dues entrades d'aire que surten per la part posterior del casc

-Rugositat: mètode per afavorir el desprendiment de la capa límit. Consisteix en aplicar petits foradets molt junts per aconseguir crear una superfície no plana de manera que sigui rugosa. En la *imatge 37* es pot apreciar la forma d'aquest forats en un casc de bicicleta.

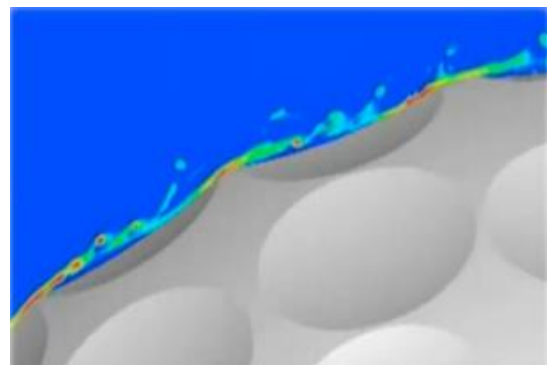
Aquesta estratègia no és gens freqüent en el món industrial en el disseny de vehicles, avions, o en el cas d'aquest treball en els cascs de motociclisme. Sí que s'ha vist algun cop en dissenys extraordinaris de cascs competitiu de bicicletes en alguna crono-rellotge.

El propòsit és el que es veu en la *imatge 36* en la simulació en CFD del casc de bicicleta. El que es busca es obtenir petits vòrtex controlats, sense obtenir velocitats de l'aire no molt elevades per aconseguir que el flux d'aire no es desprengui, generant zones d'altres pressions (final i inici de la forma ovalada) i zones de pressions més baixes (punt entremig de la forma còncaua). Aleshores, En les zones centrals del forat es veuen els petits vòrtex generats on la pressió serà baixa i velocitat alta mentre que el final i el principi del forat s'obté un flux més veloç i més enganxat el cos.

Dit d'una altra manera, es busca el desprendiment de la capa límit però de forma controlada, evitant que el fluid d'aire es separi del tot.



Imatge 37: Casc de bicicleta real on s'empra el mètode de la rugositat per obtenir un flux més uniforme en tot el recorregut del fluid per el casc



Imatge 36: Anàlisi amb CFD d'un casc com el de la imatge 37 on es veuen les zones de més pressió (marcades amb Vermell) i menys pressions (marcades en blau)

2.3.2 Mètodes de reducció de drag

Pel que fa a mètodes de reducció de la resistència aerodinàmica, pren molta importància el disseny de les formes i en general el disseny conjunt. El que es busca és evitar el desprendiment de la capa límit en tot moment fins al final de l'element.

És cert que amb un casc és difícil obtenir un disseny 100% aerodinàmic ja que el disseny és força limitat degut a que el casc s'ha d'adequar a la forma del cap d'una persona i no superar grans dimensions per tenir un sobrepès i causar qualsevol dany a la persona que el porta. A més a més, l'objectiu principal es regeix en la seguretat del conductor i molts dels dissenys de cascs avui en dia deixen de banda la aerodinàmica i es centren en la protecció.

No obstant els enginyers i fabricants de casc de motocicletes a nivell competitiu estudien les millors formes de disseny per obtenir una protecció excel·lent i a la vegada obtenir un rendiment aerodinàmic a nivell de reduir al màxim el drag.

Aleshores pel que fa a cascs de motociclisme els mètodes purs reductors de drag són les entrades d'aire i incidir en el flux aigües avall (en la part final del casc que incideix a l'esquena del pilot)

-Entrades d'aire: Mètode molt utilitzat en els cascs de competició amb diferents varietats de formes. Consisteix en aplicar una entrada d'aire en la zona que amb més força i velocitat incideix el vent sobre el casc. Aquesta zona sol ser a la part de sobre el casc que en la posició de velocitat en rectes del pilot és la que rep la major part del fluid directament (depenent de la posició del pilot la zona on anirà col·locada l'entrada d'aire variarà uns centímetres amunt o avall).

El funcionament és simple: gran part del fluid entra per l'entrada d'aire i segueix el seu camí fins a la sortida en la part de darrere del casc. El que s'aconsegueix és que gran part del fluid es quedi enganxat a la superfície del casc i d'aquesta manera aconseguir un flux laminar sense turbulències.

A part d'actuar com a element aerodinàmic, en la majoria d'entrades d'aire hi ha un orifici a la part interior del casc que actua com a element per evaporar la suor i humitat que hi ha en l'interior, mitjançant una corrent d'aire que circuli per la part de dins.

L'exemple bàsic d'aquesta aplicació es veu en la *imatge 38*, on es veu la imatge del casc de Nicky Hayden (expilot de MotoGP) on l'entrada d'aire es troba a la part de dalt del casc, a sobre de la visera del pilot; i la sortida just on comença la forma de la part posterior del casc (*imatge 39*).



Imatge 38: Vista isomètrica del casc de Nicky Hayden



Imatge 39: Vista posterior del casc de Hayden on es veuen les sortides d'aire, unes més petites a la part de sobre i les principals a sota

En la *imatge 40* hi ha un altre exemple d'aplicació del mètode. En aquest cas, l'entrada d'aire és més reduïda i no forma part del conjunt del casc, correspon a una peça que segons la posició del pilot és més efectiva aerodinàmicament si es col·loca en una posició o altra i, per tant podria ser mòbil. La diferència respecte l'anterior és que en la part frontal hi ha un turbulador i en la part on comença el canvi entre part de dalt i part superior hi ha incorporada l'entrada d'aire.



Imatge 40: Casc de la marca Arai amb la incorporació d'un turbulador a la part frontal i una entrada d'aire curta a la part posterior

Un altre exemple de la companyia de cascs Arai és el de *imatge 41* on es veu un disseny diferent, que incorpora com el primer cas una entrada d'aire més gran i amb dues sortides incorporades, una a la part de dalt del casc i l'altra a la part posterior com en el primer cas (*imatge 38*).

El que s'aconsegueix en aquest tipus de disseny és l'obtenció de dos flux d'aire en diferents direccions. Un flux que seguirà en tot moment l'entrada d'aire i sortirà per la part final d'aquesta, on es buscarà el mateix objectiu que en el casc de Hayden. I l'altre flux, que sortirà per la primera entrada on incidirà fins a la forma més pronunciada sense desprendre's del cos degut a la forma plana i recta del casc i incidirà sobre l'esquena del pilot on transcorrerà aquest flux.

Per tant el disseny d'aquests casc és força innovador ja que combina els dos mètodes, l'entrada d'aire i disseny del flux aigües avall i es busca en tot moment que el flux d'aire vagi el més recte possible sense generar turbulències (en la zona posterior es redueixen les pressions) i que per una part el fluid vagi esquenes avall del pilot i l'altre recorri tot el perfil del casc.



Imatge 41: Model de casc Arai on incorpora les entrades d'aire i a la vegada el flux d'aigües avall

Pel que fa a entrades d'aire que no van incorporades directament en el disseny del casc i que són peces individuals, n'hi ha de varis tipus amb funcions similars entre elles.



Imatge 42: Entrada d'aire curta mòbil



Imatge 43: Entrada d'aire llarga mòbil



Imatge 44: Entrada d'aire mòbil incorporada a un casc de motociclisme

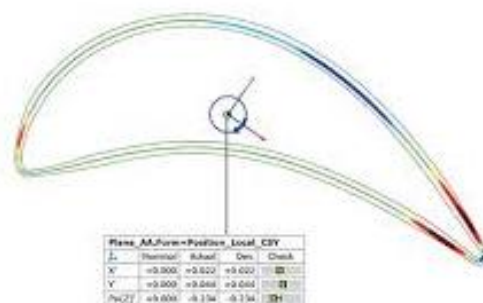
-Flux aigües avall: Mètode que per defecte trobem en gairebé tots els cascs de competició sobretot especialitzats per a circuits on hi hagi rectes molt llargues i la velocitat punta que s'agafi sigui molt alta.

Consisteix en aconseguir un perfil aerodinàmic en la part superior del casc per reduir el màxim possible el drag. És per això que si comparem la forma d'un casc on es busqui aquest mètode (l'obtenció d'un flux molt laminar i enganxat el cos) amb un perfil alar (airfol), es veuen moltes similituds respecte l'un i l'altre pel que fa a la idea de disseny de la part de sobre del casc.

Aquest factor es veu molt pronunciat en els cascs de bicicleta professionals especials per a curses de crono-rellotge (curses en solitari amb rectes molt llargues) per aprofitar en gran part la força de l'aire perquè incideixi el més mínim en la resistència a l'avanç i la trajectòria del ciclista. En les *imatges 45 i 46* podem veure una imatge comparativa del factor esmentat en els cascs de bicicleta (imatge real comparat amb un perfil alar).



Imatge 45: Casc de bicicleta totalment aerodinàmic per a curses de crono-rellotge



Imatge 46: Perfil alar molt similar a la forma del casc de bicicleta

En els cascs de motociclisme la semblança és raonable vist els cascs de crono-rellotge de bicicleta. A continuació es presenten diferents imatges on es veuen algunes de les formes per aconseguir un flux aigües avall el més laminar possible sense la formació de turbulències.

En la *imatge 47* es veu representat el casc de Jorge Lorenzo ja esmentat anteriorment per l'entrada d'aire, però en aquesta imatge es pot apreciar la forma posterior del casc que s'allarga la forma de la zona posterior per incidir directament sobre l'esquena del pilot obtenint un flux de baixes pressions però a velocitats molt altes.



Imatge 47: Casc de Jorge Lorenzo on es busca la incidència del flux aigües avall

En la *imatge 49* veiem el casc de Valentino Rossi, on el disseny és molt similar a la versió de Jorge Lorenzo. En aquest cas, no és el mateix relleu del casc sinó que és un element anomenat spoiler o apèndix que actua com a "aleró" situat a la part posterior, el que fa que en l'aspecte estètic sigui més atractiu. A part, en la zona frontal també disposa de 2 entrades d'aire.

En la *imatge 48* es veu el casc de diferent color vist des de la part frontal, on es veuen clarament les dues sortides d'aire així com la part elevada (spoiler) que fa que el fluid vagi el més recte possible, retardant el despreniment quan sobrepassi la part del casc.



Imatge 49: Casc de Valentino Rossi en vista lateral



Imatge 48: Casc de Valentino Rossi en un altre color en vista posterior

Altres exemples de dissenys similars es veuen en *imatges 50 i 51*, són models del pilot de Moto GP Marc Márquez que ha portat en alguns campionats en els darrers anys. Com es veu el disseny es una mica diferent però amb la mateixa idea, obtenir un flux de grans velocitats durant tot el transcurs en la part de sobre del casc i que acabi transcorrent en l'esquena del pilot.



Imatge 50: Casc de Marc Márquez en vista lateral



Imatge 51: Casc de Marc Márquez temporada 2021 en vista lateral

Vistos varis exemples de cascs convencionals i casc més enfocats en la competició podem veure clarament que en els cascs de competició pren una gran importància aconseguir un flux molt laminar que acabi incidint en l'esquena del pilot en comparació amb els cascs més convencionals on es premia més l'estètica i la seguretat del casc abans que l'obtenció de models aerodinàmics.

Aleshores seguint els models de cascs competitius els elements més importants són:

- ✚ Entrades d'aire → presents en la majoria de cascs de MotoGP
- ✚ Disseny de flux d'aigües avall → spoilers, presents en els darrers models de casc de Moto GP i en l'actualitat

Els turbuladors i rugositats costen més de veure ja que són més complicats d'aplicar i pel que fa el nivell estètic no són gaire agradables.

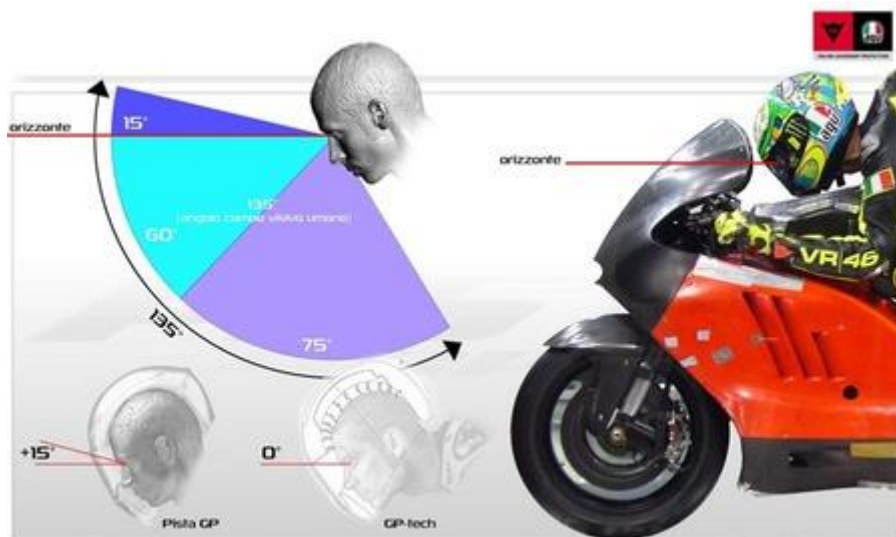
2.4 Importància de la posició del pilot i la forma del casc en rectes

En el present estudi, la posició del casc alhora de fer les simulacions és vital per obtenir uns resultats el més reals possibles, és per això que en aquest apartat es destaca la posició del pilot i l'angle del casc respecte l'horitzontal.

2.4.1 Angle de visió i inclinació d'un pilot en rectes

Els cascs de competició es fan a mida a les necessitats i les costums del pilot. És a dir, no tots els pilots fan servir la mateixa inclinació del dors ni el mateix angle de la cara amb la part horitzontal. Tot hi això hi ha un estàndard en què s'ha fet varis estudis demostrant que hi ha un rang d'inclinacions més eficients que altres:

En la *imatge 52*, es mostra un resum de forma gràfica de l'estàndard estudiat en la posició del pilot en recta.



Imatge 52: Angle de visió del pilot en recta

Destacar que l'angle de visió ideal del pilot correspon a 15° sobre la línia d'horitzó horitzontal més els 60° que té cap a sota, limitat 75° degut a la visera.

Aleshores, la posició perfecte del pilot sobre la moto en recta seria la vista en la *imatge 53*, on paral·lelament, es veu el disseny de l'armadura en la part superior de l'esquena on a part d'actuar com element de seguretat actua com a superfície perquè l'aire circuli de forma homogènia i laminar i segueixi el relleu de l'apèndix fins acabar en la part de les lumbrals.



Imatge 53: Posició idònia del pilot en recta

2.4.2 Comparació de la posició de dos pilots en recta

A part de la imatge anterior, feta al laboratori per estudiar quina és la posició més bona en termes aerodinàmics, a continuació en les *imatges 54 i 55* es veuen dues representacions reals de 2 pilots professionals en què es poden apreciar algunes diferències.



Imatge 55: Valentino Rossi en posició al pas per recta



Imatge 54: Cal Crutchlow en posició al pas per recta

En les imatges s'aprecia la similitud entre ambdues posicions però si que es veuen algunes diferències:

- ✚ La posició de Valentino Rossi es una posició més arrodonida, s'aprecia amb la forma de l'esquena.
- ✚ La posició de Crutchlow és més "plegada", intenta que el centre de gravetat del pilot estigui més baix, més proper a la moto.
- ✚ Una altra diferència important és el "gap" (espai que hi ha entre el final del casc i l'armadura de l'esquena del pilot: Amb Rossi aquest gap és important, el que fa que el flux no sigui tant constant i pugui ocasionar l'aparició de petits vòrtex en aquesta zona (despreniment de la capa límit)
- ✚ En canvi en el cas de Crutchlow l'apèndix del casc està molt proper de l'armadura, la qual cosa faria que el flux fos molt més ràpid i laminar.

Vistes les diferències, les dues posicions són molt bones i la variació de les dècimes obtingudes per la posició aerodinàmica per un o per l'altre es veuria compensada en la potencia del motor o en la posició de frenada dels dos pilots, però és probable que la major velocitat obtinguda en la recta sigui per Crutchlow en el cas que les potències dels motors siguin similars, com és el cas.

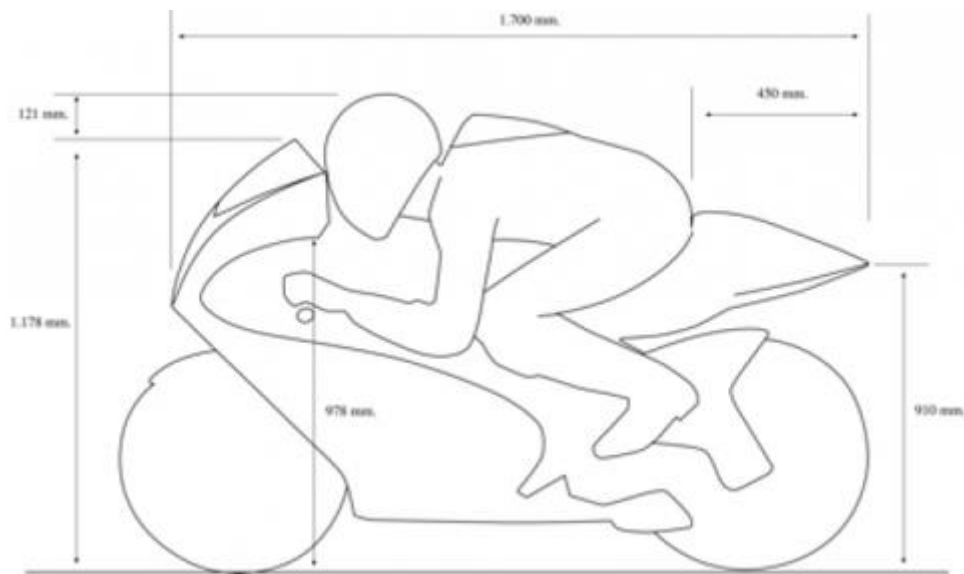
2.4.3 Estudi real de les pressions i velocitats de l'aire d'un pilot de moto GP en recta

Durant la temporada i sobretot abans de que comenci el campionat, els equips de Moto GP professionals treballen en varis estudis per millorar les prestacions de tot el conjunt de la moto-pilot. Pel cas de l'equip d'aerodinàmica, s'encarreguen de l'estudi del disseny de les formes de la moto i casc i també de la influència del pilot en la seva posició en la moto.

Actualment és pràcticament impossible trobar estudis recents aerodinàmics a la xarxa ja que són estudis confidencials i si sortissin a la llum moltes marques, empreses i sobretot els equips adversaris podrien beneficiar-se del treball realitzat.

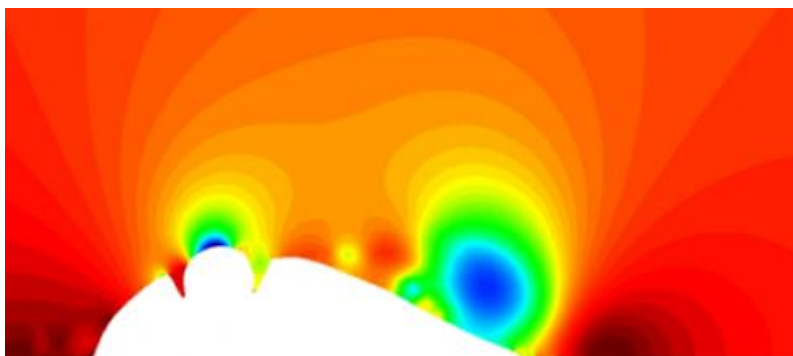
En aquest apartat es presenta un petit estudi real per reduir les vibracions en recta portat a terme l'any 2005 en l'equip de Honda amb la moto de Jorge Lorenzo RSW250 i el casc Spyder de NZI Helmets.

L'estudi es va iniciar per unes protestes de Jorge Lorenzo on en la posició en recta sentia unes vibracions molt molestes que el perjudicaven en la seva conducció i concentració. L'equip va plasmar en 2D la posició del pilot (*imatge 56*) i a continuació es va fer el disseny en CAD per poder-ho simular en CFD en un túnel de vent virtual i poder veure si les pressions i direccions del flux tenien alguna a cosa a veure amb lo succeït.

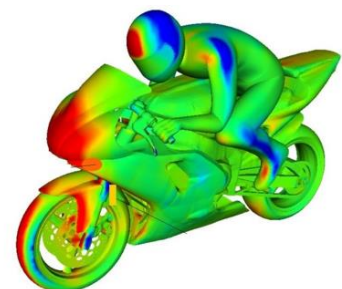


Imatge 56: Esbós en 2D de la posició del pilot en recta

Com es veu en la imatge anterior, a priori no es veu cap irregularitat, però sí que es veu en el diagrama de pressions obtingut en la simulació en CFD (*imatge 57 i 58*):

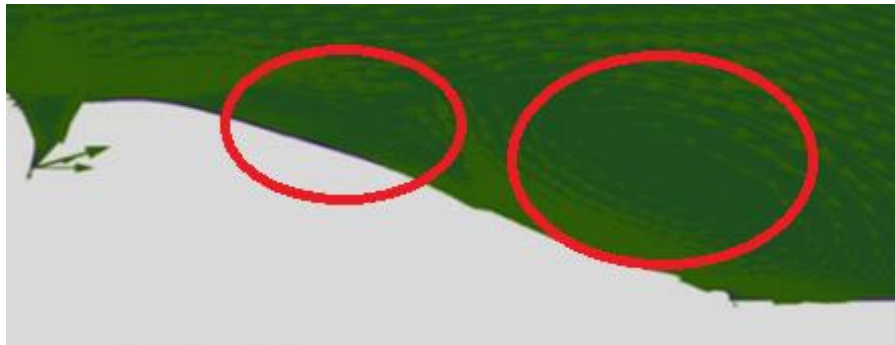


Imatge 58: Diagrama de pressions de la posició conflictiva de Jorge Lorenzo en la moto RSW250



Imatge 57: Vista 3D del diagrama de pressions

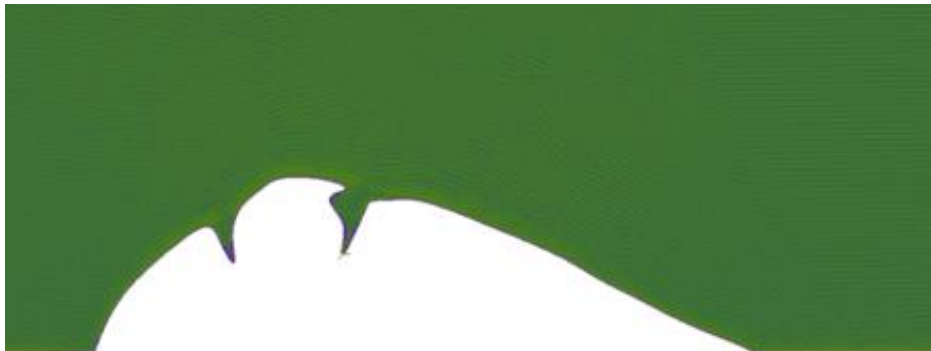
En els diagrames de pressions es va observar com hi havien dues zones de molt baixes pressions en l'esquena del pilot que ocasionava un excessiu gradient de pressions que portaven a la creació d'alguns vòrtexs que causaven aquestes vibracions, tal hi com es veu en la *imatge 59* amb el diagrama de vectors de direcció de flux.



Imatge 59: Diagrama de vectors de flux amb les dues zones de vòrtex encerclades en vermell

La solució que se'ls va ocórrer amb els enginyers de l'equip d'aerodinàmica va ser la incorporació d'un petit apèndix en la part final del casc per igualar les pressions a l'esquena del pilot i fer que el flux sortís el més uniforme possible en la interacció a l'esquena.

El resultat va ser el de la *imatge 60* on les línies de flux són molt més estables i no apareixen vòrtexs. El resultat va ser favorable ja que el pilot en el següent gran premi no va notar les vibracions tant molestes i a més a més va augmentar la velocitat en recta en 5 km/h .



Imatge 60: Diagrama de flux després de la incorporació de l'apèndix en el casc

2.5 Tipus túnel de vent

En qualsevol estudi aerodinàmic de qualsevol element, aquest s'ha de sotmetre a simulacions en CFD o en el cas que hi hagués disponible, en túnels de vent reals, per veure el comportament d'aquest vers les modificacions pertinents que es vagin aplicant.

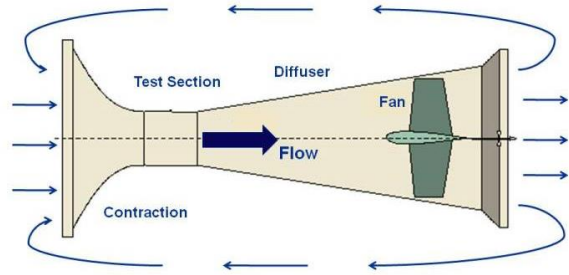
Abans d'iniciar-se amb les simulacions és necessari oferir una visió dels tipus de túnel de vent que es fan servir en les companyies industrials, més concretament en el sector automobilístic.

Hi ha 3 formes principals de circuits d'aire en els túnels de vent utilitzats per a automoció a gran escala:

-Circuit obert (EIFFEL) → Túnel de vent reduïts pensat per simular objectes a escala reduïda, el ser un circuit obert és sorollós i necessita de molta potència per la generació d'aire però l'aplicació és ràpida i cost reduït així com pocs problemes d'ús.



Imatge 61: Túnel de vent real de tipus Eiffel de circuit obert

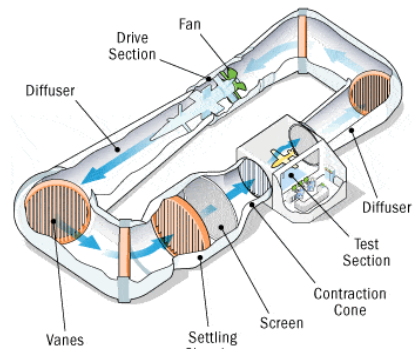


Imatge 62: Esquema parts i direcció del flux en un túnel de vent de tipus Eiffel obert

-Circuit tancat (retorn simple) → Circuit tancat on el flux és més controlat, pot ser construït de grans dimensions i el soroll i la potència són més reduïts en comparació amb el túnel de circuit obert. És car i és necessari el control de temperatura de l'aire durant el transcurs de la simulació per evitar temperatures molt elevades.

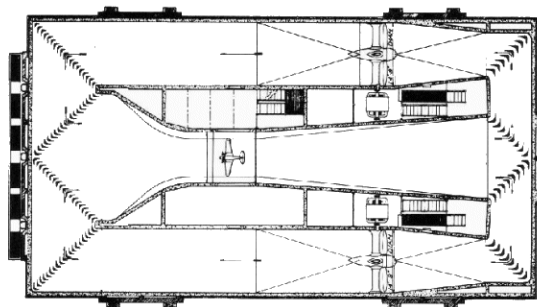


Imatge 63: Túnel de vent real de tipus tancat (retorn simple)



Imatge 64: Esquema parts túnel de vent tancat (retorn simple)

-Circuit tancat (retorn doble) → Mateixes característiques que el túnel de circuit tancat de simple retorn la diferència és que el retorn de l'aire es produeix per 2 bandes el que permet una major velocitat de l'aire.



Top View of Kirsten Wind Tunnel

Imatge 65: Esquema de un túnel de vent de circuit tancat de doble retorn

Per el cas del present estudi, No es requereix de un túnel de vent real que hagués permès realitzar el treball de forma pràctica afegint modificacions en un casc real. Per tant, alhora de fer les simulacions amb diferents models de cascs dibuixats amb el programa CATIA V5, es farà servir el programa de CFD “HyperWorks CFD 2021” de la companyia ALTAIR disponible per a estudiants en els ordinadors de la UPC i amb llicència gratuïta per descarregar en els ordinadors personals.

Abans de sotmetre el cos a estudiar pel túnel de vent virtual se li ha d’aplicar un mallat que es farà igualment amb el programa “HyperWorks CFD 2021”. La intenció és elaborar un mallat correcte, suficient per veure com els resultats varien depenent de les modificacions que es vagin afegint en el casc.

3- Selecció de models CAD per a la realització de l'estudi

En un primer moment la intenció era fer un disseny propi de casc en 3D però degut a la complicitat per crear un model que fos útil per a les properes modificacions es va decidir agafar un model ja creat.

No obstant, després de nombrosos problemes amb el CAD escollit, i amb un debat amb el tutor del treball es va optar per elaborar un disseny propi molt senzill en CAD.

Després de realitzar una recerca intensa per les diferents pàgines web on es poden obtenir models en 3D en format STEP es van seleccionar 5 models a escollir. Que són els següents:

Model 1



Figura 1: Vista isomètrica 1r model de casc trobat a Grabcad



Figura 2: Vista lateral 1r model de casc trobat a Grabcad

1r model trobat en la base de dades de Grabcad, però no acaba de convèncer per a dur a terme els retocs necessaris per a l'estudi. Part de la visera molt extensa i la part frontal conté una forma "abombada" una mica estranya no gaire vista en models de casc reals.

Model 2



Figura 3: Vista frontal model 2 trobat a Grabcad



Figura 4: Vista posterior 2n model

Model extret també de Grabcad, però com es veu en les figures superiors, és un model més desenvolupat en el que ja incorpora entrades d'aire i la forma de la part posterior per millorar el flux aigües avall. Aleshores ja incorpora un parell de modificacions respecte el casc base i per elaborar el treball present el que interessa és partir de zero.

Model 3

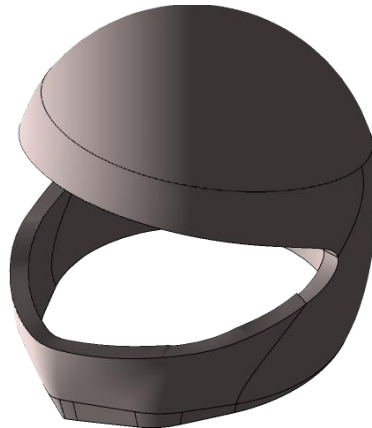


Figura 5: Vista isomètrica del 3r model

Model bàsic fet amb SolidWorks on no incorpora visera ni elements de protecció ni elements interiors. Té una forma molt arrodonida i s'allunya de la semblança d'un casc real.

Model 4



Figura 6: Vista isomètrica 4t model

Model bàsic molt semblant als cascs convencionals d'avui en dia. Podria haver sigut una gran elecció perquè té una forma bàsica sense cap forma ni element incorporat, però donava molts problemes a l'obrir el conjunt en CAD.

Model 5



Figura 7: Vista frontal 5è i últim model



Figura 8: Vista lateral 5è model

Model a escala real, que incorpora varis elements que contenen avui en dia tots els cascs convencionals, amb visera mòbil i totalment ergonòmic.

Dels anteriors models hi va haver el dubte entre els dos últims models però finalment es va escollir l'últim ja que és el més semblant als cascs convencionals d'avui en dia i amb el que es poden extreure conclusions més reals dels 5 models. Un altre motiu és que els diferents elements surten desglossats en l'arbre del programa del CAD i per realitzar la simulació es podria treure algun element que no interessés.

Aquest model s'ha extret de la base de dades de Grabcad on es poden trobar diferents models de màquines i elements gratuïts.

3.1 Model seleccionat en 3D i característiques

El model escollit va ser en un principi el model 5 presentat en l'apartat anterior, i a continuació amb les figures següents, vistes de diferents perspectives (imatges capturades en el programa CAD amb què es treballarà) es veu amb més detall la forma del casc i les seves característiques.

Vistes laterals

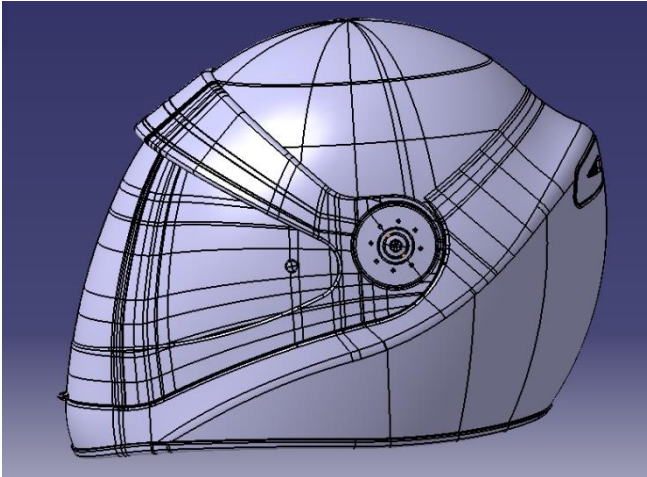


Figura 9: Vista lateral 1 del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA

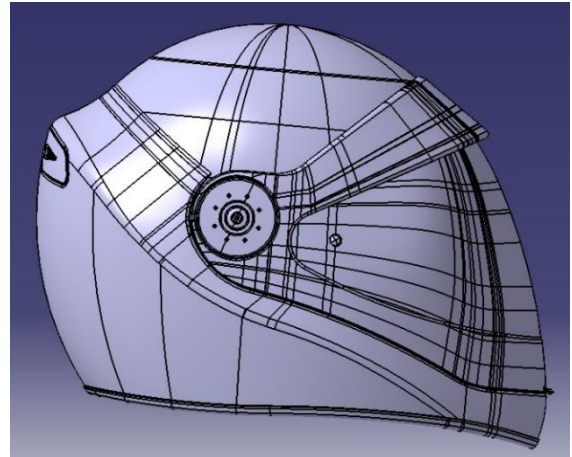


Figura 10: Vista lateral 2 del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA

Vista frontal i vista posterior

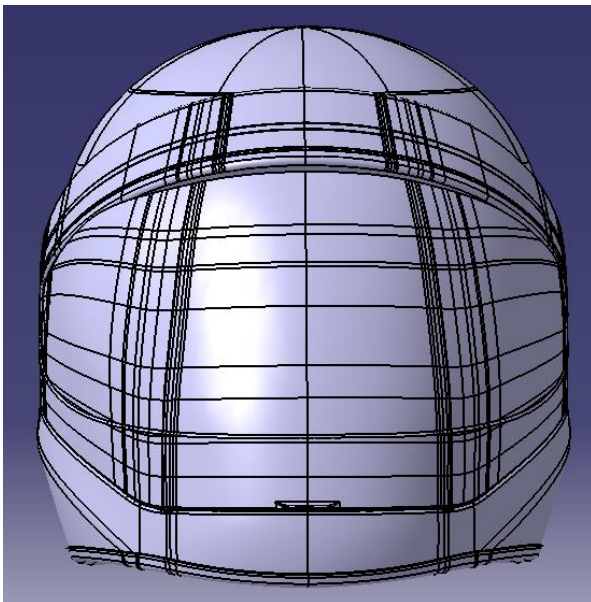


Figura 11: vista frontal del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA

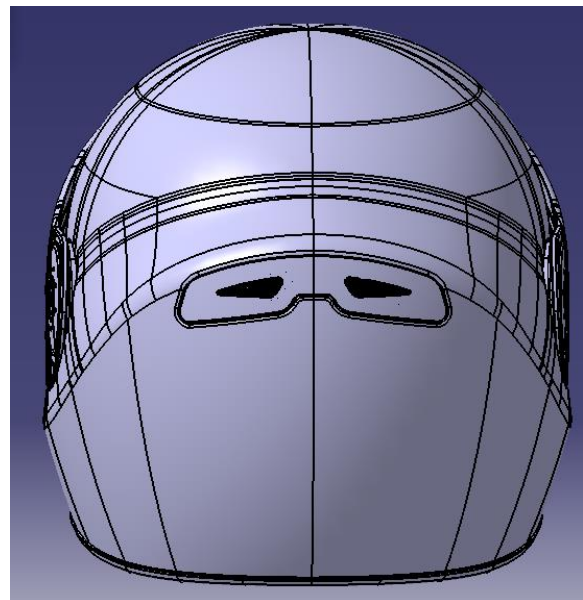


Figura 12: Vista posterior del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA

Vista planta i superior

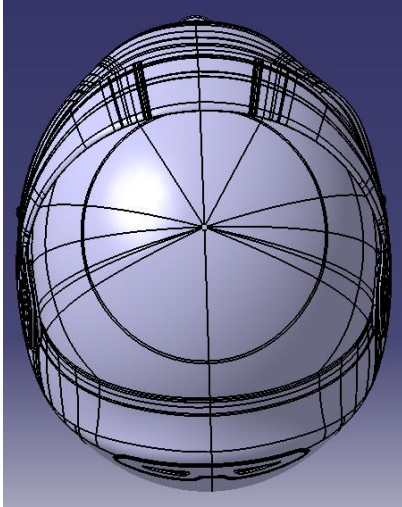


Figura 13: vista des de Dalt del casc a estudiar extret del model en CAD amb CATIA

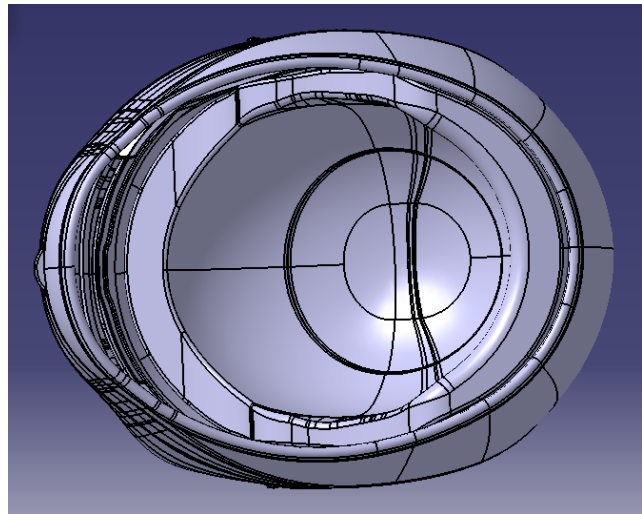


Figura 14: Vista des de sota del casc a estudiar extret del model en cad amb CATIA

Mesures principals (exterior)

Llargada → 280 mm

Amplada → 207 mm

Alçada → 245 mm

Per desgràcia alhora de fer les simulacions en el software CFD es va trobar que el model tenia més de 4000 superfícies, la qual cosa feia que el programa es col·lapsés i no s'avançés en les simulacions.

No es va aconseguir elaborar cap anàlisi degut a la multitud d'errors superficials que hi havien i la complexitat del model.

Aleshores es va decidir amb el tutor generar un model propi de forma molt senzilla i poder veure així amb més diferència els canvis aplicats des del model base.

El model és el següent (figures 15, 16, 17 i 18):

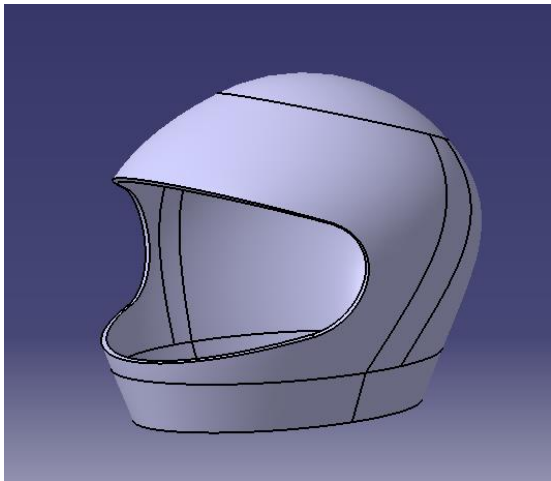


Figura 15: Vista isomètrica model propi base a estudiar

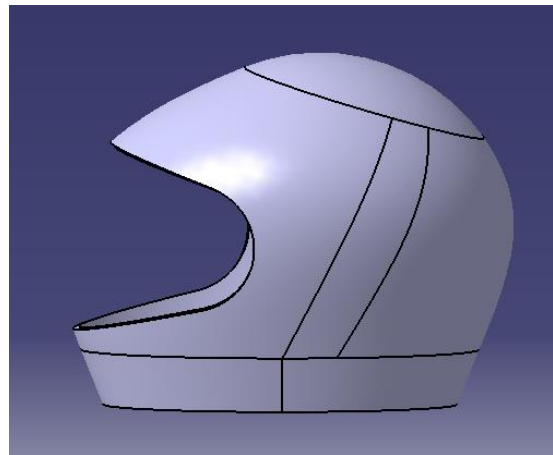


Figura 16: Vista lateral model propi base

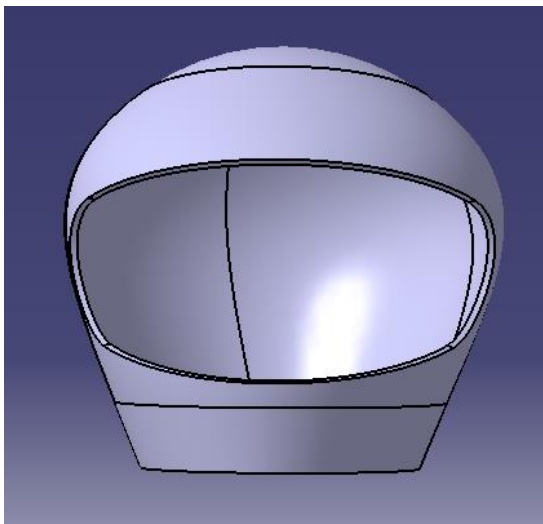


Figura 17: Vista frontal model propi base

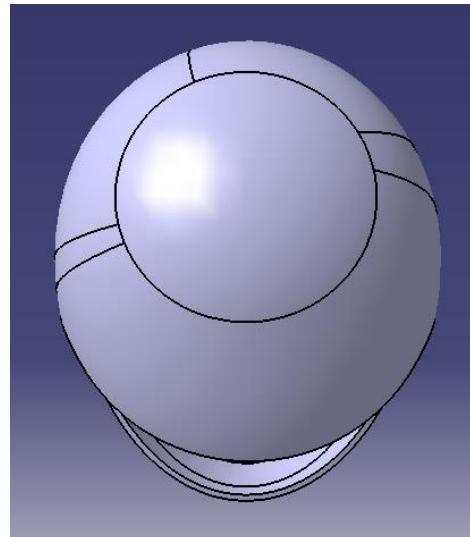


Figura 18: Vista superior model propi base

Mesures principals

Gruix: 3 mm

És un gruix reduït per evitar errors de intersecció alhora de donar-li volum al sòlid. Com és aquest cas que només ens interessa simular la part exterior del casc (closca) el gruix no es tindrà en compte en cap moment.

Llargada exterior → 222 mm

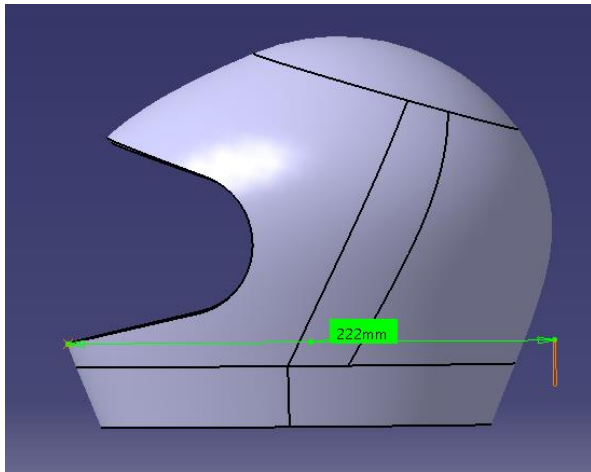


Figura 19: Llargada exterior casc propi base

Llargada interior: 172 mm

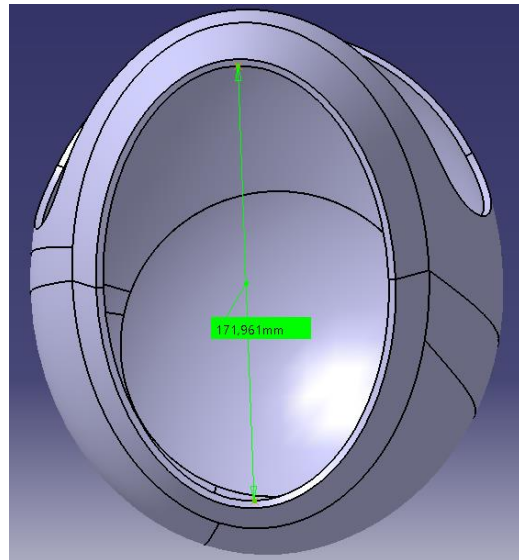


Figura 20: Llargada interior casc propi base

Amplada → 180 mm

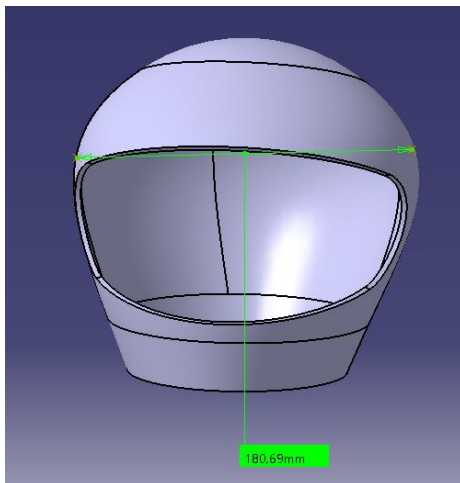


Figura 21: Amplada exterior casc propi base

Alçada → 178 mm

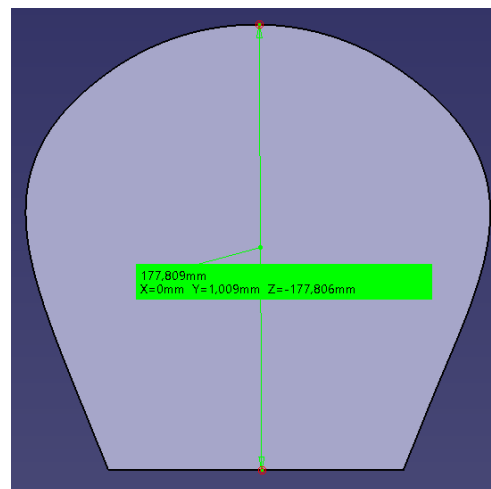


Figura 22: Alçada exterior casc propi base

Cal comentar que el casc està dibuixat a escala reduïda i les dimensions, així com la forma del casc, s'allunyen una mica dels models comercials que es venen avui en dia a la realitat. Posant com a exemple mesures reals, el nostre casc estaria a escala 3/4 De la realitat (comparant-ho amb un casc d'adult) i mides similars a un casc de nen. Aquesta relació s'ha determinat a partir de mesures de 2 cascs reals:

1ª opció casc base dibuixat amb mides estàndards:

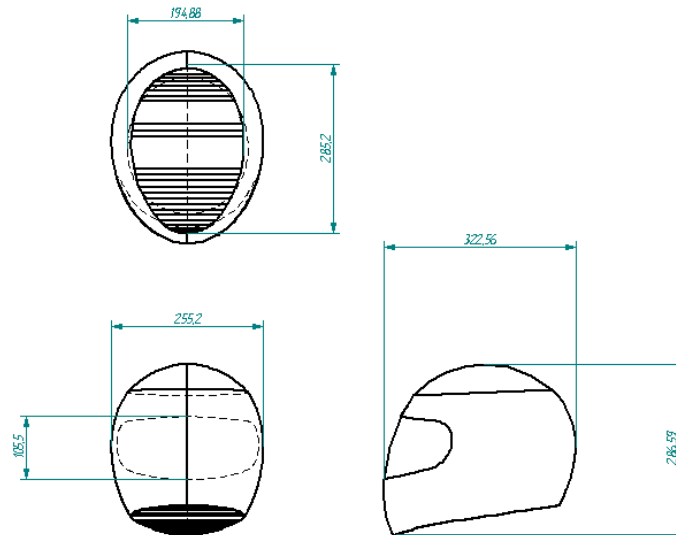


Figura 23: Mides estàndards casc de competició

2a opció (font més fiable) casc Agu, casc comercial que correspon a un dels més venuts en el mercat

Per assegurar-nos de mides estàndards de cascs reals i d'establir l'escala del nostre casc també s'han mesurat manualment el casc K1 MONO ECE2205 - MATT BLACK (propietat del autor del treball) de la marca AGU. Les mides exteriors són les següents:

Amplada 22 cm, llargada 30 cm, altura 23 cm.



Figura 24: Casc AGU per verificar mides d'un casc de competició

4- Anàlisi CDF

Es durà a terme el primer anàlisi en CFD. Per fer-ho s'haurà de passar el CAD en format STEP exportar l'arxiu en el programa Hyperworks CFD 2021 on validarem el model i elaborarem el mallat.

Per evitar problemes de simulació en el túnel de vent hem d'assegurar-nos que el casc es comporti com a un sòlid, és a dir, que no contingui forats per on pugui interferir de forma errònia l'aire.

Per tant el forat per on ens posem el casc i el forat on va incorporada la visera s'haurà de tancar (figures 25 i 26)

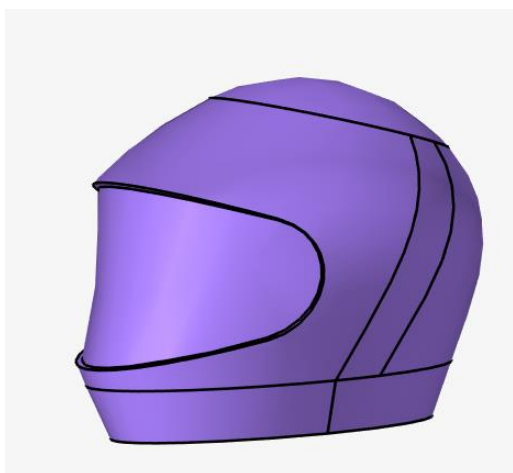


Figura 25: Casc base llest per a simular amb visera i forats tapats

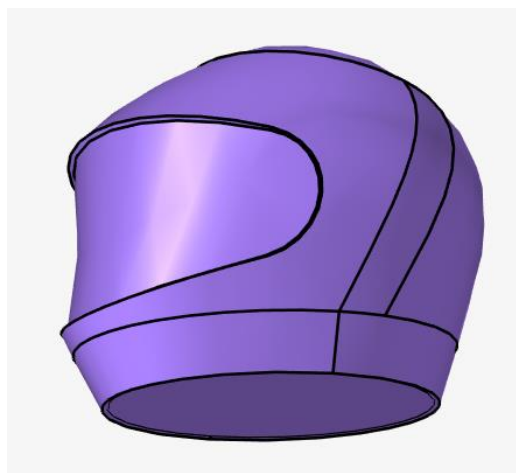


Figura 26: Casc base, llest per a simular amb visera i forat tapats

4.1 Validació del model i condicions de contorn

El primer pas abans d'elaborar la malla és verificar que el model no tingui errors, per exemple interferències, cantonades lliures, cantonades punxegudes, etc.

El software utilitzat permet eliminar aquests errors i d'alguna manera retocar el sòlid final perquè sigui totalment homogeni.

Al ser un model simple només ens hem trobat un contorn obert com a resultat de la intersecció entre el model del casc propi i la visera creada. Aleshores només s'ha hagut de combinar i automàticament el programa ha resolt els errors.

Un cop tenim el model validat es dividirà el cos en dos per la meitat i que sigui tot sòlid, per facilitar el càlcul.

Acte seguit s'assignarà la dimensió del túnel de vent. En la figura 27 es veu la dimensió escollida per a aquesta simulació amb les mesures corresponents en metres, així com les del túnel refinat que s'aplicarà a posteriori:

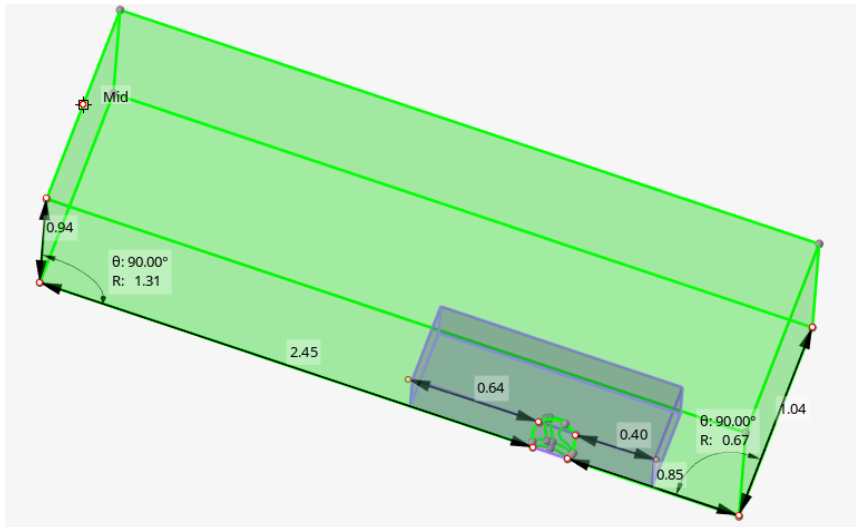


Figura 27: Dimensions túnel de vent

Finalment abans de la malla se li assignaran unes condicions de contorn al túnel de vent i se li farà un túnel més refinat per definir el major possible la mida del mallat en el contorn del casc.

Les condicions de contorn són simples i són les que es veuen en la figura 28 on s'assigna:

- ✚ Condició **inlet (entrada)** en la cara frontal, important remarcar que és en l'eix Z, en aquest cas. El valor és de 83 m/s, que equival a **300 km/h** (velocitat Intermèdia en zona de rectes en els circuits de Moto GP).
- ✚ condició de **slip (lliscament)** en les cares superiors, inferiors i zona externa perquè d'aquesta manera el fluid, en aquest cas l'aire, es comporti de forma normal i pugui interferir en aquestes zones del casc, tal hi com ho faria en la realitat.
- ✚ Condició de **symmetry** (simetria) en la cara interior on hem tallat el principi el casc en dues parts iguals perquè es comporti com un cos simètric encara que l'altre part hagi quedat suprimida.
- ✚ Condició **outlet (sortida)** en la part posterior del casc on no interferirà cap factor que pugui alterar els resultats de les altres condicions establertes.

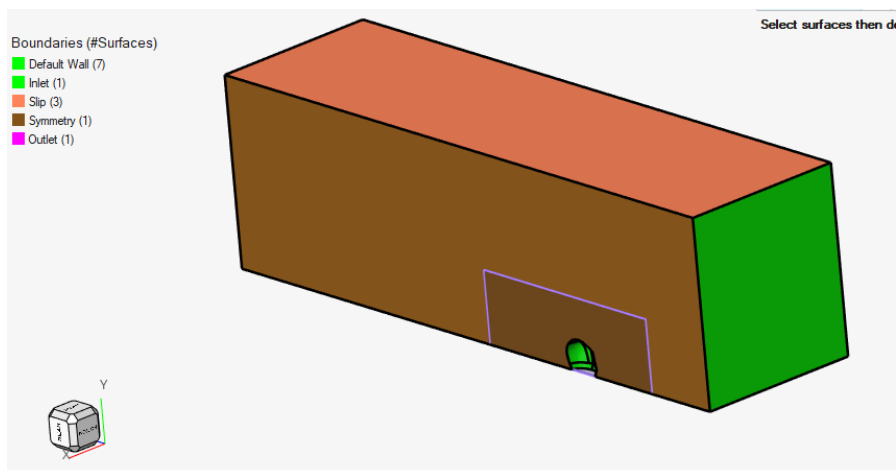


Figura 28: Condicions de contorn aplicades en el túnel de vent

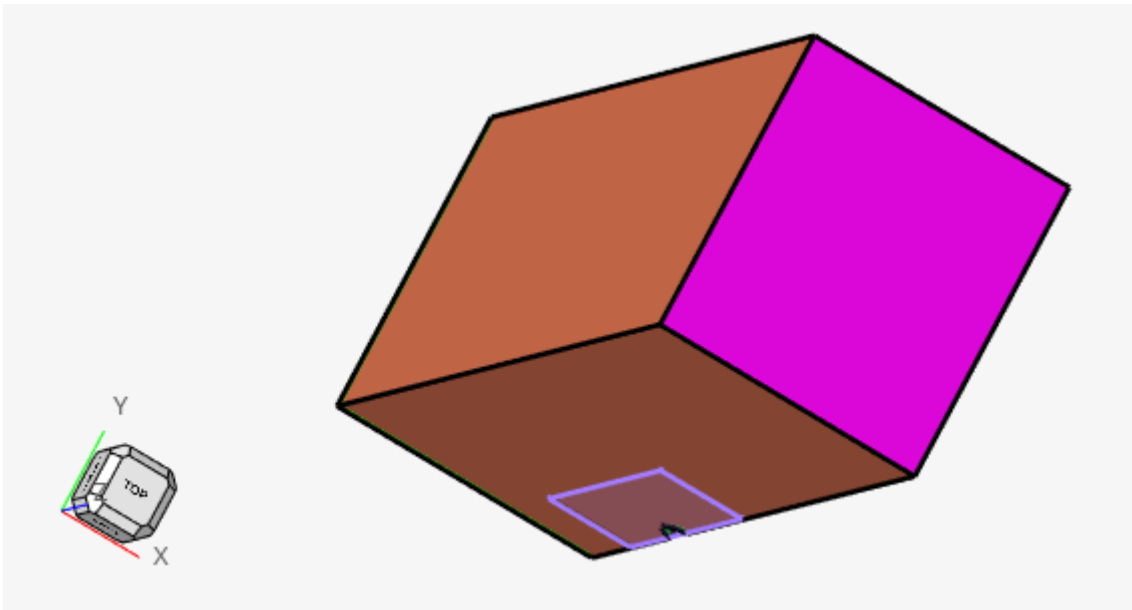


Figura 29: Condicions de contorn part posterior del túnel de vent

4.2 Mallat del casc

Un cop tenim el model i el túnel de vent definit s'haurà de fer el mallat, amb que es basaran els càlculs. Com és lògic, com més petita i fina sigui la malla, en especial en la zona propera al casc, més acurats seran els resultats i més propers a la realitat.

Els paràmetres del mallat seran els següents:

Average element size:	0.08
<input checked="" type="checkbox"/> Curvature based surface refinement	
Minimum size factor:	0.1
Geometric feature angle:	22.5
Mesh growth rate:	1.3

Figura 30: Paràmetres 1 mallat del casc

First layer thickness definition:	Constant
First layer thickness:	0.0008
Total number of layers:	12
Growth method:	Constant
Growth rate:	1.3
Final Layer Height / Base Ratio:	0.8
Termination policy:	Squeeze
<input type="checkbox"/> Enable surface mesh modification	

Figura 31: Paràmetres 2 mallat del casc

Meshing Operations

Surface mesh

Surface + Volume mesh

Mesh size: Average size

Average element size: 0.22

Curvature based surface refinement

Minimum size factor: 0.1

Geometric feature angle: 22.5

Mesh growth rate: 1.3

Retain existing surface mesh

Generate boundary layers on fluid domains only

Advanced

Mesh

Figura 32: Paràmetres 3 mallat del casc

Amb els paràmetres mostrats la malla obtinguda és la següent, es veu com és una malla acceptable, per contra no és gaire fina en la part allunyada del casc però a favor és que en la zona propera al contorn, la malla és bona. Es veu com a la part que voreja la superfície del casc la malla es en forma rectangular, com també la part frontal i posterior del túnel de vent d'aquesta manera es va resseguint el contorn del casc de forma més òptima. La part superior més allunyada del contorn del casc hi ha el mallat en forma de triangles.

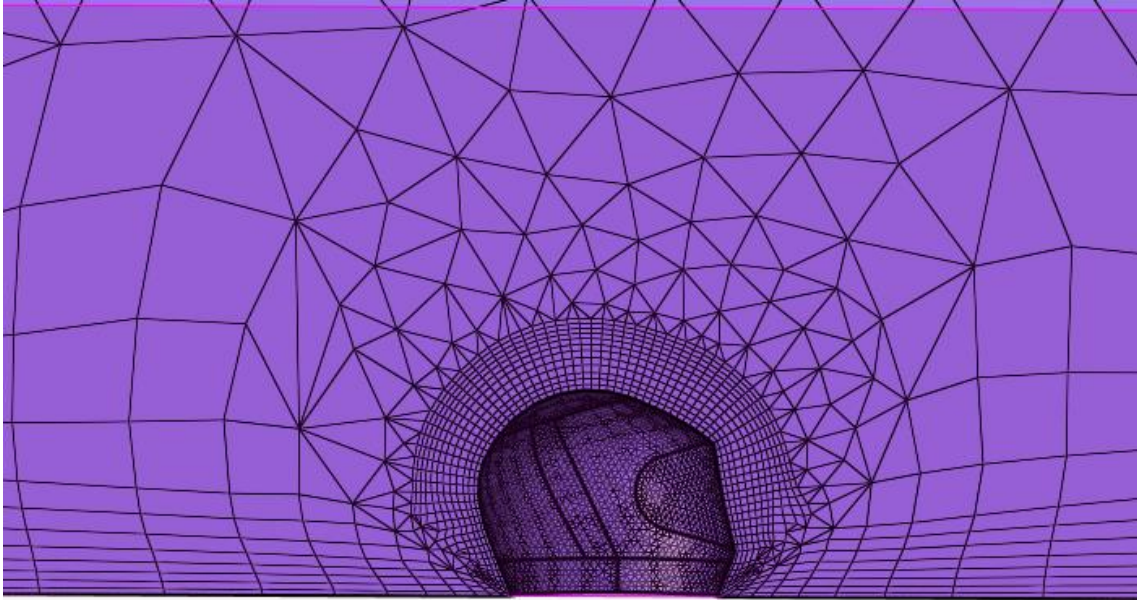


Figura 33: Malla obtinguda del casc base

4.3 Paràmetres túnel de vent

Important definir abans de tot altre cop la velocitat de l'aire. Aquest cop se li ha d'assignar en l'eix corresponent, per a la present simulació se li aplicarà en l'eix Z, que és en l'eix frontal on l'aire interferirà al pilot. Es pot apreciar en la *figura 34*.

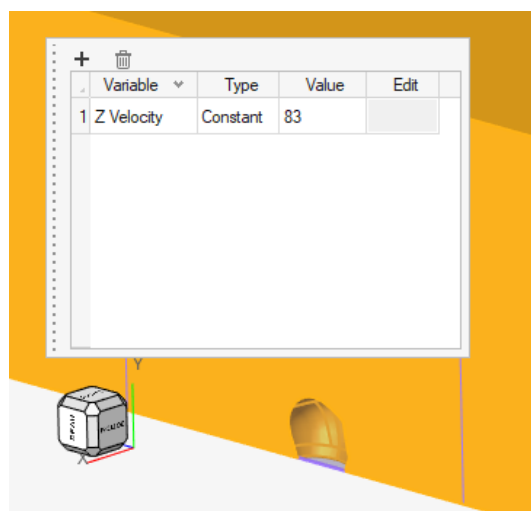


Figura 34: Velocitat de l'aire per el túnel de vent

Finalment calculem la solució amb els paràmetres per defecte posant correctament els directoris de guardat i del runpath.

4.3 Anàlisi dels resultats

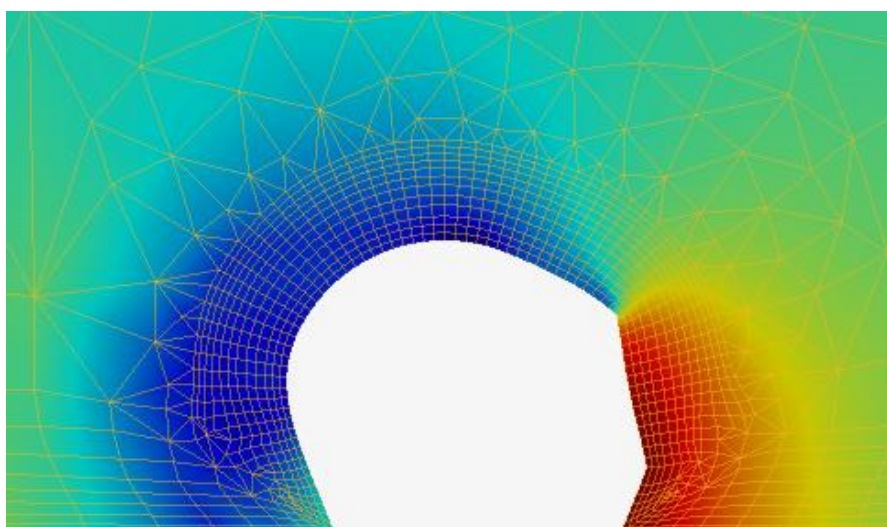
Un cop es tenen els paràmetres definits en els anteriors apartats en la pestanya de “solution” en el software CFD s’analitzen els resultats. Es començarà per l’anàlisi gràfic de pressions i velocitats

4.3.1 Gràfiques pressió i velocitat model base

En les imatges següents s’analitzen la zona d’altes i baixes pressions i la zona d’altes i baixes velocitats en forma de gràfic per colors i per el cas de la velocitat en vectors de direcció del flux.

El valor ve determinat per el mapa de colors on l’escala de colors de major a menor valor correspon al vermell, taronja, groc, verd, turquesa, blau i blau marí.

Gràfic de colors mapa de pressions



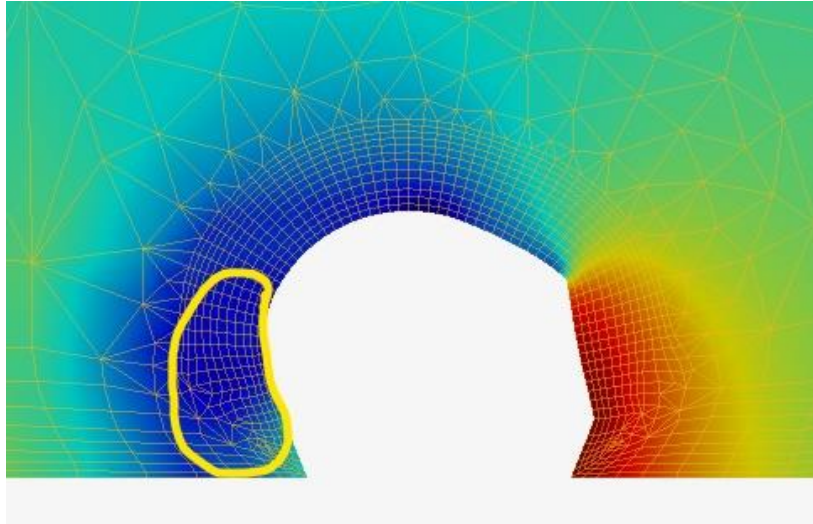
Gràfica 1: Mapa de pressions del casc base

El **gràfic de pressions**, en la part frontal es veu clarament una gran zona de pressió intensa, es deu a que la velocitat impacte amb gran força a la part frontal (visera i zona “barbeta”) i això fa que la pressió ocupi gran part de la zona frontal i part de la zona superior frontal abans de produir-se el canvi de pressions.

El canvi de pressions (de més a menys) es produeix de forma ràpida progressivament, però en un interval de longitud molt reduït, es veu que de seguida passa del rang de pressió de color vermell-groc a una pressió més reduïda on el blau del gràfic augmenta de to de forma ràpida fins arribar a la zona superior del casc on la pressió és mínima i conseqüentment la velocitat en aquest perfil és molt alta (color blau fort en el mapa de pressions). Aquesta zona és ideal on el flux va molt enganxat en el contorn del casc i la resistència aerodinàmica és baixa.

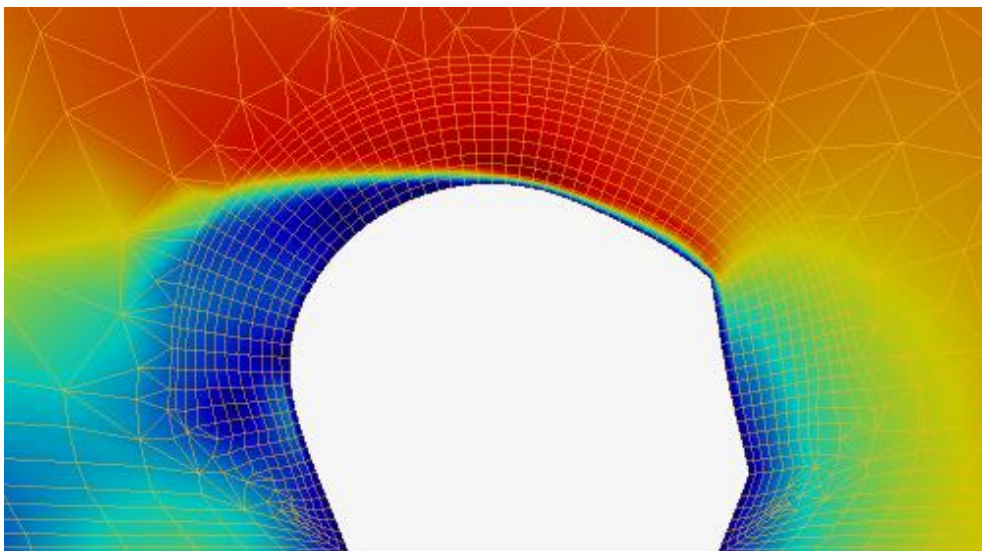
Finalment a la part de darrere del casc la pressió torna a augmentar (no tant fort com ho fa en la zona frontal) creant d’aquesta manera un possible flux turbulent en variades direccions (es veurà en el gràfic vectors de velocitat)

La zona posterior del casc (zona marcada en groc en la *gràfica 2*) on en la imatge el color continua sent blau indicant una pressió baixa, podem deduir que la pressió augmenta encara que en el gràfic no ho mostri, ja que pel gràfic de velocitats, aquestes zones són de baixa velocitat i conseqüentment d’alta pressió. Erròniament en el gràfic no ens mostra aquest canvi, sinó que ho mostra uns centímetres després en la zona baixa (zona blau flux posterior).



Gràfica 2: Mapa pressions casc base amb zona groga marcada de pressions mitjes

Gràfic de colors mapa de velocitats



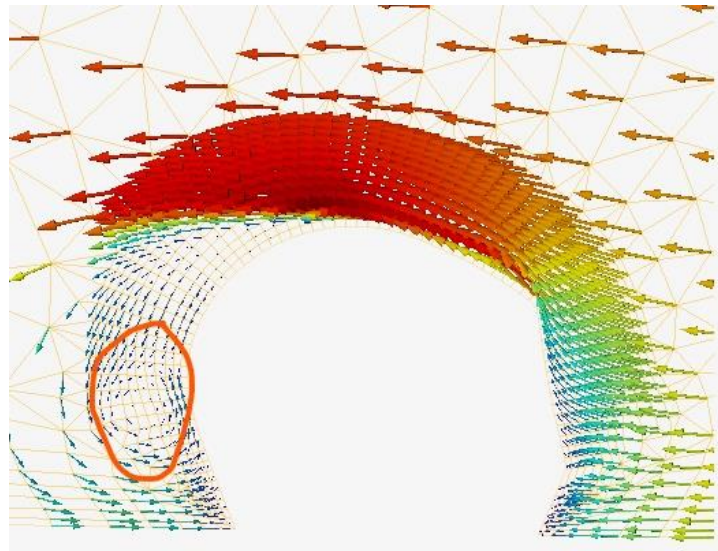
Gràfica 3: Mapa de velocitats casc base

En el **gràfic de velocitats** es veu com a la part frontal les velocitats son baixes, ja que és on la pressió és més alta. On comença la superfície plana la velocitat augmenta fins arribar a la zona on el casc, per la seva forma es torna a “tancar” i es veu el canvi bruscat com la velocitat torna a disminuir.

La velocitat més baixa es produeix en el punt superior de la zona posterior (blau més fort) on és la zona més crítica del casc on podrien ocórrer les vibracions i la generació de un flux turbulent que ocasionaria gran multitud de vòrtexs. (es comprovarà en la gràfica de línies de velocitat).

Pel que fa a la zona de darrere del casc, la velocitat és baixa lògicament. Aquest és un punt difícil de millorar aerodinàmicament ja que per la forma del cap del pilot, el casc s’ha de tancar i per tant és un punt on les velocitats seran baixes sempre.

Gràfic de vectors de direcció de velocitat



Gràfica 4: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc base amb zona de vòrtex marcada

En l'últim gràfic de zones de colors, en aquest cas representat amb vectors, marcant la direcció de la velocitat, és un gràfic molt interessant i es pot deduir el que s'ha comentat anteriorment:

- Zona frontal: impacte de la velocitat, conseqüentment la velocitat disminueix a mesura que el flux impacta amb la part frontal i la pressió augmenta.

- Zona superior: es produeix el canvi de velocitat de menor a major valor de forma progressiva, arribant en el punt d'inflexió (marcat en groc en la imatge) on la velocitat a la part superior encara és alta, però degut a l'efecte coanda explicat en la teoria el flux té tendència a resseguir el contorn del casc i és en aquesta zona on es comença a desprendre la capa límit i es comencen a generar zones de flux turbulent.

- Zona posterior: la velocitat en la zona posterior disminueix generant un flux turbulent en diverses direccions (fins hi tot contràries a la direcció del flux, que ocasiona la creació d'alguns vòrtex, com es veu en la zona taronja marcada en la *gràfica 4*).

Com a aspecte a millorar en les properes modificacions per tal de millorar el coeficient de drag del casc, clarament ens hauriem d'enfocar en la part frontal (reducció de la pressió) i sobretot en la part posterior on s'ocasionen els vòrtex i també altes pressions.

4.3.2 Càlcul coeficient de drag i lift model base

Aplicant les fórmules explicades en l'apartat 2.1.1, caldrà calcular l'àrea frontal del nostre model de casc per poder trobar els coeficients de drag i de lift. Coeficients que ens guiaran alhora de realitzar les millores aerodinàmiques en el casc.

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times A_f \times C_d$$

$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times A_f \times C_l$$

Aleshores, ens falten 2 incògnites per a cada formula per treure el Cd i Cl, aquestes són la resistència aerodinàmica (força de drag (D)) i la força de sustentació (força de lift (L)) i l'àrea frontal del casc (Af), en ambdós casos.

Per calcular l'àrea s'haurà de fer amb el software de disseny que s'ha treballat amb el casc. Amb el Catia projectarem l'àrea frontal del casc i amb la icona "measure inertia" obtindrem el càlcul automàtic de l'àrea. Tal hi com es veu en la *figura 35* la **Àrea frontal = 0'027 m²**.

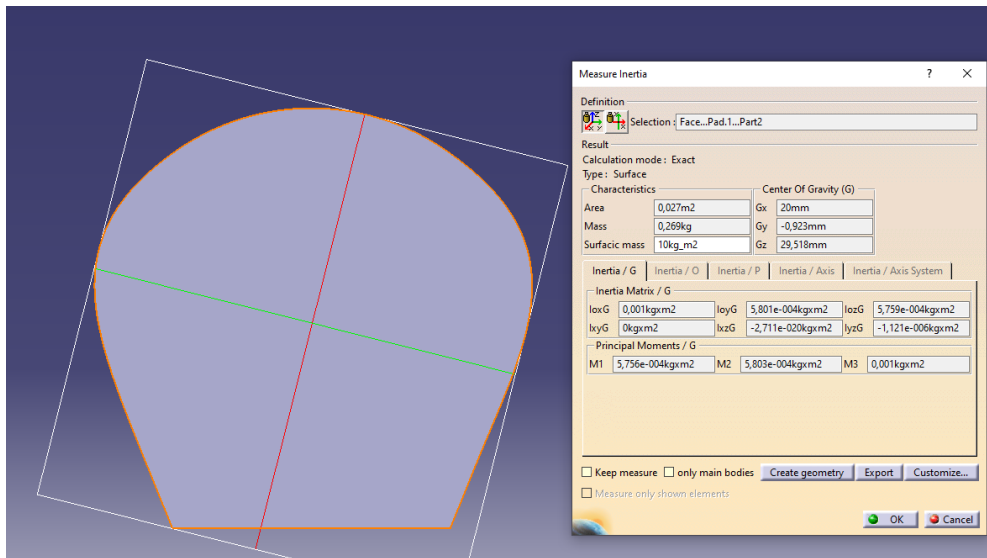





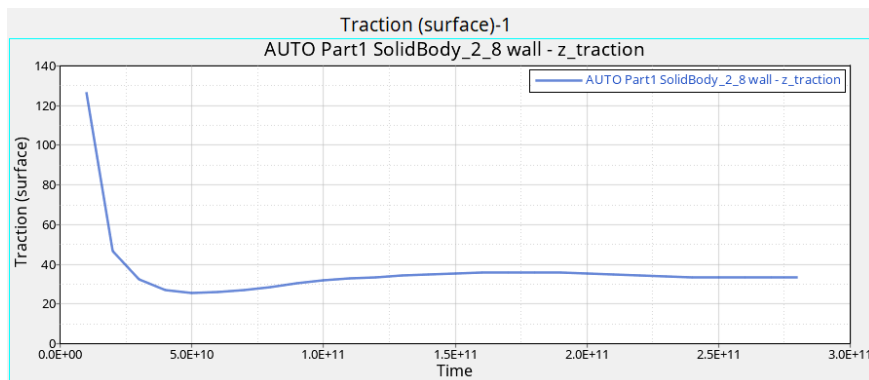
Figura 35: Càlcul de l'àrea frontal amb el software de disseny (CATIA V5)

Agafarem el fitxer calculat en la simulació i l'introduïrem en l'Hypergraph:

Pel que fa a l'anàlisi, s'enfocarà amb els resultats de pressió màxima obtinguda i forces en els diferents sentits; com a recordatori per el present sistema d'eixos del casc:

-  **Força en Z:** Resistència aerodinàmica (Drag)
-  **Força en Y:** Força de sustentació (Lift)
-  **Força en X:** Força lateral (Side force)

Força de drag



Gràfica 5: Valor de la força de drag en funció del temps de simulació

En la imatge es veu el valor de la força d'oposició a l'avanç de forma gràfica, per saber el valor exacte s'haurà de fixar amb el valor calculat en l'últim step (pas) del càlcul. (gràfica 6)

Curve:	AUTO Part1 SolidBody_2_8 v	Pt	X	Y	Show X as:
Point:	0	21	220000000000.0	34.258466331895306	Linear
X:	10000000000.0	22	230000000000.0	33.80480822685121	dB10
Y:	126.89424241926277	23	240000000000.0	33.46835951814151	dB20
Slope:	-8.017915369200913e-9	24	250000000000.0	33.29706940881255	Show Y as:
Time:	10000000000.0	25	260000000000.0	33.27652959266544	Linear
		26	270000000000.0	33.376817314695685	dB10
		27	280000000000.0	33.56629010088199	dB20
					<input type="checkbox"/> Sync Coordinate Data With Axis Format

Gràfica 6: Valors de la força de drag (en SI) del casc base en funció del nº de steps en el càlcul

El valor doncs, correspon a **33,566 N**.

Força de lift

Es seguirà el mateix procediment que en la força de drag tot i que ara l'eix a estudiar serà l'eix Y. Mirant l'últim step del càlcul es veu com el resultat és de **22,3 N**

Curve:	AUTO Part1 SolidBody_2_8 v	Pt	X	Y	Show X as:
Point:	27	21	220000000000.0	22.886543679306314	Linear
X:	280000000000.0	22	230000000000.0	22.59627524070336	dB10
Y:	22.300894316586398	23	240000000000.0	22.383315639366383	dB20
Slope:	8.667713242897435e-12	24	250000000000.0	22.242032149618733	Show Y as:
Time:	280000000000.0	25	260000000000.0	22.192472921565763	Linear
		26	270000000000.0	22.214217184157423	dB10
		27	280000000000.0	22.300894316586398	dB20
					<input type="checkbox"/> Sync Coordinate Data With Axis Format

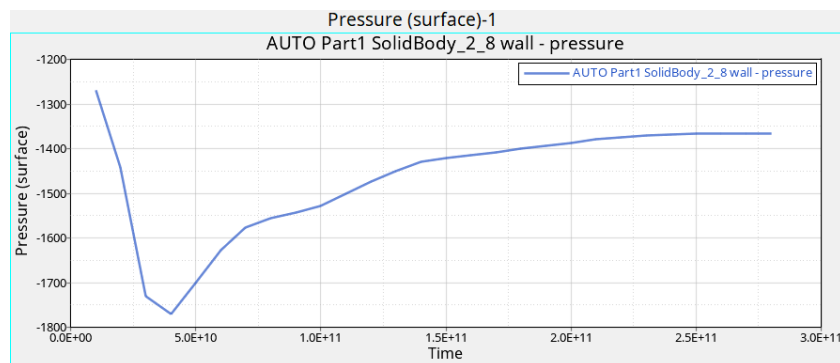
Gràfica 7: Valors de la força de lift (en unitats de SI) del casc base en funció del nº de steps en el càlcul

Força lateral

En els resultats es veu com la força lateral (side force) és diferent de 0, la qual cosa a priori no quadra amb la simulació ja que només hem incorporat vent frontal i per tant la força lateral s'hauria de contrarestar. Aquest resultat és degut a que la simulació s'ha fet utilitzant la simetria de mig casc, aleshores com que en la nostra simulació, el contorn no és simètric la força no dona 0, però tenint en compte que els resultats per l'altre part de la simetria seran els mateixos però en l'altre sentit, la força total lateral s'acaba igualant a 0.

En les properes simulacions, no tindrem en compte la força lateral ja que en perfils simètrics com el present casc, s'acaba contrarestant.

Pressió màxima



Gràfica 8: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc base en funció del temps de simulació

La pressió màxima obtinguda és de 1360 Pa, on deduïm per el mapa de colors que correspon en la zona frontal del casc.

Amb els resultats obtinguts apliquem les fórmules i calculem el CD i CL (cal tenir en compte que les forces tant D com L s'han de multiplicar per 2 ja que l'estudi es correspon a mig casc o s'haurà de dividir la àrea frontal entre dos corresponent a mig casc):

Càlcul CD

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cd$$
$$Cd = \frac{2D}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot 33,56}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = \mathbf{0,602}$$
$$\mathbf{Cd = 0,602}$$

Càlcul CL

$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cl$$
$$Cl = \frac{2L}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot 22,3}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = 0,4$$
$$\mathbf{Cl = 0,4}$$

4.4 Comparació anàlisis dels resultats amb angle òptim dels pilots en recta (20°)

Es repetirà la mateixa simulació que en el primer cas, però aquest cop girant el casc a uns -20 ° (angle del casc respecte l'horitzontal (eix Z)).

Així doncs els paràmetres seran els mateixos, el que ens canviarà serà la posició del túnel de vent i conseqüentment la malla (*figura 36*)

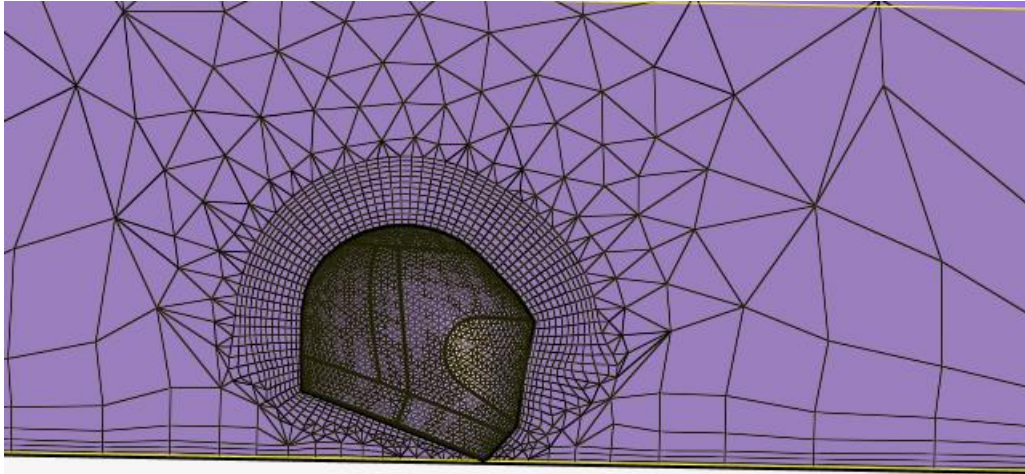
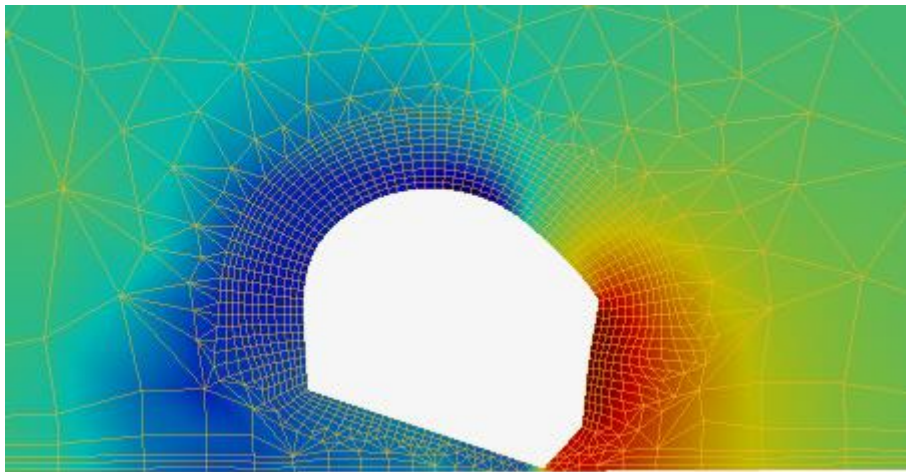


Figura 36: Malla obtinguda del casc base en posició inclinada

4.4.1 Gràfiques de pressió i velocitats model base inclinat

En les imatges següents s'analitzen la zona de altes i baixes velocitats i la zona de altes i baixes pressions en forma de gràfic per colors, com s'ha fet en l'anterior apartat.

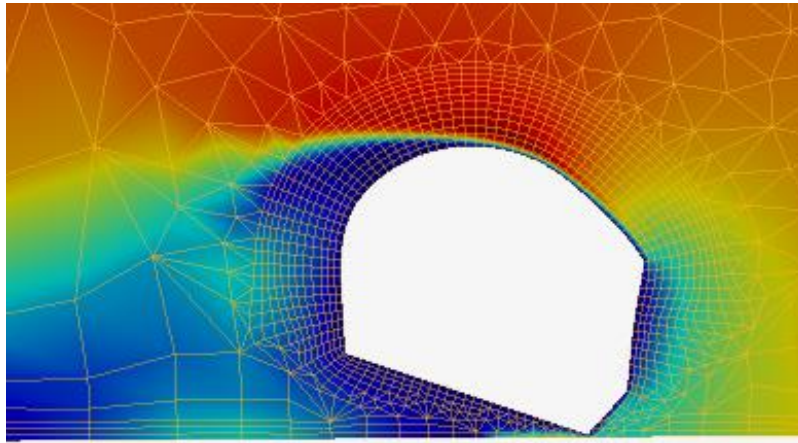
Gràfic de colors mapa de pressions



Gràfica 9: Mapa de pressions del casc base en posició inclinada

Mapa de pressions molt semblant en el primer cas, amb la diferència que la pressió frontal engloba una àrea més gran en la zona frontal superior. Es veu també com el canvi de pressions no és tant bruscat com en la simulació per un angle nul. La pressió disminueix de forma més progressiva. Com en l'anterior cas la zona de menor pressió es produeix en el punt més proper a la superfície del casc en la zona superior on el flux es troba molt enganxat al contorn i ho fa a velocitats molt altes.

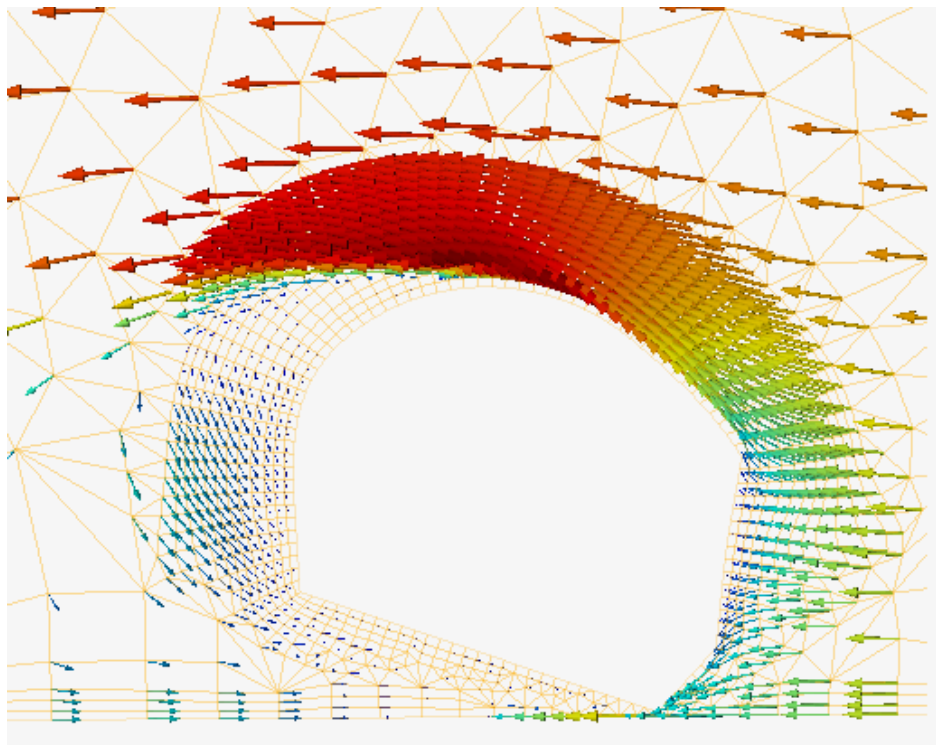
Gràfic de colors mapa de velocitats



Gràfica 10: Mapa de velocitats del casc base en posició inclinada

En el mapa de velocitats s'aprecia com el desprendiment de la capa límit ocorre en un instant més tard que en la primera simulació, la qual cosa indica que el flux ressegueix de forma ràpida el contorn del casc amb una distància més gran.

Gràfic de vectors de direcció de velocitat



Gràfica 11: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc base en posició inclinada

Amb l'angle inclinat aconseguim un major recorregut de flux laminar però unes velocitats més baixes a la zona frontal. A la zona posterior ja no s'obté el vortex de la primera simulació però sí que s'obtenen baixes velocitats de direccions oposades al flux.

4.4.2 Càlcul coeficient de drag i lift model base inclinat

Força de drag

Directament realitzem el càlcul en forma de steps i s'agafa el resultat de l'últim pas (resultat més fiable).

Curve:	AUTO Part1 SolidBody_2_8 v	Pt	X	Y
Point:	0	20	210000000000.0	42.40745017567677
X:	10000000000.0	21	220000000000.0	42.9433606565224
Y:	119.46122522689066	22	230000000000.0	43.27611676935486
Slope:	-6.789246221299304e-9	23	240000000000.0	43.38279704481673
Time:	10000000000.0	24	250000000000.0	43.25624863051661
		25	260000000000.0	43.01837222759728
		26	270000000000.0	42.7763694152002

Gràfica 12: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc base en posició inclinada en funció del nº de steps en el càlcul

El valor doncs, correspon a **42,78 N**. Amb més acumulació de pressió més resistència a l'avanç tindrem i per tant més força.

Força de lift

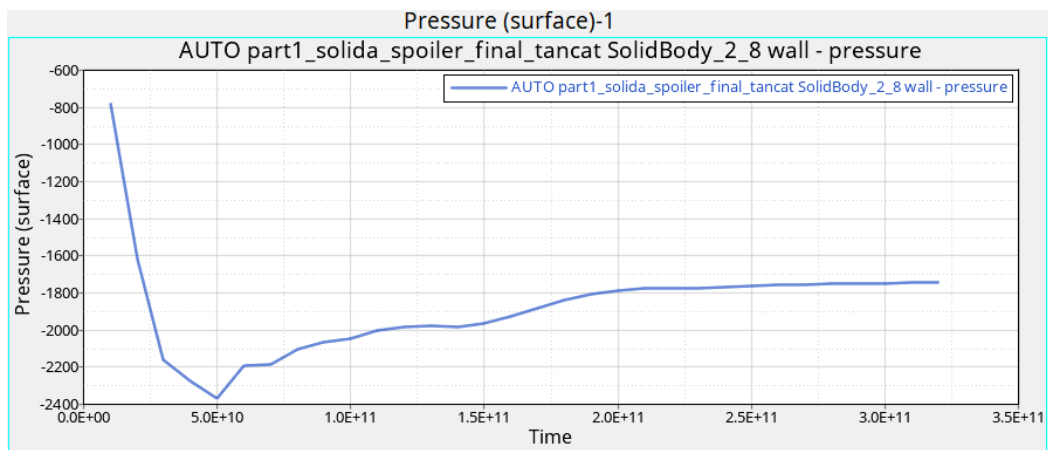
Es seguirà el mateix procediment que en la força de drag, però ara en l'eix Y. Mirant l'últim step del càlcul es veu com el resultat és negatiu de **-2,71 N**

Curve:	AUTO Part1 SolidBody_2_8 v	Pt	X	Y
Point:	26	20	210000000000.0	-2.582584566483428
X:	270000000000.0	21	220000000000.0	-2.0884973475252466
Y:	-2.71177281051509	22	230000000000.0	-1.9149636643626156
Slope:	-1.9194485844193832e-11	23	240000000000.0	-2.010226349863866
Time:	270000000000.0	24	250000000000.0	-2.2630916396190703
		25	260000000000.0	-2.5198279520731517
		26	270000000000.0	-2.71177281051509

Gràfica 13: Valors de la força de lift (en unitats de SI) del casc base en posició inclinada en funció del nº de steps en el càlcul

Canvi molt significatiu: al inclinar el casc el perfil redueix de forma substancial la força de sustentació, i com és lògic al inclinar cap sota, la sustentació (fenomen per el qual el casc "s'enlairi") és nul·la, fins hi tot en aquest cas, negativa.

Pressió màxima



Gràfica 14: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc base en funció del temps de simulació

La pressió màxima obtinguda és de 1750 Pa aproximadament, on deduïm per el mapa de colors que correspon en la zona frontal del casc. Aquest cop és més elevada degut a l'angle d'inclinació, que fa que les pressions s'acumulin en la zona frontal baixa.

Introduïm el fitxer de la solució en el Hypergraph i analitzem els resultats:

Càlcul CD

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cd$$
$$Cd = \frac{2D}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot 42,77}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = 0,766$$

$$\mathbf{Cd = 0,766}$$

*Afegir que l'àrea frontal s'ha considerat la mateixa ja que per una inclinació de 20 graus la diferència d'àrees frontals és mínima. Sí que és cert que el resultat podria variar unes centèsimes per sota ja que la àrea frontal per l'angle inclinat és lleugerament més gran.

Càlcul CL

$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cl$$
$$Cl = \frac{2l}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot (-2,71)}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = -0,048$$

$$\mathbf{Cl = -0,048}$$

5- Millores aplicades en el model Base

Vist els resultats obtinguts en el punt 4.3 del casc amb la versió base, es treballarà amb el mateix model per obtenir una reducció en la resistència aerodinàmica (drag), vòrtexs causants de vibracions i la homogeneïtat del flux aigües avall.

La primera modificació treballada per obtenir aquests factors és la mostrada en les imatges següents amb el software CATIA V5 on s'ha treballat per a realitzar la següent modificació:

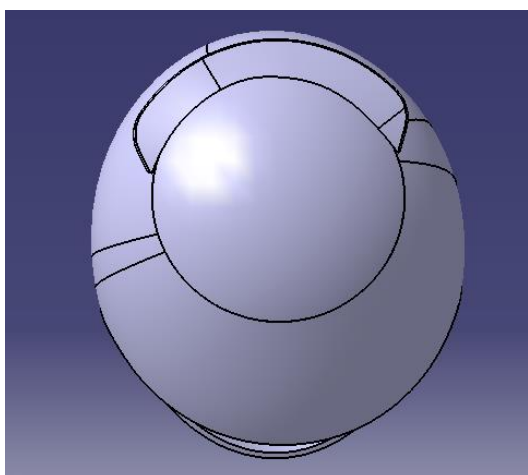


Figura 37: Vista des de sobre del casc base modificat

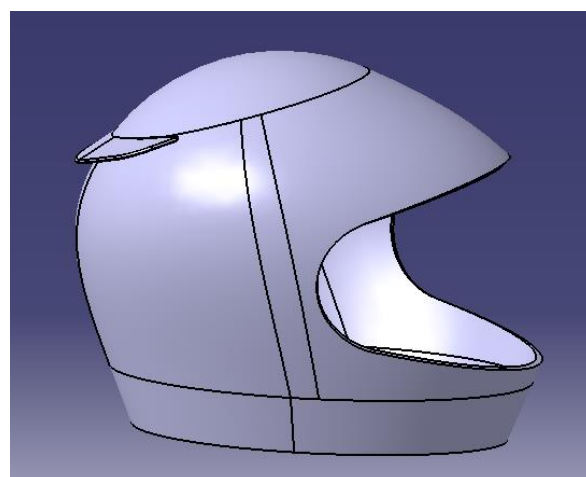


Figura 38: Vista lateral del casc base modificat

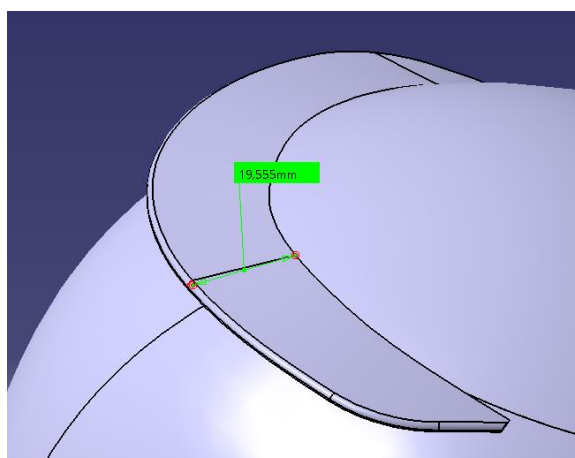


Figura 39: Vista isomètrica del spoiler generat en el casc base

S'ha pretingut elaborar un spoiler/apèndix / aleró de 20 mm de longitud en la part posterior del casc per veure si el flux aigües avall és millor per una banda, i per altra banda, es retarda el desprendiment de la capa límit i conseqüentment es minimitzen els vòrtexs generats en aquella zona (zona ubicada del spoiler).

La zona és estratègica ja que si mirem el gràfic de velocitats en la primera simulació, la zona on comença un flux turbulent de velocitats a causa de la separació de la capa límit és aproximadament en el punt on hem ubicat l'aleró. La inclinació és aproximadament d'uns 40-45 ° respecte l'horitzontal, pensant també que l'aire interfereixi en l'esquena del pilot de manera que el flux sigui el més laminar i constant possible.

5.1 Anàlisi CFD 1r model

Es procedeix a la importació del CAD en format .IGS i se li aplica la visera i la superfície de la part de sota per tenir un casc totalment tancat i hermètic.

Els passos que venen a continuació són idèntics al de la 1a simulació ja que es pretén fer una comparació amb les mínimes diferències possibles amb els paràmetres del túnel de vent.

Així doncs, es crea el túnel de vent (mateixes dimensions que en la primera i segona simulació, s'introdueixen els mateixos paràmetres i s'elabora la malla *(figura 40)*):

Per aquest cas veiem com la visera s'ha fet seguint un cert radi que no s'ha pogut modificar. El que hagués sigut ideal hagués sigut crear una visera com el primer model (casc bàsic) ja que per aquest cas, aquest radi podria ocasionar una acumulació de pressió en l'espai no comprès per una visera més normal sense el radi esmentat. Es veurà però en els resultats posteriors.

El mallat és molt semblant a les anteriors simulacions i per tant es dona com a bo el càlcul i seguidament es procedeix al càlcul de la solució amb els mateixos paràmetres com s'ha dit.

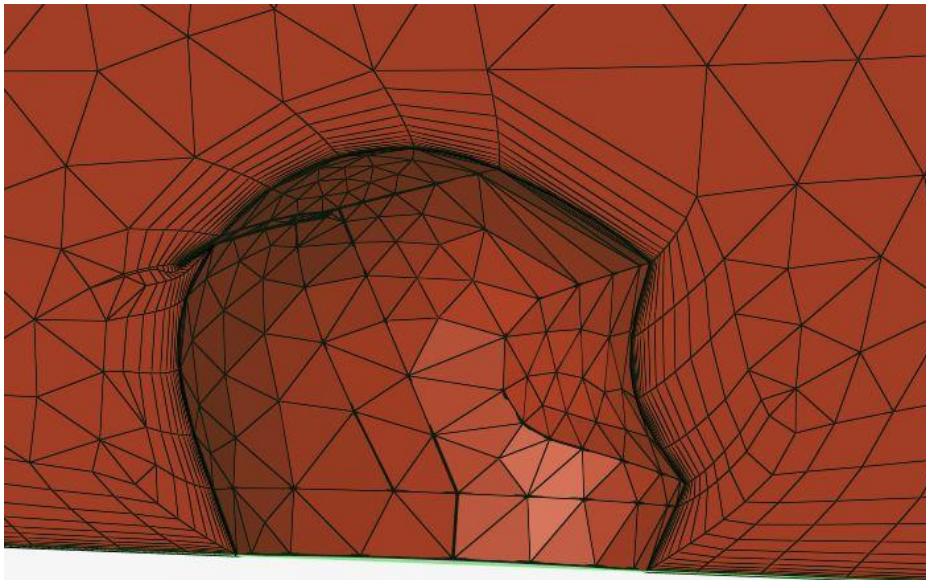
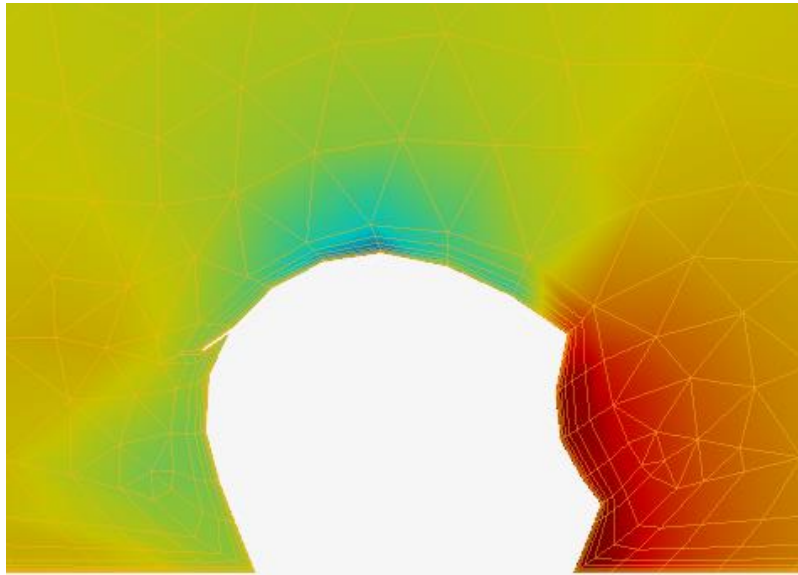


Figura 40: Malla obtinguda de la 1ª modificació del casc

5.1.1 Gràfiques pressió i velocitat 1r model

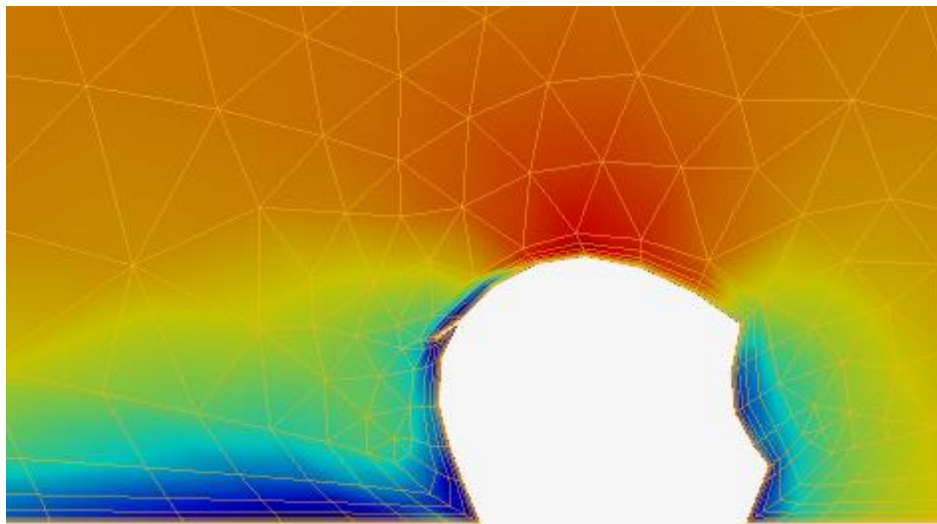
Gràfic de colors mapa de pressions



Gràfica 15: Mapa de pressions del casc amb la 1ª modificació

A primera vista es pot apreciar que el càlcul ja és més precís, la zona d'altres pressions aquest cop és més forta degut a la zona còncava de la visera. A la part superior s'obté el flux constant de altes velocitats i baixa pressió i al darrere la pressió també augmenta.

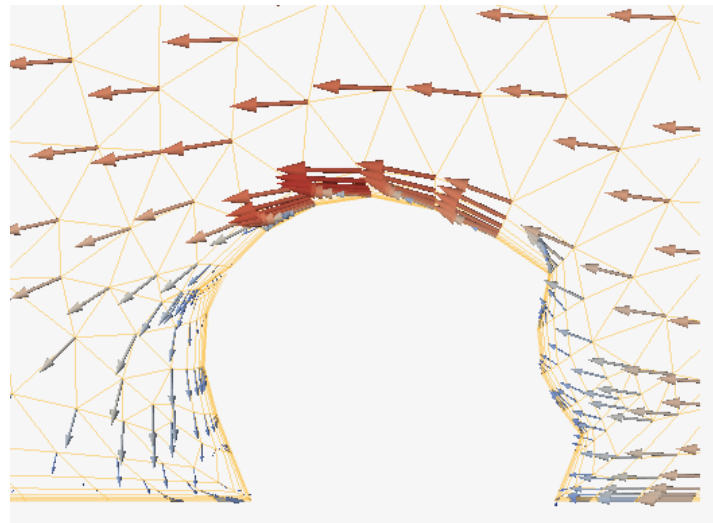
Gràfic de colors mapa de velocitats



Gràfica 16: Mapa de velocitats del casc amb la 1ª modificació

Respecte la primera simulació es veu com la velocitat roman més estable durant tot el contorn del casc en la zona superior fins a acabar en el spoiler. En la part superior continua la zona de baixes velocitats. Una solució podria ser un augment de la longitud de l'aleró i observa si aquesta zona de velocitats més baixes canvia.

Gràfic de vectors de direcció de velocitat



Gràfica 17: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc amb la 1ª modificació

En el gràfic de vectors s'aprecia més els canvis de flux generat per l'aleró. Es veu com per l'efecte coanda el flux d'aire tendeix a resseguir el contorn del casc. El flux arriba en una velocitat baixa en la zona del spoiler degut a la forma del casc, però si ens fixem en la direcció dels vectors després d'haver sobrepassat la visera, es veu com la direcció ja no és a favor de la direcció del pilot sinó que ara la direcció és en la direcció Y negativa, la qual cosa el flux ja no es tant turbulent ja que segueix una única direcció.

Tot i així aquesta direcció no és del tot idònia ja que seria ideal que totes les línies de flux anessin en la direcció oposada al sentit del pilot per aconseguir un flux del tot lineal, constant i laminar.

5.1.2 Càlcul coeficient de drag i lift 1r model

Força de drag

Directament realitzem el càlcul en forma de steps i s'agafa el resultat de l'últim pas (resultat més fiable).

Curve:	Pt	X	Y
AUTO_part1_superficie_spoile	18	190000000000.0	29.085343134240613
Point:	19	200000000000.0	29.06605551687929
X:	20	210000000000.0	29.017555872879235
Y:	21	220000000000.0	28.93458376777836
Slope:	22	230000000000.0	28.83145346483654
Time:	23	240000000000.0	28.72286536761911
	24	250000000000.0	28.613749897276445

Gràfica 18: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc amb la 1ª modificació, en funció del nº de steps en el càlcul

El valor correspon a **28,61 N**. La resistència a l'avanç serà menor que els anteriors casos.

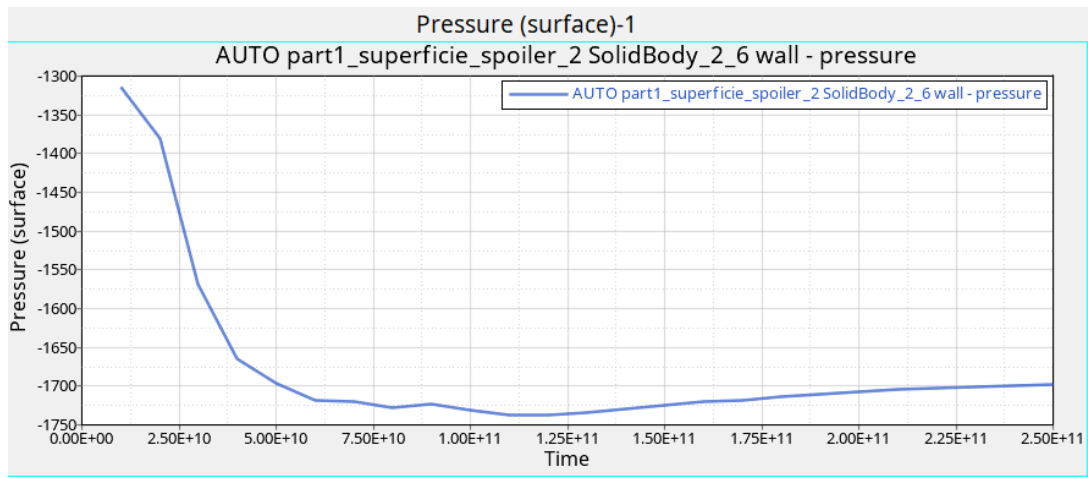
Força de lift

Es seguirà el mateix procediment que en la força de drag, però ara en l'eix Y. Mirant l'últim step del càlcul es veu com el resultat és negatiu de **25,108 N**. Lift lleugerament superior que el peïrmer model, que indica que té més tendència a "enlairar-se".

Curve:	AUTO part1_superficie_spoile	Pt	X	Y
Point:	0	18	190000000000.0	25.416172196965768
X:	10000000000.0	19	200000000000.0	25.34769946898495
Y:	2.895297144680468	20	210000000000.0	25.282278068310738
Slope:	7.602430303694694e-10	21	220000000000.0	25.22494686455281
Time:	10000000000.0	22	230000000000.0	25.17663082090756
		23	240000000000.0	25.13867835780573
		24	250000000000.0	25.108265992141632

Gràfica 19: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc amb la 1ª modificació, en funció del nº de steps en el càlcul

Pressió màxima



Gràfica 20: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc base en funció del temps de simulació

La pressió màxima obtinguda és de 1700 Pa aproximadament, on deduïm per el mapa de colors que correspon en la zona frontal del casc. Aquest cop és més elevada que en el primer cas, per la forma còncava de la visera comentada en l'inici del apartat on s'acumulen les pressions.

Càlcul CD

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cd$$

$$Cd = \frac{2D}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot 28,61}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = 0,513$$

$$Cd = 0,513$$

Càlcul Cl

$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cl$$
$$Cl = \frac{2l}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot 25,1}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = 0,45$$
$$Cl = 0,45$$

Al tractar-se d'un model molt semblant al que vé a continuació, no es realitzarà la simulació per un angle inclinat.

Vistos els resultats obtinguts s'ha millorat el drag amb l'addició del spoiler, però s'intentarà fer petites variacions i comprovar quins són els paràmetres que canvien en els nous resultats per intentar millorar encara més el Cd i sobretot pel que fa al mapa de pressions i velocitats, intentar reduir possibles vortex i grans acumulacions de pressió.

5.2 Anàlisi CFD 1r model millorat

S'ha modificat el spoiler del 1r model de manera que s'ha allargat per aconseguir que no hi hagi tanta diferència de pressió i conseqüentment generació de vòrtex en la part posterior del casc. L'estructura de la visera no canvia sinó que s'allarga amb la intenció de dirigir el flux de forma més horitzontal intentant evitar la separació de la capa límit com passa en el cas anterior just en el moment de passar el flux per l'aleró. El model és el següent:

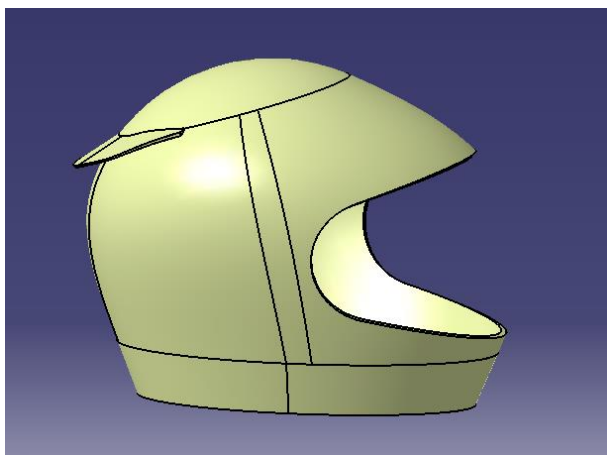


Figura 41: Vista lateral del casc amb el spoiler millorat

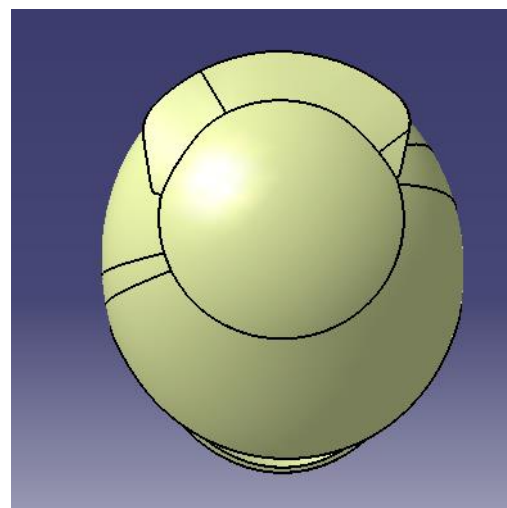


Figura 42: Vista des de sobre del casc amb el spoiler millorat

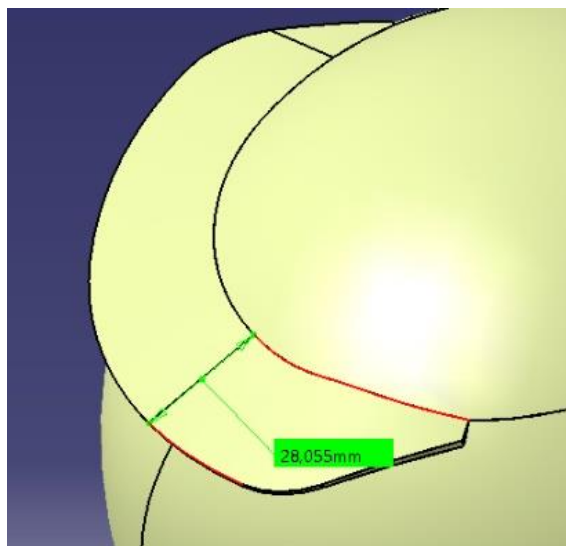


Figura 43: Vista isomètrica del spoiler millorat

Per aquest cas ja definitiu, s'ha allargat la distància del spoiler fins els 28 mm, mantenint la mateixa altura i angle d'inclinació. 28 mm pot semblar poca distància però cal tenir en compte que l'escala del casc és $\frac{3}{4}$ per tant la distància real seria de 37,3 mm. Una altra diferència important és el tancament de l'aleró, com es veu en la *figura 42* (part frontal) aquest cas el tancament en els laterals segueix la direcció de l'eix z en canvi en l'anterior cas, aquest angle era més pronunciat (s'obria més).

Aleshores introduint l'arxiu en IGS i arreglant els possibles errors que puguin sortir en la validació, copiem els mateixos paràmetres com en les simulacions anteriors i elaborem la malla:

En aquest cas ocórrer el mateix que en la simulació anterior, la visera entra cap endins i podria alterar els resultats, sobretot de drag i lift.

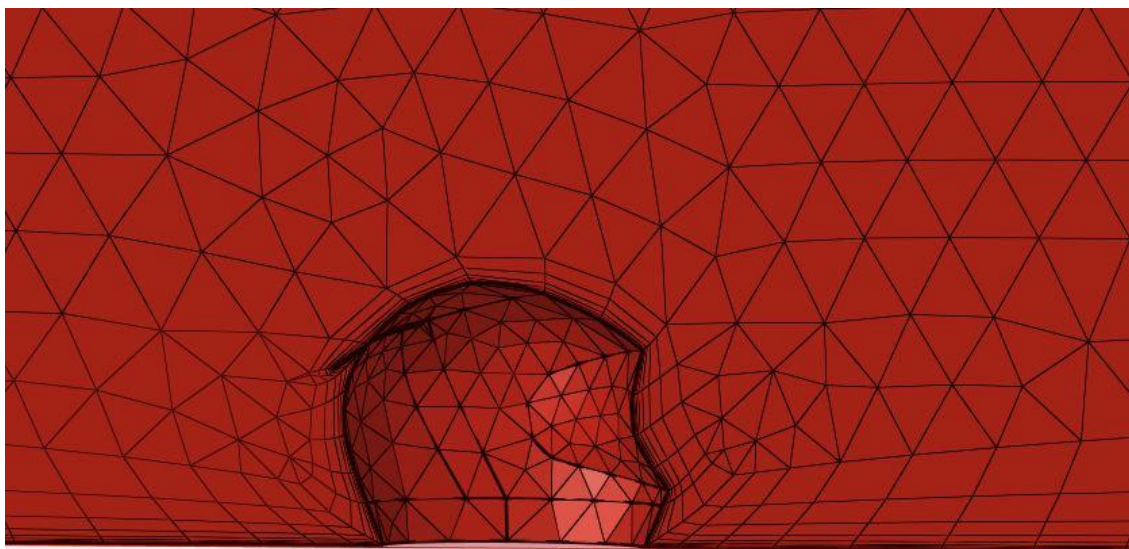
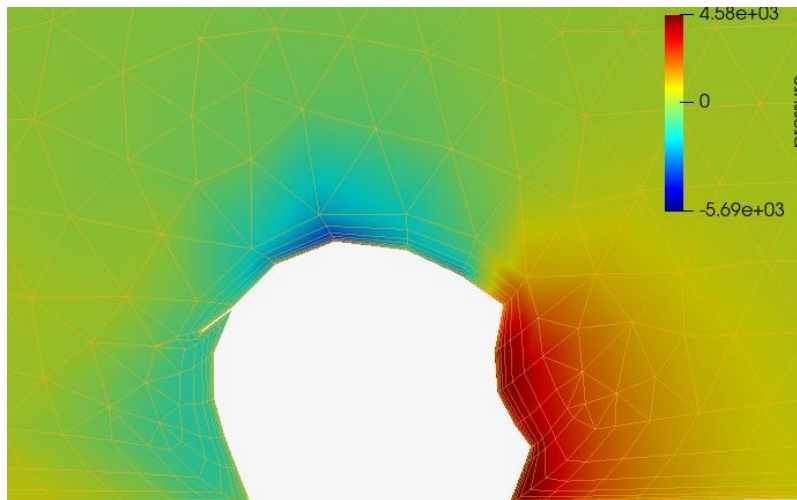


Figura 44: Malla obtinguda del casc amb spoiler millorat

Aquest cop la malla (*figura 44*) obtinguda no ha sigut tant acurada com el primer cas però continua sent acceptable per tant podem realitzar el càlcul.

5.2.1 Gràfiques pressió i velocitat model millorat

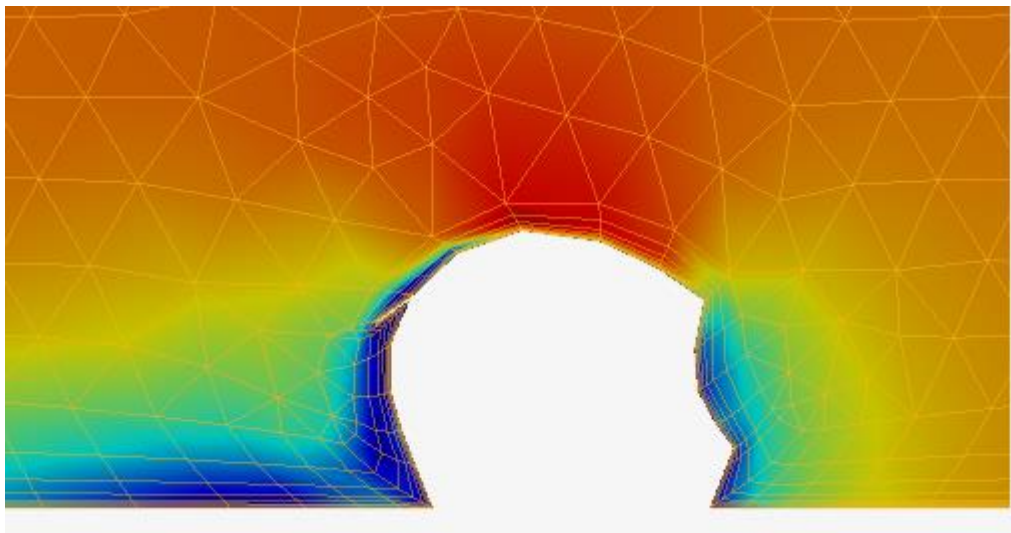
Gràfic de colors mapa de pressions



Gràfica 21: Mapa de pressions del casc amb spoiler millorat

Gràfic molt semblant per la simulació del spoiler més curt. Aquest cop però, veiem com les pressions darrere del casc no són tant altes com la simulació anterior, la qual cosa indica que els vortex seran menors possiblement.

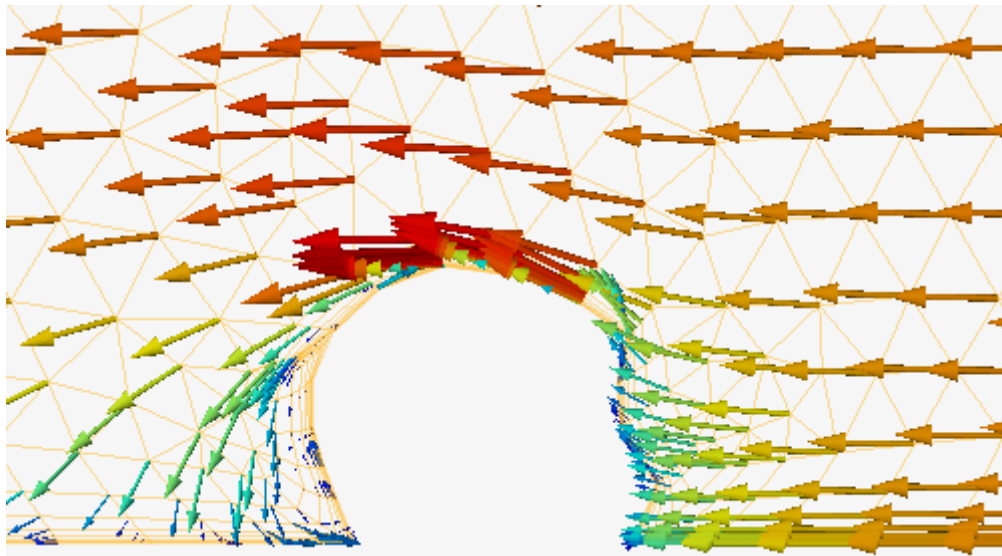
Gràfic de colors mapa de velocitats



Gràfica 22: Mapa de velocitats del casc amb spoiler millorat

Com els anteriors casos, velocitats altes en la zona més fina del casc i a causa del spoiler la direcció del flux de la velocitat varia en comparació al model sense spoiler on ara, en la zona propera al spoiler les velocitats no són tan baixes.

Gràfic de vectors de direcció de velocitat



Gràfica 23: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc amb spoiler millorat

Per la direcció dels vectors la diferència respecte l'aleró més curt és que la direcció de les línies de flux en la zona del spoiler tendeixen a seguir el seu angle i s'obtenen més línies de flux seguint aquesta direcció, com a conseqüència no hi ha tantes línies de flux en direcció vertical.

5.2.2 Càlcul coeficient de drag i lift model millorat

Força de drag

Directament realitzem el càlcul en forma de steps i s'agafa el resultat de l'últim pas (resultat més fiable)

Curve:	AUTO part1_solida_spoiler_fii	Pt		X	Y	Show X as:
Point:	26	20		210000000000.0	29.372511732521275	Linear
X:	270000000000.0	21		220000000000.0	29.460582513361185	dB10
Y:	29.587985776422492	22		230000000000.0	29.530814018877678	dB20
Slope:	9.97947057824078e-13	23		240000000000.0	29.566723137018904	Show Y as:
Time:	270000000000.0	24		250000000000.0	29.57978880354113	Linear
		25		260000000000.0	29.57800630584425	dB10
		26		270000000000.0	29.587985776422492	dB20

Sync Coordinate Data With Axis Format

Gràfica 24: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat, en funció del nº de steps en el càlcul

El valor correspon a **29,58 N**. La resistència a l'avanç serà lleugerament superior que en l'aleró curt.

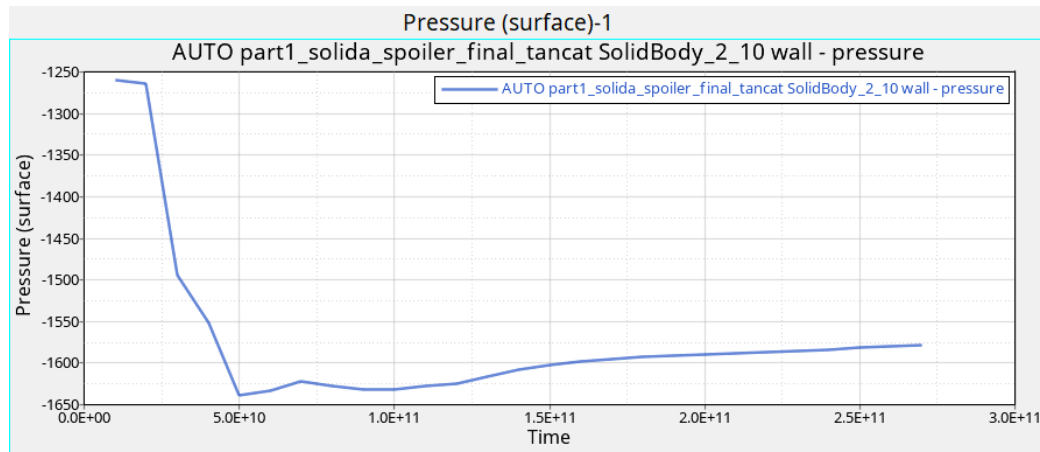
Força de lift

Es seguirà el mateix procediment que en la força de drag, però ara en l'eix Y. Mirant l'últim step del càlcul es veu com el resultat és negatiu de **25,59 N**. Lift lleugerament superior que el model amb l'aleró més curt.

Curve:	AUTO part1_solida_spoiler_fi	Pt	X	Y
Point:	0	20	210000000000.0	25.535143450777547
X:	10000000000.0	21	220000000000.0	25.56602397640329
Y:	4.243546658260819	22	230000000000.0	25.57749046994254
Slope:	6.671866568534419e-10	23	240000000000.0	25.5814659812342
Time:	10000000000.0	24	250000000000.0	25.577789554120333
		25	260000000000.0	25.578642109376315
		26	270000000000.0	25.593955093572106

Gràfica 25: Valors de la força de lift (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat, en funció del nº de steps en el càlcul

Pressió màxima



Gràfica 26: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat en funció del temps de simulació

La pressió màxima obtinguda és de 1575 Pa aproximadament, on deduïm per el mapa de colors que correspon en la zona frontal del casc.

Càlcul CD

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cd$$

$$Cd = \frac{2D}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot 29,59}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = 0,531$$

$$Cd = 0,531$$

Càlcul CL

$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cl$$

$$Cl = \frac{2l}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot 25,59}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = 0,459$$

$$Cl = 0,459$$

Els resultats són molt similars respecte els 2 casos tot i que en aquest darrer el drag sigui lleugerament més elevat, el flux turbulent a darrere del casc és menor, sinònim de menys vibracions que puguin causar moviments estranys en el cap del pilot.

5.3 Comparació anàlisi CFD 1r model millorat a un angle de 20º

Es repetirà la mateixa simulació que en l'anterior apartat, però aquest cop girant el casc a uns - 20 º (angle del casc respecte l'horitzontal (eix Z)).

Així doncs els paràmetres seran els mateixos, el que ens canviarà serà la posició del túnel de vent i conseqüentment la malla (*figura 45*) que en aquesta ocasió si que ens ha permès elaborar un mallat més fi en el contorn del casc.

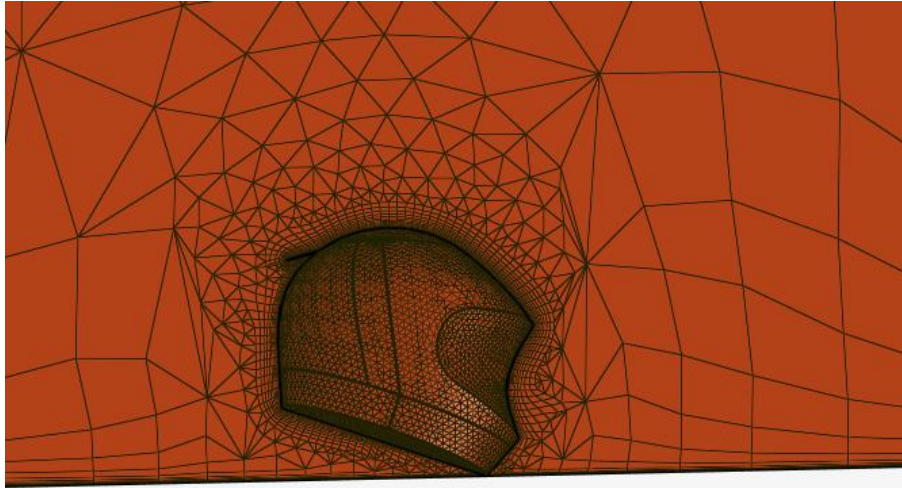
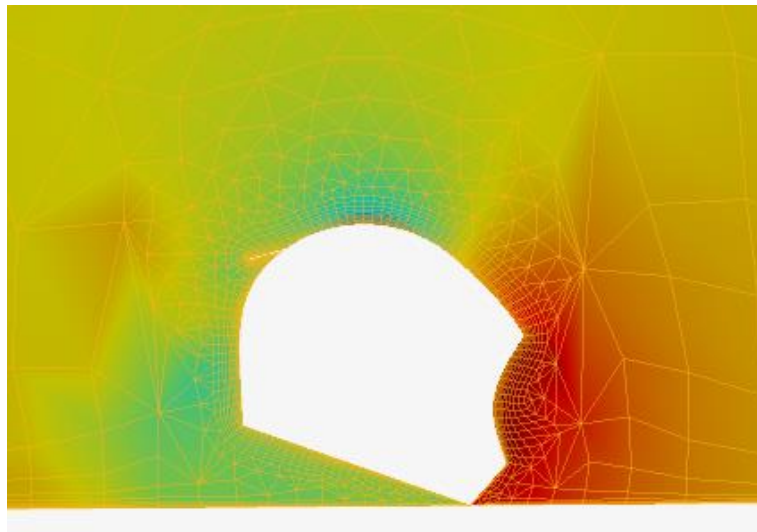


Figura 45: Malla obtinguda del casc amb spoiler millorat en posició inclinada

5.3.1 Gràfiques pressió i velocitat model millorat inclinat

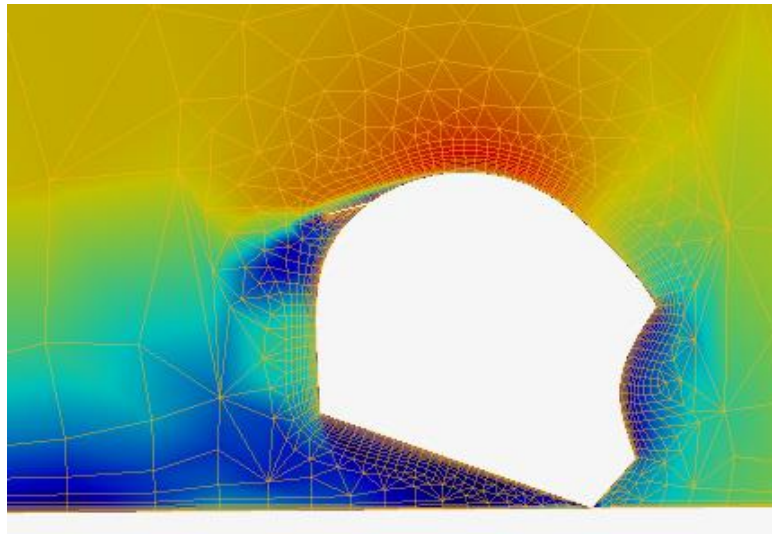
Gràfic de colors mapa de pressions



Gràfica 27: Mapa de pressions del casc amb spoiler millorat en posició inclinada

En el gràfic de pressions té lloc el que s'ha comentat per a la primera simulació inclinada. La diferència és que amb el spoiler, les pressions en la zona propera al spoiler són més baixes i com a conseqüència velocitats més altes, degut a l'efecte coanda que fa que el fluid vagi més enganxat al cos.

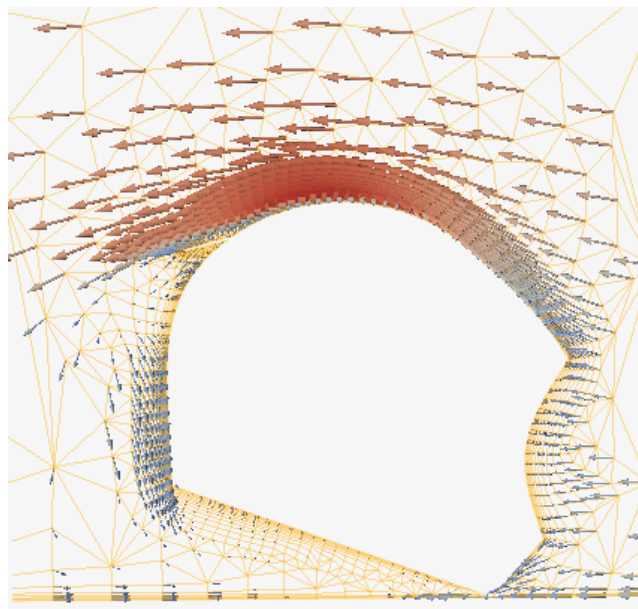
Gràfic de colors mapa de velocitats



Gràfica 28: Mapa de velocitats del casc amb spoiler millorat en posició inclinada

Per aquest angle inclinat sí que veiem realment la funció del spoiler, el flux ressegueix el contorn superior del casc fins arribar a la zona crítica, però gràcies al spoiler i el fenomen de l'efecte Coanda el flux ressegueix també el contorn de l'aleró i continua una centímetres més de forma laminar. A partir de llavors i sobretot en la part posterior del casc, la pressió torna augmentar i la velocitat disminueix.

Gràfic de vectors de direcció de velocitat



Gràfica 29: Mapa de vectors de direcció de velocitat del casc amb spoiler millorat en posició inclinada

En el gràfic de vectors es veu encara més bé com el flux en la part superior és perfecte (velocitats altes i línies de flux en una única direcció), però per contra, la part frontal perjudica molt (acumulació de pressions en la visera i barbata) així com la part posterior (línies en direcció Y i fins hi tot algunes contràries al sentit de l'aire).

5.3.2 Càlcul coeficient de drag i lift model millorat inclinat

Força de drag

Directament realitzem el càlcul en forma de steps i s'agafa el resultat de l'últim pas (resultat més fiable)

Curve:	AUTO part1_solid_spoiler_fii	Pt	X	Y
Point:	0	25	260000000000.0	44.75346867786082
X:	10000000000.0	26	270000000000.0	44.64570878793872
Y:	142.95947567000954	27	280000000000.0	44.6176921015184
Slope:	-8.541241593751462e-9	28	290000000000.0	44.605322681059384
Time:	10000000000.0	29	300000000000.0	44.5384500260501
		30	310000000000.0	44.411448737132204
		31	320000000000.0	44.29318501423869

Gràfica 30: Valors de la força de drag (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat en posició inclinada, en funció del nº de steps en el càlcul

El valor correspon a **44,29 N**. La resistència a l'avanç major que per el casc a 0º

Força de lift

Es seguirà el mateix procediment que en la força de drag, però ara en l'eix Y. Mirant l'últim step del càlcul es veu com el resultat és negatiu de **2.93 N**. Lift pràcticament nul degut el que s'ha comentat en la segona simulació.

Curve:	AUTO part1_solid_spoiler_fii	Pt	X	Y
Point:	0	25	260000000000.0	2.9340312140537463
X:	10000000000.0	26	270000000000.0	3.0462157282155977
Y:	-26.139279524610295	27	280000000000.0	3.1540867608361967
Slope:	-8.604049642447187e-10	28	290000000000.0	3.17423912789008
Time:	10000000000.0	29	300000000000.0	3.095854054177007
		30	310000000000.0	2.9905810059236266
		31	320000000000.0	2.936911432389222

Gràfica 31: Valors de la força de lift (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat en posició inclinada, en funció del nº de steps en el càlcul

Càlcul CD

$$D = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cd$$

$$Cd = \frac{2D}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot 44,29}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = 0,795$$

$$Cd = 0,795$$

Càlcul CL

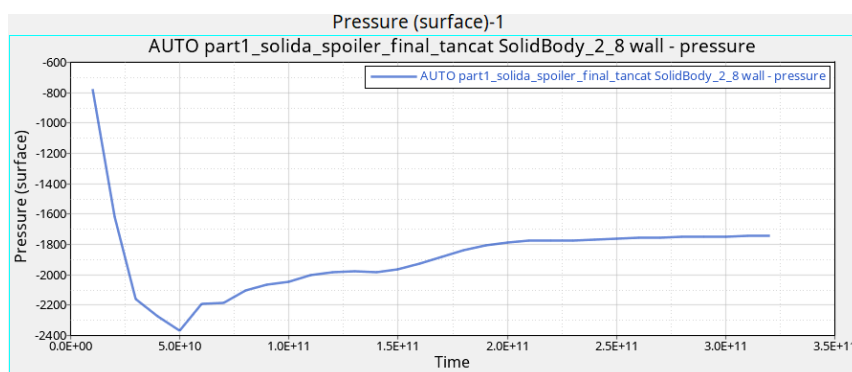
$$L = \frac{1}{2} \times \rho \times v^2 \times Af \times Cl$$

$$Cl = \frac{2l}{\rho \times v^2 \times Af} = \frac{2 \cdot 2,93}{1,29 \cdot 80^2 \cdot \frac{0,027}{2}} = 0,052$$

$$Cl = 0,052$$

El principal problema d'aquest model amb la simulació feta per a 20 graus d'inclinació, és l'excés de pressió que hi ha en la zona frontal, començant per la visera i acabant per la zona de la barbata.

Aquesta zona del casc és una zona crítica d'acumulació de pressions que fa que el drag no sigui l'esperat. El casc, al estar orientat cap a sota, la pressió queda acumulada en la zona còncaua així com en la part inferior de la barbata ocasionant unes velocitats del fluid molt lentes que com es veu en el resultat interfereixen molt en la força de drag (força que s'oposa al moviment) que és aproximadament $\frac{3}{4}$ parts més gran que la força en la simulació per a 0 graus.



Gràfica 32: Valor de la pressió (en unitats de SI) del casc amb spoiler millorat en posició inclinada, en funció del temps de simulació

La solució que donaria un drag més baix seria una visera amb una forma lleugerament convexa i l'angle de la zona de la barbata on es tanca el casc menys pronunciat. D'aquesta manera, el flux no es quedaria estancat en aquesta zona i podria escapar-se per sobre seguint el contorn del casc.

No obstant en la competició de moto GP aquesta zona ja no es té en compte aerodinàmicament ja que alhora de fer el disseny (com es veu en la figura 46) aquesta zona queda coberta per el para-xocs de la moto i l'aire només interfereix en la part frontal.



Figura 46: Pilot de Ducati en posició al pas per recta on amaga el cap per sota el paraxocs perquè només quedi exposada en l'aire, la part de sobre del casc.

6-Conclusions

Vistos els resultats obtinguts de les 5 simulacions que finalment s'han pogut materialitzar, la conclusió final és satisfactòria: s'ha obtingut dos models modificats respecte el casc base molt semblants però amb petites diferències comentades en l'anàlisi, on la modificació que s'ha fet és l'afegit d'un spoiler que ha millorat les condicions aerodinàmiques.

Pel que fa a l'elecció entre els dos models, el casc preferit és amb el que s'ha obtingut un drag lleugerament més gran però amb uns millors resultats en el túnel de vent (en la part posterior on s'ha obtingut un flux menys turbulent).

En comparació el model base, **s'ha reduït en un 11,8 % el coeficient de drag**. Tal i com s'ha vist a la part teòrica el drag és el coeficient que determina si el perfil és aerodinàmic o no. Al obtenir un drag menor es pot afirmar que la millora aerodinàmica s'ha completat. Per tant, s'ha assolit l'objectiu del treball.

Posant com a exemple l'aplicació del casc modelat en la realitat en un pilot de moto GP, tenint en compte aquesta millora, el pilot guanyaria més velocitat punta en recta i probablement les vibracions i sorolls que rebria serien menors degut a que el flux en la part posterior és menys turbulent.

Tot i això, han quedat algunes zones conflictives on hi ha aspectes a millorar. Algunes millores es proposen en els punts següents després de comparar i veure els anàlisis estudiats:

Propostes de millora perquè el casc pugui sigui més aerodinàmic:

✚ Zona frontal:

Part de la visera: la primera proposta seria que el disseny de la visera no fos totalment pla, és a dir, dissenyar-la amb una forma lleugerament còncaua per evitar l'acumulació de pressions. Al tenir un cert radi, el flux d'aire no es quedaria estancat en un mateix punt sinó que aniria o cap a la zona superior o cap a la zona inferior.

Part barbeta: disminuir l'angle de la zona de la barbeta respecte la visera, per evitar estancament de pressió en la zona baixa del casc, i com el cas de la visera donar-li una certa concavitat per reduir l'acumulació de pressions.

✚ **Zona superior:** com es veu en l'anàlisi, el desprendiment de la capa límit es dona relativament ràpid. Per aconseguir retardar aquest desprendiment la idea seria modificar la geometria i obtenir una zona més fina amb un radi més gran, fins a arribar al spoiler.

✚ **Geometria i disseny del spoiler:** en les simulacions per el casc en angle 0 es veu com el desprendiment de la capa límit es comença a produir abans d'arribar al spoiler. La solució seria col·locar el spoiler just a la zona on comença a separar-se el fluid del contorn del casc perquè continuï amb una alta velocitat en la zona del spoiler.

Una altra millora seria reduir l'angle del spoiler, per aconseguir que les línies de flux vagin el més recta possible sense desviar-se cap a l'eix y.

✚ **Zona posterior:** és una zona crítica on les alternatives de millora es redueixen per a les dimensions del casc. Seria possible elaborar un acabat en forma més punxeguda, intentant assemblar-se a la part posterior de un casc de bici per crono-rellotge (imatge 45). Una altra alternativa seria incloure una entrada d'aire a la part superior i redirigir la en la part posterior, perquè l'aire sortís el més recte possible, així s'aconseguiria unes

velocitats més altes de sortida en la zona posterior que minimitzarien les turbulències de l'aire restant que passaria per sobre el casc.

Aplicant aquestes millores ideades a partir dels gràfics i resultats obtinguts, en el casc final del present estudi es veuria una millora considerable on el drag es reduiria encara més.

No obstant aquestes són algunes propostes de millora que gràcies a l'estudi s'han ideat, però ni molt menys són les úniques ja que les possibilitats de millora que es podrien fer són pràcticament infinites.

En els estudis d'aerodinàmica la dedicació que es dona a les simulacions de prova i error són molt importants i es veuen reflectides en les hores de simulació. Recordar que en els equips competitius de curses de motor, tant en cotxes com en motos, hi ha un equip extens que tan sols es dedica a la aerodinàmica. La major feina de dedicació del equip és la d'estudiar el comportament dels elements que tenen contacte amb l'aire i dissenyar noves geometries comprovant cada prova en túnels de vent fins a obtenir un disseny fiable.

Pel que fa al transcurs del treball, afegir que tot i els problemes sorgits en la part pràctica del treball, el resultat ha estat favorable. La intenció era elaborar un anàlisi d'un casc real, i afegir millores reals i veure com es comportaria aquest en front a les modificacions.

No obstant com a conseqüència de la complexitat del casc, no es va poder continuar amb les simulacions i es van haver de trobar alternatives que van allargar el treball i van suposar la creació pròpia de un casc de motociclisme que s'assemblés en mesura del possible a un casc real.

Tot i això, no tot són contres ja que aquest conflicte ha permès a l'autor del treball aconseguir una major fluïdesa en programes de CAD, especialment en el disseny de superfícies, que en la branca de l'automoció és una part essencial en el disseny de la majoria de components de un vehicle, començant per la carrosseria, fins a la part interior amb el disseny de seients i formes del vehicle interior.

Finalment el resultat pràctic del treball ha sigut similar tot i que ha estat un treball més acadèmic, on a favor s'han vist els canvis aerodinàmics amb més determinació però per contra, l'anàlisi s'allunya d'una simulació real degut a la geometria del casc modelat de creació pròpia, que com és lògic, per la complexitat de geometries dels cascs avui en dia, es necessitaria de moltes hores de disseny per obtenir un casc real.

7- Bibliografia

1. Vives J. Apunts fluidodinàmica grau d'automoció. 2019.
2. Kimerius aircraft. Aerodynamic Factors. En p. 1-18. Disponible a: <https://www.kimerius.com/aerodinàmica/>
3. Subcourse Number AL0966. Basic Aerodynamics. army Inst Prof Dev. 1994;2.
4. Gandhi VCS, Kumaravelan R, Ramesh S, Venkatesan M, Krishnan MSR. An Aerodynamic Design and Analysis of Motor Cycle Helmet with Anti-Glare Visor. 2014;8(3):622-5.
5. Carrilho J, Silva M da. Aerodynamic noise in motorcycle helmets. II LAETA Young Res Meet FEUP, Porto [Internet]. 2012;(April):10-1. Disponible a: https://www.researchgate.net/profile/Joao_Dias_Carrilho/publication/259910492_Aerodynamic_Noise_in_Motorcycle_Helmets/links/0a85e52e7e4874c6ed000000.pdf
6. Qin R, Chunyi D. The principle and applications of Bernoulli equation. J Phys Conf Ser [Internet]. 2017;7. Disponible a: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/916/1/012038/pdf>
7. Bernoullis equation [Internet]. Disponible a: <https://www.khanacademy.org/science/physics/fluids/fluid-dynamics/a/what-is-bernoullis-equation>
8. Felföldi A. What Is the Venturi Effect? Simscale blog [Internet]. 2021; Disponible a: <https://www.simscale.com/blog/2018/04/what-is-venturi-effect/>
9. Oriol. El Efecto Venturi en la Fórmula 1. Racing Atmos [Internet]. 2018; Disponible a: <https://www.racingatmosphere.com/aerodinamica/efecto-venturi/>
10. Oriol. El Efecto Coanda en la fórmula 1. Racing Atmos [Internet]. 2018; Disponible a: <https://www.racingatmosphere.com/aerodinamica/efecto-coanda/>
11. Fernández Osma M. La capa límite. Aerodinámica F1 [Internet]. 2019; Disponible a: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/09/la-capa-limite/>
12. Fernández Osma M. ¿Qué es el número de Reynolds? Aerodinámica F1 [Internet]. 2020; Disponible a: <https://www.aerodinamicaf1.com/2020/10/que-es-el-numero-de-reynolds/>
13. Fernández Osma M. Flujo laminar y turbulento. Aerodinámica F1 [Internet]. 2019; Disponible a: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/flujo-laminar-y-turbulento/>
14. Fernández Osma M. Los generadores de vórtices en la Fórmula 1. Aerodinámica F1 [Internet]. 2019; Disponible a: <https://www.aerodinamicaf1.com/2019/10/los-generadores-de-vortices-en-la-formula-1/>
15. Andreas D. [Altair Academic Program] (2021). *Evaluating aerodynamics with Altair CFD Solutions* [Video]. Youtube. Disponible a: <https://www.youtube.com/watch?v=ox2aCp9IQJI>