

Treball final de grau

Estudi: Grau en Enginyeria Mecànica

Títol: Disseny d'un aleró davanter de l'EuroFormula Open

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Christian Simón Rodríguez

Tutor: Lino Montoro Moreno

Departament: Enginyeria Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids – Màquines i Motors Tèrmics

Convocatòria (mes/any): Setembre 2019

MEMÒRIA

ÍNDEX

1.	INTRODUCCIÓ.....	4
1.1	Antecedents	4
1.2	Objecte del projecte.....	7
1.3	Especificacions i abast.....	8
1.3.1	Especificacions.....	8
1.3.2	Abast.....	8
2.	DESCRIPCIÓ DEL MONOPLAÇA DE DALLARA F317	9
2.1	Monoplàça F317.....	9
2.2	Aleró davanter.....	10
2.2.1	Ala principal.....	11
2.2.2	Flap.....	12
2.2.3	Derives.....	12
2.2.4	Endplate	13
3.	METODOLOGIA DE TREBALL	14
3.1	Introducció	14
3.2	Disseny	14
3.3	Mètode de simulació.....	16
3.3.1	Simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil.....	17
3.3.2	Simulació en funció de la velocitat de desplaçament	31
3.3.3	Simulació en funció de l'alçada respecte al terra	33
3.4	Anàlisi Static Structural	34
4.	RESULTATS.....	38
4.1	Introducció	38
4.2	Resultats de la simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil.....	38
4.2.1	Càlcul dels coeficients aerodinàmics.....	41
4.3	Resultats de la simulació en funció de la velocitat de desplaçament.....	46
4.3.1	Càlcul dels coeficients aerodinàmics.....	48
4.4	Resultats de la simulació en funció de l'alçada respecte al terra	51
4.4.1	Càlcul dels coeficients aerodinàmics.....	53
4.5	Resultats de l'anàlisi estructural de l'aleró	57
5.	CONCLUSIONS	60
6.	RELACIÓ DE DOCUMENTS	62
7.	BIBLIOGRAFIA.....	63
8.	GLOSSARI.....	64

ANNEXOS

A.- AERODINÀMICA I MECÀNICA DE FLUIDS.....	67
A.1 Introducció	67
A.2 Equació de continuïtat	67
A.3 Equació de Bernoulli.....	67
A.4 Capa límit.....	67
A.5 Perfil alar	68
A.6 Angle d'atac.....	69
A.7 Efecte terra.....	70
A.8 Perfil alar NACA de 4 dígit.....	71
A.9 Coeficients aerodinàmics	72
A.10 Eficiència aerodinàmica	72
B.- RESULTATS DE LES SIMULACIONS EN FUNCIO DE L'ANGLE D'ATAC.....	74
B.1 Introducció	74
B.2 Resultats de les simulacions.....	74
C.- RESULTATS DE LES SIMULACIONS EN FUNCIO DE LA VELOCITAT DE DESPLAÇAMENT	107
C.1 Introducció	107
C.2 Resultats de les simulacions.....	107
D.- RESULTATS DE LES SIMULACIONS EN FUNCIO DE L'ALÇADA RESPECTE AL TERRA	116
D.1 Introducció	116
D.2 Resutats de les simulacions.....	116
E.- RESULTATS DE L'ANÀLISI ESTRUCTURAL.....	137
E.1 Introducció	137
E.2 Resultats de les simulacions.....	137

1. INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

L'EuroFormula Open, antigament anomenada European F3 Open, és un campionat internacional de Fórmula 3 que es disputa a Europa des del 2009. Gràcies a l'empresa espanyola GT Sport en col·laboració amb la *Real Federación Española de Automovilismo (RFEDA)*, l'any 2001 el campionat es va iniciar com a *Campeonato de España de Fórmula 3*, per tal de substituir altres campionats que van desaparèixer com la Fórmula Renault o la Fórmula Supertoyota. L'objectiu d'aquest nou campionat era crear un escaló d'accés al que no fa gaire es coneixia com la World Series by Renault, campionat que va deixar d'existir al finalitzar la temporada 2017.

L'any 2014, la Federació Internacional de l'Automòbil (FIA) va decidir limitar l'ús del terme *F3* únicament als campionats que utilitzessin reglamentació de motors FIA més actual. Així és una manera de quedar-se sense competència amb el seu Campionat Europeu de FIA Fórmula 3. Per tant, GT Sport va canviar el nom de European F3 Open per EuroFormula Open.



Figura 1. Monoplça de la categoria EuroFormula Open, F317.

El format i el sistema de puntuació que utilitza aquesta categoria durant el cap de setmana és el següent:

L'esdeveniment comença amb sessions d'entrenaments lliures els divendres. Dissabte és fa la primera sessió de classificació amb una durada de 30 minuts per tal de definir l'engraellat de sortida de la primera cursa que es disputa el mateix dissabte. Aquesta té una duració màxima de 35 minuts o una distància màxima de 95 kilòmetres. El mateix succeeix el diumenge amb una segona sessió de classificació de 30 minuts i una segona cursa de 35 minuts o 95 kilòmetres de

distància. Un cop finalitzada cada cursa els deu primers classificats obtenen, tant l'escuderia com els pilots, començant pel primer i finalitzant pel desè, 25, 18, 15, 12, 10, 8, 6, 4, 2 i 1 punt/s, respectivament. També se li atorga 1 punt al pilot i a l'escuderia que fa la *pole position* a cada sessió de classificació, i el mateix succeeix quan es fa aquesta volta ràpida a les curses.

A dia d'avui l'EuroFormula Open és la millor plataforma per accedir a curses de Fórmula 3, és la sèrie que ofereix les millors actuacions de curses de Fórmula 3, és el campionat de Fórmula 3 amb la millor relació cost / exposició, i és el campionat de Fórmula 3 amb el nombre major de Dallara F317, l'últim automòbil de Fórmula 3 desenvolupat i construït per Dallara, tot i que de cares a la següent temporada ja s'ha vist el disseny del nou Dallara F320 degut a canvis en el reglament tècnic de la competició.



Figura 2. Dallara F320, el nou monoplaça a partir de l'any 2020.

Dallara Automobili és un fabricant italià de xassís fundat pel dissenyador Gian Paolo Dallara l'any 1972. Actualment, i des de l'any 1993, s'ha convertit gairebé en el principal i únic constructor de xassís de tots els monoplaços en la majoria de categories de Fórmula 3, i per tant és l'encarregat de complir amb el reglament tècnic de la competició.

Històricament ha participat en el disseny i construcció d'automòbils de carrer de marques com Lancia, Alfa Romeo, Audi, Toyota i Honda.

De cares a la competició, Dallara ha arribat a crear xassís per a monoplaços de Fórmula 1 en les escuderies HRT F1 Team i Haas F1 Team. També ha sigut durant molts anys l'únic constructor de les World Series by Renault i de les GP2 Series.

Actualment Dallara fabrica xassís a les competicions IndyCar Series i a la Formula E, entre d'altres, a part de moltes categories de Fórmula 3 on s'inclou el campionat de l'EuroFormula Open.



Figura 3. Diferents categories on Dallara participa o ha participat.

Al llarg dels anys la competició en el món de la automoció ha anat evolucionant de manera considerable. Avui en dia, guanyar unes centèsimes o mil·lèsimes de segon per volta respecte als rivals és fonamental per garantir èxits tant a nivell individual (pilots) com a nivell col·lectiu (marques i/o escuderies, entre d'altres). És clar, que el talent d'un pilot té certa influència, sobretot en categories com l'EuroFormula Open on hi ha màxima igualtat entre escuderies ja que totes tenen les mateixes prestacions per igual. Però la posta a punt del monoplaça és fonamental ja que aquesta varia segons les característiques de cada circuit. Un dels ajustatges que el reglament de la competició permet fer a les escuderies per tal d'aconseguir una bona posta a punt és per exemple l'angle d'inclinació dels flaps o ales mòbils de, tant l'aleró davanter com l'aleró posterior. L'aleró davanter té com a finalitat, entre d'altres, la de millorar l'efecte terra del vehicle amb una mínima resistència a l'avanç, mentre que l'aleró posterior és un dels elements que més *downforce* genera en el cas dels monoplaços.

1.2 Objecte del projecte

L'objecte del projecte serà el disseny d'un aleró davanter, implementant un perfil alar NACA 2408, tot complint amb la normativa establerta que marqui el reglament tècnic de la competició, i que sigui òptim segons els punts de vista aerodinàmics. L'objectiu final és l'obtenció dels coeficients aerodinàmics de càrrega aerodinàmica (C_L) i de resistència a l'avanç (C_D) de cadascuna de les diferents simulacions a realitzar:

- El comportament dels coeficients aerodinàmics en funció de l'angle d'atac del flap mòbil, a una velocitat constant i a una mateixa alçada respecte al terra.
- El comportament dels coeficients aerodinàmics a diferents alçades, mantenint una velocitat constant i un angle d'atac del flap mòbil concret.
- El comportament dels coeficients aerodinàmics a diferents velocitats, amb un angle d'atac del flap mòbil en concret i a una mateixa alçada respecte al terra.

També es farà l'anàlisi estructural del disseny per veure el comportament d'aquest, concretament la seva deformació total.

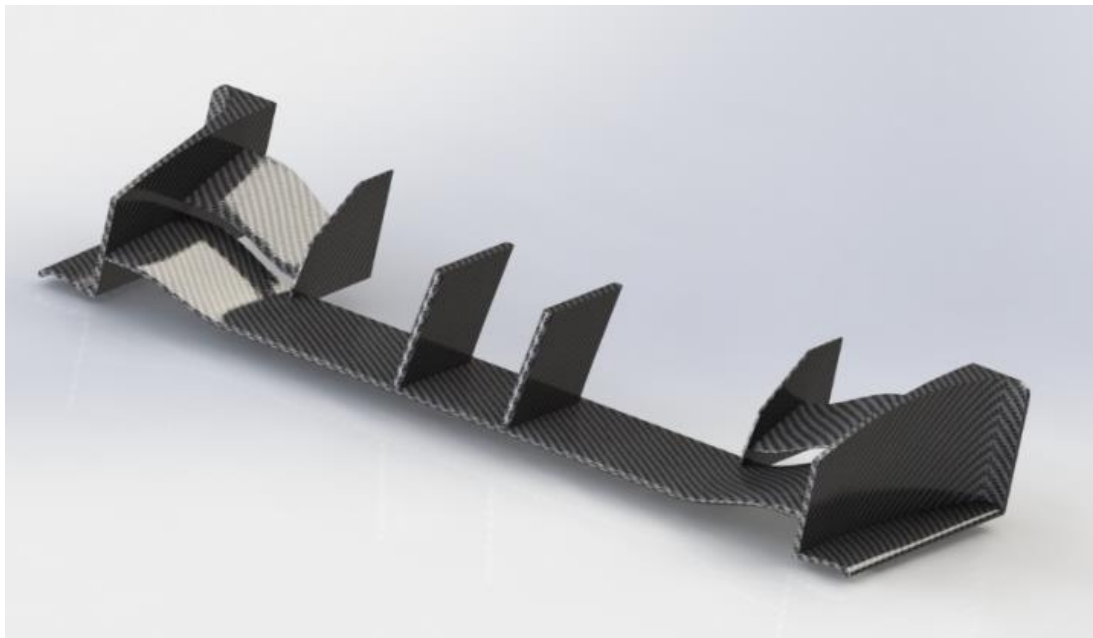


Figura 4. Concepte de disseny de l'aleró davanter.

1.3 Especificacions i abast

1.3.1 Especificacions

Requeriments en el disseny:

- L'angle d'incidència del pla principal de l'aleró ha de ser de $0,69^\circ$.
- S'ha de considerar en el disseny de l'aleró uns flaps mòbils d'alta càrrega.
- L'angle d'incidència dels flaps mòbils ha de tenir un mínim de 3° i un màxim de 34° per tal de jugar amb la posta punt del monoplaça que dependrà de les característiques del propi circuit.
- L'amplada de l'aleró no pot superar l'amplada total del monoplaça que és de 1845 mm, pneumàtics inclosos.

1.3.2 Abast

El disseny del *front wing* es realitzarà mitjançant programes de dibuix 3D com Solidworks, i es farà el seu respectiu anàlisi amb programes de simulació de túnel de vent com ANSYS CFX, per tal de perfeccionar el disseny aerodinàmic del nostre aleró i l'efecte sobre la nostra estructura de les càrregues aerodinàmiques.

2. DESCRIPCIÓ DEL MONOPLAÇA DE DALLARA F317

2.1 Monoplàça F317

El model de cotxe específic per a realitzar el disseny del *front wing* és el Dallara F317. A dia d'avui aquest és el monoplàça que hi ha actualment a la categoria des de l'any 2017, que es basa en la plataforma inicialitzada amb el model F393 (1993), esmentat anteriorment. En les següents figures es pot observar un esbós del monoplàça en diferents vistes:

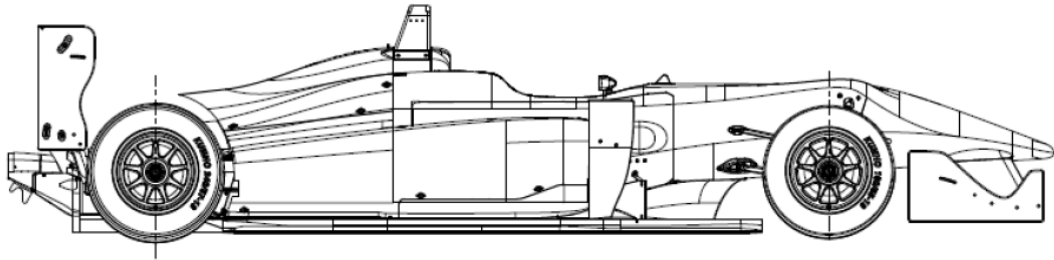


Figura 5. Vista lateral del Dallara F317 (El paquet aerodinàmic mostrat és del model F312).

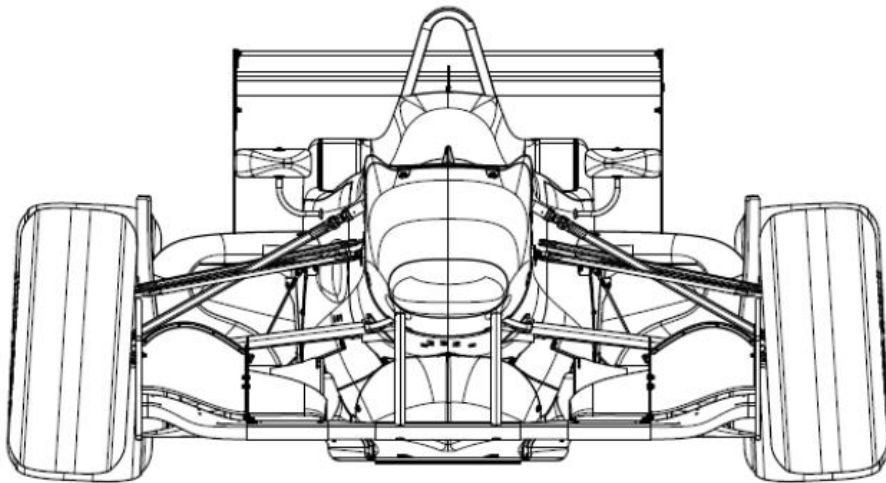


Figura 6. Vista frontal del Dallara F317 (El paquet aerodinàmic mostrat és del model F312).

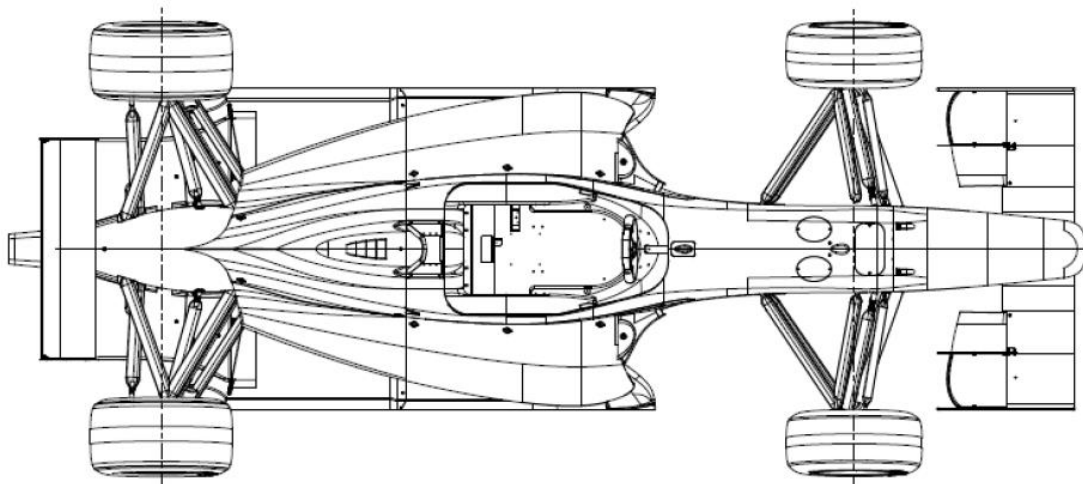


Figura 7. Vista superior del Dallara F317 (El paquet aerodinàmic mostrat és del model F312).

El Dallara F317 es basa en el xassís del seu predecessor F312. Va rebre actualitzacions importants per millorar el rendiment i la seguretat, així com ampliar la seva homologació fins a finals del 2019. En termes generals, respecte el Dallara F312, s'ha baixat el nas i s'han actualitzat les estructures d'impacte d'acord amb les normes FIA (2017-03-F3).

Aquests monoplaques poden arribar a assolir una velocitat màxima de 270 km/h.

En les següents taules es resumeix les característiques generals i els subministradors d'aquesta disciplina:

Wheelbase	2800 mm
Front track	1595 mm
Rear track	1540 mm
Overall length	4351 mm
Overall width	1845 mm [includes tires]
Overall height	945 mm [plus ride height]
Front suspension	pushrod twin damper system with torsion bar springs
Rear suspension	pushrod twin damper system with coil springs
Chassis	carbon sandwich with AL/Nomextm honeycomb
Bodywork	Glass fibre composite with Nomextm honeycomb
Gearbox	Hewland, sequential, six forward gears + reverse
G-box internals	Hewland gears and power-flow differential

Taula 1. Característiques generals i subministradors 1.

Springs	Dallara torsion bar springs and 3"/36mm ID coils
Dampers	Koni 2812 bump and rebound adjustable
Fuel cell	Premier – FT3
Extinguisher	OMP or Life Line (electric operated)
Steering wheel	OMP / BOSCH / PIEDRAFITA
Wheels	ATL / OZ 9"front & 10.5"rear
Brakes	Brembo / TM / Pagid
Battery	DEKA ref. DEAKETX 30 L or 16 or any other included at FIA technical list nº 11
Seat belts	OMP
Engine	HWA or Piedrafita or Spiess
Paddle Shift	Piedrafita or Megaline (depending on selected engine)

Taula 2. Característiques generals i subministradors 2.

2.2 Aleró davanter

L'aleró davanter és la primera part del monoplaça que contacta i es veu envoltada pel fluid. Per aquest motiu, l'aleró davanter és la part del vehicle més sensible a les variacions del flux, i una de les més importants de cares al disseny del monoplaça ja que en ella repercuteix la manera de com

dissenyar la resta de les parts aerodinàmiques del bòlid. Aquestes són les funcions més importants que té l'aleró davanter:

- Generar càrrega aerodinàmica (*downforce*).
- Evitar que el flux es dirigeixi directament a les rodes ja que aquestes generen turbulències i una resistència a l'avanç elevada (*drag*), o també per evitar que el flux es dirigeixi directament cap al pilot.
- Guiar una part del flux d'aire per tal de refrigerar, ja sigui el frens o elements del motor, etc.
- Ajuda a crear l'efecte terra del cotxe.

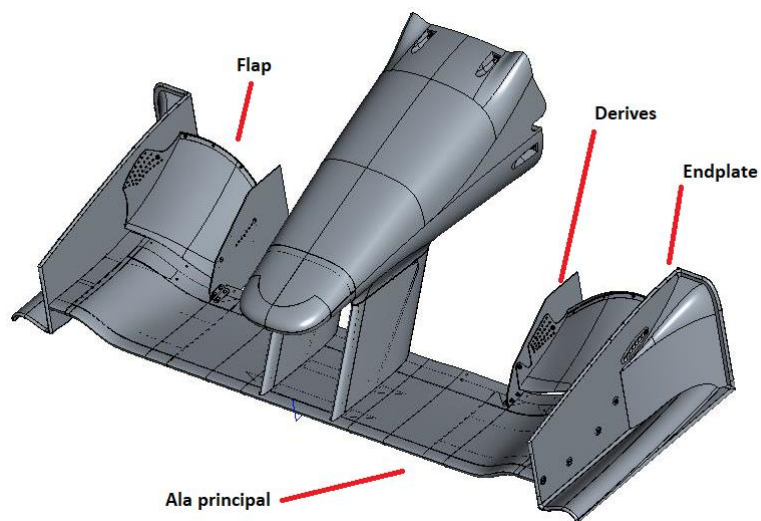


Figura 8. Parts de l'aleró davanter.

2.2.1 Ala principal

Part principal de l'aleró davanter, amb perfil alar, la qual s'uneixen la resta de components que formen part de l'aleró davanter. En la posició de referència, l'angle d'incidència de l'ala principal es de $0,69^\circ$.

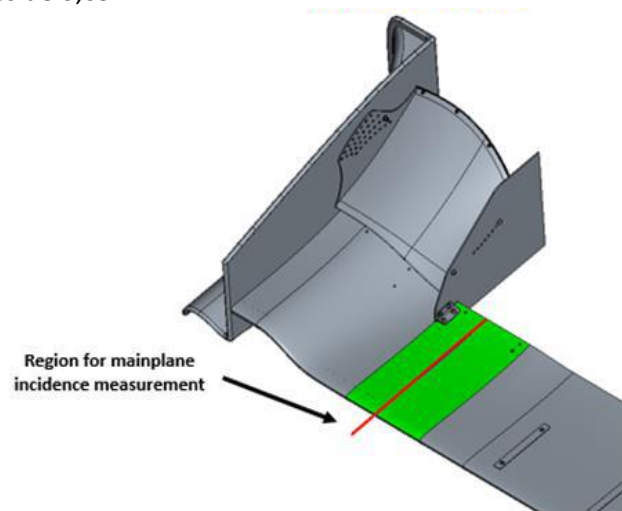


Figura 9. Regió per mesurar la incidència de l'ala principal.

2.2.2 Flap

Dispositiu fix o mòbil, amb perfil alar, que generalment forma part dels alerons i la seva funció principal consisteix en generar sustentació, és a dir, càrrega aerodinàmica.



Figura 10. Vista de perfil d'un aleró amb flap.

2.2.3 Derives

Les derives laterals tenen una funció molt important per aconseguir una bona càrrega aerodinàmica. Mantenen les zones d'alta i baixa pressió d'aire que circulen per la part superior i inferior, respectivament, de l'aleró en el seu lloc i així s'aconsegueix que el flux travessi tot el perfil alar sense poder sortir pels laterals. Sense les derives el flux d'aire es mouria de manera irregular i crearia turbulències.

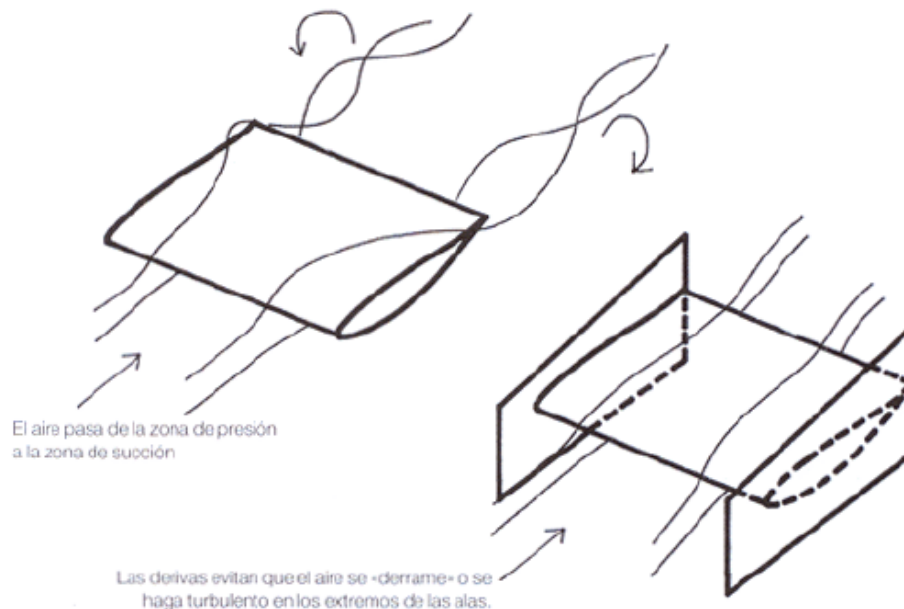


Figura 11. Funcionament de les derives laterals en un aleró.

2.2.4 Endplate

Compleix la funció de redirigir el flux aerodinàmic a l'exterior de les rodes davanteres, per tal d'evitar que aquestes generin resistència a l'avanç (*drag*), i així enviar aquest flux a zones del monoplaça on la refrigeració sigui necessària per disminuir la temperatura, o a altres parts aerodinàmiques del vehicle. També fa la funció de les derives.

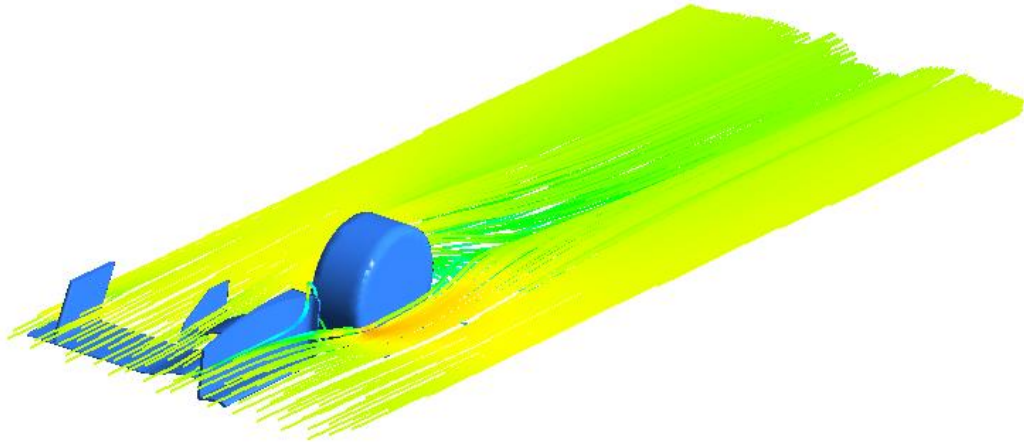


Figura 12. Exemple pràctic del endplate redirigint les línies de flux que van contra la roda.

3. METODOLOGIA DE TREBALL

3.1 Introducció

En aquest capítol s'explicarà la metodologia seguida per aconseguir l'objecte del projecte, és a dir, els coeficients aerodinàmics, partint d'un disseny del *front wing*, implementant un perfil alar NACA 2408, que compleixi amb el reglament de la competició de l'EuroFormula Open.

3.2 Disseny

Per fer el disseny de l'aleró davanter ens hem d'assegurar que aquest s'ajusti a la normativa de la competició. Per tant hem de complir, com a mínim, els requeriments en el disseny que s'explica en l'apartat 1.3.1 *Especificacions*.

Com que la normativa de la competició no especifica quin perfil alar en concret s'utilitza per al disseny i construcció del *front wing*, s'ha escollit un perfil alar qualsevol. En aquest cas, s'ha escollit un perfil alar NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) de 4 dígit, 2408 (vegis l'Annex A: Fonaments d'aerodinàmica i mecànica de fluids).

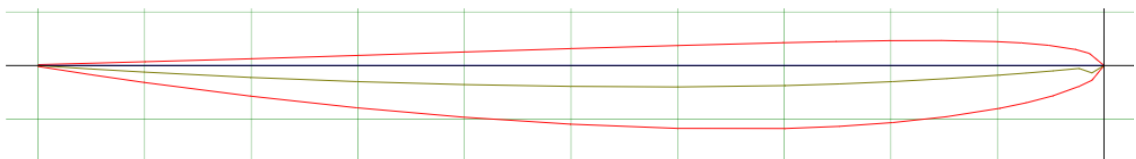


Figura 13. Perfil alar NACA 2408.

Un cop escollit el perfil es realitza el disseny de l'aleró mitjançant un programa de dibuix 3D com és el Solidworks. Degut a què posteriorment es vol fer la simulació de túnel de vent a l'aleró, es considera simplificar el disseny d'aquest, de tal manera per així evitar possibles problemes posteriors en el programa de simulació, així com per exemple, alhora de fer el mallat de l'objecte. En les següents figures es pot observar el disseny en diferents vistes:

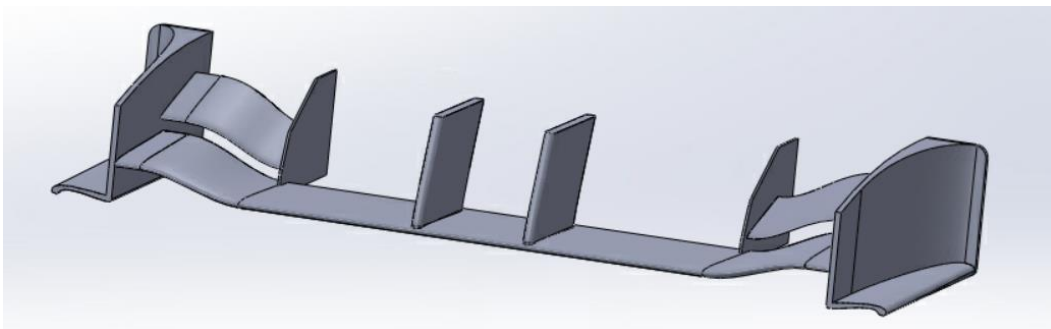


Figura 14. Disseny de l'aleró davanter amb perfil alar NACA 2408.

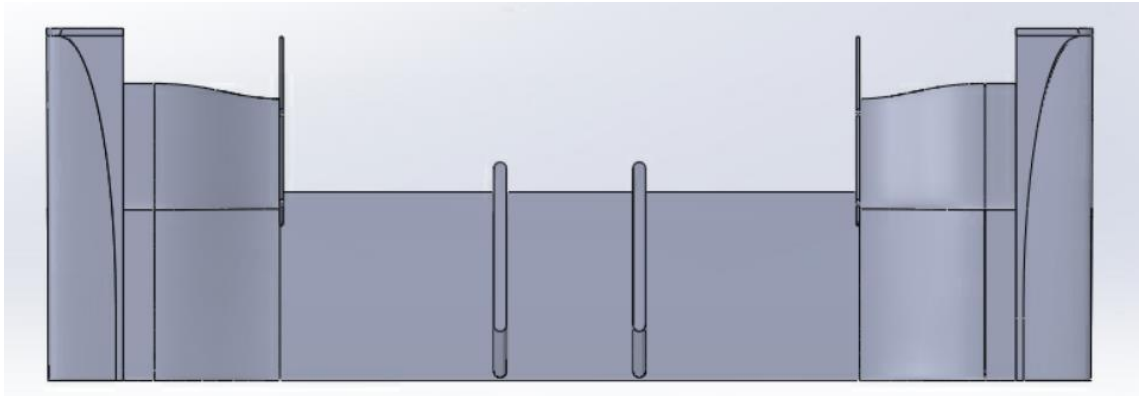


Figura 15. Vista en planta de l'aleró davanter.

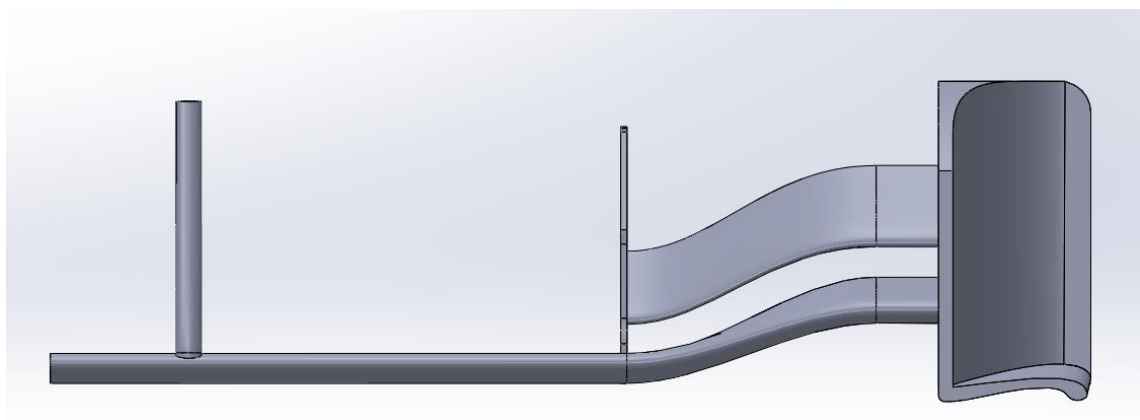


Figura 16. Vista frontal de mig aleró davanter.

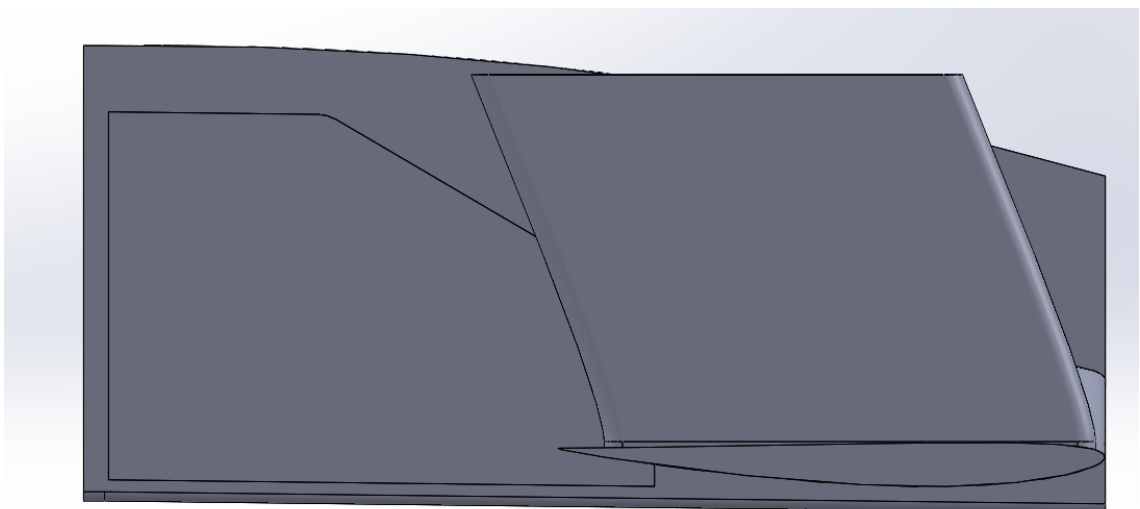


Figura 17. Vista de perfil de mig aleró davanter amb perfil alar NACA 2408 en l'ala principal.

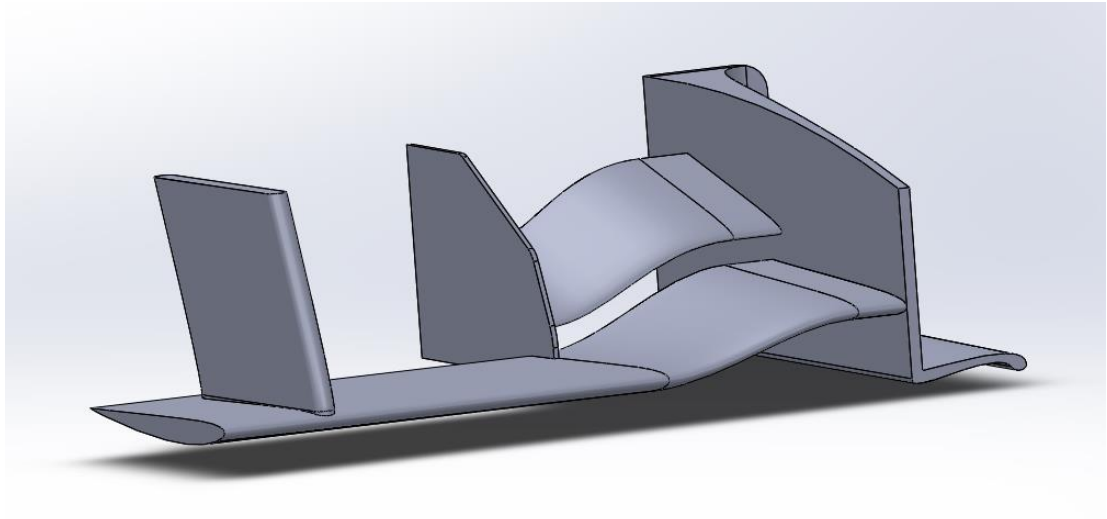


Figura 18. Vista en perspectiva del perfil alar NACA 2408 en l'ala principal.

3.3 Mètode de simulació

Degut a que l'objecte del projecte és l'obtenció i el comportament dels coeficients aerodinàmics de tres maneres diferents, implica que s'ha de fer tres tipus de simulació diferents (vegis l'apartat 1.2).

No obstant, són molt similars alhora de preparar la simulació. Per tant, s'explicarà en profunditat el procés utilitzat d'un dels tres tipus de simulacions a realitzar, mentre que els altres dos només es farà èmfasi d'allò que difereixi respecte l'explicat.

Per a dur a terme les simulacions s'ha optat per utilitzar un dels programes d'elements finits més utilitzats, l'ANSYS Workbench:

Per fer el primer tipus de simulació s'utilitzarà el *Custom System FSI: Fluid Flow (CFX) -> Static Structural* ja que s'aprofitarà la solució obtinguda de l'anàlisi del CFX per fer el *Setup* de l'anàlisi estructural:

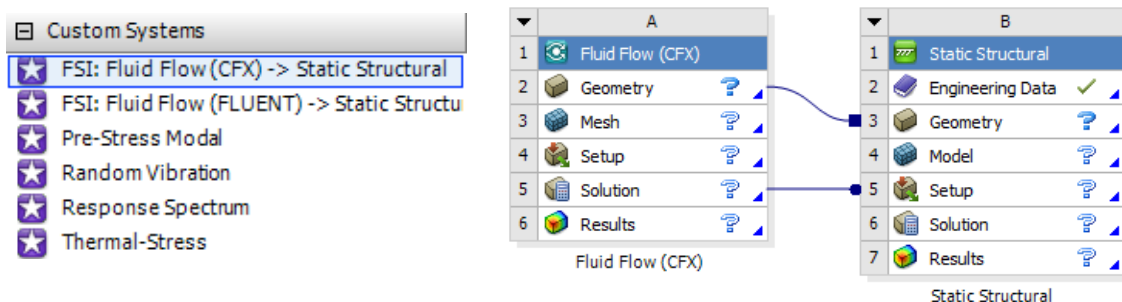


Figura 19. Simulació CFX i Static Structural.

Pels altres dos tipus de simulació només s'utilitzarà el sistema d'anàlisi *Fluid Flow (CFX)*:

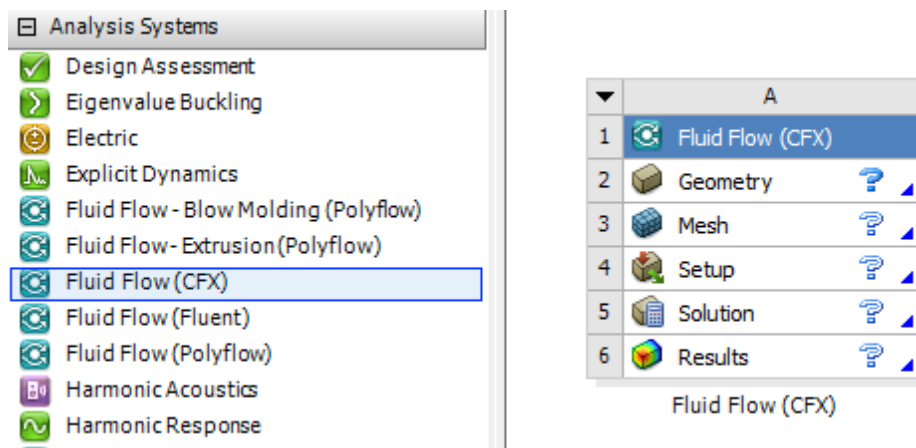


Figura 20. Simulació CFX.

Com que el programa té una condició de contorn de simetria, es farà l'estudi de mig *front wing* (vegis Figura 18) i s'aplicarà aquesta condició quan sigui necessària. Això és degut a què, de cares quan es faci el mallat, compost d'una sèrie d'elements i nodes, la llicència del programa que té la universitat només ens permet fer simulacions de 512.000 nodes com a màxim.

Per tant, si es duu a terme d'aquesta manera, el mallat que es faci serà més bo si només fem l'estudi amb mig aleró que no pas si fem l'estudi amb l'aleró sencer, i per tant, s'obtidrà uns resultats més pròxims a la realitat.

3.3.1 Simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil

Per a realitzar aquest estudi, s'ha dut a terme 32 simulacions les quals només es diferencien entre si per l'angle d'atac del flap mòbil ja que aquest pot tenir 32 posicions diferents (des dels 3° fins als 34°), i es creu que els valors que s'obtinguin dels coeficients dependran de l'angle d'inclinació que tinguin els flaps mòbils (vegis l'Annex A: Fonaments d'aerodinàmica i mecànica de fluids).

També s'ha dibuixat, amb el Solidworks, un sòlid en forma de roda per així veure com es comporta el fluid quan aquest interfereix amb la roda (vegis Figura 21).

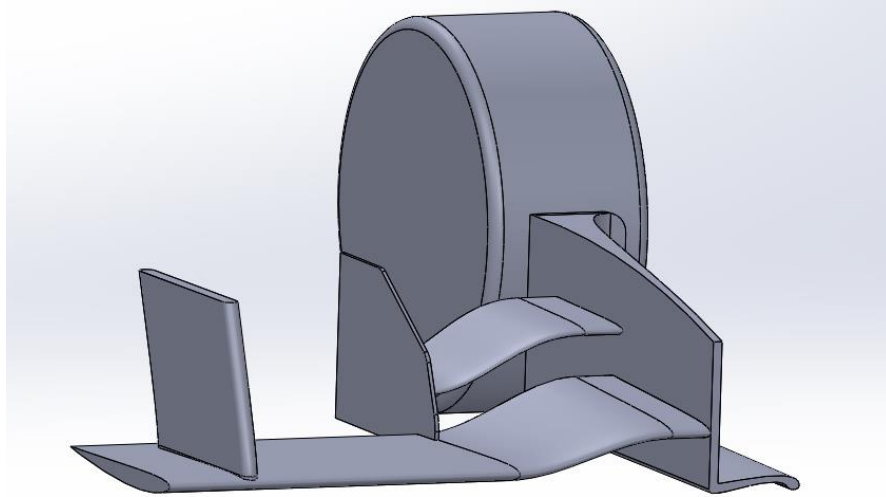


Figura 21. Sòlid mig aleró i sòlid roda.

Geometria:

Una vegada importada la geometria de mig aleró i la roda, es crea una “caixa” o domini virtual, que no deixa de ser un túnel de vent virtual, i per tant, és per on passarà el fluid a estudiar (en aquest cas, l'aire). Les mides que ha de tenir aquest túnel de vent no són fixes, però han de ser suficientment coherents per tal de recollir amb la màxima fidelitat el comportament de l'aire al voltant dels cossos.

Com que el volum d'aire més proper als sòlids és el flux que més ens interessa, degut a què aquest és el que entra en contacte amb l'aleró i la roda, es crea un altre prisma al túnel ja creat per tal d'obtenir valors més acurats en aquesta zona (vegis Figura 22).

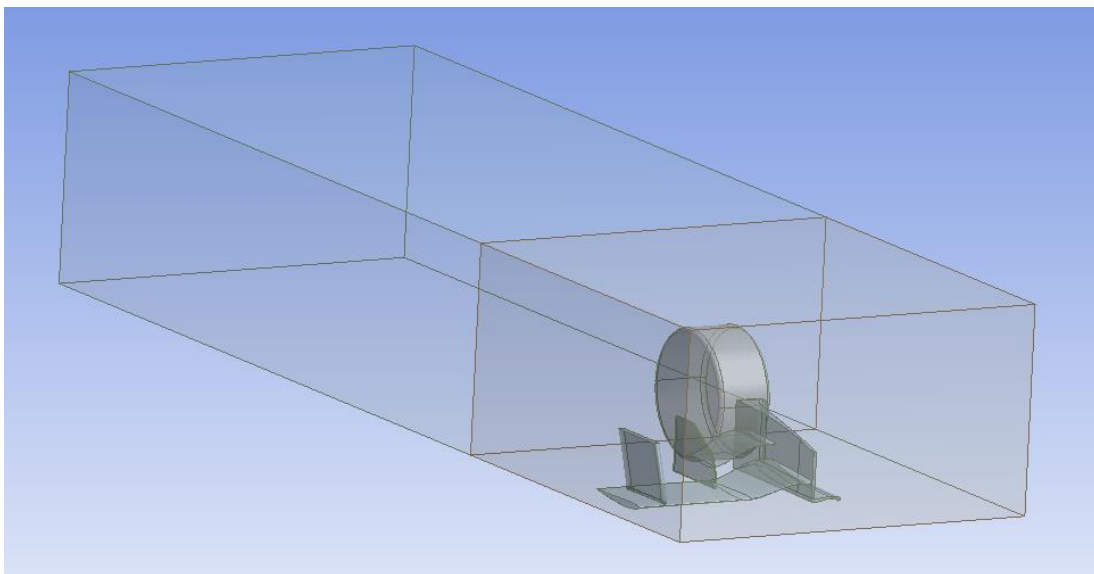


Figura 22. Túnel de vent virtual.

Abans de realitzar el mallat, prèviament s'han de suprimir els dos sòlids ja que només ens interessa el túnel de vent creat amb el "motlle" o la forma de l'aleró i la roda.

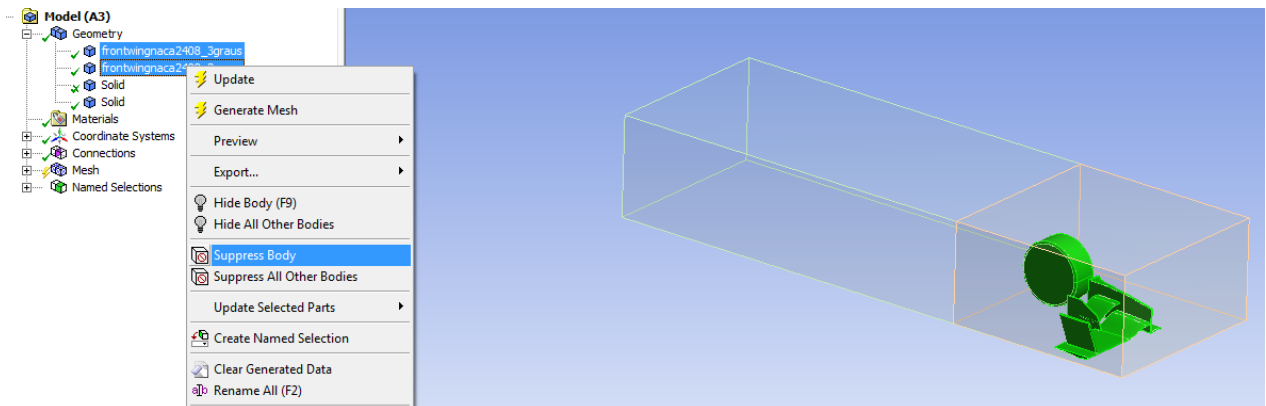


Figura 23. Suppress Body aleró i roda.

Mallat:

Definim una sèrie de paràmetres per a generar el mallat, i aquests seran iguals per a tots els models a estudiar (vegis Figura 24).

Details of "Mesh"	
Defaults	
Physics Preference	CFD
Solver Preference	CFX
Element Order	Linear
<input type="checkbox"/> Element Size	150, mm
Sizing	
<input type="checkbox"/> Use Adaptive Sizing	No
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
<input type="checkbox"/> Max Size	600, mm
Mesh Defeaturing	Yes
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0,75 mm)
Capture Curvature	Yes
<input type="checkbox"/> Curvature Minimum	100, mm
<input type="checkbox"/> Curvature Normal	17,°
Capture Proximity	No
Bounding Box Diameter	4737,1 mm
Average Surface Area	2,1933e+005 mm ²
Minimum Edge Length	1,e-001 mm

Figura 24. Paràmetres establerts per al mallat.

Això ens generarà una malla suficientment bona en les zones del túnel de vent més llunyanes i que no interaccionen amb la peça (prisma "gran"). Per altre banda, si es vol millorar el mallat a les zones del túnel de vent més properes (prisma "petit") i que si interaccionen amb la peça, cal utilitzar la funció *Mesh Sizing*, en concret l'opció *Body Sizing*, donant una mida més petita d'element finit al prisma "petit" respecte al prisma "gran", i l'opció *Face Sizing*, donant una

mida d'element finit més petit respecte a la resta del túnel de vent a les zones que interaccionen amb la peça (vegis les següents figures).

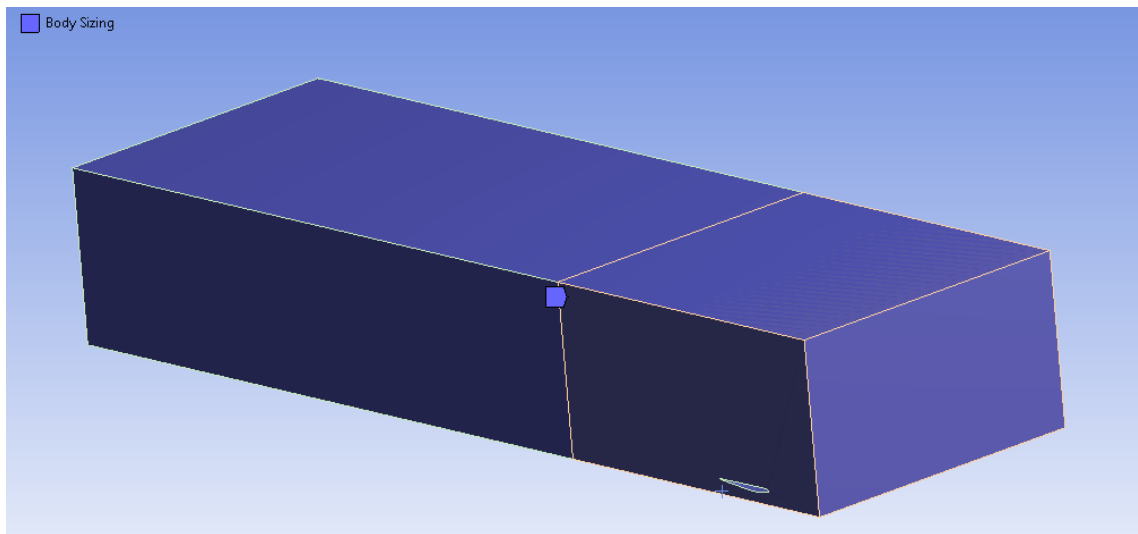


Figura 25. Body Sizing al prisma "petit" respecte al prisma "gran".

Details of "Body Sizing" - Sizing	
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Body of Influence
Bodies of Influence	1 Body
<input type="checkbox"/> Element Size	39, mm
Advanced	
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)

Figura 26. Paràmetres establerts del Body Sizing.

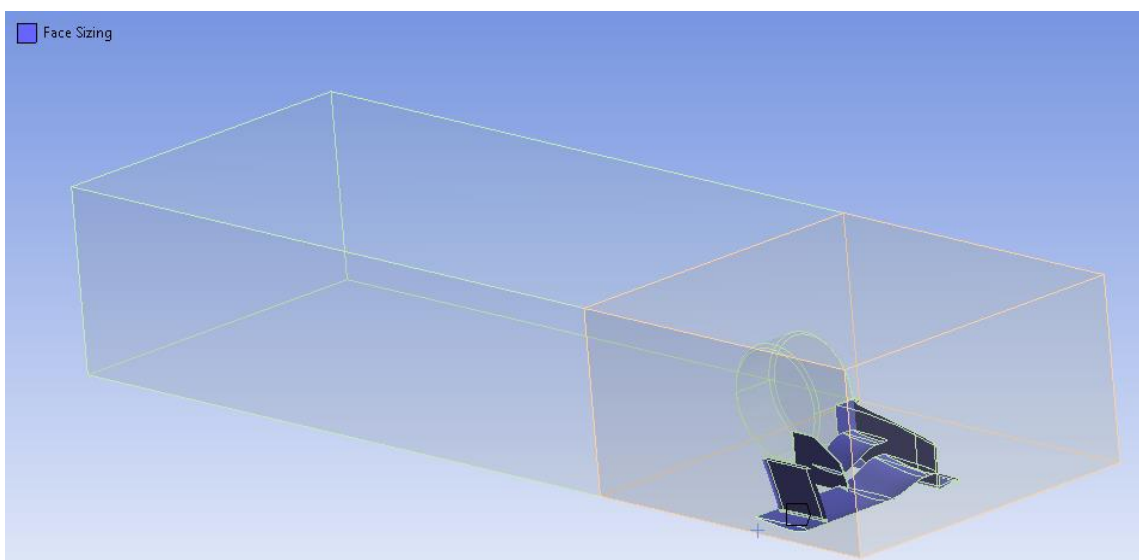


Figura 27. Face Sizing a la zona del túnel de vent que interacciona amb la peça.

Details of "Face Sizing" - Sizing	
[-] Scope	
Scoping Method	Named Selection
Named Selection	Selection
[-] Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
<input type="checkbox"/> Element Size	5, mm
[-] Advanced	
<input type="checkbox"/> Defeature Size	Default (0,75 mm)
Behavior	Soft
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default (1,2)
Capture Curvature	No
Capture Proximity	No

Figura 28. Paràmetres establerts del Face Sizing.

Per poder visualitzar com es comporta la capa límit en les zones del mallat properes als perfils alars, s'aplicarà el mètode de refinat *Inflation* que permetrà crear diferents capes de prismes a partir dels triangles de la superfície, les quals van augmentant el gruix a mesura que és distancien de l'element analitzat. En les següents figures es pot observar el resultat final i els paràmetres utilitzats per a dur a terme l'opció *Inflation*:

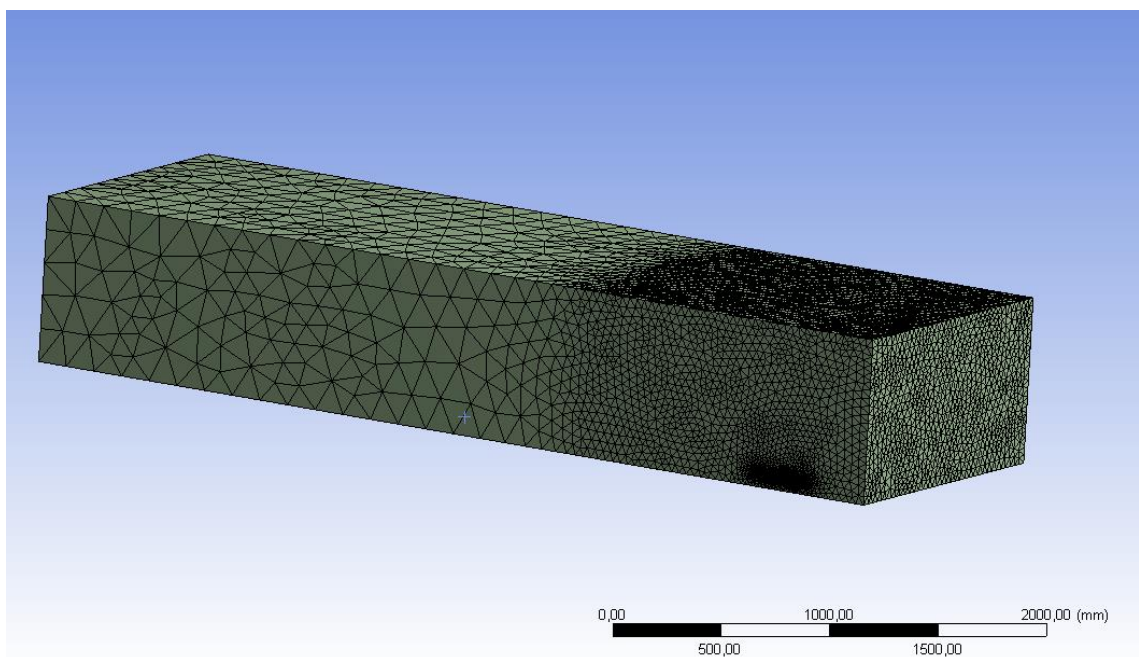


Figura 29. Mallat del túnel de vent.

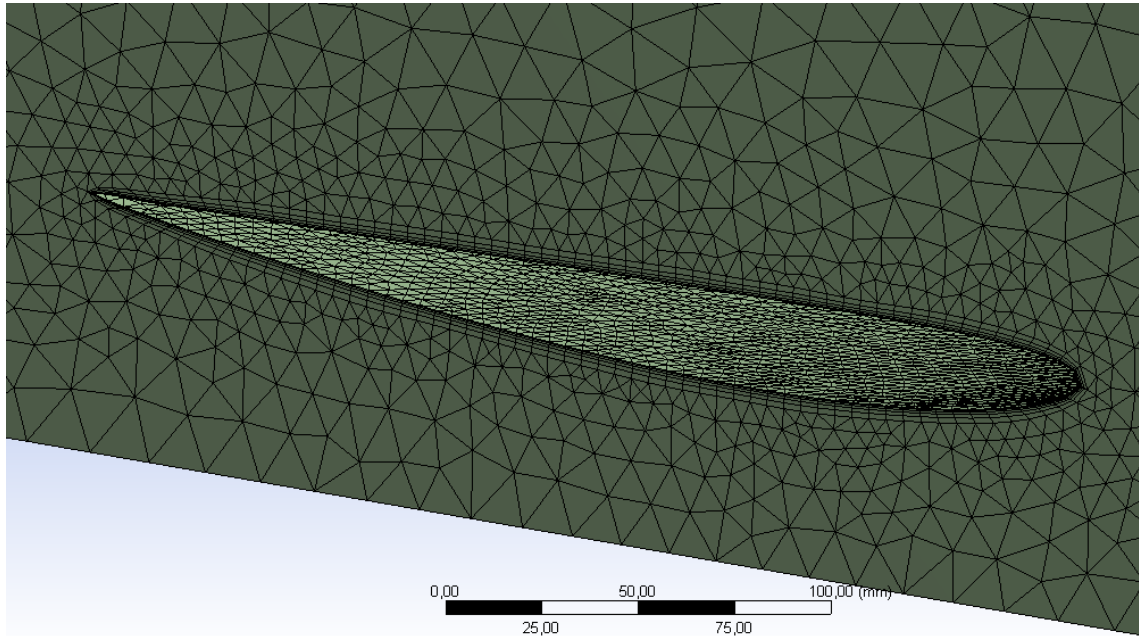


Figura 30. Mallat proper al perfil amb l'opció *Inflation* aplicada.

Details of "Mesh" 🔍	
[-] Display	
Display Style	Body Color
[+] Defaults	
[+] Sizing	
[+] Quality	
[-] Inflation	
Use Automatic In...	All Faces in Chosen Named Selection
Named Selection	Selection
Inflation Option	Smooth Transition
<input type="checkbox"/> Transition Ratio	0,3
<input type="checkbox"/> Maximum Lay...	5
<input type="checkbox"/> Growth Rate	1,5
Inflation Algorit...	Pre
View Advanced ...	No
[+] Advanced	
[-] Statistics	
<input type="checkbox"/> Nodes	499438
<input type="checkbox"/> Elements	1849497

Figura 31. Paràmetres establerts en la *Inflation*.

En la Figura 31 es pot observar el nombre de nodes i d'elements del mallat. Gairebé uns 500.000 nodes, que és inferior al nombre màxim de nodes permesos per realitzar la simulació en la llicència de la universitat, i 1.850.000 elements, aproximadament. Aquests valors seran molt semblants per a la resta de simulacions, tant d'aquest tipus d'estudi com dels altres dos.

Condicions de contorn:

Un cop definit el mallat del prisma de túnel de vent hem de definir les condicions de les cares d'aquest perquè el programa pugui realitzar i resoldre la simulació demanada:

- Entrada: es defineix com *Inlet* la cara del prisma de túnel de vent de davant del model per així determinar la velocitat d'entrada de l'aire. En aquest cas, i en la resta de simulacions d'aquest estudi, la velocitat d'entrada de l'aire serà la màxima a la que poden arribar aquests monoplaques, és a dir, 270 km/h. El mateix succeeix amb la temperatura de treball que es durà a terme en totes les simulacions, i aquesta és de 25°C.

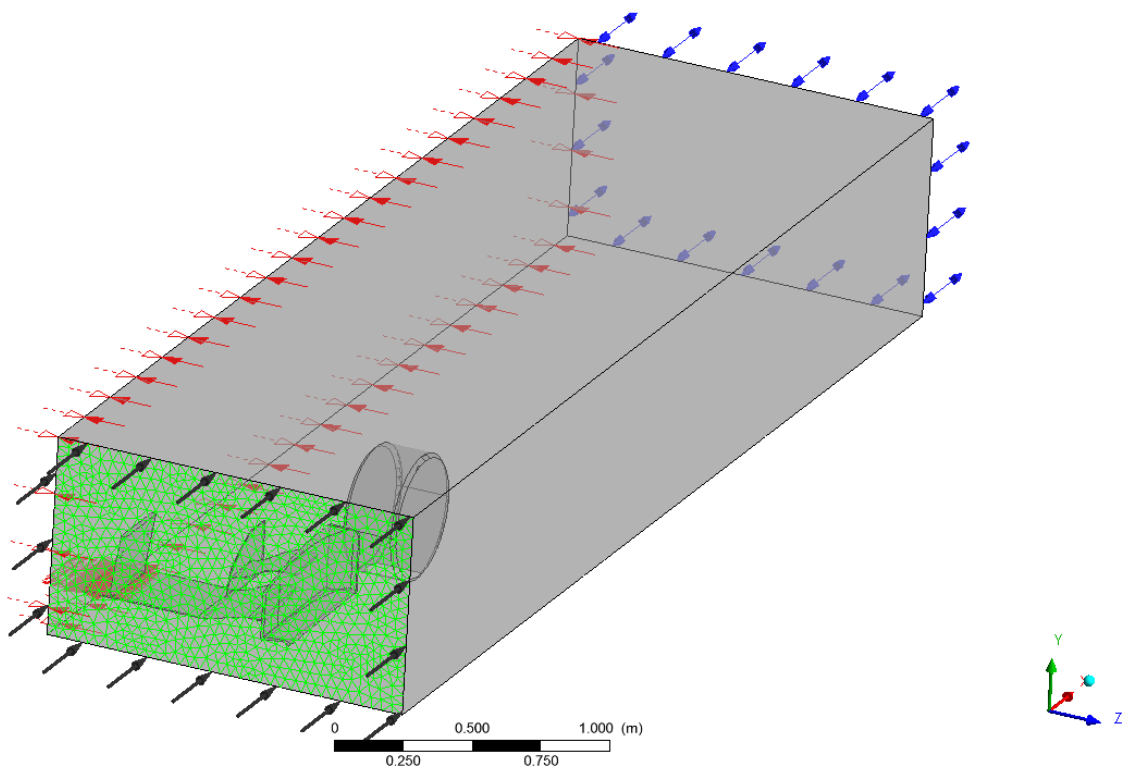


Figura 32. Determinació de la cara d'entrada de l'aire.

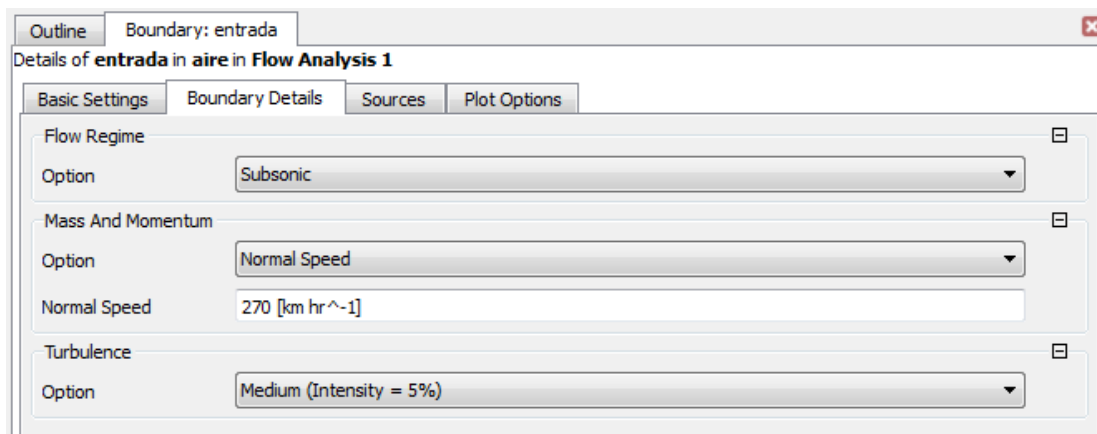


Figura 33. Definició de la velocitat d'entrada de l'aire.

- Inferior: és la cara del prisma de túnel de vent que representa el terra. Aquest serà tipus *Wall* però sense lliscament ja que l'aire en contacte amb el terra està a velocitat zero i aquest exerceix de paret. Per tant l'opció a escollir és *No Slip Wall*. No obstant, també se li ha d'afegir una velocitat en sentit contrari a l'avanç de l'aleró igual a la velocitat d'aquest, és a dir, 270 km/h, ja que l'aleró s'ha de simular com si es desplaçés.

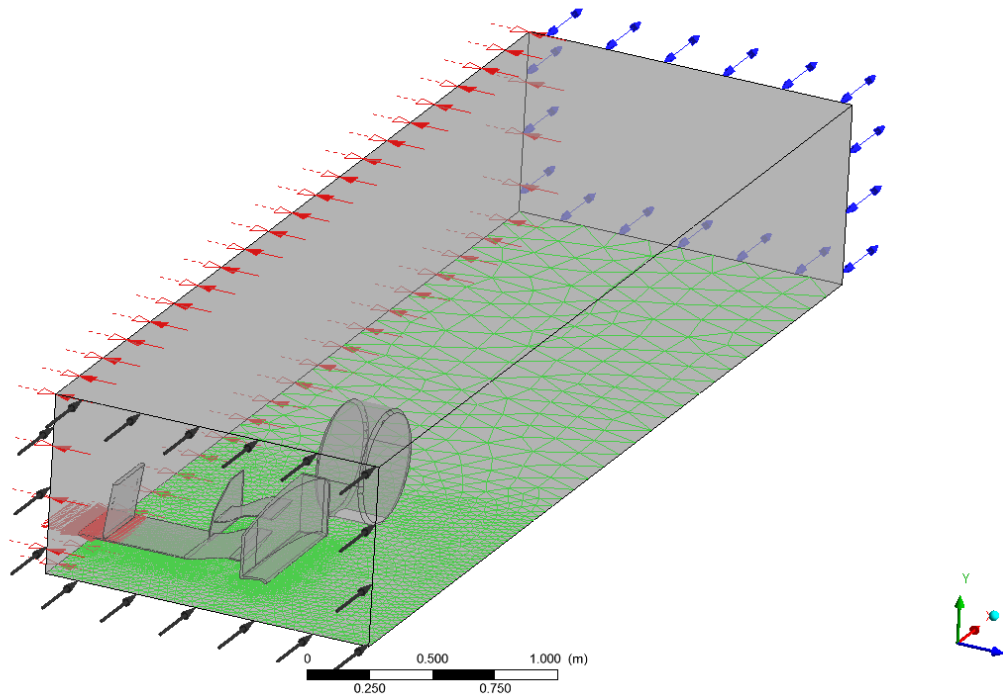


Figura 34. Determinació del terra.

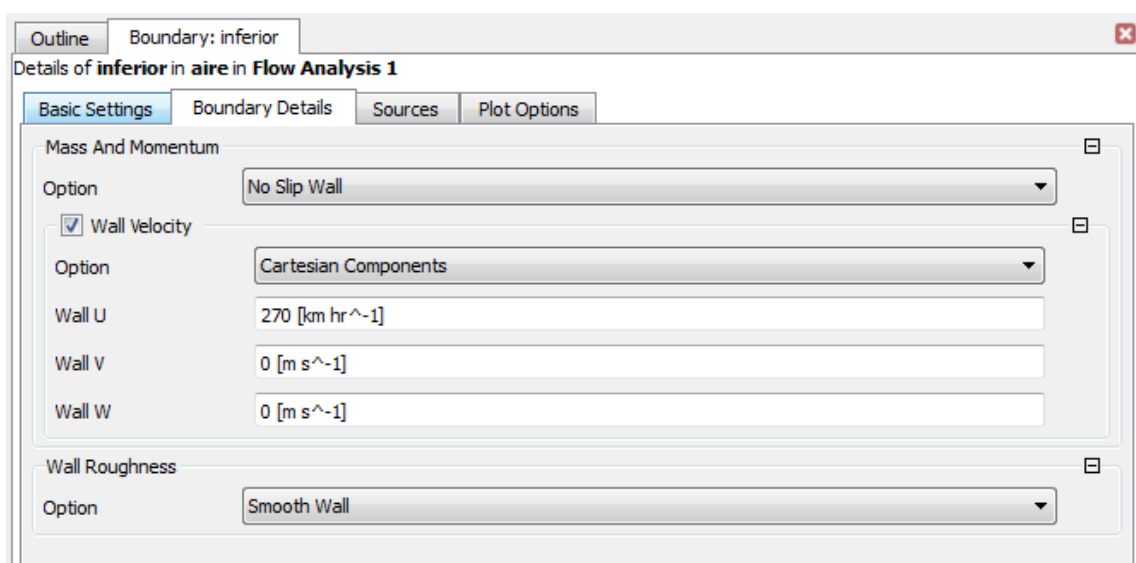


Figura 35. Paràmetres utilitzats per definir el terra.

- Lateral: és la cara del prisma de túnel de vent que representa el lateral més proper a la roda. Aquest serà tipus *Wall* i l'aire llisca lliurement, com si no hi haguessin parets. Per tant, es determina com *Free Slip*.

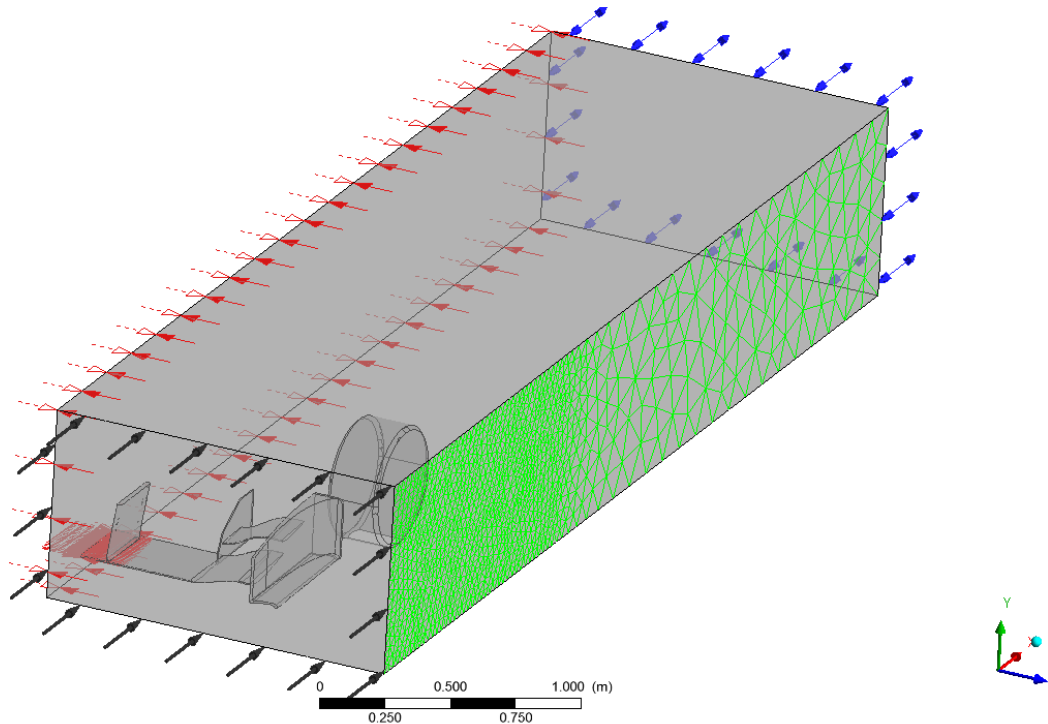


Figura 36. Determinació del lateral extern del túnel de vent.

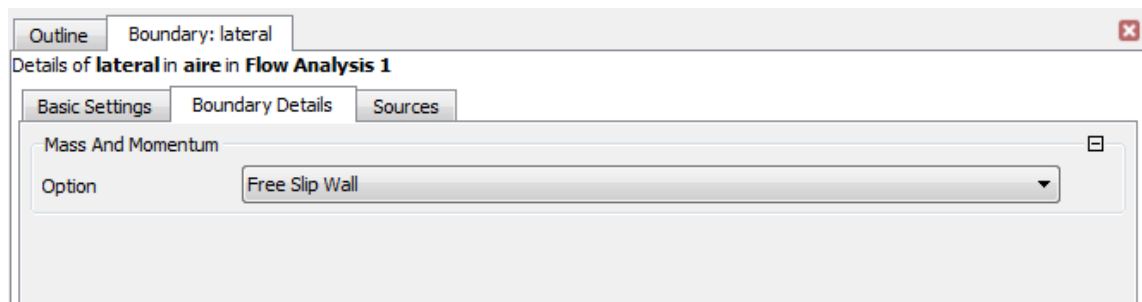


Figura 37. Definició del lateral extern del túnel de vent.

- Simetria: és la cara del prisma de túnel de vent que divideix el model en dos. Es defineix com *Symmetry*, i així el programa pot detectar que a l'altre part del model hi ha les mateixes condicions.

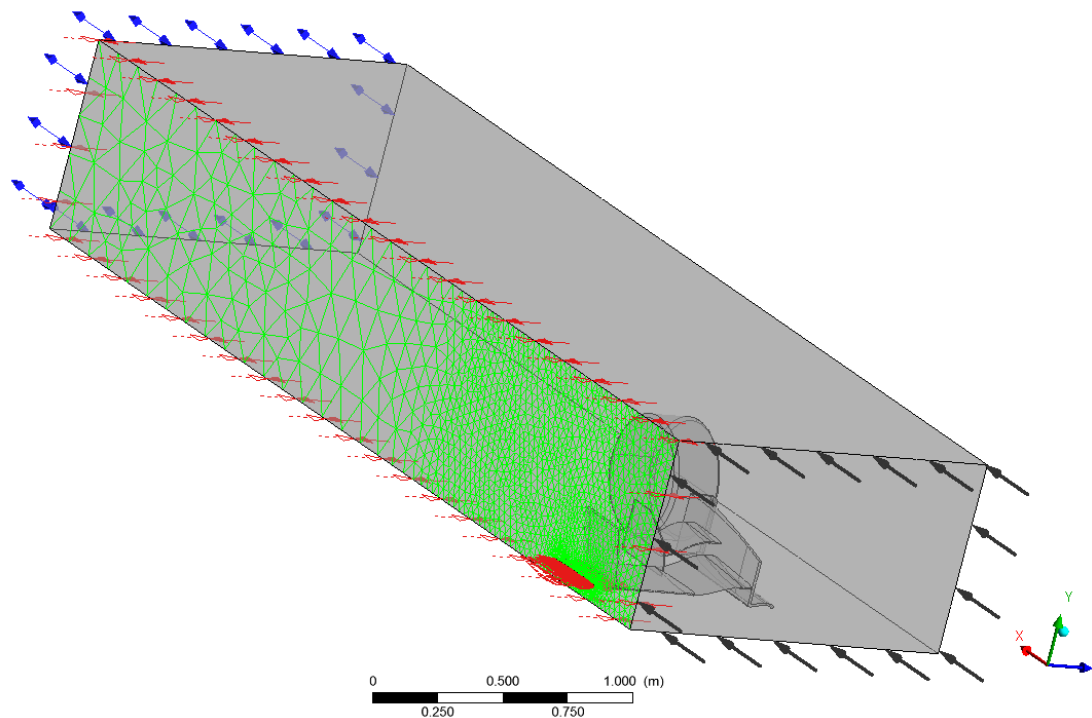


Figura 38. Determinació de la cara del túnel de vent de simetria.

- Sortida: és la cara del darrera del prisma de túnel de vent en la qual es determina la pressió a la que sortirà l'aire, és a dir a pressió atmosfèrica, i per tant, a pressió relativa zero. Es pot definir com *Outlet* o com *Opening*. Si la defineixes com *Outlet* estàs obligant a que l'aire surti sí o sí del túnel de vent independentment de com es comporti el fluid dins del túnel de vent. En canvi, si la defineixes com *Opening* no obligues a que el fluid faci una trajectòria en concret de sortida, sinó que li dones total llibertat a la trajectòria que fa el fluid alhora d'encarar aquest tram final del túnel de vent.

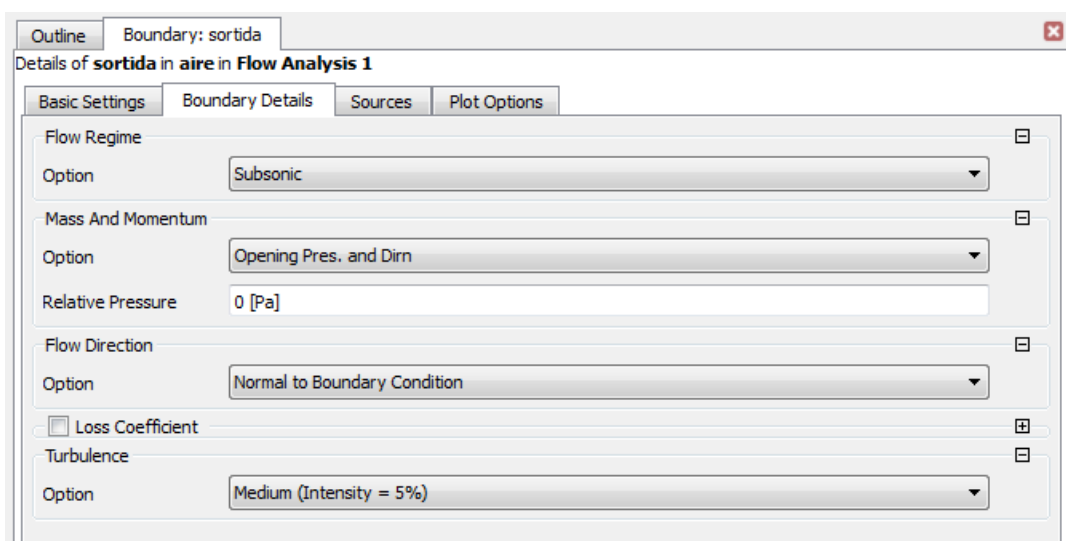


Figura 39. Configuració sortida del túnel de vent.

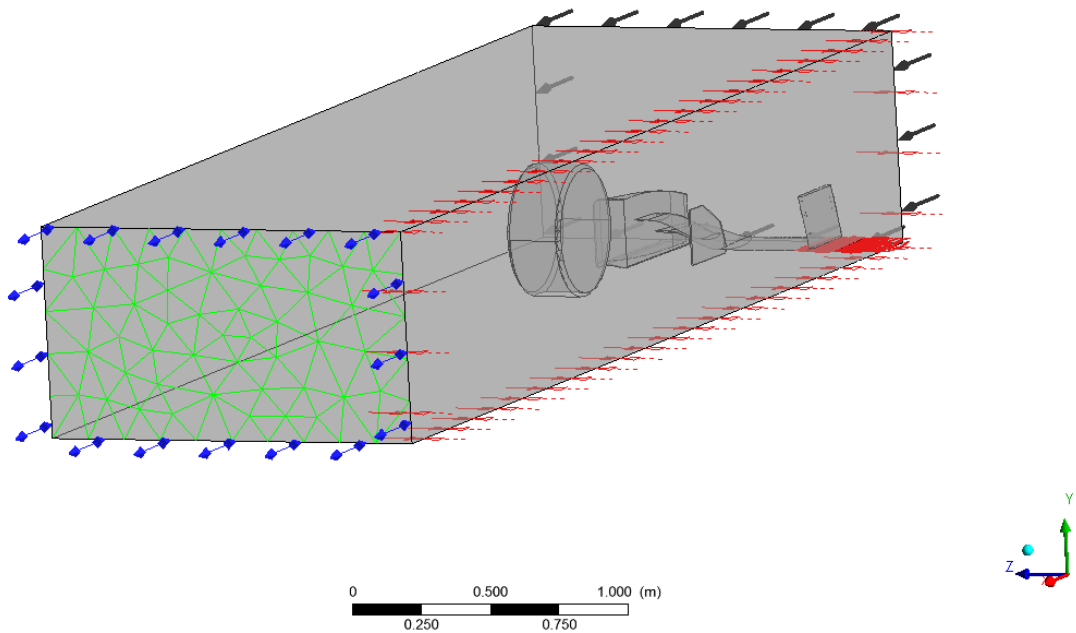


Figura 40. Determinació de la cara del túnel de vent de la sortida del fluid.

- Superior: és la cara del sostre del túnel de vent i se li aplica la mateixa configuració de la lateral. *Wall* i *Free Slip*.

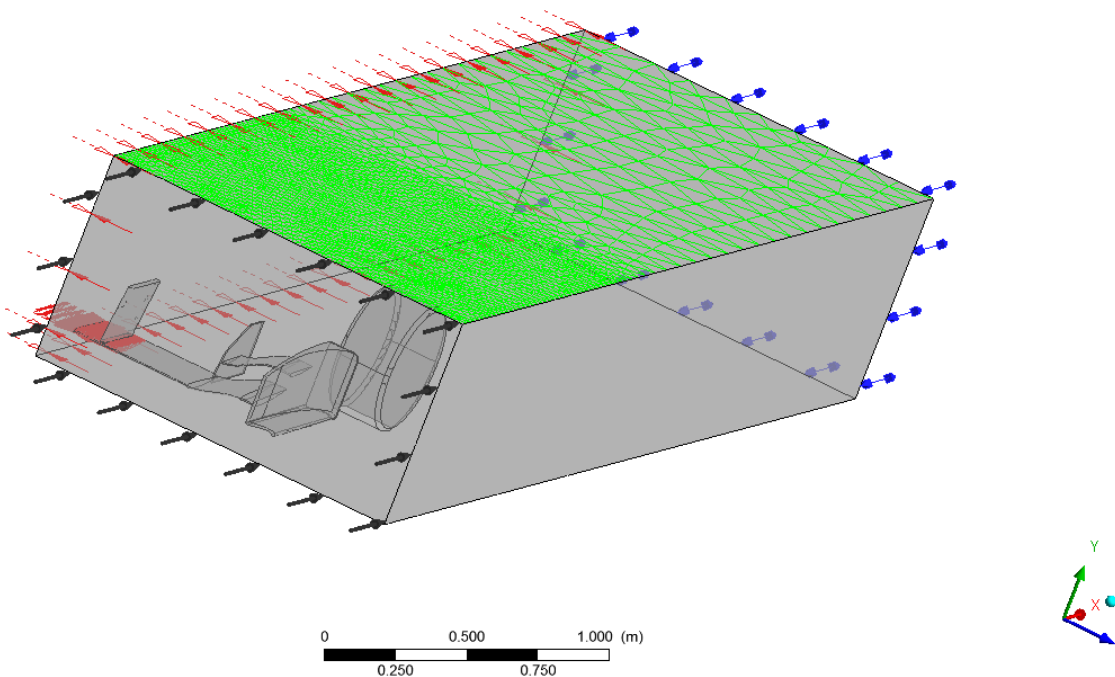


Figura 41. Determinació de la cara superior del túnel de vent.

Ara ja tindriem la caixa de túnel de vent ben definida. No obstant, com que només volem saber els resultats que s'obtenen respecte l'aleró i no el conjunt aleró + roda, aquest últim també

l'hem de configurar per tal que el programa alhora de fer els càlculs no el tingui en compte i així obtindrem els resultats que nosaltres volem en aquest estudi.

Per tant, es selecciona totes aquelles superfícies del túnel de vent que representen el contacte del fluid amb la roda i les definim com *Wall* i l'opció *No Slip Wall* ja que l'aire que contacta amb la superfície de la roda no llisca, i per tant, està a velocitat zero.

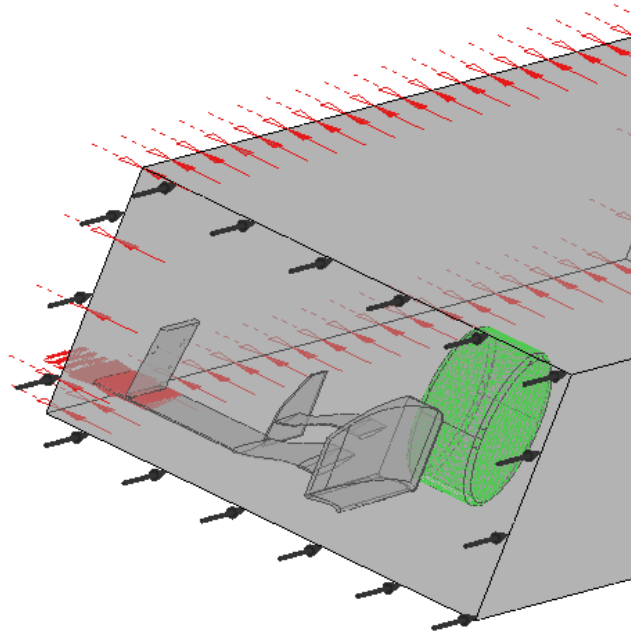


Figura 42. Selecció de totes les superfícies de la roda.

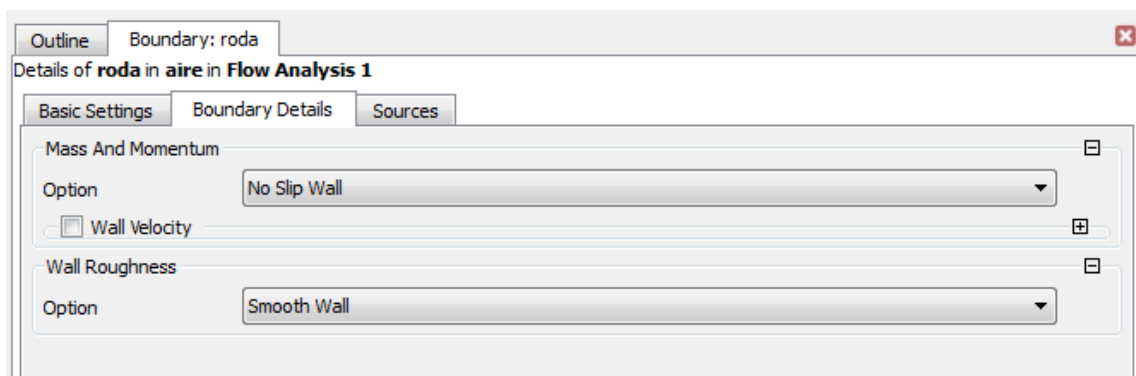


Figura 43. Configuració de totes les superfícies de la roda.

Solver Control:

Per tal de dur a terme les simulacions, s'ha d'especificar una sèrie de paràmetres, com per exemple les condicions de parada o finalització de la simulació. Es poden definir dues condicions de parada, i la primera de les dues que es compleixi aturarà la simulació per donar-la com a finalitzada. Per un costat tenim el nombre d'iteracions que volem que faci durant la simulació (convergència de control). Un cop realitzades la simulació es dona per acabada. Per

l'altre banda es pot donar un valor d'error residual (criteri de convergència). Com més petit sigui aquest error residual imposat més probable que es realitzin totes les iteracions demanades. En la següent figura es pot observar els valors imposats i la resta de paràmetres que són posats per defecte:

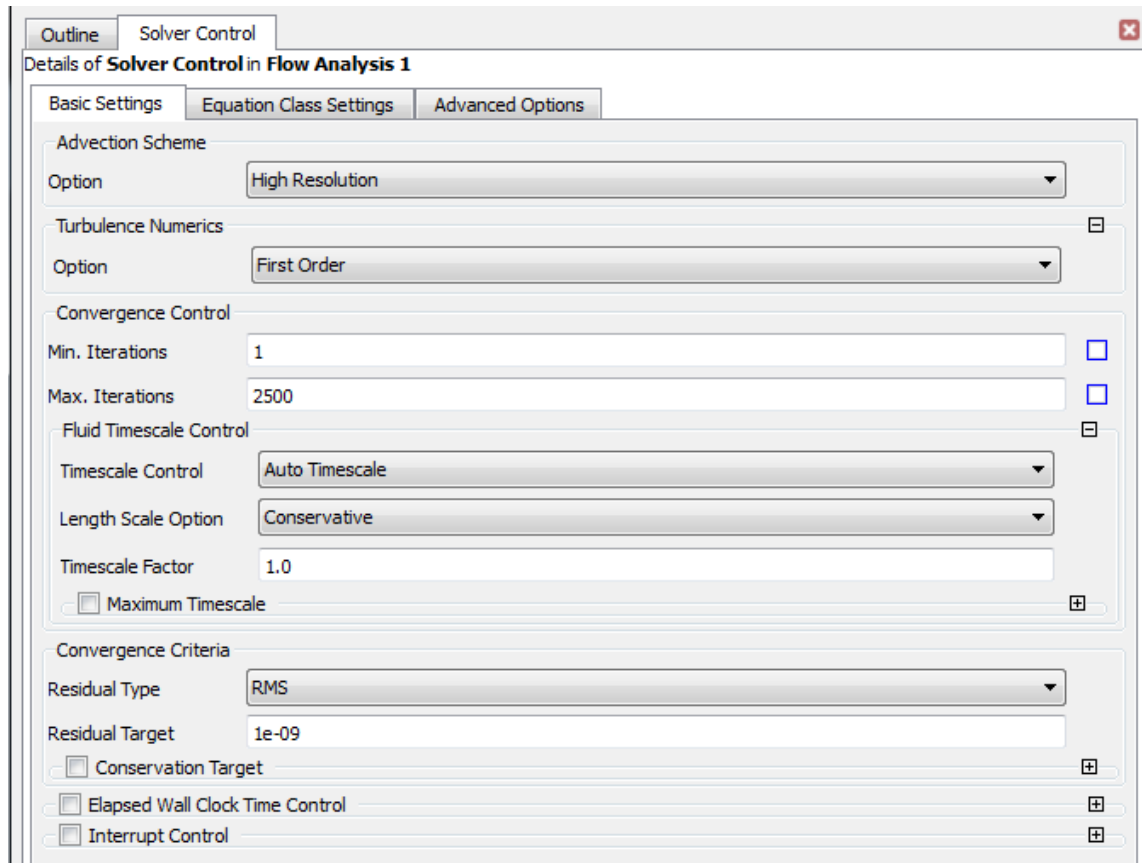


Figura 44. Paràmetres Solver Control.

En les següents figures es pot observar com convergeixen els residuals i com aquests es van estabilitzant. De fet quan els residus s'estabilitzen significa que la solució no variarà, i per tant, es podria aturar la simulació:

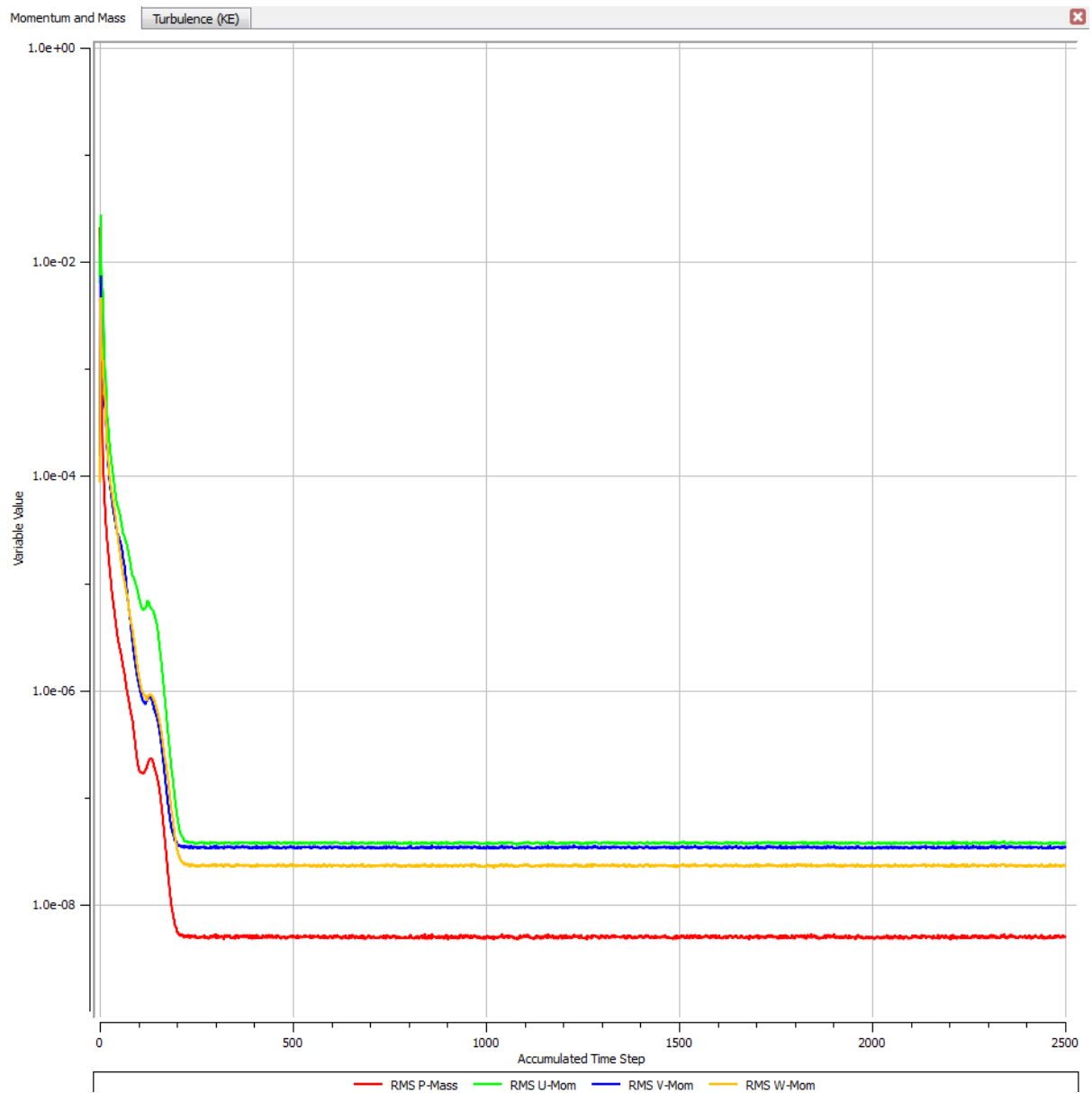


Figura 45. Gràfic evolució d'errors residuals al llarg de les iteracions 1.

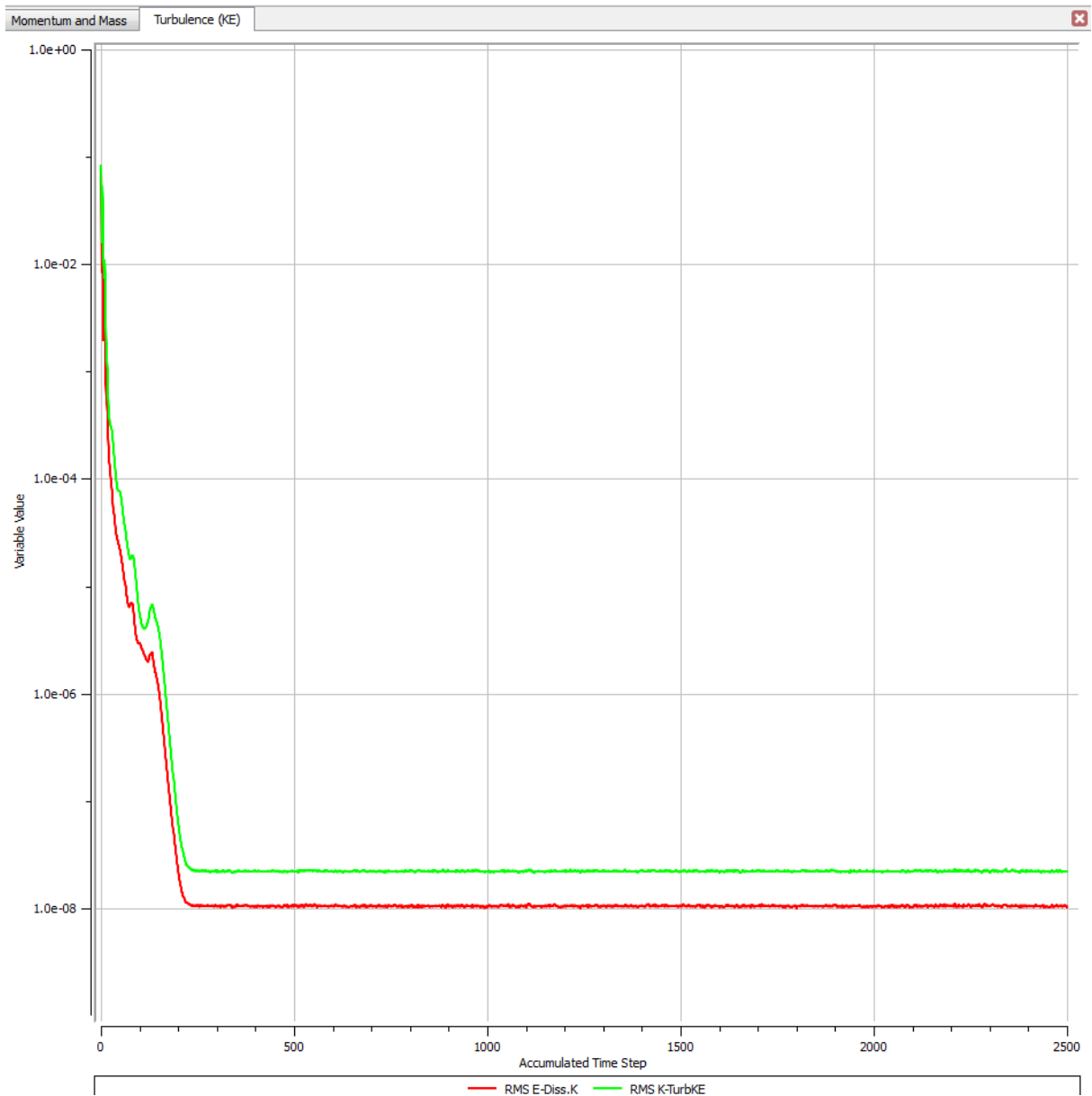


Figura 46. Gràfic evolució d'errors residuals al llarg de les iteracions 2.

3.3.2 Simulació en funció de la velocitat de desplaçament

Per a realitzar aquest estudi, s'ha dut a terme 8 simulacions les quals només es diferencien entre si per la velocitat de desplaçament que s'implementa. Aquesta va des dels 60 km/h, que és la velocitat màxima permesa en el *Pit Lane*, fins als 270 km/h, que és la velocitat màxima que pot arribar a assolir els monoplaces de l'EuroFormula Open, amb un interval de 30 km/h de diferència per a cada simulació. Es creu que els valors que s'obtinguin dels coeficients es mantindran bastant estables.

El procediment utilitzat és exactament el mateix que s'ha explicat en l'estudi anterior (vegis apartat 3.3.1 Simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil), amb una única diferència en

la part de *Condicions del contorn*. Dins d'aquest apartat només s'ha de canviar, per a cadascuna de les 8 simulacions, el valor de la velocitat a la que es desplaça el fluid, en la cara del túnel de vent *Entrada*, i la velocitat en sentit contrari a l'avanç de l'aleró, en la cara *Inferior* del túnel de vent:

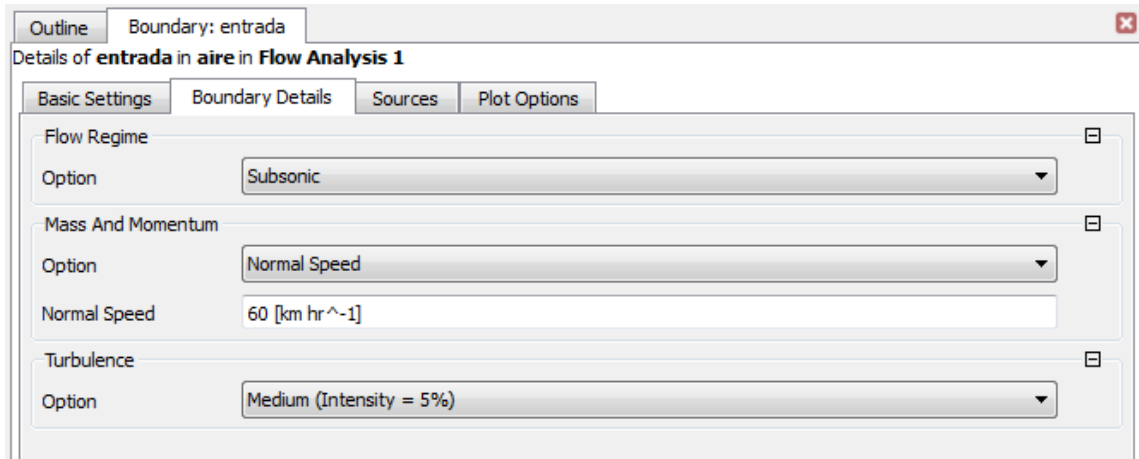


Figura 47. Canvi de valor de la velocitat d'entrada de l'aire.

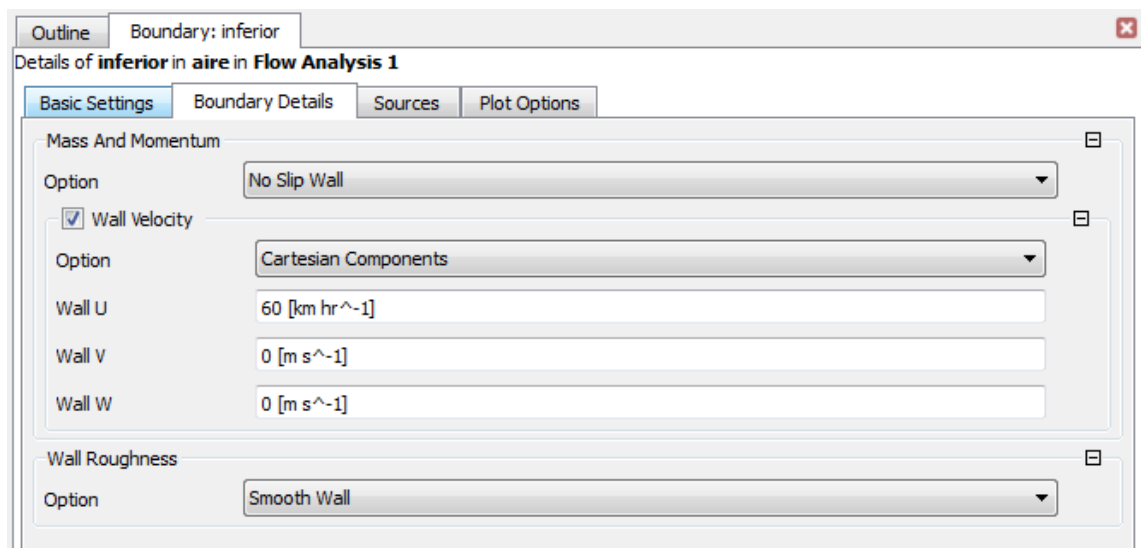


Figura 48. Canvi de valor de la velocitat en sentit contrari a l'avanç de l'aleró.

3.3.3 Simulació en funció de l'alçada respecte al terra

Per a realitzar aquest estudi, s'ha dut a terme 11 simulacions les quals només es diferencien entre si per l'alçada en la que es troba l'aleró respecte al terra. Aquestes distàncies són les següents:

3'75 mm, 7'5 mm, 15 mm, 20 mm, 32'5 mm, 70 mm, 100 mm, 150 mm, 250 mm, 370 mm i 500 mm.

Es creu que com més distància hi hagi entre aleró i terra, els coeficients aerodinàmics tendiran a estabilitzar-se en un valor en concret. Per contra, es creu que quan l'alçada sigui més pròxima al terra els coeficients variaran de manera considerable entre si. Per tant, en aquest estudi es posarà en pràctica el concepte de *l'efecte terra* (vegis l'Annex A: Fonaments d'aerodinàmica i mecànica de fluids).

El procediment utilitzat és exactament el mateix que s'ha explicat en l'apartat 3.3.1 *Simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil*, amb l'única diferència en la part de *Geometria*:

En aquest cas no necessitem el disseny de l'aleró + roda ja que situarem l'aleró a diferents alçades respecte al terra.

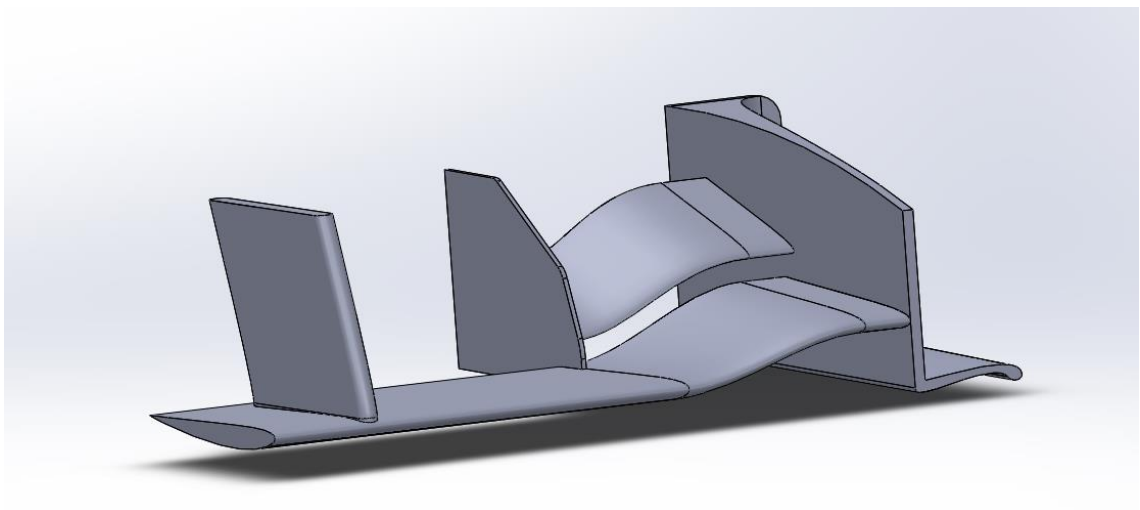


Figura 49. Disseny sòlid mig aleró.

Per tant, el que també ens varia és el túnel de vent virtual per a cada simulació a realitzar ja que, en cadascuna de les simulacions a fer, hem de situar l'aleró a l'alçada que s'ha proposat a estudiar.

3.4 Anàlisi Static Structural

Per fer l'anàlisi estructural de l'aleró s'ha aprofitat una de les dades que es poden obtenir fent la simulació CFX, com és la pressió que suporta l'aleró. Es considera utilitzar les pressions que s'han obtingut en l'estudi de l'apartat 3.3.1 *Simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil*, ja que és es vol saber el comportament d'aquest en funció de com varia l'angle d'incidència. Per tant, per realitzar aquest estudi s'ha tingut en compte les 32 simulacions fetes anteriorment.

Engineering Data:

El programa per defecte considera que el material de tots els sòlids a estudiar són d'acer. Per a que l'anàlisi estructural del disseny sigui el més proper a la realitat s'ha de considerar de quin material està fet l'aleró. Com que, en el nostre cas, no s'ha tingut en compte com és l'estructura interna de l'aleró alhora de fer el disseny, es considera que tot el sòlid és de fibra de carboni. En les següents figures es mostra les propietats més significatives que té aquest material:

Properties of Outline Row 3: Epoxy Carbon UD (230 GPa) Prepreg					
	A	B	C	D	E
1	Property	Value	Unit		
2	Density	1,95	g cm...		
3	Orthotropic Secant Coefficient of Thermal Expansion				
8	Orthotropic Elasticity				
9	Young's Modulus X direction	2,25E+05	MPa		
10	Young's Modulus Y direction	15000	MPa		
11	Young's Modulus Z direction	15000	MPa		
12	Poisson's Ratio XY	0,2			
13	Poisson's Ratio YZ	0,4			
14	Poisson's Ratio XZ	0,2			
15	Shear Modulus XY	4700	MPa		
16	Shear Modulus YZ	3100	MPa		
17	Shear Modulus XZ	4700	MPa		

Figura 50. Propietats de la fibra de carboni 1.

18	Orthotropic Stress Limits			
19	Tensile X direction	3590	MPa	
20	Tensile Y direction	29	MPa	
21	Tensile Z direction	29	MPa	
22	Compressive X direction	-1082	MPa	
23	Compressive Y direction	-100	MPa	
24	Compressive Z direction	-100	MPa	
25	Shear XY	60	MPa	
26	Shear YZ	32	MPa	
27	Shear XZ	60	MPa	

Figura 51. Propietats de la fibra de carboni 2.

28	Orthotropic Strain Limits			
29	Tensile X direction	0,0167		
30	Tensile Y direction	0,0032		
31	Tensile Z direction	0,0032		
32	Compressive X direction	-0,0108		
33	Compressive Y direction	-0,0192		
34	Compressive Z direction	-0,0192		
35	Shear XY	0,012		
36	Shear YZ	0,011		
37	Shear XZ	0,012		

Figura 52. Propietats de la fibra de carboni 3.

Geometria:

A diferència de l'anàlisi de fluids, en aquest cas, alhora de definir la geometria en el programa, ens interessa el sòlid de l'aleró i no la caixa virtual del túnel de vent. Per tant, es suprimeixen els sòlids del túnel de vent i també de la roda, ja que, en el nostre cas, tampoc ens interessa el seu comportament estructural, tal i com es mostra en la figura següent (Figura 53).

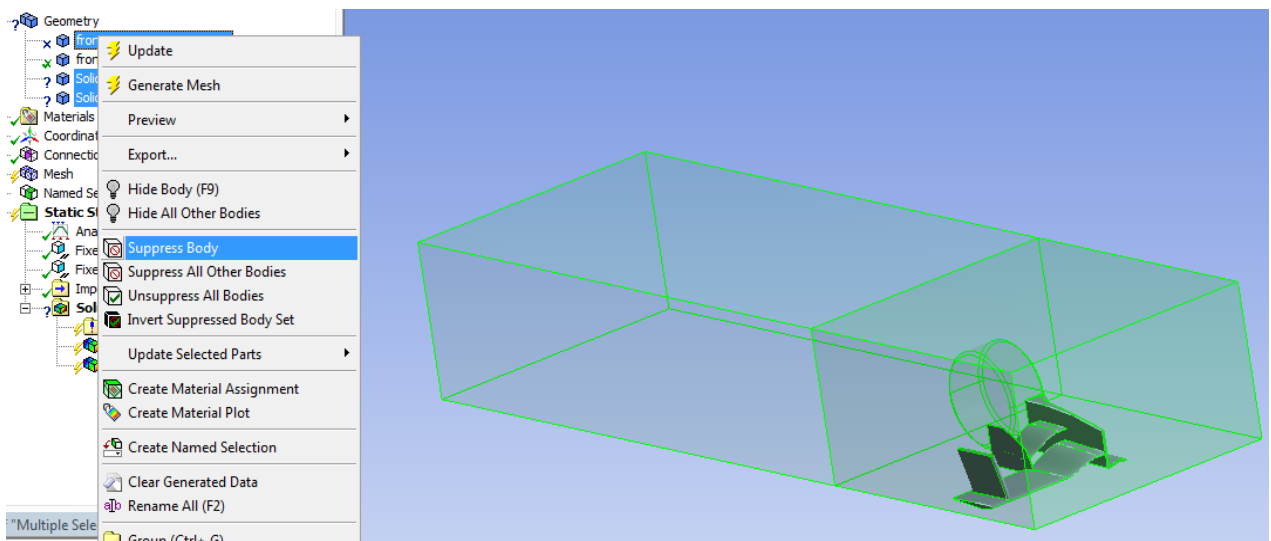


Figura 53. Suppress Body a totes les geometries menys l'aleró.

Mallat:

Es defineix el paràmetre de la mida de l'element. En aquest cas s'ha definit una mida de 10 mm, i es canvia la geometria d'aquests elements del mallat, de triangles a quadrats, utilitzant l'opció *Hex Dominant Method*:

Details of "Mesh"	
[-] Display	
Display Style	Body Color
[-] Defaults	
Physics Preference	Mechanical
Element Order	Program Controlled
<input type="checkbox"/> Element Size	10, mm

Figura 54. Detalls del mallat.

Details of "Hex Dominant Method" - Method	
[-] Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
[-] Definition	
Suppressed	No
Method	Hex Dominant
Element Order	Use Global Setting
Free Face Mesh Type	Quad/Tri

Figura 55. Detalls del Hex Dominant Method.

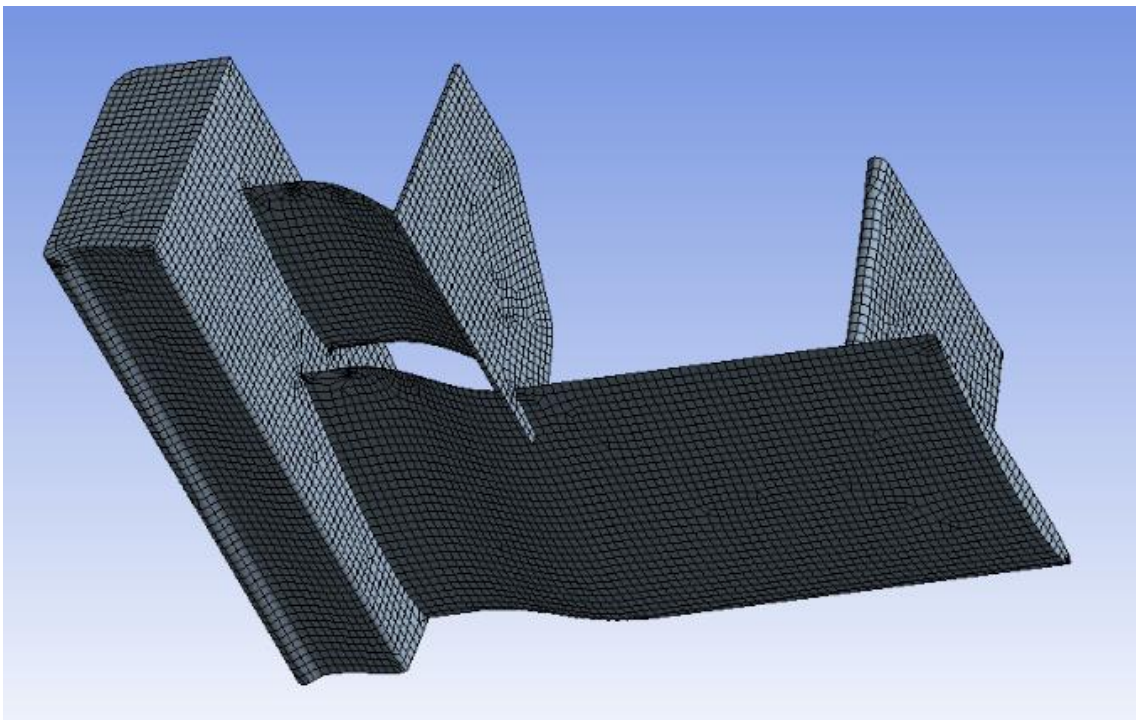


Figura 56. Mallat de l'aleró.

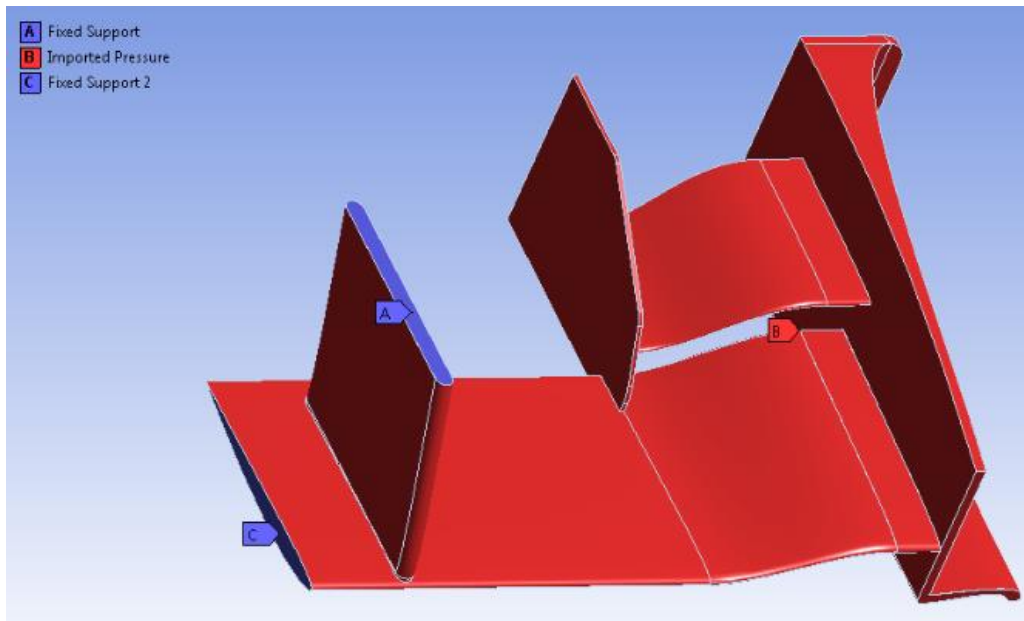
Static Structural:

Figura 57. Condicions definides al Static Structural.

En aquest apartat es defineixen les condicions de caràcter estàtiques del sòlid. Per un costat tenim la funció *Fixed Support* que ens servirà per definir aquella cara de l'aleró que estigui fixada en una altra cara d'un altre element del monoplaça, com és en aquest cas, al nas del monoplaça. També considerarem aquesta funció en el perfil alar de l'ala principal per simular la unió amb l'altre meitat de l'aleró. Per l'altre banda, tal i com s'ha dit al principi d'aquest apartat, s'importarà la pressió que pateix tot el conjunt de l'aleró, obtinguda en la simulació CFX, tal i com es pot observar en la següent figura:

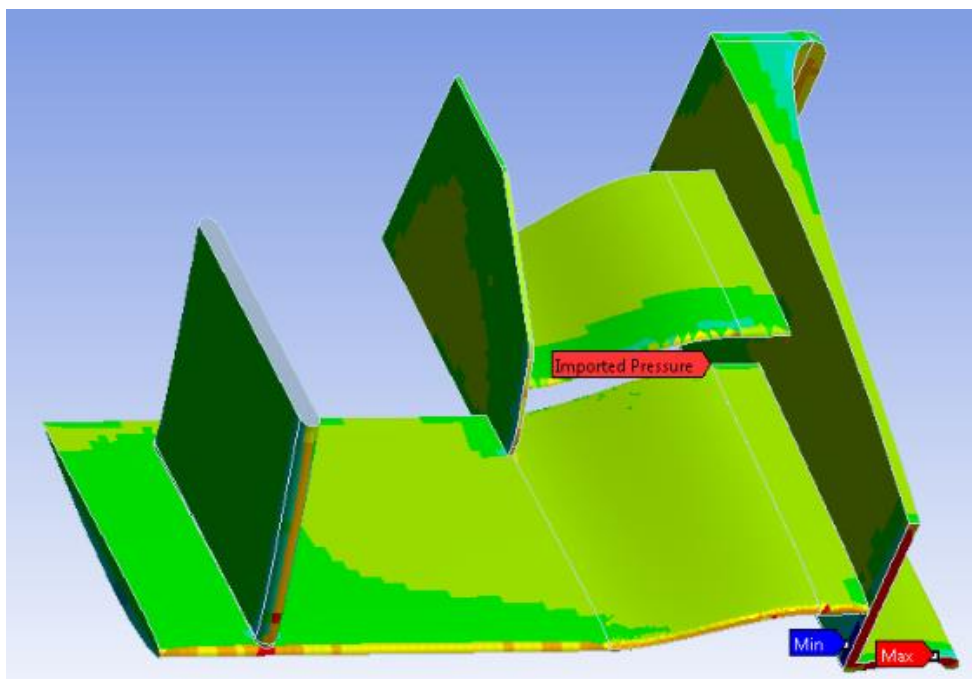


Figura 58. Imported Pressure.

4. RESULTATS

4.1 Introducció

En aquest capítol es mostraran els resultats obtinguts dels tres tipus de simulació que s'han fet, i també de l'anàlisi estructural:

Com que en les tres simulacions l'objectiu és el mateix, és a dir, l'obtenció dels coeficients aerodinàmics, el mètode de resolució aplicat és el mateix. No obstant, els valors que s'obtinguin seran diferents entre si, igual que les gràfiques a mostrar. Per valorar una mica el rendiment d'aquests coeficients que s'han obtingut, es farà el càlcul del rendiment d'aquests per així valorar des d'una altra perspectiva els resultats obtinguts, és a dir, l'eficiència aerodinàmica (vegis l'Annex A: Fonaments d'aerodinàmica i mecànica de fluids).

L'anàlisi estructural només es centrarà en la deformació total de l'aleró.

4.2 Resultats de la simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil

En aquest apartat només es mostraran les figures corresponents a la simulació feta amb l'angle d'atac a 3°. La resta de figures es troben a l'Annex B: *Resultats de les simulacions en funció de l'angle d'atac*.

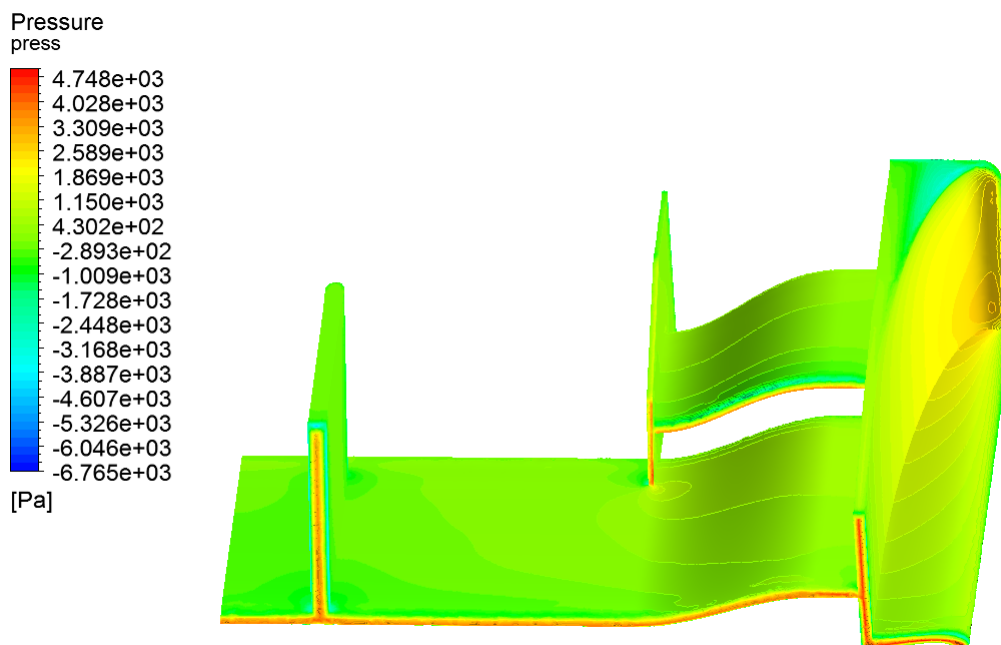


Figura 59. Pressió que suporta la part superior de l'aleró.

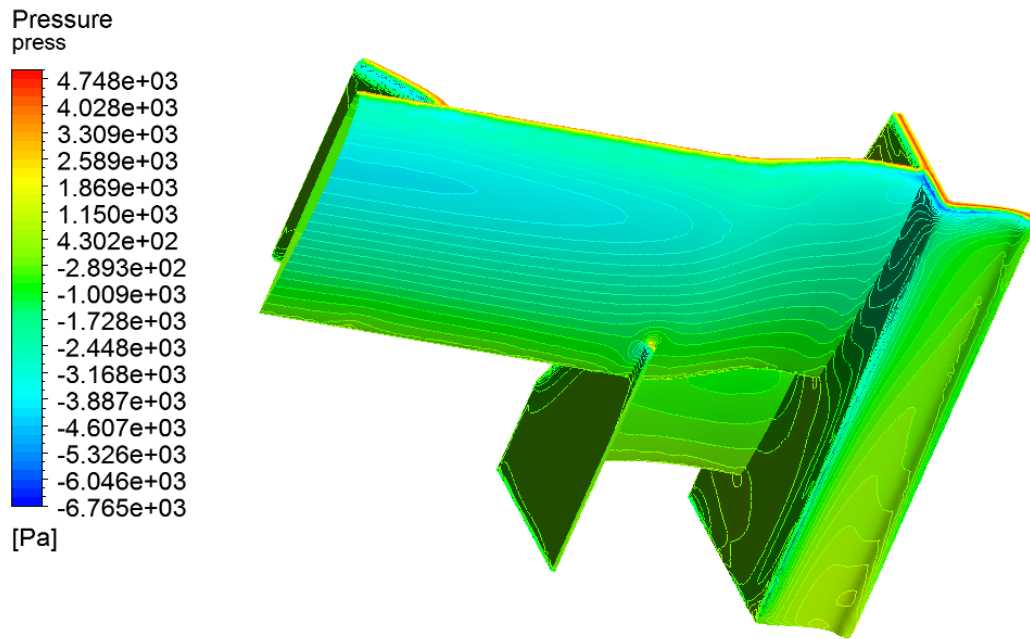


Figura 60. Pressió que suporta la part inferior de l'aleró.

Tal i com es pot observar en les Figures 59 i 60, d'entrada ja es pot saber que el disseny de l'aleró ha estat el correcte ja que a la part inferior de l'aleró la pressió és més baixa que la part superior, i això vol dir que ens genera càrrega aerodinàmica. És més, la pressió de la part inferior de l'aleró és negativa, per tant, ens genera succió contra el terra.

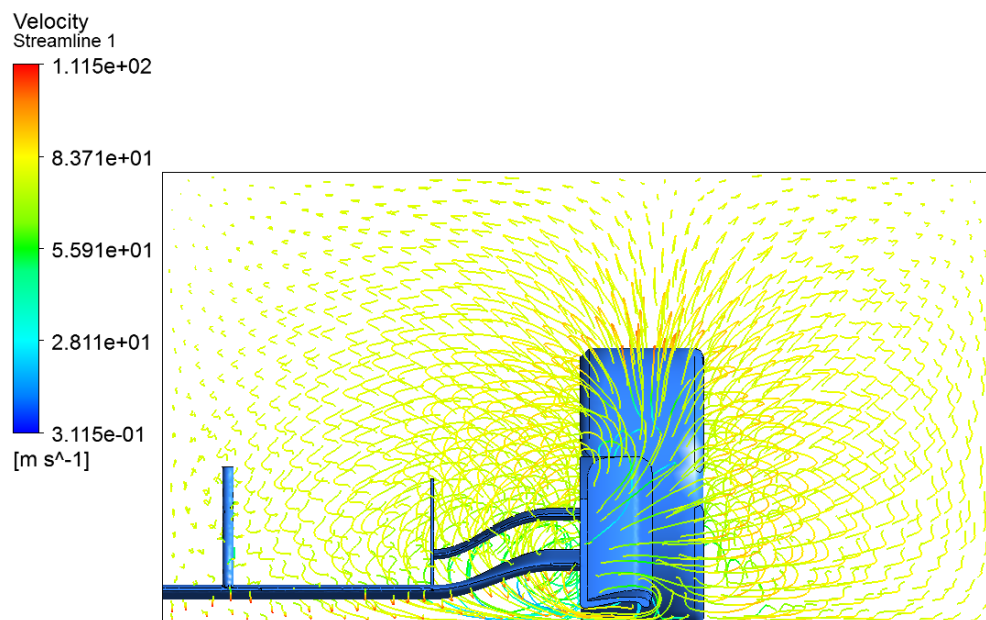


Figura 61. Vista frontal de les línies de velocitat del fluid.

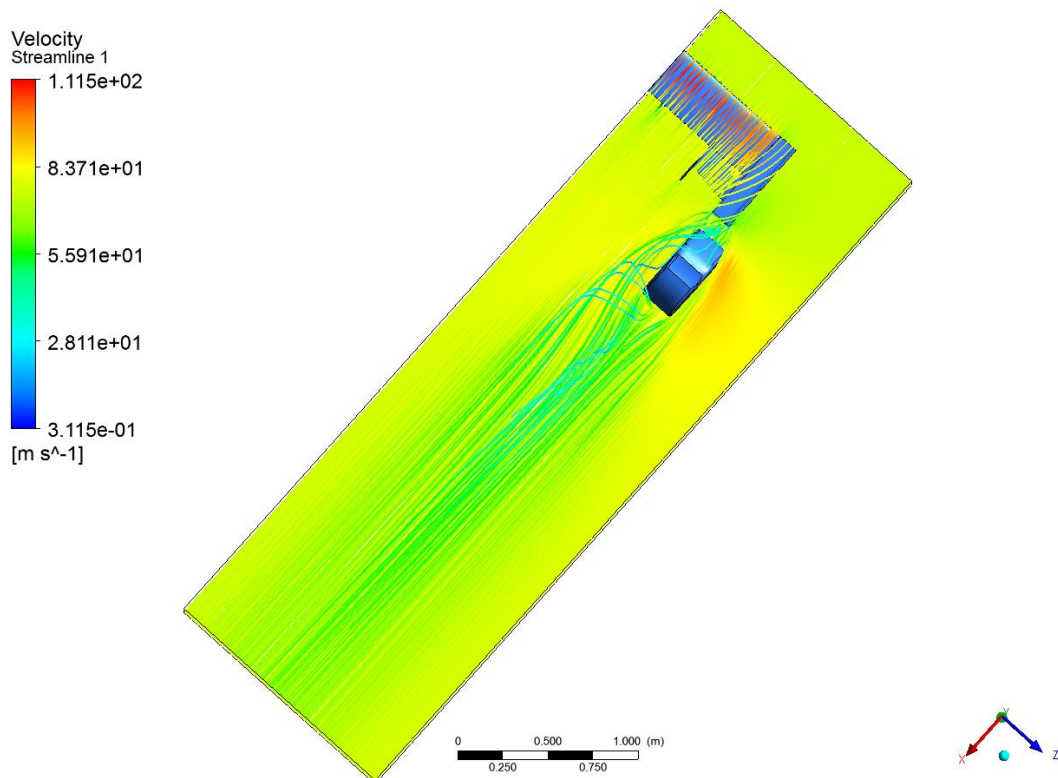


Figura 62. Vista inferior de les línies de velocitat del fluid.

Tal i com s'observa en les Figures 61 i 62, es pot apreciar com l'*endplate* fa la seva funció de redirigir el fluid per tal que aquest no impacti de manera directa a la roda i aquesta no generi tanta resistència a l'avanç.

També es pot apreciar la connexió que hi ha entre les Figures 59 i 60 amb aquestes, en el que es refereix a la generació de càrrega aerodinàmica. Degut a què la pressió en la part inferior és menor a la part superior, això fa que la velocitat del fluid que passa per la part inferior de l'aleró sigui més elevada respecte la velocitat del fluid que circuli per la part superior del sòlid. En la següent figura es pot observar que amb aquesta configuració no es desprèn la capa límit dels dos perfils alars:

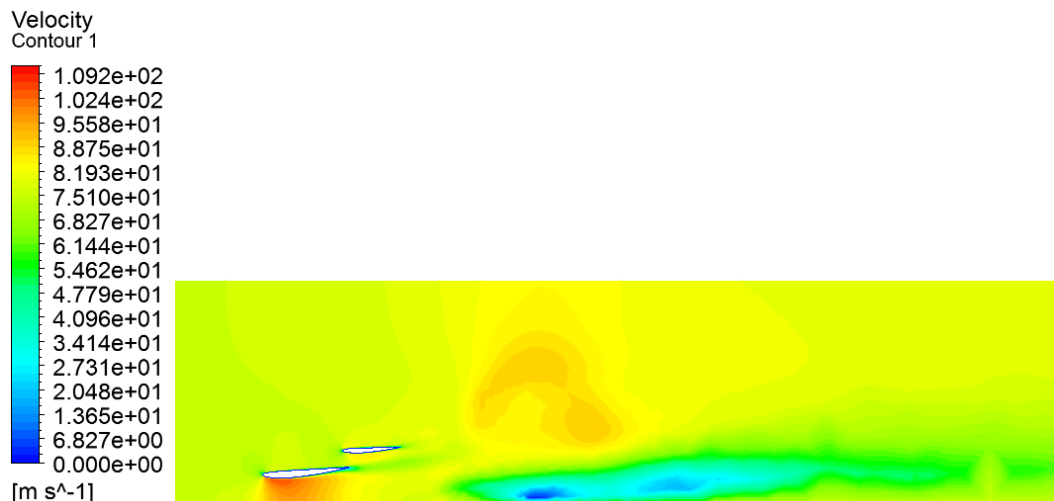


Figura 63. Gràfic de velocitats en un pla paral·lel al de simetria.

4.2.1 Càlcul dels coeficients aerodinàmics

En aquest apartat es definiran totes les dades que estiguin implicades alhora de calcular els coeficients aerodinàmics (vegis l'Annex A: Fonaments d'aerodinàmica i mecànica de fluids).

Força de càrrega aerodinàmica i de resistència a l'avanç:

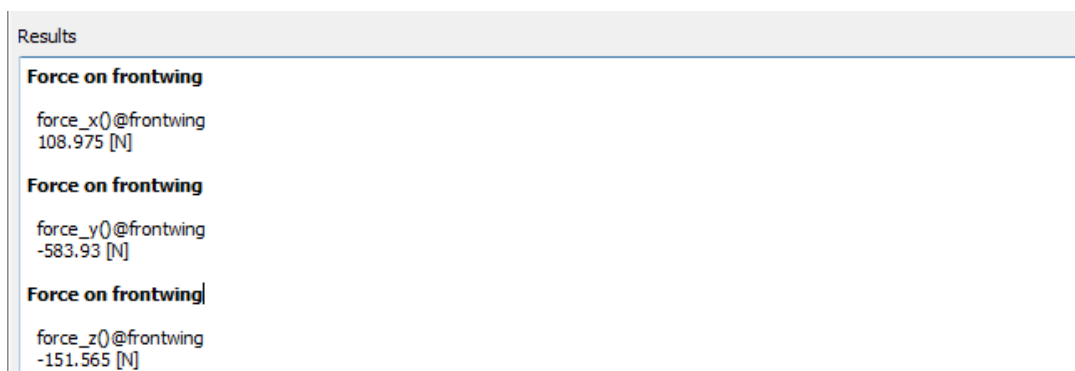


Figura 64. Components de les forces obtingudes.

El signe de cada component de les forces obtingudes va en funció del sistema de coordenades que s'ha utilitzat alhora de fer el disseny. Per tant no és significatiu. La resta de forces obtingudes en els diferents angles d'atac es resumeixen en la següent taula (Taula 3):

Graus	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)				
3	108,975	-583,93	-151,565	19	184,703	-974,277	-191,551
4	112,665	-603,127	-154,961	20	188,908	-995,744	-193,403
5	115,957	-612,235	-157,035	21	194,455	-1028,82	-195,148
6	116,735	-627,378	-155,6	22	200,267	-1049,26	-196,259
7	122,131	-646,066	-160,51	23	206,307	-1076,92	-198,417
8	126,591	-668,699	-163,476	24	211,474	-1094,8	-199,08
9	129,432	-690,646	-164,823	25	214,159	-1111,31	-199,484
10	133,67	-716,929	-167,138	26	219,856	-1132,7	-200,966
11	138,289	-741,376	-169,435	27	222,089	-1129,74	-197,633
12	144,631	-768,978	-173,947	28	225,893	-1146,71	-200,032
13	151,755	-801,74	-177,716	29	228,216	-1143,94	-197,995
14	155,285	-823,702	-179,86	30	226,849	-1139,92	-196,348
15	160,669	-853,884	-181,33	31	229,082	-1140,17	-192,706
16	166,401	-884,245	-184,205	32	232,715	-1150,26	-193,943
17	171,686	-916,367	-186,312	33	234,905	-1134,28	-186,329
18	178,613	-945,024	-188,961	34	239,619	-1159,26	-187,403

Taula 3. Resultats de les components de força en funció l'angle d'atac del flap mòbil.

Pel càlcul del coeficient C_L es necessita la component F_y que representa la força de càrrega aerodinàmica, mentre que pel càlcul del coeficient C_D es necessita la component F_x que representa la força de resistència a l'avanç.

Densitat de l'aire:

Com que les simulacions CFX es fan per defecte a una temperatura de 25°C, necessitem el valor de la densitat de l'aire a aquesta temperatura. El seu valor és de 1,205 Kg/m³.

Velocitat del fluid:

En aquesta simulació s'ha mantingut sempre el mateix valor de velocitat de desplaçament del fluid de 270 km/h, és a dir, 75 m/s.

Superfície alar:

El valor d'aquesta àrea ens servirà tant pel càlcul del coeficient C_L com pel coeficient C_D , tot i que si es tractes d'una simulació d'un automòbil, en el cas del coeficient C_D la seva àrea de referència correspondria a l'àrea frontal projectada del vehicle.

Com que en el nostre cas es tracta d'un aleró, s'utilitza la superfície alar que es projecta en la vista superior d'aquest. Per fer-ho s'ha utilitzat el programa Solidworks generant una extrusió en un pla paral·lel que projecta la vista superior de l'aleró:

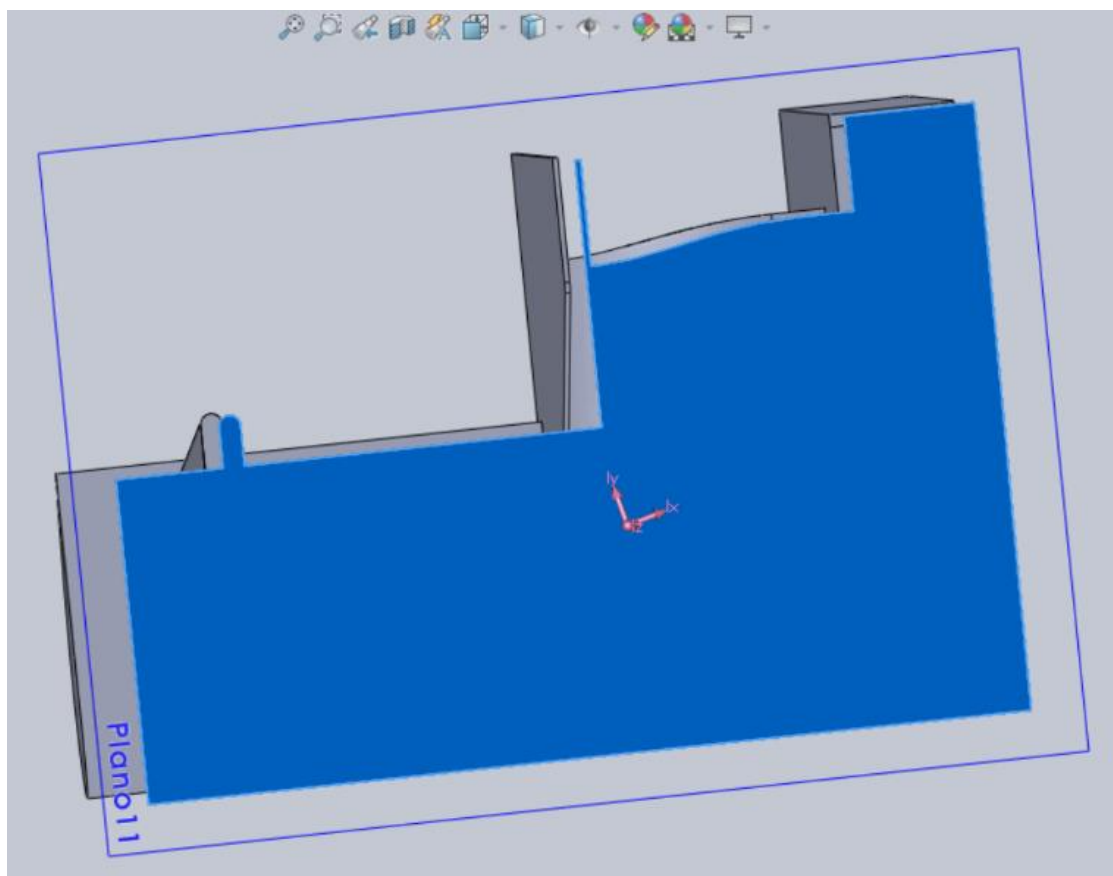


Figura 65. Extrusió en un pla paral·lel de la vista superior de l'aleró.

El programa et permet obtenir les propietats físiques d'allò que demanis, i una de les dades que et proporcionen és l'àrea de la superfície:

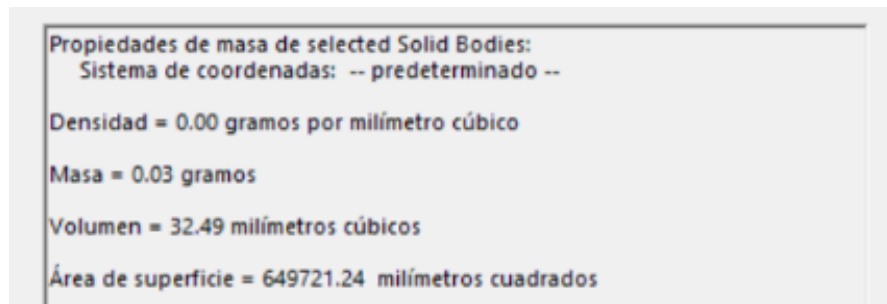


Figura 66. Propietats físiques de l'extrusió.

Aquesta àrea variarà una mica en funció de l'angle d'atac del flap mòbil ja que, com menys angle d'atac tingui més àrea projecta el flap. Per tant, aplicant correctament les fórmules pel càlcul dels coeficients (vegis l'Annex A: Fonaments d'aerodinàmica i mecànica de fluids) i posant correctament el valor de les dades en les unitats corresponents, els resultats dels coeficients de totes les simulacions d'aquest apartat són els següents (Taula 4):

Graus	C_Drag	C_Lift
3	0,049506075	-0,26527261
4	0,05119148	-0,27404219
5	0,052696611	-0,27822995
6	0,053059588	-0,28516228
7	0,055522087	-0,29370866
8	0,05755987	-0,30405185
9	0,058862099	-0,31408673
10	0,060800221	-0,32609741
11	0,062912361	-0,33727711
12	0,065809242	-0,34989635
13	0,069063037	-0,36486837
14	0,070682085	-0,3749298
15	0,073145755	-0,38873703
16	0,07576876	-0,40263067
17	0,078189124	-0,41733125
18	0,081358282	-0,43045875
19	0,084147245	-0,44386245
20	0,086078277	-0,45372312
21	0,088621604	-0,46887803
22	0,091286629	-0,47827854
23	0,094056551	-0,49097404
24	0,096429381	-0,4992145
25	0,097671096	-0,50683308
26	0,100287175	-0,51668039
27	0,101323804	-0,51542199
28	0,103077667	-0,52325744
29	0,104156238	-0,52208647
30	0,103550801	-0,5203445
31	0,104588751	-0,5205514
32	0,106266362	-0,52525168
33	0,107285527	-0,51804699
34	0,109458019	-0,52955026

Taula 4. Resultats dels coeficients C_D i C_L .

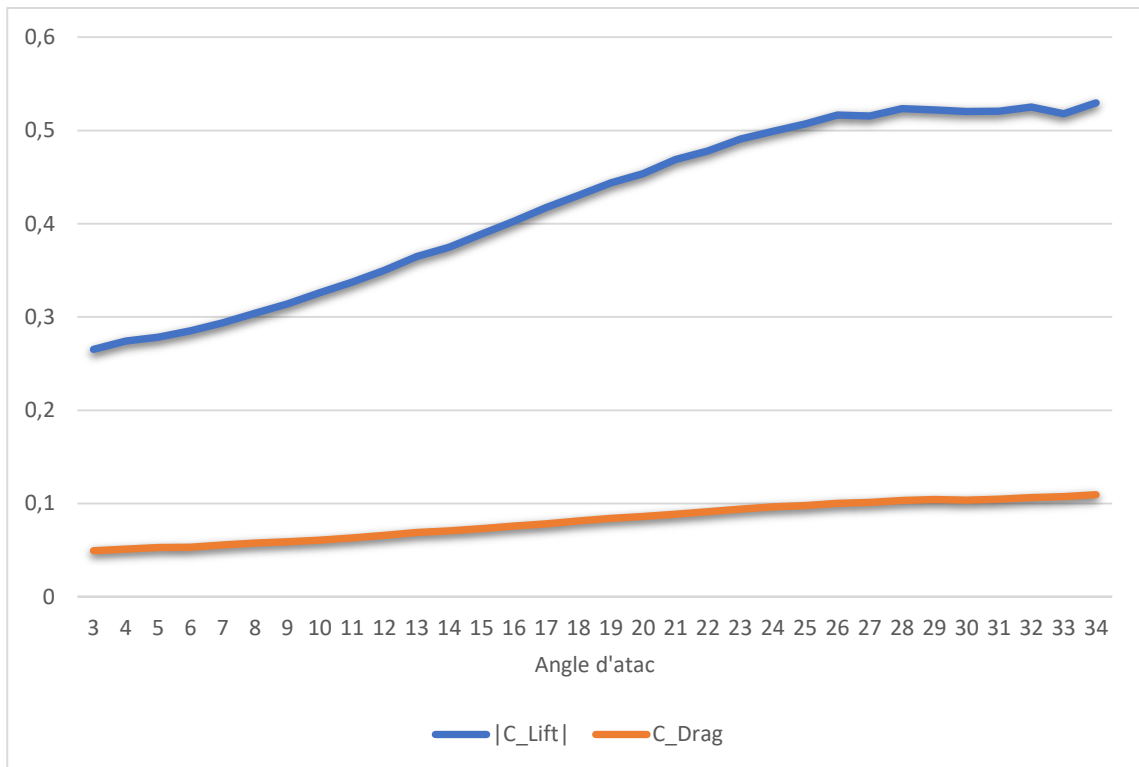


Figura 67. Representació gràfica dels resultats obtinguts dels coeficients en funció de l'angle d'atac.

Tal i com es pot observar el valor del coeficient C_L augmenta, a mesura que el valor de l'angle d'atac puja fins arribar a un cert punt en el qual, per molt que pugui l'angle d'atac el valor del coeficient és manté bastant estable. Això ens pot indicar que ha arribat al valor màxim de càrrega aerodinàmica que ens pot arribar a proporcionar, i que segurament, si es pogués augmentar encara més el valor de l'angle d'atac del flap mòbil, el coeficient aniria a la baixa i, per tant, ens deixaria de generar més càrrega aerodinàmica. Per tant, quan això succeeix, vol dir que la capa límit es desprèn del perfil alar del flap mòbil, i el perfil entra en pèrdua.

En el cas del coeficient C_D es pot entendre que com més petit sigui el valor de l'angle d'atac del flap mòbil, menys resistència a l'avanç ens proporcionarà l'aleró. Per tant, aquest, a mesura que augmenti el valor de l'angle d'inclinació més resistència a l'avanç ens proporcionarà, i aquest, aniria augmentant de manera progressiva generant-nos cada cop més resistència a l'avanç.

Eficiència aerodinàmica:

El que es pretén es veure el rendiment que s'obté amb els valors d'aquests coeficients per tal de donar-nos una idea per saber si aquests tenen una finesa elevada o no (vegis l'Annex A: Fonaments d'aerodinàmica i mecànica de fluids):

Graus	C_Lift/C_Drag		
3	5,358384951	19	5,274830403
4	5,353277415	20	5,271052576
5	5,279845115	21	5,290787072
6	5,374377864	22	5,239305527
7	5,289942766	23	5,219987688
8	5,282358146	24	5,176995754
9	5,335975647	25	5,18918187
10	5,363424852	26	5,152008587
11	5,361062702	27	5,086879584
12	5,31682696	28	5,076341454
13	5,28312082	29	5,012531987
14	5,304453102	30	5,025016641
15	5,314553523	31	4,977126095
16	5,313940421	32	4,942784092
17	5,337459082	33	4,828675422
18	5,290902678	34	4,837930214

Taula 5. Valors de l'eficiència aerodinàmica en funció de l'angle d'atac.

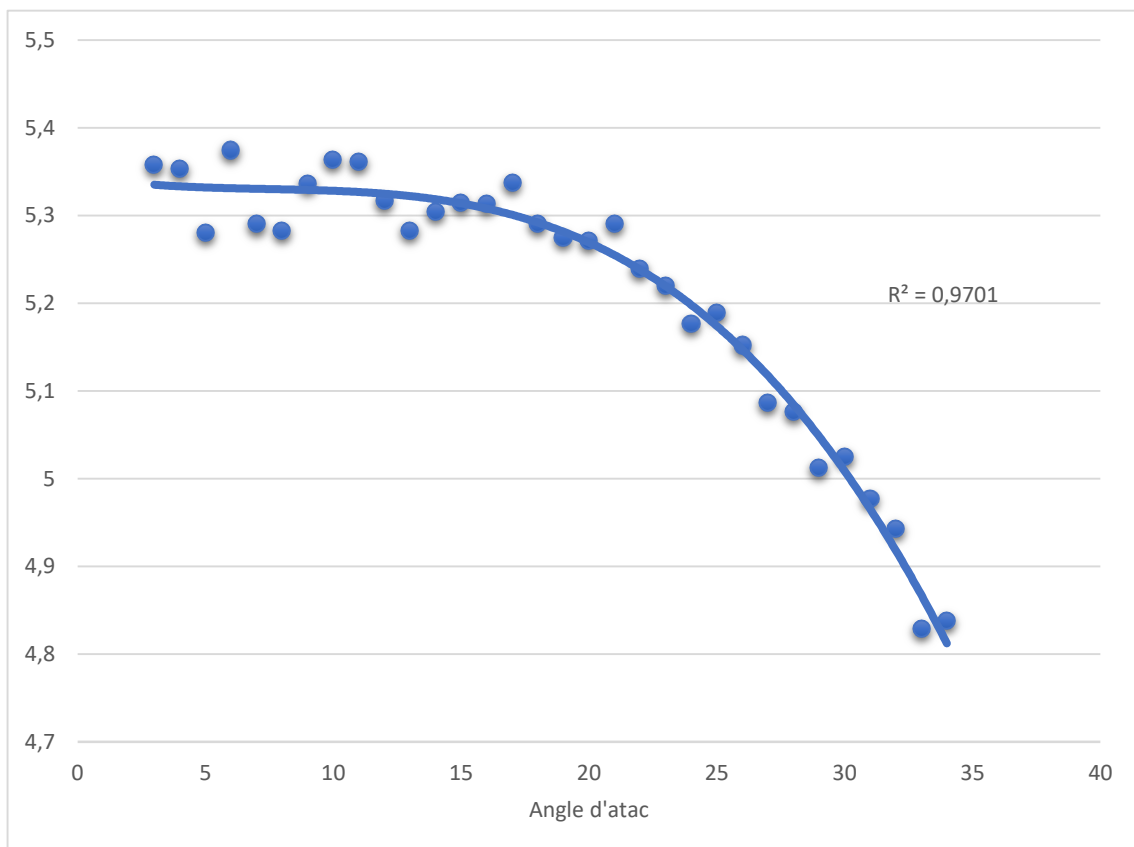


Figura 68. Representació gràfica dels valors de l'eficiència aerodinàmica en funció de l'angle d'atac.

Es pot observar que a mesura que augmentem l'angle d'atac del flap mòbil el valor de la finesa va disminuint ja que s'arriba en un punt que quan augmentem l'angle d'atac la càrrega aerodinàmica es manté constant però la resistència a l'avanç segueix augmentant. No obstant, els valors que s'han obtingut són molt bons.

4.3 Resultats de la simulació en funció de la velocitat de desplaçament

En aquest apartat només es mostraran les figures corresponents a la simulació feta amb les velocitats de desplaçament de 60 km/h i algunes a 270 km/h. La resta de figures es troben a l'Annex C: *Resultats de les simulacions en funció de la velocitat de desplaçament.*

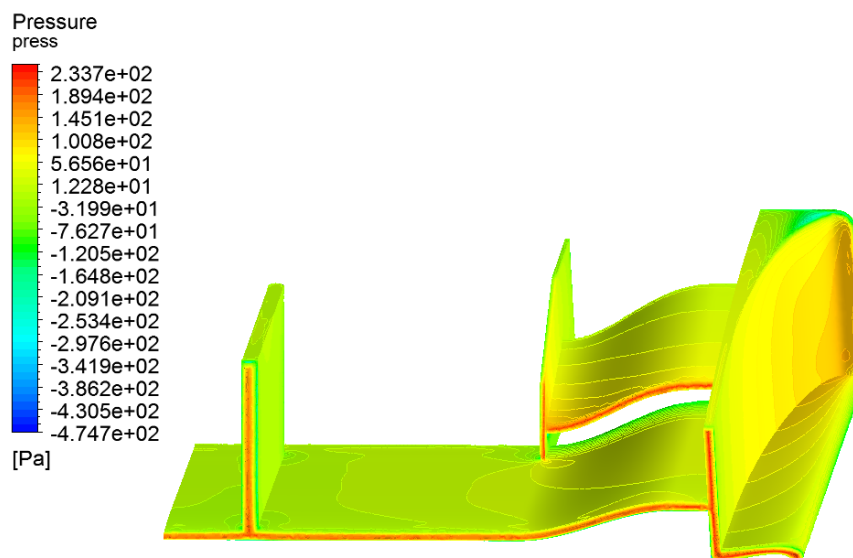


Figura 69. Pressió que suporta l'aleró a 60 km/h.

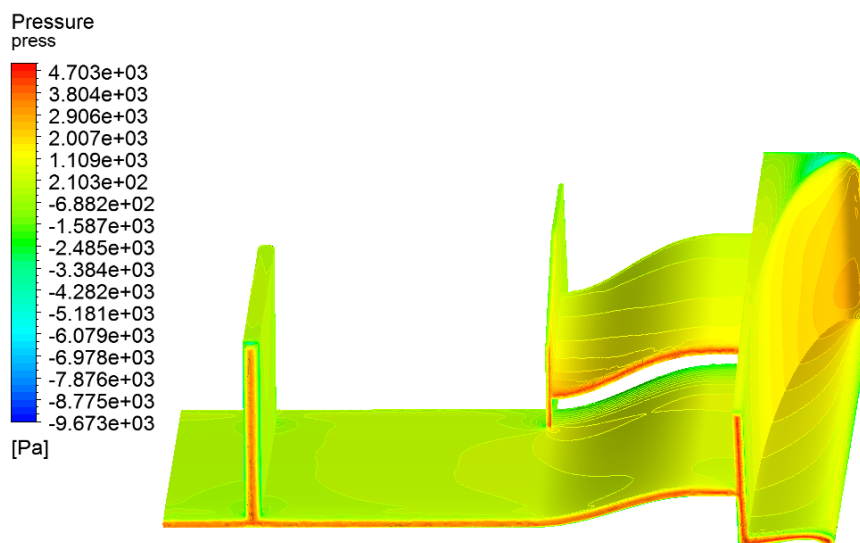


Figura 70. Pressió que suporta l'aleró a 270 km/h.

Tal i com es pot observar, és d'intuïció que com més velocitat de desplaçament hi hagi més pressió rep el sòlid, per tant, la seva resistència a l'avanç també augmenta, així com la força de càrrega aerodinàmica. No obstant, això no voldrà dir que els coeficients també variïn com en l'apartat anterior.

En les següents figures es podrà observar com varien els valors de les línies de velocitat tot i que aquestes mantenen la mateixa trajectòria en el túnel de vent virtual:

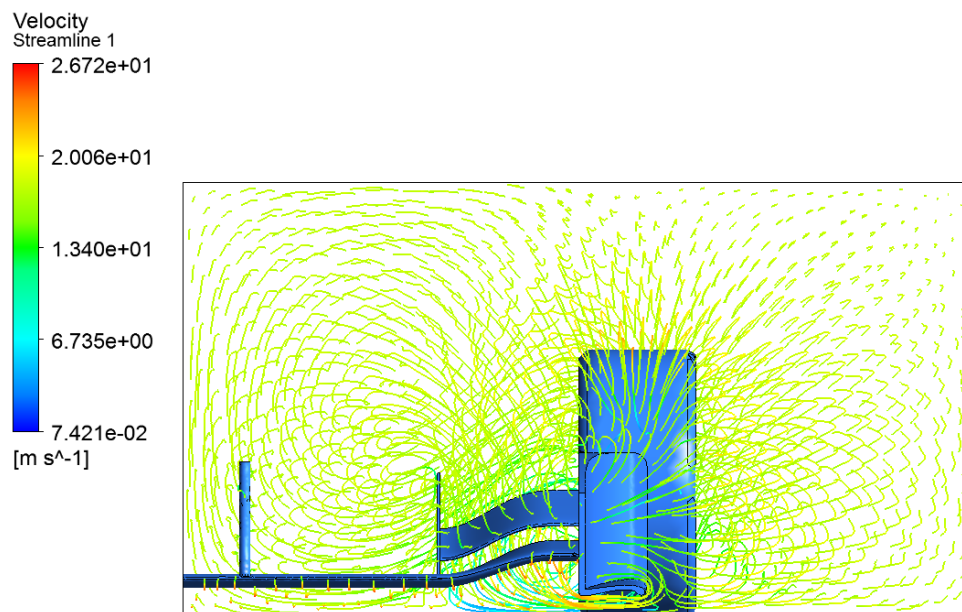


Figura 71. Valor de les trajectòries de les velocitats del fluid a 60 km/h.

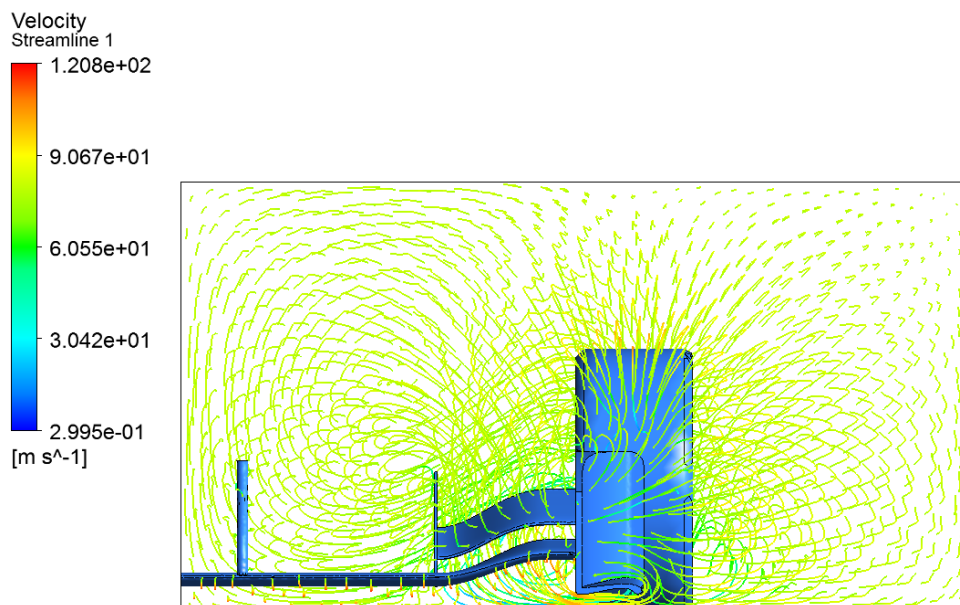


Figura 72. Valor de les trajectòries de les velocitats del fluid a 270 km/h.

4.3.1 Càlcul dels coeficients aerodinàmics

Força de càrrega aerodinàmica i de resistència a l'avanç:

Results	
Force on frontwing	
force_x()@frontwing	9.25731 [N]
Force on frontwing	
force_y()@frontwing	-46.9247 [N]
Force on frontwing	
force_z()@frontwing	-9.34977 [N]

Figura 73. Components de les forces obtingudes.

La resta de forces obtingudes en les diferents velocitats de desplaçament del fluid es resumeixen en la següent taula (Taula 6):

Velocitat (km/h)	F _x (N)	F _y (N)	F _z (N)
60	9,25731	-46,9247	-9,34977
90	20,6824	-106,242	-21,1229
120	36,6335	-189,74	-37,6612
150	57,1099	-297,531	-58,9544
180	82,1161	-429,633	-84,9953
210	111,648	-586,109	-115,767
240	145,703	-767,018	-151,263
270	184,28	-972,39	-191,483

Taula 6. Resultats de les components de força en funció de la velocitat de desplaçament del fluid.

Pel càlcul del coeficient C_L es necessita la component F_y mentre que pel càlcul del coeficient C_D es necessita la component F_x .

Densitat de l'aire:

Com que les simulacions CFX es fan per defecte a una temperatura de 25°C, necessitem el valor de la densitat de l'aire a aquesta temperatura. El seu valor és de 1,205 Kg/m³.

Velocitat del fluid:

En aquest estudi la velocitat del fluid no és la mateixa per a totes les simulacions, tal i com es pot observar en la Taula 6.

Superfície alar:

En aquest estudi s'ha escollit un aleró que tingui un angle d'atac al flap mòbil en concret per a totes les simulacions. S'ha escollit un angle de 19° ja que és una configuració d'angle intermèdia entre els 3° i 34° que pot assolir el reglament tècnic de la competició. Aquest valor és de 647.671 mm^2 .

Per tant, aplicant correctament les fórmules pel càlcul dels coeficients i posant correctament el valor de les dades en les unitats corresponents, els resultats dels coeficients de totes les simulacions d'aquest apartat són els següents:

Velocitat (km/h)	C_Drag	C_Lift
60	0,08540352	-0,43290488
90	0,08480264	-0,43561688
120	0,0844908	-0,43761267
150	0,08429899	-0,43918064
180	0,08417377	-0,44039877
210	0,08408254	-0,44140097
240	0,08401165	-0,44225887
270	0,08395453	-0,44300276

Taula 7. Resultats dels coeficients C_D i C_L .

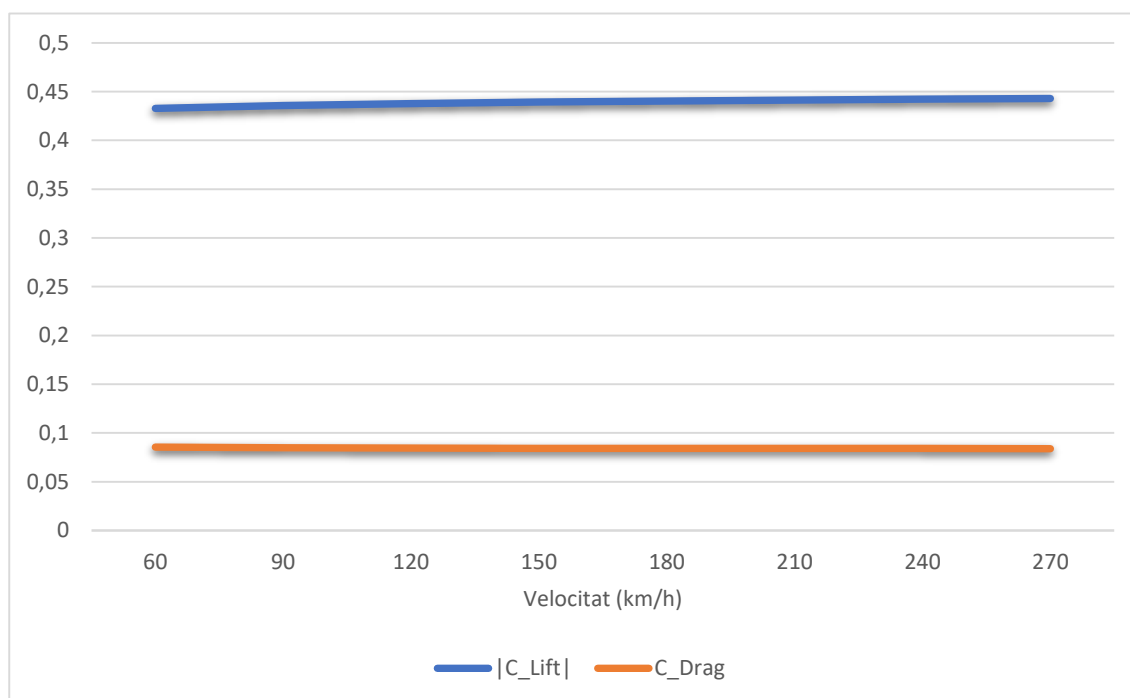


Figura 74. Representació gràfica dels resultats obtinguts dels coeficients en funció de la velocitat del fluid.

Tal i com es pot observar, en aquest estudi els dos coeficients es mantenen constants tot i canviant la velocitat de desplaçament. Això és degut ja que, pel càlcul dels coeficients, només

ens canvia la variable força i la variable velocitat, i aquestes dues són proporcionals de tal manera fent que el valor dels coeficients es mantinguin constants. Dit amb altres paraules, amb aquesta simulació trobem el valor dels coeficients que té aquesta geometria en concret, amb aquesta configuració de paràmetres concretes.

Eficiència aerodinàmica:

El que es pretén es veure el rendiment que s'obté amb els valors d'aquests coeficients per tal de donar-nos una idea per saber si aquests tenen una finesa elevada o no:

Velocitat (km/h)	C_Lift/C_Drag
60	5,068934712
90	5,136831316
120	5,179412287
150	5,209797251
180	5,232019056
210	5,249614861
240	5,264256741
270	5,276698502

Taula 8. Valors de l'eficiència aerodinàmica en funció de la velocitat del fluid.

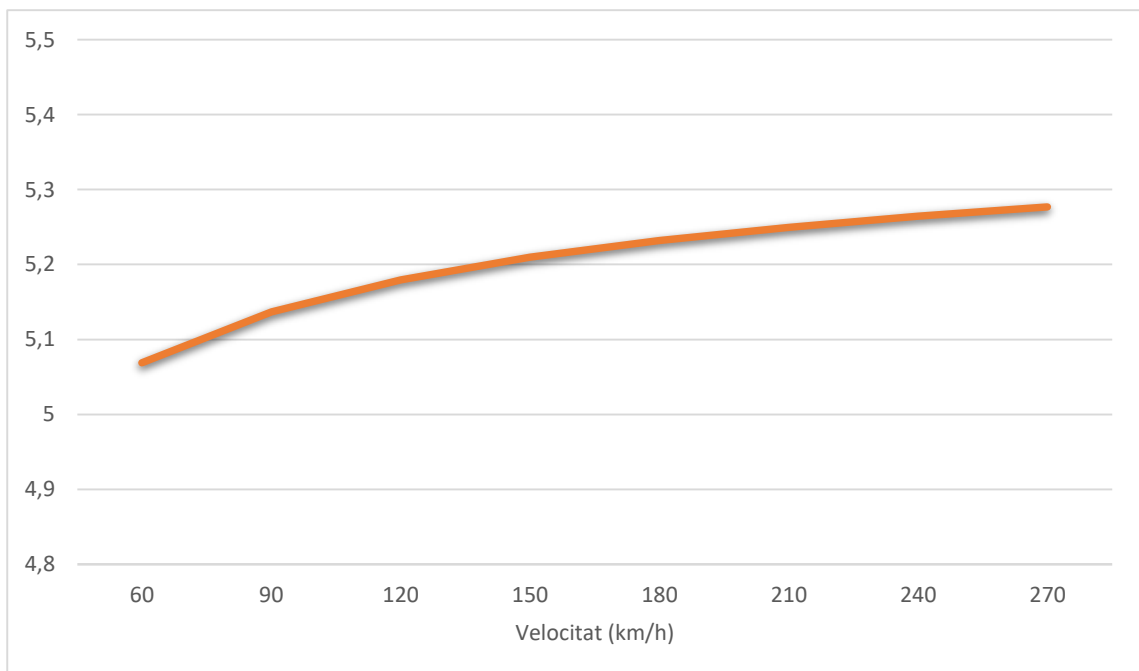


Figura 75. Representació gràfica dels valors de l'eficiència aerodinàmica en funció de la velocitat del fluid.

Es pot observar que la sensació que transmet la gràfica és que, a mesura que augmentem la velocitat del fluid, ens augmenta el valor de la finesa. Això és degut al rang d'escala que s'ha dut a terme per defecte en la gràfica. No obstant, estem parlant de valors que varien dècimes. Per tant, tot i veure una línia ascendent, s'ha de dir que l'eficiència es manté constant, i no

varia significativament degut a què els valors dels coeficients es mantenen bastant estables, tal i com s'ha vist en la Figura 74.

4.4 Resultats de la simulació en funció de l'alçada respecte al terra

En aquest apartat només es mostraran les figures corresponents a la simulació feta a una alçada de 3,75 mm respecte al terra. La resta de figures es troben a l'Annex D: Resultats de les simulacions en funció de l'alçada respecte al terra.

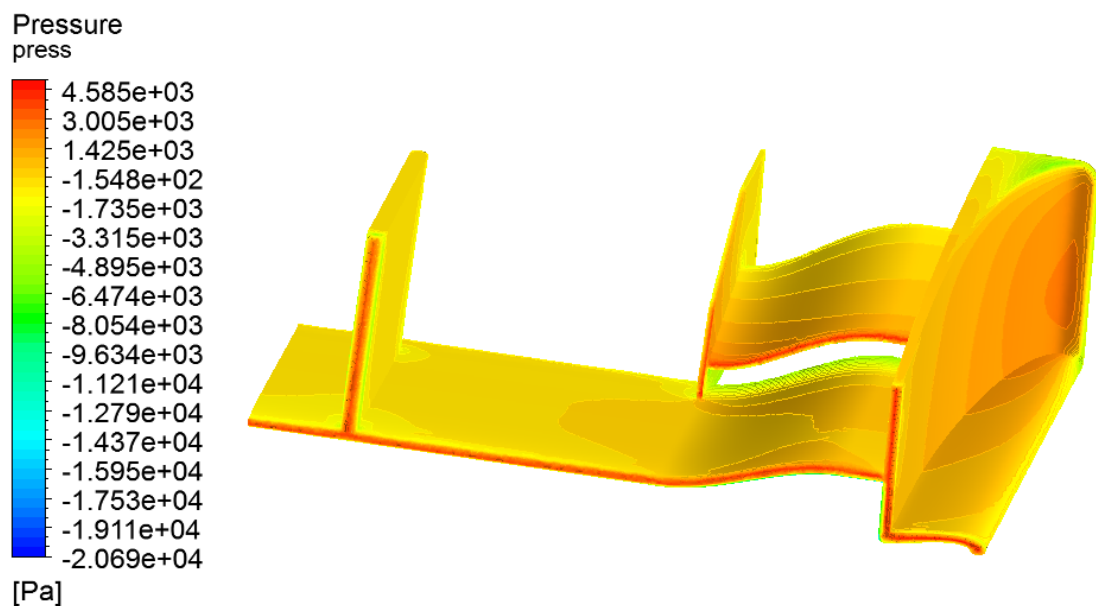


Figura 76. Pressió que suporta la part superior de l'aleró a 3,75 mm respecte al terra.

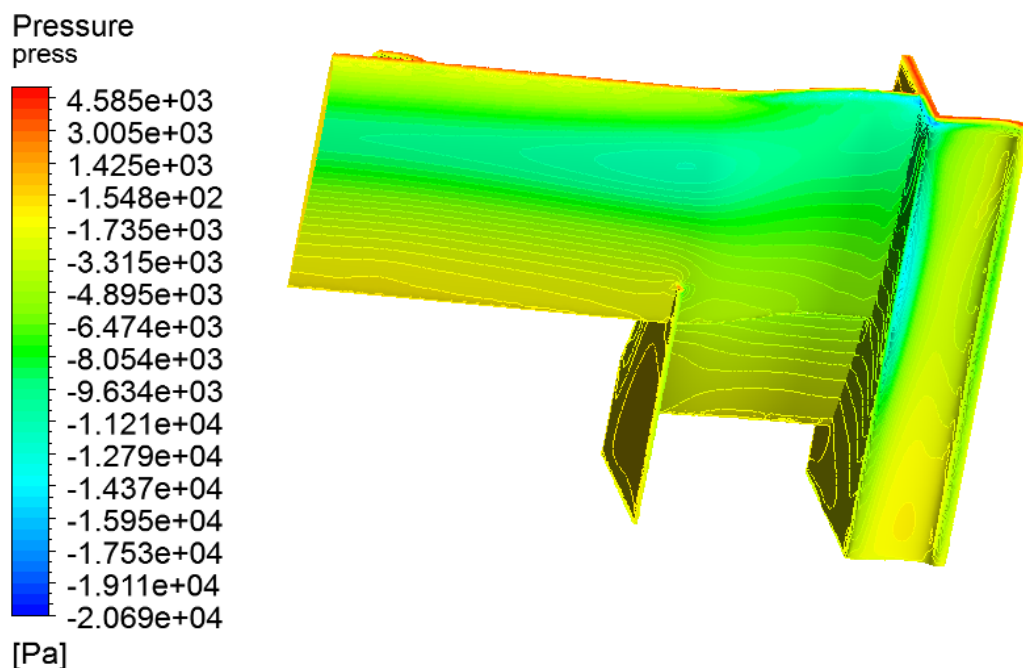


Figura 77. Pressió que suporta la part inferior de l'aleró a 3,75 mm respecte al terra.

Tal i com es pot observar en les Figures 76 i 77, al tractar-se d'una alçada tan petita respecte al terra, l'efecte terra fa el seu acte de presència i això fa que la pressió que rep l'aleró sigui tan elevada, i per tant, el valor de la càrrega aerodinàmica també sigui elevat. A mesura que la distància respecte al terra augmenti, l'efecte terra no tindrà tanta eficàcia i també el mateix succeeix amb el *downforce*, fins arribar a una certa alçada on es comenci a estabilitzar.

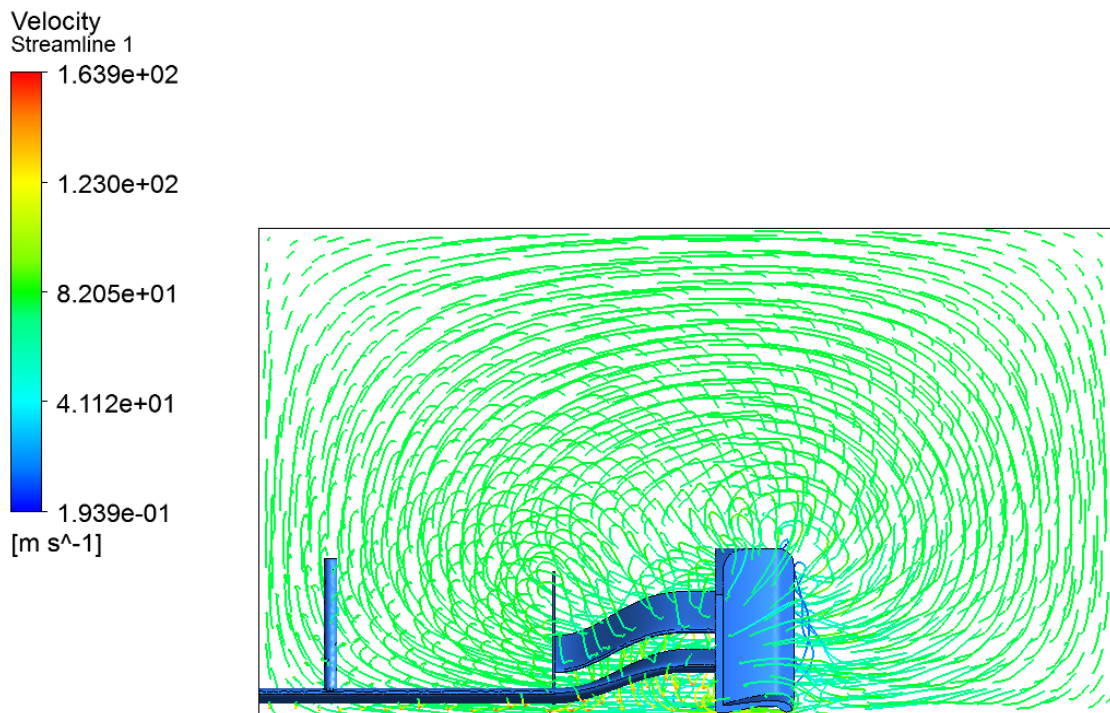


Figura 78. Vista frontal de les línies de velocitat del fluid.

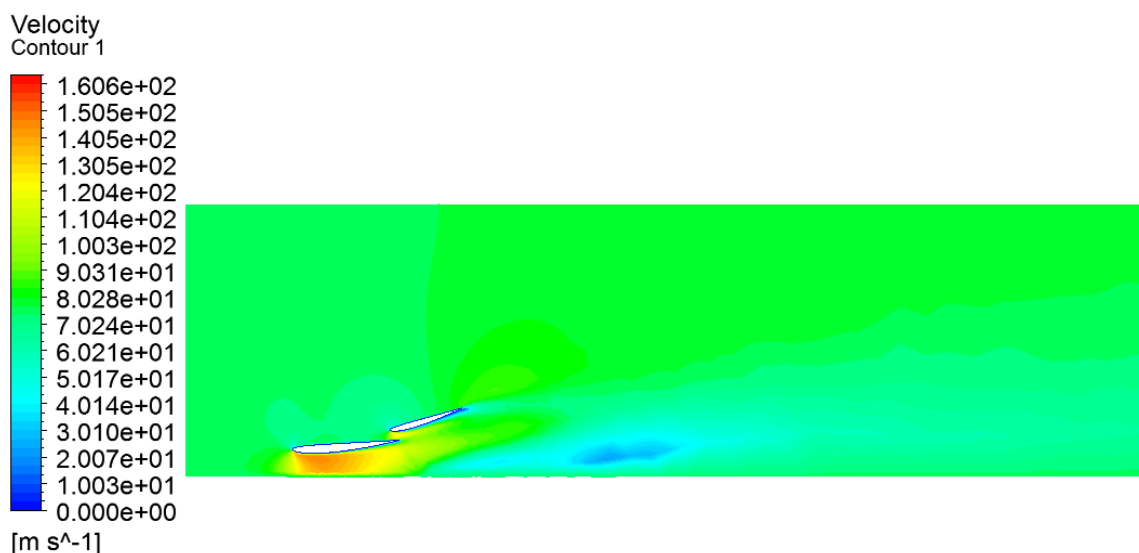


Figura 79. Gràfic de velocitats en un pla paral·lel al de simetria.

Com es pot observar en ambdues figures, i mirant en la llegenda de colors, es nota una certa apreciació que hi ha un rang de variació considerable en la velocitat del fluid ja que la tonalitat de verd està representant aproximadament la velocitat de desplaçament del fluid programada (270

km/h) i en la llegenda es troba a la meitat dels colors. A mesura que augmenti l'alçada respecte al terra aquest color verd que hi ha en general, tendirà a convertir-se en un color groguenc, i això voldrà dir que hi ha menys variació de velocitats en el túnel de vent (vegis l'Annex C: Resultats de les simulacions en funció de l'alçada respecte al terra).

4.4.1 Càlcul dels coeficients aerodinàmics

Força de càrrega aerodinàmica i de resistència a l'avanç:

```
Results
Force on frontwing
force_x()@frontwing
229.393 [N]
Force on frontwing
force_y()@frontwing
-1826.07 [N]
Force on frontwing
force_z()@frontwing
-217.403 [N]
```

Figura 80. Components de les forces obtingudes.

La resta de forces obtingudes en les diferents alçades respecte al terra es resumeixen en la següent taula (Taula 9):

Alçada (mm)	Fx (N)	Fy (N)	Fz (N)
3,75	229,393	-1826,07	-217,403
7,5	225,048	-1693,55	-213,789
15	224,558	-1449,55	-189,473
20	223,773	-1325,23	-176,943
32,5	222,189	-1120	-157,401
70	212,655	-852,764	-134,932
100	205,775	-757,736	-128,178
150	199,66	-682,615	-120,598
250	195,113	-621,723	-111,425
370	193,761	-595,221	-108,638
500	193,055	-587,962	-104,587

Taula 9. Resultats de les components de força en funció de l'alçada respecte al terra.

Pel càlcul del coeficient C_L es necessita la component F_y mentre que pel càlcul del coeficient C_D es necessita la component F_x .

Densitat de l'aire:

Com que les simulacions CFX es fan per defecte a una temperatura de 25°C, necessitem el valor de la densitat de l'aire a aquesta temperatura. El seu valor és de 1,205 Kg/m³.

Velocitat del fluid:

En aquesta simulació s'ha mantingut sempre el mateix valor de velocitat de desplaçament del fluid de 270 km/h, és a dir, 75 m/s.

Superfície alar:

En aquest estudi s'ha escollit un aleró que tingui un angle d'atac al flap mòbil en concret per a totes les simulacions. S'ha escollit un angle de 19° ja que és una configuració d'angle intermèdia entre els 3° i 34° que pot assolir el reglament tècnic de la competició. Aquest valor és de 647.671 mm².

Per tant, aplicant correctament les fórmules pel càlcul dels coeficients i posant correctament el valor de les dades en les unitats corresponents, els resultats dels coeficients de totes les simulacions d'aquest apartat són els següents:

Alçada (mm)	C_Drag	C_Lift
3,75	0,10450718	-0,83192346
7,5	0,10252767	-0,77154982
15	0,10230444	-0,66038797
20	0,10194681	-0,60375009
32,5	0,10122517	-0,51025113
70	0,09688166	-0,38850339
100	0,09374726	-0,3452104
150	0,09096138	-0,31098667
250	0,08888985	-0,28324541
370	0,0882739	-0,2711716
500	0,08795226	-0,26786453

Taula 10. Resultats dels coeficients C_D i C_L.

Alçada (mm)	h/c
3,75	0,0125
7,5	0,025
15	0,05
20	0,06666667
32,5	0,10833333
70	0,23333333
100	0,33333333
150	0,5
250	0,83333333
370	1,23333333
500	1,66666667

Taula 11. Quocient de l'alçada respecte al terra amb la longitud alar de l'ala principal de l'aleró.

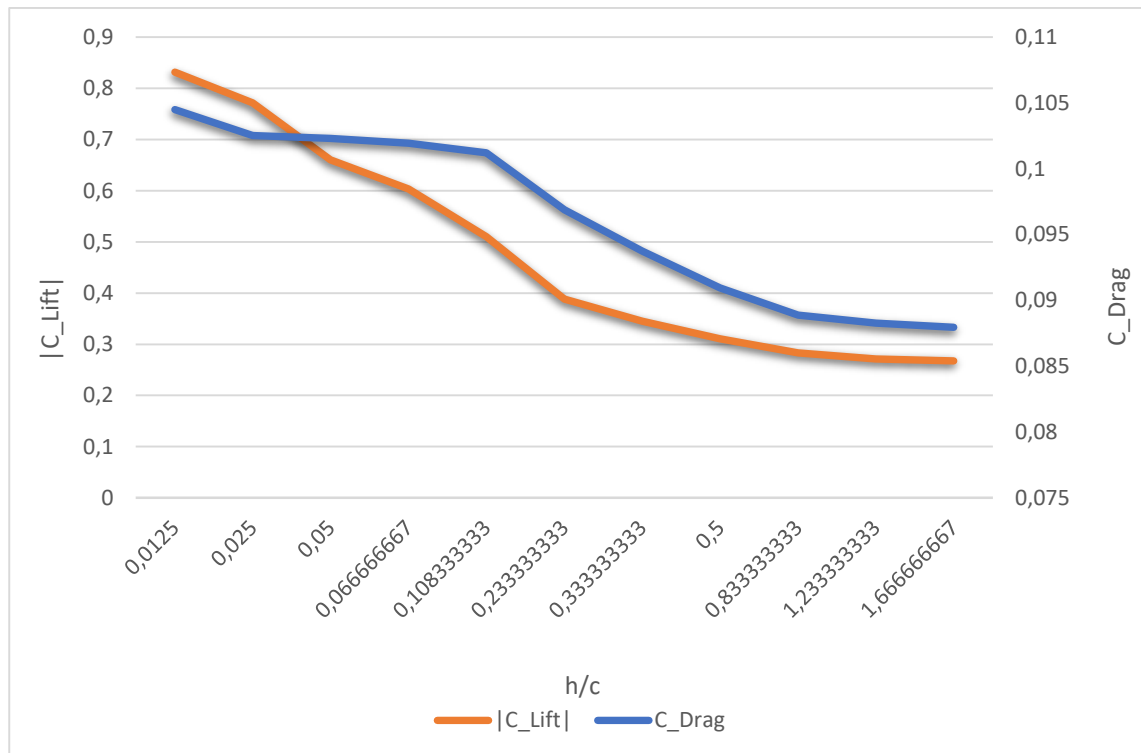


Figura 81. Representació gràfica dels resultats obtinguts dels coeficients en funció del quocient entre l'alçada respecte al terra i la longitud de la corda de l'ala principal de l'aleró.

Si la representació gràfica dels coeficients s'hagués fet només en funció de l'alçada respecte al terra i no tal i com s'ha fet el dibuix seria exactament igual. Però en aquest cas ens interessa els valors obtinguts dels quocients ja que ens interessa aquells valors dels dos coeficients que es situïn entre 0,1 – 0,3 del valor del quocient entre alçada respecte al terra i longitud de la corda de l'ala principal de l'aleró (vegis l'Annex A: Fonaments d'aerodinàmica i mecànica de fluids). El motiu pel qual es fa això és perquè s'utilitza clarament com a principi de desenvolupament en el disseny dels cotxes de competició.

Com es pot observar en la gràfica com més a prop del terra estigui l'aleró més alts són els dos coeficients, cadascun amb la seva respectiva magnitud, mentre que com més lluny del terra es situï l'aleró més petits són els valors dels coeficients i més estables són. Això indica que l'efecte terra deixa de tenir el seu efecte a partir de determinades alçades.

Per tant, l'alçada respecte al terra més indicada per a situar l'aleró davanter és aproximadament entre 32,5 mm i no superar els 100 mm, el C_L ha de ser més gran que 0,345 fins a 0,51, aproximadament (en valor absolut), i el C_D ha de ser més gran que 0,093 fins a 0,101, aproximadament.

Eficiència aerodinàmica:

El que es pretén es veure el rendiment que s'obté amb els valors d'aquests coeficients per tal de donar-nos una idea per saber si aquests tenen una finesa elevada o no:

Alçada (mm)	C_Lift/C_Drag
3,75	7,960443431
7,5	7,525283495
15	6,455125179
20	5,922206879
32,5	5,040753593
70	4,010082058
100	3,682352084
150	3,418887108
250	3,186476555
370	3,071933981
500	3,045567325

Taula 12. Valors de l'eficiència aerodinàmica en funció de l'alçada respecte al terra.

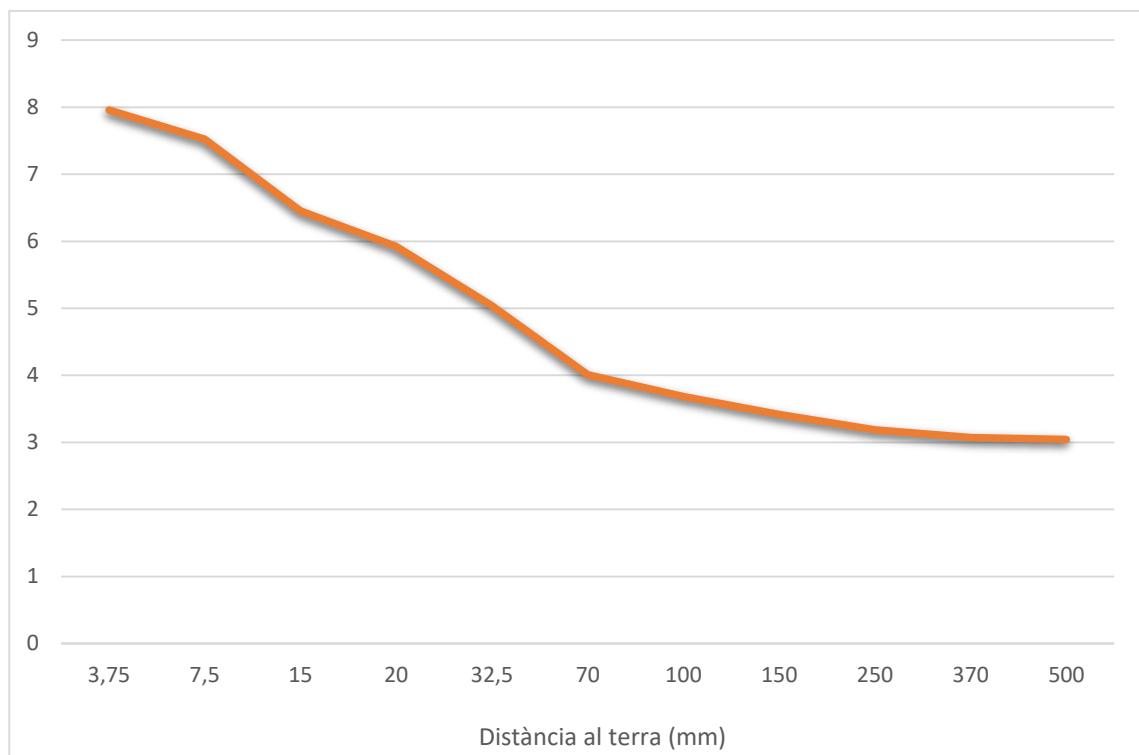


Figura 82. Representació gràfica de l'eficiència aerodinàmica en funció de l'alçada respecte al terra.

Es pot observar que com més a prop del terra més finesa hi ha, i per tant, compensa el fet que es guanyi *downforce* en relació a l'augment de *drag*. També, i com era d'esperar, la finesa va disminuint i s'acaba estabilitzant a mesura que augmenta l'alçada de l'aleró respecte al terra, i per tant, l'*efecte terra* deixa de tenir el seu efecte. Si ens centrem en els valors on l'alçada respecte al terra és la més indicada per a situar l'aleró (entre 32,5 mm i que no superi els 100 mm, tal i com s'ha dit en la Figura 81, vegis també l'Annex A: Fonaments d'aerodinàmica i

mecànica de fluids), el valor de la finesa es situa a partir de 3,68 fins arribar a 5, aproximadament.

4.5 Resultats de l'anàlisi estructural de l'aleró

En aquest apartat només es mostraran les figures corresponents a l'anàlisi estructural fet amb l'angle d'atac a 3°. La resta de figures es troben a l'Annex E: Resultats de l'anàlisi estructural de l'aleró. Recordar que es parteix dels resultats obtinguts en l'apartat 4.2 Resultats de la simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil.

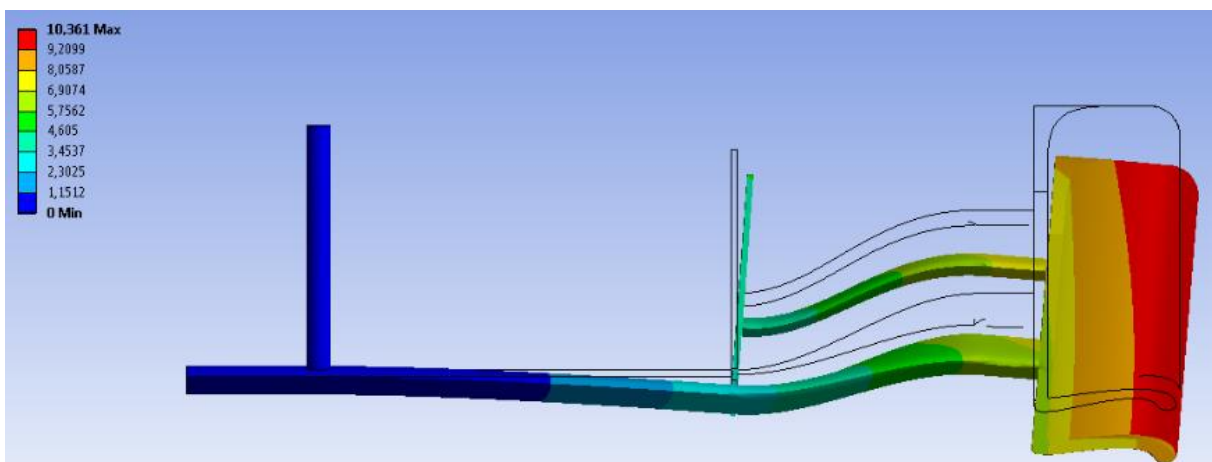


Figura 83. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Graus	Deformation (mm)		
3	10,361	19	24,458
4	10,993	20	25,226
5	11,209	21	26,346
6	11,746	22	27,065
7	12,384	23	27,999
8	13,307	24	28,691
9	14,139	25	29,137
10	15,024	26	29,875
11	15,882	27	29,652
12	16,873	28	30,227
13	18,219	29	29,998
14	18,97	30	29,854
15	20,073	31	29,619
16	21,194	32	29,909
17	22,264	33	29,379
18	23,427	34	30,125

Taula 13. Resultats de les deformacions obtingudes en funció de l'angle d'atac del flap mòbil.

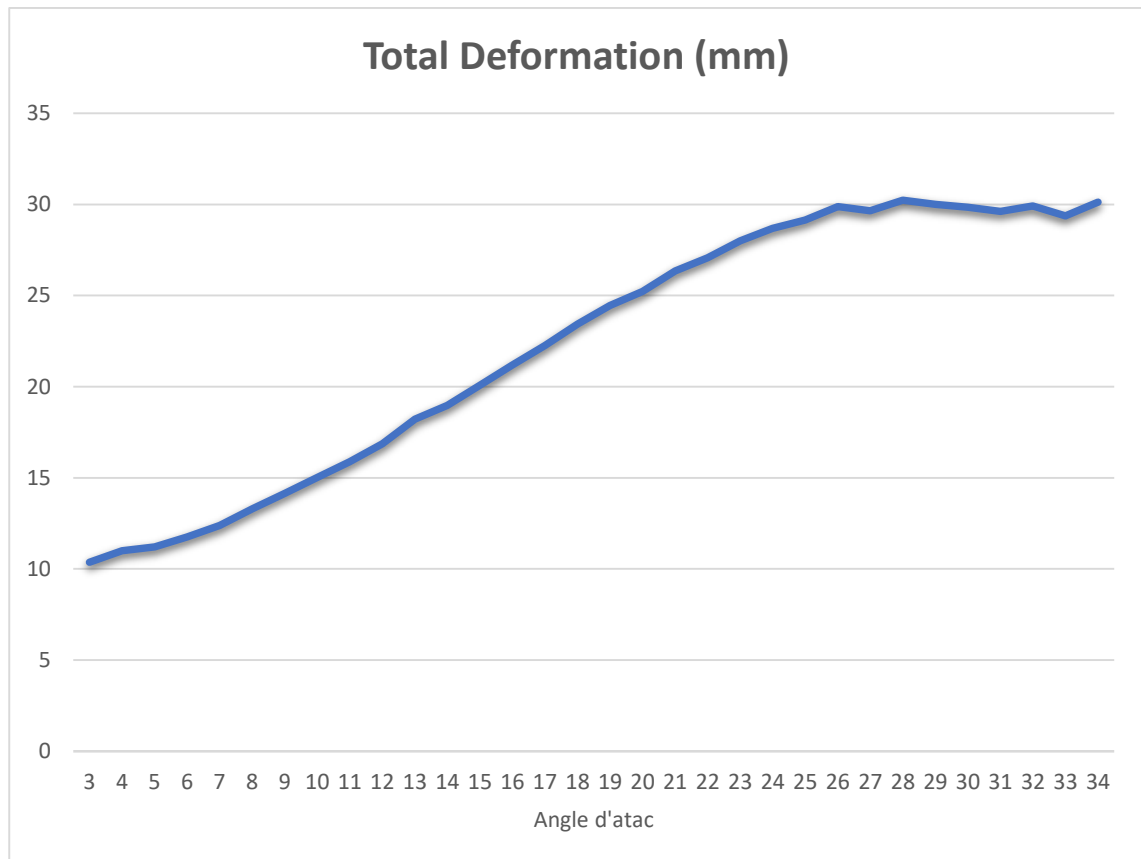


Figura 84. Representació gràfica dels resultats obtinguts de la deformació total de l'aleró en funció de l'angle d'atac.

Tal i com es pot observar en la Figura 83, d'un bon principi ja tenim 10 mm de deformació amb 3° d'angle d'atac i amb la pressió importada en el càlcul de la simulació CFX. Si observem la taula de resultats i la representació gràfica (Taula 13 i Figura 84, respectivament) a partir dels 26° fins als 34° veiem com aquesta deformació ja s'estabilitza als 30 mm aproximadament. Això és degut a què les forces i, per tant, la pressió que suporta l'aleró en aquests angles d'atac, s'han estabilitzat a un valor, tal i com s'ha vist en l'estudi de la simulació variant l'angle d'atac.

Ara bé, la part de l'aleró que està més pròxima al terra es troba a una alçada de 32,5 mm. Per tant, per poc que no ens toca al terra. Però cal recordar les condicions a les que s'enfronta aquest anàlisi estructural, ja que estem fent una configuració de molta càrrega aerodinàmica i assolint una velocitat màxima de 270 km/h, i això és contradictori ja que normalment, quan es vol assolir aquesta velocitat punta no es configura el monoplaça a màxima càrrega aerodinàmica, és a dir, amb un angle d'atac del flap tant elevat.

A més d'això, també s'ha de tenir en compte que l'estructura interna de l'aleró no s'ha considerat alhora de realitzar el disseny i s'ha optat per l'opció de tractar l'aleró com un sòlid. Per tant, amb una estructura interna adequada aquests valors de deformació es veurien reduïts en un gran percentatge.

Per tant, tot i haver imposat aquestes condicions que s'han utilitzat per a realitzar l'anàlisi estructural, l'aleró es capaç d'assolir una configuració tan desfavorable com és donar molta càrrega aerodinàmica mentre es desplaça a una velocitat màxima de 270 km/h.

5. CONCLUSIONS

En l'apartat del disseny s'ha complert tots els requeriments mostrats a les especificacions del projecte, i per tant, era essencial per al compliment del reglament tècnic de la competició. A més a més, el disseny s'ha simplificat de tal manera per evitar tenir problemes alhora de fer les simulacions de càlcul de CFX.

Els resultats dels coeficients aerodinàmics obtinguts en totes les simulacions dels diferents estudis han sigut coherents i correctes segons el previst:

Per un costat tenim l'estudi en funció de l'angle d'atac del flap mòbil i s'ha demostrat que el C_L augmenta a mesura que puja l'angle d'atac fins arribar a un cert angle d'inclinació en el qual el coeficient és manté estable, i per tant s'ha arribat al límit de generar *downforce*, i per tant, si s'augmentés més l'angle ens passaria el contrari i s'aniria perdent càrrega aerodinàmica. Això ens indica que, en aquest punt, la capa límit es desprèn del perfil alar del flap mòbil, i per tant, el perfil entra en pèrdua. Mentrestant, el C_D augmenta progressivament a mesura que puja l'angle d'atac, i a diferència del C_L , aquest segueix augmentant ja que com més angle d'incidència hi hagi més *drag* es genera. Amb la representació gràfica de l'eficiència aerodinàmica ens mostra la relació que hi ha entre ambdós coeficients per donar-nos una idea del valor de la finesa que s'obté, i es veu clarament que quan l'angle d'atac arriba a una certa inclinació el valor de la finesa disminueix degut a l'estabilització del C_L .

Per un altre costat tenim l'estudi en funció de la velocitat de desplaçament en el qual els dos coeficients es mantenen en uns valors constants de 0,44 (en valor absolut) pel C_L i 0,084 pel C_D , tot i canviant la velocitat de desplaçament. Això és degut a què només ens canvia la variable força (càrrega aerodinàmica en el cas del C_L i resistència a l'avanç en el cas del C_D) i la variable velocitat, i aquestes dues són proporcionals de tal manera fent que el valor dels coeficients es mantinguin constants. L'única manera d'aconseguir que aquests coeficients canviïn de valor és modificant l'angle d'atac del flap mòbil o l'alçada de l'aleró respecte al terra, tal i com es realitza en el tercer tipus d'estudi. Per tant, en la representació gràfica de l'eficiència aerodinàmica es veu com es manté el valor de la finesa gairebé constant tot i canviant la velocitat de desplaçament.

També tenim l'estudi en funció de l'alçada respecte al terra. S'arriba a la conclusió que com més a prop del terra estigui l'aleró més alts són els dos coeficients, cadascun amb la seva respectiva magnitud, mentre que com més lluny del terra es situï l'aleró més petits són els valors dels coeficients i més estables són. Això indica que l'*efecte terra* deixa de tenir el seu efecte a partir de determinades alçades. També, gràcies al valor del quocient entre alçada i longitud de la corda de l'ala principal, s'ha pogut determinar, a través de la representació gràfica, aquells valors dels dos

coeficients que es situïn entre 0,1 – 0,3 del valor del quocient de cares al desenvolupament del disseny dels cotxes de competició i que, a més a més, et determina l'alçada òptima de l'aleró respecte al terra. Per tant, l'alçada respecte al terra més indicada per a situar l'aleró davanter és aproximadament entre 32,5 mm i no superar els 100 mm, el C_L ha de ser més gran que 0,345 fins a 0,51 aproximadament (en valor absolut), i el C_D ha de ser més gran que 0,093 fins a 0,101 aproximadament. En la representació gràfica de l'eficiència aerodinàmica es pot observar que com més a prop del terra més finesa hi ha, i aquesta va disminuint i s'acaba estabilitzant a mesura que augmenta l'alçada de l'aleró respecte al terra.

Respecte l'anàlisi estructural s'ha de tenir en compte que l'estructura interna de l'aleró no s'ha considerat alhora de realitzar el disseny i s'ha optat per l'opció de tractar l'aleró com un sòlid. Per tant, amb una estructura interna adequada aquests valors de deformació es veurien reduïts en un gran percentatge. Tot i haver imposat aquestes condicions que s'han utilitzat per a realitzar l'anàlisi estructural, l'aleró es capaç d'assolir una configuració tan desfavorable com és donar molta càrrega aerodinàmica mentre es desplaça a una velocitat màxima de 270 km/h, ja que la seva deformació total màxima en aquesta velocitat ha sigut de 30,2 mm mentre que la part de l'aleró més propera al terra es troba a 32,5 mm.

Per tant, seria interessant realitzar aquest mateix disseny tenint en compte la seva estructura interna ja que, al menys de cares a l'anàlisi estructural, s'obtindrien uns resultats més propers a la realitat.

6. RELACIÓ DE DOCUMENTS

DOCUMENT 1. MEMÒRIA I ANNEXOS

1. MEMÒRIA

2. ANNEXOS

A.- Fonaments d'aerodinàmica i mecànica de fluids

B.- Resultats de les simulacions en funció de l'angle d'atac

C.- Resultats de les simulacions en funció de la velocitat de desplaçament

D.- Resultats de les simulacions en funció de l'alçada respecte al terra

E.- Resultats de l'anàlisi estructural

DOCUMENT 2. PRESSUPOST

7. BIBLIOGRAFIA

Documents:

- [1] EuroFormula Open, *Manual d'Usuari Dallara F317* (Abril 2019).
- [2] EuroFormula Open, *Parts Catalogue 2019* (Abril 2019).
- [3] EuroFormula Open, *Technical Regulations advance & main tòpics* (Febrer 2019).
- [4] EuroFormula Open, *Reglament Tècnic, Annex 1* (Maig 2019).
- [5] Joseph Katz, *Aerodynamics of race cars, Annual Review of Fluid Mechanics* 38(1):27-63 (2006).
- [6] Toni Pujol Sagaro EPS, *Enginyeria Fluidomecànica Flux al voltant d'objectes* (2015).

Articles d'internet:

- [7] Propietats del material, <https://albrodpulf1.wordpress.com/2014/10/24/analisi-tecnico-fibra-de-carbono/> (Octubre 2014).
- [8] Parts d'un monoplaça, <https://www.motor.es/formula-1/el-diccionario-de-la-formula-1-las-partes-de-un-f1-y-los-neumaticos-201520437.html> (Març 2015).
- [9] Perfil alar NACA
<https://publicacionesfac.com/index.php/cienciaypoderaereo/article/view/4/106> (2013).

Adreces electròniques:

- [10] <http://www.euroformulaopen.net/en/> (Maig 2019).
- [11] <https://www.dallara.it/> (Juny 2019).
- [12] <http://airfoiltools.com/> (Juny 2019).
- [13] <http://www.valvias.com/prontuario-propiedades-materiales-densidad-gases.php> (Juliol 2019).
- [14] https://es.wikipedia.org/wiki/F%C3%B3rmula_3 (Agost 2019).

8. GLOSSARI

Aerodinàmica: Branca de la mecànica de fluids que estudia la interacció entre els cossos sòlids i els fluids a través dels quals es desplacen. En aquest cas els cossos sòlids són l'aleró i la roda, i el fluid a través del qual es mouen és l'aire.

Aleró: Element situat en la part davantera i posterior del vehicle destinats a interaccionar amb l'aire que circula al voltant del vehicle amb la finalitat de proporcionar càrrega aerodinàmica per tal de millorar les prestacions del monoplaça.

Àrea de referència: Àrea transversal si l'objecte és un vehicle, i àrea en planta si l'objecte és un ala.

Capa límit: Zona on el moviment del fluid és pertorbat degut a la presència d'un sòlid amb el que està en contacte. La capa límit senten com aquella zona on la velocitat del fluid respecte al sòlid en moviment varia des de 0 fins al 99% de la velocitat de la corrent no pertorbada.

Càrrega aerodinàmica: És la configuració aerodinàmica que dóna força contra l'asfalt per mantenir l'adherència del monoplaça. Quanta més càrrega aerodinàmica, més adherència però menys velocitat. És una força en direcció vertical descendent.

C_D : Coeficient de resistència a l'avanç que indica relativament la resistència que pateix un cos al moviment en la direcció d'aquest.

C_L : Coeficient de sustentació que indica la capacitat de crear una força en direcció perpendicular a la de la velocitat de desplaçament. En el món de la competició com és l'EuroFormula Open interessa que aquesta força tingui una direcció vertical cap avall, i se li denomina com a càrrega aerodinàmica.

Corda: Distància entre el caire d'atac i el caire de sortida o de fuga d'un ala.

Downforce: Força de sustentació negativa.

Drag: Força de resistència a l'avanç.

Efecte terra: Fenomen aerodinàmic que succeeix quan un cos, amb una diferència de pressions entre la zona superior i la zona inferior, està molt a prop del terra, cosa que provoca unes alteracions en el flux d'aire les quals s'aprofita, entre altre coses, per generar càrrega aerodinàmica.

Força de resistència a l'avanç: Força generada sobre un cos que es desplaça a través d'un fluid, de direcció paral·lela a la de la velocitat del corrent incident.

Força de sustentació: Força generada sobre un cos que es desplaça a través d'un fluid, de direcció perpendicular a la de la velocitat del corrent incident.

Pit Lane: Carrer de boxes.

Pole Position: Participant que comença la cursa des de la primera plaça de la graella de sortida.

Túnel de vent: Eina utilitzada per ajudar a estudiar el comportament de l'aire en moviment al voltant d'un cos.

ANNEX A: FONAMENTS D'AERODINÀMICA I MECÀNICA DE FLUIDS

A.- FONAMENTS D'AERODINÀMICA I MECÀNICA DE FLUIDS

A.1 Introducció

En aquest annex s'explicarà els conceptes i principis bàsics d'aerodinàmica i de mecànica de fluids que s'han aplicat durant la realització del treball.

A.2 Equació de continuïtat

És un principi fonamental en la mecànica de fluids en el qual s'estableix que la massa ni es crea ni es destrueix, i per tant, aquesta s'ha de conservar. Aquesta equació l'aplicarem a fluids incompressibles i quan no hi ha pèrdues ni aportacions de fluid, flux estacionari:

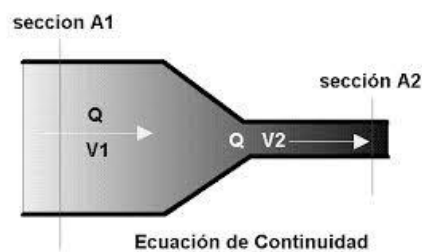


Figura A1. Sistema fluid, volum de control.

$$\rho_1 \cdot A_1 \cdot v_1 = \rho_2 \cdot A_2 \cdot v_2 \quad (\text{Eq. A.1})$$

On ρ = densitat (kg/m^3), v = velocitat (m/s), A = secció de pas (m^2), 1 i 2 són dos punts en una mateixa línia de corrent.

A.3 Equació de Bernoulli

L'equació de Bernoulli relaciona la pressió, l'energia potencial i la velocitat d'un flux constant no viscos en un fluid incompressible. Per a una mateixa alçada, com és en el nostre cas, a mesura que la pressió decreix, la velocitat del fluid augmenta:

$$p + \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 = \text{constant} \quad (\text{Eq. A.2})$$

On p = pressió absoluta (Pa), ρ = densitat (kg/m^3), v = velocitat (m/s).

A.4 Capa límit

Zona on el moviment del fluid és pertorbat degut a la presència d'un sòlid amb el que està en contacte. La capa límit senten com aquella zona on la velocitat del fluid respecte al sòlid en moviment varia des de 0 fins al 99% de la velocitat de la corrent no pertorbada. Les partícules d'aire que es desplacen per la capa límit primer ho fan de manera laminar, paral·leles entre elles,

mentre que més endavant la seva trajectòria es torna més caòtica, convertint-se en un flux turbulent, augmentant així el gruix de la capa límit.

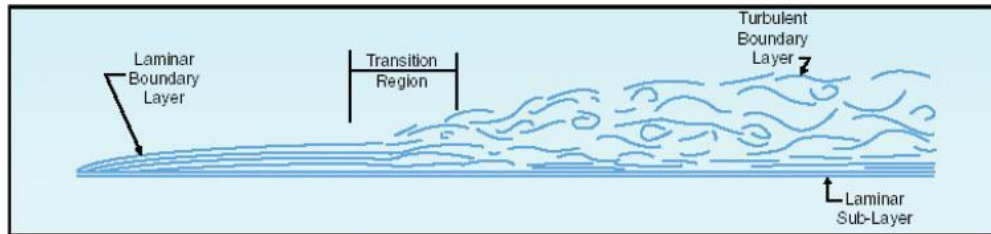


Figura A2. Capa límit laminar i turbulenta.

En el nostre cas, quan l'aire entra en contacte amb el flap mòbil de l'aleró, depenent de l'angle d'incidència d'aquest, el flux laminar pot anar perdent velocitat al llarg de la capa límit fins arribar a un cert punt on el fluid no pot vèncer la pressió adversa que pateix arribant fins i tot a retrocedir. Aquest fet es coneix com desprendiment de la capa límit, i provoca que el flux d'aire deixi d'estar en contacte amb els elements aerodinàmics.

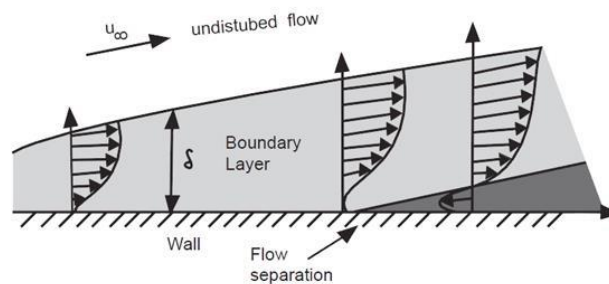


Figura A3. Desprendiment de la capa límit.

A.5 Perfil alar

S'entén com perfil alar la geometria de la secció transversal d'un ala.



Figura A4. Perfil alar típic d'un aleró de competició com l'EuroFormula Open i la Fórmula 1, entre d'altres.

- Caire d'atac: És la part frontal de l'ala.
- Caire de sortida o de fuga: És la part posterior de l'ala, afilada i estreta.
- Extradós: Curvatura superior que va des del caire d'atac fins el caire de sortida.
- Intradós: Curvatura inferior que va des del caire d'atac fins el caire de sortida.
- Gruix: Distància màxima entre l'extradós i l'intradós.
- Corda: És la línia recta que uneix el caire d'atac amb el caire de sortida.
- Curvatura mitja: És la línia equidistant entre l'extradós i l'intradós.

A.6 Angle d'atac

És l'angle que hi ha entre la direcció del flux i la corda del perfil alar. Aquest angle pot ser positiu, negatiu o neutre.

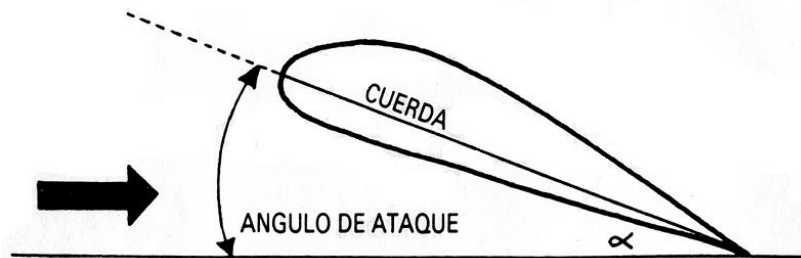


Figura A5. Representació d'un perfil alar amb angle d'atac positiu.

Depenent de l'angle d'atac que adopti l'aleró, s'obindrà més o menys sustentació o càrrega aerodinàmica. Quant més angle d'atac més sustentació, però tenint en compte que hi ha un angle d'atac màxim ja que passat aquest angle la capa d'aire es desprèn i el perfil entra en pèrdues, i aquest deixa d'estar en sustentació.

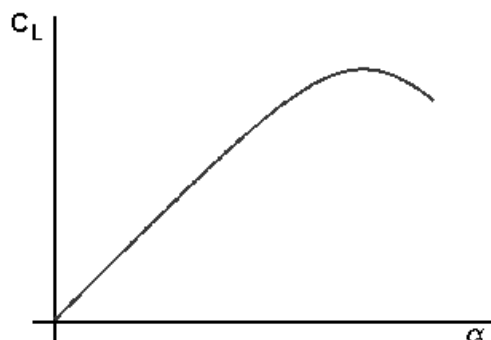


Figura A6. Gràfica del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac.

A.7 Efecte terra

Com s'ha explicat anteriorment, el fet que un fluid, recorri el perfil alar per la part superior o per la part inferior d'aquest, provoca que la velocitat d'aquest fluid sigui diferent, i tal com s'ha explicat en l'equació de Bernoulli, la pressió també serà diferent.

En el nostre cas, si l'aire vol passar per la part inferior del perfil alar, i aquesta té una secció menor respecte la superior, com que el flux d'aire ha de ser constant i és igual a la velocitat multiplicada per la secció, al ser aquesta menor la velocitat ha de ser major. Això fa que es generi una zona de baixa pressió sota l'aleró degut a l'alta velocitat de l'aire en aquesta zona, i per tant, això provoca una força de sustentació en sentit descendent degut a que la pressió en la part superior del perfil alar és més gran que en la part inferior.

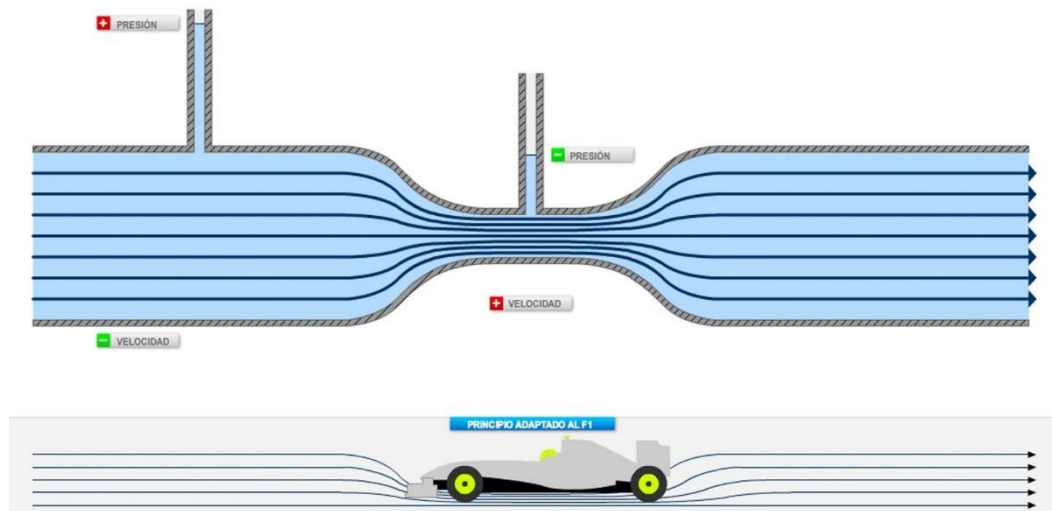


Figura A7. Representació esquemàtica de l'efecte terra aplicat com efecte venturi.

De cares al desenvolupament del disseny dels cotxes de competició, gràcies al valor del quocient entre alçada i longitud de la corda de l'ala principal, s'ha d'escollir, a través de la representació gràfica, aquells valors dels dos coeficients aerodinàmics que es situïn entre 0,1 – 0,3 del valor del quocient. A més a més, et determina l'alçada òptima de l'aleró respecte al terra.

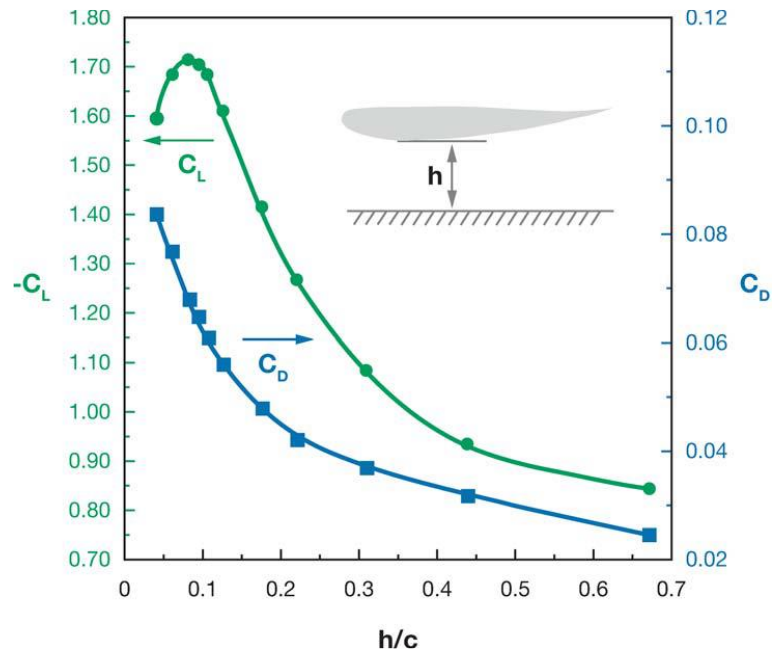


Figura A8. Gràfica de C_L i C_D en funció del quocient entre alçada i longitud de la corda.

A.8 Perfil alar NACA de 4 dígit

NACA (National Advisory Committee for Aeronautics), és una institució estatunidenca precursora pel desenvolupament racional de perfils alars. NACA va decidir generar la nomenclatura per a la primera família de perfils alars, en aquest cas, com la família de perfils de 4 dígit.

D'acord amb la definició NACA, i agafant el nostre perfil (2408) com a exemple i agafant el caire d'atac com a referència, el primer dígit representa l'ordenada màxima de la línia de la curvatura mitja en percentatge de la corda. Si per exemple la longitud de la corda fa 300 mm, l'ordenada màxima de la curvatura mitja serà de 6 mm. El segon dígit representa la posició on es situa l'ordenada màxima del perfil en percentatge o dècimes de la corda. En el nostre cas es situa a 120 mm. Els dos últims dígit representen el gruix màxim en percentatge de la corda. En el nostre cas, el gruix màxim del perfil alar és de 24 mm. També cal destacar que el gruix màxim d'un perfil alar de 4 dígit es situa per defecte al 30% de la corda, i per tant, en el nostre cas, es situa a 90 mm respecte el caire d'atac.

A.9 Coeficients aerodinàmics

Coeficient C_L :

Número adimensional que ens indica la capacitat que té un ala alhora de generar sustentació, és a dir C_L positiva en el cas dels avions, o càrrega aerodinàmica, és a dir C_L negativa en el cas dels cotxes.

$$C_L = 2 \cdot L / \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (\text{Eq. A.3})$$

On: L = Lift (Força de sustentació o càrrega aerodinàmica), ρ = densitat de l'aire, v = velocitat, A = Àrea de referència.

L'àrea de referència en el cas d'un cotxe correspon a l'àrea frontal, en canvi en el cas d'un ala es calcula segons l'equació A.4:

$$A = C \cdot L \quad (\text{Eq. A.4})$$

On: C = corda alar, L = longitud alar.

En el cas d'un aleró l'àrea de referència és l'àrea que es projecta en vista en planta.

Coeficient C_D :

Número adimensional que ens indica la resistència a l'avanç que genera un objecte.

$$C_D = 2 \cdot D / \rho \cdot v^2 \cdot A \quad (\text{Eq. A.5})$$

On: D = Força d'arrossegament o de resistència generada, ρ = densitat de l'aire, v = velocitat, A = Àrea de referència.

A.10 Eficiència aerodinàmica

L'objectiu en el món de la competició és maximitzar la càrrega aerodinàmica minimitzant la resistència a l'avanç. Això s'aconsegueix mitjançant diferents apèndixs aerodinàmics. Per determinar el rendiment d'aquests s'ha definit l'eficiència aerodinàmica, també anomenada com finesa.

$$f = |C_L| / C_D \quad (\text{Eq. A.6})$$

Com més gran és aquest coeficient adimensional més eficient és l'apèndix aerodinàmic estudiat.

ANNEX B: RESULTATS DE LES SIMULACIONS EN FUNCIO DE L'ANGLE D'ATAC

B.- RESULTATS DE LES SIMULACIONS EN FUNCIÓ DE L'ANGLE D'ATAC

B.1 Introducció

Aquest annex conté la resta de figures dels resultats de les simulacions fetes relacionada amb l'estudi dels coeficients aerodinàmics en funció de l'angle d'atac del flap mòbil, tal i com s'explica detalladament en l'apartat 3.3.1 *Simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil*, i posteriorment els resultats en l'apartat 4.2 *Resultats de la simulació en funció de l'angle d'atac del flap mòbil*. En les figures de contorn de velocitat, es podrà observar com, a partir d'un cert angle d'incidència del flap mòbil, la capa límit d'aquest perfil es va desprendre.

B.2 Resultats de les simulacions

Angle d'atac de 4°:

$C_L = -0,274$.

$C_D = 0,0511$.

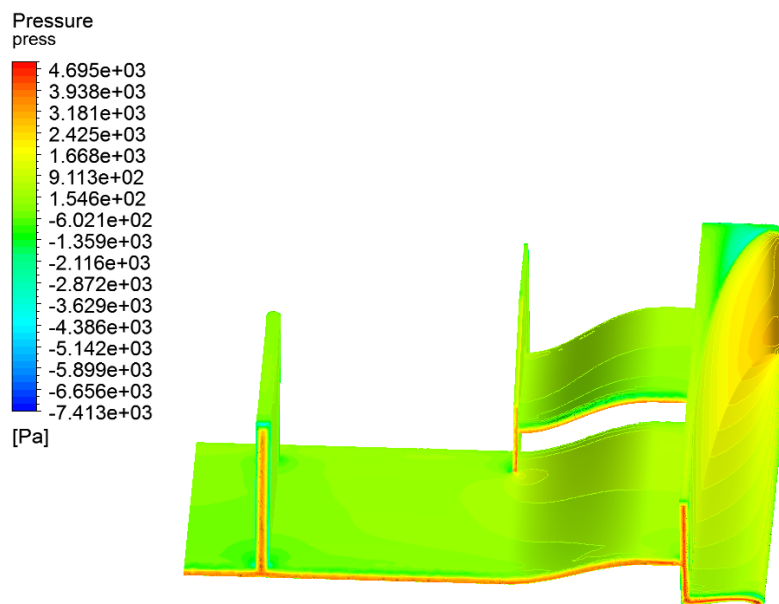


Figura B1. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 4°.

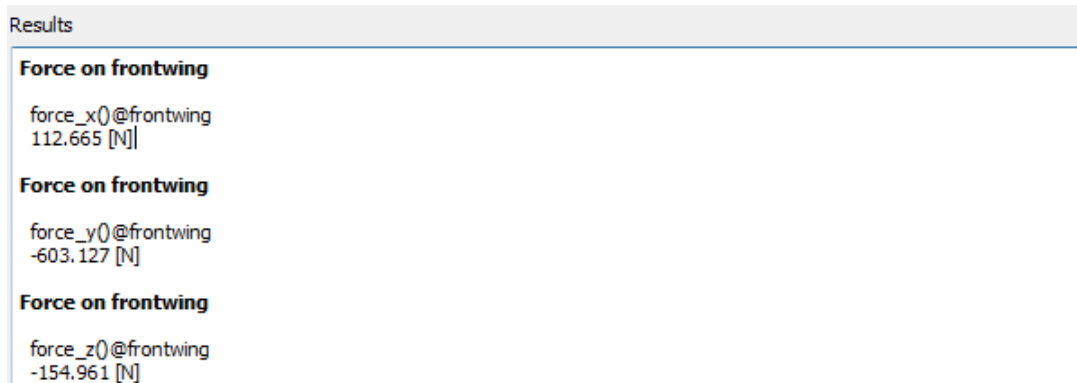


Figura B2. Components de les forces obtingudes.

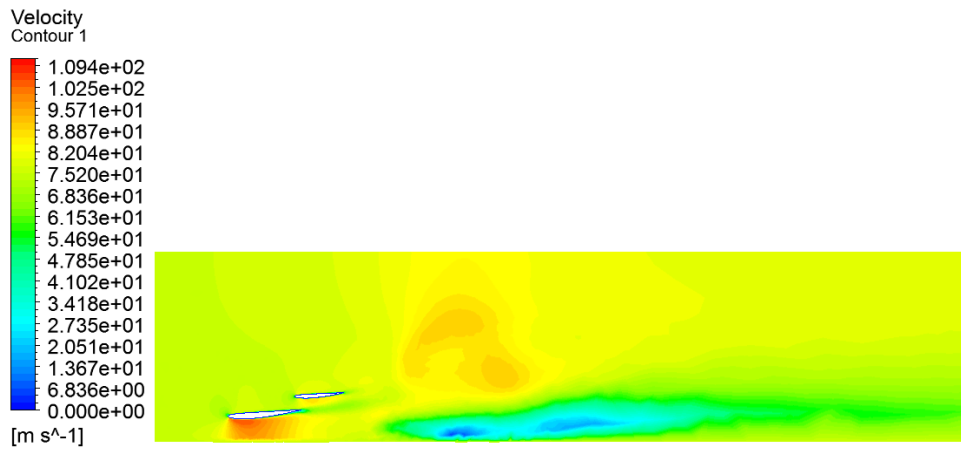


Figura B3. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 5°:

$C_L = -0,278$.

$C_D = 0,0526$.

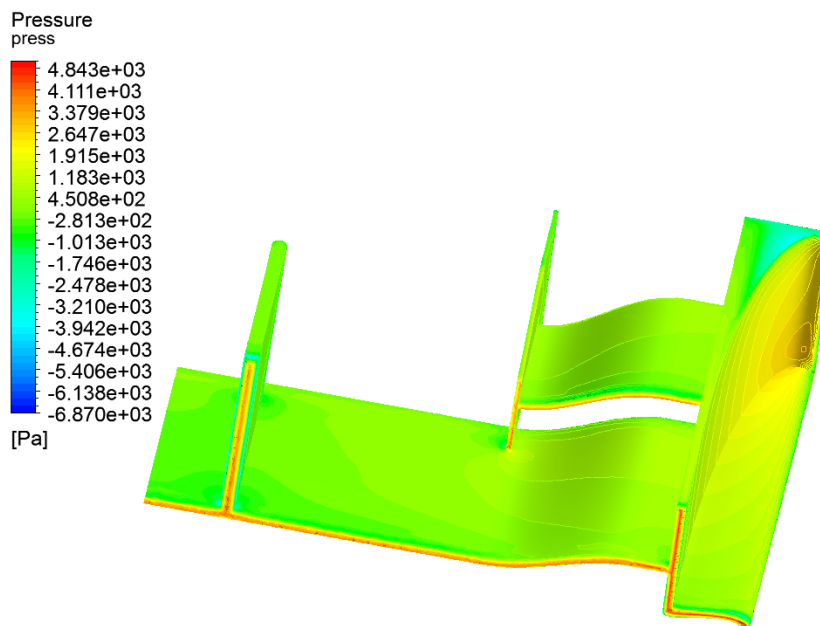


Figura B4. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 5°.

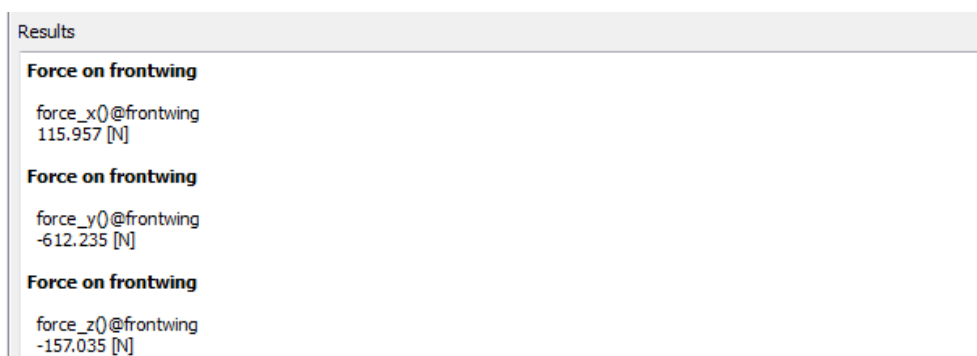


Figura B5. Components de les forces obtingudes.

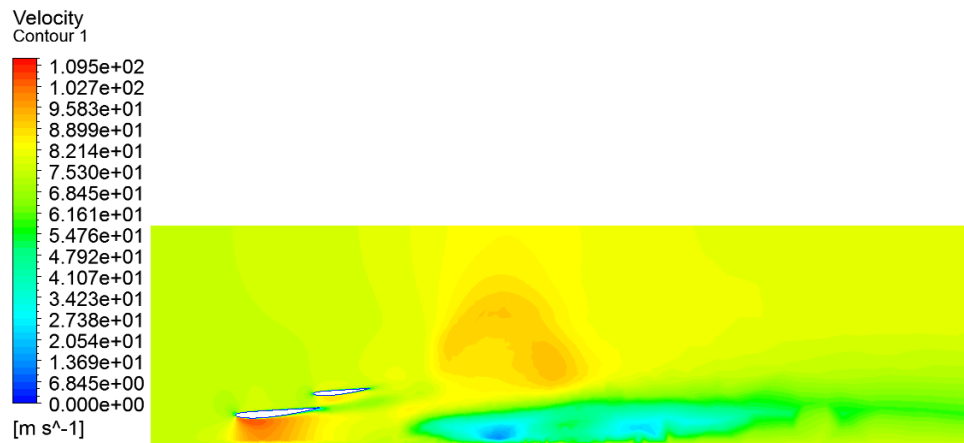


Figura B6. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 6°:

$C_L = -0,285$.

$C_D = 0,0530$.

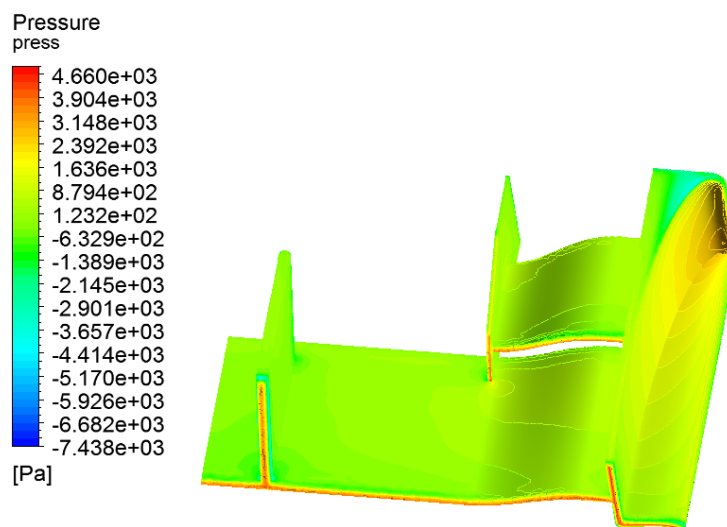


Figura B7. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 6°.

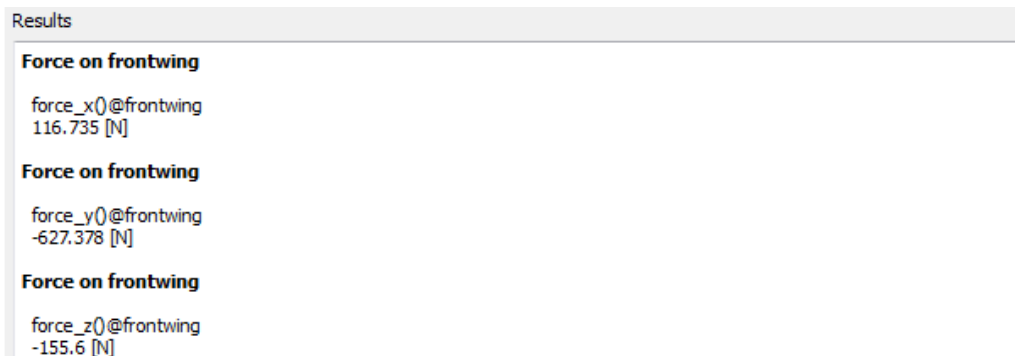


Figura B8. Components de les forces obtingudes.

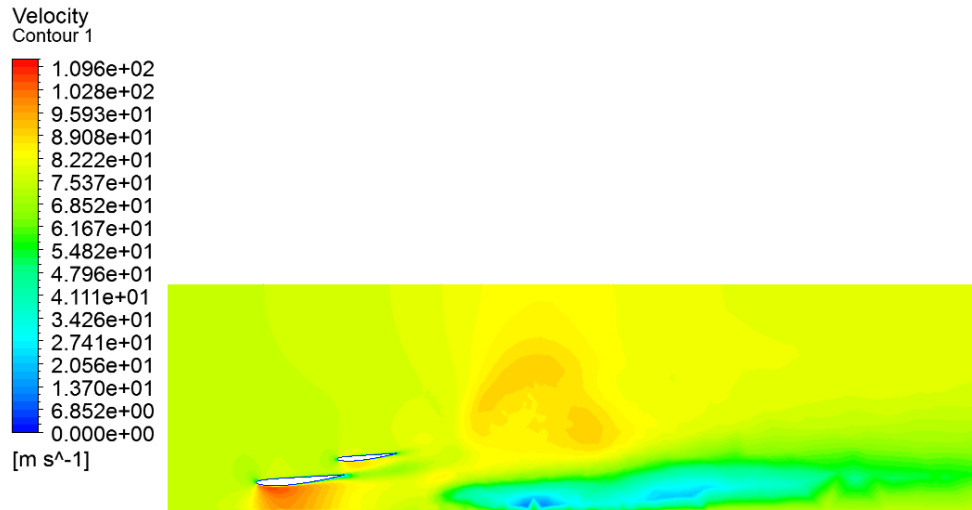


Figura B9. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 7°:

$C_L = -0,293$.

$C_D = 0,0555$.

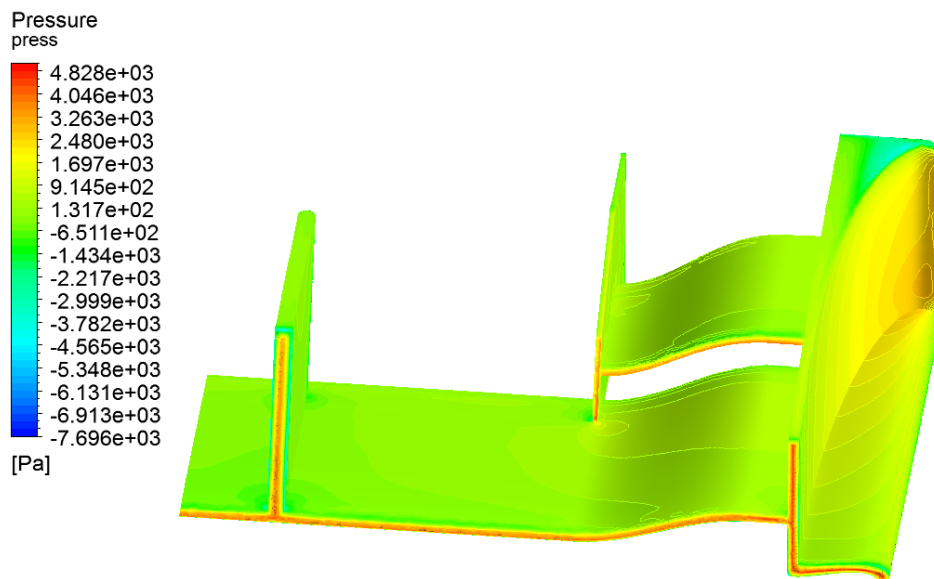


Figura B10. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 7°.

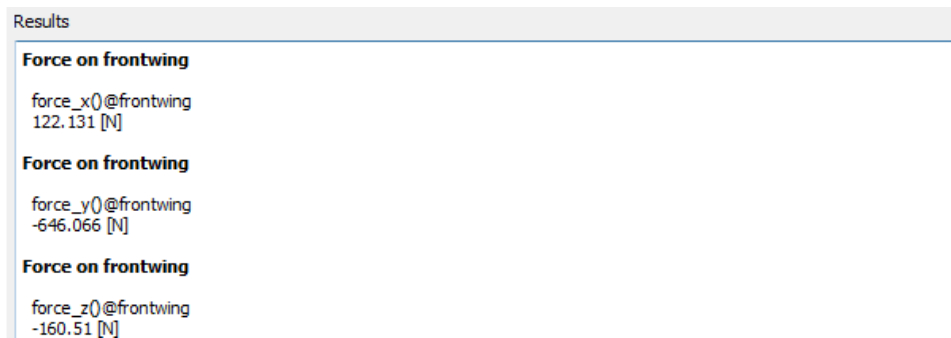


Figura B11. Components de les forces obtingudes.

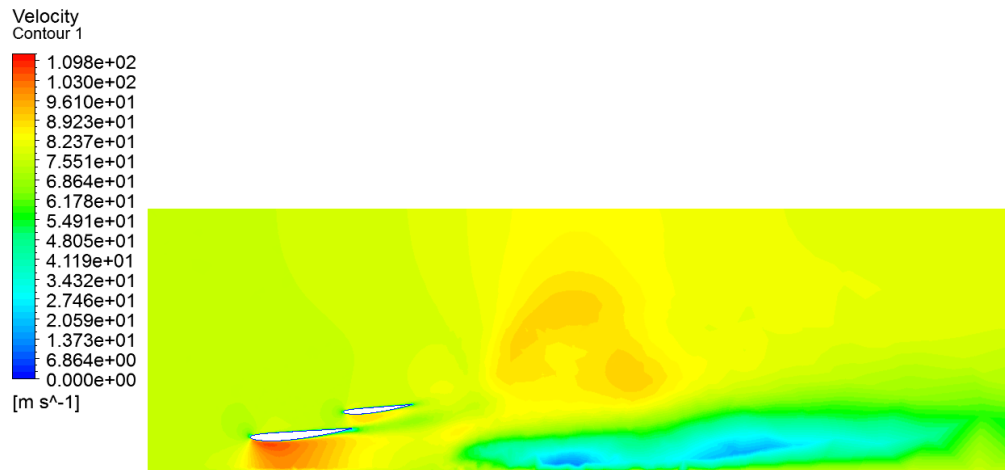


Figura B12. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 8°:

$C_L = -0,304$.

$C_D = 0,0575$.

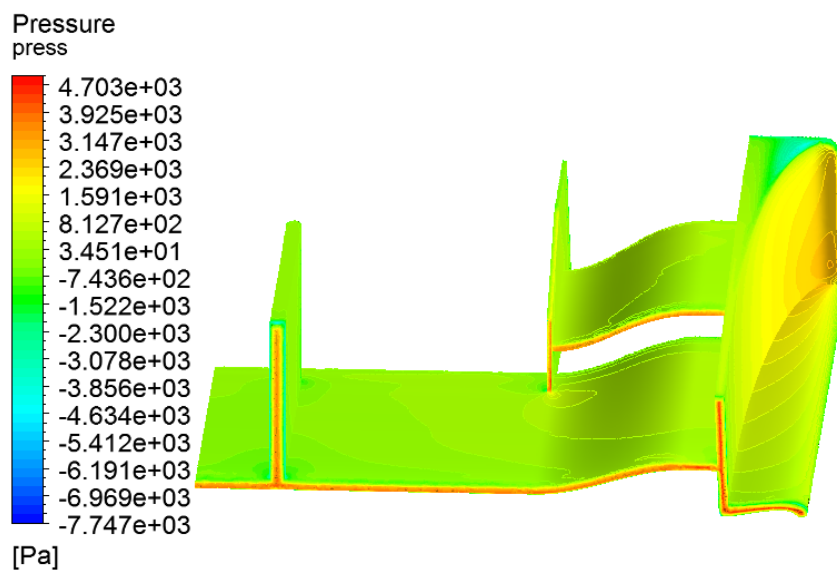


Figura B13. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 8°.

Results	
Force on frontwing	
force_x()@frontwing	126.591 [N]
Force on frontwing	
force_y()@frontwing	-668.699 [N]
Force on frontwing	
force_z()@frontwing	-163.476 [N]

Figura B14. Components de les forces obtingudes.

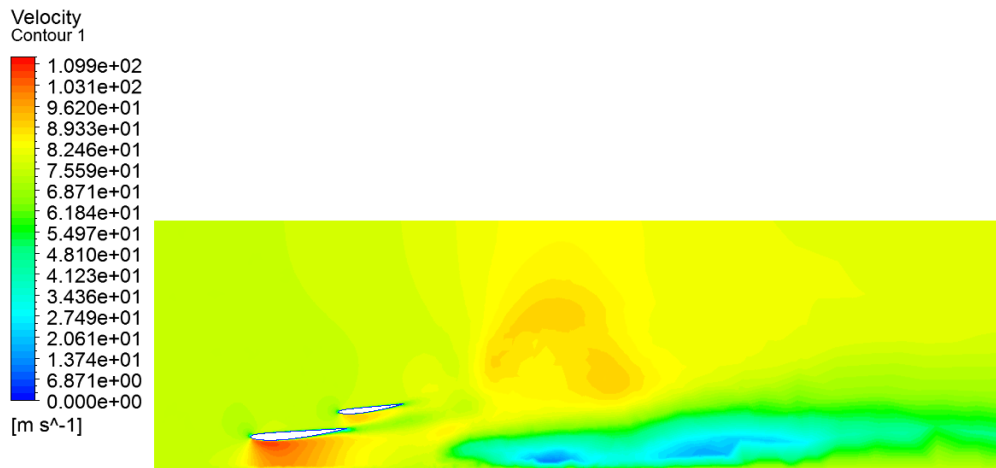


Figura B15. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 9°:

$C_L = -0,314$.

$C_D = 0,0588$.

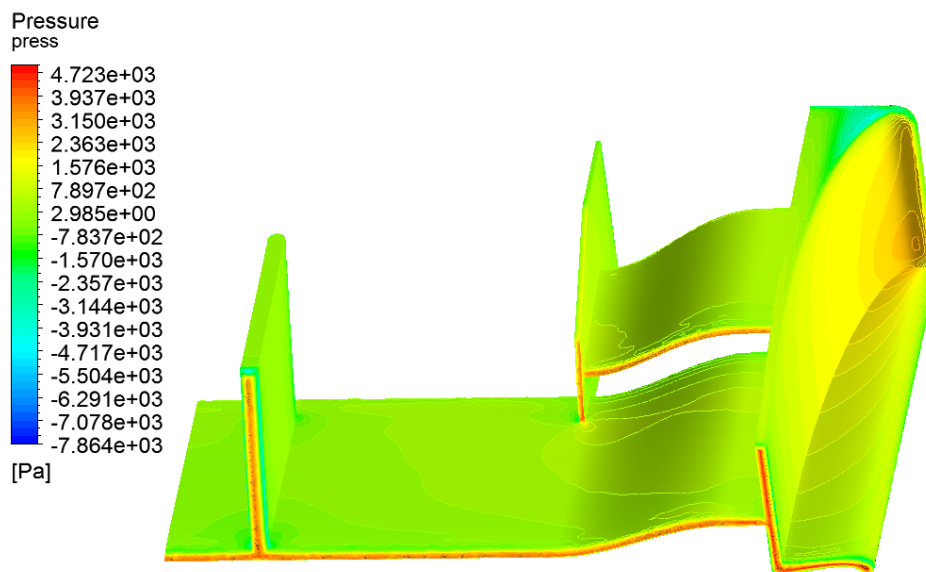


Figura B16. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 9°.

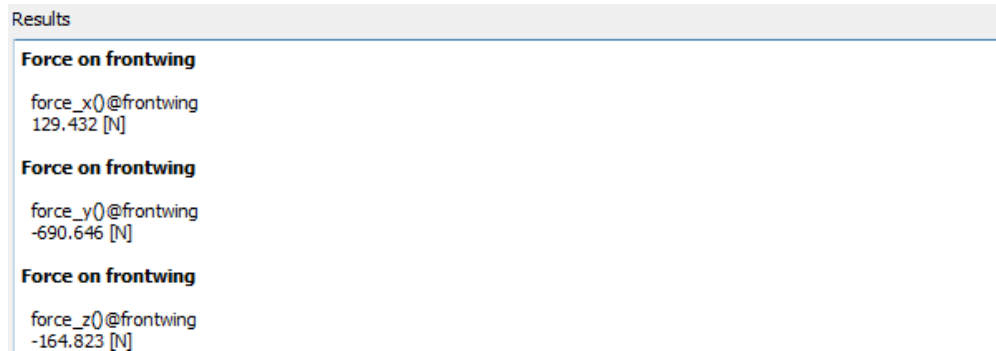


Figura B17. Components de les forces obtingudes.

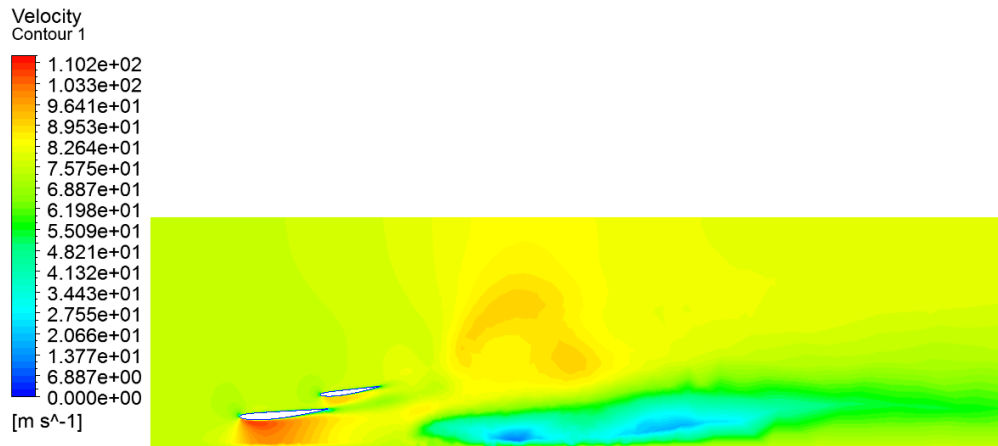


Figura B18. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 10°:

$C_L = -0,326$.

$C_D = 0,0608$.

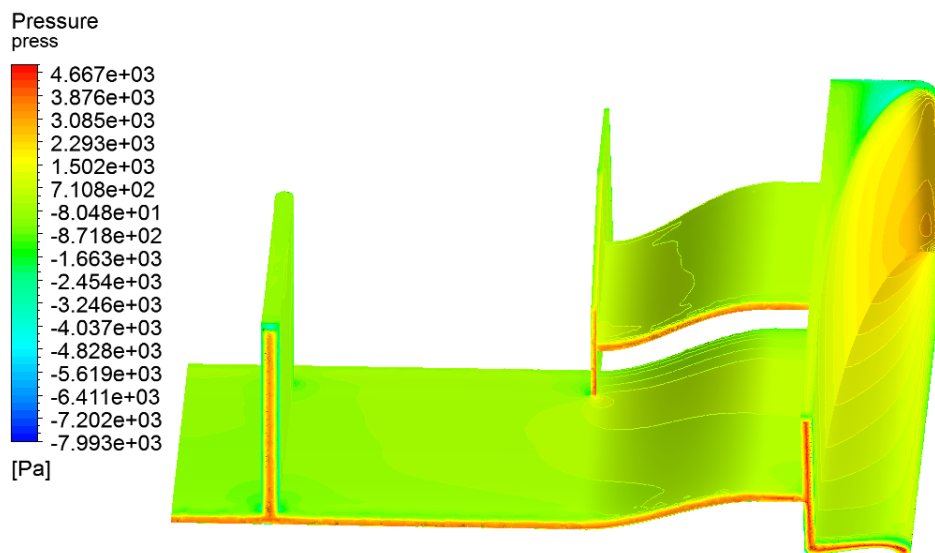


Figura B19. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 10°.

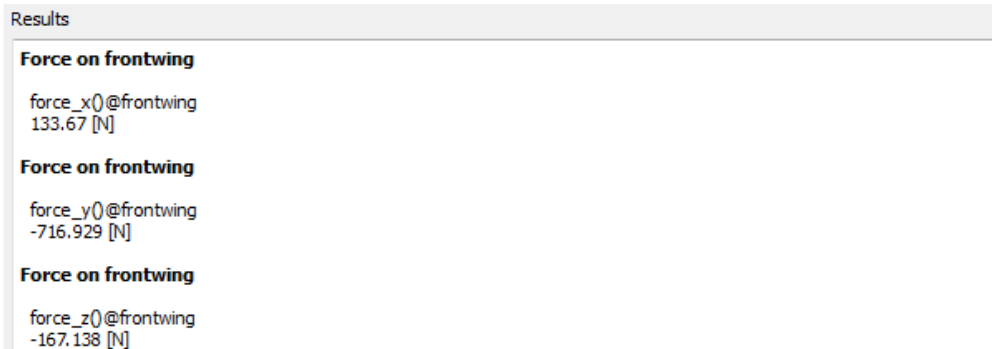


Figura B20. Components de les forces obtingudes.

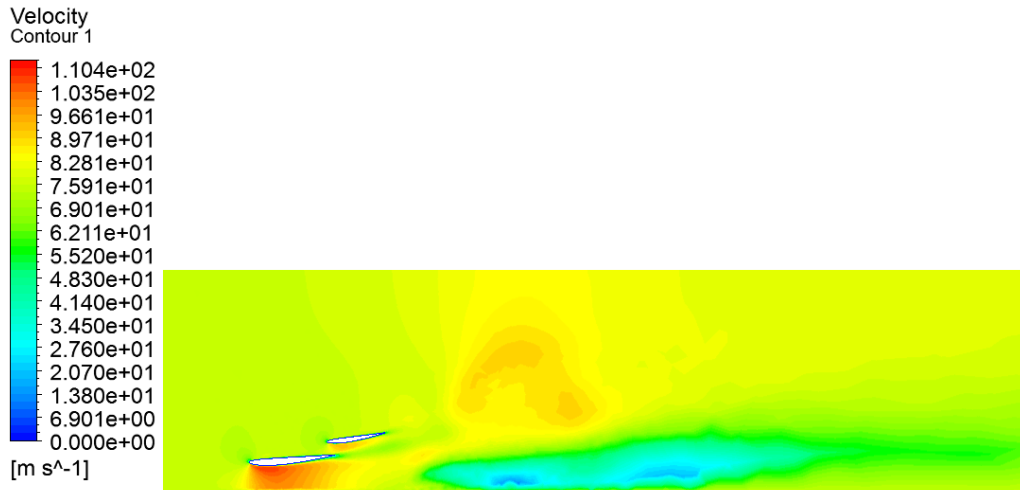


Figura B21. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 11°:

$C_L = -0,337$.

$C_D = 0,0629$.

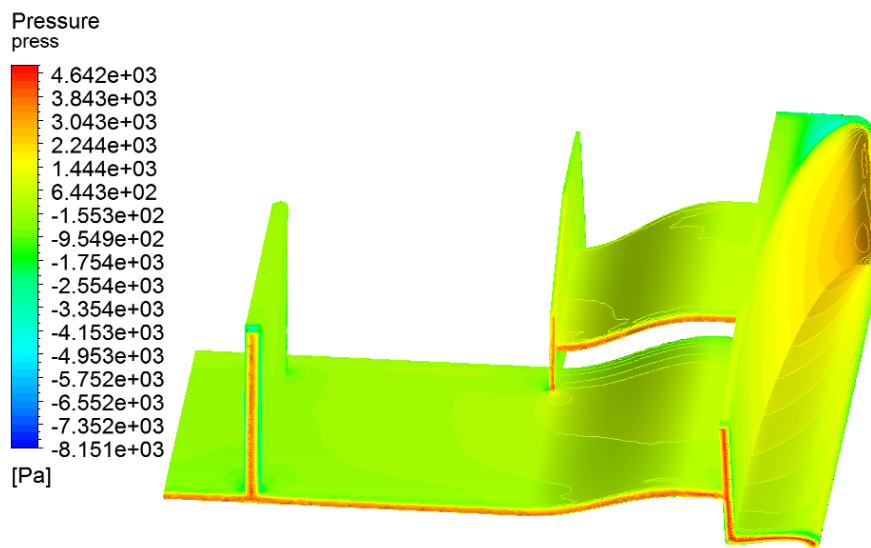


Figura B22. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 11°.

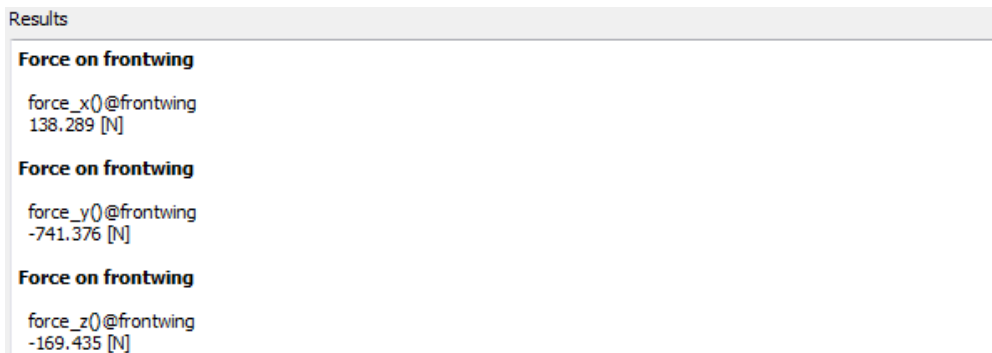


Figura B23. Components de les forces obtingudes.

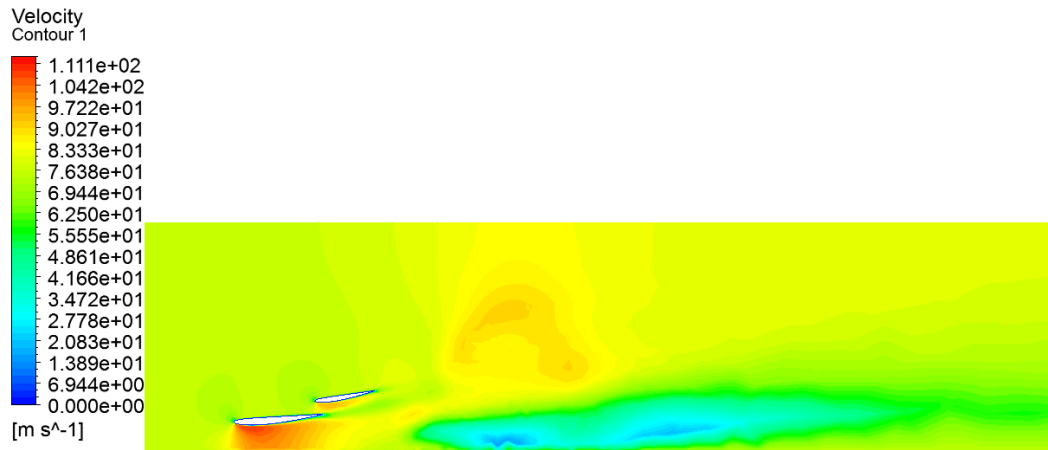


Figura B24. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 12°:

$C_L = -0,349.$

$C_D = 0,0658.$

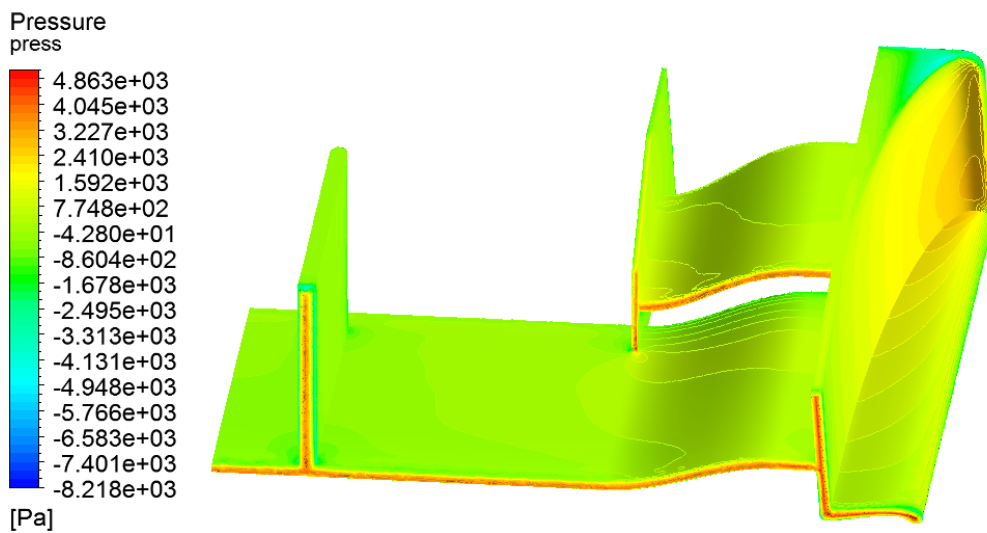


Figura B25. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 12°.

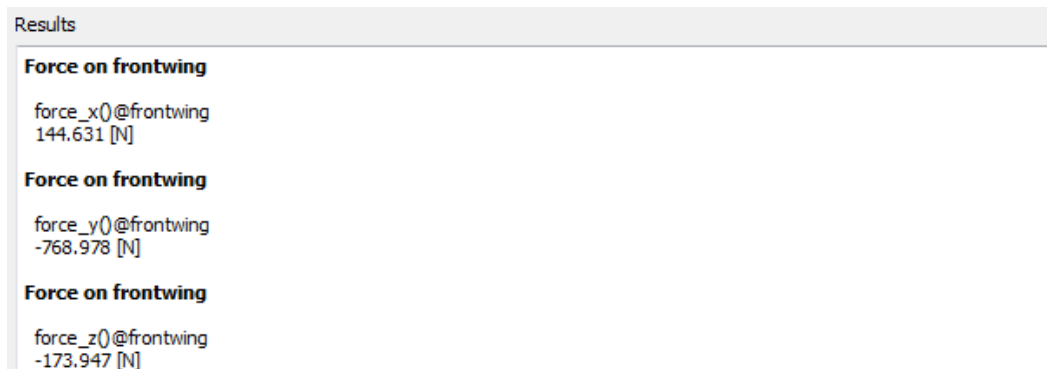


Figura B26. Components de les forces obtingudes.

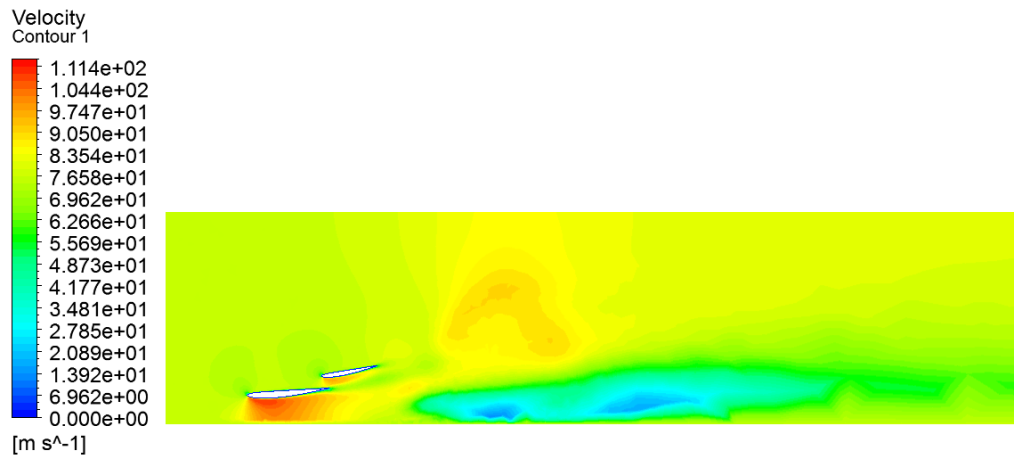


Figura B27. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 13°:

$C_L = -0,364$.

$C_D = 0,0690$.

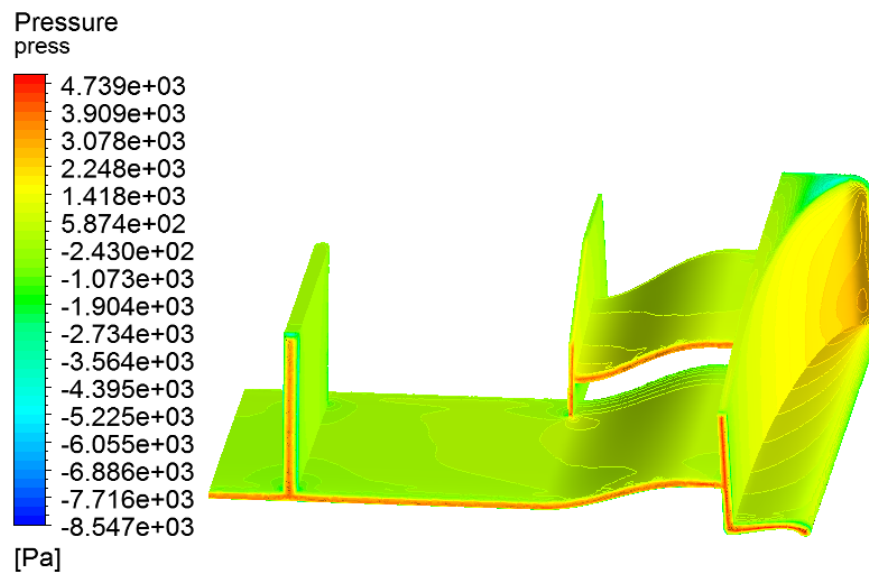


Figura B28. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 13°.

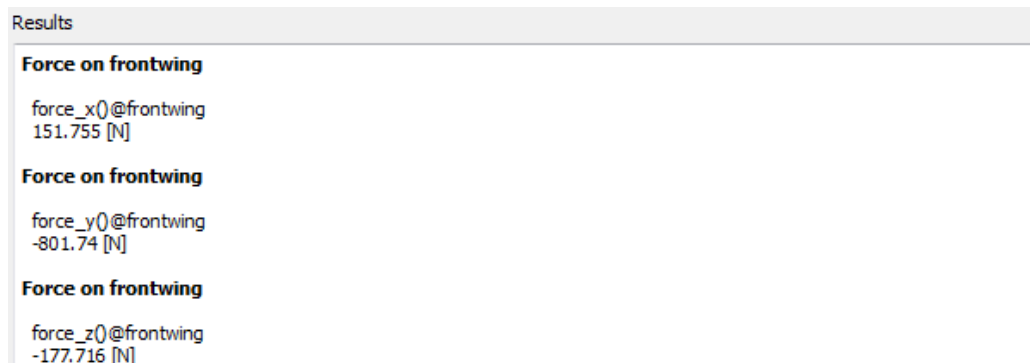


Figura B29. Components de les forces obtingudes.

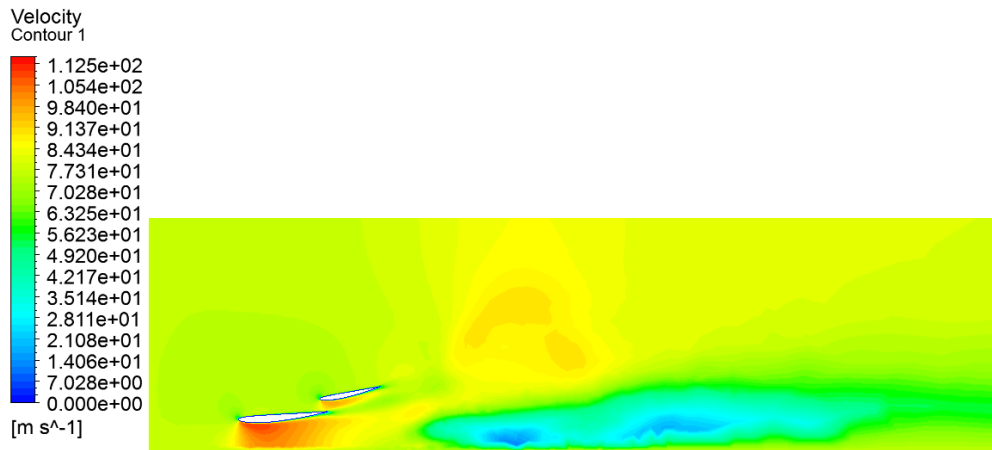


Figura B30. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 14°:

$C_L = -0,374$.

$C_D = 0,0706$.

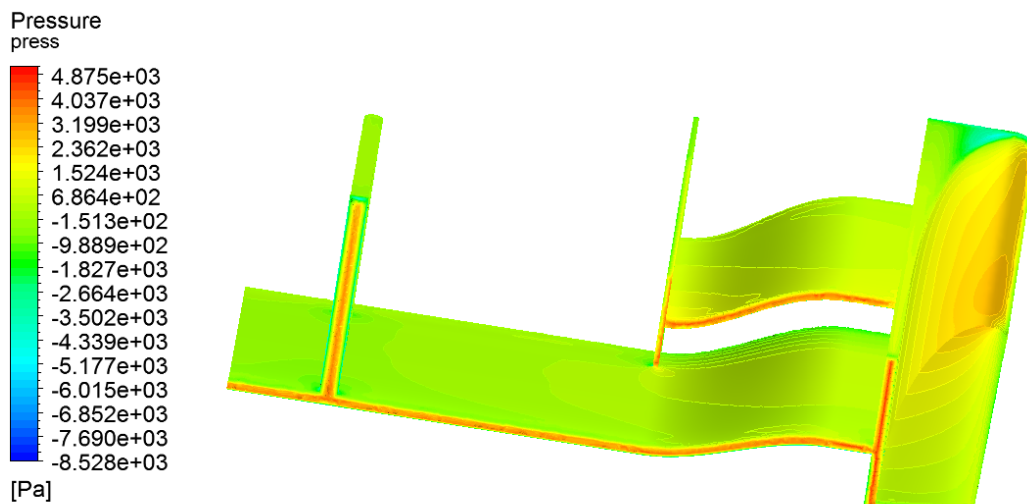


Figura B31. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 14°.

Results	
Force on frontwing	
force_x()@frontwing	155.285 [N]
Force on frontwing	
force_y()@frontwing	-823.702 [N]
Force on frontwing	
force_z()@frontwing	-179.86 [N]

Figura B32. Components de les forces obtingudes.

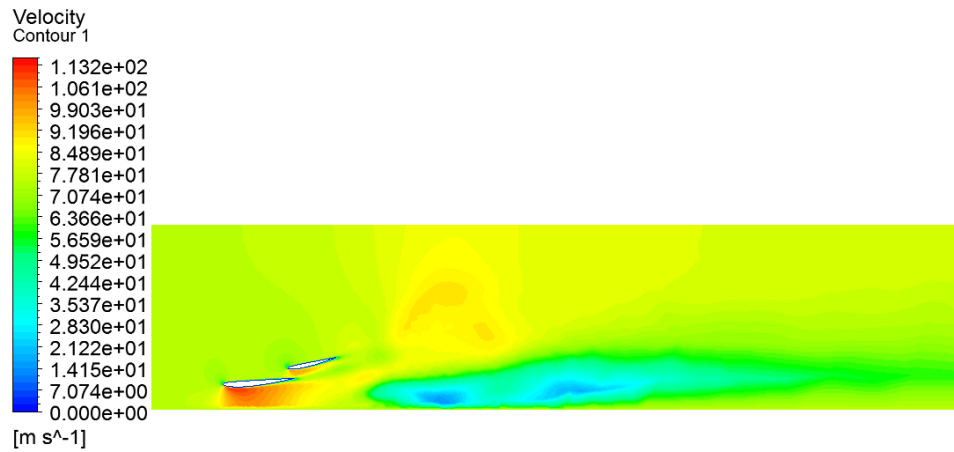


Figura B33. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 15°:

$C_L = -0,388$.

$C_D = 0,0731$.

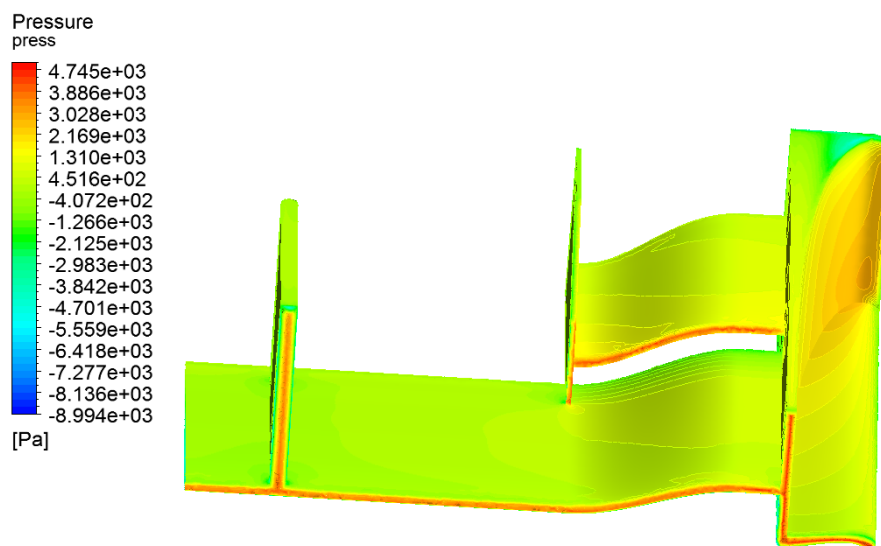


Figura B34. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 15°.

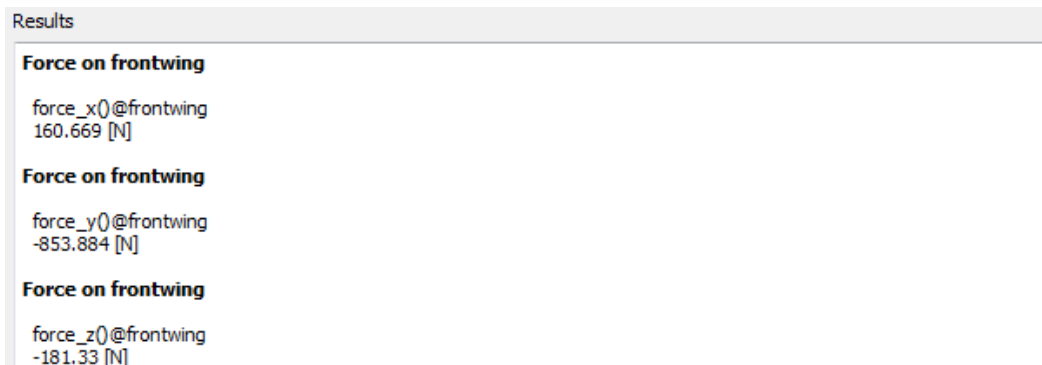


Figura B35. Components de les forces obtingudes.

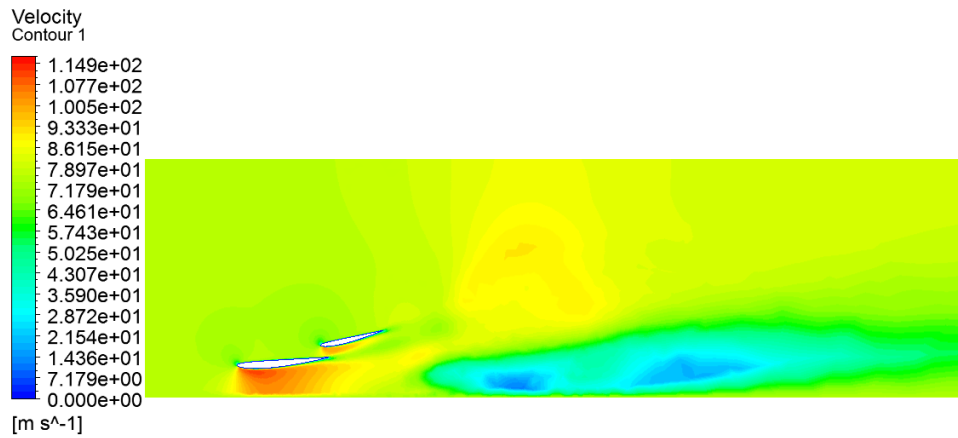


Figura B36. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 16°:

$C_L = -0,402$.

$C_D = 0,0757$.

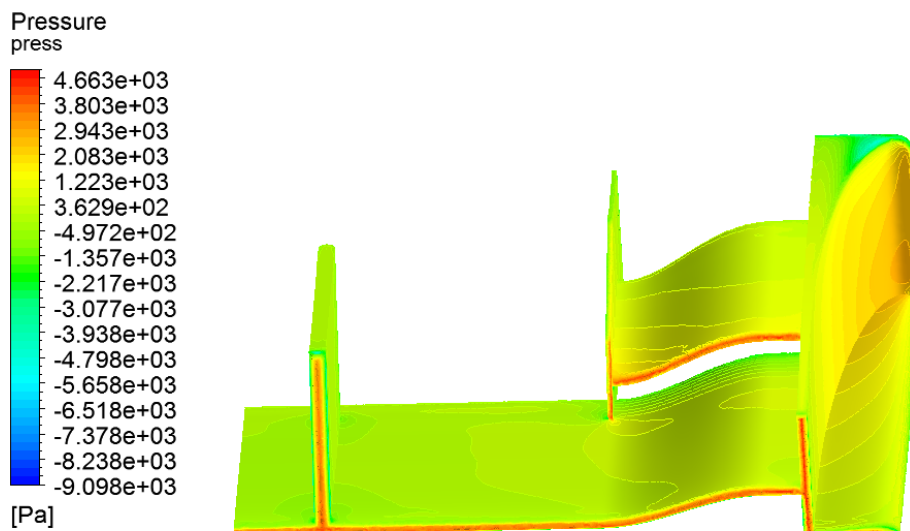


Figura B37. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 16°.

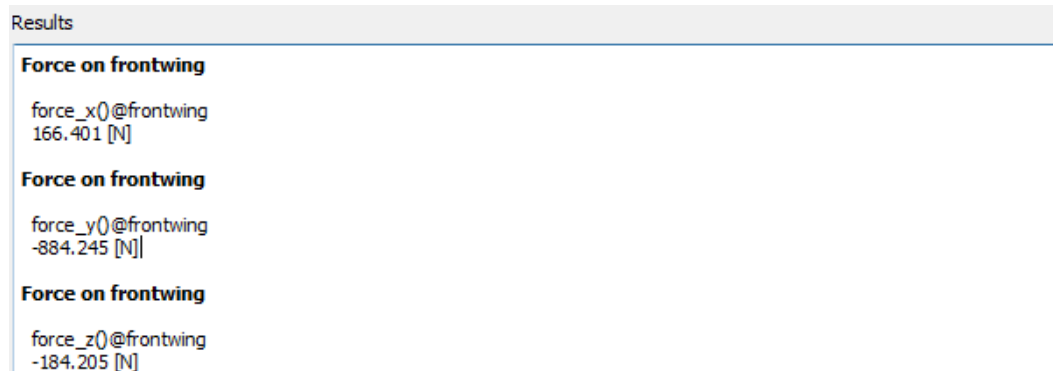


Figura B38. Components de les forces obtingudes.

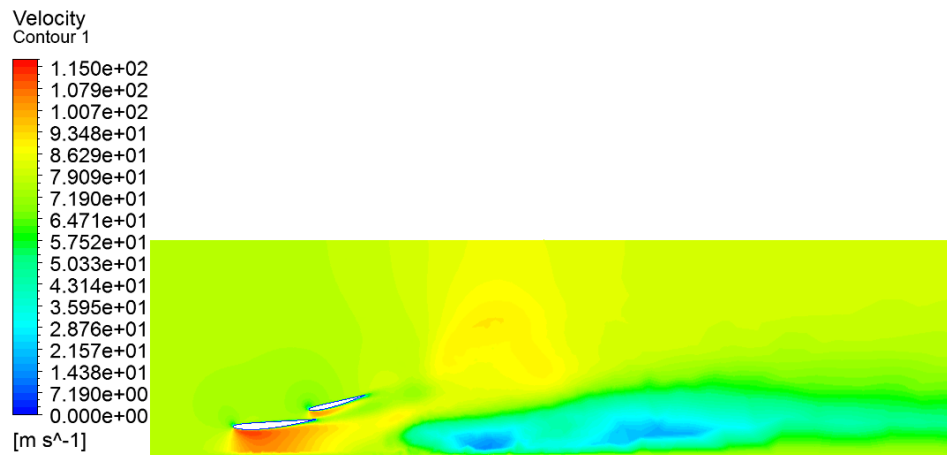


Figura B39. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 17°:

$C_L = -0,417$.

$C_D = 0,0781$.

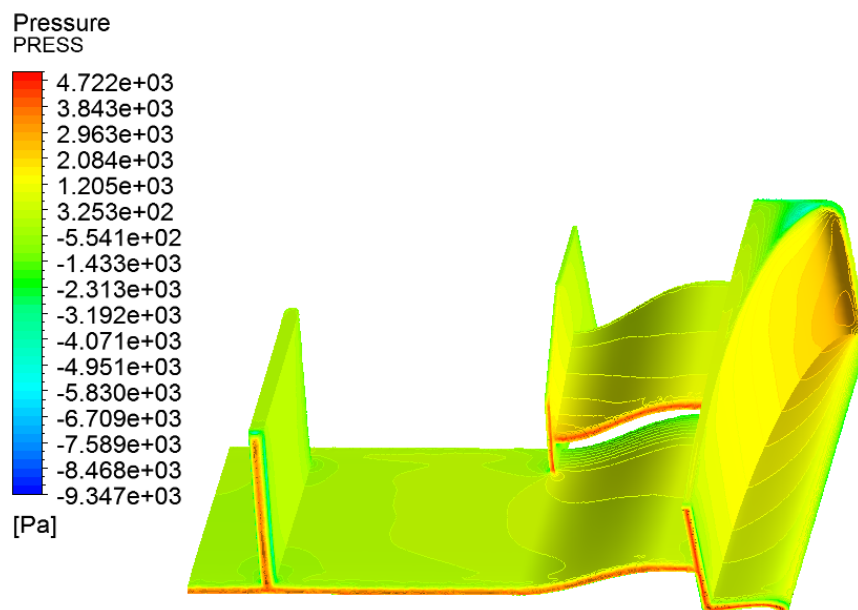


Figura B40. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 17°.

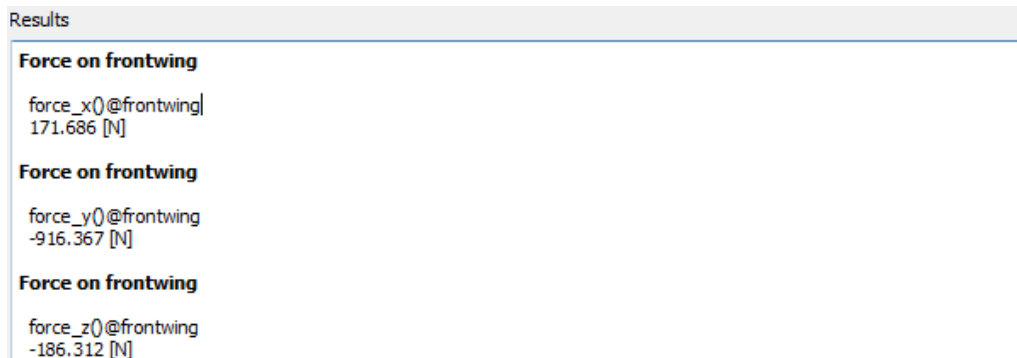


Figura B41. Components de les forces obtingudes.

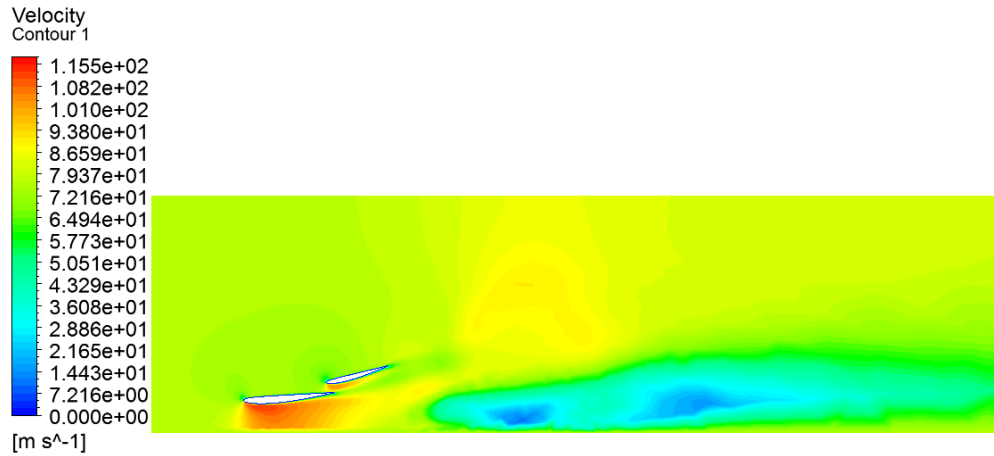


Figura B42. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 18°:

$C_L = -0,430$.

$C_D = 0,0813$.

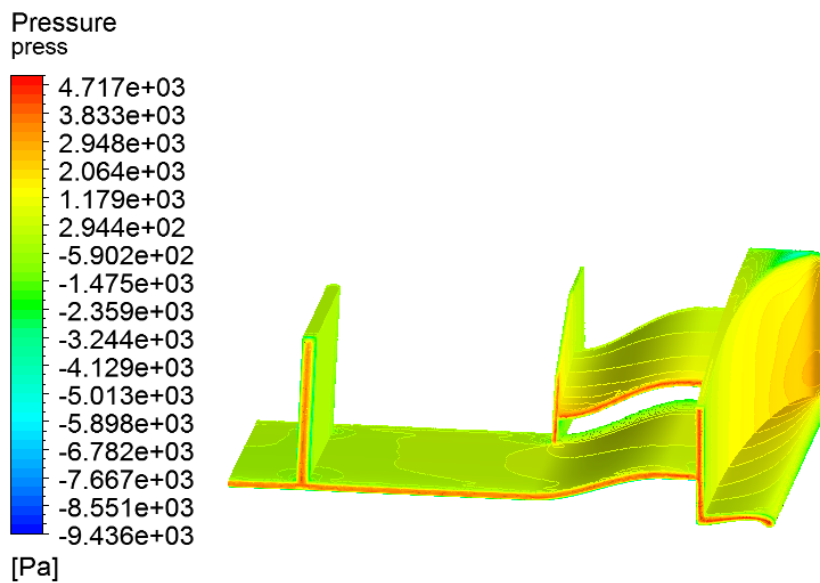


Figura B43. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 18°.

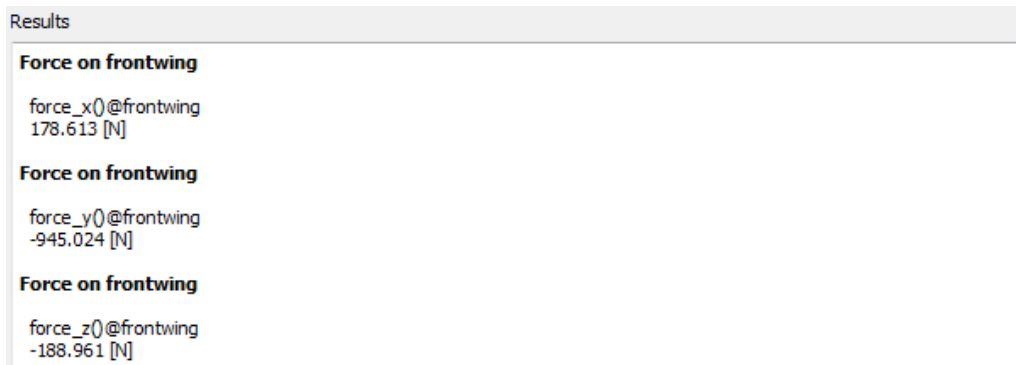


Figura B44. Components de les forces obtingudes.

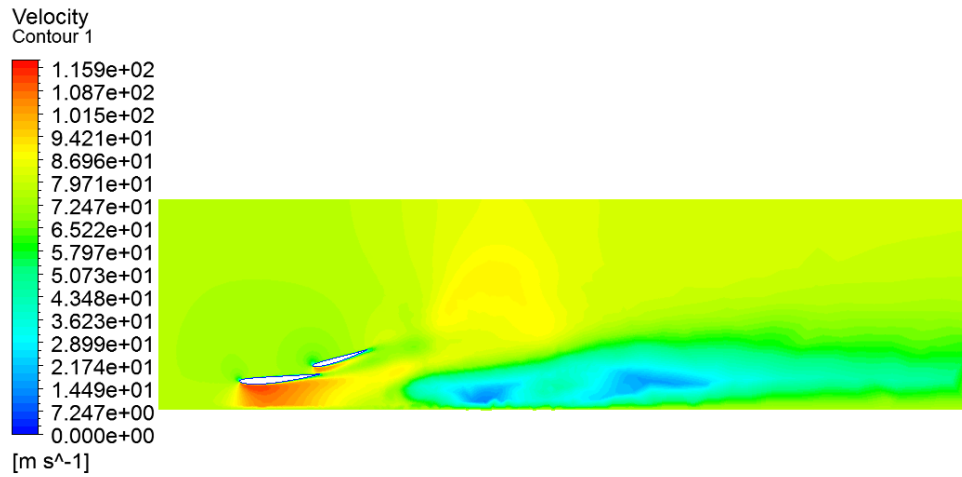


Figura B45. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 19°:

$C_L = -0,443$.

$C_D = 0,0841$.

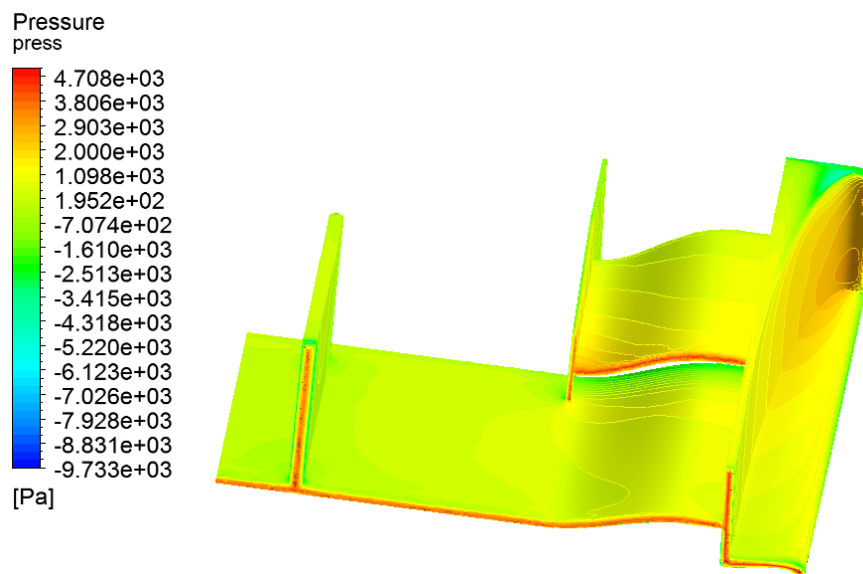


Figura B46. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 19°.

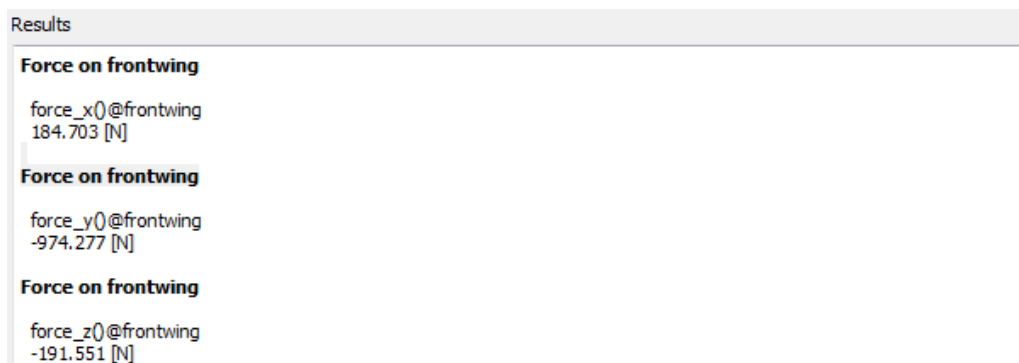


Figura B47. Components de les forces obtingudes.

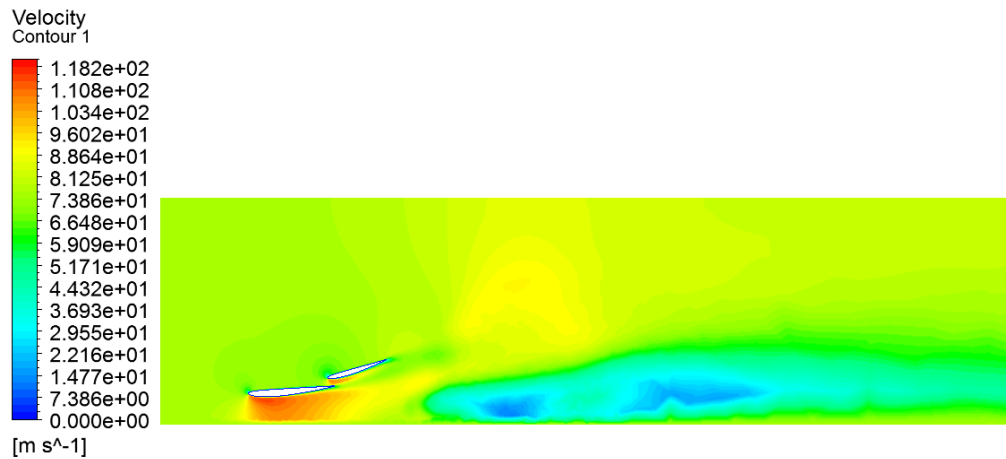


Figura B48. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 20°:

$C_L = -0,453$.

$C_D = 0,0860$.

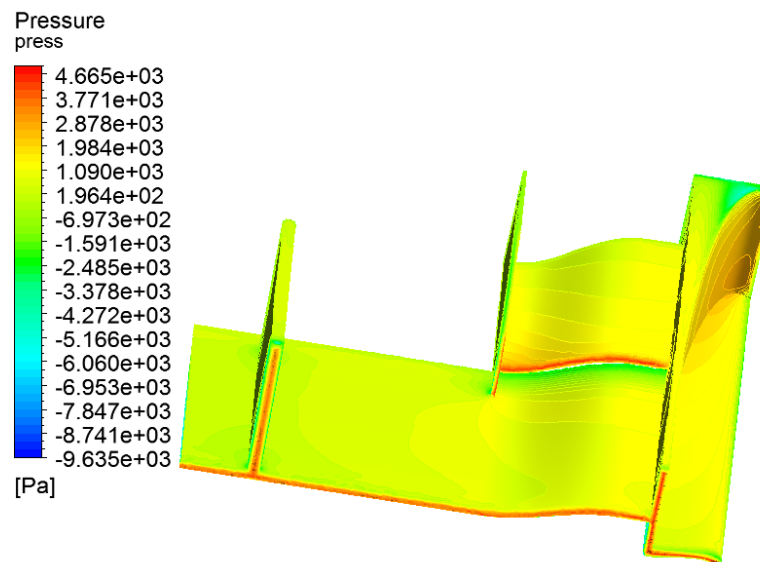


Figura B49. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 20°.

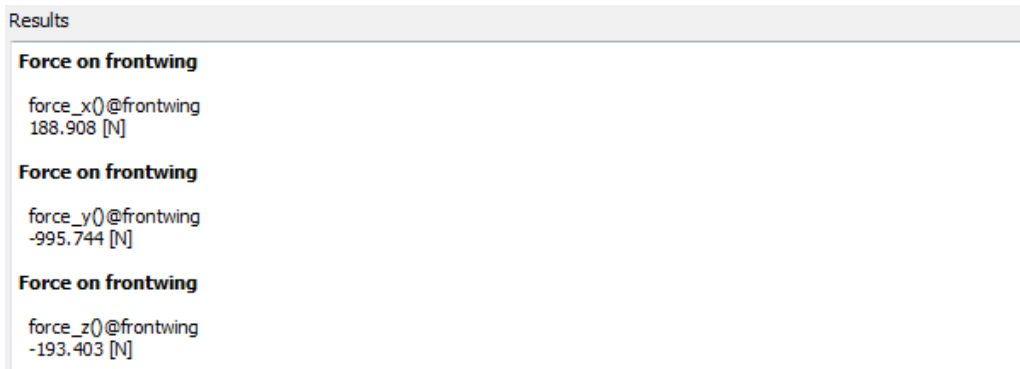


Figura B50. Components de les forces obtingudes.

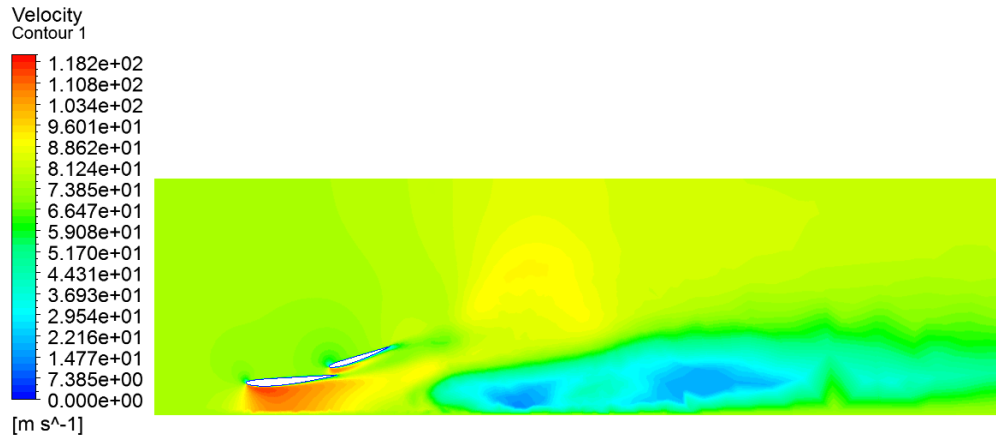


Figura B51. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 21°:

$C_L = -0,468$.

$C_D = 0,0886$.

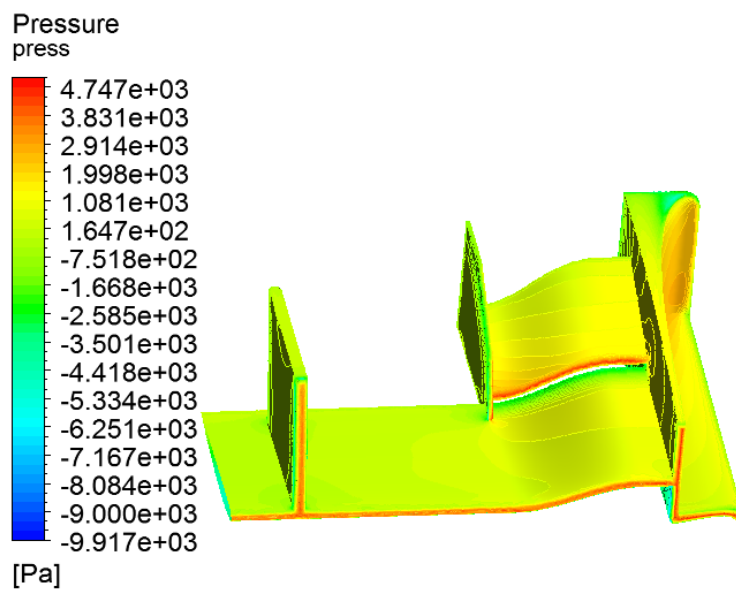


Figura B52. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 21°.

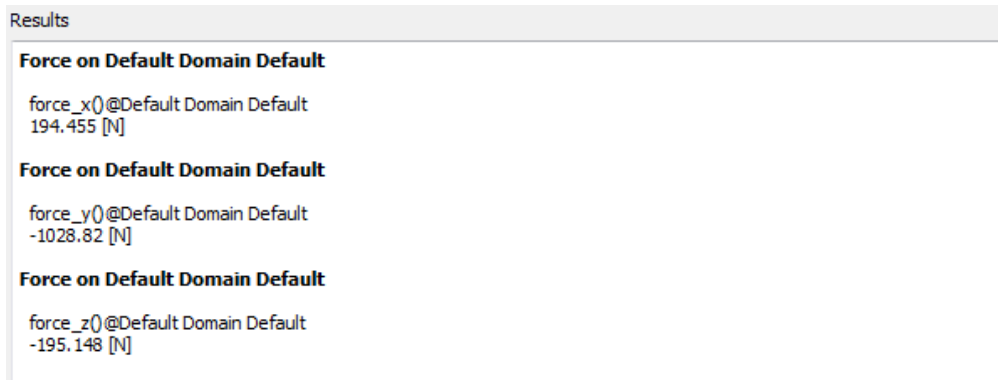


Figura B53. Components de les forces obtingudes.

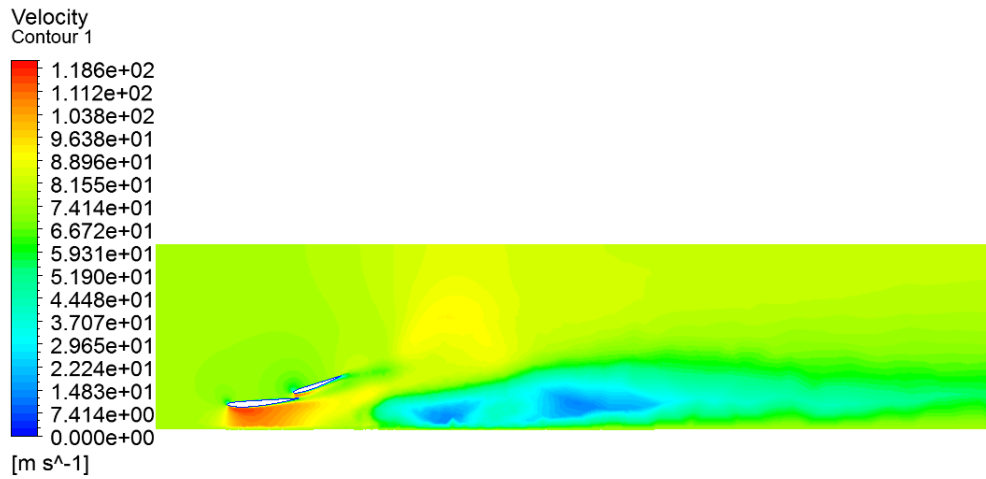


Figura B54. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 22°:

$C_L = -0,478$.

$C_D = 0,0912$.

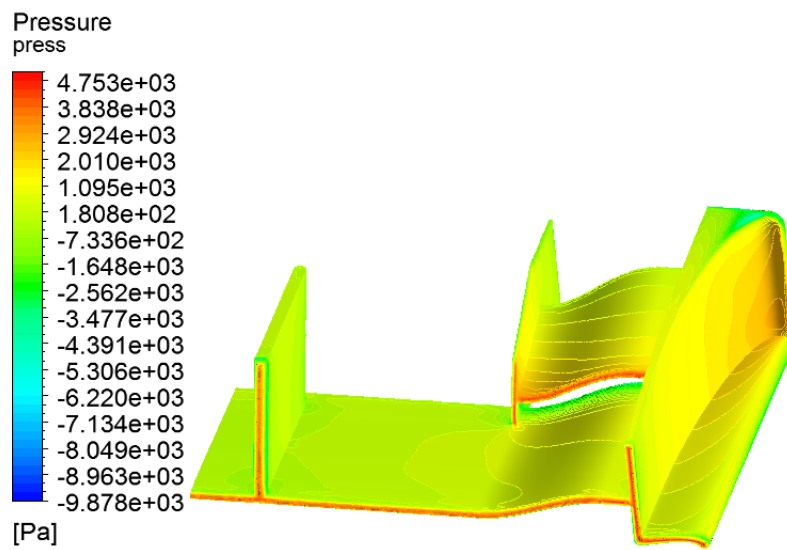


Figura B55. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 22°.

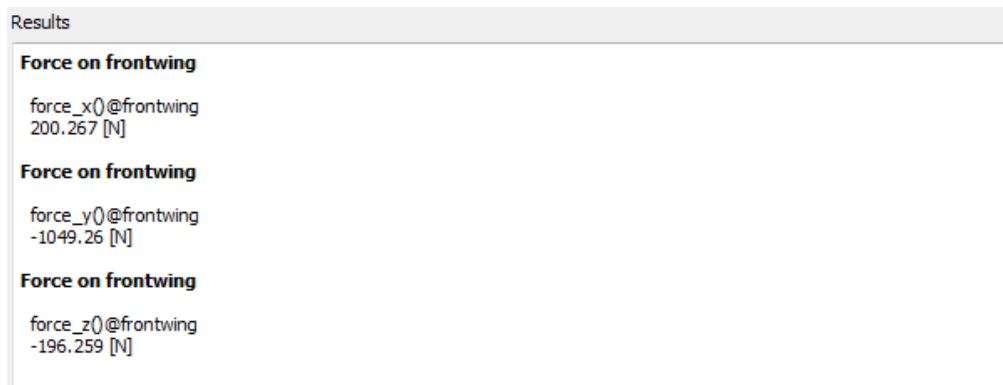


Figura B56. Components de les forces obtingudes.

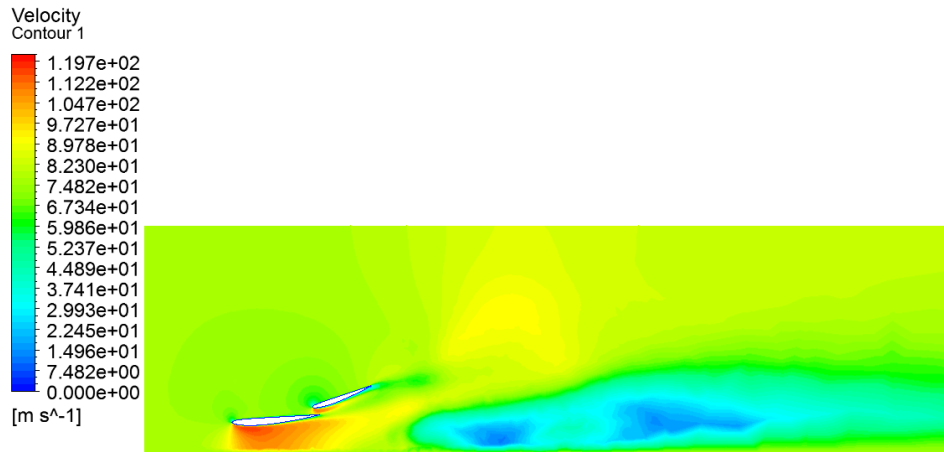


Figura B57. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 23°:

$C_L = -0,490$.

$C_D = 0,0940$.

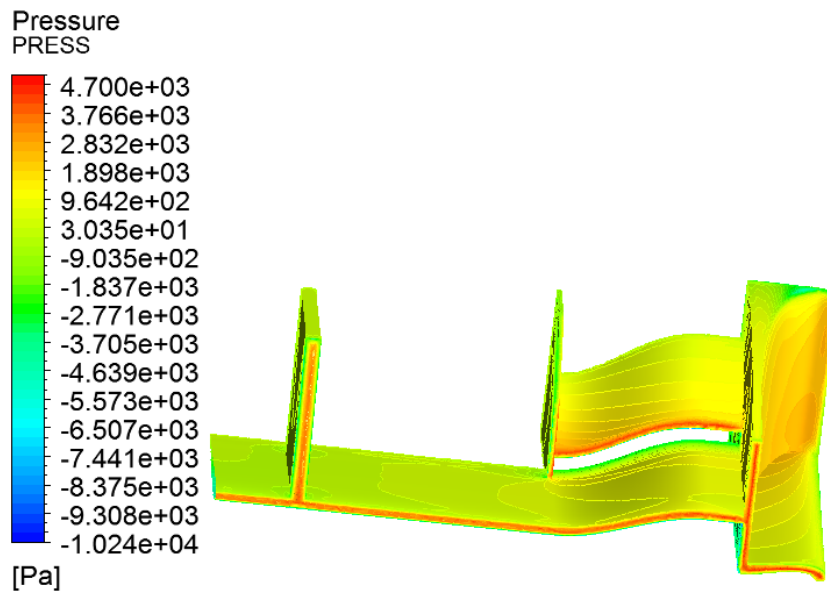


Figura B58. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 23°.

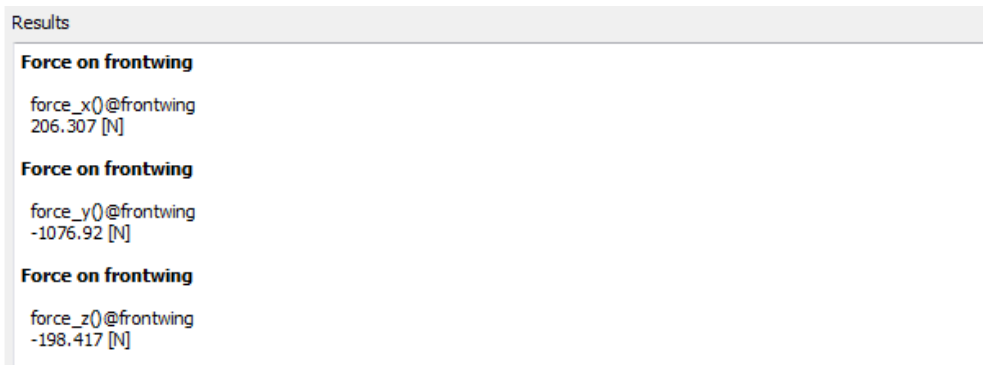


Figura B59. Components de les forces obtingudes.

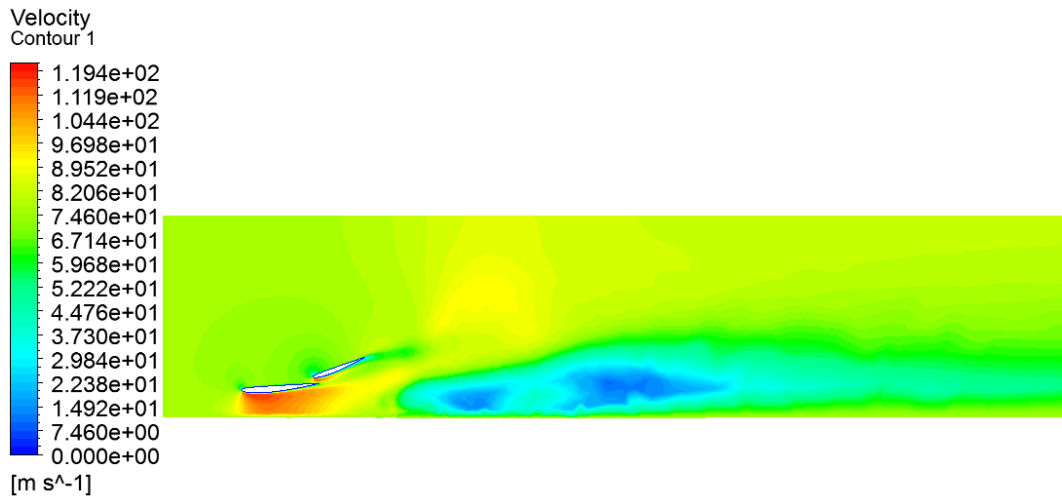


Figura B60. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 24°:

$C_L = -0,499$.

$C_D = 0,0964$.

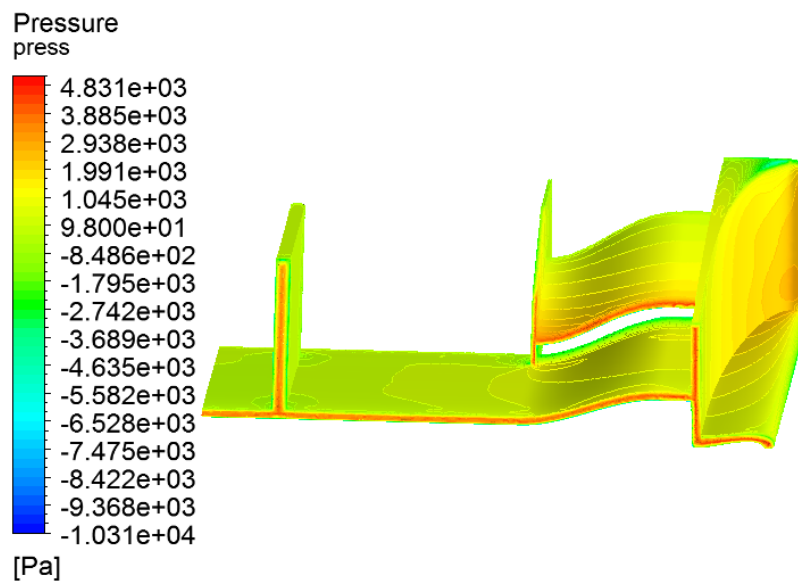


Figura B61. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 24°.

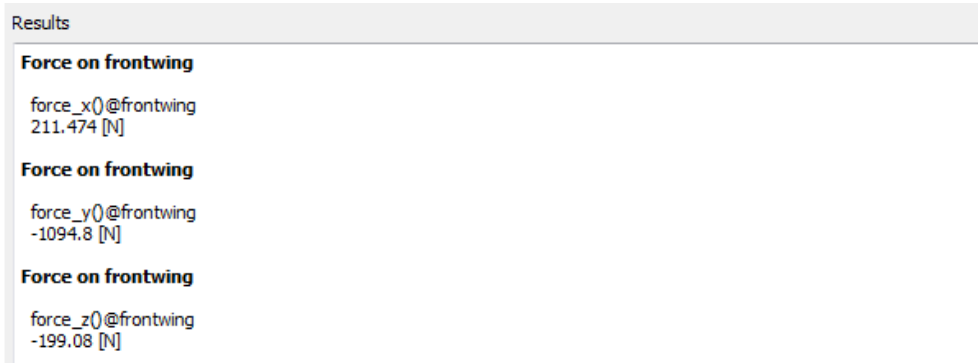


Figura B62. Components de les forces obtingudes.

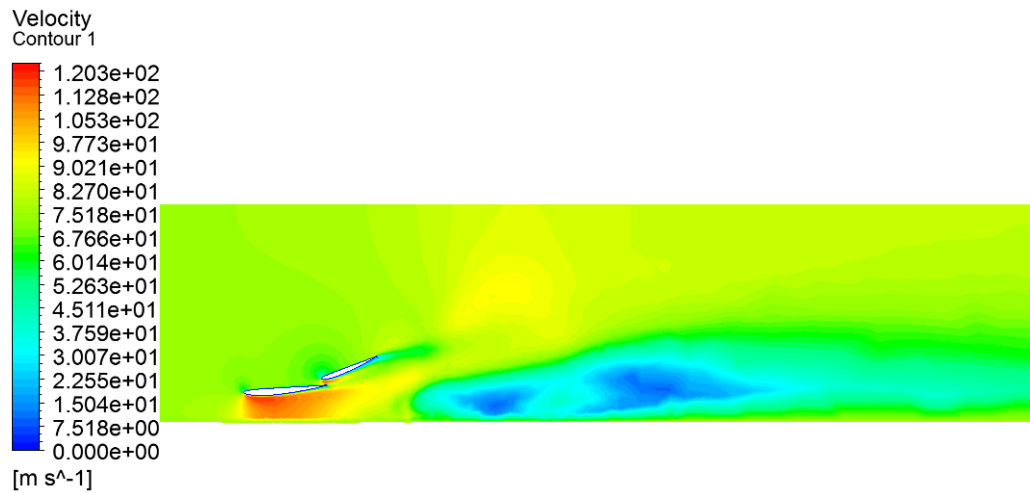


Figura B63. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 25°:

$C_L = -0,506$.

$C_D = 0,0976$.

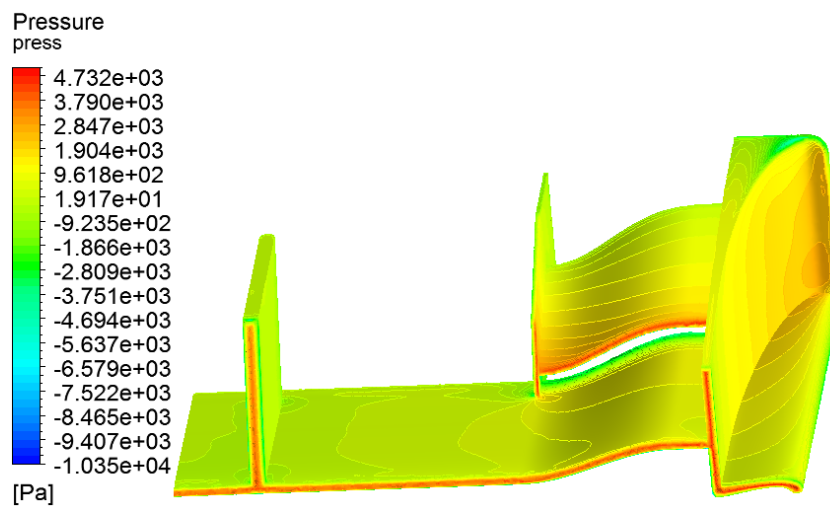


Figura B64. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 25°.

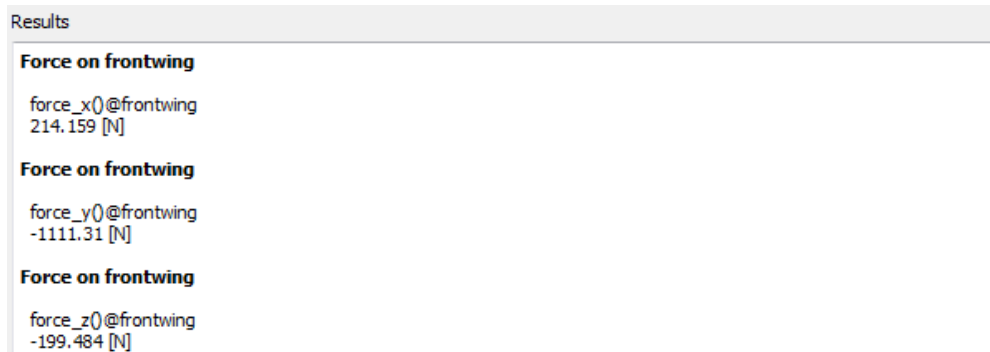


Figura B65. Components de les forces obtingudes.

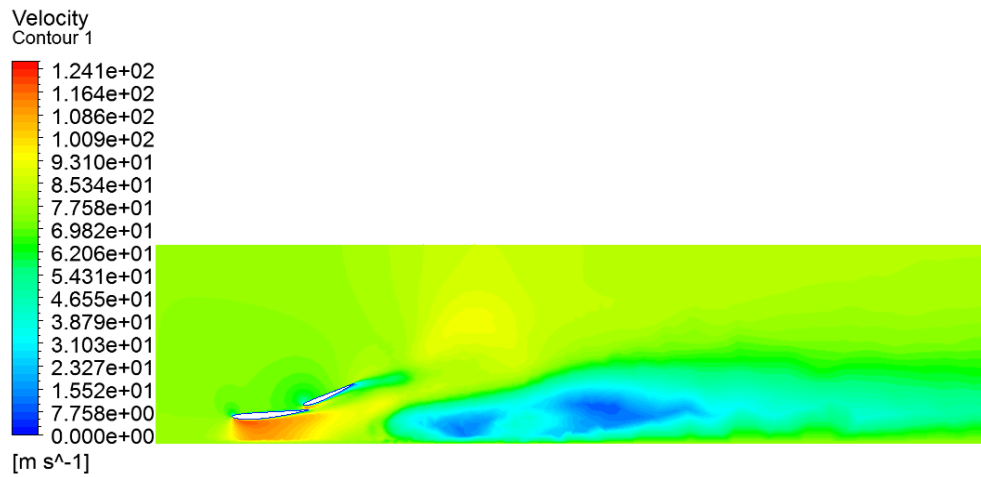


Figura B66. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 26°:

$C_L = -0,516$.

$C_D = 0,100$.

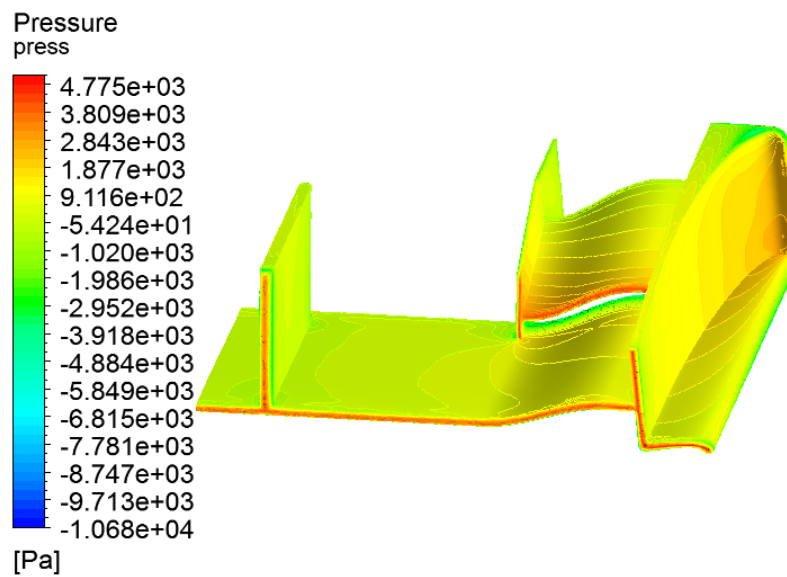


Figura B67. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 26°.

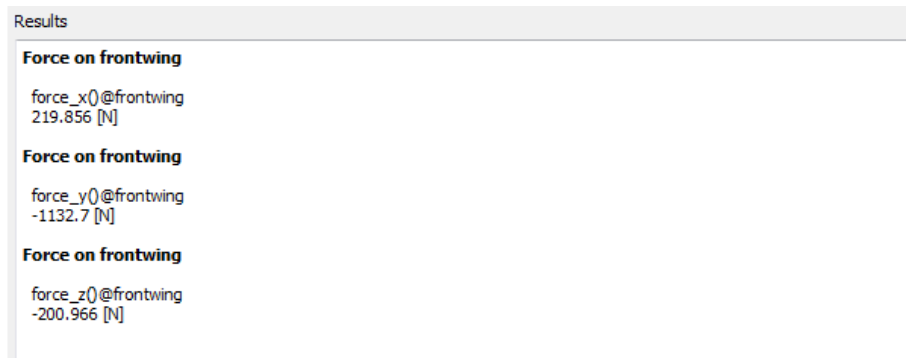


Figura B68. Components de les forces obtingudes.

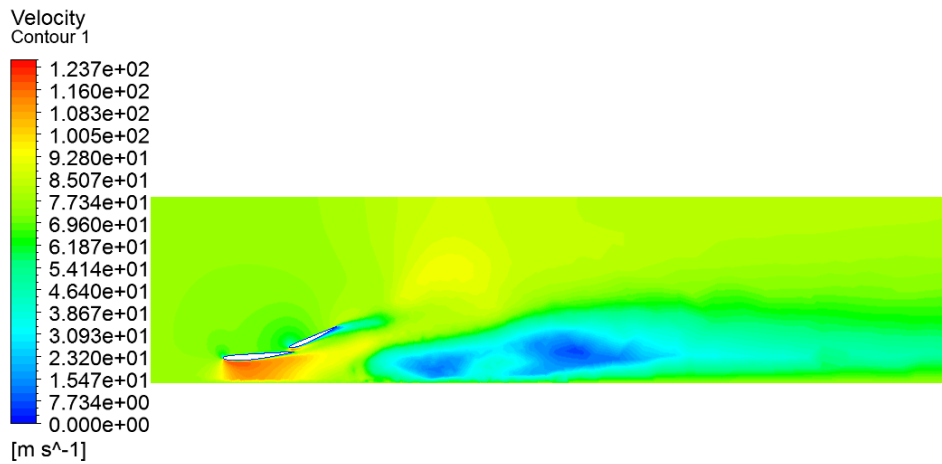


Figura B69. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 27°:

$C_L = -0,515$.

$C_D = 0,101$.

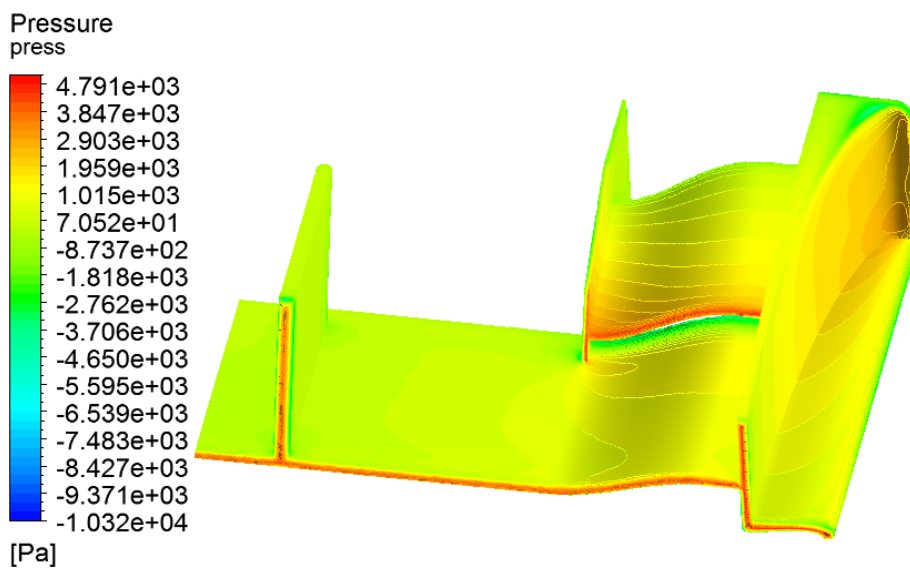


Figura B70. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 27°.

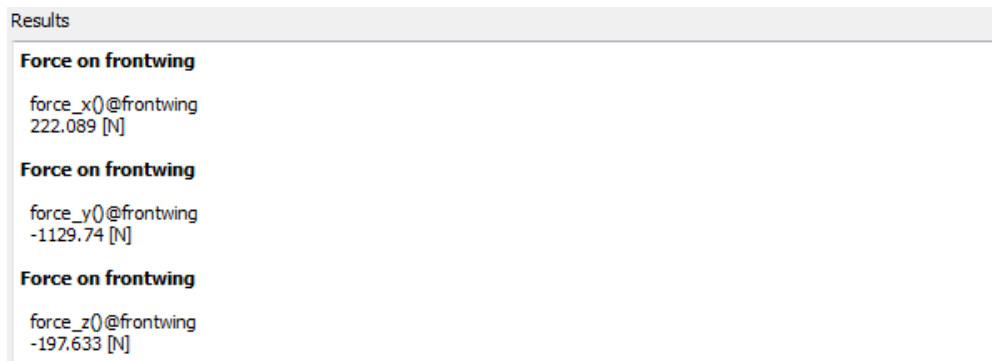


Figura B71. Components de les forces obtingudes.

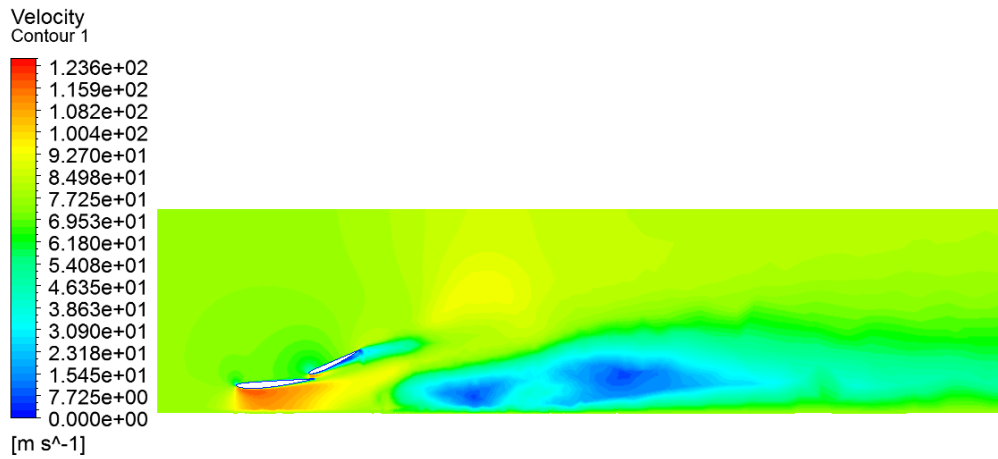


Figura B72. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 28°:

$C_L = -0,523$.

$C_D = 0,103$.

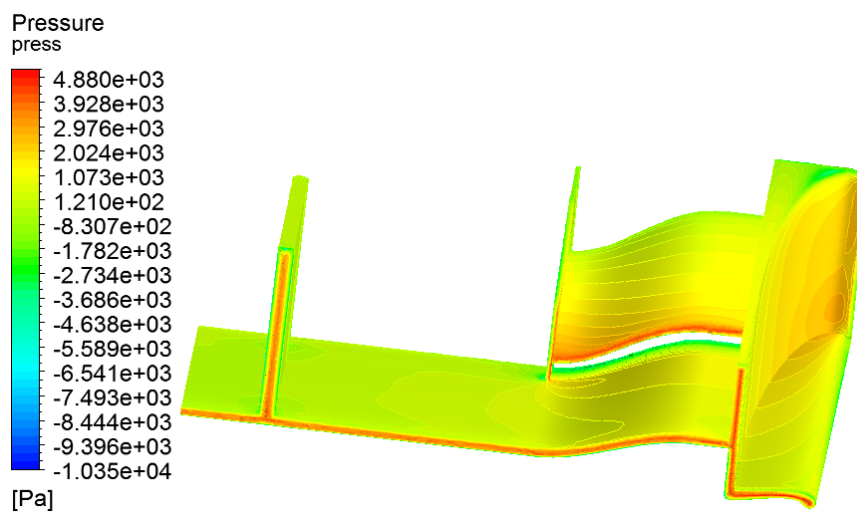


Figura B73. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 28°.

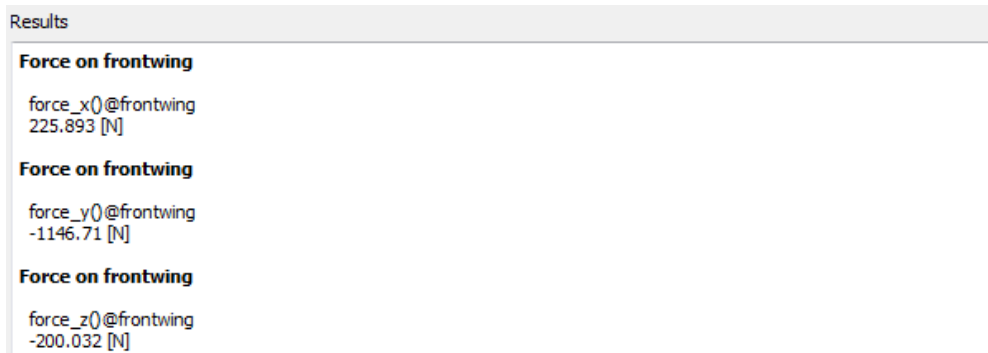


Figura B74. Components de les forces obtingudes.

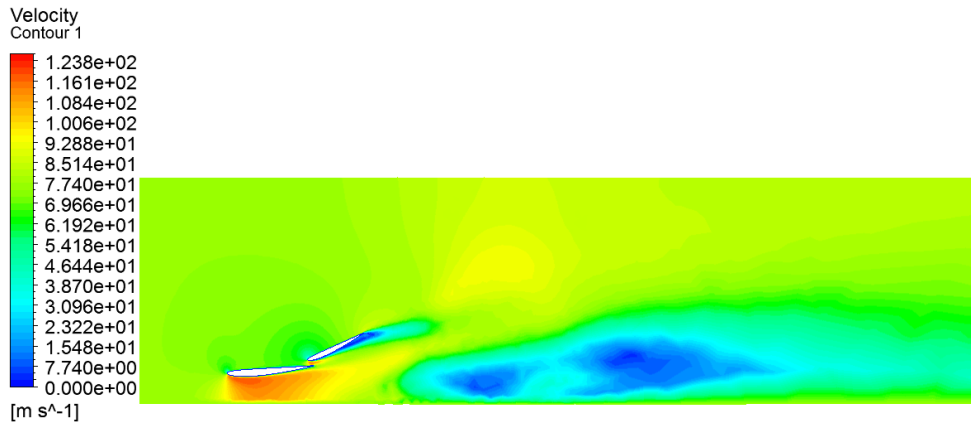


Figura B75. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 29°:

$C_L = -0,522$.

$C_D = 0,104$.

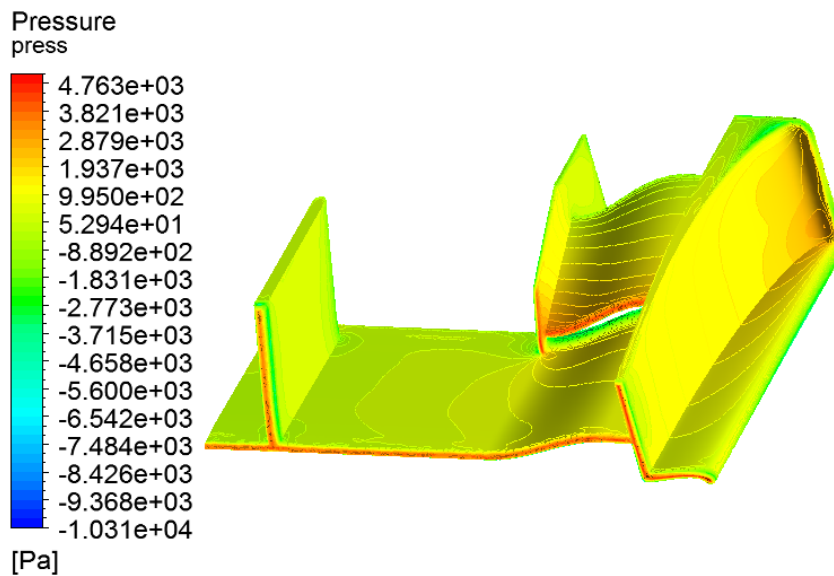


Figura B76. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 29°.

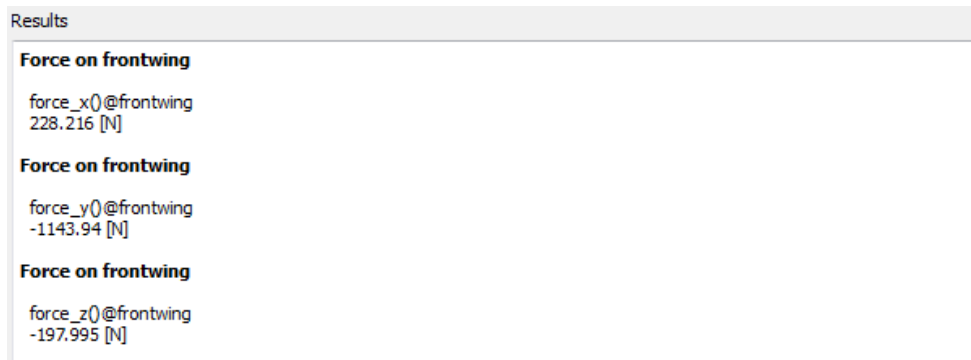


Figura B77. Components de les forces obtingudes.

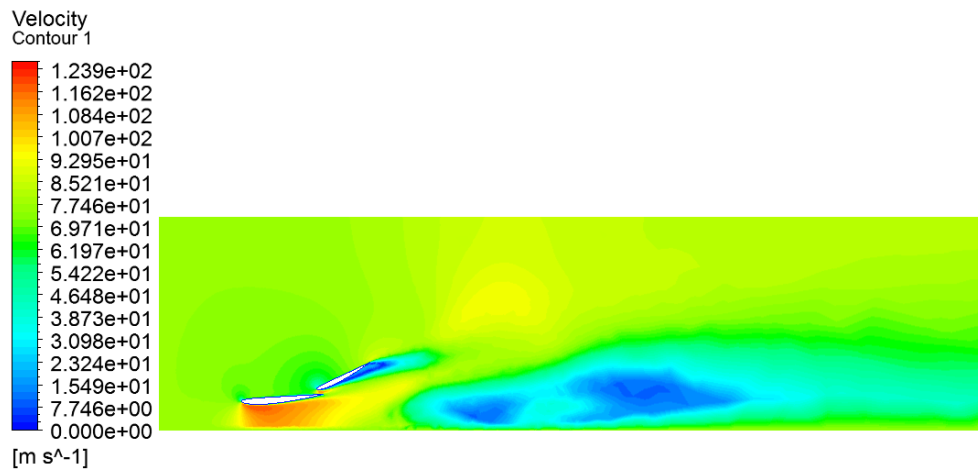


Figura B78. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 30°:

$C_L = -0,520$.

$C_D = 0,103$.

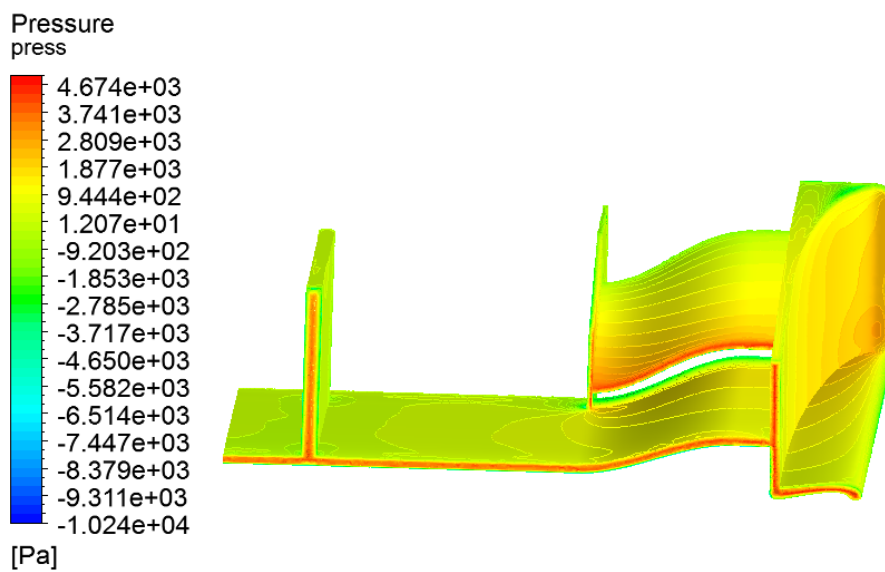


Figura B79. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 30°.

Results	
Force on frontwing	
force_x()@frontwing	226.849 [N]
Force on frontwing	
force_y()@frontwing	-1139.92 [N]
Force on frontwing	
force_z()@frontwing	-196.348 [N]

Figura B80. Components de les forces obtingudes.

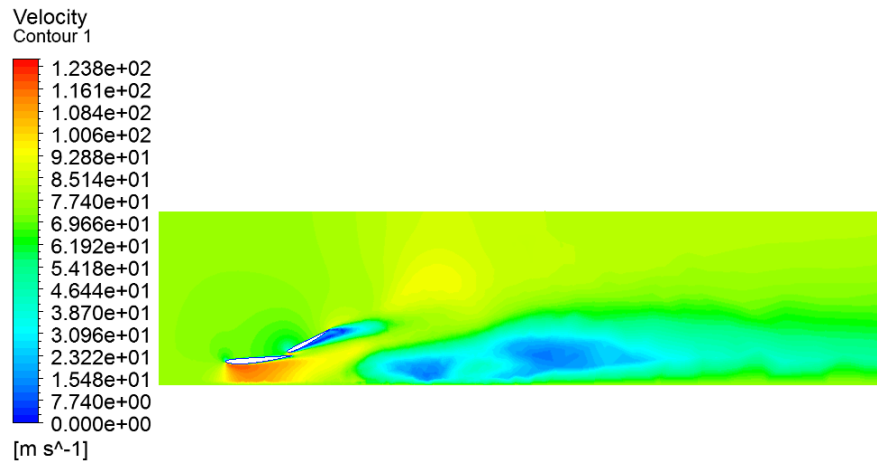


Figura B81. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 31°:

$C_L = -0,520$.

$C_D = 0,104$.

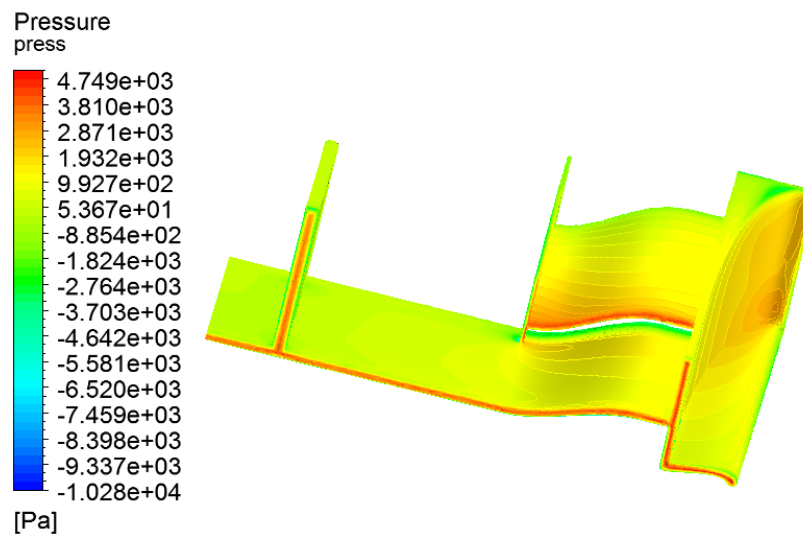


Figura B82. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 31°.

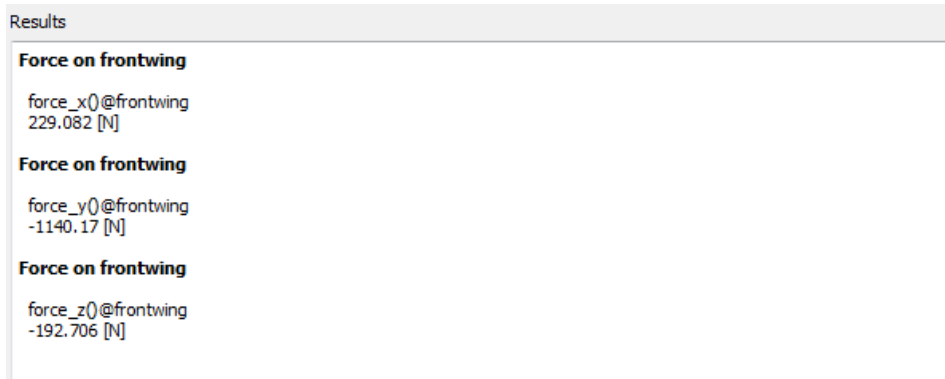


Figura B83. Components de les forces obtingudes.

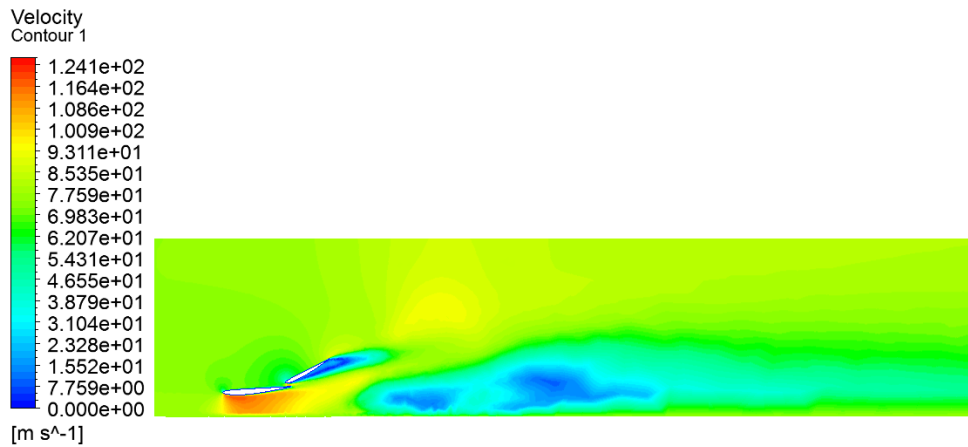


Figura B84. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 32°:

$C_L = -0,525$.

$C_D = 0,106$.

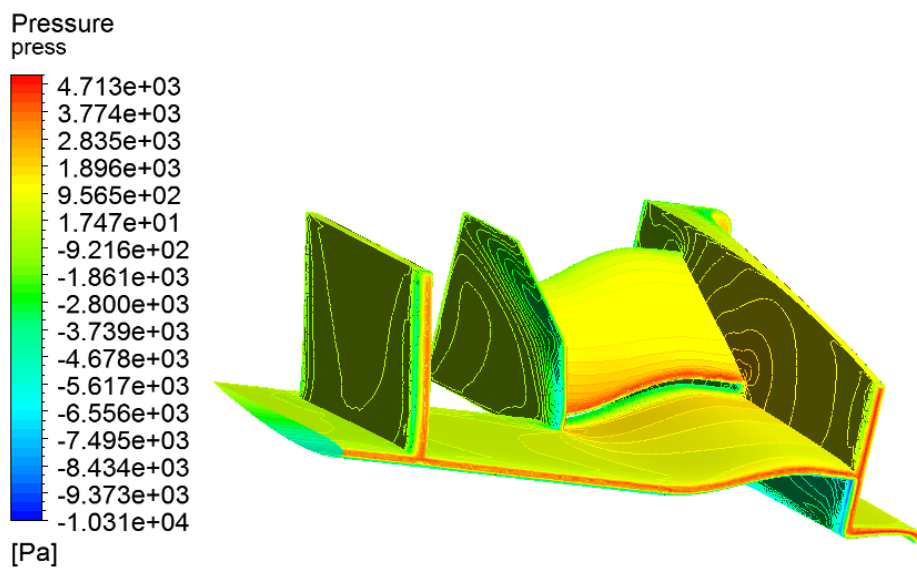


Figura B85. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 32°.

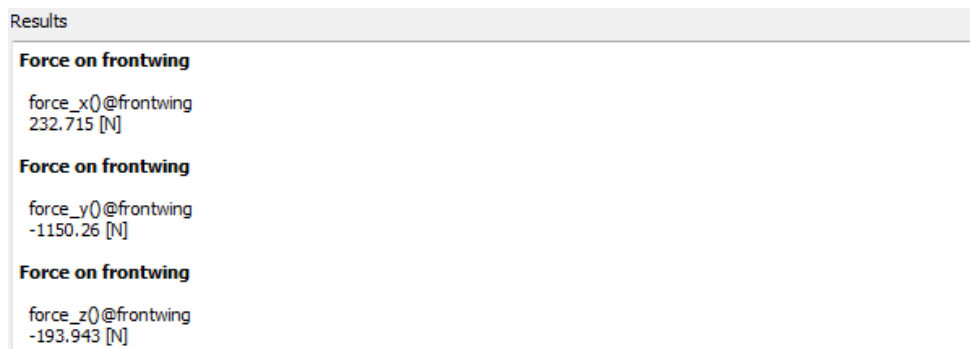


Figura B86. Components de les forces obtingudes.

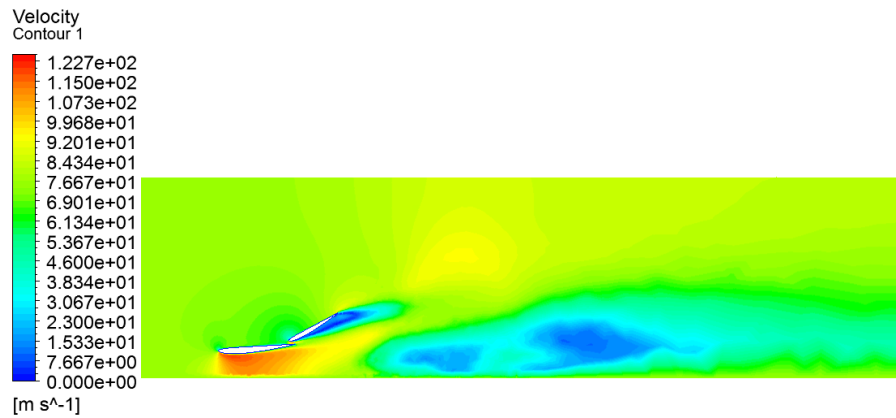


Figura B87. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 33°:

$C_L = -0,518.$

$C_D = 0,107.$

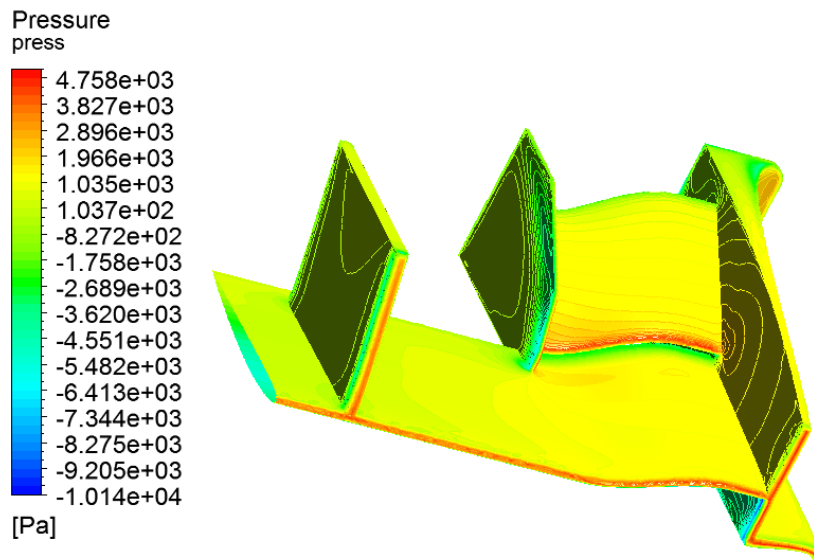


Figura B88. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 33°.

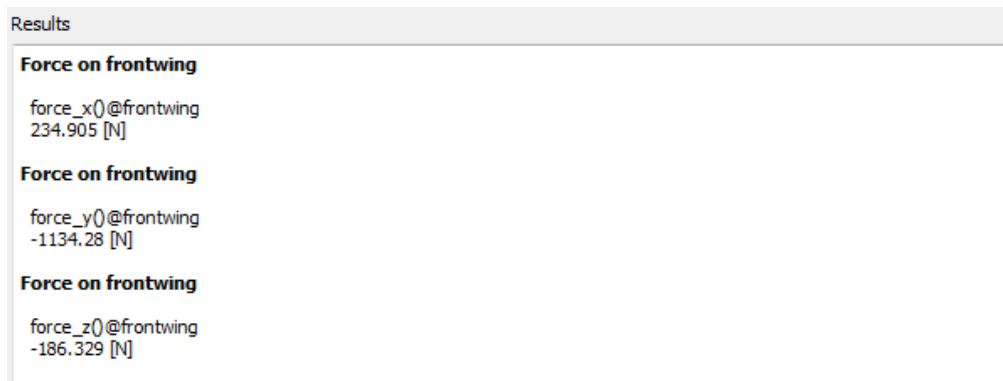


Figura B89. Components de les forces obtingudes.

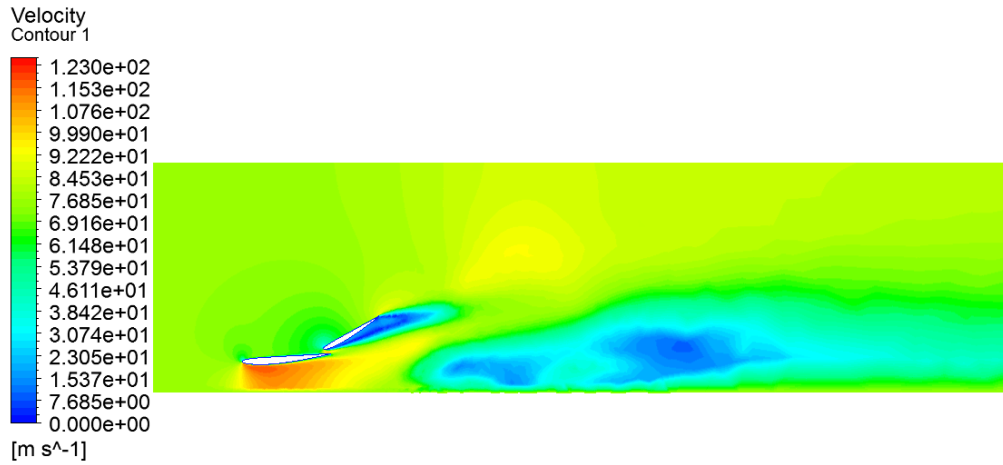


Figura B90. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Angle d'atac de 34°:

$C_L = -0,529$.

$C_D = 0,109$.

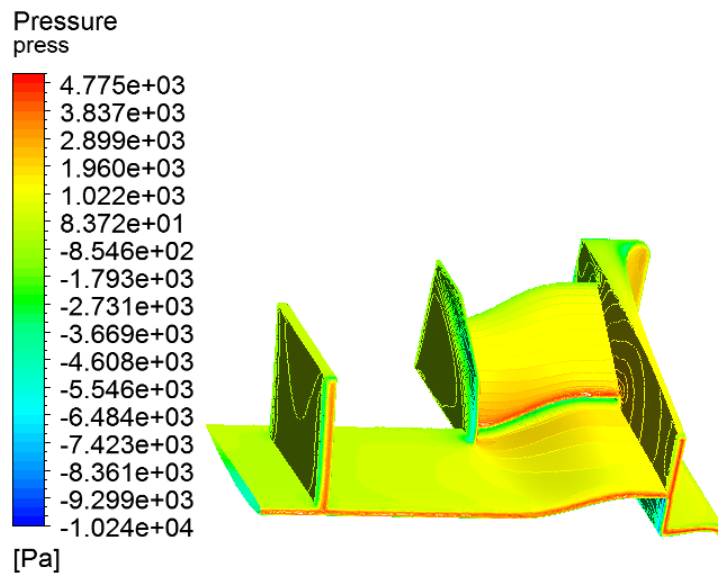


Figura B91. Pressió que suporta l'aleró amb un angle d'atac de 34°.

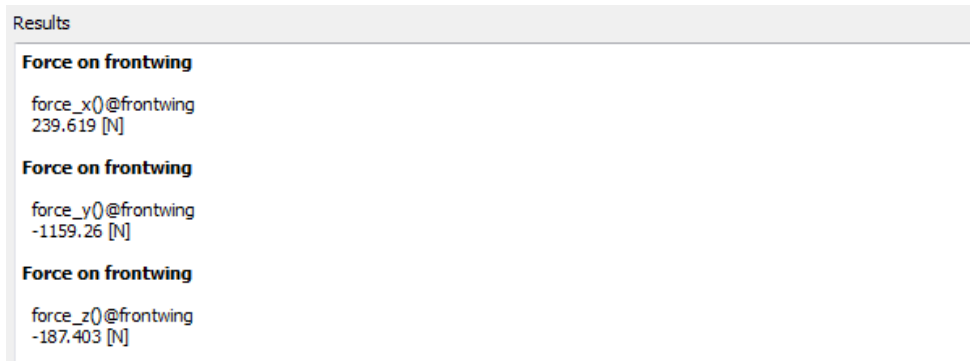


Figura B92. Components de les forces obtingudes.

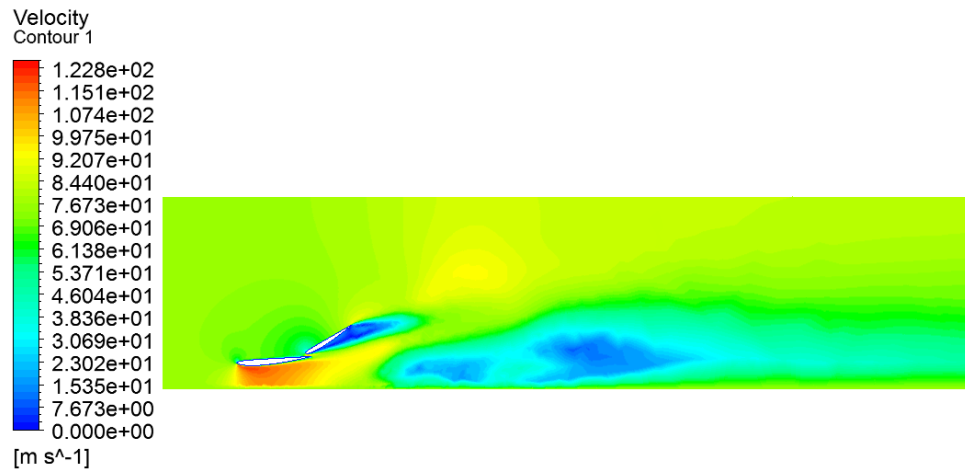


Figura B93. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

ANNEX C: RESULTATS DE LES SIMULACIONS EN FUNCIO DE LA VELOCITAT DE DESPLAÇAMENT

C.- RESULTATS DE LES SIMULACIONS EN FUNCIÓ DE LA VELOCITAT DE DESPLAÇAMENT

C.1 Introducció

Aquest annex conté la resta de figures dels resultats de les simulacions fetes relacionada amb l'estudi dels coeficients aerodinàmics en funció de la velocitat de desplaçament, tal i com s'explica en l'apartat 3.3.2 Simulació en funció de la velocitat de desplaçament, i posteriorment els resultats en l'apartat 4.3 Resultats de la simulació en funció de la velocitat de desplaçament.

C.2 Resultats de les simulacions

Velocitat del fluid de 90 km/h

C_L : -0,433.

C_D : 0,0854.

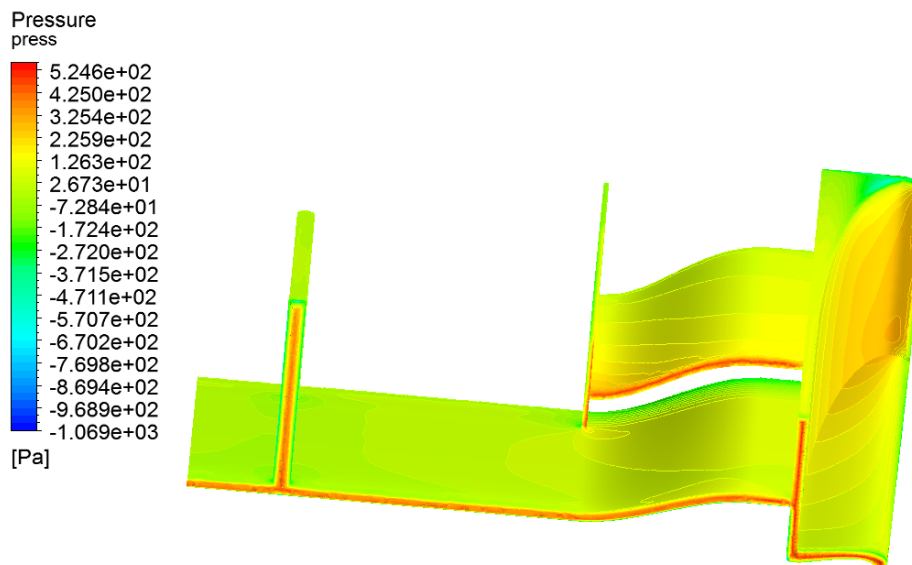


Figura C1. Pressió que suporta l'aleró a una velocitat del fluid de 90 km/h.

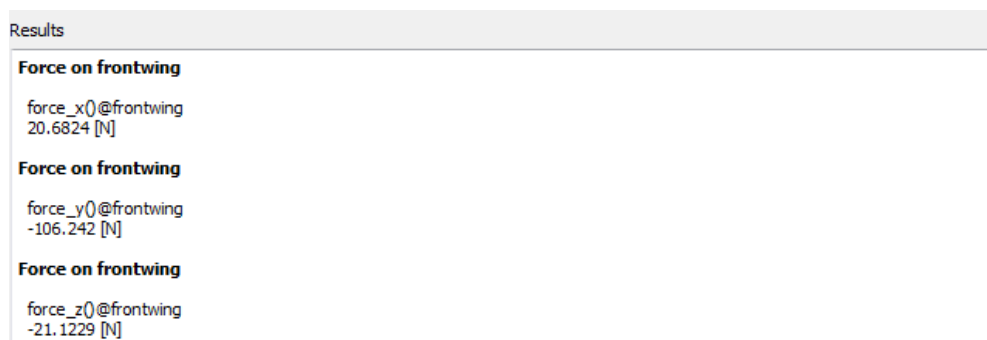


Figura C2. Components de les forces obtingudes.

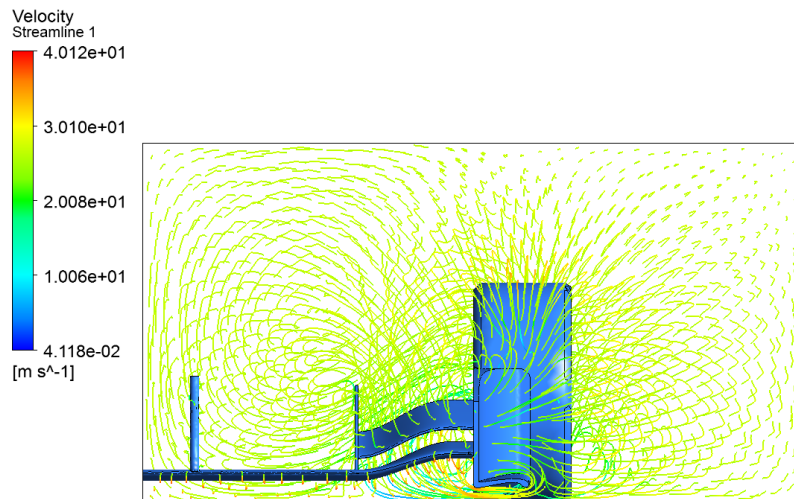


Figura C3. Valor de les trajectòries del fluid a 90 km/h.

Velocitat del fluid de 120 km/h

C_L : -0,435.

C_D : 0,0848.

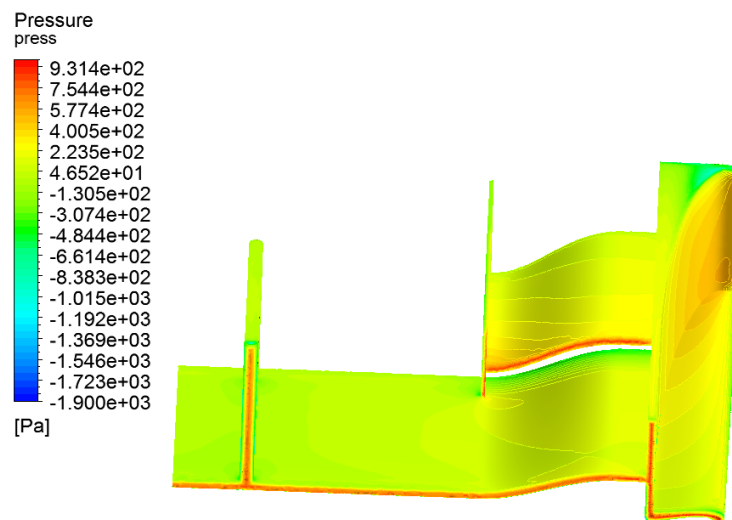


Figura C4. Pressió que suporta l'aleró a una velocitat del fluid de 120 km/h.

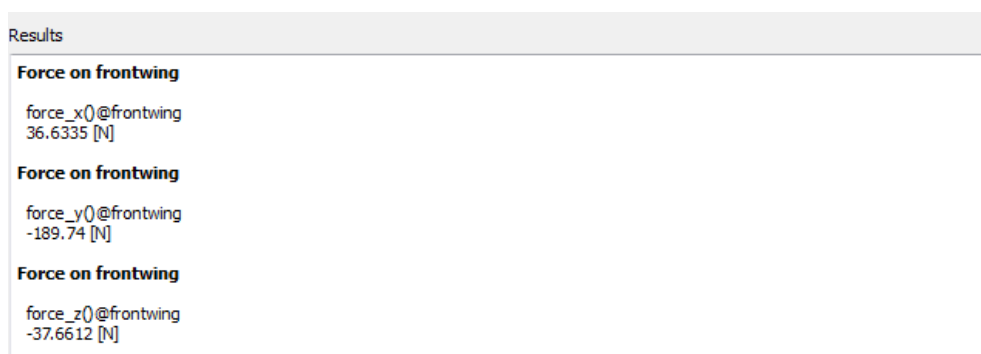


Figura C5. Components de les forces obtingudes.

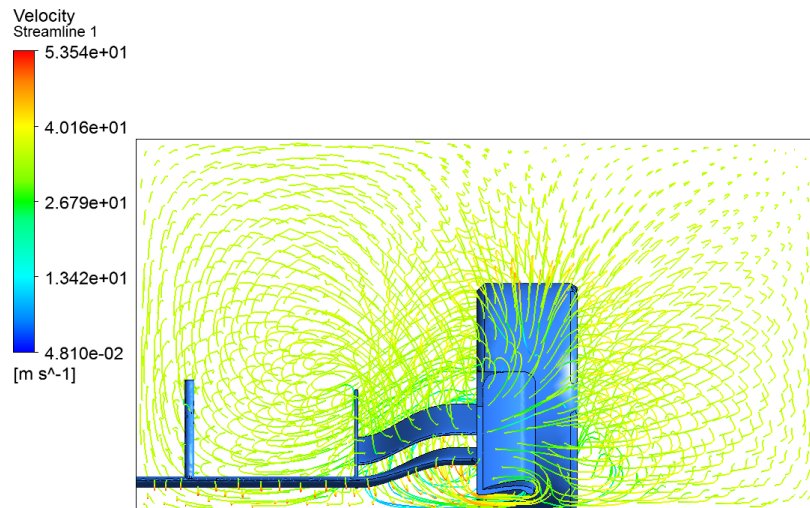


Figura C6. Valor de les trajectòries del fluid a 120 km/h.

Velocitat del fluid de 150 km/h

C_L : -0,437.

C_D : 0,0844.

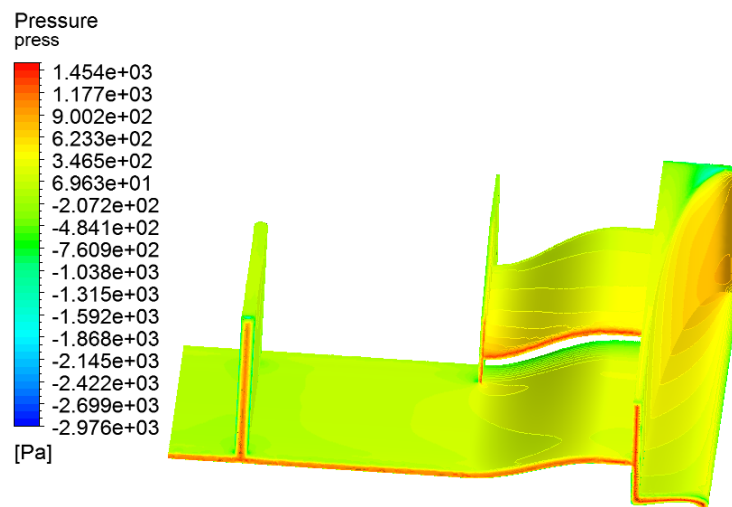


Figura C7. Pressió que suporta l'aleró a una velocitat del fluid de 150 km/h.

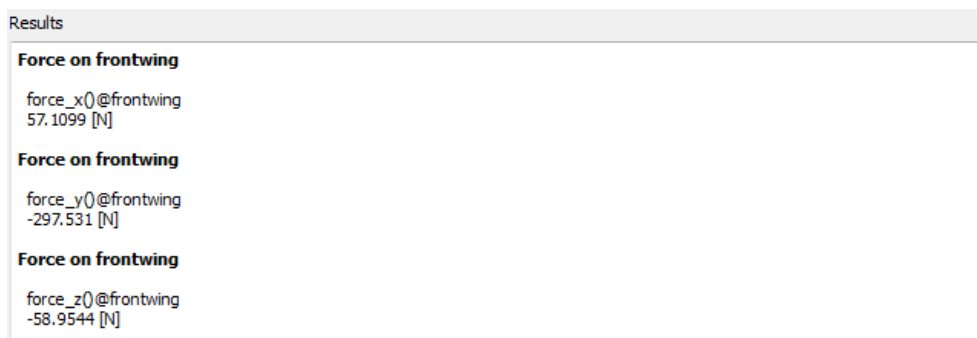


Figura C8. Components de les forces obtingudes.

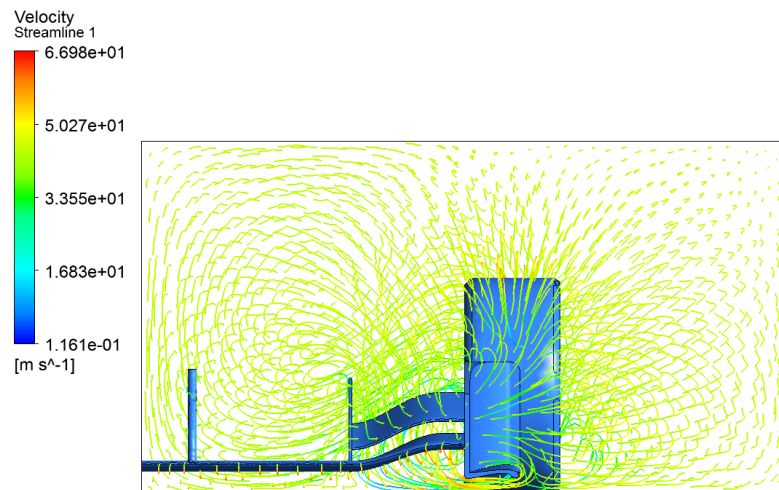


Figura C9. Valor de les trajectòries del fluid a 150 km/h.

Velocitat del fluid de 180 km/h

C_L : -0,440.

C_D : 0,0841.

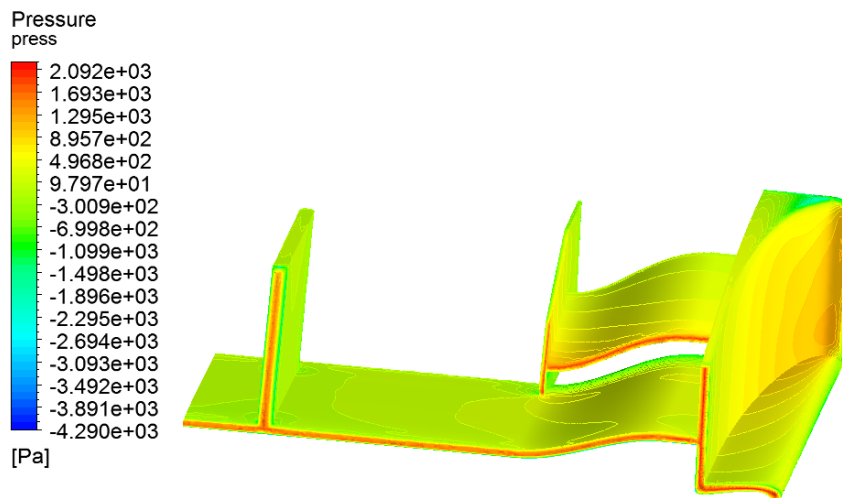


Figura C10. Pressió que suporta l'aleró a una velocitat del fluid de 180 km/h.

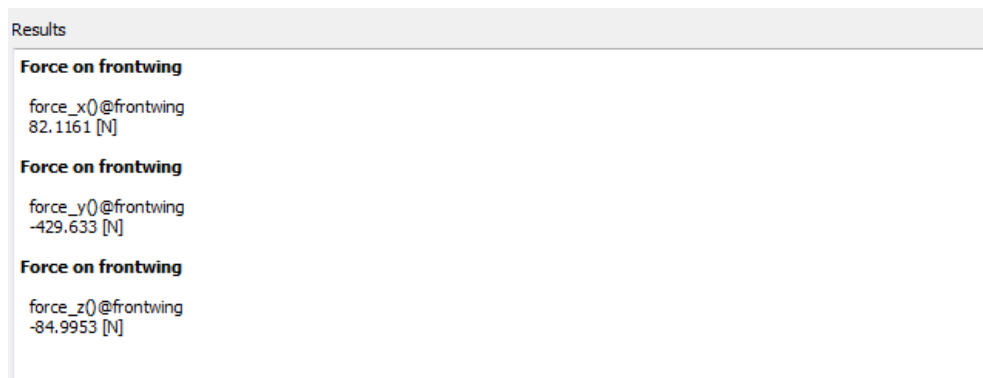


Figura C11. Components de les forces obtingudes.

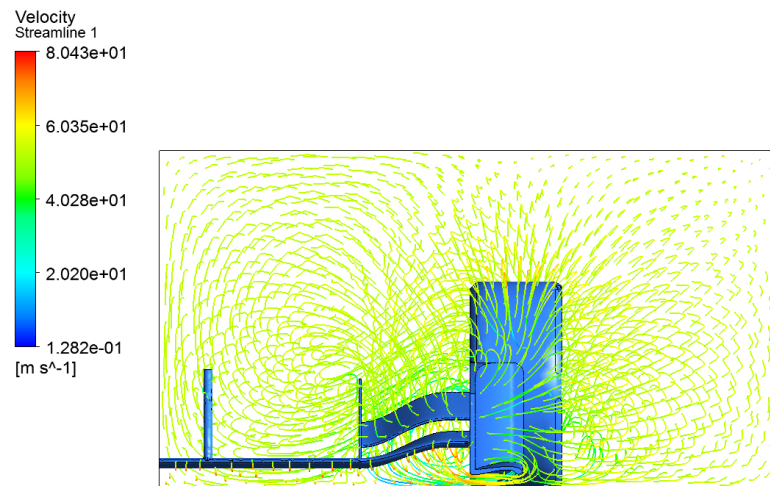


Figura C12. Valor de les trajectòries del fluid a 180 km/h.

Velocitat del fluid de 210 km/h

C_L : -0,441.

C_D : 0,0840.

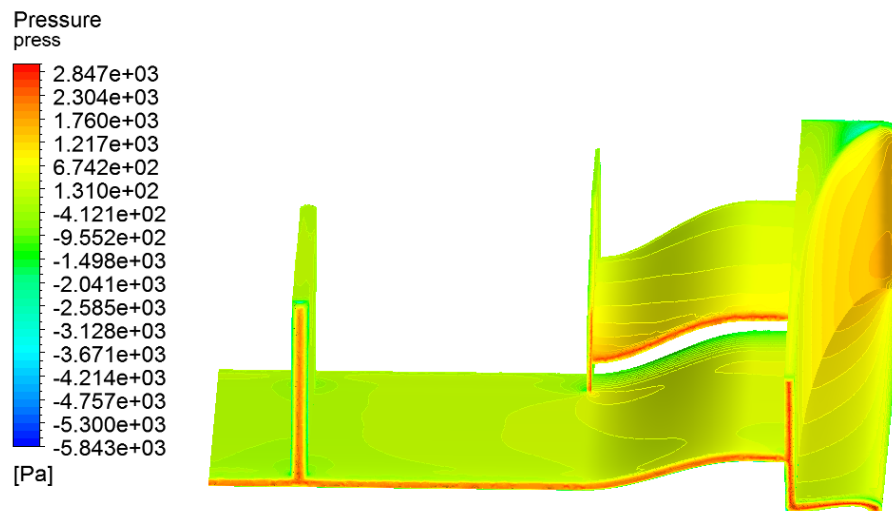


Figura C13. Pressió que suporta l'aleró a una velocitat del fluid de 210 km/h.

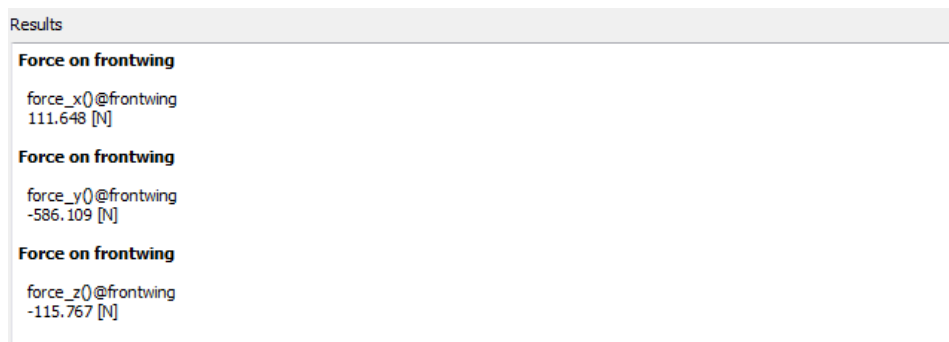


Figura C14. Components de les forces obtingudes.

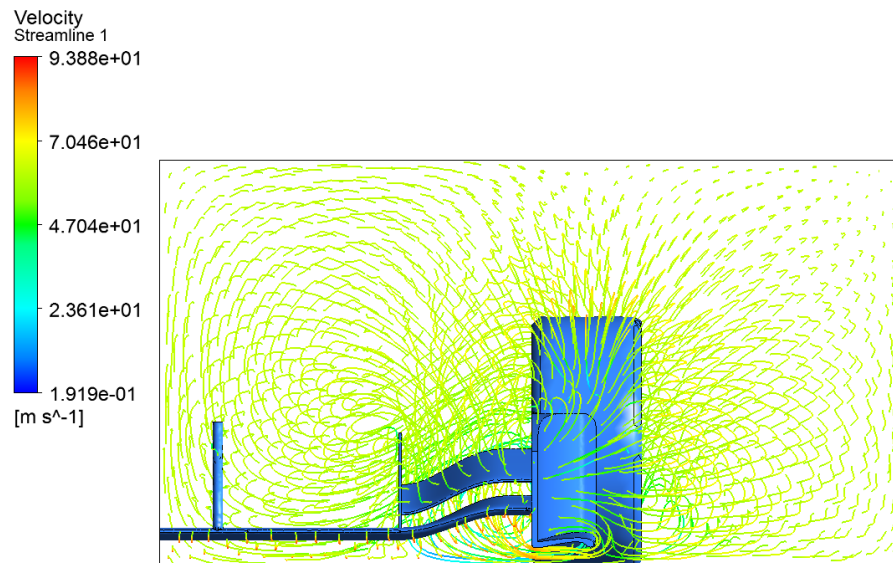


Figura C15. Valor de les trajectòries del fluid a 210 km/h.

Velocitat del fluid de 240 km/h

C_L : -0,442.

C_D : 0,0840.

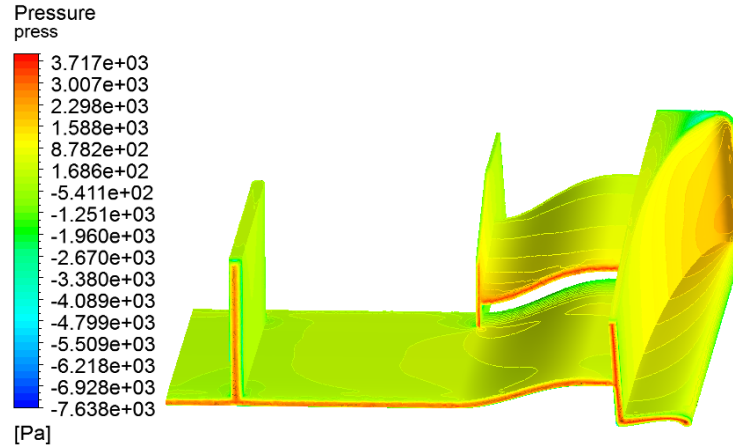


Figura C16. Pressió que suporta l'aleró a una velocitat del fluid de 240 km/h.

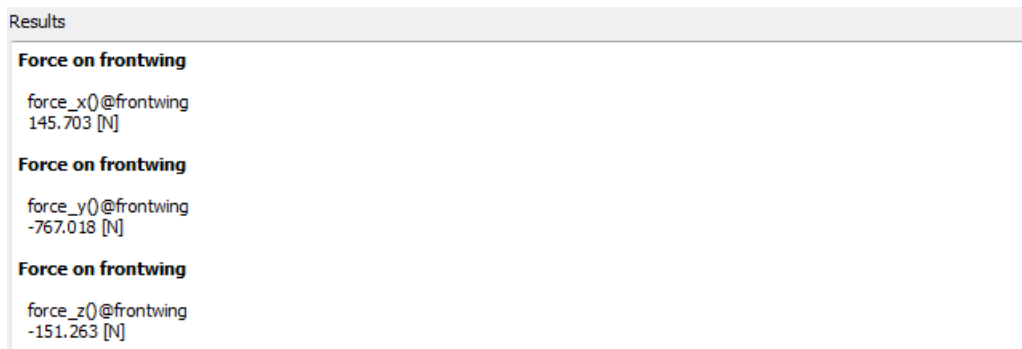


Figura C17. Components de les forces obtingudes.

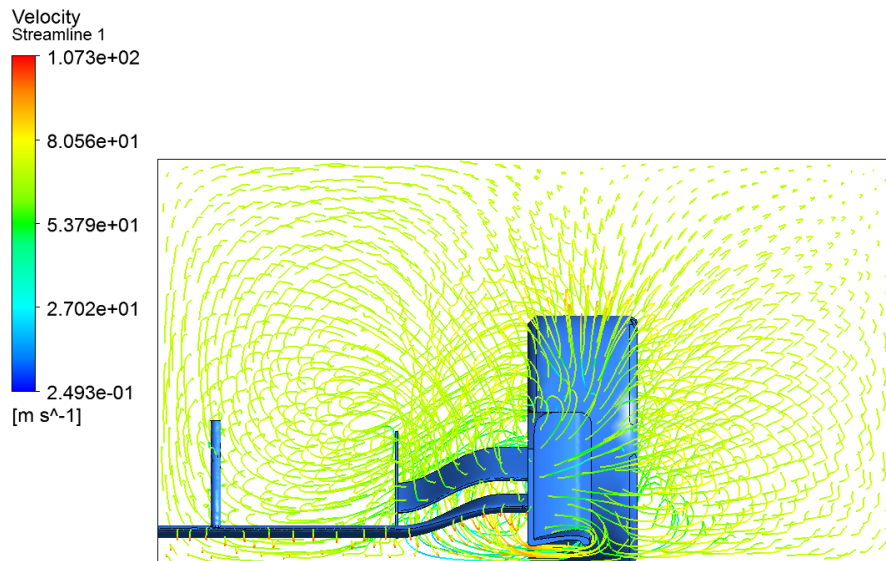


Figura C18. Valor de les trajectòries del fluid a 240 km/h.

Velocitat del fluid de 270 km/h

C_L : -0,443.

C_D : 0,0840.

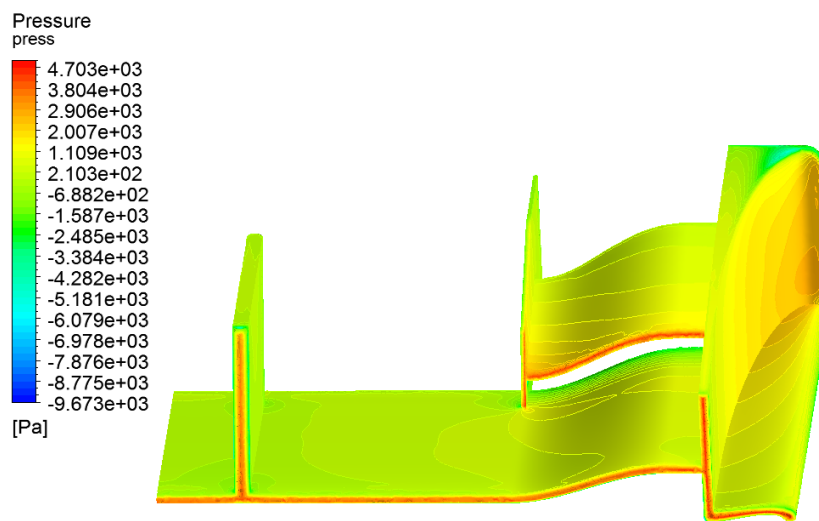


Figura C19. Pressió que suporta l'aleró a una velocitat del fluid de 270 km/h.



Figura C20. Components de les forces obtingudes.

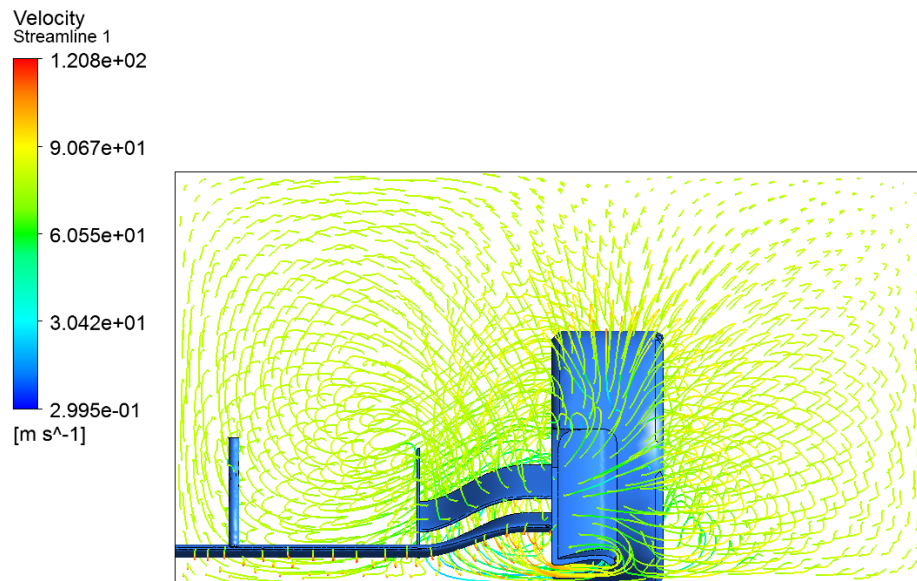


Figura C21. Valor de les trajectòries del fluid a 270 km/h.

ANNEX D: RESULTATS DE LES SIMULACIONS EN FUNCIO DE L'ALÇADA RESPECTE AL TERRA

D.- RESULTATS DE LES SIMULACIONS EN FUNCIÓ DE L'ALÇADA RESPECTE AL TERRA

D.1 Introducció

Aquest annex conté la resta de figures dels resultats de les simulacions fetes relacionada amb l'estudi dels coeficients aerodinàmics en funció de l'alçada respecte al terra, tal i com s'explica en l'apartat 3.3.3 *Simulació en funció de l'alçada respecte al terra*, i posteriorment els resultats en l'apartat 4.4 *Resultats de la simulació en funció de l'alçada respecte al terra*.

D.2 Resultats de les simulacions

Alçada de 7'5 mm:

C_L : -0,771.

C_D : 0,102.

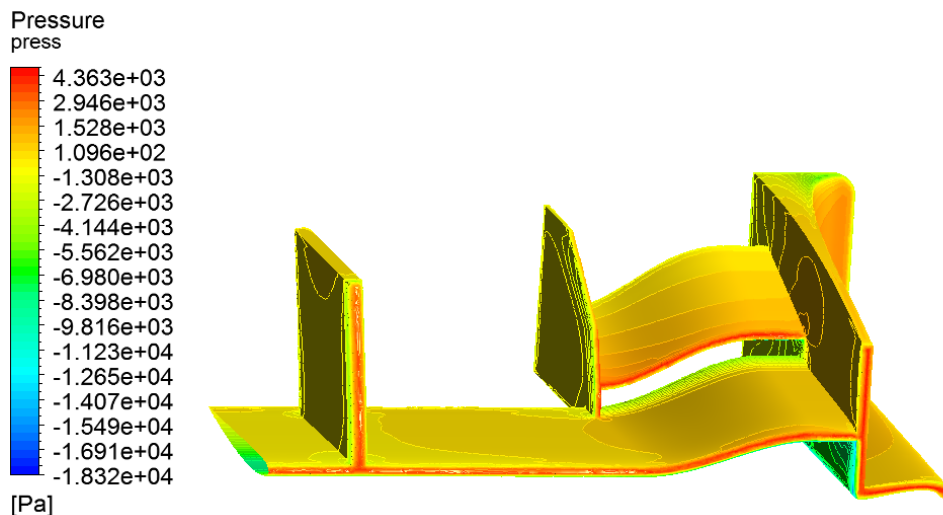


Figura D1. Pressió que suporta l'aleró a 7,5 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

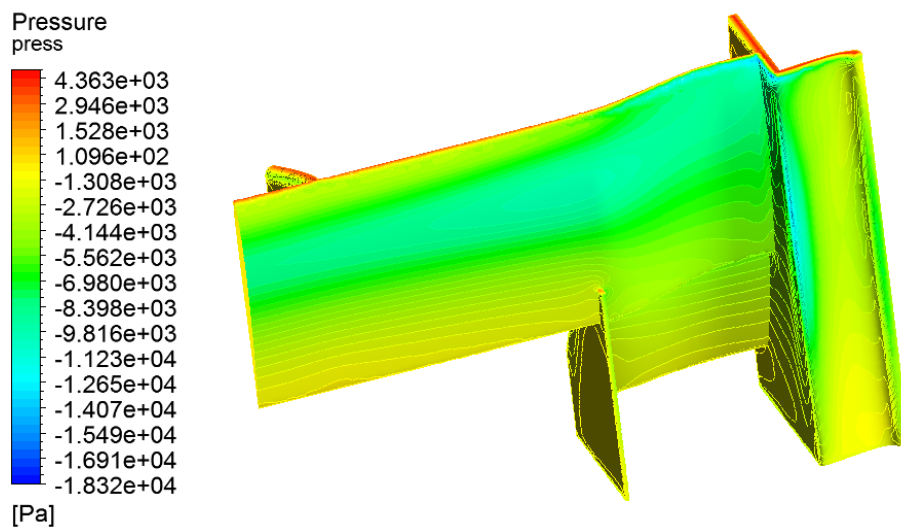


Figura D2. Pressió que suporta l'aleró a 7,5 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

Results	
Force on frontwing	
force_x()@frontwing	225.048 [N]
Force on frontwing	
force_y()@frontwing	-1693.55 [N]
Force on frontwing	
force_z()@frontwing	-213.789 [N]

Figura D3. Components de les forces obtingudes.

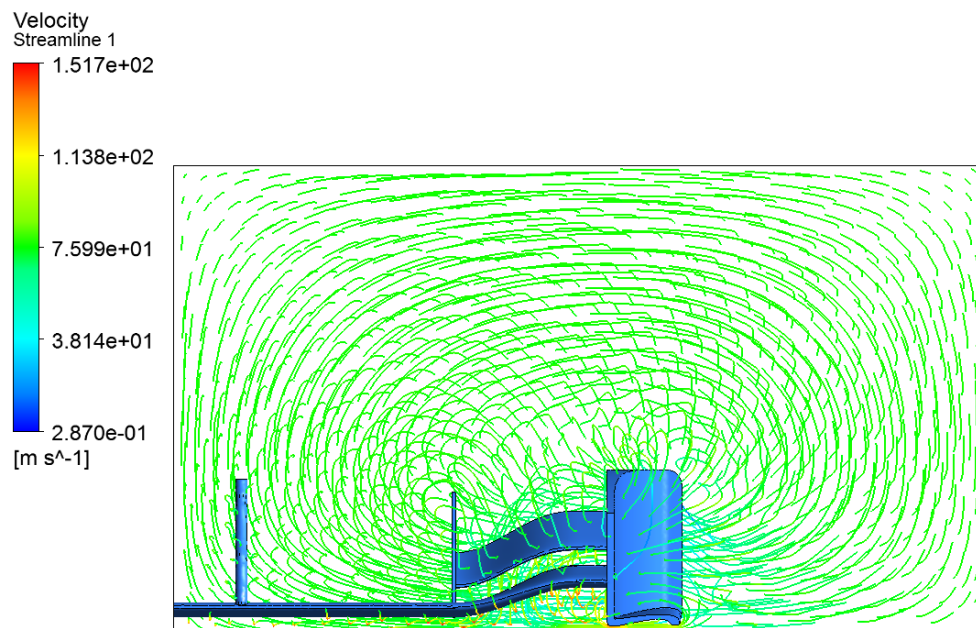


Figura D4. Trajectòria de les línies de fluid a 7,5 mm d'alçada respecte al terra.

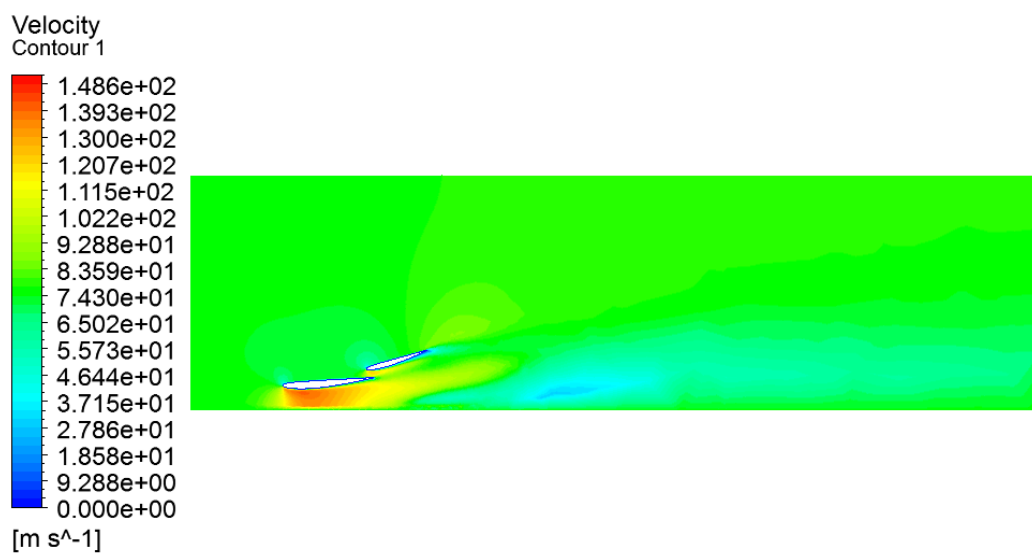


Figura D5. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Alçada de 15 mm:

C_L : -0,660.

C_D : 0,102.

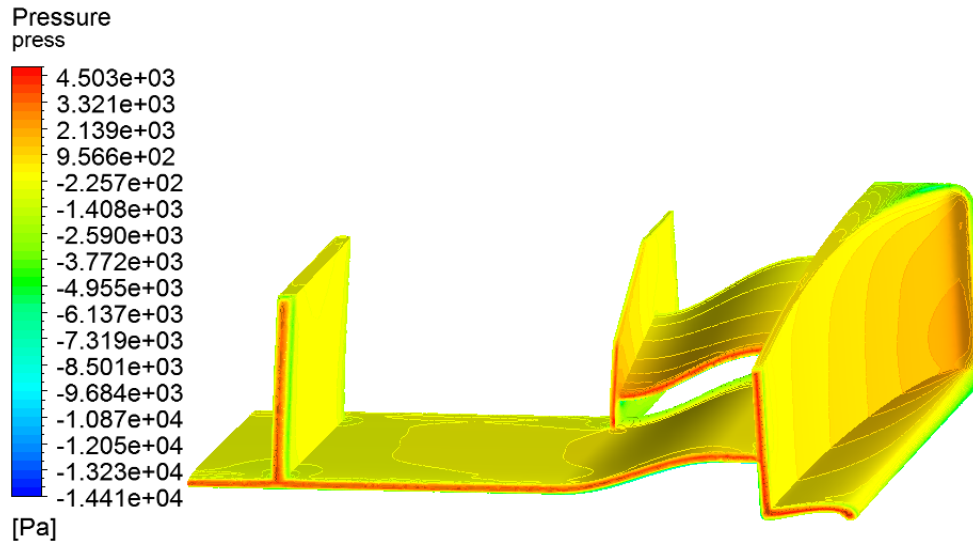


Figura D6. Pressió que suporta l'aleró a 15 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

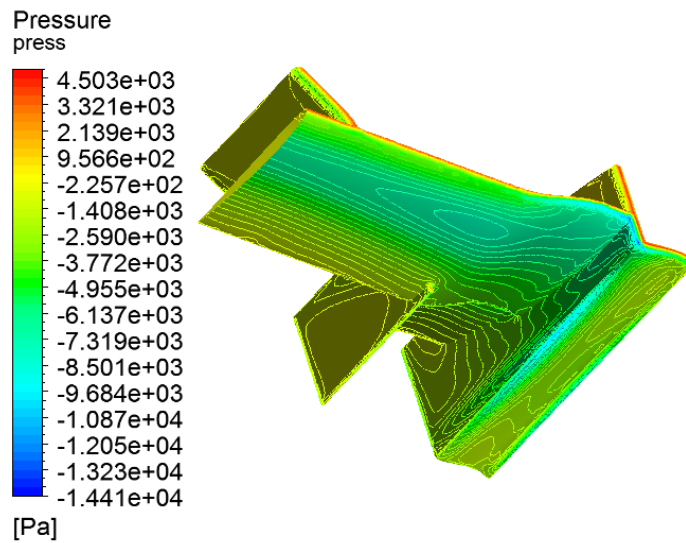


Figura D7. Pressió que suporta l'aleró a 15 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

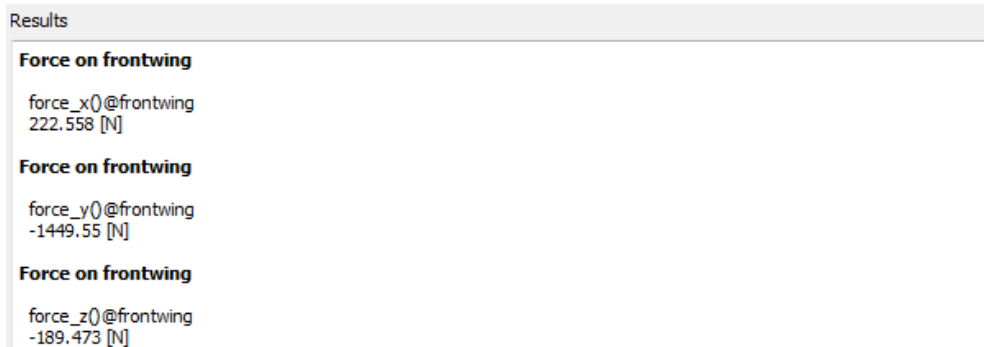


Figura D8. Components de les forces obtingudes.

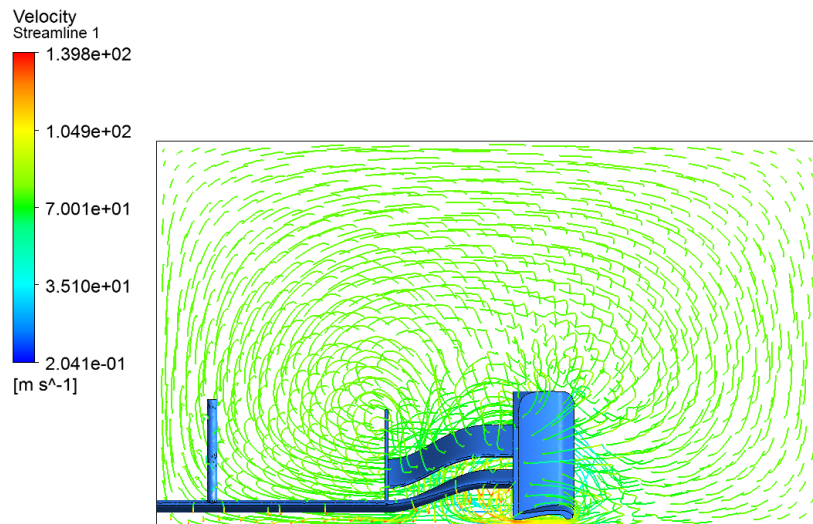


Figura D9. Trajectòria de les línies de fluid a 15 mm d'alçada respecte al terra.

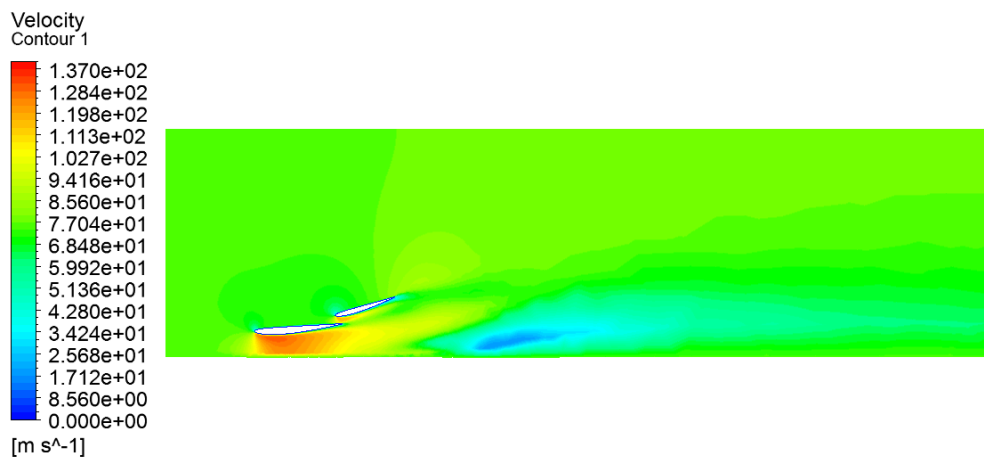


Figura D10. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Alçada de 20 mm:

C_L : -0,603.

C_D : 0,102.

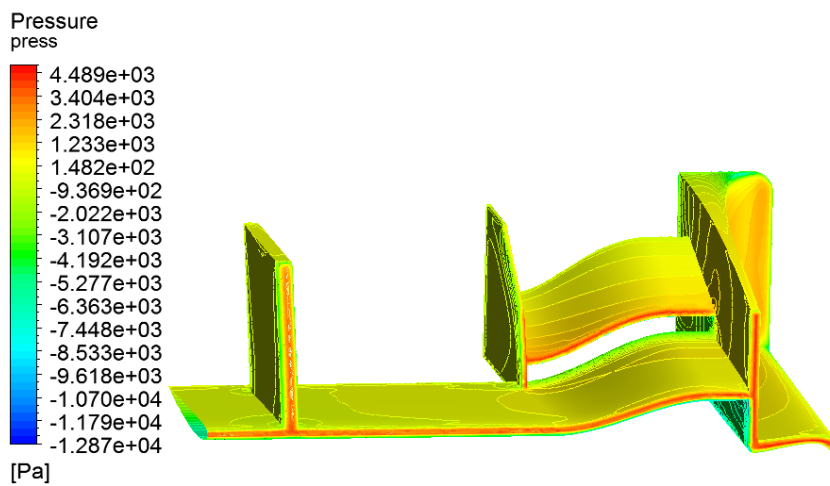


Figura D11. Pressió que suporta l'aleró a 20 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

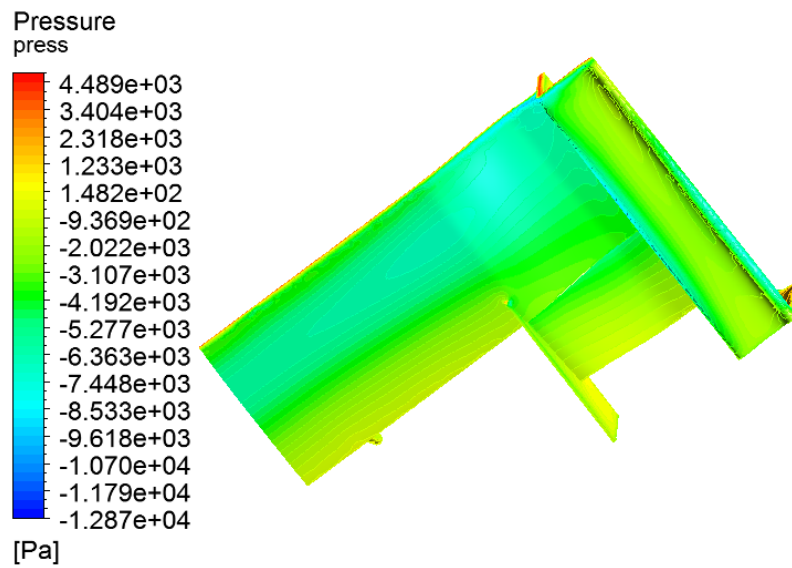


Figura D12. Pressió que suporta l'aleró a 20 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

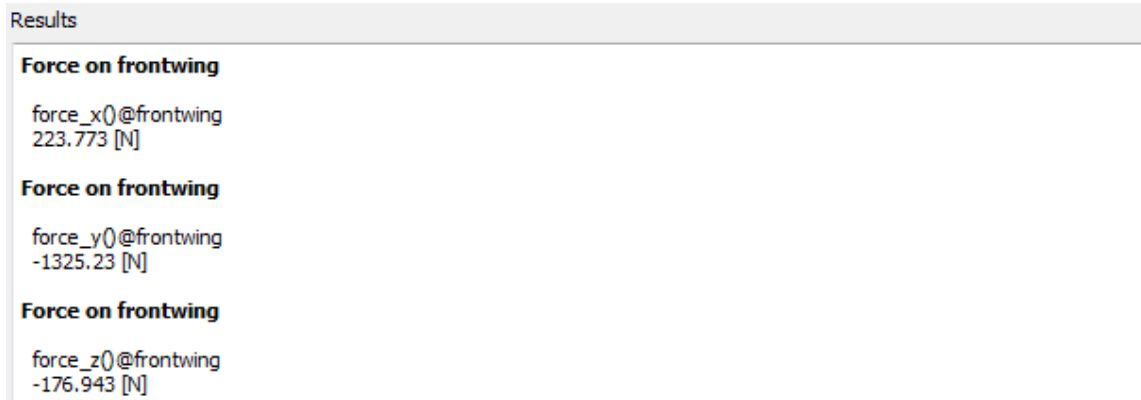


Figura D13. Components de les forces obtingudes.

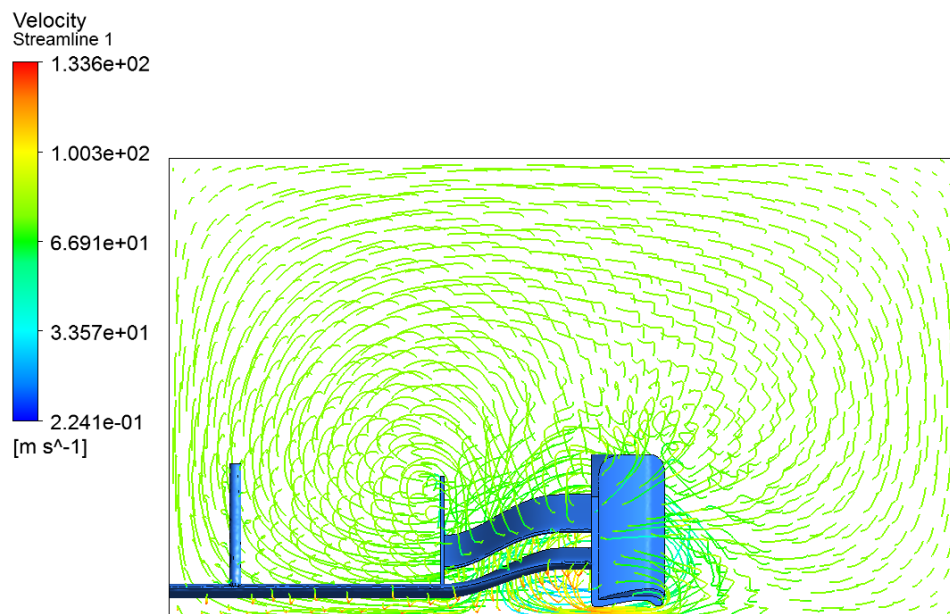


Figura D14. Trajectòria de les línies de fluid a 20 mm d'alçada respecte al terra.

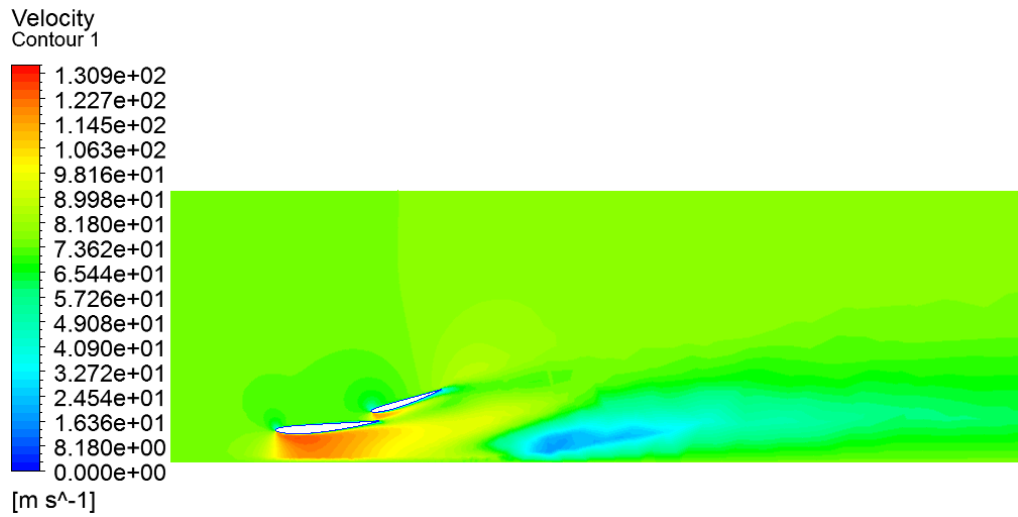


Figura D15. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Alçada de 32'5 mm:

C_L : -0,510.

C_D : 0,101.

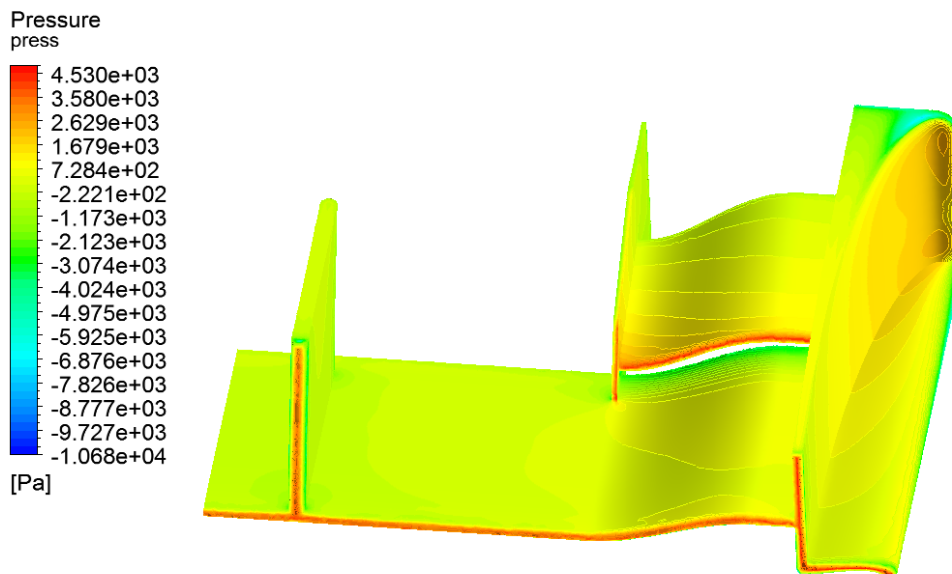


Figura D16. Pressió que suporta l'aleró a 32,5 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

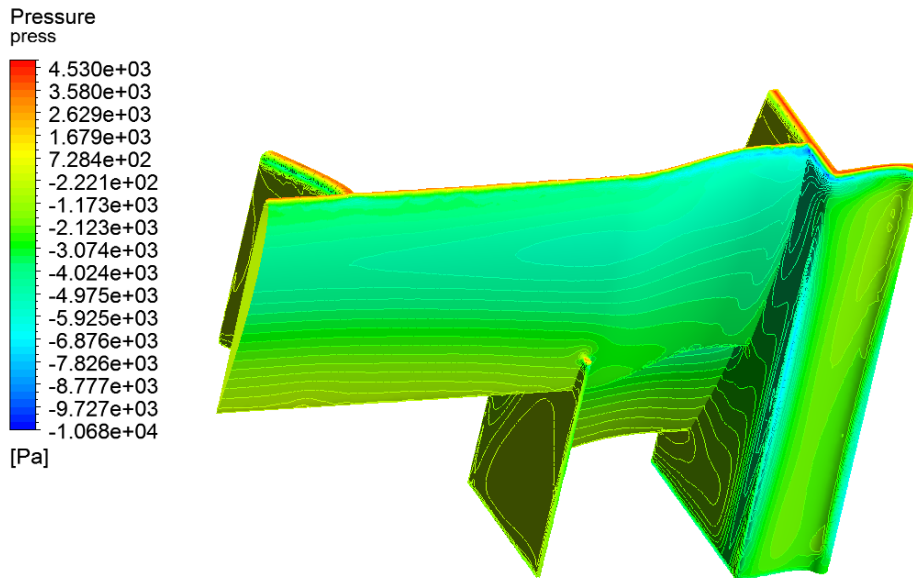


Figura D17. Pressió que suporta l'aleró a 32,5 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

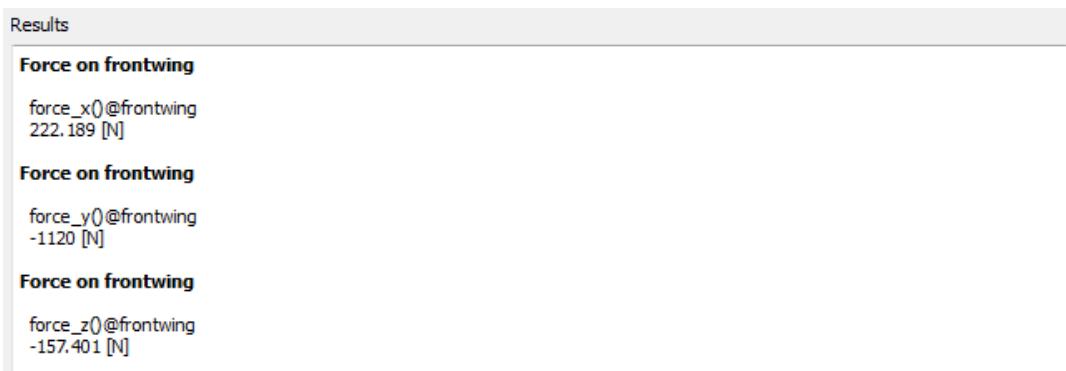


Figura D18. Components de les forces obtingudes.

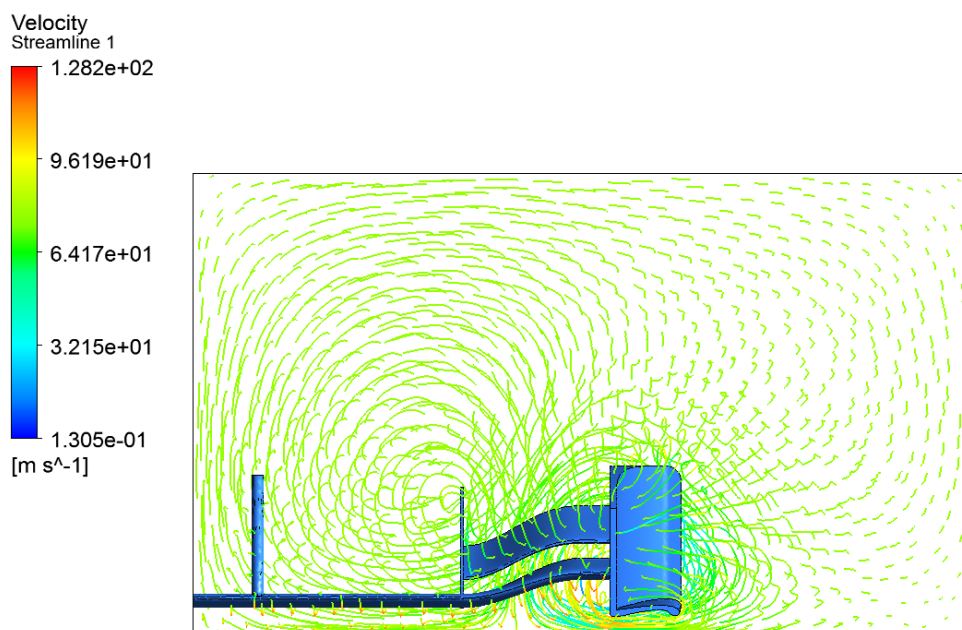


Figura D19. Trajectòria de les línies de fluid a 32,5 mm d'alçada respecte al terra.

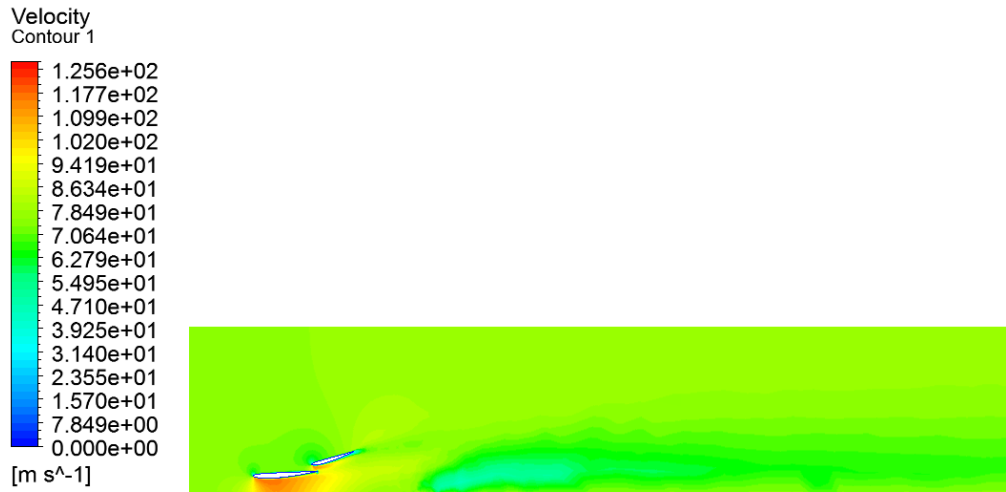


Figura D20. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Alçada de 70 mm:

C_L : -0,388.

C_D : 0,096.

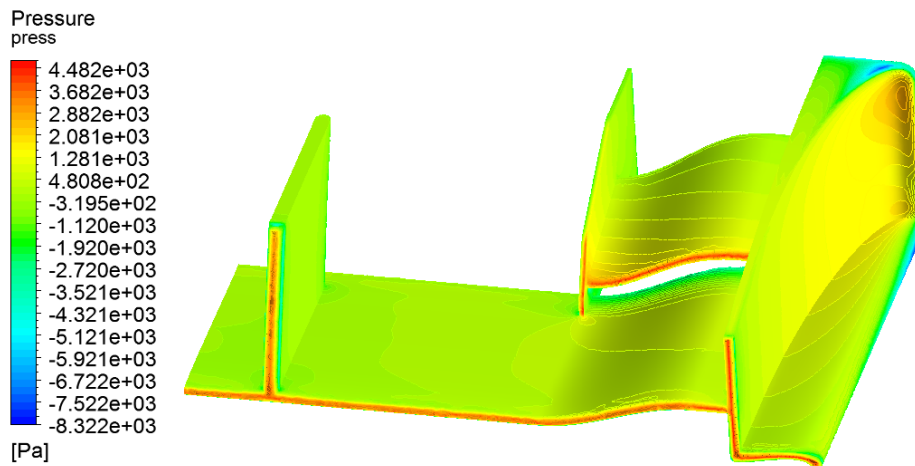


Figura D21. Pressió que suporta l'aleró a 70 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

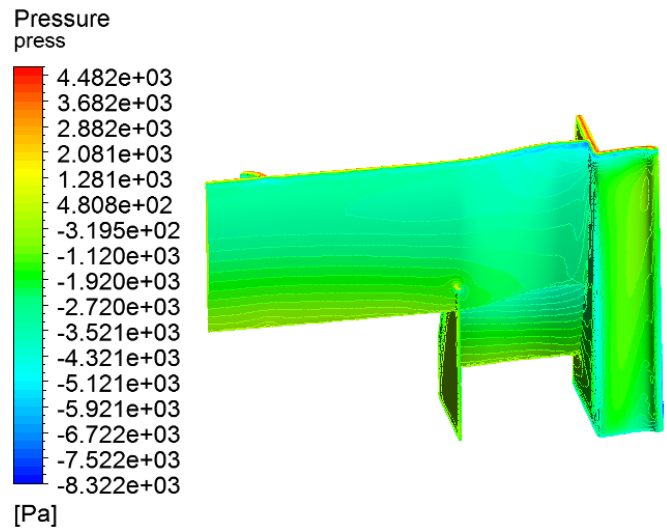


Figura D22. Pressió que suporta l'aleró a 70 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

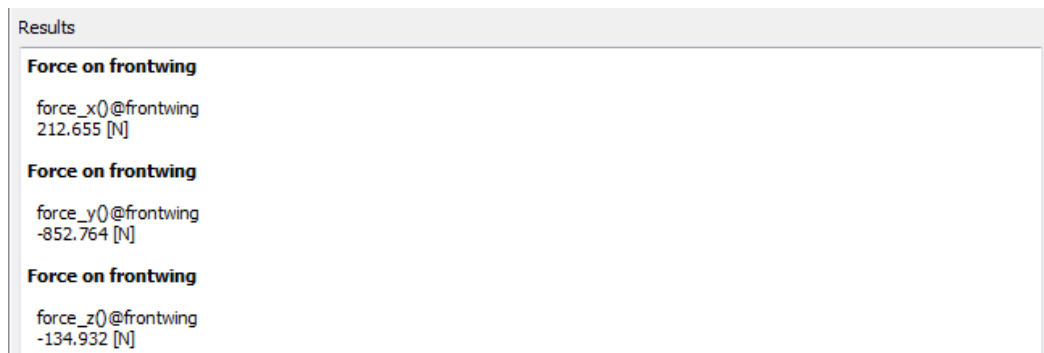


Figura D23. Components de les forces obtingudes.

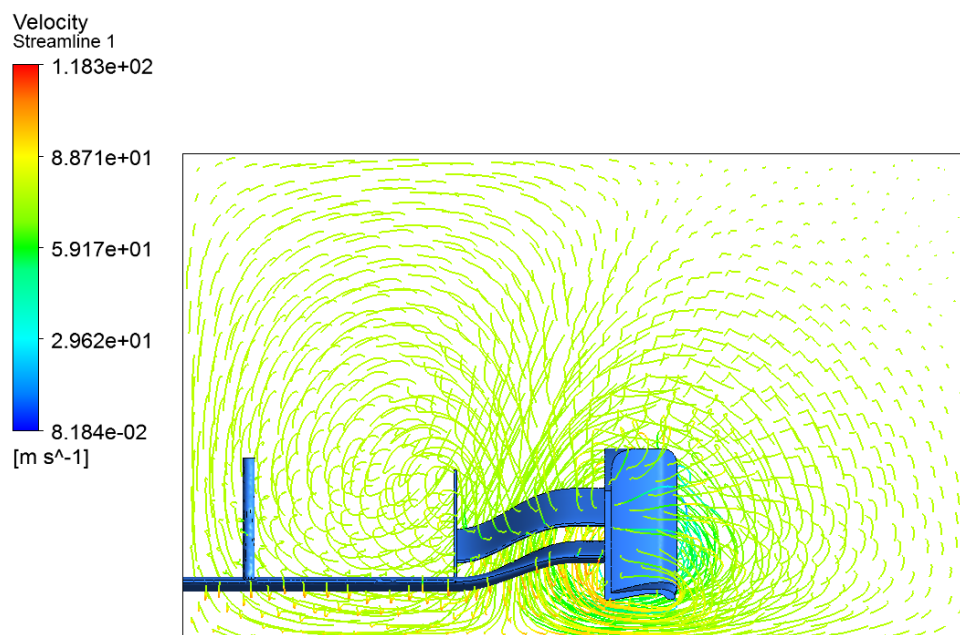


Figura D24. Trajectòria de les línies de fluid a 70 mm d'alçada respecte al terra.

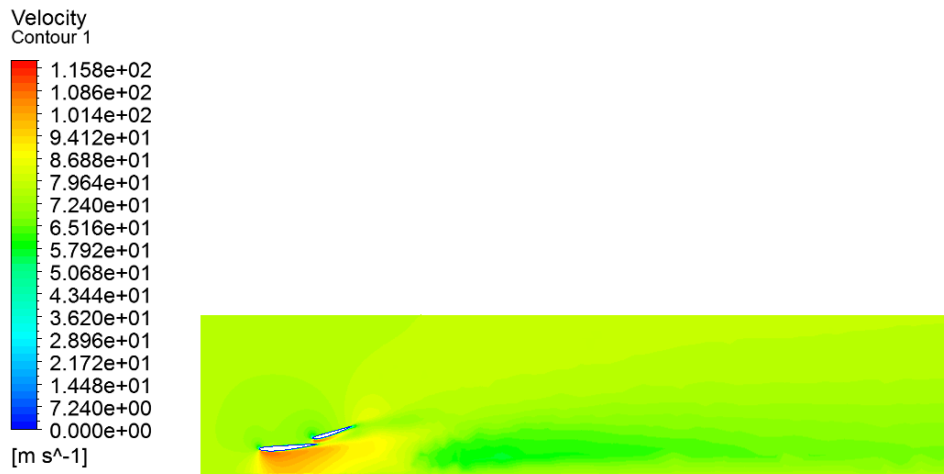


Figura D25. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Alçada de 100 mm:

C_L : -0,345.

C_D : 0,093.

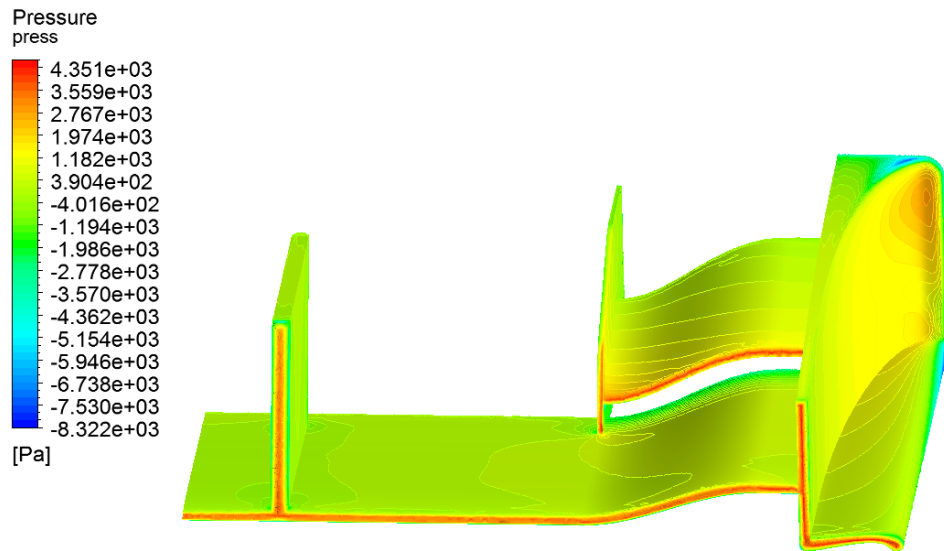


Figura D26. Pressió que suporta l'aleró a 100 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

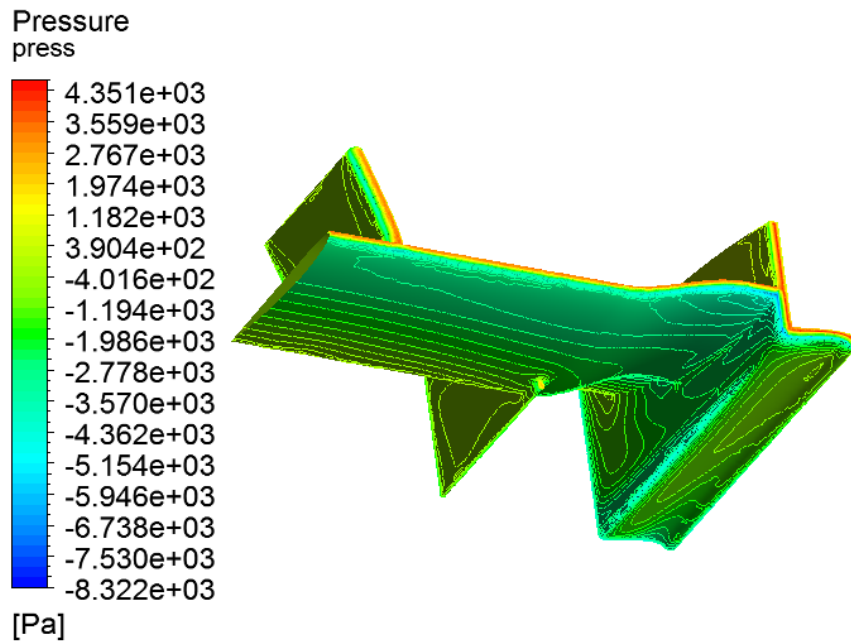


Figura D27. Pressió que suporta l'aleró a 100 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

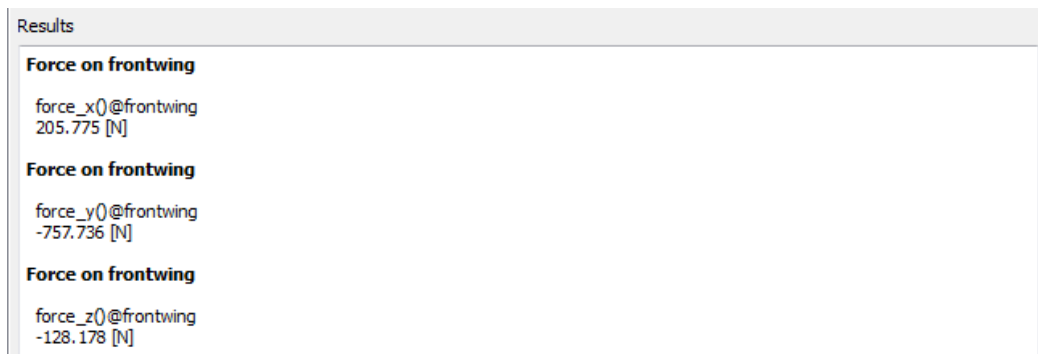


Figura D28. Components de les forces obtingudes.

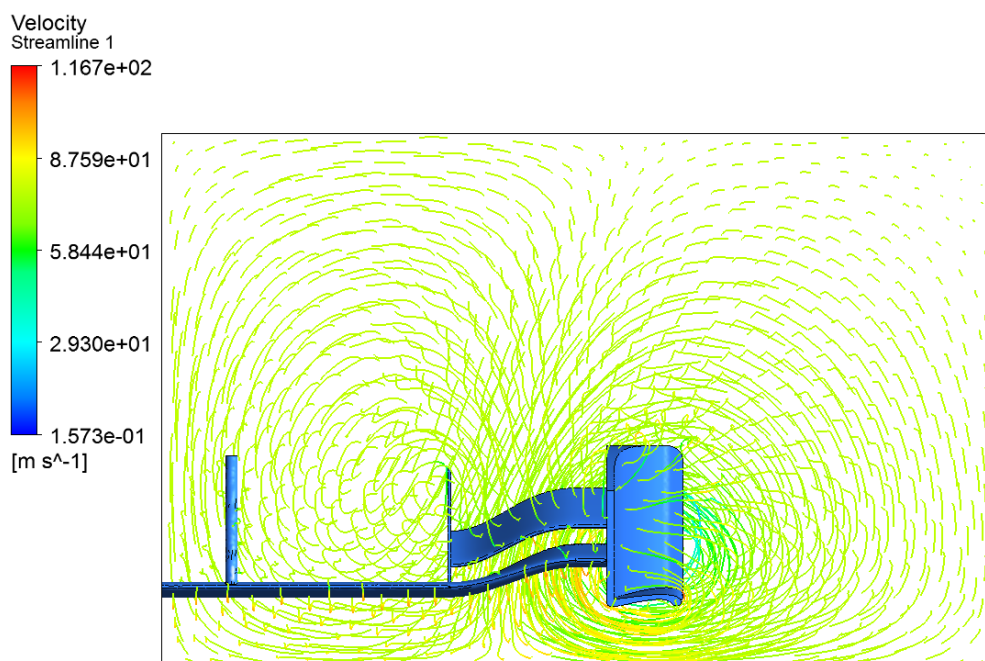


Figura D29. Trajectòria de les línies de fluid a 100 mm d'alçada respecte al terra.

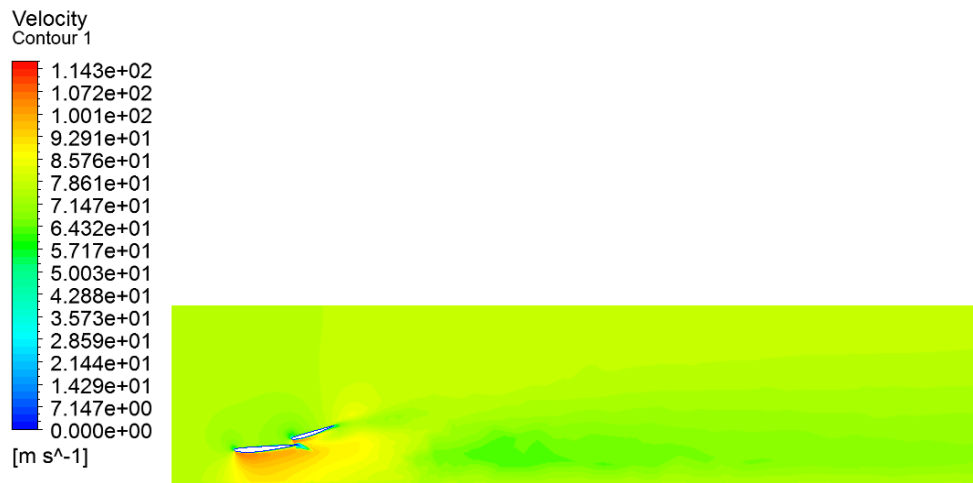


Figura D30. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Alçada de 150 mm:

C_L : -0,311.

C_D : 0,091.

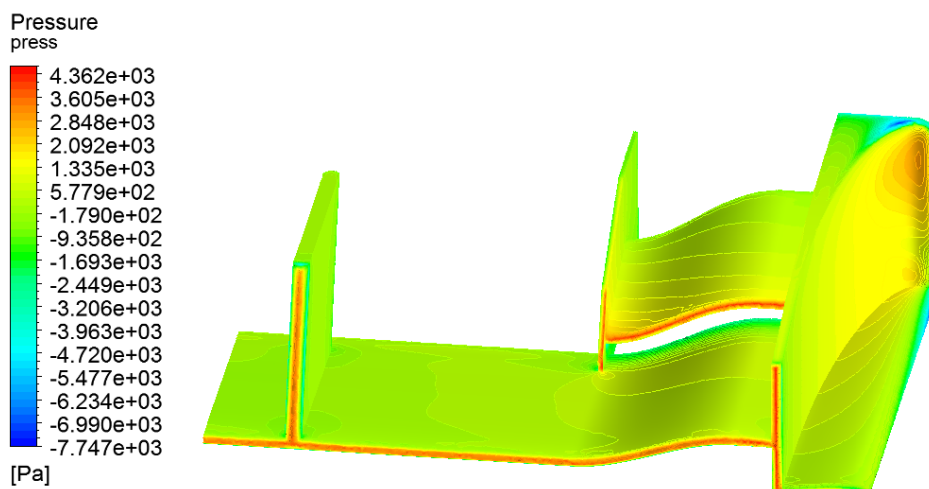


Figura D31. Pressió que suporta l'aleró a 150 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

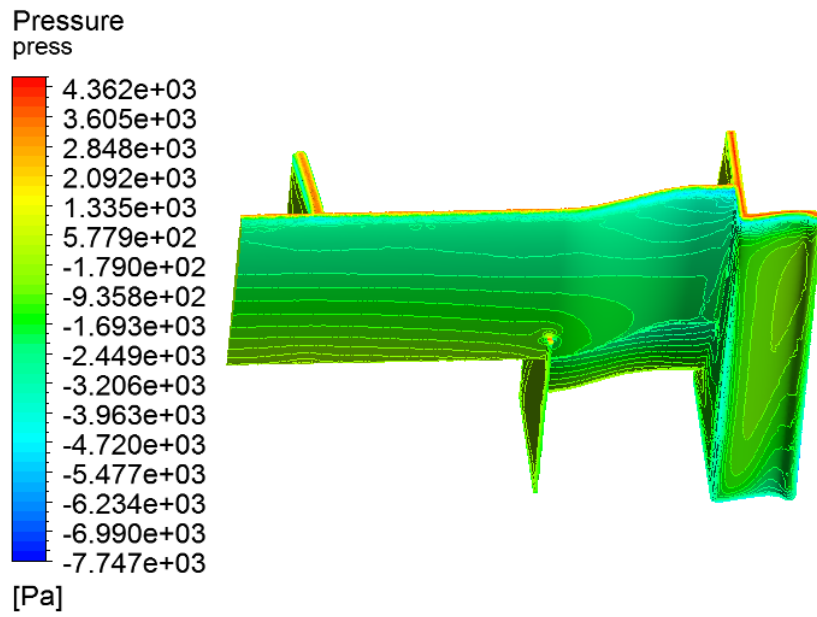


Figura D32. Pressió que suporta l'aleró a 150 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

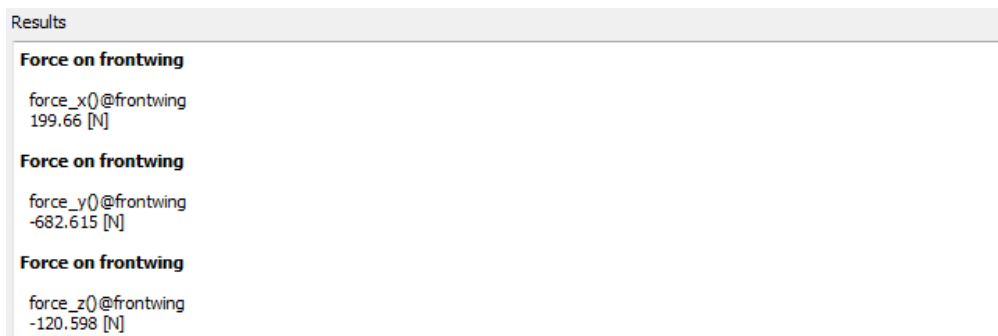


Figura D33. Components de les forces obtingudes.

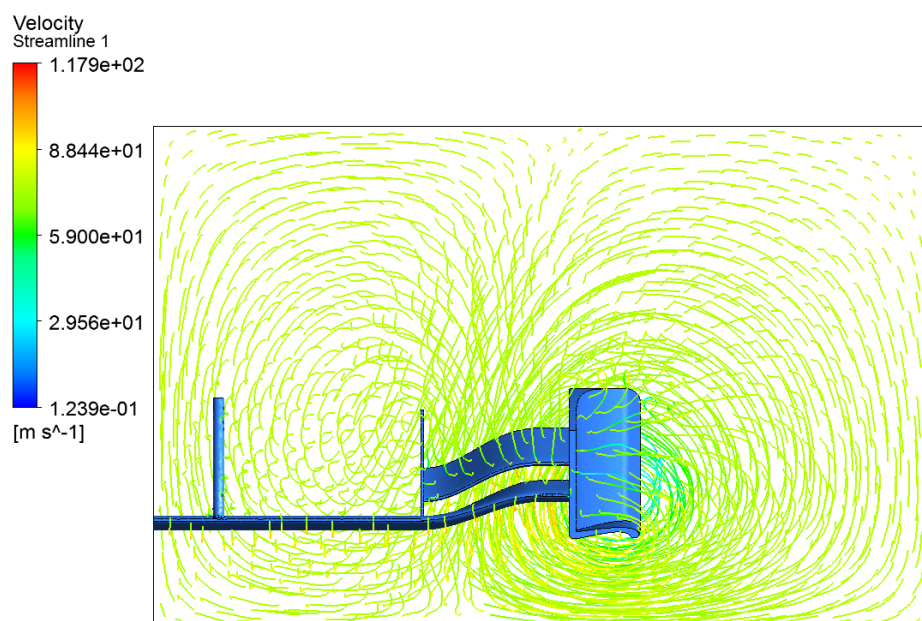


Figura D34. Trajectòria de les línies de fluid a 150 mm d'alçada respecte al terra.

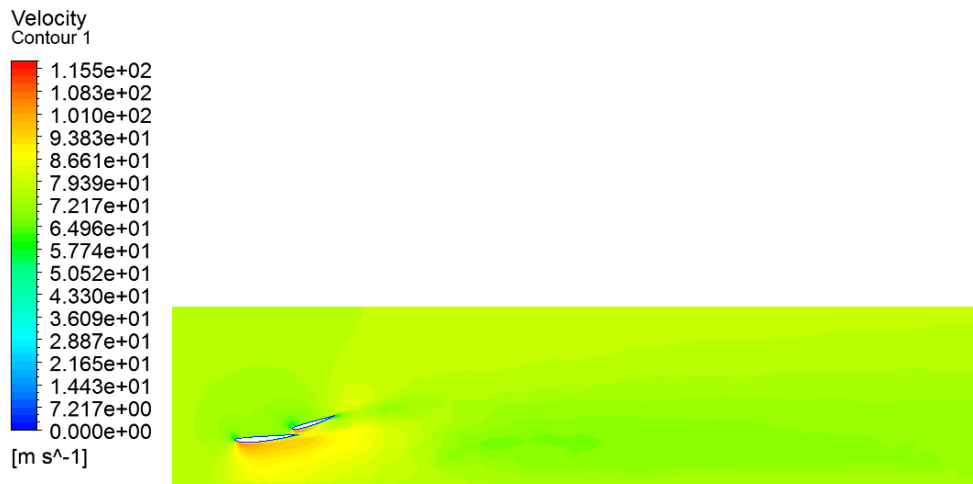


Figura D35. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Alçada de 250 mm:

C_L : -0,283.

C_D : 0,089.

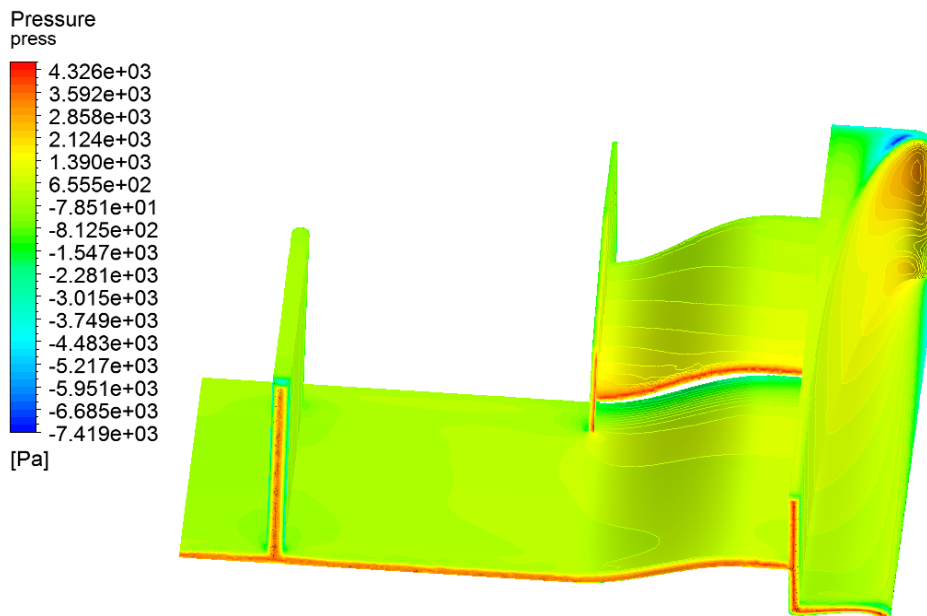


Figura D36. Pressió que suporta l'aleró a 250 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

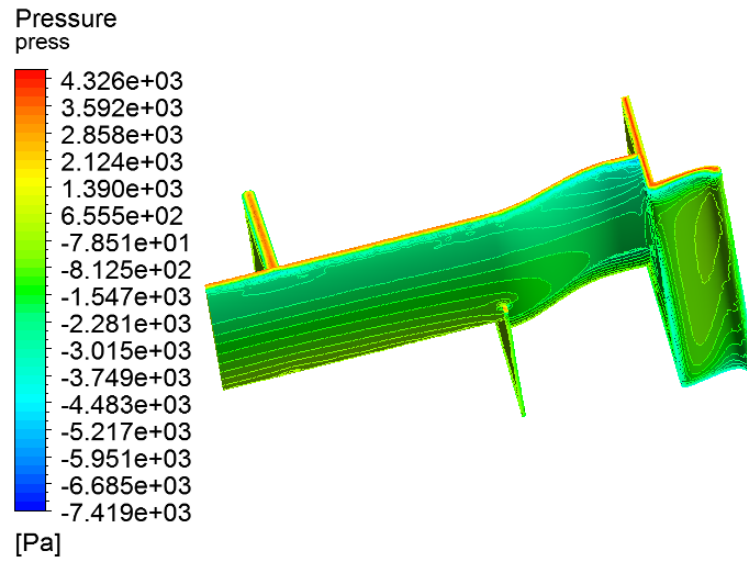


Figura D37. Pressió que suporta l'aleró a 250 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

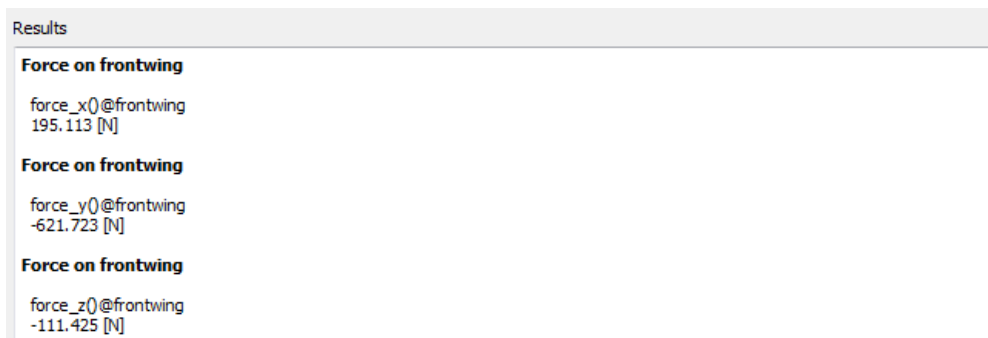


Figura D38. Components de les forces obtingudes.

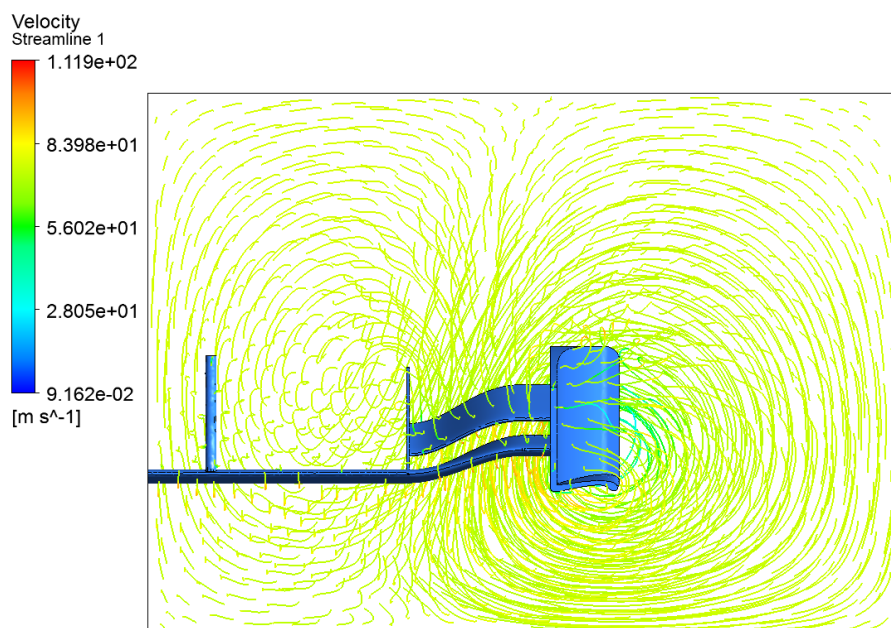


Figura D39. Trajectòria de les línies de fluid a 250 mm d'alçada respecte al terra.

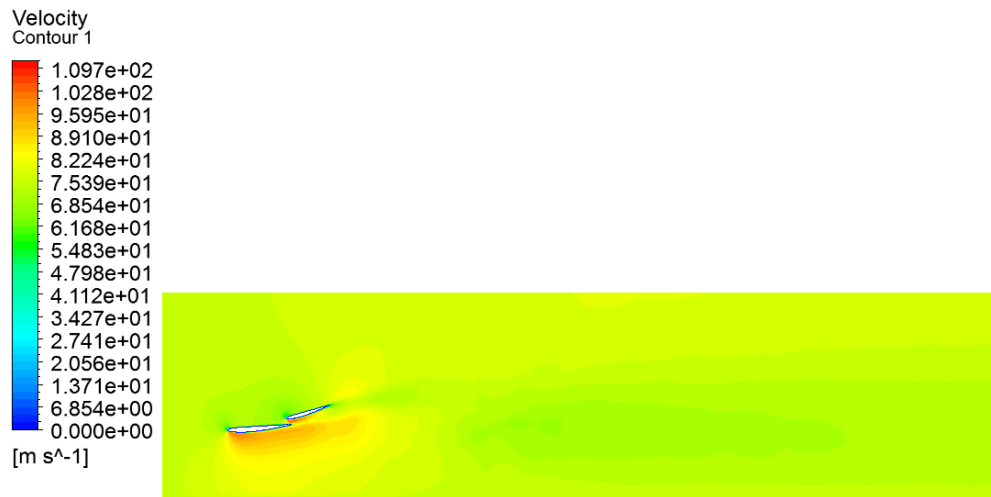


Figura D40. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Alçada de 370 mm:

C_L : -0,271.

C_D : 0,088.

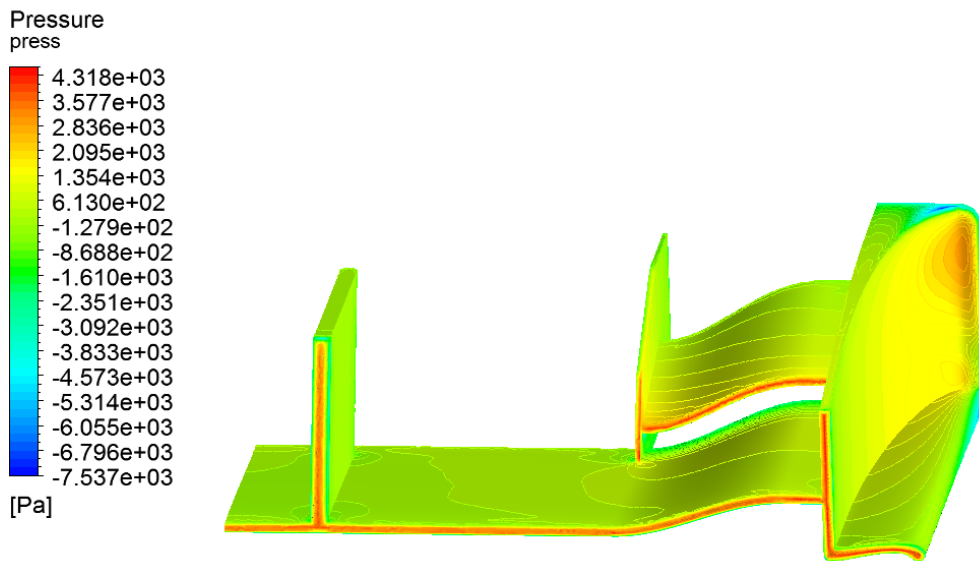


Figura D41. Pressió que suporta l'aleró a 370 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

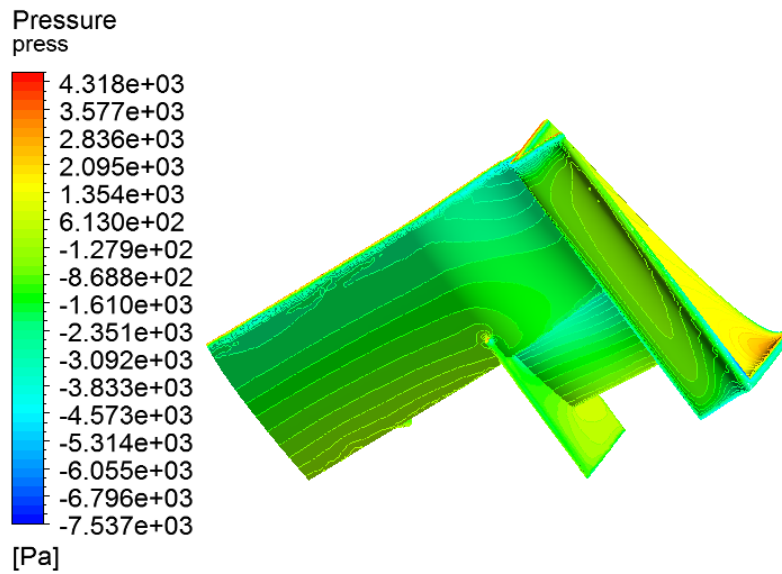


Figura D42. Pressió que suporta l'aleró a 370 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

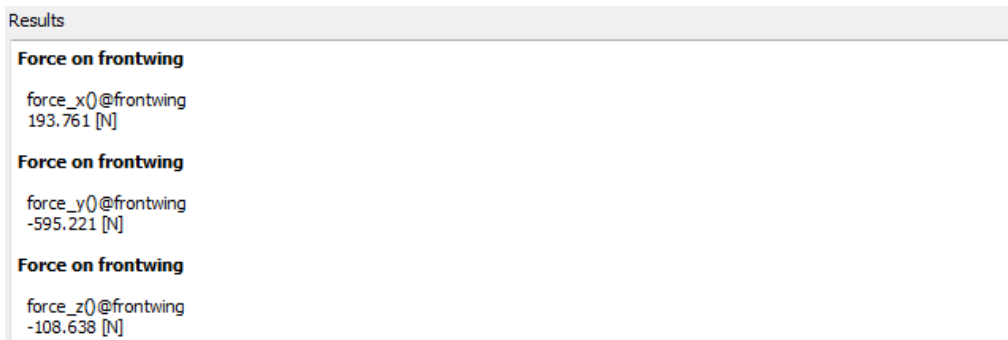


Figura D43. Components de les forces obtingudes.

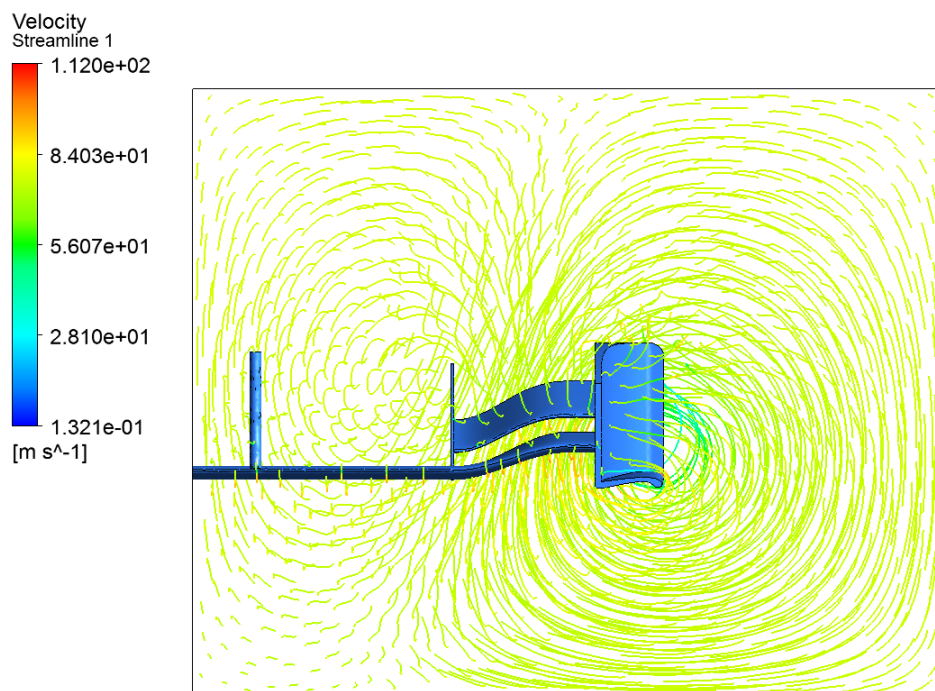


Figura D44. Trajectòria de les línies de fluid a 370 mm d'alçada respecte al terra.

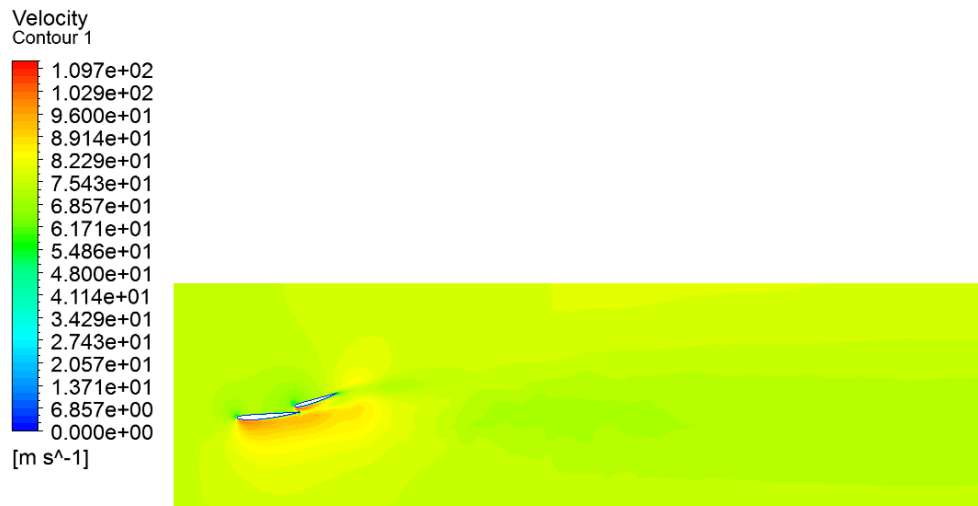


Figura D45. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

Alçada de 500 mm:

C_L : -0,267.

C_D : 0,087.

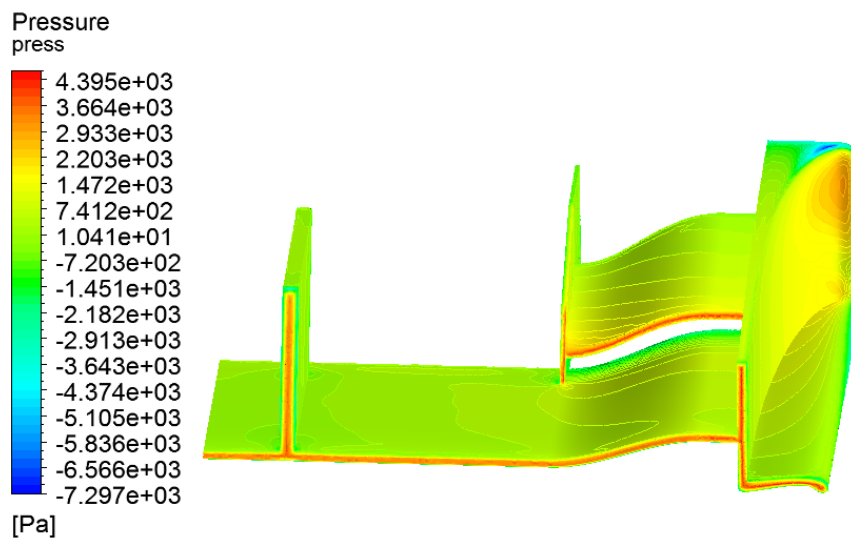


Figura D46. Pressió que suporta l'aleró a 500 mm d'alçada respecte al terra, part superior.

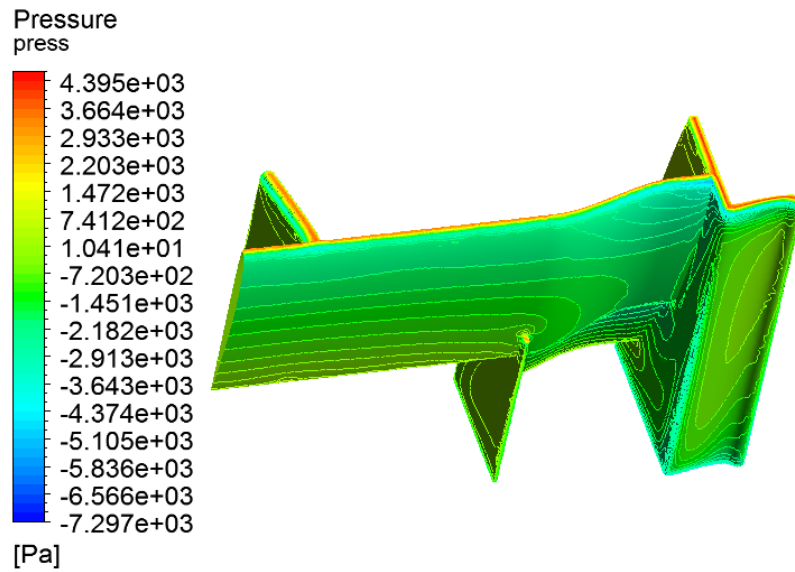


Figura D47. Pressió que suporta l'aleró a 500 mm d'alçada respecte al terra, part inferior.

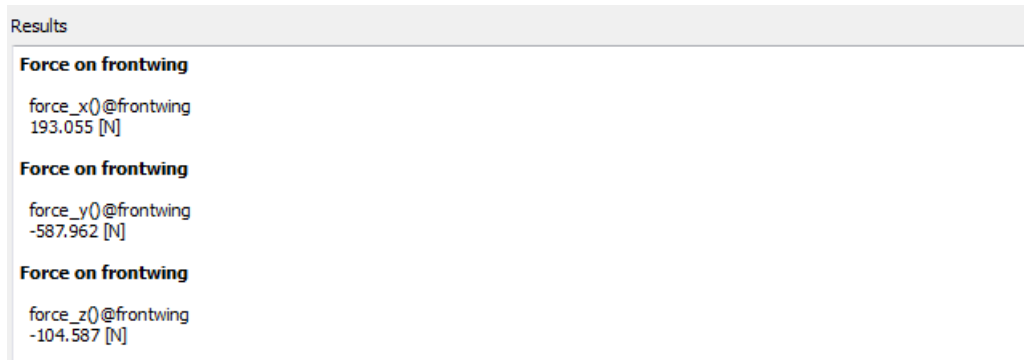


Figura D48. Components de les forces obtingudes.

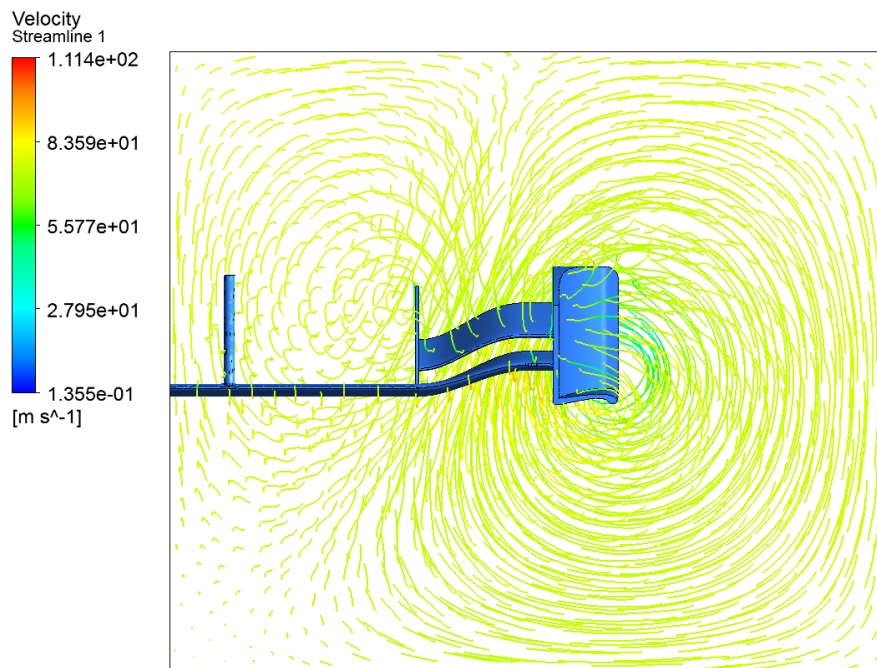


Figura D49. Trajectòria de les línies de fluid a 500 mm d'alçada respecte al terra.

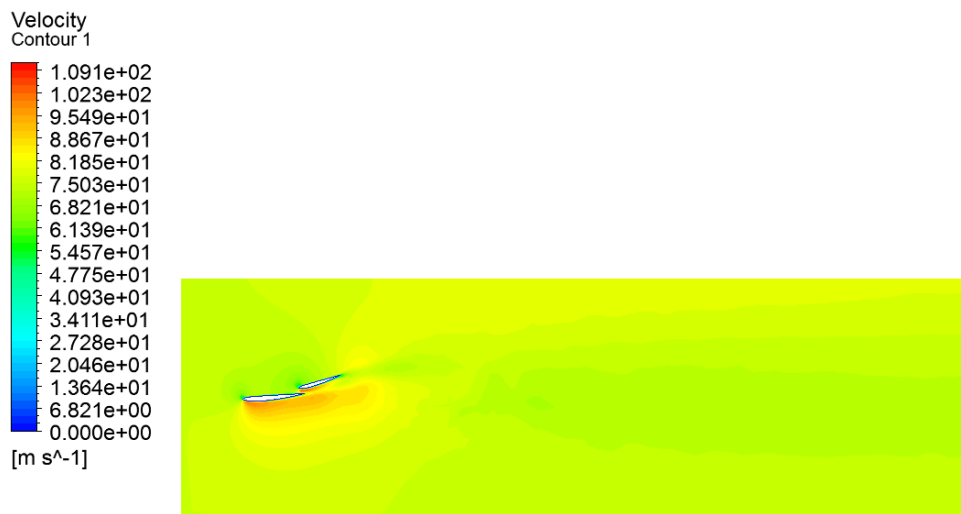


Figura D50. Contorn de velocitat en un pla paral·lel al de simetria.

ANNEX E: RESULTATS DE L'ANÀLISI ESTRUCTURAL

E.- RESULTATS DE L'ANÀLISI ESTRUCTURAL

E.1 Introducció

Aquest annex conté la resta de figures dels resultats de l'anàlisi estructural de l'aleró relacionada amb l'estudi dels coeficients aerodinàmics en funció de l'angle d'atac, tal i com s'explica detalladament en l'apartat 3.4 *Anàlisi Static Structural*, i posteriorment els resultats en l'apartat 4.5 *Resultats de l'anàlisi estructural de l'aleró*.

E.2 Resultats de les simulacions

Angle d'atac 4°:

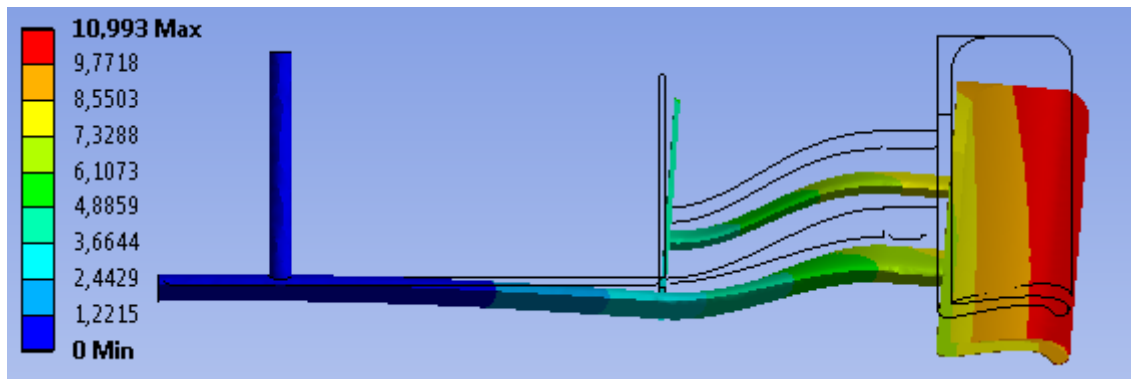


Figura E1. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 5°:

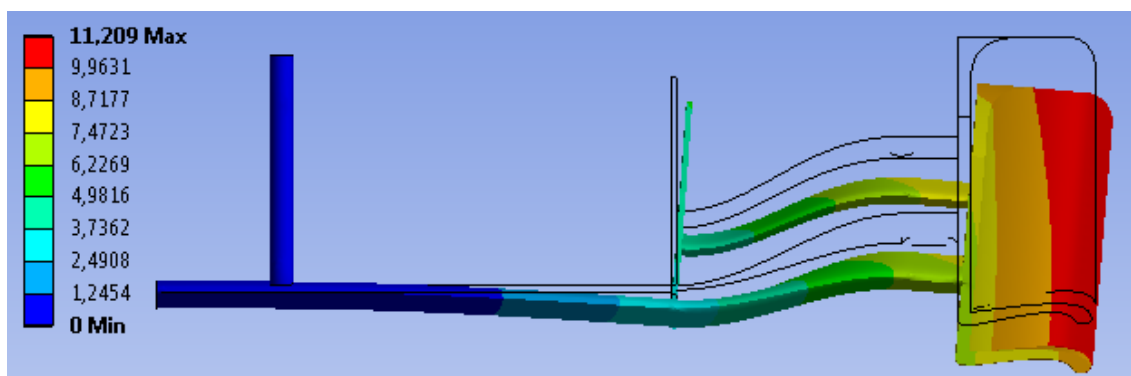


Figura E2. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 6°:

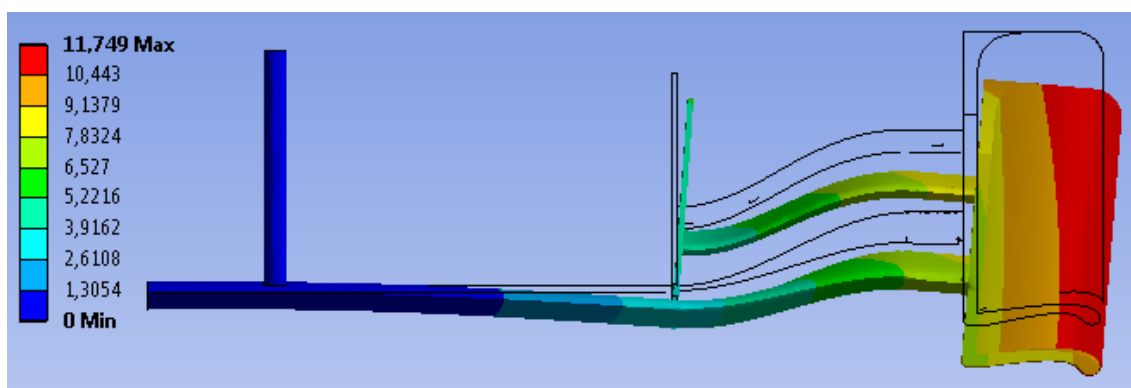


Figura E3. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 7°:

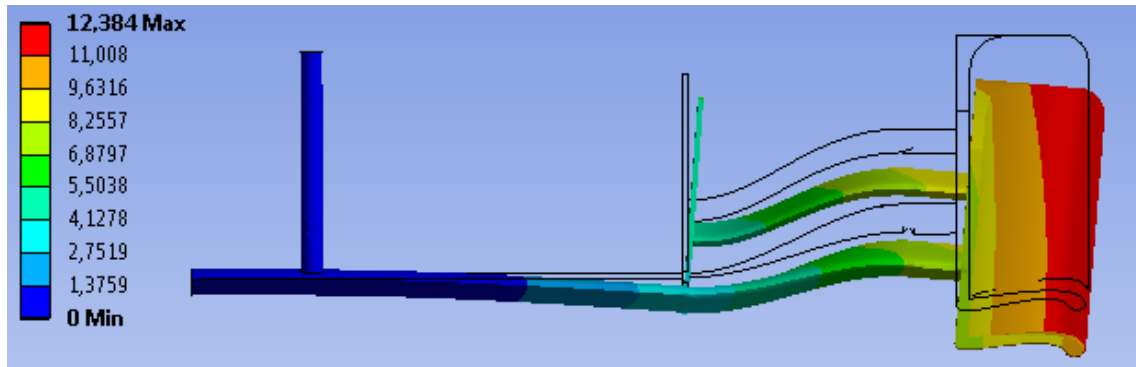


Figura E4. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 8°:

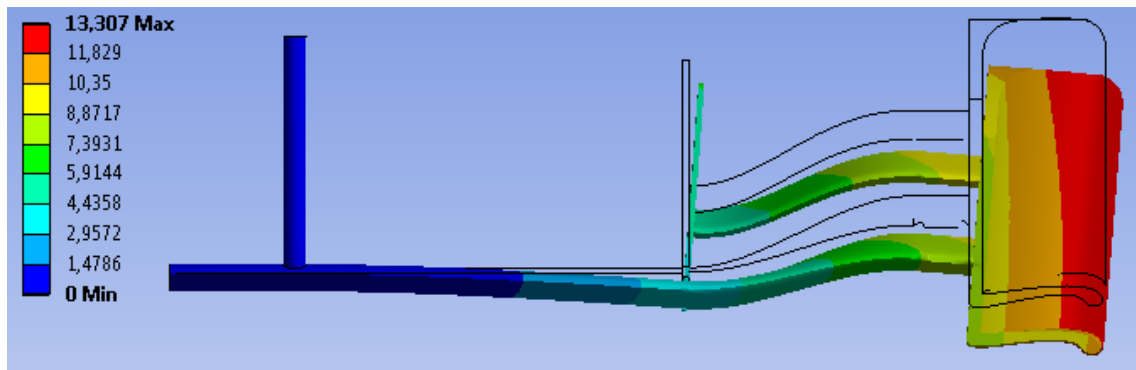


Figura E5. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 9°:

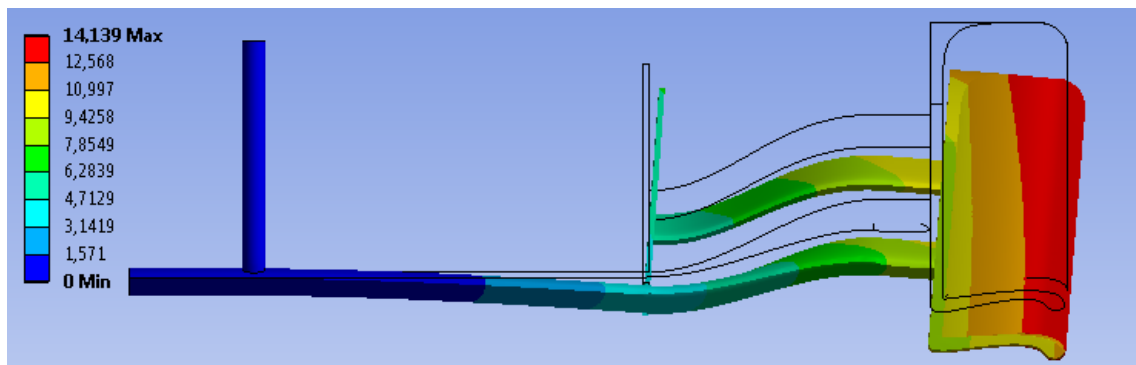


Figura E6. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 10°:

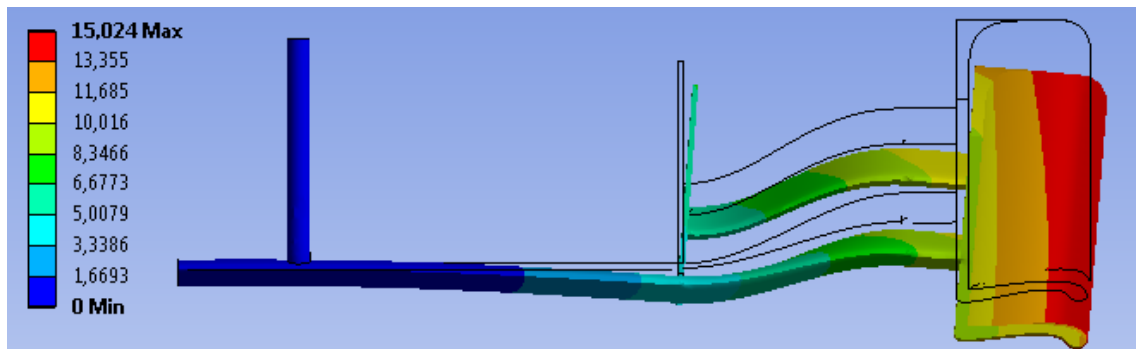


Figura E7. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 11°:

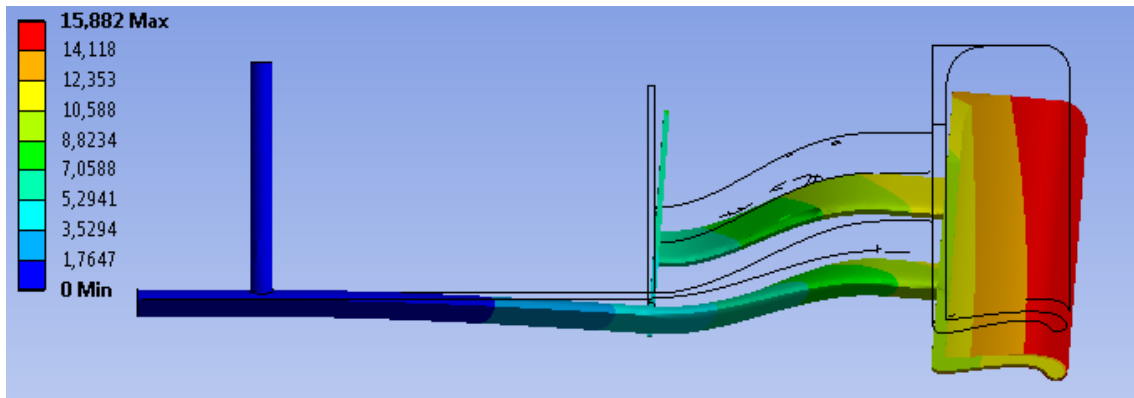


Figura E8. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 12°:

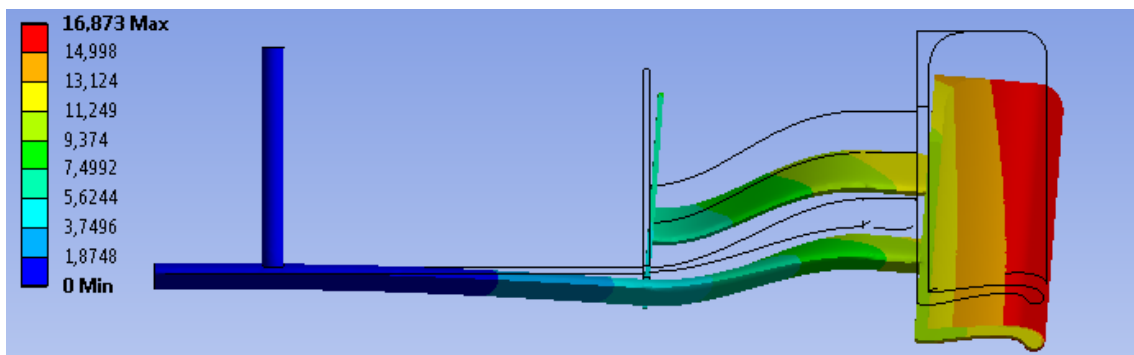


Figura E9. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 13°:

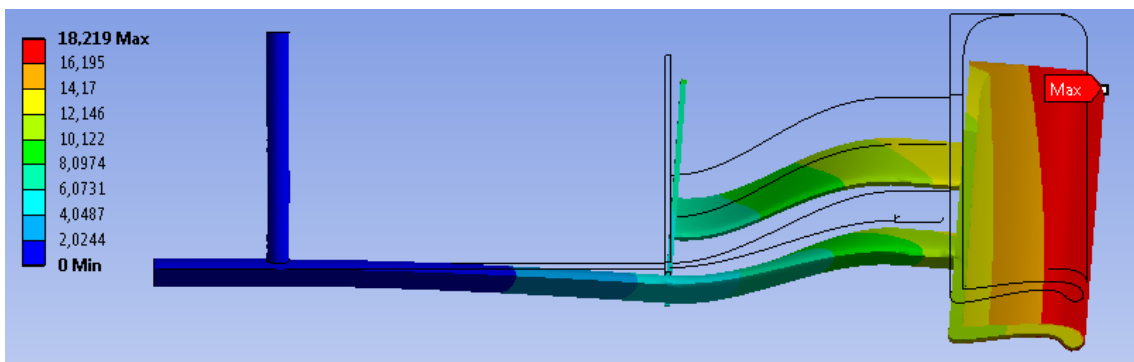


Figura E10. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 14°:

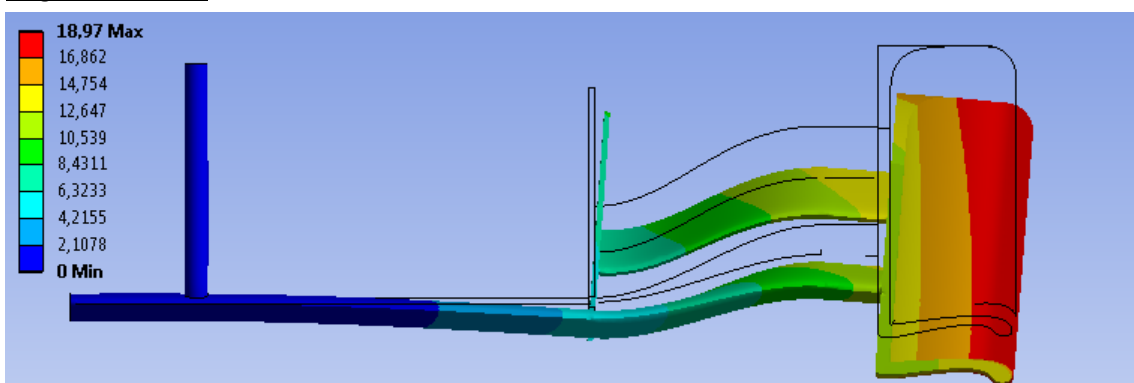


Figura E11. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 15°:

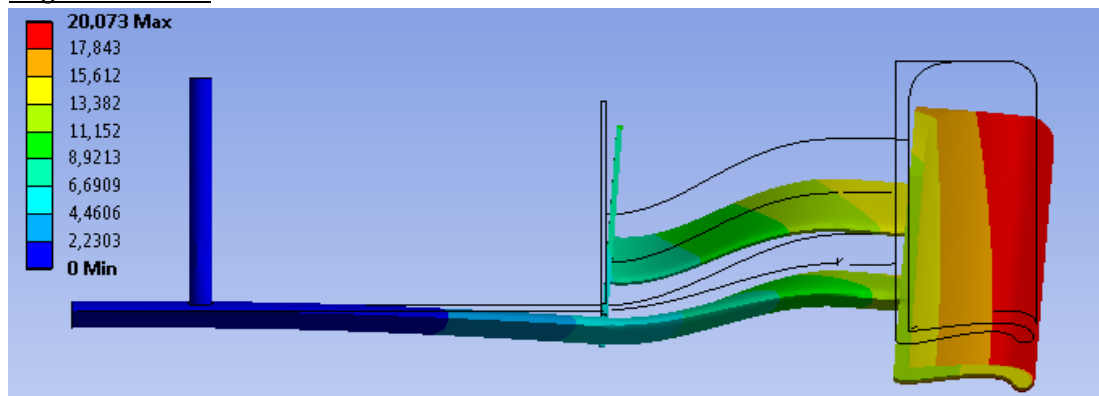


Figura E12. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 16°:

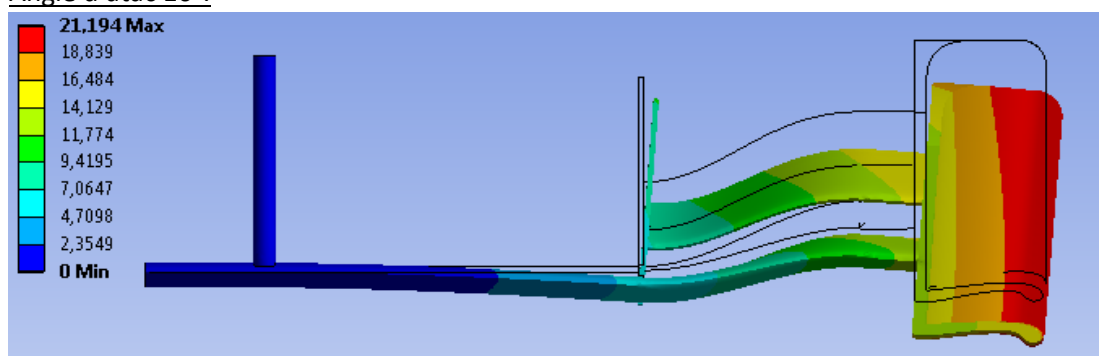


Figura E13. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 17°:

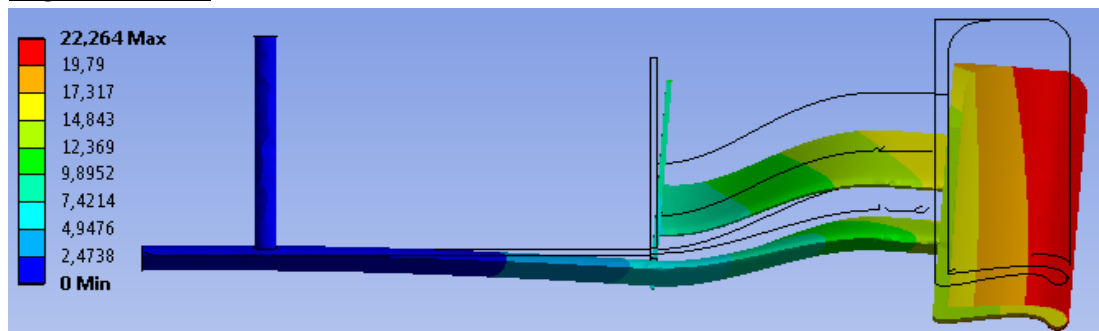


Figura E14. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 18°:

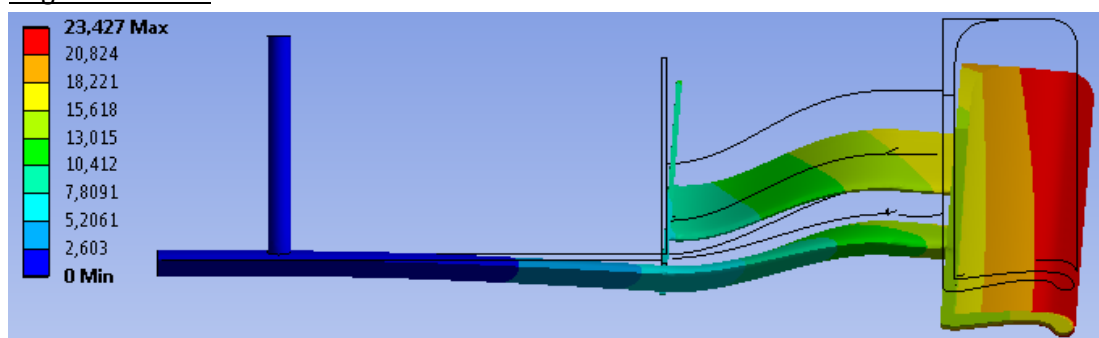


Figura E15. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 19°:

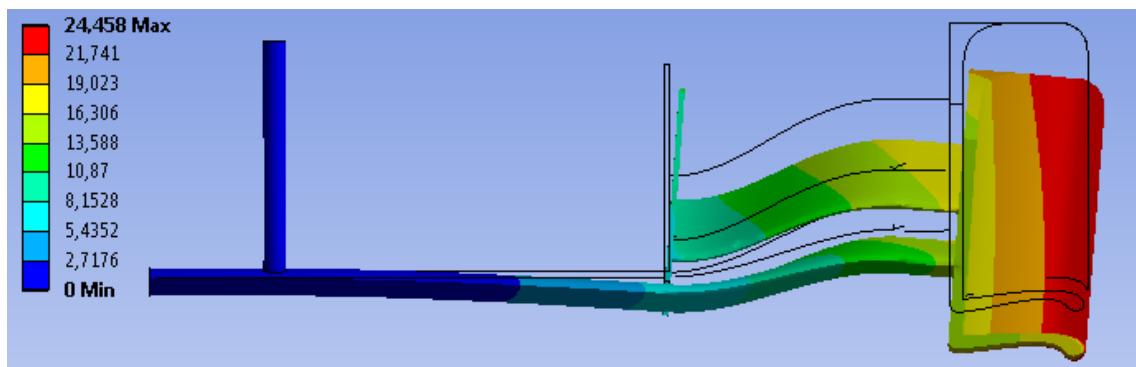


Figura E16. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 20°:

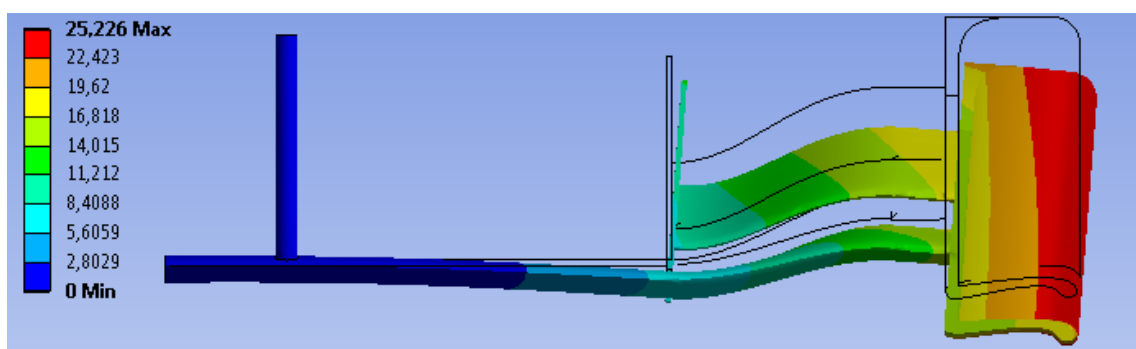


Figura E17. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 21°:

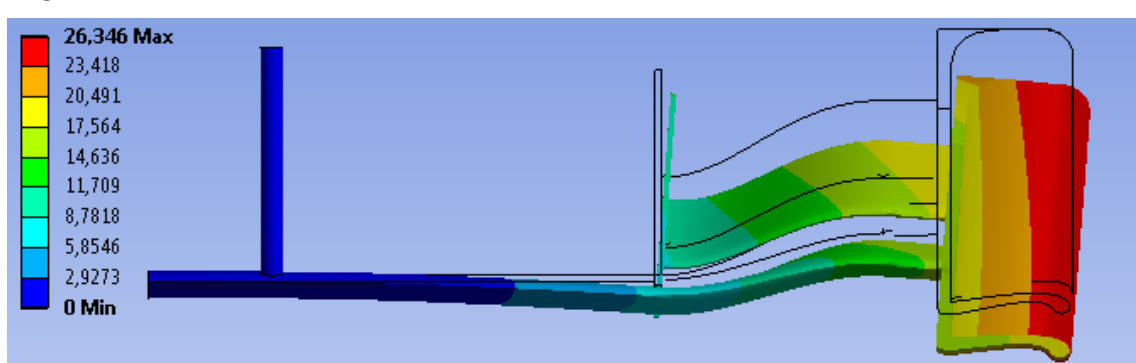


Figura E18. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 22°:

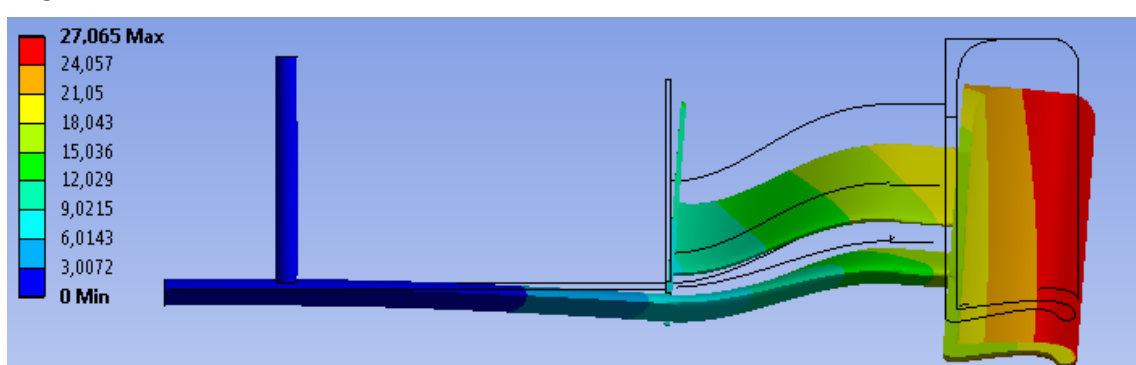


Figura E19. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 23°:

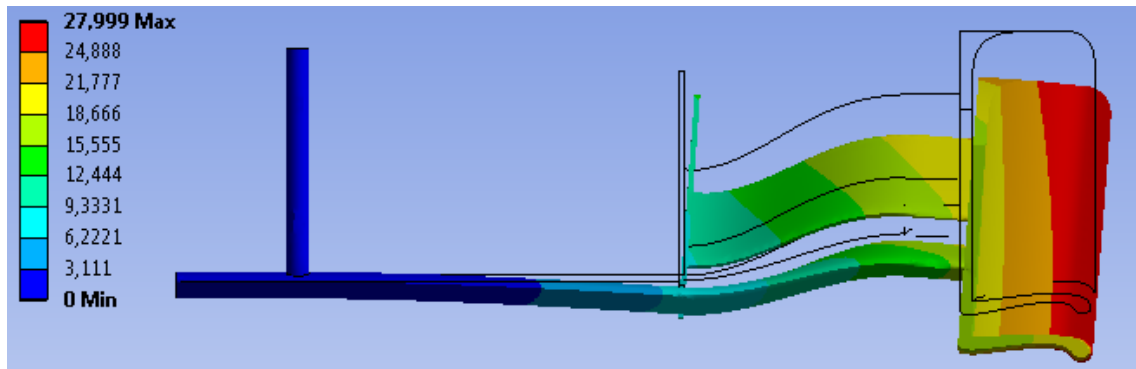


Figura E20. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 24°:

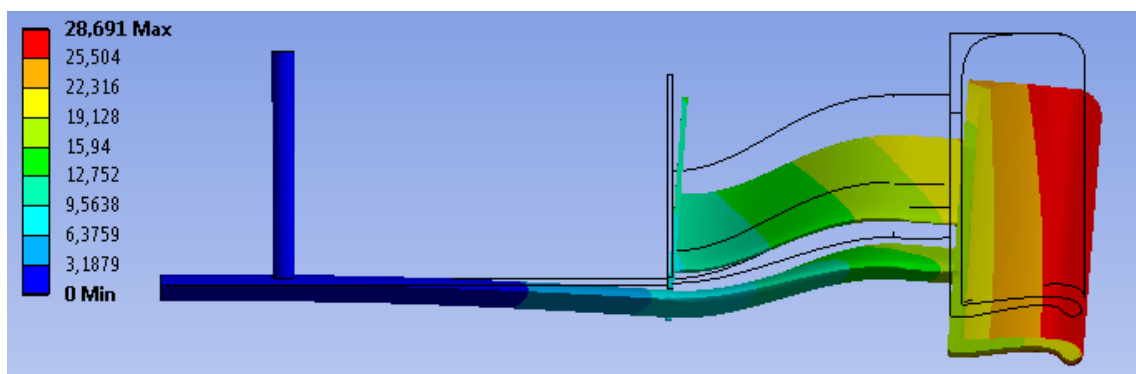


Figura E21. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 25°:

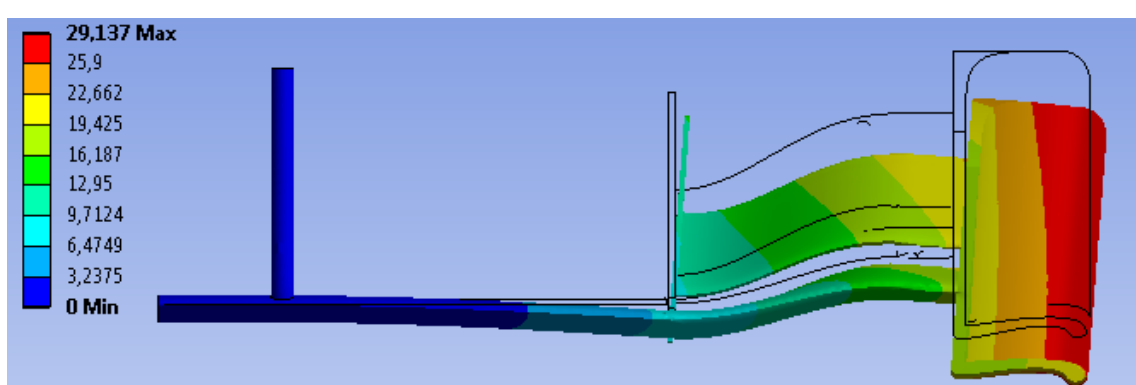


Figura E22. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 26°:

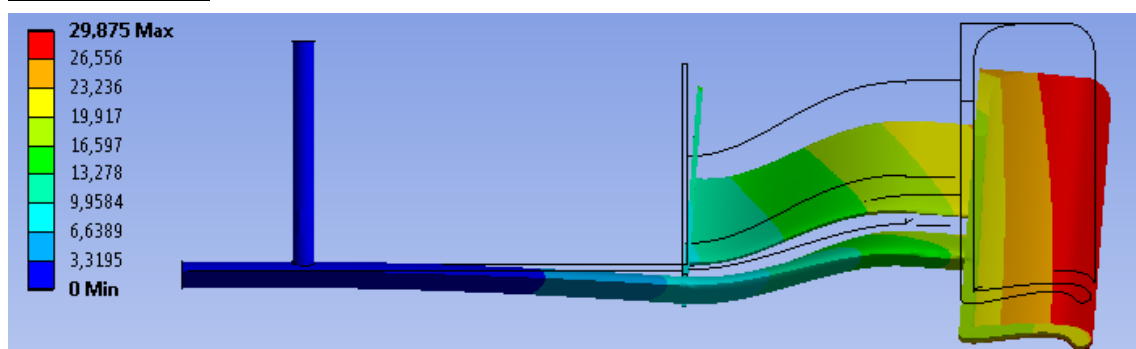


Figura E23. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 27°:

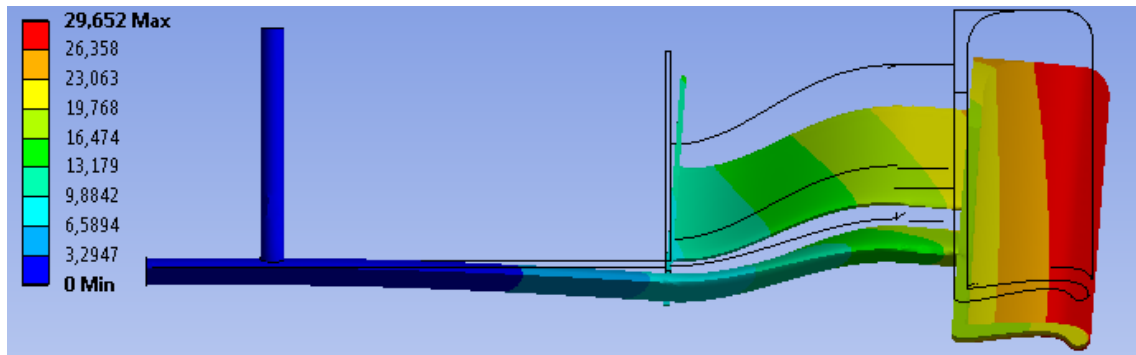


Figura E24. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 28°:

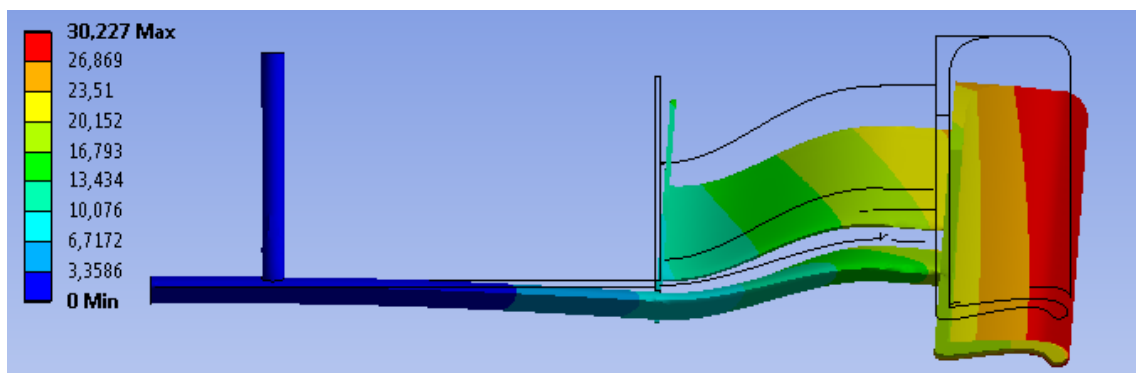


Figura E25. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 29°:

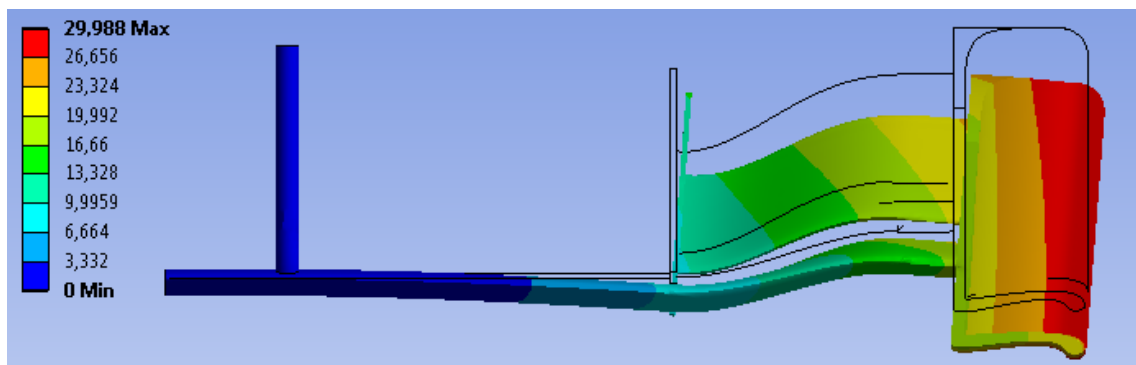


Figura E26. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 30°:

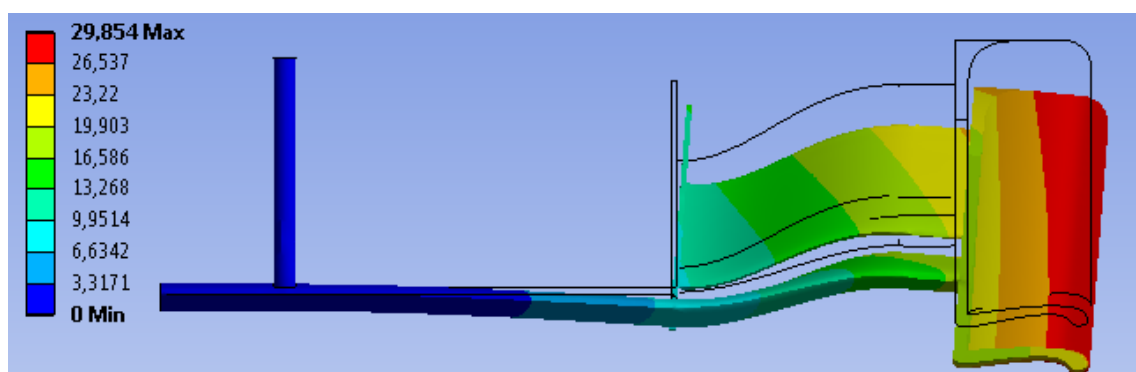


Figura E27. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 31°:

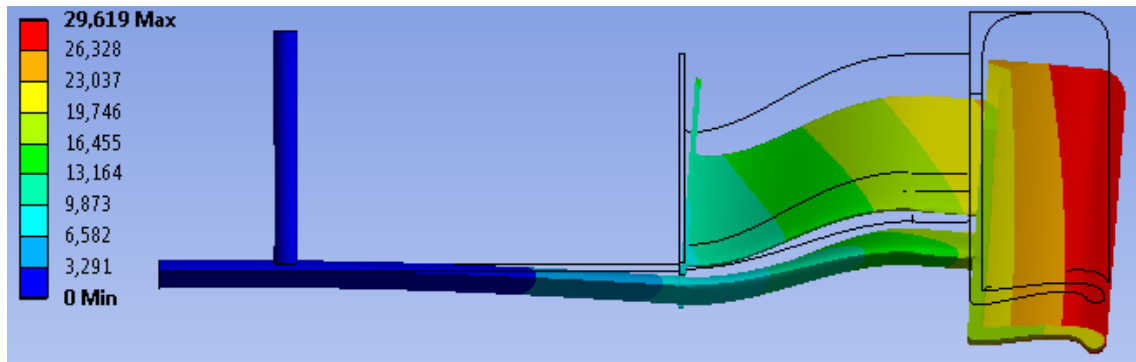


Figura E28. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 32°:

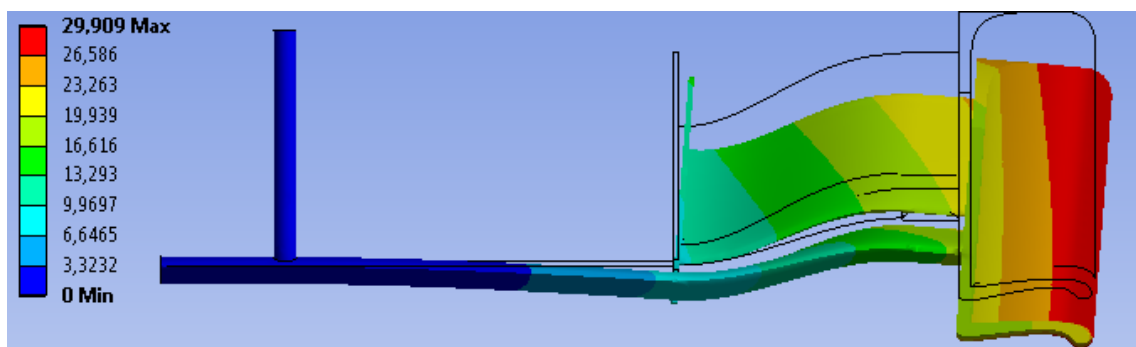


Figura E29. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 33°:

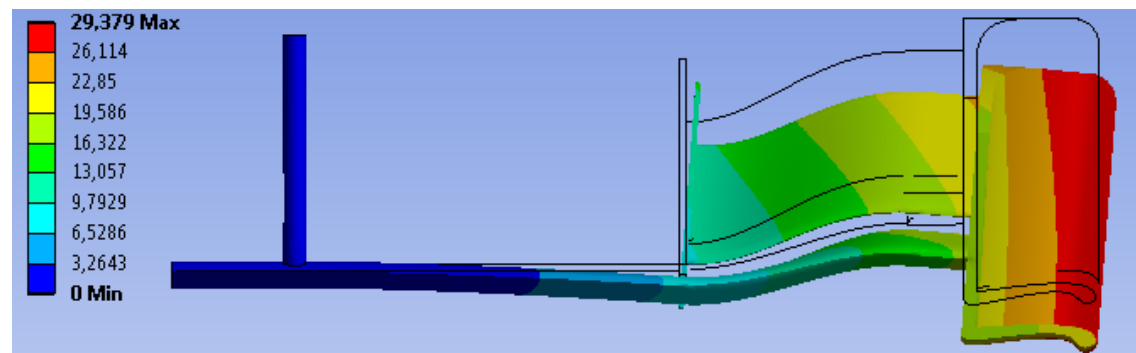


Figura E30. Deformació de l'aleró, unitats en mm.

Angle d'atac 34°:

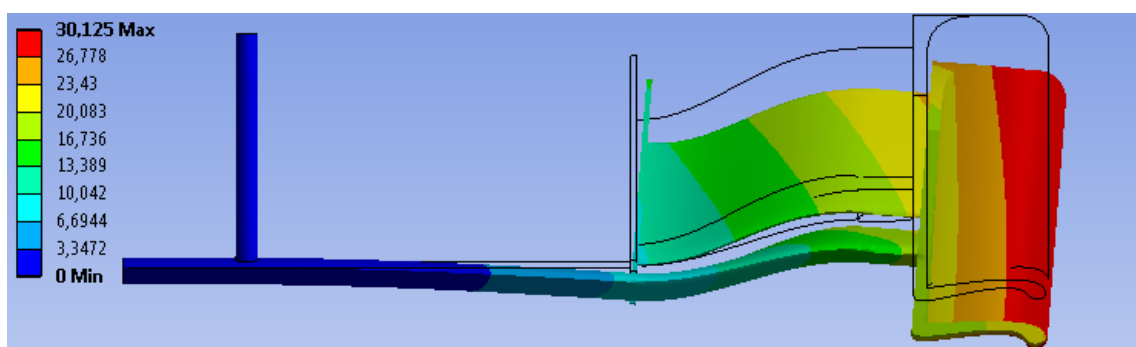


Figura E31. Deformació de l'aleró, unitats en mm.