

ÍNDEX

1	INTRODUCCIÓ.....	1
1.1	Antecedents	1
1.2	Objecte	1
1.3	Especificacions i abast	2
2	INTRODUCCIÓ A LA FORMULA STUDENT	3
2.1	Origen i història	3
2.2	Objectius	4
2.3	Estructura de la competició	5
2.3.1	Test estàtic	5
2.3.2	Test dinàmic	5
3	APÈNDIXS AERODINÀMICS.....	7
3.1	Carrosseria.....	7
3.2	Aleró posterior	9
3.3	Aleró davanter.....	10
3.4	Derives.....	11
3.5	Fons pla i difusors.....	12
3.6	Spoilers	14
3.7	Divisors de flux	16
3.8	Eficiència aerodinàmica	18
4	VALIDACIÓ DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓ.....	19
4.1	Introducció al CFD	19
4.2	Procediment a seguir	20
4.2.1	Pre-procés	20
4.2.2	Resolució numèrica	21
4.2.3	Post-procés.....	21
4.3	Estudi del C_D de diverses figures tridimensionals senzilles	21
5	ETAPES DE LA SIMULACIÓ	27
5.1	Construcció dels models	27
5.1.1	Limitacions de la normativa	27
5.1.2	Disseny de la carrosseria	28
5.1.3	Disseny del difusor	30

5.1.4	Disseny dels alerons	31
5.1.5	Altres elements del cotxe.....	31
5.1.6	Domini computacional	32
5.2	Procés de mallat	33
5.3	Condicions de contorn	35
5.4	Resolució numèrica	37
5.5	Visualització i interpretació dels resultats	39
6	ANÀLISI DELS RESULTATS	40
6.1	Distribució de pressions sobre el vehicle	40
6.2	Distribució de pressions al voltant del vehicle.....	43
6.3	Velocitats de l'aire al voltant del vehicle	48
6.4	Vectors de velocitat de l'aire al voltant del vehicle	52
6.5	Coeficients aerodinàmics	57
7	RESUM DEL PRESSUPOST	59
8	CONCLUSIONS	60
9	BIBLIOGRAFIA.....	62
	Llibres	62
	Articles.....	62
	Adreces electròniques.....	62
	Projectes/Treballs Fi de Carrera.....	63
A	MECÀNICA DE FLUIDS	65
A.1	Definició de fluid	65
A.2	Forces i pressions	65
A.3	Propietats dels fluids.....	67
A.4	Flux de fluid	68
A.5	Classificació dels fluxos	69
A.6	Equació de continuïtat	70
A.7	Equació de Bernoulli.....	71
A.8	Equació de Navier-Stokes.....	72
A.9	Capa límit.....	72
A.10	Bibliografia	74
B	FONAMENTS D'AERODINÀMICA	75
B.1	Sustentació.....	75

B.2	Teorema de Kutta-Joukowski de la sustentació.....	76
B.3	Coeficient de sustentació.....	78
B.4	Perfils sustentadors.....	79
B.5	Angle d'atac del perfil alar i entrada en pèrdua.....	81
B.6	Resistència.....	82
B.7	Coeficient d'arrossegament	84
B.8	Resistència a elevats números de Reynolds.....	84
B.9	Resistència aerodinàmica a l'avanç.....	85
B.10	Bibliografia	86
C	CÀLCUL ÀREA FRONTAL.....	87
D	PRESSUPOST	88

1 INTRODUCCIÓ

1.1 Antecedents

Un grup d'estudiants de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona s'han unit per participar, amb l'ajuda de diversos professors, en la competició Formula Student Spain en la categoria de cotxes elèctrics.

La Formula Student, també coneguda amb el nom de Formula SAE (*Society of Automotive Engineers*) als Estats Units, és una competició esportiva de motor, que té com a objectiu formar i atorgar experiència als futurs enginyers que actualment cursen els seus estudis en universitats d'arreu del món.

Amb el nom de UdG Racing Team, l'equip format pels estudiants de la UdG, ha de construir des de zero un monoplaça per competir en les diferents proves de la competició.

En el desenvolupament d'un cotxe hi intervenen molts elements i disciplines, i una de les més importants és l'aerodinàmica. Un correcte estudi i posterior aplicació dels conceptes aerodinàmics influiran decisivament en el comportament del prototip, per tal d'obtenir uns bons resultats.

1.2 Objecte

Aquest projecte busca estudiar el comportament aerodinàmic dels diferents elements que formen part d'un monoplaça participant a la competició Formula Student.

D'aquesta manera, es vol establir quin mesura contribueixen al rendiment aerodinàmic del vehicle diferents apèndixs, com alerons (davanter i posterior) i un difusor, per tal de determinar si la seva incorporació al cotxe està justificada, i per tant val la pena construir-los.

Primer s'estudiarà el comportament del vehicle sense apèndixs afegits, només amb la carrosseria. Llavors la resta de models amb un apèndixs diferent cadascun i finalment un amb tots ells aplicats en un mateix prototip i es compararan els resultats obtinguts.

Qualsevol configuració proposada haurà d'ajustar-se a la normativa de la competició per poder-se du a terme en la pròxima edició de la Formula Student.

1.3 Especificacions i abast

Per al disseny de la carrosseria, així com dels afegits, ja siguin apèndixs aerodinàmics (alerons, difusors...) o altres elements (rodes, pilot...), s'utilitzarà el programa de CAD anomenat SolidWorks. També s'utilitzarà aquest mateix programa per a l'assemblatge de les diferents configuracions a estudiar.

Una vegada definits els models a analitzar es farà servir el programari de CFD de ANSYS Workbench (ANSYSCFX) per a mallar les diferents geometries i realitzar les simulacions del túnel del vent virtual.

La construcció física dels models no està inclosa.

2 INTRODUCCIÓ A LA FORMULA STUDENT

La Formula Student és una competició esportiva de motor que té lloc cada any arreu del món per promoure l'excel·lència en els camps de l'enginyeria entre estudiants universitaris, que han treballat durant tot l'any en el disseny i construcció d'un cotxe de carreres.

És la competició educativa d'aquestes característiques més estesa i de més tradició i prestigi a Europa, recolzada per la indústria i enginyers de prestigi, com el patró de la competició Ross Brawn, màxim responsable de l'equip Mercedes AMG de Formula 1.

La Formula Student permet als participants posar en pràctica tots els coneixements adquirits durant els seus estudis, així com els aporta experiència en el món de l'enginyeria de competició.

En un principi només competien vehicles amb motors de combustió, però en aquests moments també existeix una categoria on els monoplaques són propulsats per motors elèctrics. En aquesta categoria és on participarà el prototip construït per l'equip d'estudiants de l'Escola Politècnica, UdG Racing Team.

2.1 Origen i història

L'origen de la Formula Student es remunta al 1981, quan la *Society of Automotive Engineers* (SAE) va organitzar la primera edició als Estats Units d'Amèrica.

Posteriorment al 2010 es van organitzar deu competicions de les mateixes característiques arreu del món. Cinc d'elles van tenir lloc a Europa (Regne Unit, Alemanya, Itàlia, Àustria i per primera vegada a Espanya) mentre que les altres cinc es van celebrar als Estats Units, Brasil, Austràlia, Japó i Korea.

Les competicions estaven regides gairebé per les mateixes regles i normativa, permetent així als equips participar en diverses competicions diferents sense cap, o gairebé cap, modificació en el treball ja realitzat.

Actualment els esdeveniments de la Formula Student es celebren en nombrosos països, totes elles amb la mateixa normativa base, molt extensa i que pràcticament no es deixa cap aspecte del cotxe. El conjunt de competicions aconsegueix implicar fins a 120 equips i més de 2000 estudiants, la puntuació dels quals és recollida en un rànquing mundial.

A Espanya la competició té lloc cada any cap a finals d'agost, una vegada finalitzat el curs acadèmic, i es disputa al Circuit de Catalunya a Montmeló.

2.2 Objectius

La Formula Student busca inspirar i desenvolupar joves enginyers amb aptituds emprenedores i innovadores.

L'objectiu és simular una situació real, en la qual una companyia contracta els components de cada equip com a enginyers de curses perquè desenvolupin un prototip d'un cotxe monoplaça.

El cotxe construït ha de complir uns certs requisits i desenvolupar bones prestacions per a la conducció tals com: l'acceleració, la frenada i l'estabilitat. Ha de ser fàcil de mantenir, i estar construït a un cost raonable però amb un alt grau de fiabilitat.

També seran avaluats altres factors relacionats amb el disseny com l'estètica i l'ergonomia.

En el decurs de la competició els equips són avaluats en aspectes teòrics i pràctics, i han de demostrar el seu coneixement i aptituds en àrees diverses com per exemple la construcció del cotxe, el pla econòmic o l'estratègia de marketing.

Existeixen dues disciplines, estàtiques i dinàmiques. Aquestes consten de diverses proves, mitjançant les quals els jutges, experts en la matèria, avaluen el millor model entre els diferents equips participants.

2.3 Estructura de la competició

La competició consta de diverses proves. Cada una es puntua segons la Taula 2.1, que es mostra a continuació:

PUNTUACIÓ GENERAL			
ESDEVENIMENT ESTÀTIC		ESDEVENIMENT DINÀMIC	
Prova	Punts	Prova	Punts
Inspecció tècnica	-	Acceleració	75
Presentació	75	SkidPad	50
Disseny	150	Maniobrabilitat	150
Anàlisi de costos	100	Eficiència	100
-	-	Resistència	300
Suma	325		675
Total			1000

Taula 2.1. Puntuació general de la competició.

2.3.1 Test estàtic

El test estàtic serveix per que els equips puguin justificar les decisions preses en el procés de desenvolupament del vehicle, sense que estigui en moviment. Aquest consta de les següents proves

- **Inspecció tècnica:** el vehicle és inspeccionat per comprovar si compleix la normativa de la Formula Student. Es comproven les distàncies, la geometria, pes del vehicle, etc.
- **Presentació:** els equips presenten el seu pla de negoci per a la construcció del cotxe a un fabricant, amb l'objectiu de convèncer-los que el monoplaça compleix les peticions establertes pel grup, que pot ésser produït i en poden obtenir beneficis.
- **Disseny:** en la prova de disseny els jutges examinen els cotxes i en discuteixen la configuració amb els estudiants, que prèviament han exposat per escrit les solucions constructives a les que han arribat i les seves avantatges.
- **Anàlisi de costos:** en aquesta prova també cal escriure un informe, en aquest cas del cost i construcció del prototip, per poder-ne comentar el contingut amb els jutges i que aquests l'avaluin.

2.3.2 Test dinàmic

El test dinàmic és on realment es troba l'essència de la competició. El prototip ha de superar de la millor manera possible les següents proves:

- **Acceleració:** consisteix en recórrer, en el mínim temps possible, una línia recta de 75 metres de distància.
- **SkiPad:** en aquesta prova els vehicles han de seguir una trajectòria en forma de vuit, veure Figura 2.1, per demostrar quanta acceleració lateral poden generar.

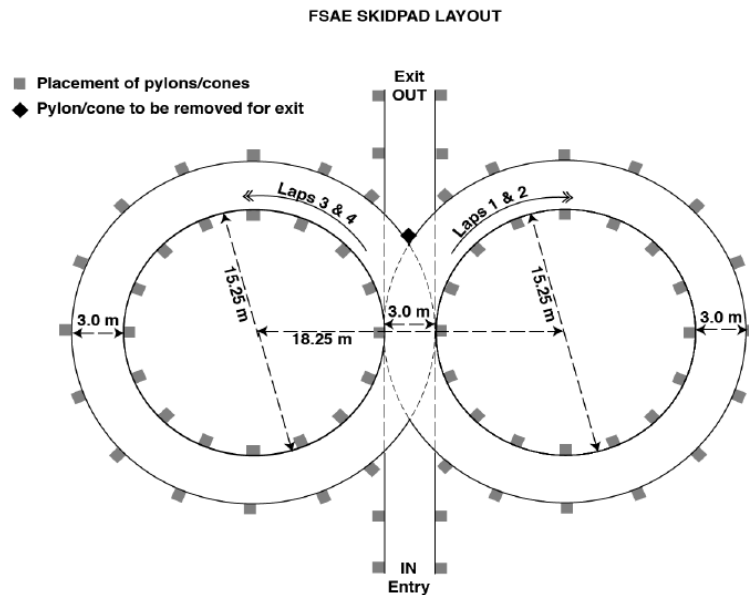


Figura 2.1. Descripció del circuit de SkidPad.

- **Maniobrabilitat:** en aquest test, també anomenat autocross, es realitzen voltes en un circuit amb rectes i corbes, on s'avaluen les dinàmiques de conducció i de maneig amb els temps per volta obtinguts. Amb resultats d'aquesta prova es determina l'ordre de sortida en l'última i principal prova de la competició, la prova de resistència.
- **Eficiència:** es mesura el consum de combustible o l'energia emprada pel vehicle en la prova de resistència per avaluar l'eficiència del mateix.
- **Resistència:** també anomenada "endurance". Es tracta d'un recorregut de 22 quilòmetres, en la que els vehicles han de demostrar la seva durabilitat en condicions de funcionament prolongades en el temps. En certa manera, els equips han de demostrar, en una sola prova, totes les capacitats dels seus prototips.

3 APÈNDIXS AERODINÀMICS

En un primer moment podria semblar que la característica més rellevant a l'hora de dissenyar el perfil d'un cotxe és que es mogui més fàcilment a través de l'aire, ja que, com menys resistència més fàcil i ràpidament pot avançar. Aquest fet comporta un evident estalvi de combustible i és per això que reduir aquesta resistència és la principal preocupació de la indústria de l'automòbil.

En canvi, en el disseny de cotxes de carreres això no és així. La reducció de la resistència a l'avanç (**drag**) és secundària, el més important és la generació de càrrega aerodinàmica (**downforce**).

La força generada per la càrrega aerodinàmica empeny el cotxe contra el terra, és a dir, augmenta la força normal aplicada a les rodes sense augmentar el pes del mateix. Això provoca un augment del coeficient de fricció i per tant disminueix el risc de lliscar durant el gir. D'aquesta manera es millora la capacitat del vehicle d'agafar les corbes a una major velocitat, i per tant, augmenta el rendiment en cursa d'aquest.

Per generar *downforce* s'utilitzen diferents apèndixs aerodinàmics. Aquests tenen l'inconvenient que també ajuden a l'aparició de *drag*, que s'oposa al moviment. Tot i això, el drag és, normalment, més petit que la *downforce* generada, i es pot reduir perfeccionant els perfils i l'acabat de les superfícies externes.

Els principals elements utilitzats per a la creació de càrrega aerodinàmica són les ales d'avió invertides per crear sustentació negativa. És a dir, el conegut comunament com alerons.

Una altre opció és alterar la forma exterior del vehicle mitjançant la col·locació de spoilers, capses d'aire, divisors de flux, etc. Així com aprofitar l'anomenat efecte sòl, que es dona quan un cos es troba molt a prop de la superfície, per mitjà de la instal·lació de fons plans i difusors en la part inferior del cotxe.

A continuació es descriuen alguns d'aquests elements aerodinàmics utilitzats per a la millora del temps de pas per corba en automòbils de competició.

3.1 Carrosseria

Clarament la carrosseria no és un apèndix aerodinàmic pròpiament dit, sinó una part indispensable de la configuració d'un cotxe, tanmateix, a continuació expliquem el seu efectes

sobre el flux d'aire que l'envolta, ja que és un element determinant en el comportament aerodinàmic de qualsevol vehicle.

Normalment la carrosseria d'un cotxe no contribueix de manera efectiva a la creació de càrrega aerodinàmica, més aviat hi va en contra, ja que genera sustentació positiva (*lift*). Aquesta, encara que petita comparada amb el pes del propi cotxe, no es pot evitar i és per això que es requereix la utilització de diversos apèndix aerodinàmics per augmentar la manejabilitat i el temps de pas per corba.

A més, la carrosseria és la principal causa de creació de *drag*, ja que, el coeficient d'arrossegament depèn de l'àrea frontal del vehicle i sol ser la carrosseria l'element que representa una major superfície en un automòbil. En la Figura 3.1 podem veure la projecció de l'àrea frontal d'un vehicle, que s'utilitzarà per calcular el coeficient abans esmentat.

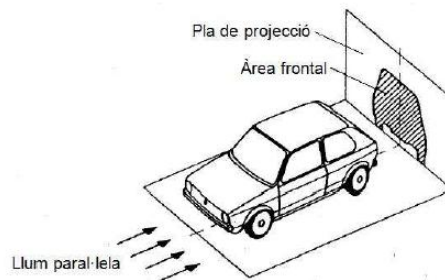


Figura 3.1. Àrea frontal d'un vehicle.

Per altra banda, a la Figura 3.2 podem comprovar que la carrosseria és l'element que més contribueix a l'àrea frontal d'un cotxe. En aquest cas es tracta d'un monoplaça tipus Formula (amb les rodes descobertes) com l'estudiat en aquest treball.

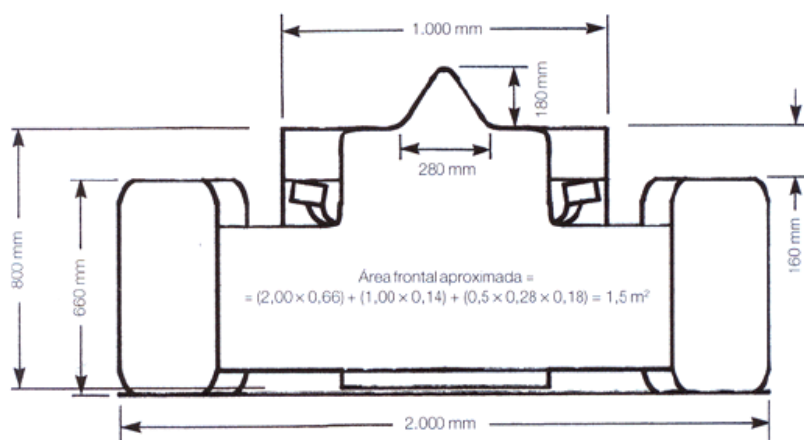


Figura 3.2. Exemple del càlcul de l'àrea frontal d'un Formula 1.

Per això, la carrosseria del nostre prototip s'ha dissenyat intentant minimitzar la resistència a l'avanç, sense tenir en compte la sustentació generada, tot adaptant-nos a la normativa de la competició Formula Student i al xassís que els nostres companys de l'equip UdG Racing Team ens han proporcionat.

3.2 Aleró posterior

L'aleró posterior és l'encarregat de generar gran part de la càrrega aerodinàmica necessària a l'eix posterior, que és qui suporta la tracció del motor, per tal d'aconseguir una tracció òptima del vehicle.

Aquests alerons poden ser de dos tipus: simples o multi-elements. Els alerons simples consten només d'un perfil, tal com es pot veure a la Figura 3.3.



Figura 3.3. Aleró posterior d'un sol element.

Mentre que els de múltiples elements en tenen varis perfils, com mostra la Figura 3.4.

Això els permet disposar de major superfície alar i també incrementar la curvatura del perfil, la qual cosa els proporciona més càrrega aerodinàmica. Per això, normalment (si la normativa no ho prohibeix) es solen utilitzar alerons de múltiples elements en automòbils de competició.

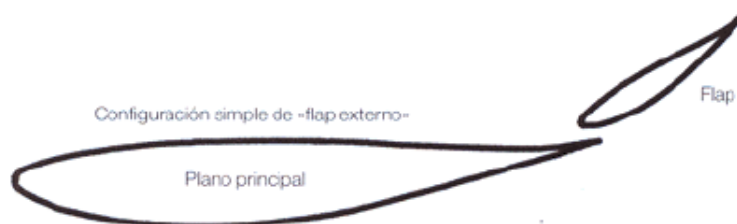


Figura 3.4. Configuració d'un aleró de dos elements.

Els alerons tenen un sol pla principal, tant si es tracta d'alerons simples com multi-elements. Tot i això podem millorar encara més la càrrega aerodinàmica del cotxe utilitzant alerons amb més d'un pla, veure Figura 3.5. Cal tenir en compte que afegint més plans també estem incrementant el *drag* creat per l'aleró.



Figura 3.5. Aleró posterior de doble pla.

3.3 Aleró davanter

En tot vehicle, l'aleró davanter és el més sensible a les variacions del flux, degut a que és la primera part del vehicle que es veu envoltada pel fluid. Això fa que el seu disseny sigui molt important, ja que, és l'encarregat de generar gran part de la càrrega aerodinàmica total.

Aquest aleró, igual que el posterior, pot estar format per més d'un element, com el de la Figura 3.6, i també per varis plans.



Figura 3.6. Aleró davanter de tres elements.

A banda de generar la força adequada per a l'estabilitat del vehicle, també és molt important dissenyar-lo pensant en la sortida del flux. De la direccionalitat del flux sortint de l'aleró davanter dependrà que la resta d'apèndixs aerodinàmics treballin correctament.

Generalitzant, les principals funcions de l'aleró davanter són:

- Generar càrrega aerodinàmica
- Separar adequadament el flux de les rodes davanteres, per evitar al màxim les turbulències que aquestes generen
- Ajudar a la creació d'efecte sòl
- Dirigir el flux a una certa zona del cotxe, per exemple per evitar focalitzar el flux cap al pilot)

3.4 Derives

Per ajudar a redirigir el flux, s'utilitzen uns elements anomenats derives. Les derives són unes plaques verticals que hi ha als extrems dels alerons, tan davanterers com posteriors. Aquestes ajuden a evitar recirculacions d'aire de l'intradós a l'extradós, reduint així la intensitat dels vòrtexs de punta d'ala, i per tant, reduint la resistència induïda. Veiem el seu efecte en la Figura 3.7.

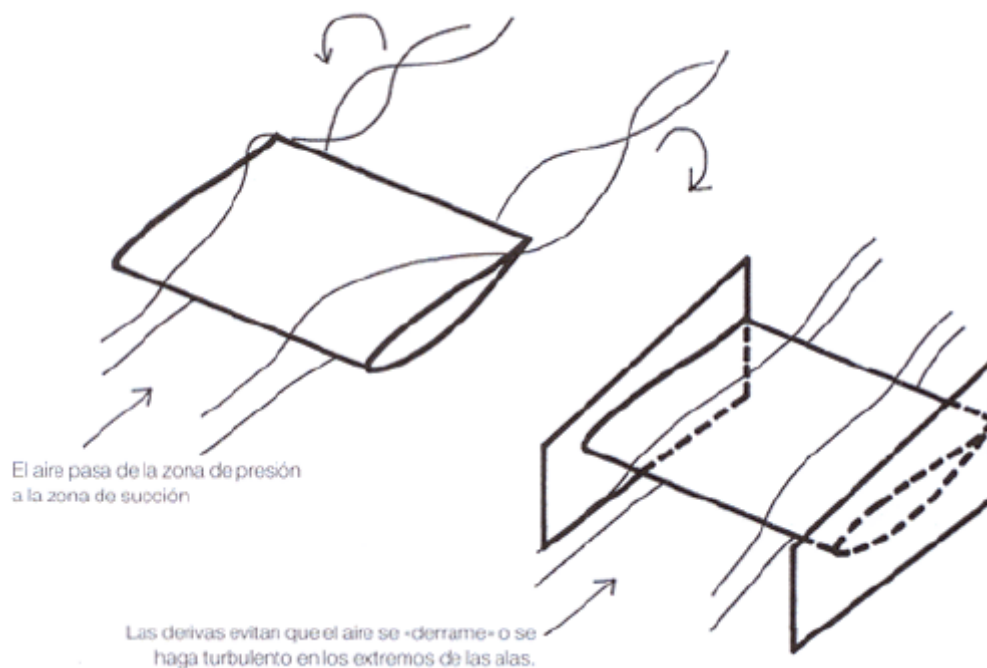


Figura 3.7. Funcionament de les derives en un aleró.

A més, en el cas dels alerons davanterers, també contribueixen a la desviació del flux per tal d'evitar la incidència d'aquest directament a les rodes. Aquest efecte és vital per disminuir el *drag*, ja que, aproximadament, el 40% de la resistència a l'avanç en un vehicle de competició és provocat per les rodes.

En les Figura 3.8 i Figura 3.9 podem veure les diferents formes que prenen les derives en un aleró davanter i posterior respectivament.



Figura 3.8. Derives de l'aleró davanter d'un Formula 1.



Figura 3.9. Derives de l'aleró posterior d'un Formula 1.

3.5 Fons pla i difusors

Com el seu propi nom indica, el fons pla converteix en una superfície llisa el fons del vehicle, que en principi era una superfície totalment irregular degut a diferents elements, com el forat del motor, el tub d'escapament, la caixa de canvis, etc. D'aquesta manera el flux d'aire pot lliscar sense trobar pràcticament oposició. Podem veure un exemple d'un fons pla a la Figura 3.10.



Figura 3.10. Fons pla d'un cotxe de Formula 1.

El fons pla ajuda a canalitzar l'aire per la part inferior del vehicle fins arribar al difusor, que s'uneix al fons a la part més posterior del cotxe, veure Figura 3.11.

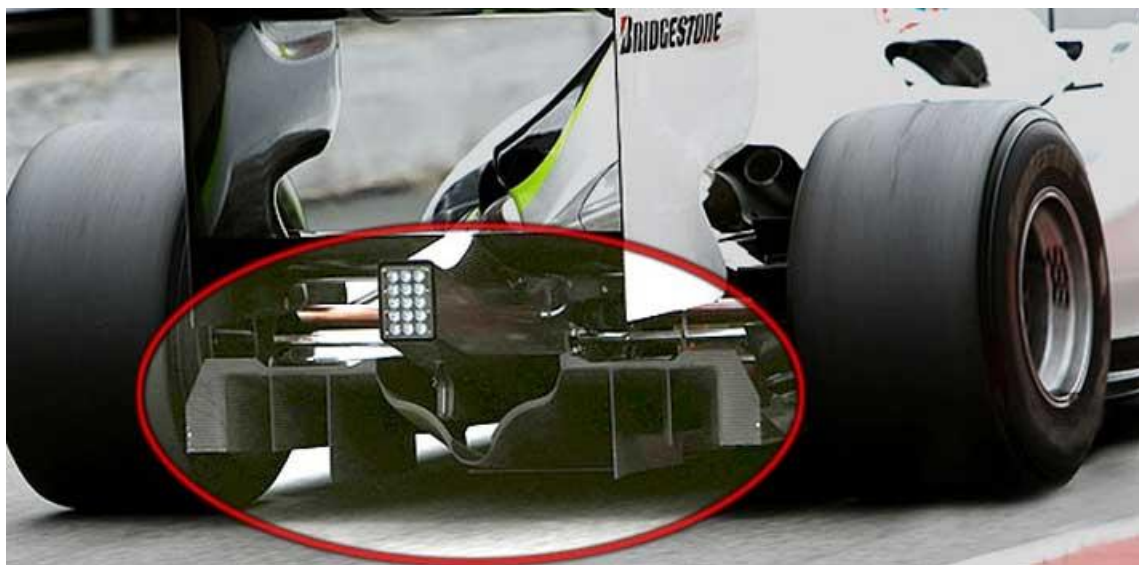


Figura 3.11. Difusor d'un Formula 1.

El difusor és una prolongació del fons pla que augmenta l'àrea de pas del flux d'aire. Amb aquest canvi de secció es crea un Efecte Venturi. La velocitat del flux augmenta abans d'arribar al difusor, per tant, la pressió disminueix i com a conseqüència es crea una força de succió a la part inferior del vehicle que l'empeny contra el terra. A la Figura 3.12 podem veure el flux que passa per un difusor.

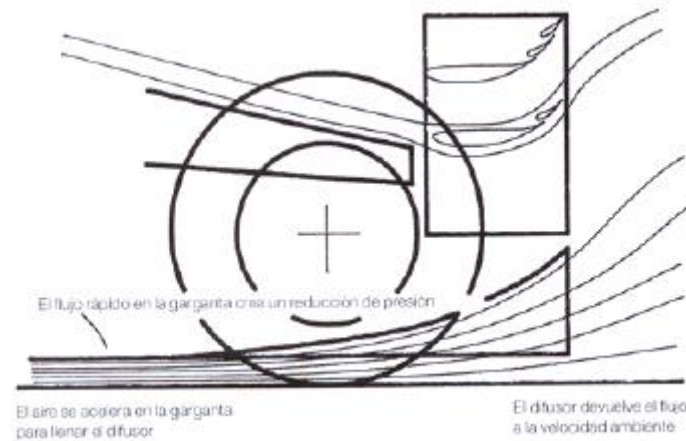


Figura 3.12. Flux a través d'un difusor.

Aquests dos elements són els responsables de al voltant d'un 15% de la càrrega aerodinàmica total generada. Això és degut a que són ells els responsables de l'aparició del denominat efecte terra, o efecte sòl.

3.6 Spoilers

Aquests elements s'utilitzen en cotxes amb carrosseries i morros amples i no pas en vehicles tipus Formula amb les rodes descobertes, com és el cas del nostre monoplaça.

En la part davantera l' spoiler és una extensió del mateix cotxe que disminueix la distància entre el terra i aquest. El seu objectiu és reduir el pas de l'aire pels baixos per provocar una disminució de la pressió i, per tant, generar *downforce*. A la Figura 3.13 veiem quin efecte provoca en el flux al voltant d'un vehicle.

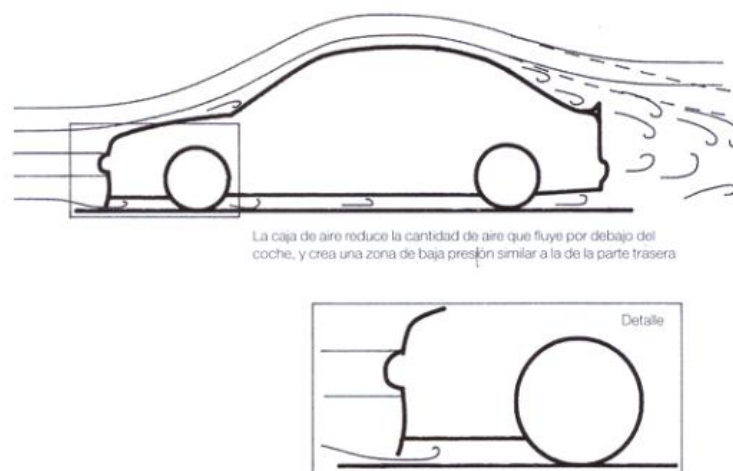


Figura 3.13. Efecte de l' spoiler davanter sobre el flux.

A la Figura 3.14 tenim un exemple d'spoiler davanter utilitzat en un cotxe de competició.

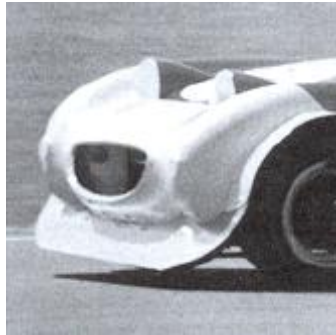


Figura 3.14. Spoiler davanter d'un cotxe de competició.

Al darrera, l' spoiler és un apèndix que sobresurt del vehicle sense deixar espai entre la carrosseria i aquest. El propòsit d'aquest spoiler és reduir la velocitat del flux d'aire que passa per la part del darrera del cotxe, de tal forma que es produeix un augment de la pressió que l'empeny contra el terra. Veure Figura 3.15.

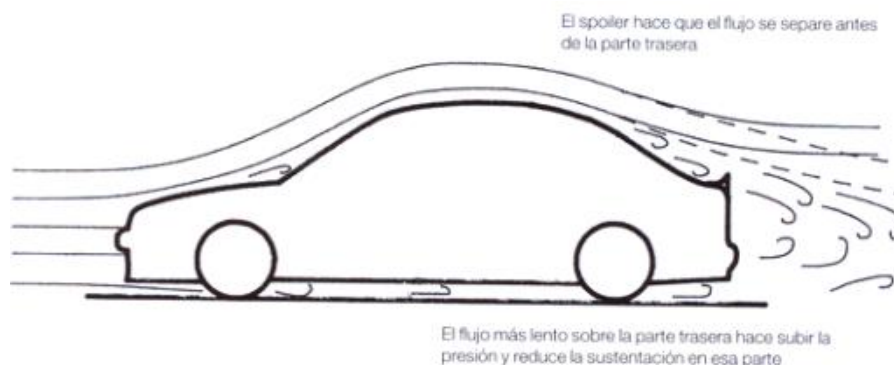


Figura 3.15. Efecte d'un spoiler posterior.

A la Figura 3.16 veiem un exemple real d'un spoiler posterior.



Figura 3.16. Spoiler posterior en un cotxe de competició.

Amb la col·locació d'aquests spoilers, i segons la mida dels mateixos, es pot augmentar el volum de càrrega aerodinàmica generada fàcilment però al mateix temps es crea una resistència de pressió que fa que augmenti la resistència a l'avanç del vehicle. Per tant, cal trobar una configuració adequada per aconseguir una relació òptima entre el *drag* i la *downforce* obtingudes.

3.7 Divisors de flux

El divisor de flux (*splitter* en anglès) és un element complementari a l' spoiler davanter. Es tracta d'una placa plana horitzontal fixada a l' spoiler i que creix cap a davant. Aquest contribueix a crear càrrega aerodinàmica addicional sense gairebé augmentar la resistència.

En vehicles de carrosseries tipus turismes o *sport*, amb morros robustos i amples, davant del morro es crea una zona d'estancament on l'aire xoca contra la part davantera del vehicle abans de dividir-se cap a la part de dalt i de baix d'aquest. Així el divisor es troba en una zona d'alta pressió que l'empeny cap avall creant d'aquesta manera *downforce*. Veiem com actua en la Figura 3.17.

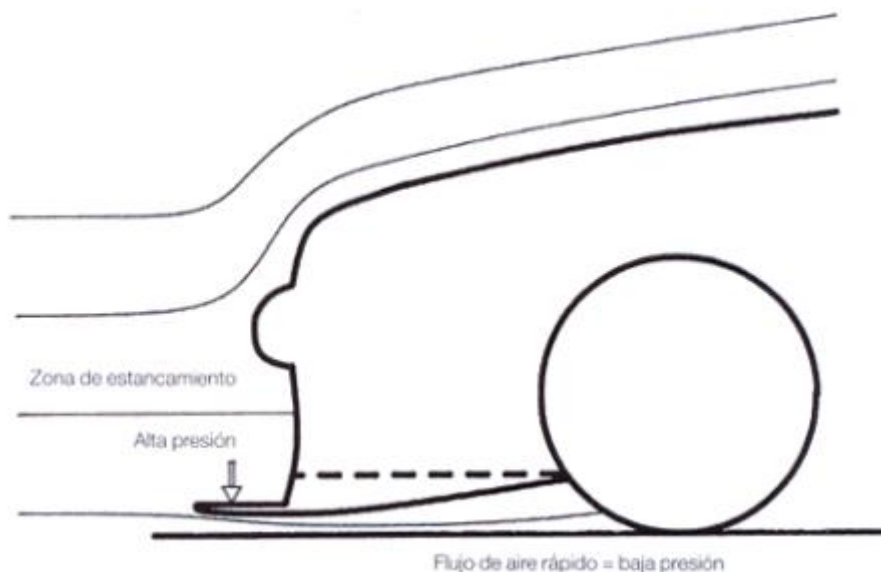


Figura 3.17. Efecte del divisor de flux.

A més, el divisor de flux ajuda a l' spoiler a restringir la quantitat d'aire que penetra en la part inferior del cotxe. En certa manera té l'efecte d'un spoiler més profund sense afegir resistència aerodinàmica. A la Figura 3.18 tenim un exemple de difusor.



Figura 3.18. Exemple de divisor de flux.

Els divisors de flux també s'utilitzen amb èxit en vehicles de categories amb morros més afilats i estilitzats. En aquest tipus de cotxes el divisor no està situat al morro, que sol estar una mica més elevat que la part inferior del xassís, sinó que és una extensió del fons pla que sobresurt de la part de sota del vehicle.

Així, en la part davantera sobresurt de la mateixa manera que havíem explicat anteriorment i genera un espai per crear una zona d'estancament per sobre seu. Mentre que al darrera el difusor sobresurt del fons pla per davant de les rodes posteriors i d'aquesta manera pot aprofitar altra vegada la zona d'estancament que existeix, en aquest cas, immediatament davant de les rodes. En podem veure un exemple a la Figura 3.19.



Figura 3.19. Divisors de flux en un Formula 1.

3.8 Eficiència aerodinàmica

L'objectiu final dels diferents apèndixs aerodinàmics és maximitzar la càrrega aerodinàmica minimitzant la resistència a l'avanç. Per determinar numèricament el rendiment de qualsevol element s'ha definit l'eficiència aerodinàmica, també anomenada finesa.

Es tracta d'un coeficient adimensional calculat com el quocient entre el coeficient de sustentació (C_L) i el coeficient de resistència (C_D), com podem veure en l'Equació 3.1.

$$f = \frac{|C_L|}{C_D} \quad (\text{Eq. 3.1})$$

Per millorar l'eficiència cal maximitzar la finesa.

4 VALIDACIÓ DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓ

Per estudiar els efectes de l'aire (forces, distribució de pressions i altres paràmetres aerodinàmics relacionats) movent-se al voltant de cossos sòlids, ja siguin avions, cotxes o edificis, s'han utilitzat tradicionalment túnels del vent.

Per fer-ho s'utilitzen prototips a escala dels models a estudiar i es necessiten túnels que compleixin amb determinades característiques, depenent de l'aplicació. És a dir, cal construir túnels diferents segons es necessitin a baixa pressió, supersònics, pressuritzats, etc.

La utilització d'aquest túnels del vent, lògicament, comporta un cost elevat d'adquisició i manteniment, a part de l'espai físic necessari. A més, els instruments de medició són cars i solen estar infrautilitzats. Per això, amb la intenció de recrear com el comportament dels diferents models s'utilitzen, cada vegada més, programes informàtics de simulació de fluids.

Encara que aquets túnels del vent virtuals aconsegueixen resultats amb força precisió no es poden donar com a definitius, ja que el programari es basa en aproximacions. Per això, després d'estudiar el prototip amb l'ordinador, s'hauria de comprovar els resultats en un túnel del vent real per obtenir millors resultats.

Aquests, però, no poden reproduir de manera fidel les condicions de funcionament reals, en el nostre cas, del cotxe. Per obtenir una simulació més realista del problema, i per tant resultats més ajustats a la realitat, necessitaríem, finalment, realitzar l'assaig a escala real i en les mateixes condicions en què treballarà posteriorment el vehicle, és a dir, a la carretera.

Així doncs coneguem una mica més el programari que s'utilitza per fer simulacions d'un túnel del vent virtual.

4.1 Introducció al CFD

La dinàmica de fluids computacional, o *Computational Fluid Dynamics* (CFD), és una de les branques de la mecànica de fluids que fa servir mètodes numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes de dinàmica de fluids utilitzant una discretització del domini espacial.

Aquesta discretització es fa en petites cel·les, formades per una sèrie de punts, que conformen el que es coneix com a malla. Posteriorment s'aplica un algorisme per resoldre numèricament les equacions que governen el fluid en cadascun dels punts de la malla, els quals es troben separats unes distàncies prou petites per obtenir una solució acceptable.

Les principals equacions que han de ser resoltes en els càlculs de CFD són les equacions de Navier-Stokes: les equacions de quantitat de moviment, l'equació de Continuitat i l'equació d'Energia.

La realització d'un estudi mitjançant CFD proporciona els següents avantatges:

- Permet fer estudis de prototips sense necessitat de construir-los, per tant, redueix molt els costos d'assajos experimentals.
- Permet resoldre problemes complexos de flux i aporta comprensió a fenòmens difícils d'observar i mesurar.
- En el cas de l'alta competició automobilística, permet la recerca de configuracions òptimes dels elements aerodinàmics, i per tant, permet un estalvi important en hores de test en pista.

D'altra banda presenta les següents limitacions:

- Requereixen computadores d'altres prestacions, en funció de la complexitat de la malla.
- Els temps de mallat i de càlcul són elevats
- Com que s'ha de fer un procés de mallat, per resoldre els elements finits, es requereix una geometria base amb un acabat perfecte. De no ser així, ni la malla ni els resultats seran correctes. És a dir, té una alta sensibilitat en imperfeccions del model.

4.2 Procediment a seguir

El passos a seguir durant l'anàlisi d'un problema de CFD són els següents:

4.2.1 Pre-procés

- Construcció de la geometria: consisteix a crear el model en 3D que es vol estudiar. Tot i que en l'ANSYS Workbench, que és el programa de CFD que nosaltres utilitzarem, hi ha l'opció de crear una geometria, la manera més senzilla és crear-la en un programa de CAD especialitzat i importar-la. En el nostre cas hem fet servir el Solidworks.

Amb aquest programa construïm el monoplaça i el túnel del vent, que és el domini computacional amb el que treballarem (prisma rectangular sòlid). Al túnel li restem la geometria del cotxe, per obtenir només un cos i l'importem a l'ANSYS.

Com que el nostre vehicle és simètric, només s'estudiarà la meitat del model per tal d'aprofitar al màxim la potència de càlcul del programa i l'ordinador.

- **Mallat:** aquest procés es basa en la discretització del model generat en el pas previ. Cada problema de CFD requereix diferents tipus de malla. Sempre es fa una primera malla superficial, que servirà de guia per la malla volumètrica.

Aquest pas és molt important ja que s'ha d'intentar aconseguir una malla suficientment fina, per obtenir uns resultats acurats, però que l'ordinador sigui capaç de resoldre en un temps acceptable.

- **Definició de zones:** l'últim pas d'aquesta etapa consisteix en definir les zones del contorn del nostre problema. Cada zona presentarà propietats diferents.

En el nostre cas haurem de definir la zona per on entra l'aire a velocitat constant (*inlet*), per on surt a pressió relativa zero (*outlet*), les parets del túnel, el terra, que es defineix sense lliscament amb les rodes (*no slip*), i finalment la simetria, per indicar que estem calculant els resultats només de la meitat del model.

4.2.2 Resolució numèrica

La resolució numèrica és un procés iteratiu, on l'ordinador realitza els càlculs necessaris sobre cada volum de la malla obtinguda anteriorment, segons les nostres especificacions.

4.2.3 Post-procés

Un cop finalitzada la simulació del problema obtenim els resultats. Aquests es processen mitjançant gràfiques, animacions i informes per tal d'extreure'n la informació que més ens interressi i facilitar així la seva interpretació.

4.3 Estudi del C_D de diverses figures tridimensionals senzilles

En aquest treball s'utilitza programari que simula un túnel del vent i cal verificar que els resultats que n'obtenim són el més acurats possible. Amb aquest objectiu s'estudiarà el comportament del flux d'aire al voltant de tres figures senzilles, el coeficient de *drag* de les quals és conegut, per comparar-ne els resultats.

Per tant, a continuació comprovarem si les dades obtingudes amb el programari utilitzat s'ajusten a les dades dels coeficients de resistència a l'avanç (C_D) experimentals que apareixen a la bibliografia. La Figura 4.1 és una taula amb els coeficients de diversos cossos extreta de la bibliografia.

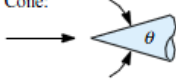
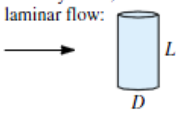
Body	C_D based on frontal area	Body	C_D based on frontal area																		
Cube:		Cone:																			
	1.07		<table><tr><td>θ:</td><td>10°</td><td>20°</td><td>30°</td><td>40°</td><td>60°</td><td>75°</td><td>90°</td></tr><tr><td>C_D:</td><td>0.30</td><td>0.40</td><td>0.55</td><td>0.65</td><td>0.80</td><td>1.05</td><td>1.15</td></tr></table>	θ :	10°	20°	30°	40°	60°	75°	90°	C_D :	0.30	0.40	0.55	0.65	0.80	1.05	1.15		
θ :	10°	20°	30°	40°	60°	75°	90°														
C_D :	0.30	0.40	0.55	0.65	0.80	1.05	1.15														
	0.81	Short cylinder, laminar flow:																			
			<table><tr><td>L/D:</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>5</td><td>10</td><td>20</td><td>40</td><td>∞</td></tr><tr><td>C_D:</td><td>0.64</td><td>0.68</td><td>0.72</td><td>0.74</td><td>0.82</td><td>0.91</td><td>0.98</td><td>1.20</td></tr></table>	L/D :	1	2	3	5	10	20	40	∞	C_D :	0.64	0.68	0.72	0.74	0.82	0.91	0.98	1.20
L/D :	1	2	3	5	10	20	40	∞													
C_D :	0.64	0.68	0.72	0.74	0.82	0.91	0.98	1.20													

Figura 4.1. C_D segons l'àrea frontal de diverses figures tridimensionals senzilles.

Les figures s'han generat mitjançant el SolidWorks, amb el corresponent domini computacional, i s'ha importat només la meitat de cada geometria al programa de CFD ANSYS Workbench per fer la simulació del túnel del vent.

A continuació és mostres les dimensions de les geometries a estudiar, Figures 4.2, 4.3, 4.4. S'ha de tenir en compte que la geometria estudiada és la meitat de cada figura, per tant l'àrea frontal que utilitzarem per calcular el coeficient de *drag* és també la meitat.

CUB

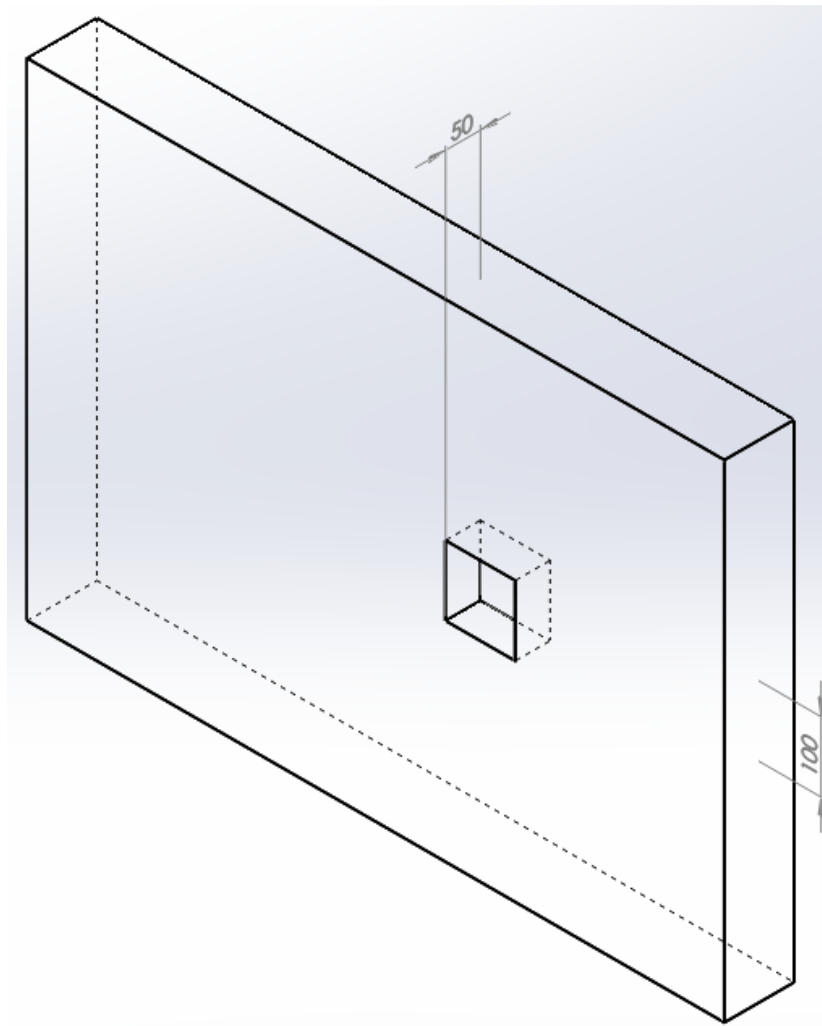


Figura 4.2. Cub i domini computacional generat amb SolidWorks. Mides en mm.

$$c = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{\textit{Àrea frontal}} = 0,005 \text{ m}^2$$

CILINDRE

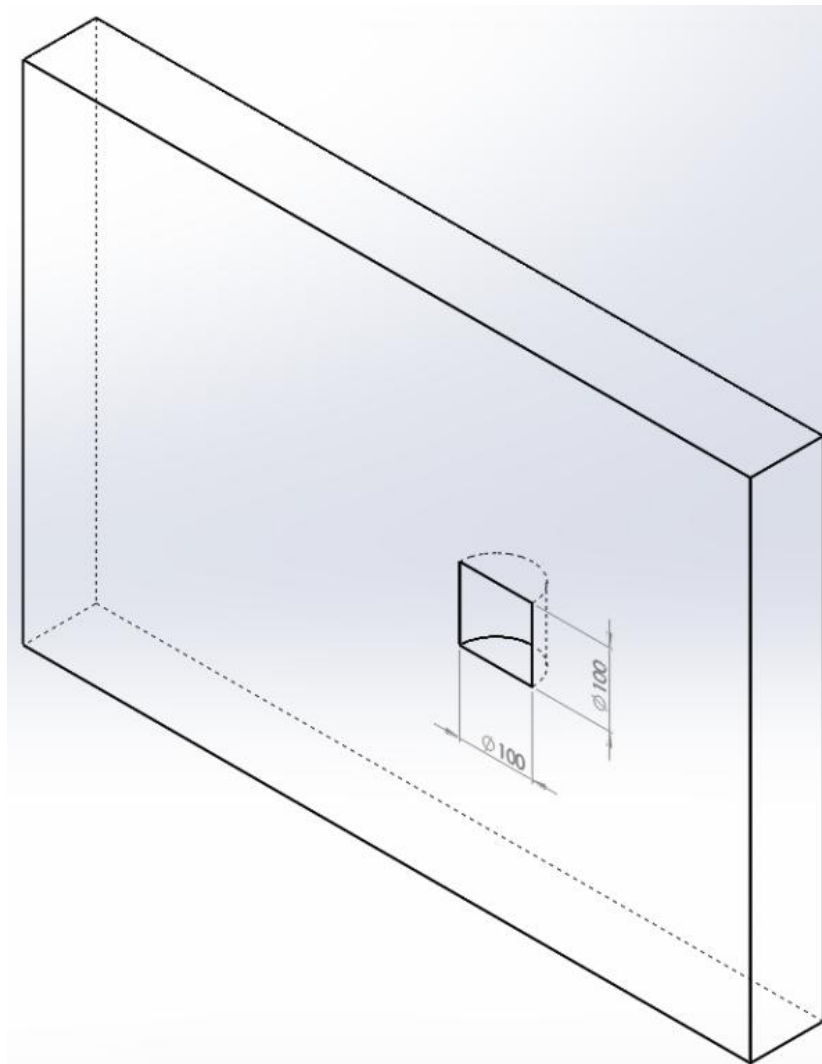


Figura 4.3. Cilindre i domini computacional generat amb SolidWorks. Mides en mm.

Longitud = 0,1 m

Diàmetre = 0,1 m

$$\frac{L}{D} = 1$$

Àrea frontal = 0,005 m²

CON

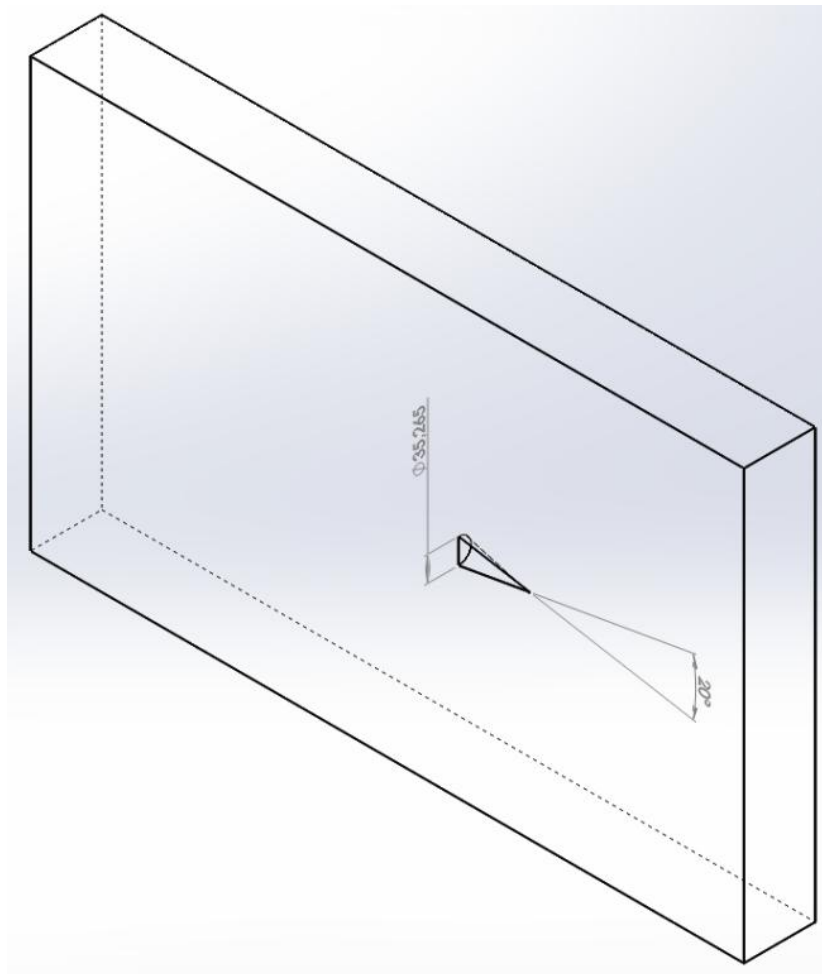


Figura 4.4. Con i domini computacional generat amb SolidWorks. Mides en mm.

Angle = 20°

Diàmetre = 0,03527 m

Àrea frontal = 0,0004885 m²

Una vegada acabada la simulació li demanem al programa que ens calculi la força en la direcció X exercida per l'aire sobre els cossos estudiats (F_D). Llavors, amb aquest valor, sabent que la velocitat a la que es mou l'aire és de 27,778 m/s i que la densitat de l'aire a 25°C és de 1,23 kg/m³ podem calcular els coeficients utilitzant l'Equació 4.1, explicada en l'Annex B: fonaments d'aerodinàmica.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} v^2 A_D} \quad (\text{Eq. 4.1})$$

En la següent Taula 4.1 es mostren els resultats del C_D obtingut mitjançant la simulació, comparats amb els que hem trobat en la bibliografia per a cadascun dels cossos tridimensionals.

	CUB	CILINDRE	CON
F_D (N)	2,24144	1,5184	0,1082
C_D teòric	1,07	0,64	0,4
C_D experimental	0,9446	0,6399	0,4667

Taula 4.1. Valors de la força i el C_D dels diferents cossos tridimensionals.

Veiem que l'error relatiu més gran correspon al con i és del 14,99%. Per tant, podem determinar que els resultats que obtenim amb el programa utilitzat són vàlids dintre un marge d'error que s'ajusta als requeriments del nostre projecte.

5 ETAPES DE LA SIMULACIÓ

En aquest capítol es descriuen els passos seguits per a la realització de les simulacions dels diferents models. Veure Figura 5.1.

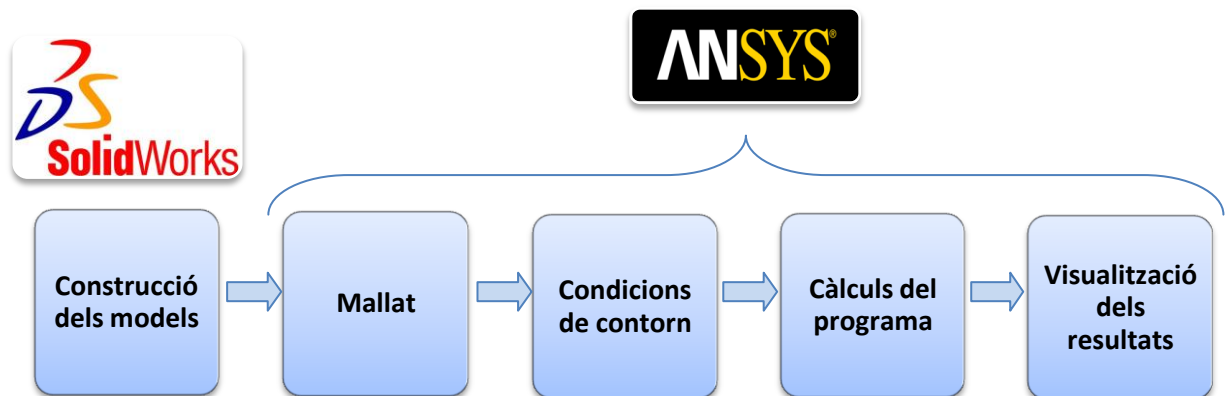


Figura 5.1. Esquema de les etapes de la simulació.

5.1 Construcció dels models

El primer pas és construir els models que volem estudiar. Per fer-ho utilitzarem el programa de CAD SolidWorks.

5.1.1 Limitacions de la normativa

A l'hora de dimensionar la carrosseria així com els diferents apèndixs aerodinàmics de cada model ens haurem d'assegurar que s'ajustin a la normativa de la competició. El requisits mínims que han de complir els vehicles participants són els següents:

- El vehicle ha de ser un monoplaça de quatre rodes descobertes i amb el *cockpit*, que és habitacle del pilot, també obert (cos estil formula). A més, les rodes no estan en una línia recta.
- El xassís ha de tenir dos arcs de seguretat, un davant del pilot i l'altre sobre el cap.
- El diàmetre dels pneumàtics ha de ser, com a mínim, de 203,2 mm.
- Les rodes no han de tenir cap obstrucció vistes des del costat.

- Cap part del vehicle pot entrar en una zona formada per un cercle de 68,6 mm més gran radialment que el diàmetre exterior del pneumàtic, amb les rodes dirigides cap endavant . Consulteu la Figura 5.2.

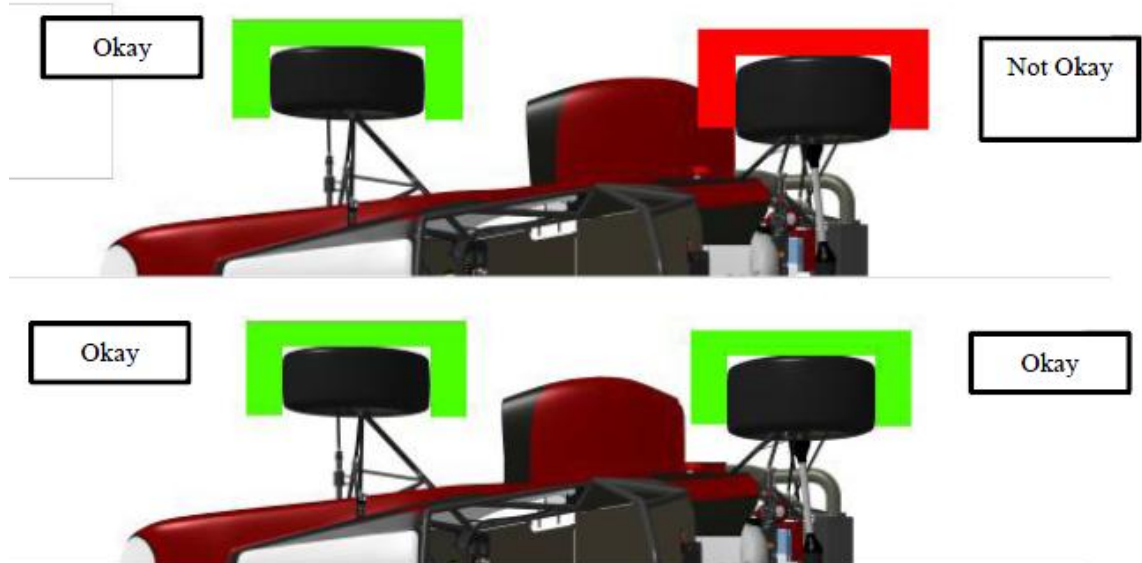


Figura 5.2. Representació gràfica de la normativa.

- La batalla mínima ha de ser de 1525 mm. Aquesta es mesura des del punt de contacte amb el terra de les rodes davanteres i posteriors, rectes.
- La via més petita no pot ser inferior al 75% de la via més gran.
- Totes les vores orientades cap endavant de la carrosseria que podrien afectar a les persones han de tenir radis de com a mínim 38 mm.
- A plena vista, cap part de qualsevol dispositiu aerodinàmic (aleró, difusor o divisor) no pot estar:
 - a) Més endavant de 762 mm des del davant dels pneumàtics
 - b) Més enrere de 305 mm del darrere dels pneumàtics posteriors
 - c) Més ample que la part exterior dels pneumàtics davanteres o posteriors, els que siguin més amples.
- Totes les arestes dels alerons i altres dispositius aerodinàmics que podrien contactar amb un vianant han de tenir un radi mínim de 1,5 mm.
- No es pot utilitzar cap dispositiu per retirar aire de sota el vehicle, excepte els ventiladors destinats exclusivament a la refrigeració. Estan prohibits per generar efecte terra.

5.1.2 Disseny de la carrosseria

Per fer el disseny de la geometria externa del monoplça hem utilitzat el xassís que ens van proporcionar els nostres companys de la UdG Racing Team, el qual ens marcarà aproximadament les mides del vehicle.

Hem utilitzat diferents perfils de croquis i corbes projectades per crear diverses superfícies per envoltar el xassís. Posteriorment les unirem i els hi donarem gruix per obtenir una sola peça que serà la nostre carrosseria. Figura 5.3.

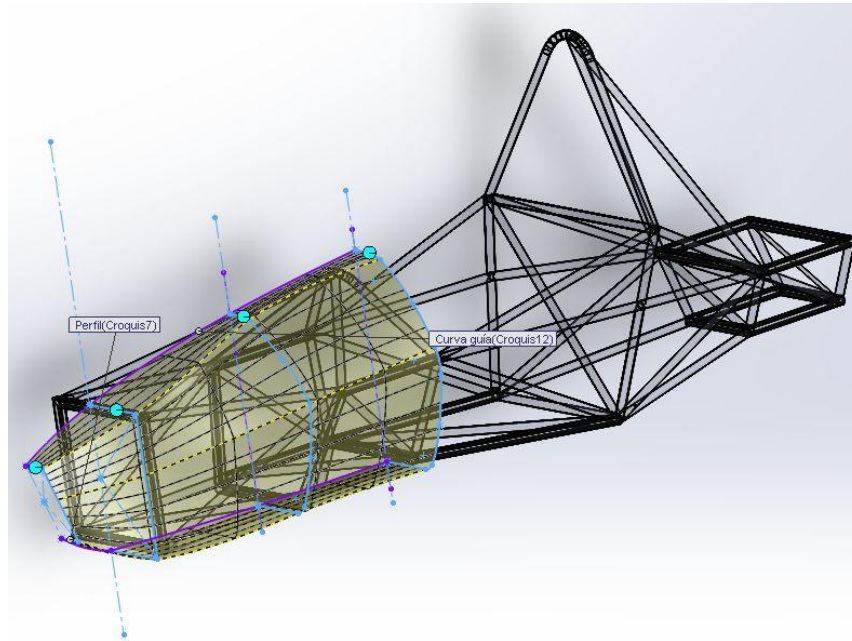


Figura 5.3. Detall de la construcció de la carrosseria.

El disseny creat és totalment propi i s'utilitzarà en tots els models que s'estudiaran. S'ha intentat que fos el més aerodinàmic possible, i també ja s'hi ha incorporat un fons pla com es pot veure a la Figura 5.4.

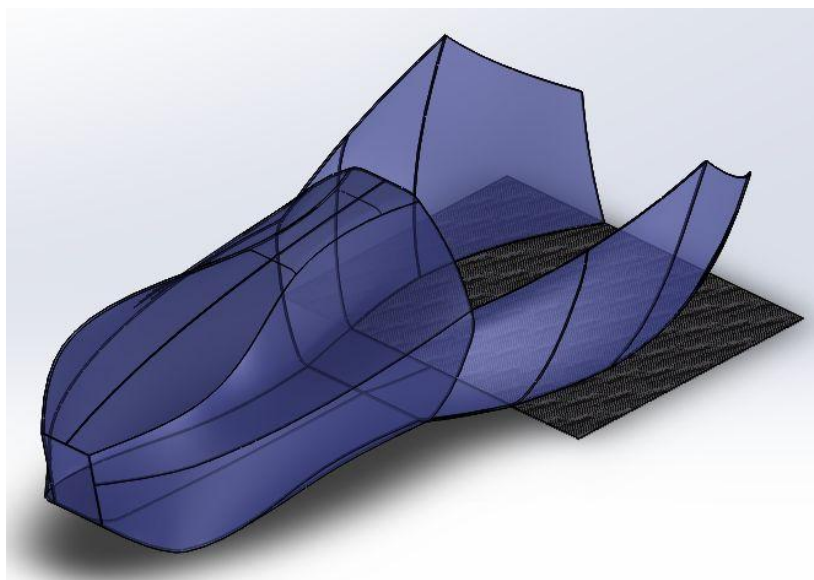


Figura 5.4. Carrosseria completa, amb el fons pla.

Lavors se li van adjuntar els diferents elements a la carrosseria fins a obtenir els models definitius. En la Figura 5.5 es mostra el model complet amb tots els apèndixs aerodinàmics que s'estudiaran en aquest projecte.

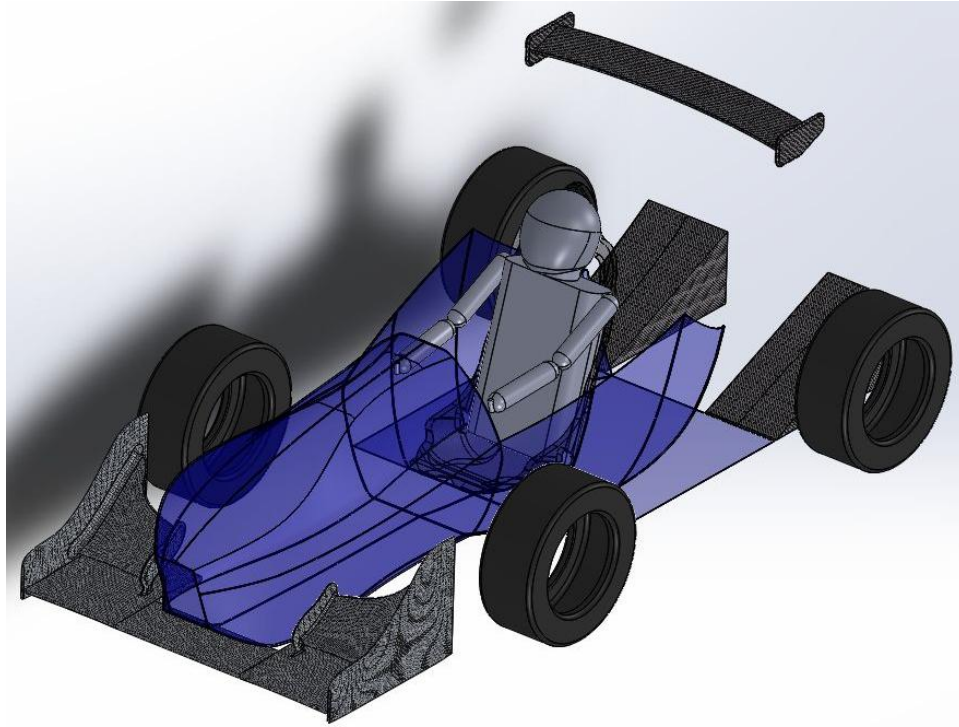


Figura 5.5. Model complet amb tots els apèndixs aerodinàmics.

Una vegada obtinguts els diferents models que necessitem ens quedarem només amb la meitat de cadascun d'ells per tal de minimitzar la càrrega de treball de l'ordinador, és a dir el nombre de càlculs que ha de fer el programa per trobar la solució.

5.1.3 Disseny del difusor

El difusor dissenyat està dividit en dues parts, separades per la zona del xassís on anirà situat el motor elèctric. Aquest s'ha unit a la part posterior del fons pla. Figura 5.6.

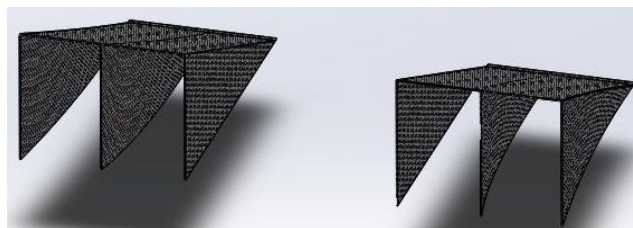


Figura 5.6. Difusor.

5.1.4 Disseny dels alerons

S'ha escollit aquesta geometria pels alerons perquè satisfan els requeriments imposats per la normativa i creiem que tenen potencial per oferir un bon rendiment. En la Figura 5.7 podem veure l'aleró davanter i en la Figura 5.8 l'aleró posterior utilitzats.

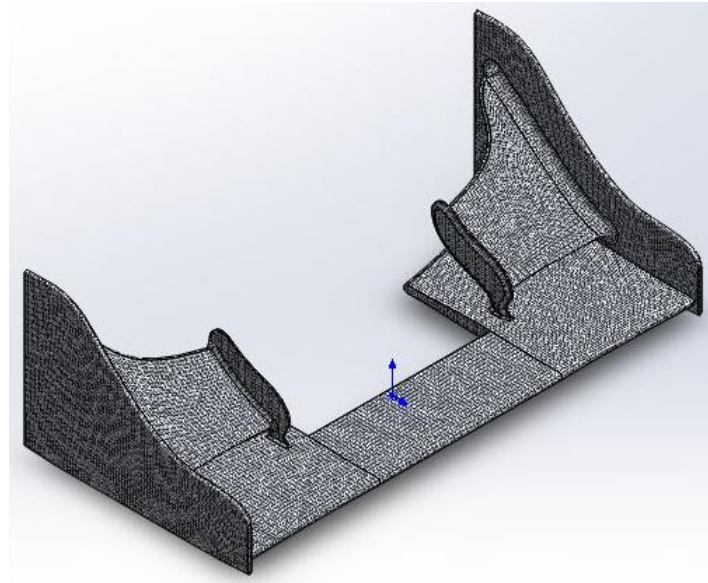


Figura 5.7. Aleró davanter.



Figura 5.8. Aleró posterior.

5.1.5 Altres elements del cotxe

A part dels apèndix aerodinàmics comentats anteriorment el nostre model ha de tenir altres elements per apropar-se al màxim a les condicions en les que competirà realment el prototip.

Per això s'han incorporat al model, mitjançant assemblatges, el casc i cos del pilot, el seient i les rodes del vehicle.

5.1.6 Domini computacional

El domini computacional és el que realitza la funció de túnel del vent. Es tracta d'un prisma sòlid el qual contindrà l'aire que es mou, virtualment, una vegada iniciada la simulació.

Les mides que ha de tenir aquest no són fixes, però han de ser suficientment grans per poder recollir amb la màxima fidelitat el comportament de l'aire al voltant del nostre cotxe. També hem de tenir en compte que com més gran és el domini més complicada és la resolució del problema i per tant el cost computacional és més elevat.

En aquests cas s'ha construït un túnel del vent amb les dimensions que es mostren en la Figura 5.9:

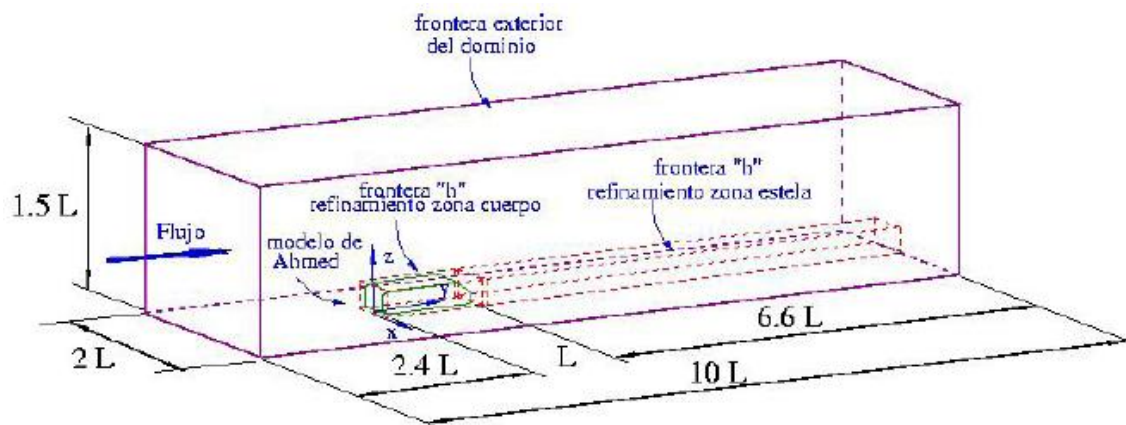


Figura 5.9. Dimensions del domini computacional.

El volum d'aire proper al vehicle, que entrarà en contacte amb els diversos elements físics, és el flux que més ens interessa descriure'n el comportament. Per això, per tal d'obtenir valors més acurats en aquesta zona crearem una prisma interior al túnel ja creat.

Aquesta prisma més petit s'hauria d'estendre la meitat de la longitud del cotxe cap a davant, als costats i per sobre del cotxe, i la mateixa longitud del cotxe per darrera, on es trobarà l'estela provocada per aquest (Lanfrit, 2005).

Una vegada construït el túnel del vent i el prisma interior al voltant del model, amb el mateix SolidWorks, restem els models a analitzar del prisma petit i després restem el resultat obtingut del túnel virtual.

D'aquesta manera obtenim dos sòlids que representen les àrees on hi haurà aire durant la simulació. Aquests ja es poden importar al programa de CFD, en aquest cas l'ANSYS.

5.2 Procés de mallat

El mètode utilitzat per generar el mallat serà el mateix per tots els models.

El mallat es compon d'una sèrie d'elements i nodes, del nombre dels quals en dependrà la precisió de la solució. La llicència del programa que té la universitat només ens permet fer simulacions amb 512.000 nodes. És per això que només simularem, i per tant només mallarem, la meitat de cada model.

Definim una sèrie de paràmetres per a generar la malla, Figura 5.10. Aquests són iguals per a tots els models i només ha calgut variar una mica la mida mínima i la proximitat mínima dels elements de la malla per ajustar-la a les necessitats específiques de cada model.

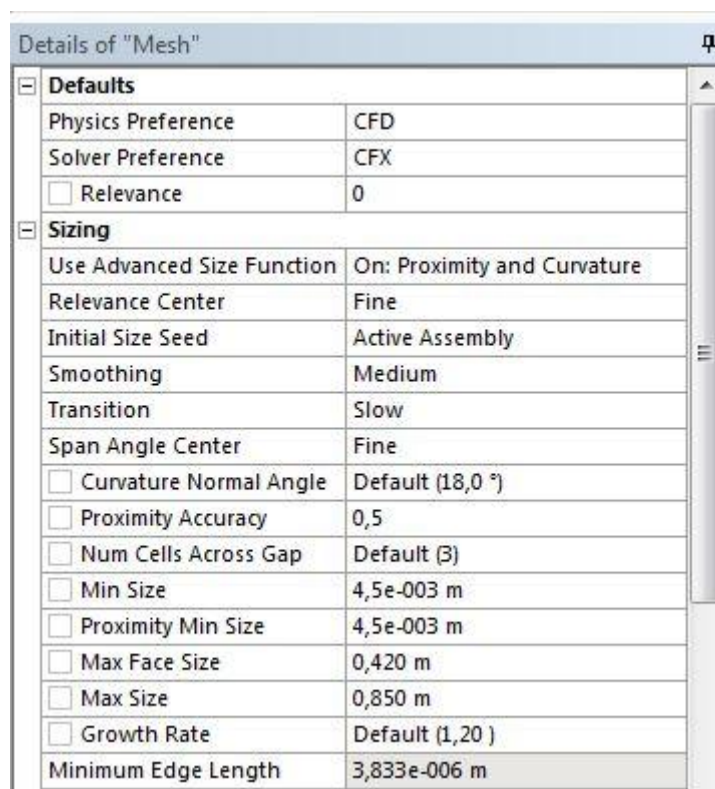


Figura 5.10. Paràmetres establerts per al mallat.

La zona del túnel del vent, el prisma més gran, es malla amb elements relativament grans, com podem veure a la Figura 5.11.

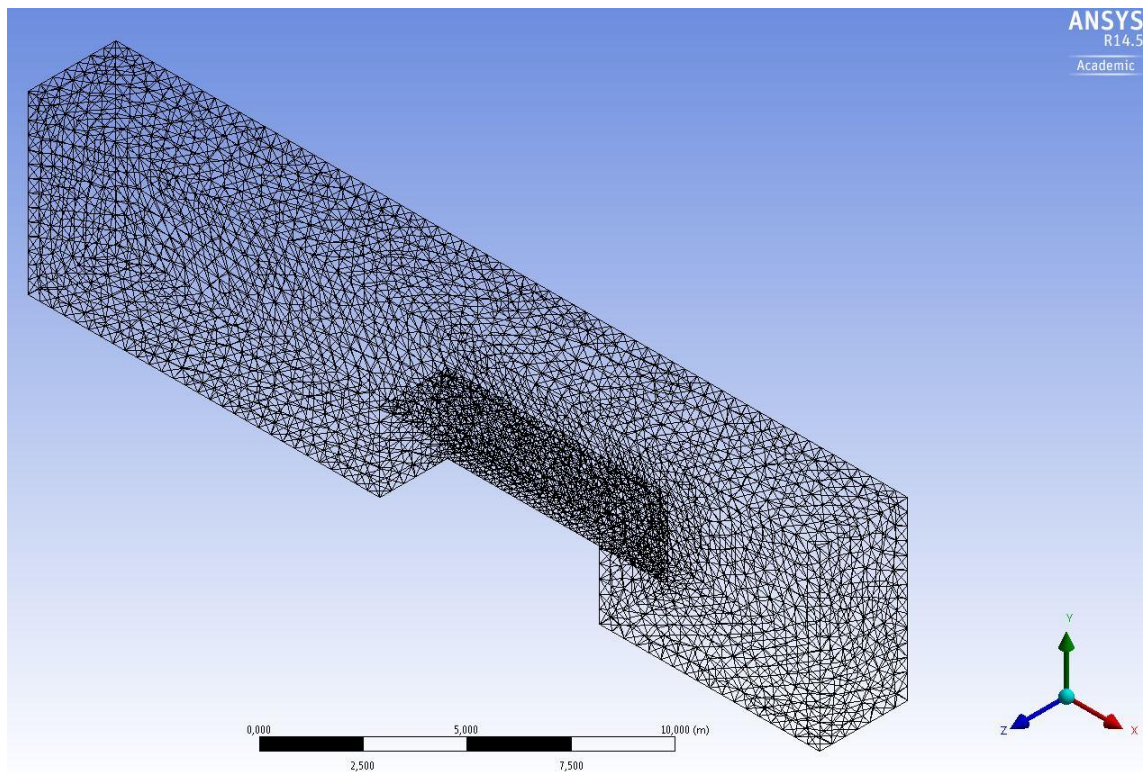


Figura 5.11. Mallat del túnel del vent.

Per altra banda la zona del prisma interior serà una zona amb una malla més intensiva, per tant amb elements més petits i més nodes, que ens proporcionarà més informació. Figura 5.12.

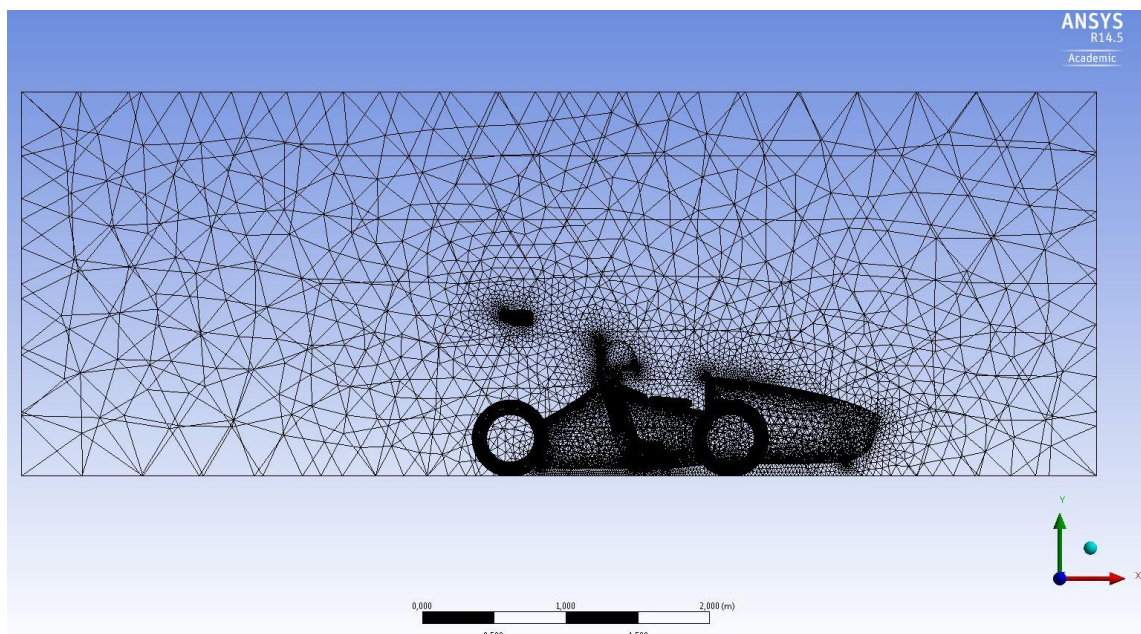


Figura 5.12. Detall del mallat del prisma interior.

S'ha intentat aconseguir la malla més definida possible, és a dir, acostar-se al màxim a la limitació de nodes de la llicència. Les malles generades, per exemple la de la Figura 5.13, tenen entre 509.000 i 484.000 nodes i entre 2.770.000 i 2.720.000 elements.

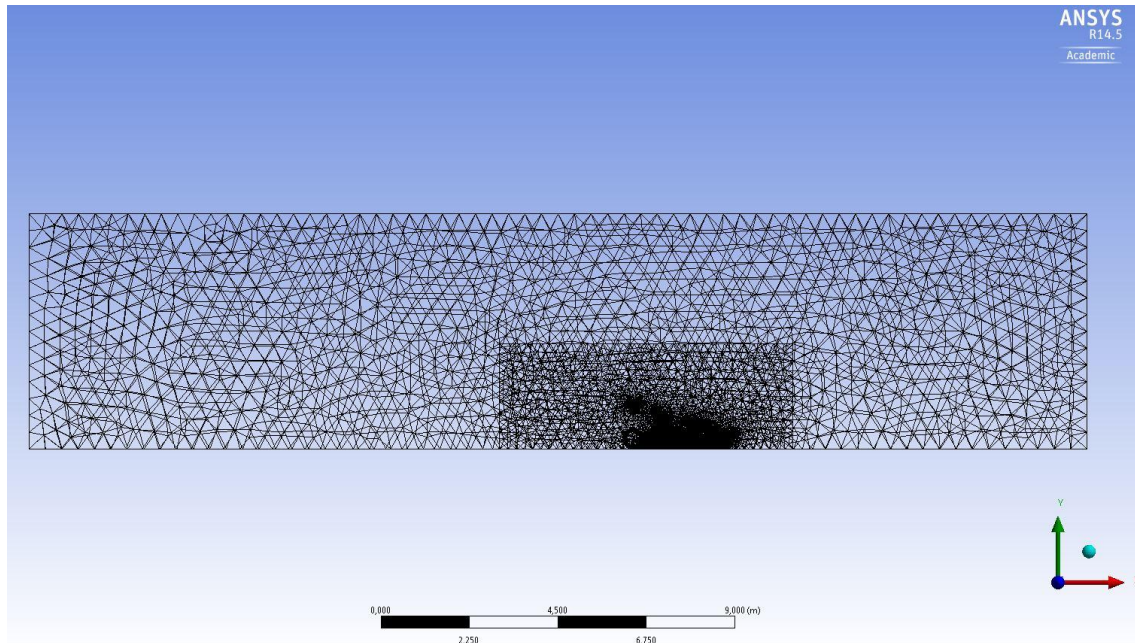


Figura 5.13. Malla generada per un dels models.

5.3 Condicions de contorn

Per definir les condicions de treball dels models hem de definir les zones del nostre problema i en quines condicions es troben:

- Entrada: definim com a “inlet” la paret de davant del model i determinem la velocitat a la que entrarà l'aire. La temperatura de treball es considera que serà sempre de 25°C. Figura 5.14.

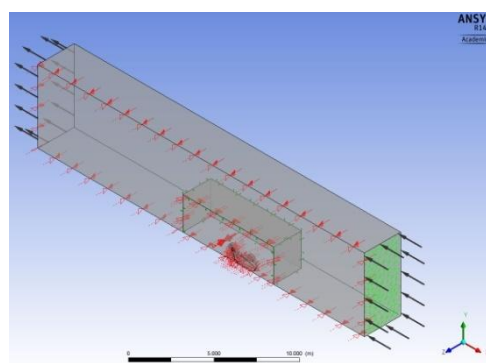


Figura 5.14. Determinació de l'entrada de l'aire.

- Sortida: definim com a “outlet” la paret de darrera del model. Es determina la pressió a la que sortirà l'aire, a pressió atmosfèrica, és a dir, pressió relativa zero. Figura 5.15.

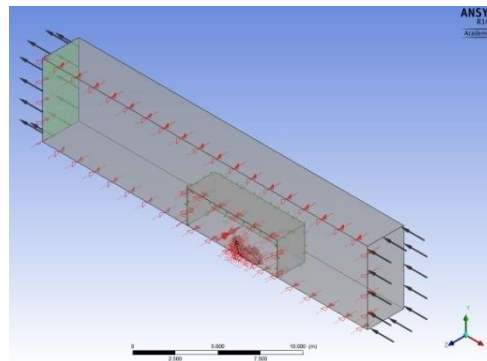


Figura 5.15. Determinació de la sortida de l'aire.

- Parets: es defineixen com a “wall” tan les parets laterals com el sostre del túnel del vent. En aquestes zones l'aire llisca lliurement (com si no hi haguessin parets) per tant es determinen com a “free slip”. Figura 5.16.

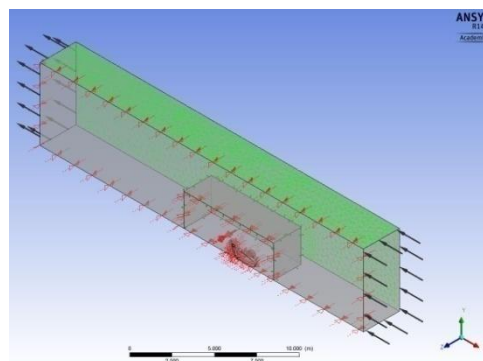


Figura 5.16. Determinació de les parets del túnel.

- Terra: la part inferior del túnel també serà de tipus “wall” però en aquest cas no existeix lliscament, l'aire en contacte amb el terra està a velocitat zero ja que la carretera exerceix de paret, i per tant es defineix com a “no slip”. Figura 5.17.

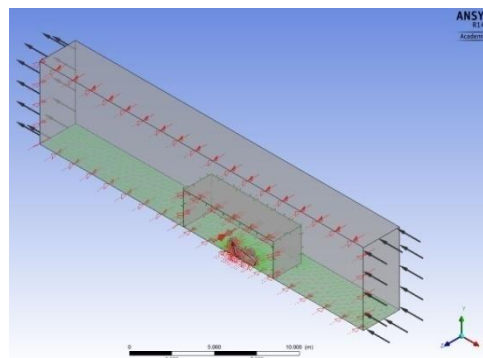


Figura 5.17. Determinació del terra.

- Simetria: la cara del túnel que divideix el model en dos es defineix com a “*symetry*” perquè el programa detecti les mateixes condicions en el que hauria de ser l'altra part del model. Figura 5.18.

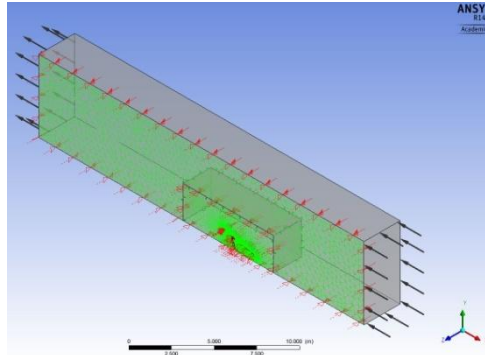


Figura 5.18. Determinació del pla de simetria.

El programa detecta per si sol que les parets de les cares interiors del prisma interior, sostre i lateral, són la interfície entre els fluids dels dos cossos i per tant han d'actuar amb continuïtat, és a dir com si no hi hagués cap canvi. Figura 5.19.

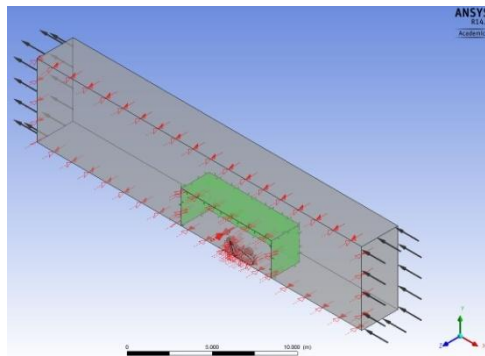


Figura 5.19. Interfície entre els dos prismes.

En aquest projecte només volem estudiar el comportament aerodinàmic i no ens interessa la distribució de temperatures en els models, per això es defineix nul la transferència de calor.

5.4 Resolució numèrica

Hem d'especificar al programa quines són les condicions de parada de la simulació. Podem definir dues condicions diferents, llavors, en el moment que es compleixi qualsevol de les dues el programa parará la simulació i mostrarà els resultats.

Les condicions de parada que hem establert són de 5.000 iteracions i d'un error residual de $1 \cdot 10^{-7}$. Figura 5.20.

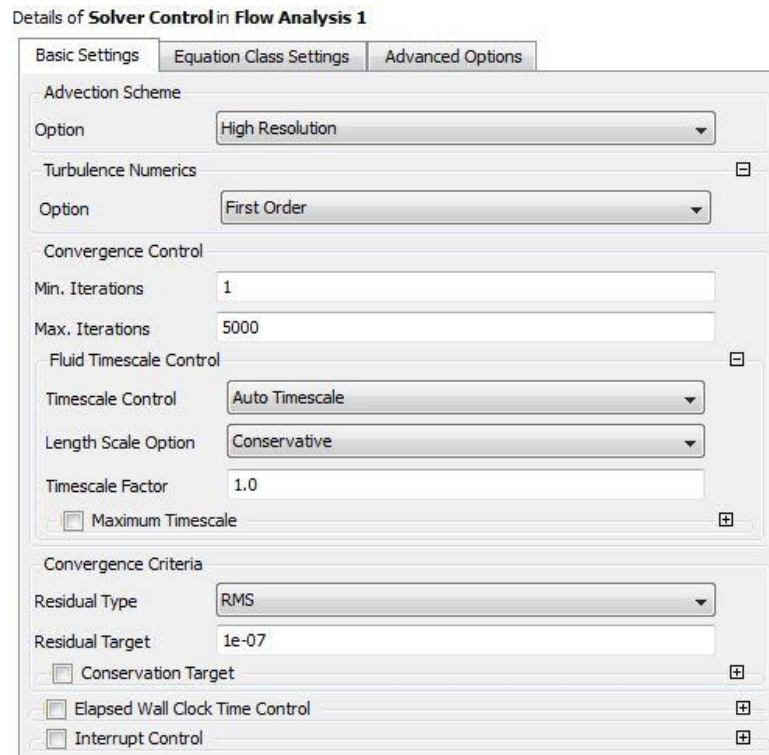


Figura 5.20. Paràmetres de parada especificats.

Les simulacions es van allargar molt i en veure que els residuals convergien i estaven estabilitzats, com es pot comprovar a Figura 5.21, es va decidir aturar les simulacions abans que acabessin, ja que la solució no variaria per més iteracions que realitzés.

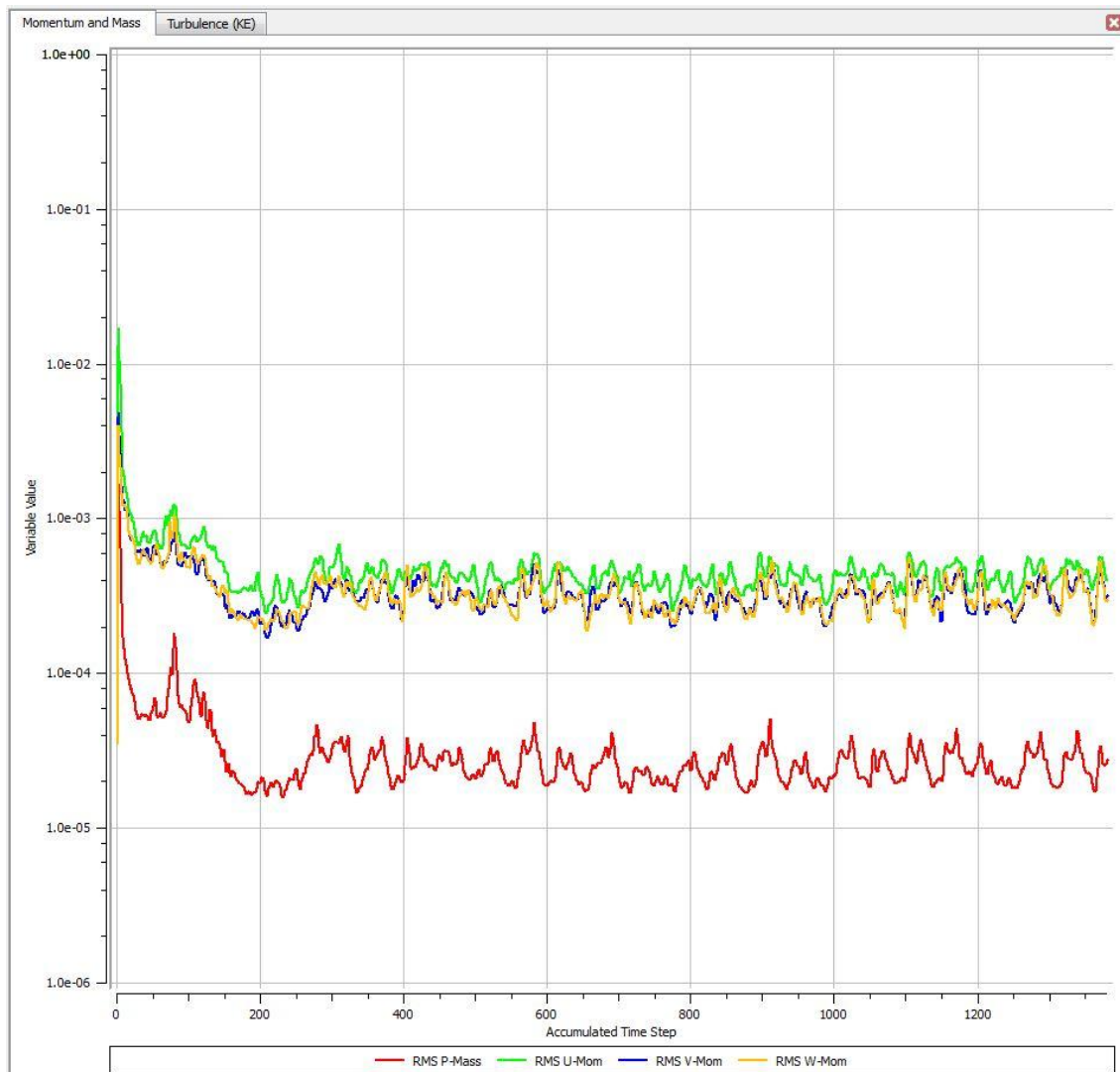


Figura 5.21. Gràfic de l'evolució dels errors residuals al llarg de les iteracions.

5.5 Visualització i interpretació dels resultats

Quan l'ordinador acaba el càlcul iteratiu, ja que es compleix alguna de les condicions de parada, o quan nosaltres decidim aturar la simulació obtenim els resultats.

El programa ens permet generar múltiples gràfics per interpretar els resultats així com ens ofereix l'opció de calcular diferents valors que ens interessin, com la força o les pressions sobre el monoplaça.

6 ANÀLISI DELS RESULTATS

En totes les simulacions s'ha establert que la velocitat d'entrada de l'aire és de 100 km/h.

També s'ha realitzat una simplificació dels models i no s'hi ha incorporat el xassís, ja que s'ha considerat que degut a la forma tubular de les barres, aquest no afectaria en gran mesura a l'estudi aerodinàmic del conjunt del vehicle.

Els models estudiats són: un sense apèndixs aerodinàmics, només consta de la carrosseria, amb aleró davanter, amb aleró posterior, amb difusor i un amb tots els apèndixs anteriors a la vegada.

A continuació es mostren els diferents resultats obtinguts de la simulació dels cinc models diferents de monoplaça.

S'agafaran com a referència els resultats del model sense apèndixs i es compararan amb els resultats dels altres models.

6.1 Distribució de pressions sobre el vehicle

En aquest apartat es mostren els gràfics de la distribució de pressions sobre els diferents models estudiats. Figures 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 i 6.5.

Podem veure ràpidament que en tots ells la zona frontal del cotxe i les zones del pilot i les rodes on incideix l'aire més directament és on hi ha una pressió més elevada.

Per altra banda veiem que en la part davantera dels dos alerons també hi ha una zona d'alta pressió, mentre que el difusor no suporta una pressió massa elevada. Podem observar però que amb la presència de l'aleró davanter el difusor experimenta una augment, encara que petit, de la pressió.

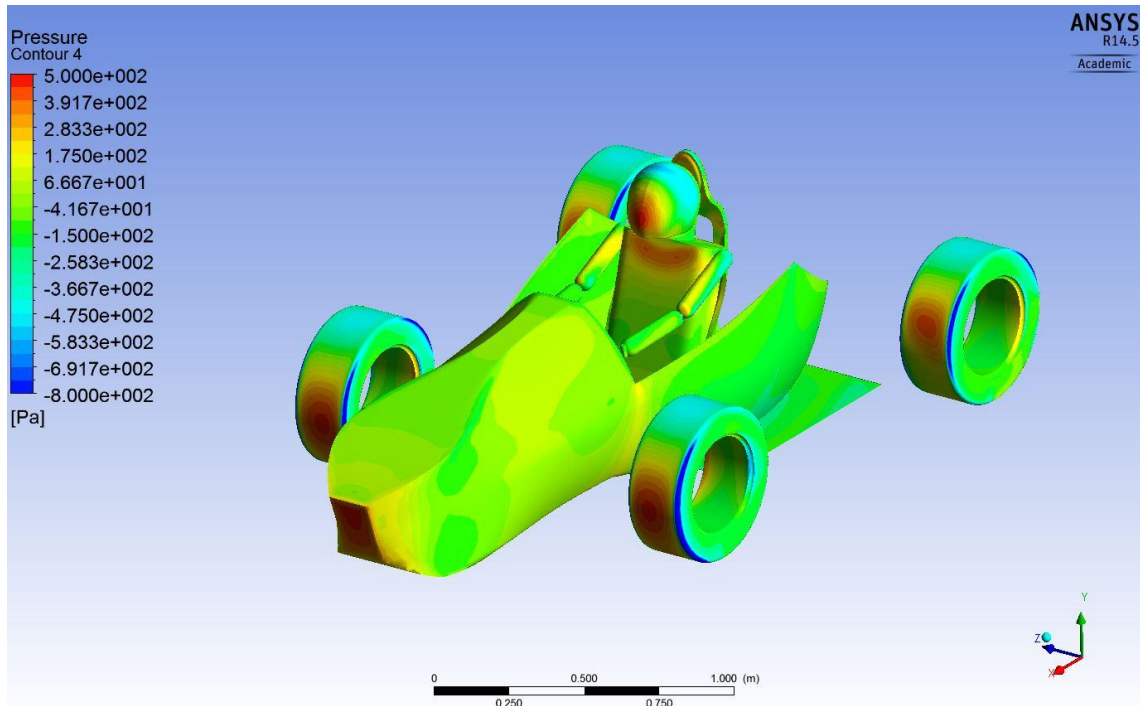


Figura 6.1. Pressions sobre el vehicle sense apèndixs.

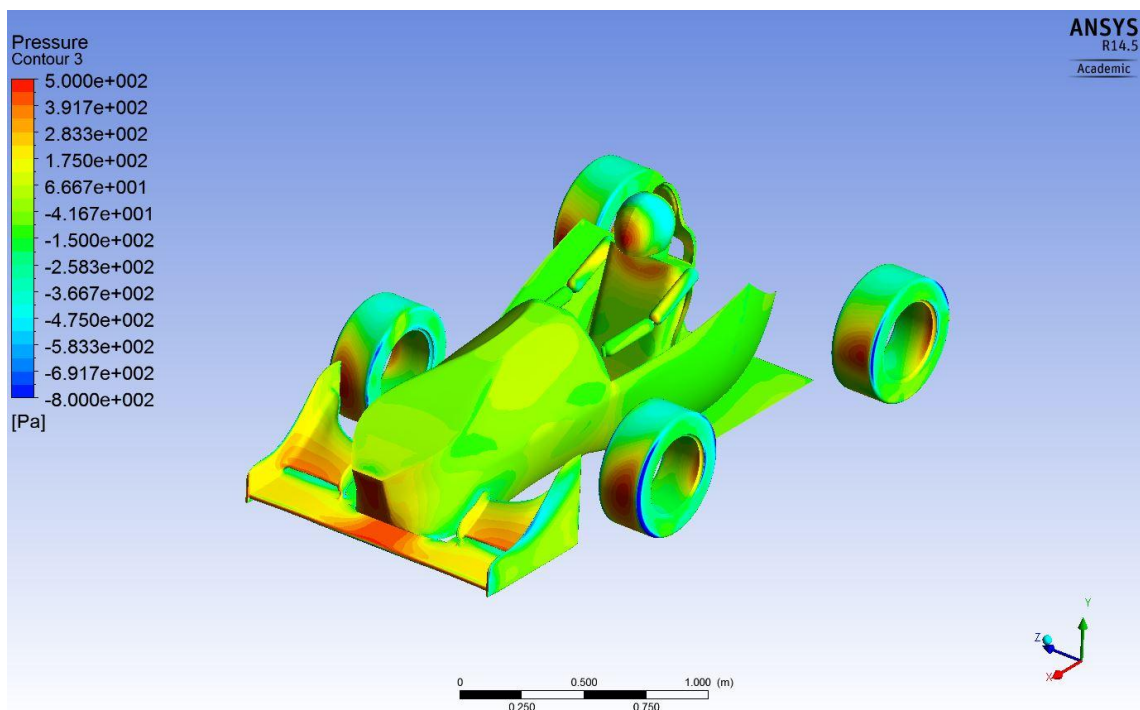


Figura 6.2. Pressions sobre el vehicle amb aleró davanter.

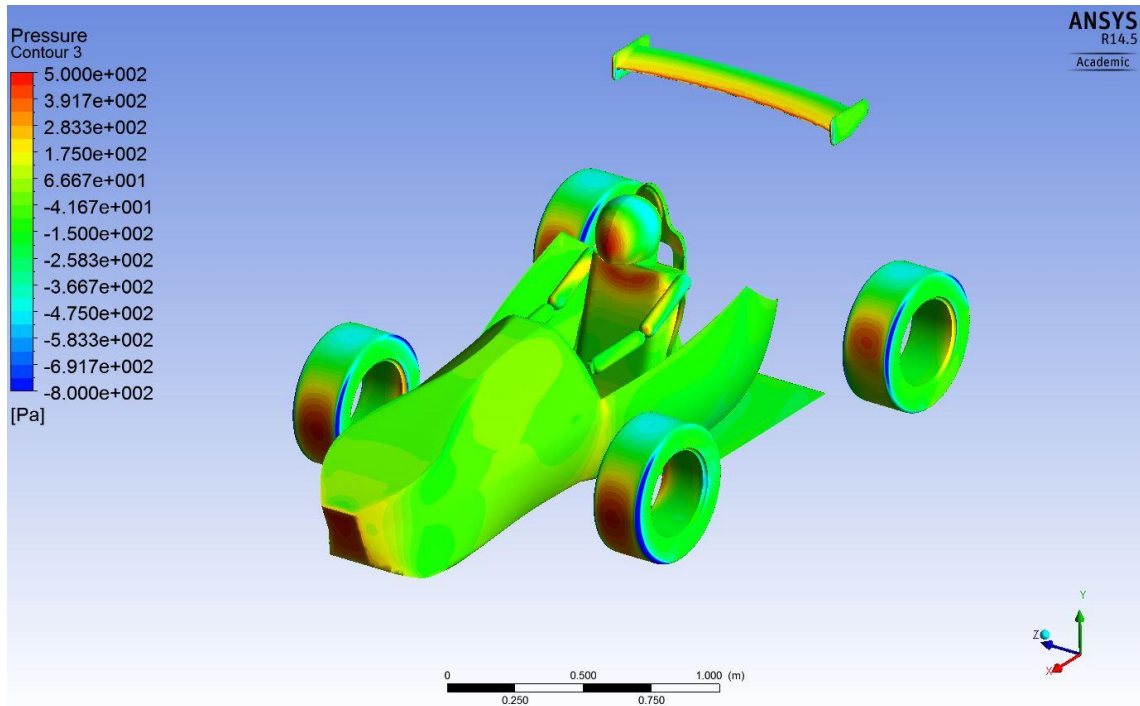


Figura 6.3. Pressions sobre el vehicle amb aleró posterior.

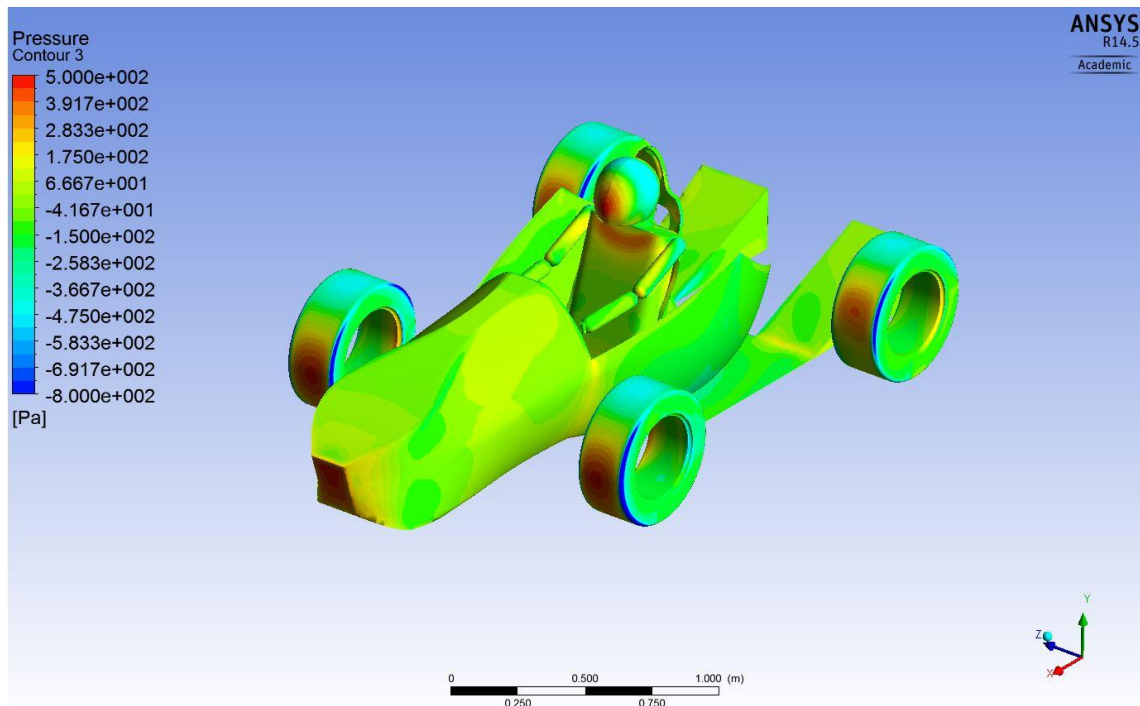


Figura 6.4. Pressions sobre el vehicle amb difusor.

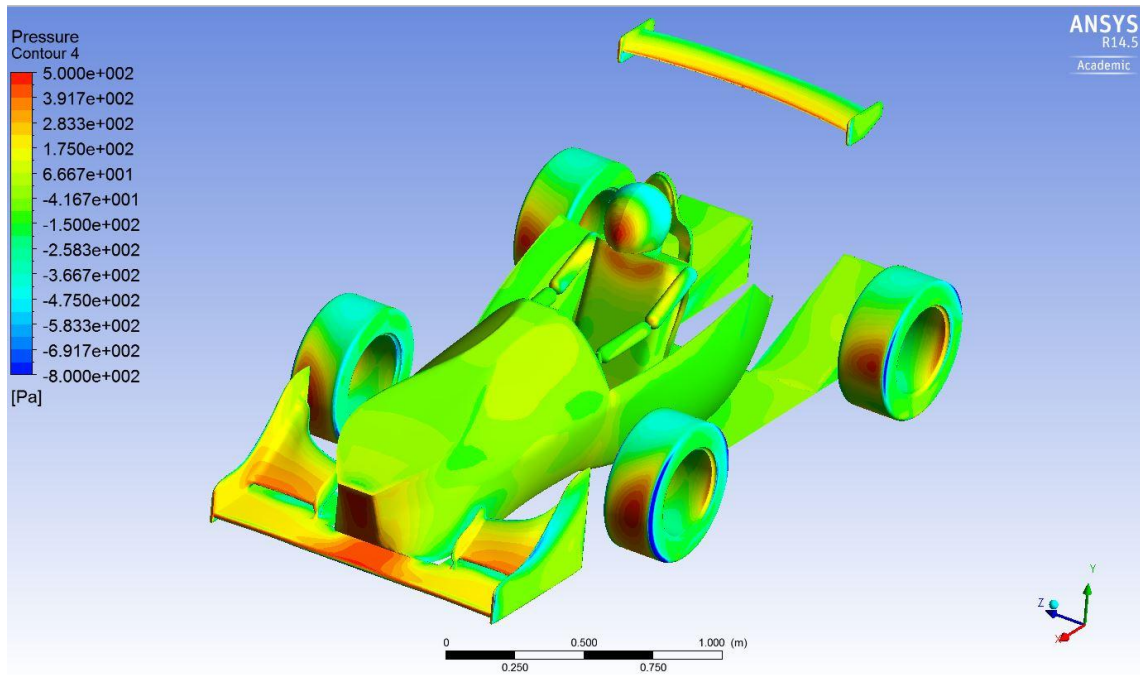


Figura 6.5. Pressions sobre el vehicle complet.

6.2 Distribució de pressions al voltant del vehicle

En aquest cas es mostren les pressions que experimenta l'aire prop del cotxe. Figures 6.6, 6.7, 6.8, 6.9, 6.10, 6.11 i 6.12.

En tots els models el perfil de pressions està situat en el pla de simetria, però en els models amb el difusor i el model amb tots els apèndixs també es presenten les pressions en un pla paral·lel al de simetria que aporta més informació.

Veiem que les imatges de les pressions existents en el pla de simetria de tots els models concorden amb el que havíem vist anteriorment, les pressions més elevades estan situades en la part frontal del cotxe i del pilot. També podem observar que darrera el seient i el pilot hi ha zones amb pressions negatives segurament degudes al reflux de l'aire.

Podem veure que el model sense apèndixs experimenta en determinades zones de la part inferior del vehicle una molt lleugera depressió degut al fons pla i a la proximitat d'aquest amb el terra. Tot i això en la major part d'aquest la pressió és positiva.

En canvi, gràcies a l'aleró davanter, la part inferior davantera del segon cotxe experimenta una disminució de la pressió més accentuada que l'anterior. En la resta del vehicle no s'observen canvis significatius.

En el tercer model veiem que la pressió disminueix respecte el primer en la part inferior de l'aleró posterior. Gràcies a l'acció d'aquest també podem veure una augment, lleuger, de la depressió que hi havia sota el vehicle en el primer cas.

En el model amb difusor veiem que la diferència és mínima respecte el primer en el pla de simetria, ja que aquest pla no passa directament pel difusor. Per altra banda, en un altre pla paral·lel, que sí que passa pel difusor, es pot comprovar que sota aquest es crea una zona de depressió que abans no existia.

En les dos últimes imatges podem comprovar que els efectes que havíem vist per separat anteriorment es repeteixen ara combinades. En el pla de simetria veiem l'efecte que tenen els dos alerons sobre el vehicle mentre que en l'altre pla veiem l'efecte que té el difusor, i seguim veient l'efecte de l'aleró de darrera.

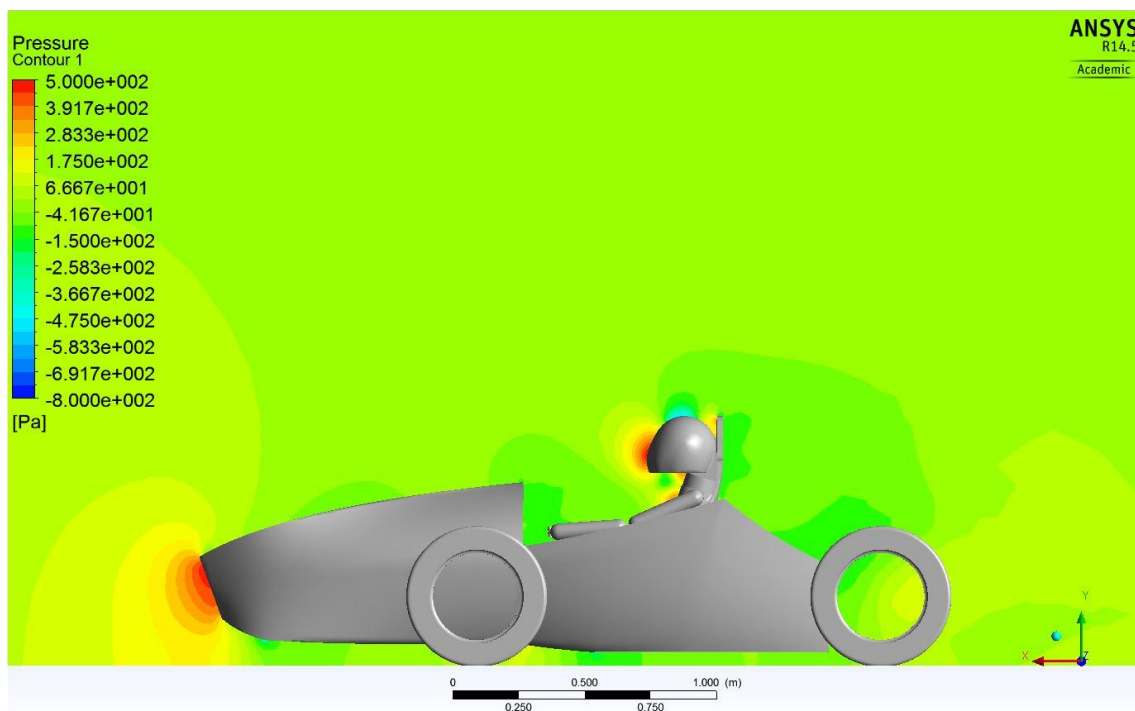


Figura 6.6. Pressions al voltant del vehicle sense apèndixs en el pla de simetria.



Figura 6.7. Pressions al voltant del vehicle amb aleró davanter en el pla de simetria.

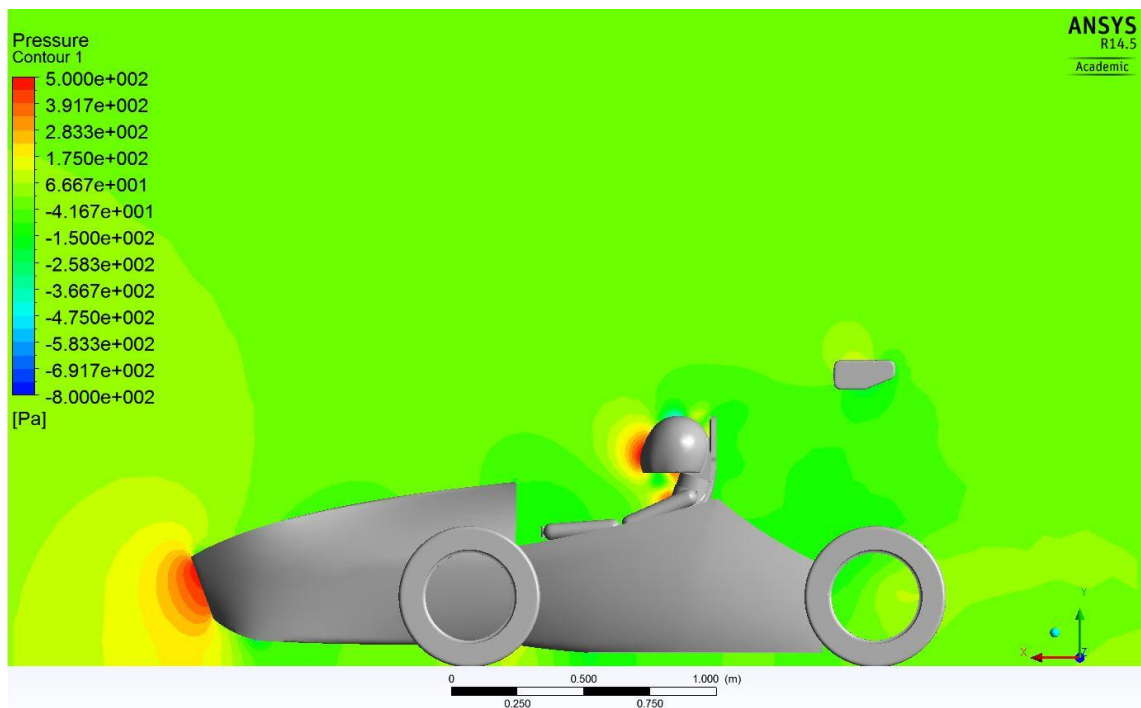


Figura 6.8. Pressions al voltant del vehicle amb aleró posterior en el pla de simetria.

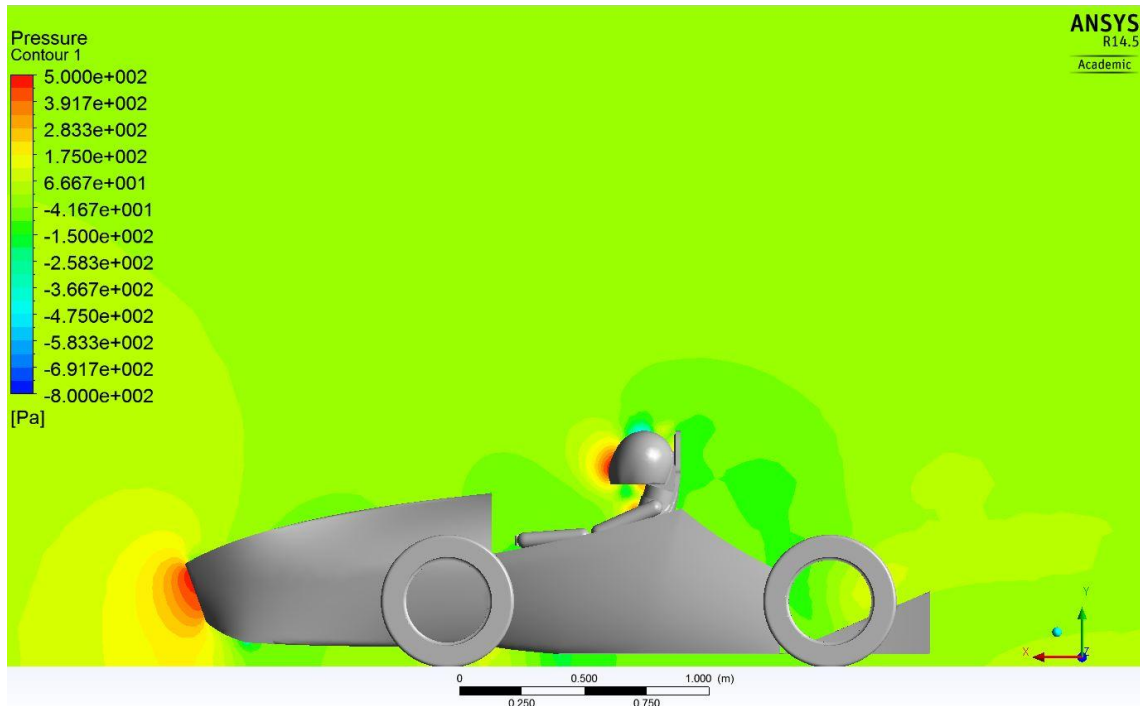


Figura 6.9. Pressions al voltant del vehicle amb difusor en el pla de simetria.

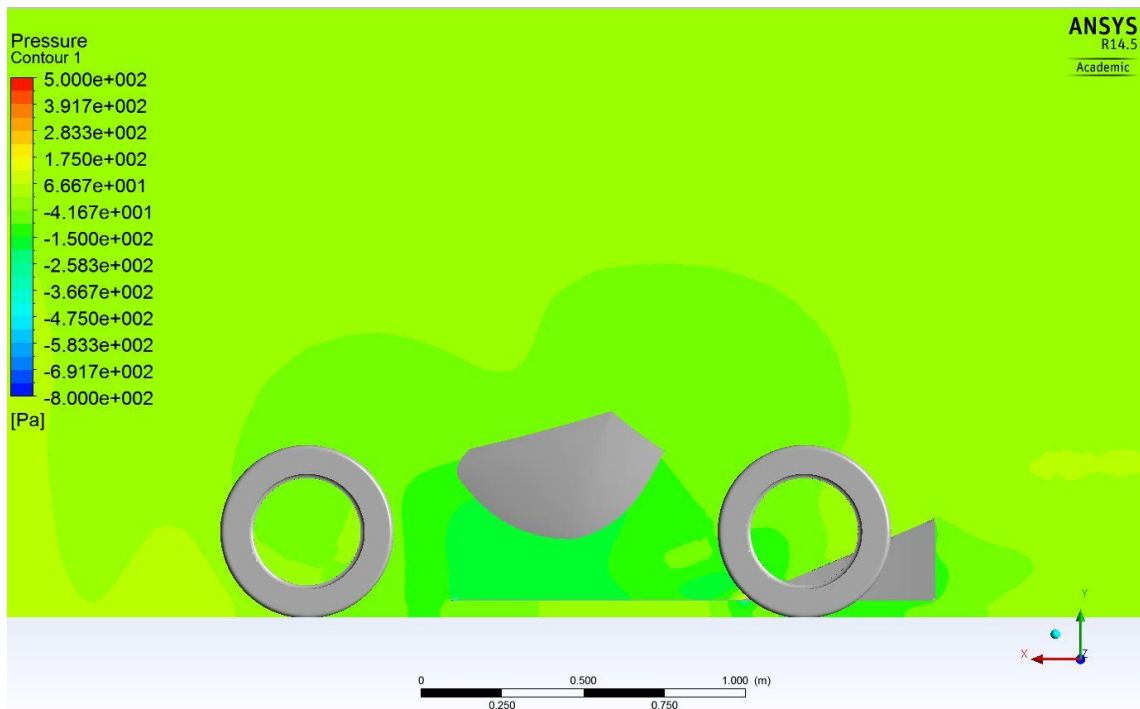


Figura 6.10. Pressions al voltant del vehicle amb difusor en un pla paral·lel al de simetria.

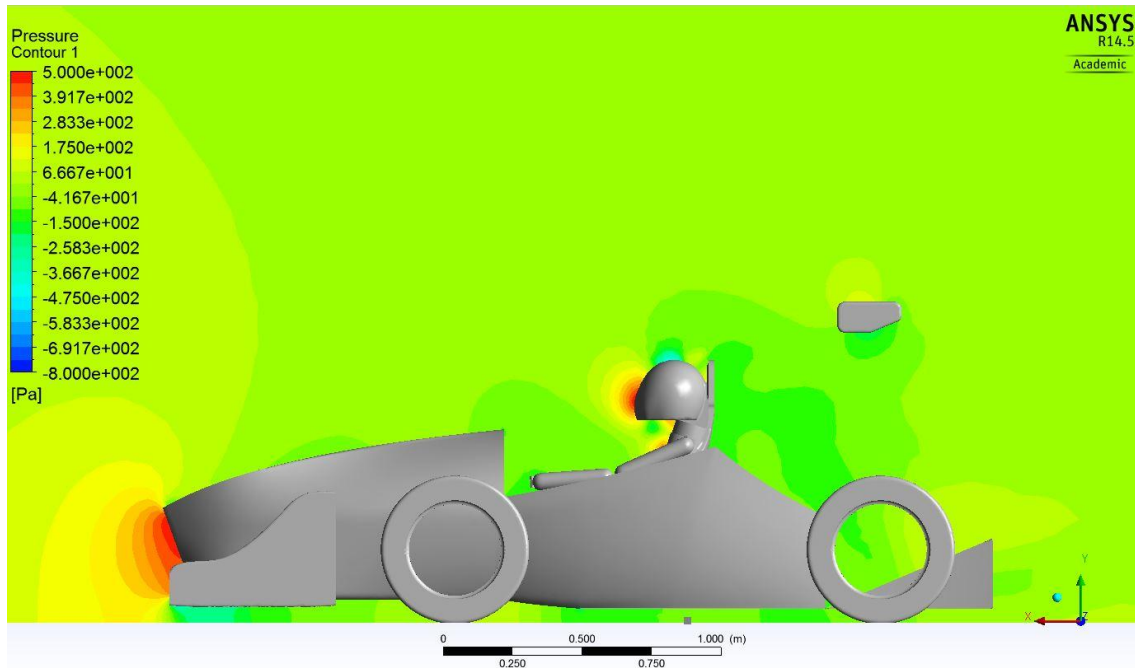


Figura 6.11. Pressions al voltant del vehicle complet en el pla de simetria.

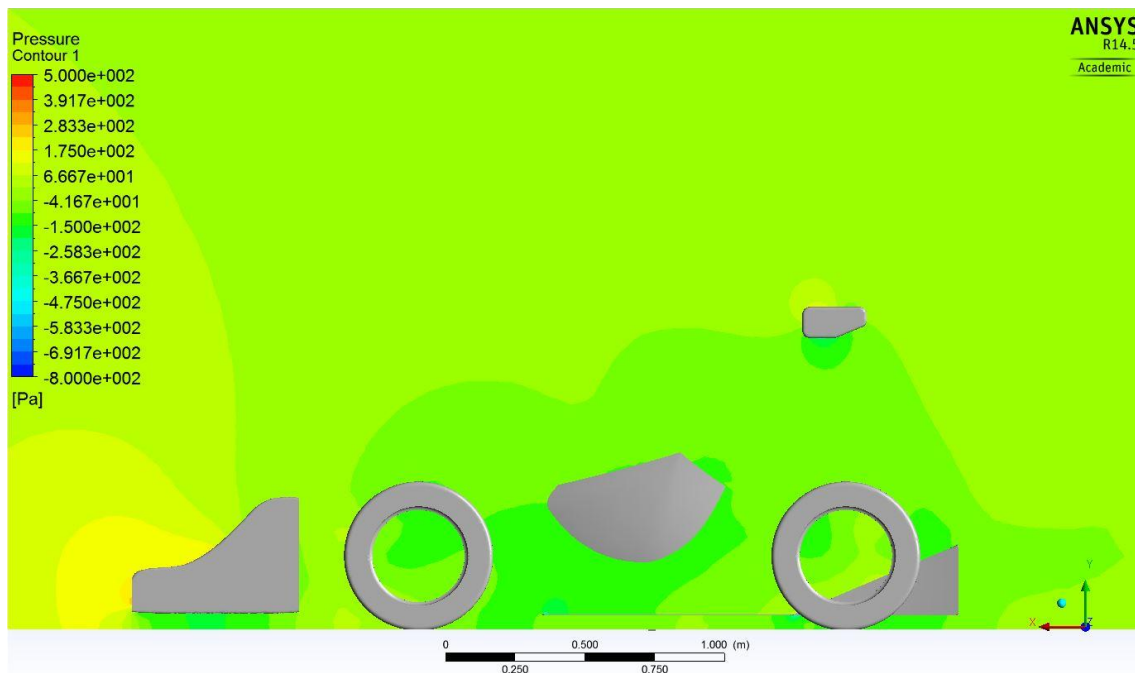


Figura 6.12. Pressions al voltant del vehicle complet en un pla paral·lel al de simetria.

6.3 Velocitats de l'aire al voltant del vehicle

A continuació es mostren els perfils de velocitat de l'aire al voltant dels models. Igual que en l'apartat anterior utilitzarem el pla de simetria en tots els casos i en algun d'ells també s'utilitzarà un pla paral·lel per ajudar a la visualització dels resultats. Figures 6.13, 6.14, 6.15, 6.16, 6.17, 6.18 i 6.19.

Observem que en tots els perfils de velocitat situats en el pla de simetria les capes d'aire situades tocant el terra i la carrosseria tenen velocitat zero. Això és degut a la capa límit. També podem veure zones on la velocitat de l'aire és zero just darrera el pilot i el seient, així com l'estela que deixa el vehicle darrera seu amb velocitats de l'aire baixes.

En tots els models es pot veure una zona amb velocitats altes just sobre el casc del pilot, la qual cosa provoca una força de sustentació positiva per l'efecte venturi.

En el model amb l'aleró davanter veiem que també la velocitat de l'aire és més elevada en la part inferior de l'aleró, cosa que ajuda a crear pressions negatives.

En el tercer model s'observen velocitats lleugerament més elevades just sota l'aleró del darrera.

Pel que fa al model amb difusor, no s'observen canvis en el pla de simetria respecte el primer model. En canvi, en el pla paral·lel veiem l'estela que provoca el difusor. En aquest pla ens faltaria veure la velocitat de l'aire que es troba travessant el difusor, i hauríem de veure un augment de la velocitat degut al canvi de secció al que es veu sotmès l'aire.

En l'últim model tornem a veure els fenòmens comentats anteriorment junts, fins i tot una mica més clarament com en el cas de l'aleró posterior.

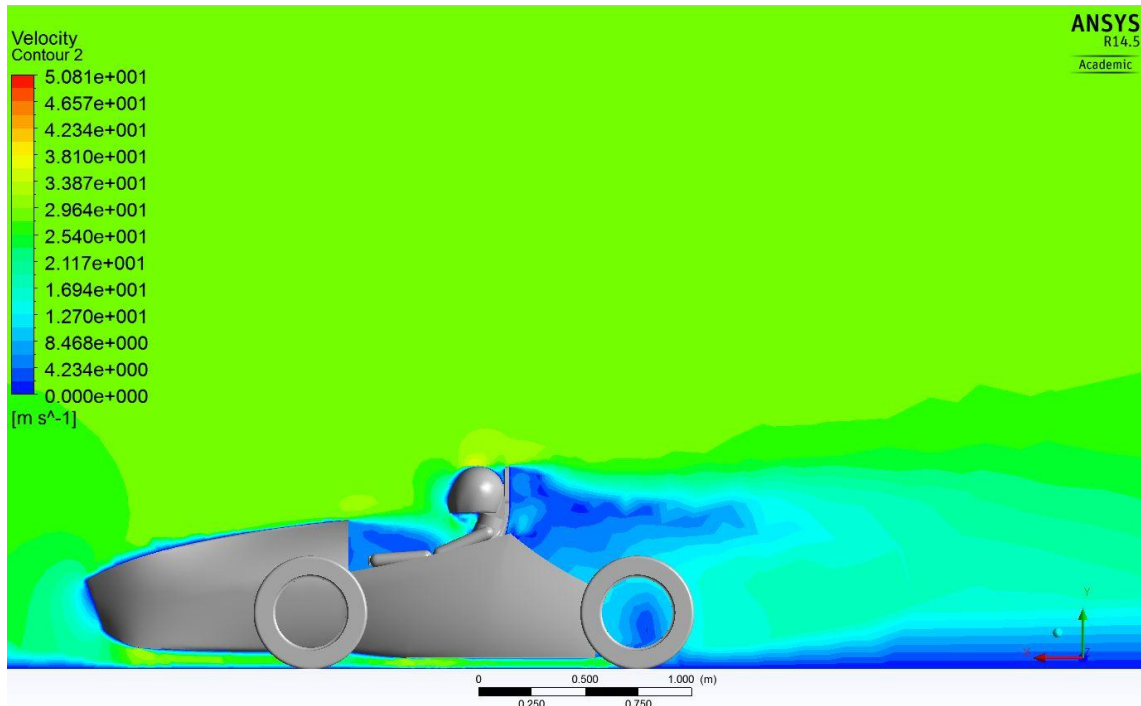


Figura 6.13. Velocitats al voltant del vehicle sense apèndixs en el pla de simetria.

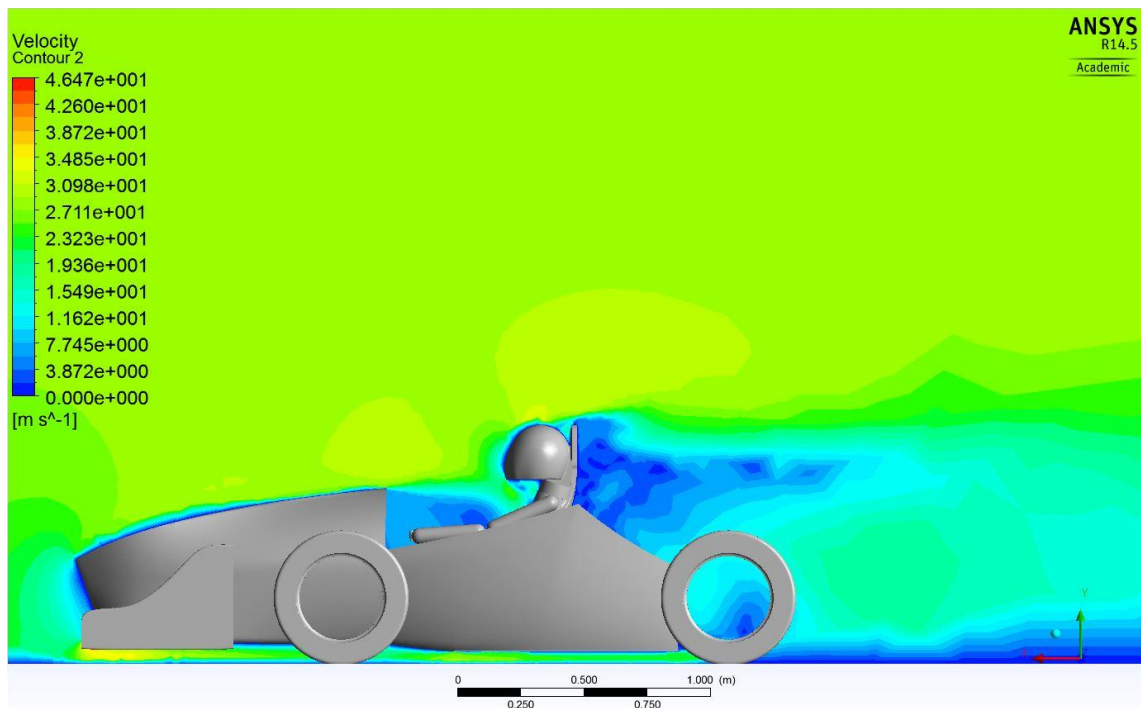


Figura 6.14. Velocitats al voltant del vehicle amb aleró davanter en el pla de simetria.

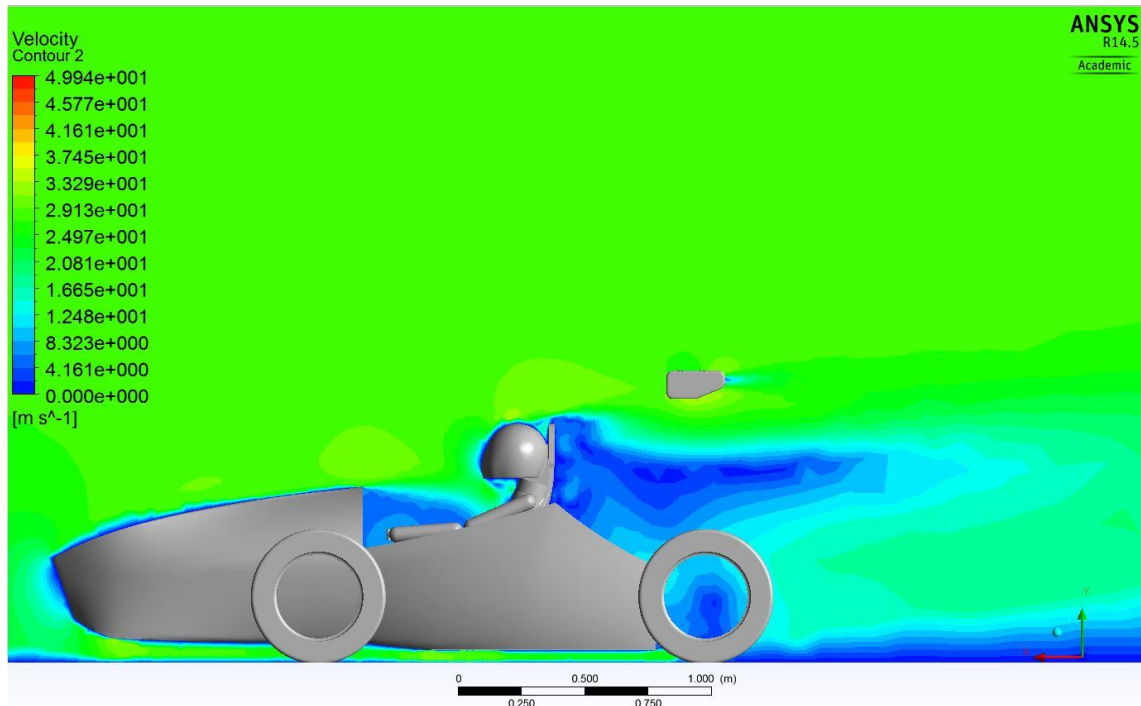


Figura 6.15. Velocitats al voltant del vehicle amb aleró posterior en el pla de simetria.

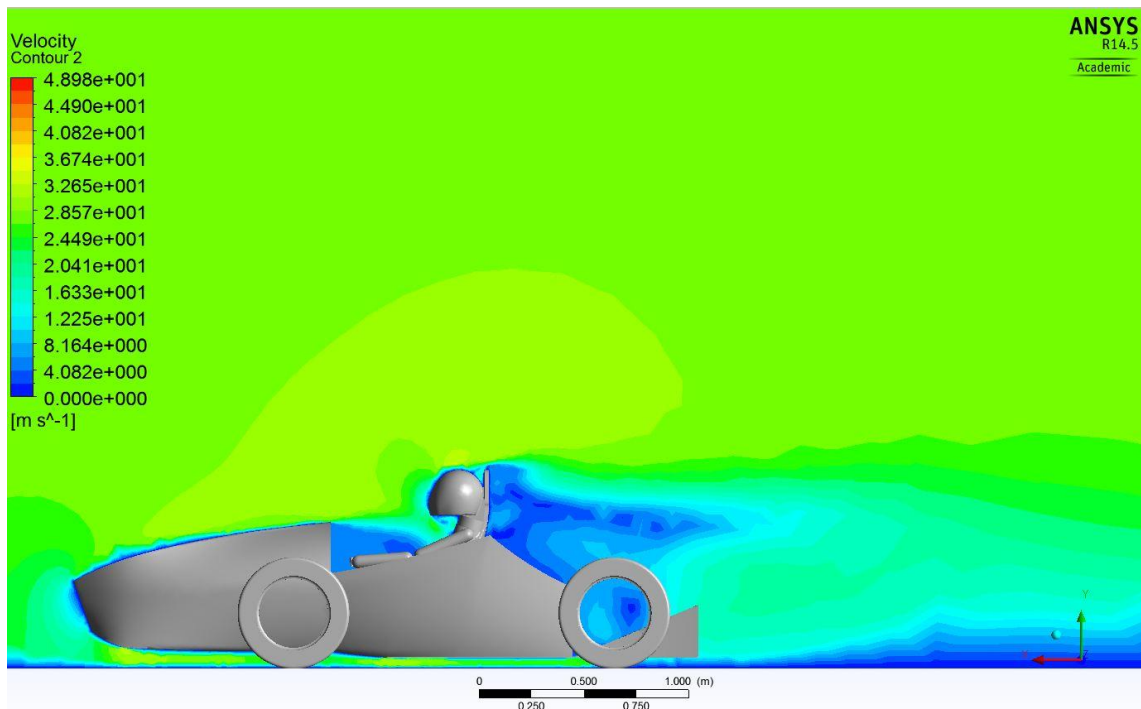


Figura 6.16. Velocitats al voltant del vehicle amb difusor en el pla de simetria.

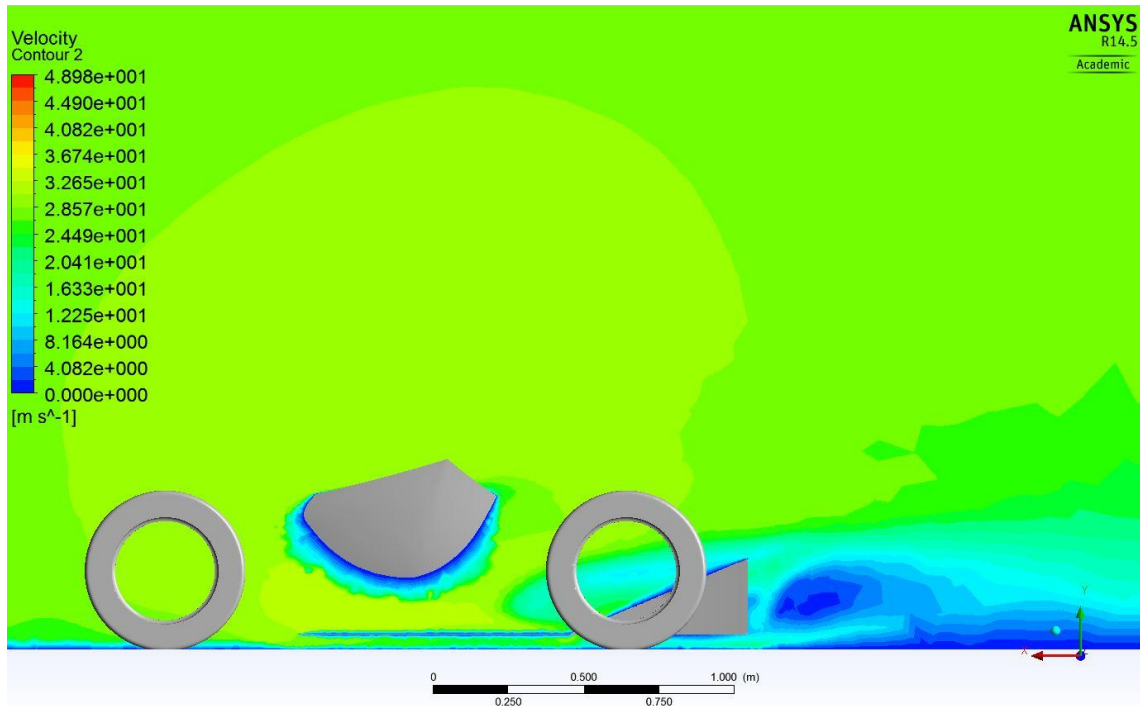


Figura 6.17. Velocitats al voltant del vehicle amb difusor en un pla paral·lel al de simetria.

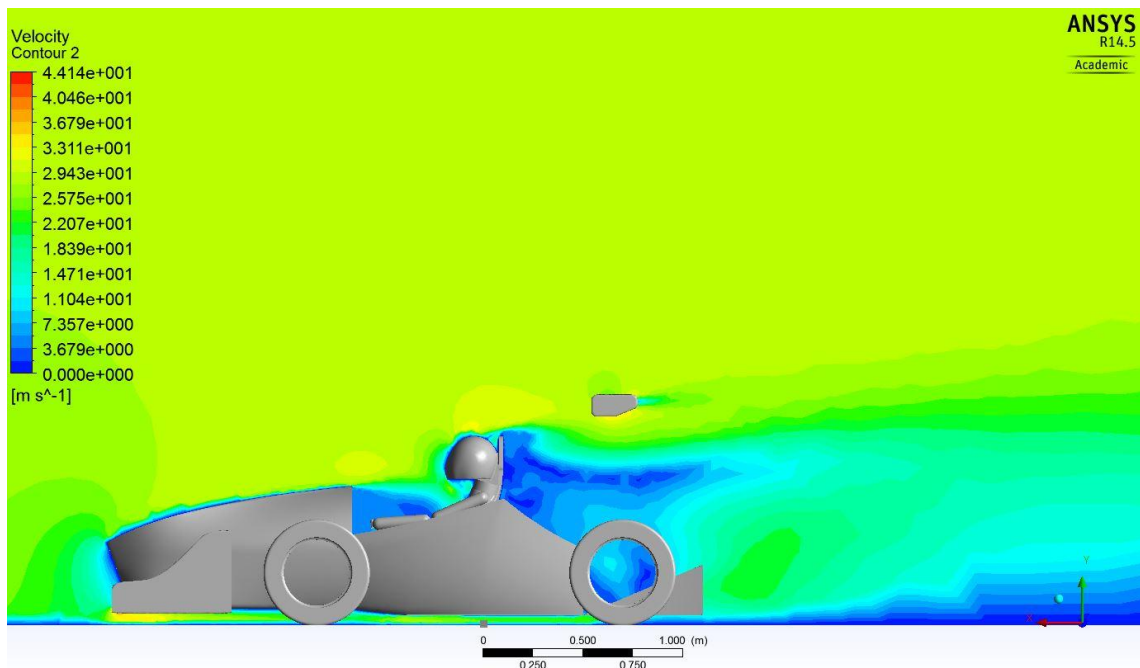


Figura 6.18. Velocitats al voltant del vehicle complet en el pla de simetria.

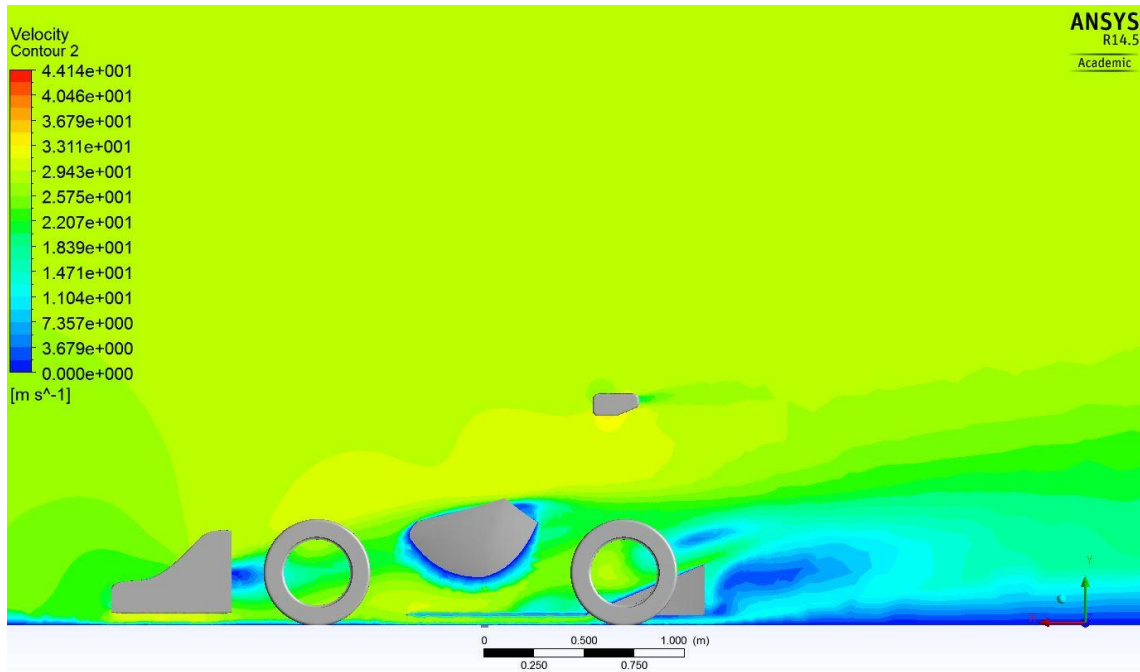


Figura 6.19. Velocitats al voltant del vehicle complet en un pla paral·lel al de simetria.

6.4 Vectors de velocitat de l'aire al voltant del vehicle

Tot seguit podem veure el perfil de velocitats en forma de vectors al voltant del vehicle, per tal de veure'n la direcció i sentit, així com comparar-ne les velocitats. Altre vegada utilitzarem dos plans per visualitzar els resultats, el de simetria i un paral·lel a aquest. Figures 6.20, 6.21, 6.22, 6.23, 6.24, 6.25, 6.26 i 6.27.

Amb les imatges que mostren els vectors de velocitat situats en el pla de simetria confirmem la suposició feta en el primer apartat d'aquest capítol i veiem com en la part posterior del vehicle es produeix un reflux de l'aire, és a dir, l'aire que surt de sota el cotxe no segueix el sentit de la resta sinó que va en sentit contrari.

També observem que les gràfiques concorden amb les vistes en l'apartat anterior, les zones amb velocitats més elevades són les mateixes que les que ens indiquen els vectors.

En el model complet veiem que l'efecte de l'aleró posterior és més significatiu, l'aire passa a més velocitat. Això pot ser degut a l'acció de l'aleró davanter, el qual redirigeix una part de l'aire cap a la zona on es troba l'aleró posterior augmentant així el rendiment d'aquest.

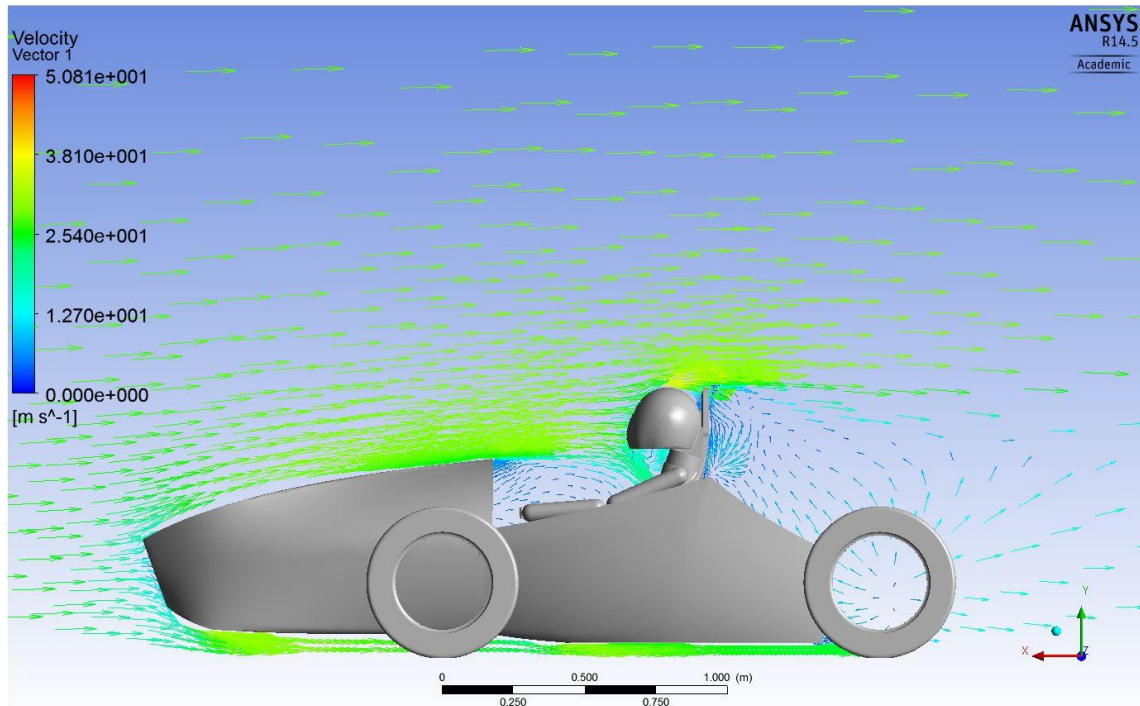


Figura 6.20. Vectors de velocitat al voltant del vehicle sense apèndixs en el pla de simetria.

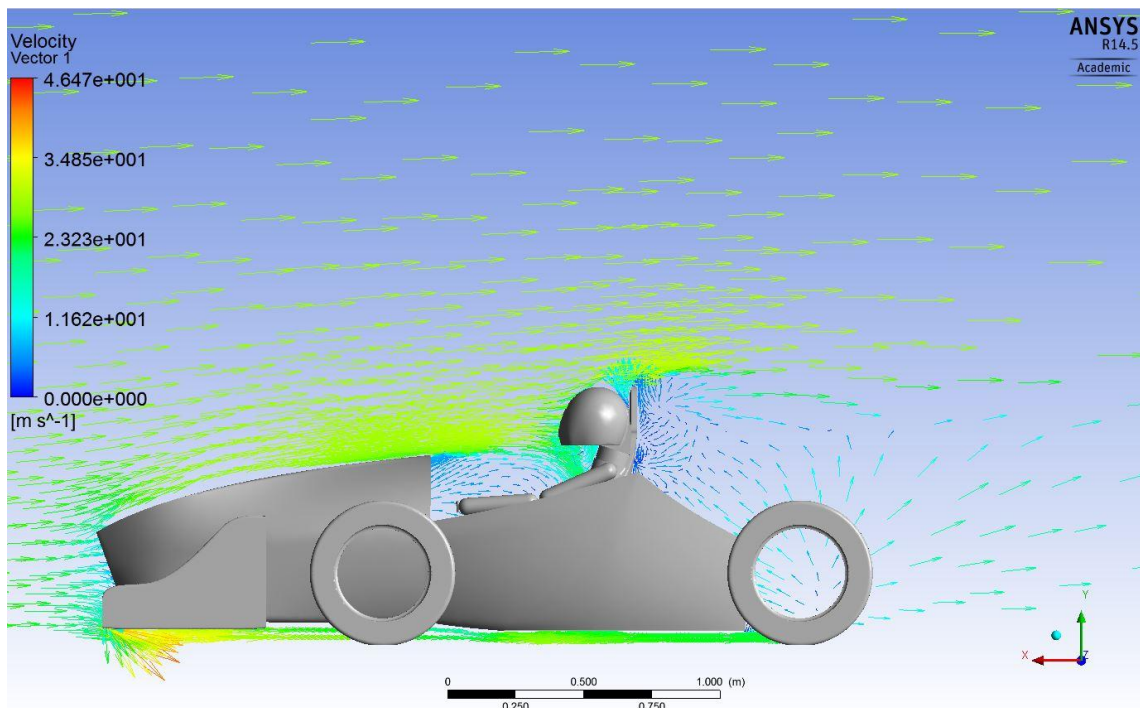


Figura 6.21. Vectors de velocitat al voltant del vehicle amb aleró davanter en el pla de simetria.

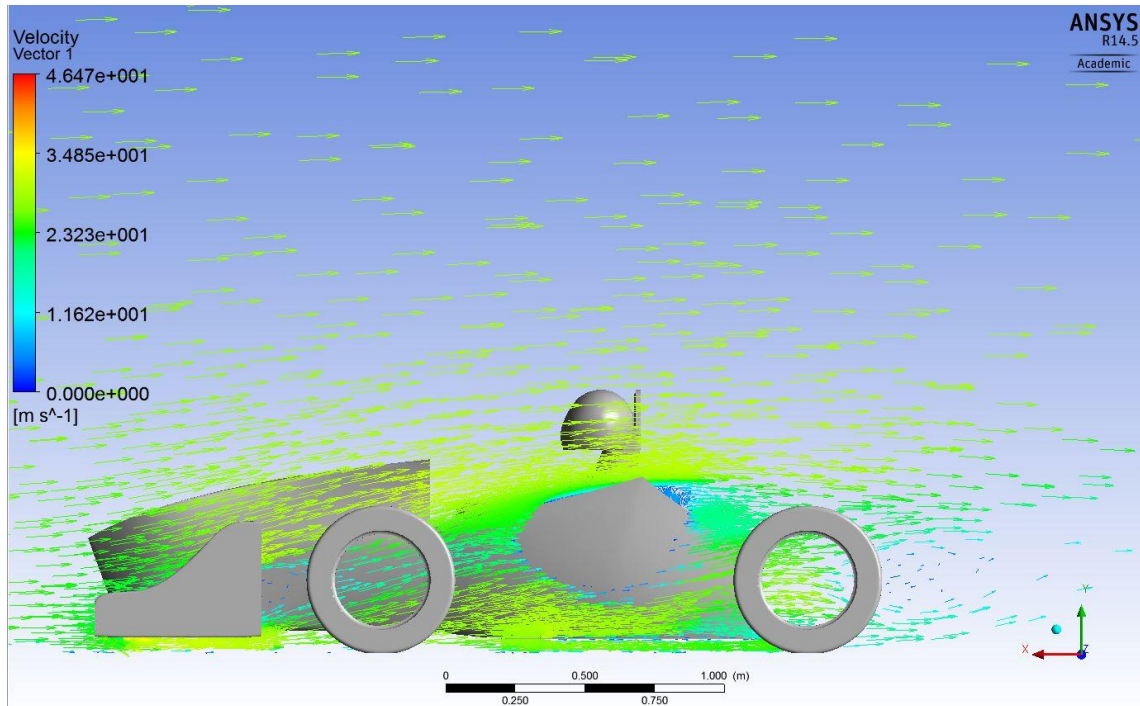


Figura 6.22. Vectors de velocitat al voltant del vehicle amb aleró davanter en un pla paral·lel al de simetria.

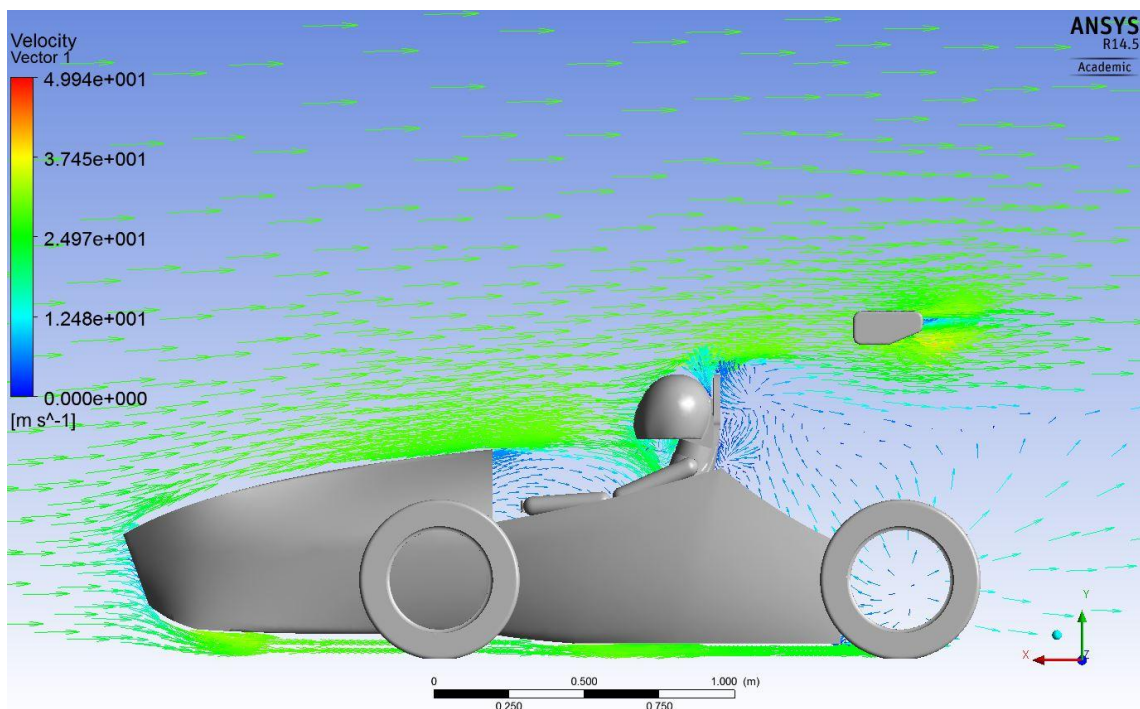


Figura 6.23. Vectors de velocitat al voltant del vehicle amb aleró posterior en el pla de simetria.

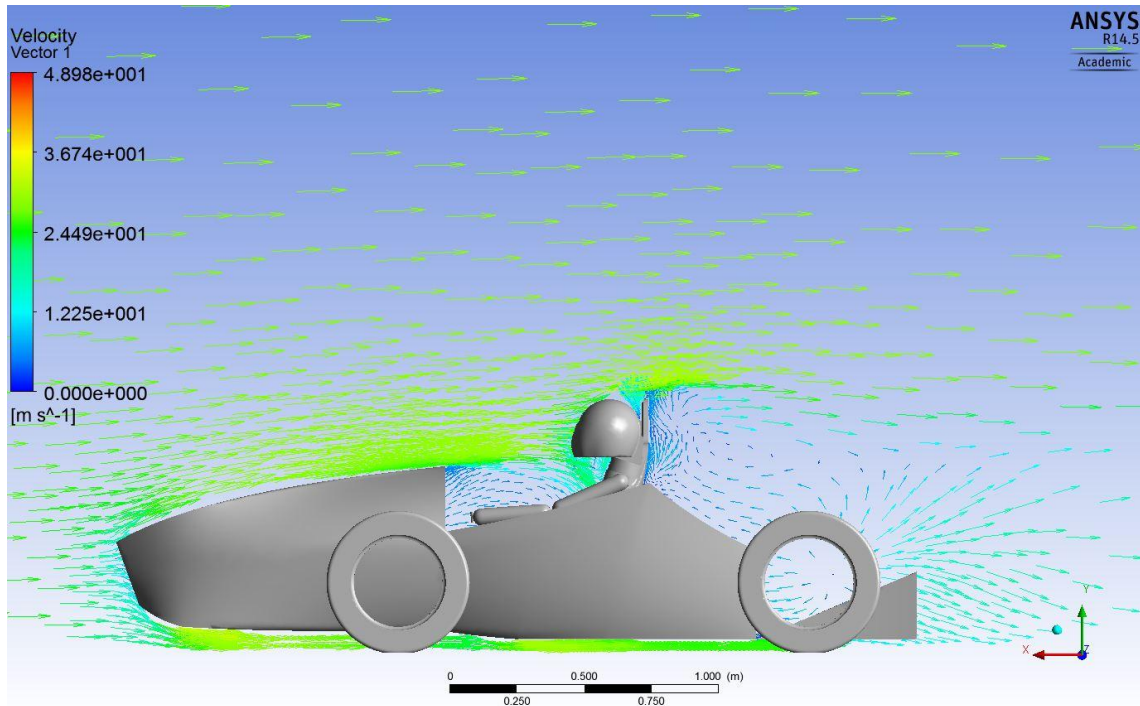


Figura 6.24. Vectors de velocitat al voltant del vehicle amb difusor en el pla de simetria.

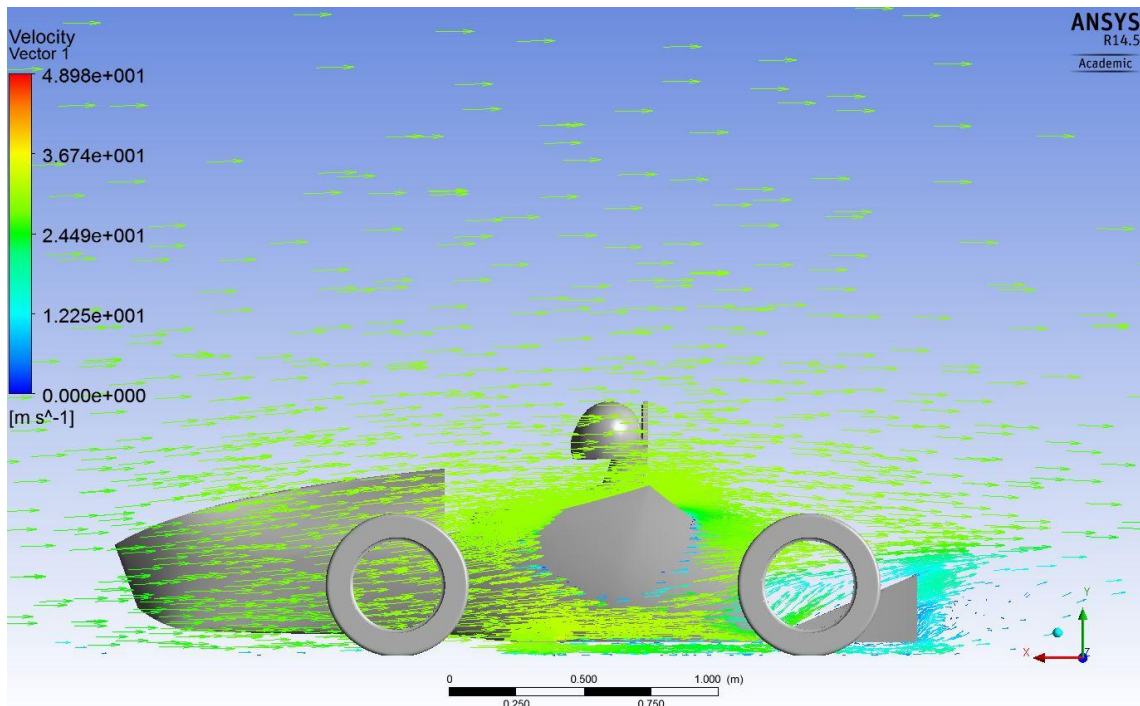


Figura 6.25. Vectors de velocitat al voltant del vehicle amb difusor en un pla paral·lel al de simetria.

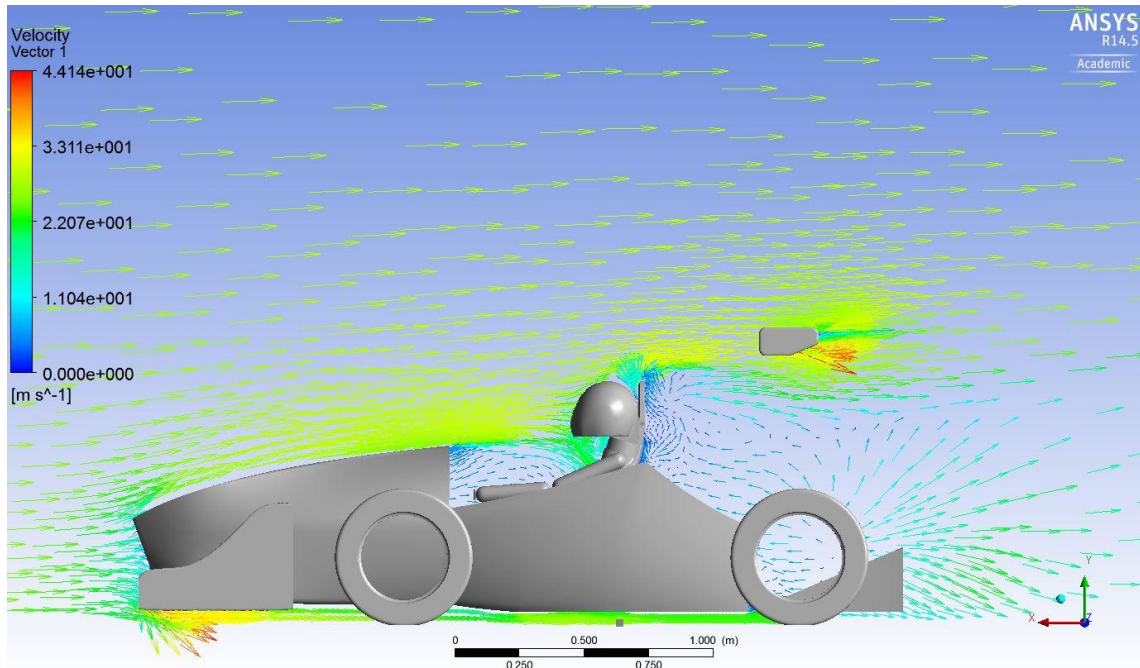


Figura 6.26. Vectors de velocitat al voltant del vehicle complet en el pla de simetria.

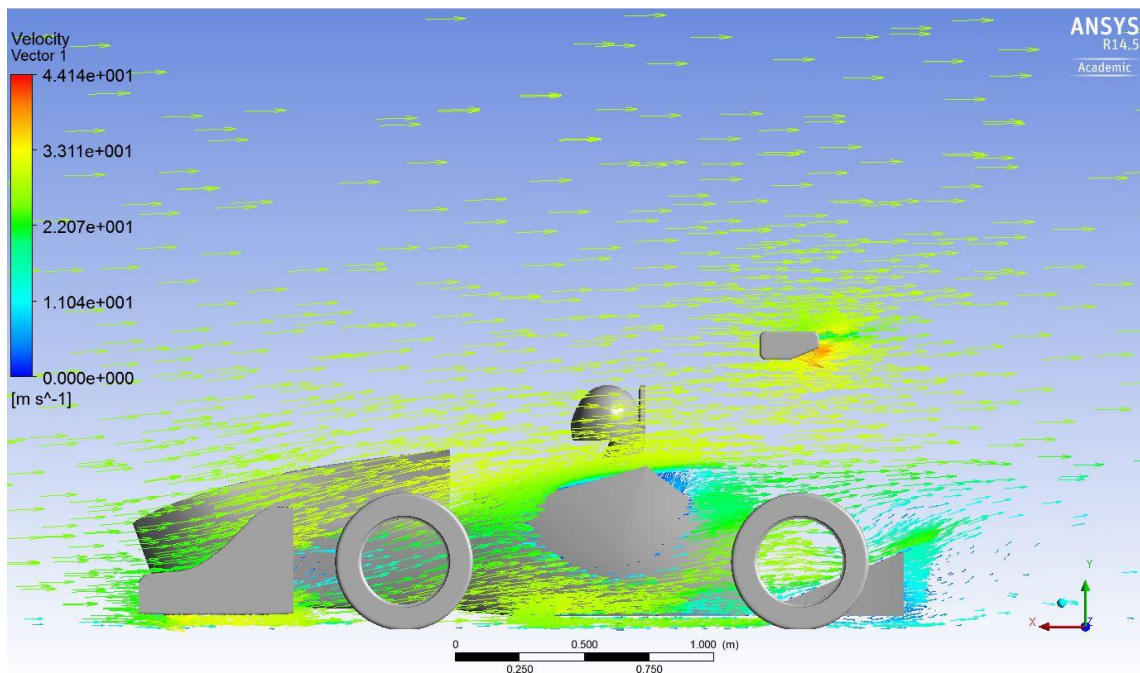


Figura 6.27. Vectors de velocitat al voltant del vehicle complet en un pla paral·lel al de simetria.

6.5 Coeficients aerodinàmics

Tot seguit calcularem els coeficients de resistència a l'avanç (C_D) i de sustentació (C_L) per cadascun dels model estudiats.

Per fer-ho s'han utilitzat les Equacions 6.1 i 6.2, explicades en l'Annex B: fonaments d'aerodinàmica.

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} v^2 A_f} \quad (\text{Eq. 6.1})$$

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} v^2 A_f} \quad (\text{Eq. 6.2})$$

La velocitat d'entrada del vent és de 100 km/h (és a dir 27,778 m/s) i la densitat de l'aire a 25°C és de 1,23 kg/m³. Aquests són paràmetres que romanen constants per les simulacions de tots els models.

Per calcular el C_D utilitzarem la força exercida sobre els models en la direcció X (F_D) mentre que per calcular el C_L utilitzarem la força en la direcció Y (F_L). L'àrea utilitzada en les dues equacions és sempre l'àrea fontal de cada model. Taula 6.1.

	Sense apèndixs	Aleró davanter	Aleró posterior	Difusor	Complet
Àrea frontal (m²)	0,3632	0,4033	0,3841	0,4008	0,4395
F_D (N)	-102,386	-149,297	-112,535	-102,548	-157,947
F_L (N)	82,689	-22,792	55,708	51,195	-71,735
C_D	-0,5940	-0,7800	-0,6173	-0,5392	-0,7573
C_L	0,4797	-0,1191	0,3056	0,2692	-0,3439

Taula 6.1. Àrea frontal, forces i coeficients aerodinàmics pels diferents models estudiats.

Les forces de resistència a l'avanç són negatives en tots els casos perquè s'oposa al moviment, va en sentit contrari a l'eix X. Mentre que la força de sustentació pot ser positiva o negativa

depenent de si té tendència a elevar el cotxe, positiva, o si l'empeny contra el terra, negativa. D'igual manera passa amb coeficients aerodinàmics.

El mètode utilitzat per calcular l'àrea frontal dels model està explicat en l'Annex C: càlcul de l'àrea frontal.

En aquest projecte, s'estudien els apèndix aerodinàmics conjuntament amb la resta del vehicle. Es per això que aquí no té sentit calcular la finesa dels models ja que aquesta es calcula per elements individuals que generen sustentació negativa, *downforce*, i així determinar la seva eficàcia.

A continuació, Figura 6.28, podem comparar els valors obtinguts amb els nostres models amb els coeficients aerodinàmics típics d'algunes formes genèriques.

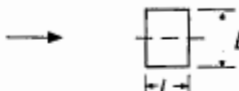
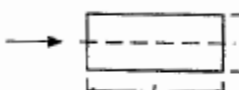
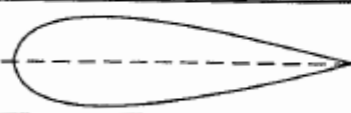
			C_L	C_D
1	Circular plate		0	1.17
2	Circular cylinder $L/D < 1$		0	1.15
3	Circular cylinder $L/D > 2$		0	0.82
4	Low drag body of revolution		0	0.04
5	Low drag vehicle near the ground		0.18	0.15
6	Generic automobile		0.32	0.43
7	Prototype race car		-3.00	0.75

Figura 6.28. Valors típics dels coeficients de *drag* i *lift* per algunes formes genèriques.

Veiem que els cotxes de carreres solen tenir el coeficient de resistència a l'avanç molt elevat, mentre que tenen un coeficient de *lift* negatiu que els ajuda a mantenir l'adherència a les corbes.

7 RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost total de l'estudi realitzat de l'aerodinàmica d'un vehicle de competició Formula Student mitjançant programari informàtic CFD, tenint en compte els costos de recerca i desenvolupament, els costos de l'amortització dels equips utilitzats i els costos de redacció és de vuit mil set-cents setanta euros amb seixanta-nou cèntims amb IVA inclòs.....8.770,69 €

8 CONCLUSIONS

Com era d'esperar el monoplaça només amb la carrosseria, sense cap apèndix aerodinàmic incorporat, genera sustentació positiva. És per això que és necessària la utilització d'algun, o varis, apèndixs que ajudin a millorar-ne el rendiment en cursa, és a dir la velocitat de pas per volta.

L'element aerodinàmic que més contribueix a la creació de *downforce* és clarament l'aleró davanter ja que aconsegueix generar sustentació negativa sobre el cotxe. Aquest, però, és també qui més contribueix a l'augment de la resistència.

En canvi l'aleró posterior és l'element que menys *downforce* genera. Aquest però, tot i perjudicar l'avanç del cotxe ho fa de manera molt menor comparat amb l'aleró davanter, ja que té una millor relació de finesa (*downforce/drag*).

Per altra banda, veiem que el difusor gairebé no perjudica la velocitat punta del vehicle, ja que provoca un augment mínim del *drag*, i tot i així aconsegueix generar més força de sustentació negativa que l'aleró posterior.

En la Taula 8.1 es pot veure els quilograms de força contra l'avanç del cotxe i els quilograms de força contra el terra que genera cada element aerodinàmic respecte el model sense apèndixs.

	Aleró davanter	Aleró posterior	Difusor
F_D (kg)	-4,79	-1'04	-0,0165
F_L (kg)	10,76	2,75	3,21

Taula 8.1. Kg de força de resistència i de sustentació negativa pels diferents apèndixs.

Respecte el model complet, amb tots els apèndixs incorporats, veiem que la *downforce* augmenta de manera molt més significativa (gairebé tres vegades més) que no pas el *drag* respecte el model més senzill, la qual cosa és molt positiva i indica els beneficis d'incorporar aquests elements.

En la Figura 8.1 veiem l'efecte que té sobre el model complet cadascun dels apèndixs aerodinàmics.

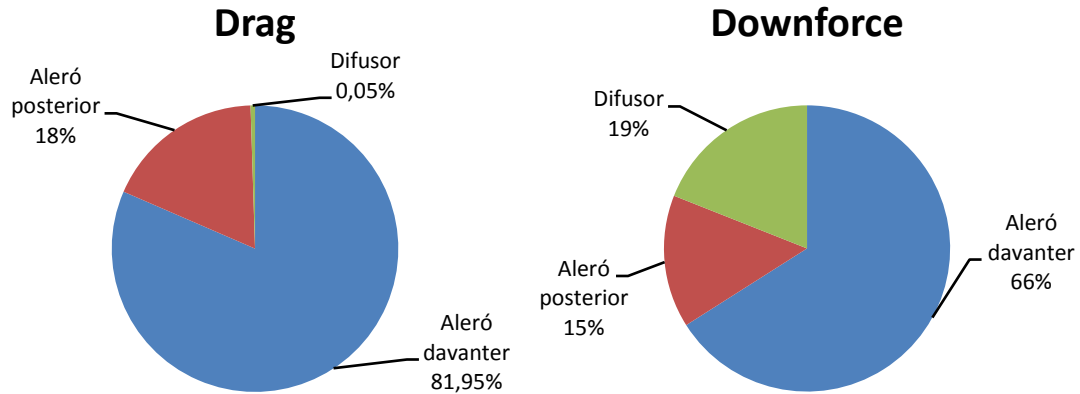


Figura 8.1. Percentatge de participació aerodinàmica dels apèndixs aerodinàmics.

Veient els resultats, creiem que és molt recomanable la incorporació d'un aleró davanter i un difusor, en canvi tenim més dubtes sobre l'efecte positiu d'incorporar un aleró posterior i caldria realitzar un estudi més acurat per comprovar si es pot trobar una configuració més satisfactòria per aquest element.

Seria interessant estudiar la incorporació d'un aleró posterior de doble pla. Tenint en comte que la resistència augmentaria, creiem que la força contra el terra es veuria incrementada considerablement respecte a l'aleró estudiat en el present projecte, la qual cosa podria justificar la seva aplicació.

Veient que el difusor és un element amb molt de potencial, degut a la seva finesa (relació *downforce/drag*) és recomanable intentar desenvolupar el disseny estudiat en aquest projecte per tal d'augmentar-ne el rendiment. Un primer suggeriment, molt senzill d'implementar, seria allargar el fons pla del monoplaça per tal d'evitar que l'aire surti per la "capsa" del xassís on estaria situat el motor. D'aquesta manera s'augmentaria l'eficàcia del difusor i també s'evitaria, o reduiria, el reflux que existeix en la part posterior del vehicle.

9 BIBLIOGRAFIA

Llibres

Katz J. Race car aerodynamics: designing for speed. BentleyPublishers. 1995.

McBeath S. Aerodinàmica del automòvil de competición. Ediciones Cead.2005.

Smith C. Tune to win. AeroPublishers. 1978.

White, F. M. Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill. Madrid 2008.

Articles

Frank G., Carazo F., Nigro N., Storti M., D'Elía J. Simulación numérica del flujo alrededor del modelo de ahmed para un angulo de inclinación crítico. Mecánica Computacional: VolXXIII. Noviembre 2004.

Lanfrit M. Best practice guidelines for handling Automotive External Aerodynamics with FLUENT. Fluent Deutschlan GmbH. Febrer 2005.

Khondge A. Scaling New Heights in Aerodynamics Optimization: The 50:50:50 Method. 2012.

SAE International. 2014 Formula SAE Rules. 2013.

Adreces electròniques

www.formulastudent.com, web oficial de la Formula Student. Juny 2014.

www.formulastudent.es, web oficial de la Formula Student Spain. Juny 2014.

http://webdocs.cs.ualberta.ca/~mgarcia/vwt_public/papers/paper_aeronaut08.pdf, web amb informació sobre el túnel del vent virtual. Juny 2014.

Projectes/Treballs Fi de Carrera

Paganetto J. Aerodinàmica del Fórmula Student BCN-001. Projecte/Treball Fi de Carrera. Enginyeria Industrial. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. Febrer 2008.

ANNEXOS

A MECÀNICA DE FLUIDS

La mecànica de fluids és la part de la mecànica que estudia les lleis del comportament dels fluids en equilibri (hidrostàtica) i en moviment (hidrodinàmica) (Mataix, 1982). La mecànica de fluids és la base de l'aerodinàmica, que estudia els fluxos al voltant de cossos immersos en el seu si.

A.1 Definició de fluid

La matèria en general pot trobar-se en diferents fases: sòlida, líquida i gasosa. Els fluids fan referència a les substàncies que es troben en fase líquida o fase gasosa.

Els fluids es deformen contínuament sota un esforç tangencial per petit que aquest sigui (Mataix, 1982). La diferència entre líquids i gasos està en les forces intermoleculars, essent important en els líquids on és definit el volum de la substància (però no la forma). Aquests són molt poc compressibles. En canvi, amb els gasos passa tot el contrari, les forces intermoleculars són molt petites i això fa que no es determini un volum de la substància (Mataix, 1982).

A.2 Forces i pressions

En la mecànica de fluids hi ha dos tipus de forces importants, una és la força massica i l'altre la força superficial.

Força massica: són les forces externes que actuen sobre tot el fluid (Gerhart P., et al., 1995). Veiem la seva expressió a través de l'Equació A.1.

$$f = \frac{\rho g}{V} \quad (\text{Eq. A.1})$$

On:

$$f = \text{força massica} \ (N/m^3)$$

$$m = \text{massa del fluid} \ (kg)$$

$$V = \text{volum del fluid} \ (m^3)$$

$g = \text{densitat de la força massica (m/s}^2\text{)}$

Força superficial: Són les forces efectuades sobre el contorn del fluid per la resta del fluid, pel recipient o qualsevol altre substància, mitjançant contacte directe (Gerhart P., et al., 1995). La Figura A.1 ens ho mostra amb més claredat. Veiem les expressions a través de les Equacions A.2 i A.3.

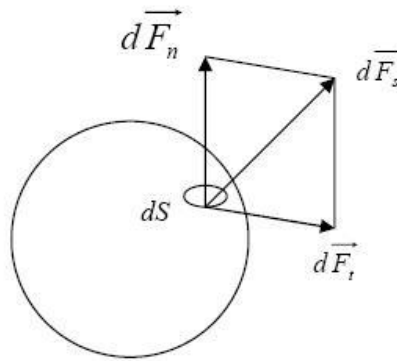


Figura A.1. Forces superficials.

$$\sigma_n = \frac{dF_n}{S} \quad (\text{Eq. A.2})$$

$$\sigma_t = \frac{dF_t}{S} \quad (\text{Eq. A.3})$$

On:

$\sigma_n = \text{esforç normal (N/m}^2\text{)}$

$F_n = \text{força normal (N)}$

$\sigma_t = \text{esforç tallant (N/m}^2\text{)}$

$F_t = \text{força tallant (N)}$

$S = \text{superfície (m}^2\text{)}$

Cal dir també que els fluids en equilibri estan lliures d'esforços tallants, ja que son incapaços de resistir-los.

Pressió: És l'esforç normal que pateix aquella superfície a través de l'Equació A.4.

$$p = \frac{dF_n}{dS} \quad (\text{Eq. A.4})$$

On :

$p = \text{pressió } (N/m^2)$

$F_n = \text{força normal } (N)$

$S = \text{superfície } (m^2)$

A.3 Propietats dels fluids.

Les principals propietats d'un fluid que intervenen en mecànica de fluids són les següents:

Densitat: la densitat es el quocient entre la massa i el seu volum. Es representa normalment amb el símbol ρ . Veiem la seva expressió a través de l'Equació A.5.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq. A.5})$$

On:

$\rho = \text{densitat } (kg/m^3)$

$m = \text{massa } (kg)$

$V = \text{Volum } (m^3)$

Viscositat: la viscositat d'un fluid es la mesura de la resistència a una deformació tallant o angular. En la Figura A.2 es mostra com la velocitat del fluid varia linealment amb la distància entre les plaques. Aquesta variació es denominada perfil de velocitats.

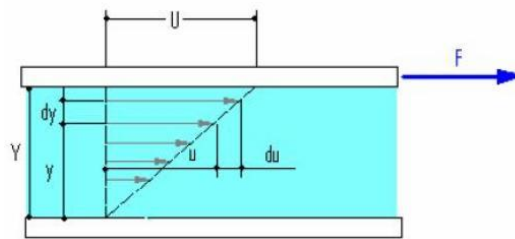


Figura A.2. Fluid comprès entre dues plaques paral·leles.

S'ha demostrat, de forma experimental, que una gran varietat de fluids en les condicions anteriors compleixen la relació de l'Equació A.6. Amb els paràmetres definits en la figura anterior (Mataix, 1982).

$$F \propto \frac{AU}{Y} \quad (\text{Eq. A.6})$$

Per semblança de triangles de la Figura A.2 el terme $\frac{U}{Y}$ es pot substituir pel gradient de velocitats $\frac{du}{dy}$. S'introdueix així una constant de proporcionalitat, la viscositat dinàmica o absoluta μ , de tal manera que l'esforç tallant σ_t entre dues capes fines de fluid, es pot expressar coma l'Equació A.7.

$$\sigma_t = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{Y} = \mu \frac{du}{dy} \quad (\text{Eq. A.7})$$

A.4 Flux de fluid

Un flux correspon a un fluid en moviment (Mataix, 1982). Gairebé sempre que parlem d'un flux de fluid ens referim a un fluid ideal, del qual considerem que la viscositat és nul·la. En canvi, si tractem un fluid real la viscositat diferent de zero dona lloc a l'aparició d'esforços tallants entre les partícules (veure la Figura A.3)

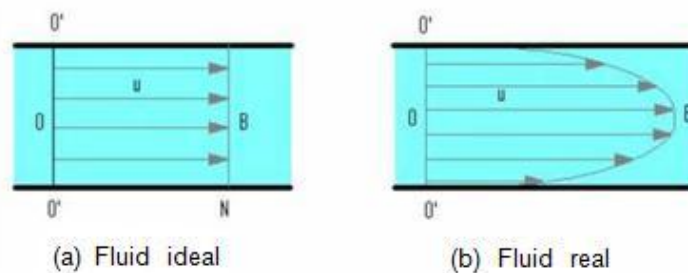


Figura A.3. Perfils de velocitats per a diferents fluids en canonades.

Els fluids també es poden classificar com a compressibles o incompressibles. Els líquids es solen considerar incompressibles, és a dir, la seva densitat (ρ) varia poc. Els gasos, per altre banda, sí són compressibles i la seva densitat varia en funció de la pressió absoluta i de la temperatura absoluta com podem veure en l'Equació A.8 dels gasos ideals.

$$\frac{P}{\rho} = Pv = RT \quad (\text{Eq. A.8})$$

On:

$P = \text{pressió absoluta (Pa)}$

$\rho = \text{densitat (kg/m}^3\text{)}$

$v = \text{volum específic (1/\rho = m}^3\text{/kg)}$

$R = \text{constant del gas ideal (Nm/K}^{-1}\text{gk)}$

$T = \text{temperatura absoluta (K)}$

A.5 Classificació dels fluxos

Flux estacionari i flux no estacionari

El flux estacionari és aquell on les seves propietats són constants al llarg del temps. En canvi això no succeeix en el no estacionari (o transitori), (Mataix, 1982).

Flux laminar i flux turbulent

Osborne Reynolds va determinar que la transició de règim laminar a turbulent era funció d'un únic paràmetre (Mataix, 1982). Aquest es coneix com nombre de Reynolds, que ve determinat per l'Equació A.9.

$$Re = \frac{Dv\rho}{\mu} \quad (\text{Eq. A.9})$$

On:

$Re = \text{numero de Reynolds (adimensional)}$

$D = \text{longitud característica del problema (m)}$

$v = \text{velocitat característica del problema (m/s)}$

$\rho = \text{densitat (kg/m}^3\text{)}$

$\mu = \text{viscositat (Pa}\cdot\text{s)}$

En canonades de secció circular, quan el nombre de Reynolds és menor de 2.000 el règim es considera *laminar* i quan és superior a aquest valor es considera *turbulent*.

En el *flux laminar* el fluid es mou degut al desplaçament de les làmines d'espessor infinitesimal sobre làmines adjacents.

En el que s'anomena *flux turbulent*, el moviment de les partícules és irregular en un breu instant de temps, tal com es pot apreciar en la Figura A.4 (a). Mentre que la trajectòria seguida per una partícula, havent transcorregut un període de temps més llarg, es mostra a la Figura A.4 (b).

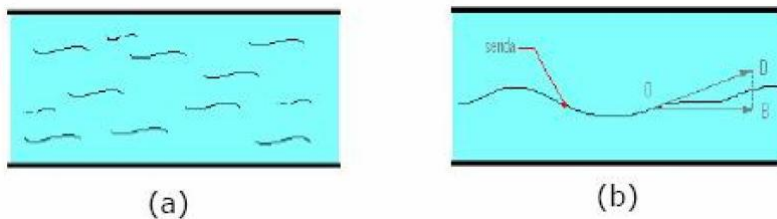


Figura A.4. Moviment de les partícules d'un fluid (a) i trajectòria d'una partícula fluida (b).

A.6 Equació de continuïtat

La conservació de la massa és un principi fonamental en mecànica de fluids. Aquest principi estableix que la massa no pot ésser creada ni destruïda, és a dir, que la massa d'un volum de control s'ha de conservar (Gerhart P., et al., 1995). Veure Figura A.5.

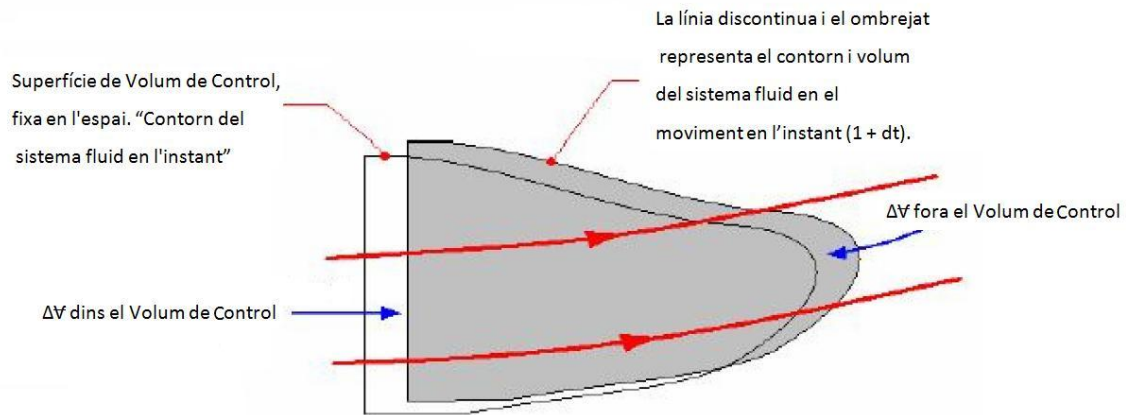


Figura A.5. Sistema fluid, volum de control i diferencials.

Observant la figura anterior, la massa del sistema s'ha de conservar. Si considerem el flux estacionari ($\partial \rho_{VC} / dt = 0$), obtenim l'Equació A.10 anomenada equació de continuïtat. S'ha suposat que les velocitats són uniformes en tota la secció de 1 i 2.

$$\rho_1 A_1 v_1 = \rho_2 A_2 v_2 \quad (\text{Eq. A.10})$$

On:

$\rho = \text{densitat (kg/m}^3\text{)}$

$v = \text{velocitat (m/s)}$

$A = \text{secció de pas (m}^2\text{)}$

1 i 2 són dos punts en una mateixa línia de corrent

A.7 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 altura a mesura que la velocitat del fluid augmenta, la seva pressió decreix (Munson, 2000). Veure l'Equació A.11.

$$p + \rho gh + \frac{1}{2} \rho v^2 = \text{constant} \quad (\text{Eq. A.11})$$

On:

$p = \text{pressió absoluta (Pa)}$

$\rho = \text{densitat (kg/m}^3\text{)}$

$v = \text{velocitat (m/s)}$

$h = \text{altura (m)}$

$g = \text{gravetat (m/s}^2\text{)}$

A.8 Equació de Navier-Stokes

Són un conjunt d'equacions diferencials que descriuen la variació de la quantitat de moviment, tenint en compte que la força actua sobre un element infinitesimal. Les equacions de Navier-Stokes es mostren a les Equacions A.12, A.13 i A.14, per a les components u , v , w (x , y , z) de la velocitat respectivament. Es considera un flux permanent i un fluid incompressible i sotmès a l'acció d'un camp extern gravitatori en la direcció z .

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) = \rho \left[\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} \right] \quad (\text{Eq. A.12})$$

$$-\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial z^2} \right) = \rho \left[\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} \right] \quad (\text{Eq. A.13})$$

$$-\rho g - \frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 w}{\partial z^2} \right) = \rho \left[\frac{\partial w}{\partial t} + u \frac{\partial w}{\partial x} + v \frac{\partial w}{\partial y} + w \frac{\partial w}{\partial z} \right] \quad (\text{Eq. A.14})$$

Quan les equacions anteriors s'utilitzen per representar un fluid ideal ($\mu = 0$), aquestes es veuen reduïdes a un conjunt d'equacions tridimensionals anomenades equacions d'Euler.

A.9 Capa límit

La capa límit és la zona existent al voltant d'un cos que es desplaça per un fluid, on la velocitat del fluid respecte al cos varia de 0 al 99% de la velocitat del corrent exterior.

Depenent de com es mou el fluid en el seu interior, la capa límit pot ser laminar o turbulenta, encara que, dins la capa límit pot haver-hi zones de flux laminar i flux turbulent (Munson, 2000).

Al comparar les capes límits, laminar i turbulenta, s'observa (Figura A.6) que la distribució de velocitats en la capa límit turbulenta mostra un gradient de velocitats més pronunciat prop de la superfície i un gradient més planer en la resta de la capa. Llavors l'esforç tallant en la superfície es major en la capa límit turbulenta que en la laminar.

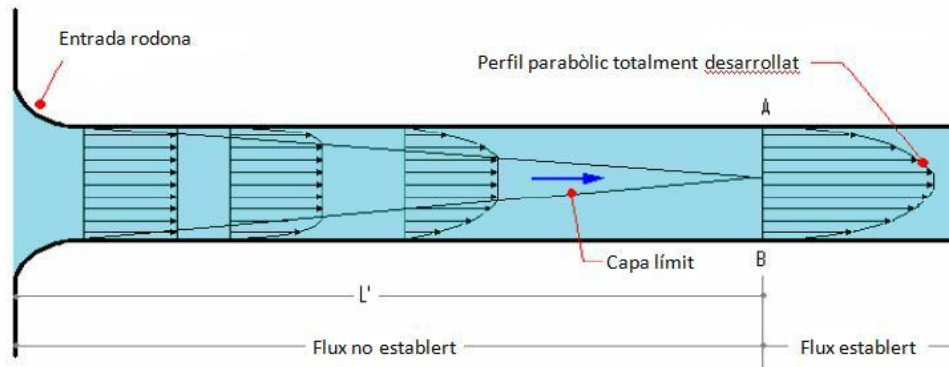


Figura A.6. Evolució de la capa límit en l'entrada a un conducte de secció circular.

Cal destacar una diferència important entre el flux al voltant de cossos submergits i fluxos en conductes. En el cas de conductes, les capes límit de les parets oposades del conducte s'uneixen a una certa distància i el flux arriba a desenvolupar-se en l'interior de la capa límit. En el cas dels vehicles, avions, etc., la capa límit pot arribar a tenir varis centímetres d'espessor, encara que serà molt petita comparada amb el dimensionament del volum de control. Veiem la Figura A.7.

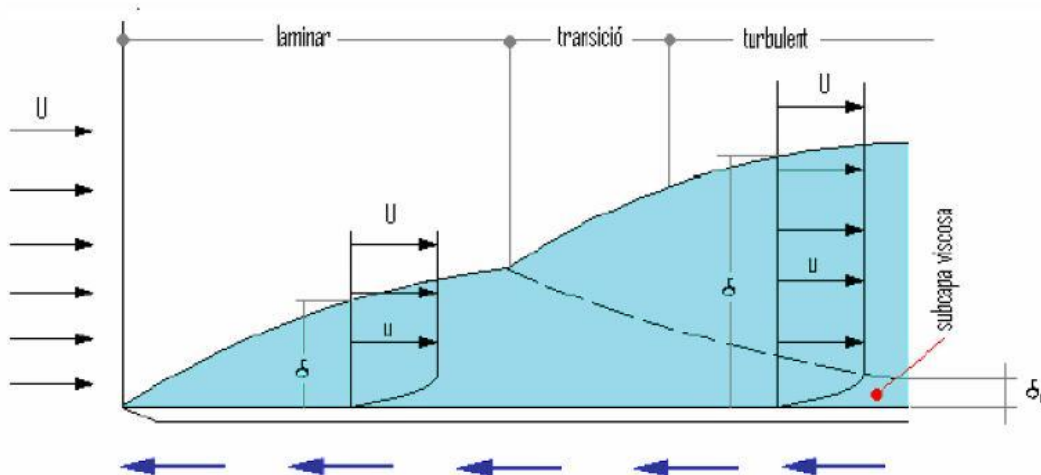


Figura A.7. Capa límit laminar i turbulenta d'una placa llisa.

A.10 Bibliografia

Fox R. W., McDonald A. T. Introducción a la mecànica de fluidos. McGraw-Hill. Any 1989.

Gerhart P., Gross R., Hochstein J. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Addison Wesley Iberoamericana. Any 1995.

Mataix C. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Ediciones del Castillo. Madrid 1982.

Munson B. R., Young D. F., Okijshi T. H. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Limusa Wiley. Mèxic 2000.

White, F. M. Mecánica de Fluidos. McGraw-Hill. Madrid 2008.

B FONAMENTS D'AERODINÀMICA

L'objectiu d'aquest annex és comprendre els principals conceptes de l'aerodinàmica i introduir els paràmetres necessaris per al disseny eficient aerodinàmicament d'un cos.

L'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que estudia els gasos en moviment i les forces o reaccions a les que estan sotmesos els cossos quan estan dins d'ells (Munson, 2000).

En termes aerodinàmics és el mateix considerar que l'objecte es mou a través de l'aire a que l'objecte estigui immòbil i sigui l'aire el que es mogui.

B.1 Sustentació

Si un fluid amb una velocitat relativa u incideix sobre un sòlid (veure Figura B.1), es pot observar que la seva acció repercuteix en la formació de la força resultant R normal al pla d'incidència AB .

Aquesta resultant es descompon en la força de resistència a l'avanç o força d'arrossegament "*dragforce*" (F_D) i la força de sustentació o "*lift force*" (F_L).

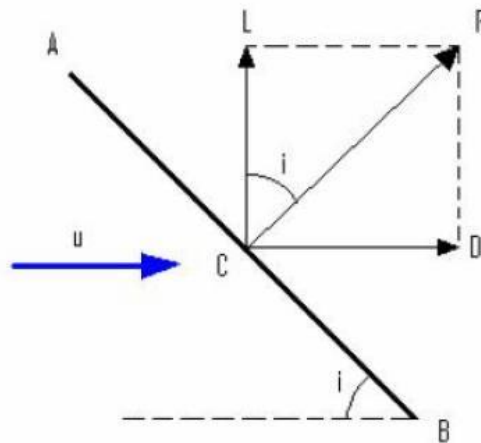


Figura B.1. Forces de pressió que es creen sobre un pla AB per la incidència d'un fluid.

Si la força de sustentació és major que la provocada pel propi pes, el cos tendirà a pujar, i si el cos té un element propulsor que exerceixi una força major a la de resistència a l'avanç, aquest podrà desplaçar-se en sentit contrari a la velocitat relativa (Anderson J. D., 1991).

El valor d'aquestes components depèn de l'angle d'incidència, també anomenat angle d'atac, compost pel pla AB i la velocitat relativa u . Si l'angle d'atac és petit, no existeix desprendiment en els límits del pla, però per contra, si és gran, es crearan remolins.

Com podem observar en la Figura B.2, la part inferior del pla on xoquen les partícules del fluid, que s'anomena intradós, es creen pressions positives. En canvi a la part superior, denominada extradós, es generen pressions negatives. De tal manera, la sustentació es produeix degut a la diferència de pressions entre l'intradós i l'extradós.

La resistència d'un cos es presenta en tots els fluxos externs, però la sustentació només apareix quan existeix asimetria.

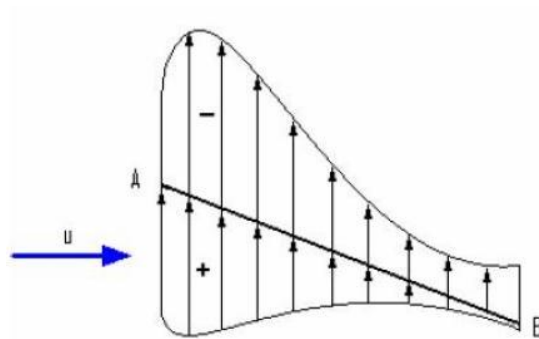


Figura B.2. Distribució de pressió sobre un pla.

B.2 Teorema de Kutta-Joukowski de la sustentació

La fórmula de la força de sustentació d'un cilindre va ser deduïda per Kutta-Joukowski. Normalment les descripcions del teorema es limiten a perfils d'ala d'avió, on la circulació (Γ), en el cas general, be donada per l'Equació B.1.

$$\Gamma = v\pi l k \sin\alpha \quad (\text{Eq. B.1})$$

On:

Γ = circulació (m^2/s)

v = velocitat (m/s)

l = corda del perfil (m)

k = coeficient que idealment només depèn de la geometria del perfil.

α = angle d'atac ($^{\circ}$)

La corda del perfil és la distància que, en cada perfil, uneix el vèrtex d'atac amb el vèrtex de sortida.

També cal dir que en aquesta fórmula l'angle d'atac és mesura a partir de la línia neutra, o sigui la paral·lela a u que passa pel vèrtex de sortida del perfil. L'Equació B.2 mostra la fórmula de Kutta-Joukowski per a la determinació de la força de sustentació.

$$F_L = b\Gamma\rho v \quad (\text{Eq. B.2})$$

On:

F_L = força de sustentació (N)

b = envergadura (distància en metres d'extrem a extrem del perfil)

ρ = densitat (kg/m^3)

Γ = circulació (m^2/s)

Substituint el valor de Γ en l'equació de Kutta-Joukowski s'obté l'Equació B.3.

$$F_L = \frac{\rho}{2} v^2 A_L 2\pi \sin\alpha \quad (\text{Eq. B.3})$$

On:

$A_L = l * b$, anomenada també àrea projectada del perfil

Es poden observar millor els paràmetres a la Figura B.3.

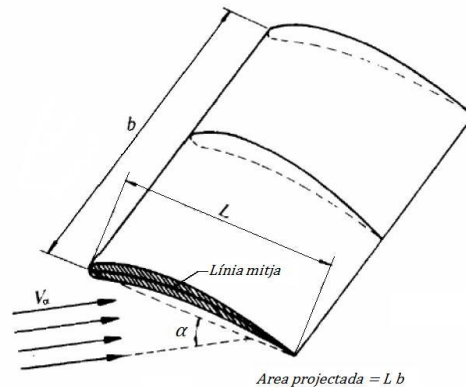


Figura B.3. Perfil d'una ala d'avió amb els seus paràmetres característics.

Per tant, la força de sustentació es pot veure a l'Equació B.4.

$$F_L = A_L \frac{\rho}{2} v^2 C_L \quad (\text{Eq. B.4})$$

On:

$C_L = \text{coeficient de sustentació}$

Aquest, idealment, només depèn del coeficient de forma i de l'angle d'atac, i es descriu matemàticament amb l'Equació B.5.

$$C_L = 2\pi \sin \alpha \quad (\text{Eq. B.5})$$

B.3 Coeficient de sustentació

El coeficient de sustentació és la relació entre la força vertical (F_L) i la pressió dinàmica per la superfície resultant de la projecció del vehicle sobre la direcció del moviment (A_L), tal com es pot veure en l'Equació B.6.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} v^2 A_L} \quad (\text{Eq. B.6})$$

El principal problema en la teoria de perfils és determinar la circulació (Γ) en funció de la forma del perfil i l'angle d'atac (α).

En funció de si la circulació que envolta el perfil, el flux abandonarà el cos per la seva borda de fuga amb més o menys suavitat, veure Figura B.4.

La forma que afavoreix la sustentació és un vèrtex de fuga (punt on l'aire deixa de tocar el perfil) agut, de manera que l'intradós i l'extradós tinguin la mateixa velocitat en abandonar el perfil.

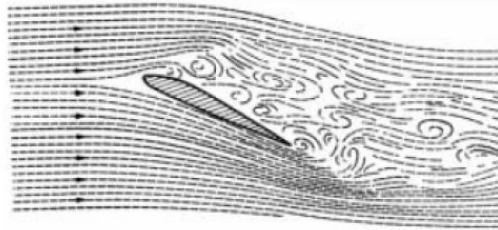


Figura B.4. Flux al voltant del perfil d'una ala.

B.4 Perfils sustentadors

Les superfícies sustentadores, o perfils alars, es defineixen per una sèrie de paràmetres que es poden apreciar en la Figura B.5.

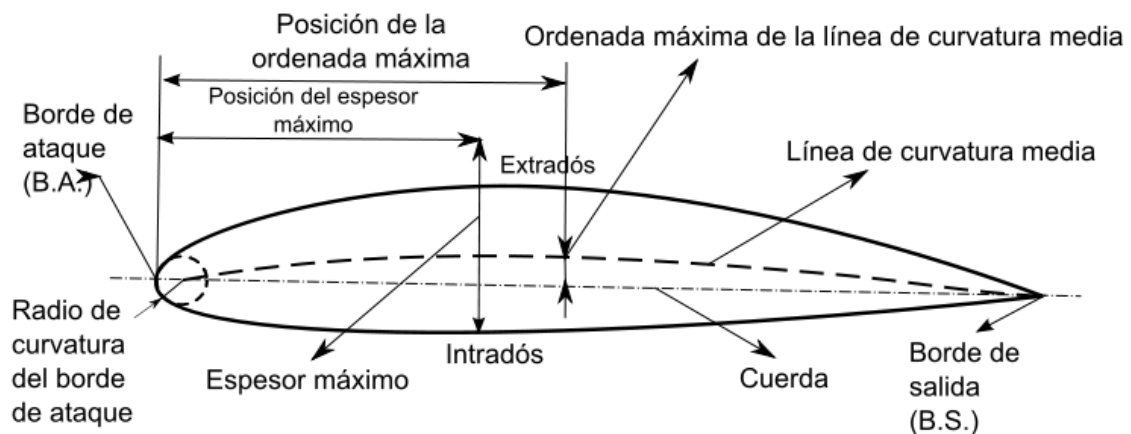


Figura B.5. Elements que constitueixen les diferents parts del perfil d'una ala.

De la figura anterior podem definir les parts del perfil alar com:

- Caire d'atac: és el caire davanter de l'ala. Aquest uneix les dues superfícies de l'ala, inferior i superior, i és la primera zona de contacte del flux d'aire.

- Caire de sortida: és el caire posterior de l'ala. A banda de ser el punt d'unió de les dues superfícies de l'ala, és la zona on idealment el flux d'aire abandona el perfil alar. Aquest flux d'aire surt pertorbat i retorna cap al corrent lliure.
- Extradós: part superior de l'ala que està compresa entre el caire d'atac i el caire de sortida.
- Intradós: és la part inferior de l'ala que està compresa entre el caire d'atac i el caire de sortida.
- Espessor: distància màxima entre l' intradós i l'extradós.
- Corda: és la línia recta imaginària que uneix el caire d'atac i el caire de sortida.
- Línia de curvatura mitja: és la corba que defineix el punt mig entre l' intradós i l'extradós.
- Curvatura màxima: és el punt on hi ha la màxima distància entre la corda i la línia de curvatura mitja.

Pel que fa a l'aspecte aerodinàmic, els valors dels coeficients de sustentació (C_L) i de resistència a l'avanç (C_D) són funció de l'angle d'incidència que forma la velocitat relativa amb la corda. A la Figura B.6 es pot observar com es descompon la força aerodinàmica.

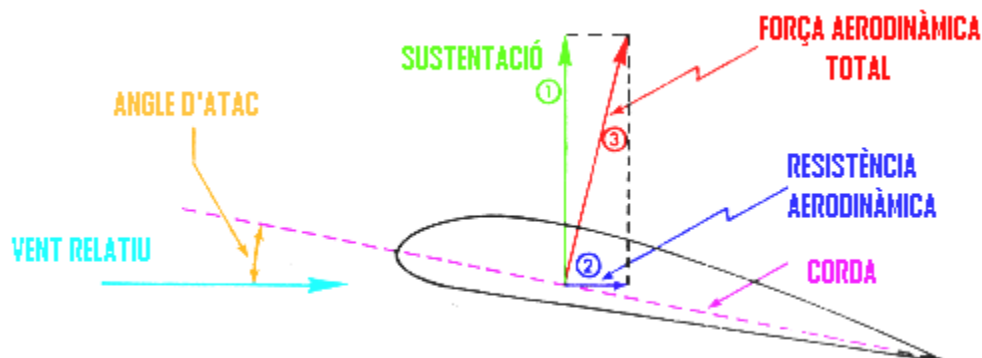


Figura B.6. Representació de la descomposició de la força aerodinàmica total.

B.5 Angle d'atac del perfil alar i entrada en pèrdua

L'angle d'atac del perfil és l'angle que forma la corda amb el vector velocitat aerodinàmica, és a dir, l'angle entre la corda del perfil i la direcció de la corrent lliure. Ho podem veure gràficament en la Figura B.7.

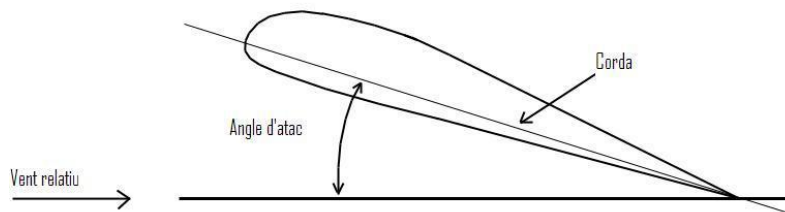


Figura B.7. Representació de l'angle d'atac d'un perfil alar.

A mesura que l'angle d'atac augmenta, les forces generades també ho fan. Tot i que a priori aquest concepte sembla senzill cal introduir una excepció. És cert que a major angle d'atac més grans són les reaccions però existeix un límit on aquests esforços s'anul·len. En aquest punt l'aire no es capaç de seguir el contorn del perfil i es separa d'aquest, la capa límit es desprèn, el perfil entra en pèrdua.

A continuació es pot apreciar gràficament, Figura B.8, com varia el coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac.

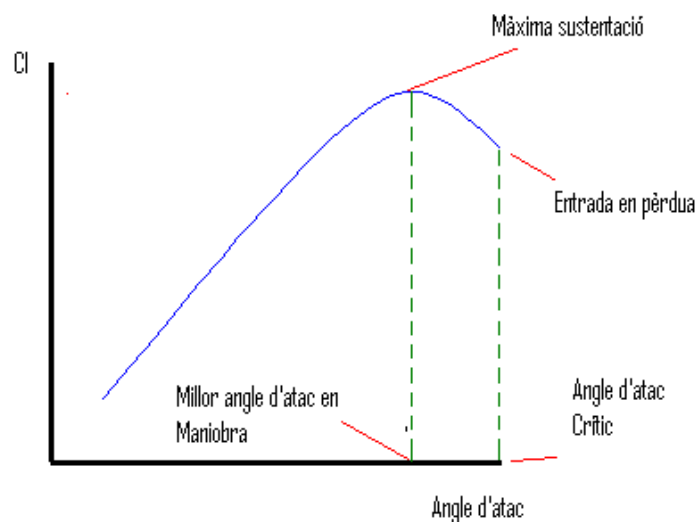


Figura B.8. Gràfic de l'evolució del coeficient de sustentació en funció de l'angle d'atac.

B.6 Resistència

La resistència és l'oposició que exerceix un fluid al desplaçament d'un sòlid a través d'ell (Munson, 2000). Prenen el sistema de referència del cos, això equival a un cos en repòs amb un flux incident no nul. Segons la forma que tingui el aquest sòlid, les partícules no podran seguir el seu contorn totalment.

En la part anterior del sòlid es produeix un xoc elàstic produint una sobrepressió, deguda a la velocitat del fluid més la pressió estàtica. Això crea una pertorbació que es transmet a les molècules de fluid contigües modificant la seva trajectòria.

A certa distància, abans i després del sòlid, i lateralment, per acció de la viscositat, el fluid notarà la pertorbació produïda pel sòlid. A la Figura B.9 en tenim un exemple.

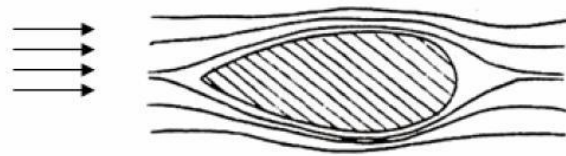


Figura B.9. Flux al voltant d'un sòlid.

D'altra banda, en un fluid ideal, si tant en l'entrada com en la sortida del volum de control no existeix pertorbació, el fluid no consumirà energia al passar el sòlid. Aquest fet contradiu les observacions anteriors i s'anomena "paradoxa de d'Alambert".

Tanmateix, en fluids reals, la viscositat juga un paper molt important. Les molècules de fluid entren en contacte amb el sòlid i hi queden adherides. En estar el sòlid en repòs, la velocitat del fluid en la superfície de contacte és nul·la, i va augmentant progressivament a mesura que ens allunyem del sòlid. Això genera un gradient de velocitats (veure Figura B.10). El gruix de la capa on el gradient de velocitats és apreciable es denomina capa límit (Mataix, 1982).

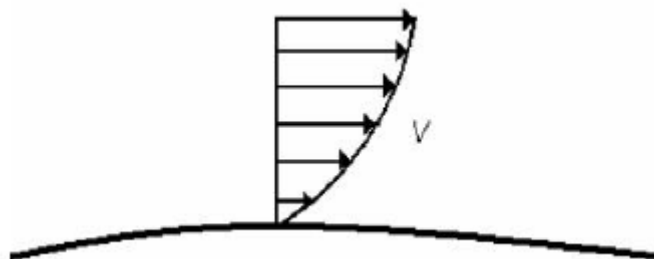


Figura B.10. Gradient de velocitats prop d'una superfície.

Si la velocitat és elevada i, especialment, si el cos que ha de ser estudiat té xamfrans aguts, els límits per on el flux abandona el sòlid penetren en una zona de depressió posterior, donant origen a la formació de remolins que es desprenen de la superfície del sòlid de forma alternada (veure Figura B.11).

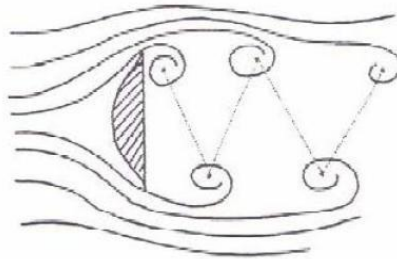


Figura B.11. Formació de remolins que es desprenen de la superfície d'un sòlid alternativament.

El moviment de rotació d'aquests remolins obté l'energia de l'aire, ja que es suposa que el sòlid està en repòs. Aquest és un dels factors que influeixen en la resistència a l'avanç, de manera que juga un paper molt important la forma del cos.

Evitant la formació de remolins es pot disminuir sensiblement la resistència a l'avanç. D'aquí l'interès per obtenir formes optimitzades aerodinàmicament.

Les formes aerodinàmiques fonamentals solen ser sòlids de revolució, amb la part anterior arrodonida i la part posterior molt allargada per evitar el desprendiment de la capa límit.

Degut a la importància de la forma, alguns autors també anomenen resistència de forma a la resistència a l'avanç, per bé que, estrictament, també s'ha de tenir en compte la resistència de superfície.

La presència de la capa límit i de les forces tangencials dona lloc a un altre fenomen que s'oposa al moviment del cos. Aquest s'anomena resistència de superfície. De manera que, de la suma de les dues (forma i superfície) s'obté la resistència total.

La resistència total es pot disminuir resolent per separat les seves components:

- Resistència de superfície: disminuint al mínim la rugositat de la superfície del cos.
- Resistència de forma: aquesta està lligada amb l'anterior, sovint quan una millora l'altra empitjora. Per exemple, augmentar la longitud del cos provoca un desprendiment de la capa límit més retardat, evitant així la formació de remolins, per contra, la resistència viscosa ha de recórrer major longitud. És a dir, s'ha de buscar el punt òptim entre les dues.

B.7 Coeficient d'arrossegament

Qualsevol cos immers en una corrent de fluid real està sotmès a una força d'arrossegament. El quocient entre aquest arrossegament i el producte de la pressió dinàmica per la superfície resultant de la projecció del sòlid sobre el pla perpendicular a la direcció del moviment, dona lloc al coeficient d'arrossegament (Munson, 2000). Veure Equació B.7.

$$C_D = \frac{F_D}{P_D} = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} v^2 A_D} \quad (\text{Eq. B.7})$$

On:

C_D = coeficient d'arrossegament(adimensional)

F_D = força d'arrossegament(N)

P_D = pressió dinàmica(Pa)

A_D = superfície (m^2)

ρ = densitat (kg/m^3)

v = velocitat (m/s)

Els efectes de separació o desprendiment del flux que es forma en els cossos submergits en una corrent externa poden reduir-se creant una forma aerodinàmicament òptima. L'objectiu es aconseguir la forma aerodinàmica que permeti un arrossegament total mínim.

B.8 Resistència a elevats números de Reynolds.

En un cos llarg i prim la resistència principal es exercida per la viscositat (fricció). Aquesta es pot reduir mantenint una capa límit laminar fins on sigui possible.

En canvi, si el cos no té punta (és arrodonit) la resistència principal és la de forma (pressió). Experimentalment s'ha demostrat que el coeficient de resistència es basa en l'àrea frontal.

La Figura B.12 (a) mostra un cilindre a l'esquerra i un fuselatge a la dreta. Els dos tenen la mateixa àrea frontal però el C_D del cilindre és 5 cops més gran que el del fuselatge. La Figura

B.12 (b) mostra un cilindre i un cos fusell amb el mateix C_D . A la dreta veiem com segons la forma final dels cossos el C_D disminueix considerablement tot i tenir la mateixa àrea frontal.

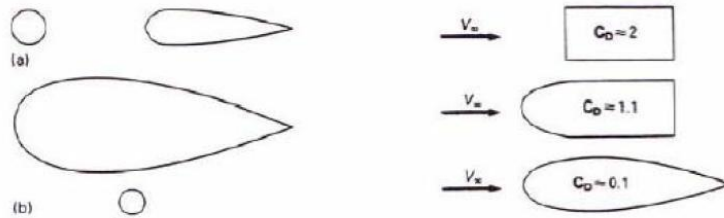


Figura B.12. Cossos amb la mateixa àrea frontal però amb diferent C_D .

B.9 Resistència aerodinàmica a l'avanç.

La força aerodinàmica més important sobre un vehicle és la resistència a l'avanç. Els factors dels que depèn són:

- Característiques del vehicle: forma, àrea frontal, etc.
- Factors del medi fluid: densitat de l'aire, condicions mediambientals, etc.
- Factors operatius: velocitat del vehicle, etc.

La resistència aerodinàmica es produeix per dues raons:

- La pressió que s'origina quan les molècules del fluid xoquen contra una superfície, de manera que experimenten una variació de la quantitat de moviment, que provoca l'aparició d'una força normal a la superfície.
- La fricció de l'aire, provocada pel moviment lliscant de les molècules d'aire al voltant de la superfície.

De tal manera, el coeficient de resistència a l'avanç, o d'arrossegament, es compon de dos sumands. Un associat a la resistència deguda a la fricció (*tensions tangencials*) i un altre originat com a conseqüència de les diferències de pressió generades pel desprendiment de la capa límit. Per tant, es pot expressar el coeficient de resistència a l'avanç com l'Equació B.8.

$$C_D = C_{DV} + C_{DP} \quad (\text{Eq. B.8})$$

On C_{DV} és la part del coeficient deguda a la fricció i C_{DP} és la part originada per les forces de pressió, associades al desprendiment de la capa límit.

B.10 Bibliografia

Munson B. R., Young D. F., Okijshi T. H. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Limusa Wiley. Mèxic 1999.

Anderson J. D. Fundamentals of aerodynamics. Mcgraw-hill. Any 1991.

Mataix C. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Ediciones del Castillo. Madrid 1982.

C CÀLCUL ÀREA FRONTAL

Per obtenir l'àrea frontal de cada model s'ha utilitzat el SolidWorks.

S'ha creat un pla frontal als models i s'ha generat un croquis al voltant d'aquest. Una vegada obtinguda la silueta només ha calgut extrudir-la i mitjançant l'eina "mesurar" del programa hem pogut determinar exactament quina és l'àrea projectada. Figura C.1.

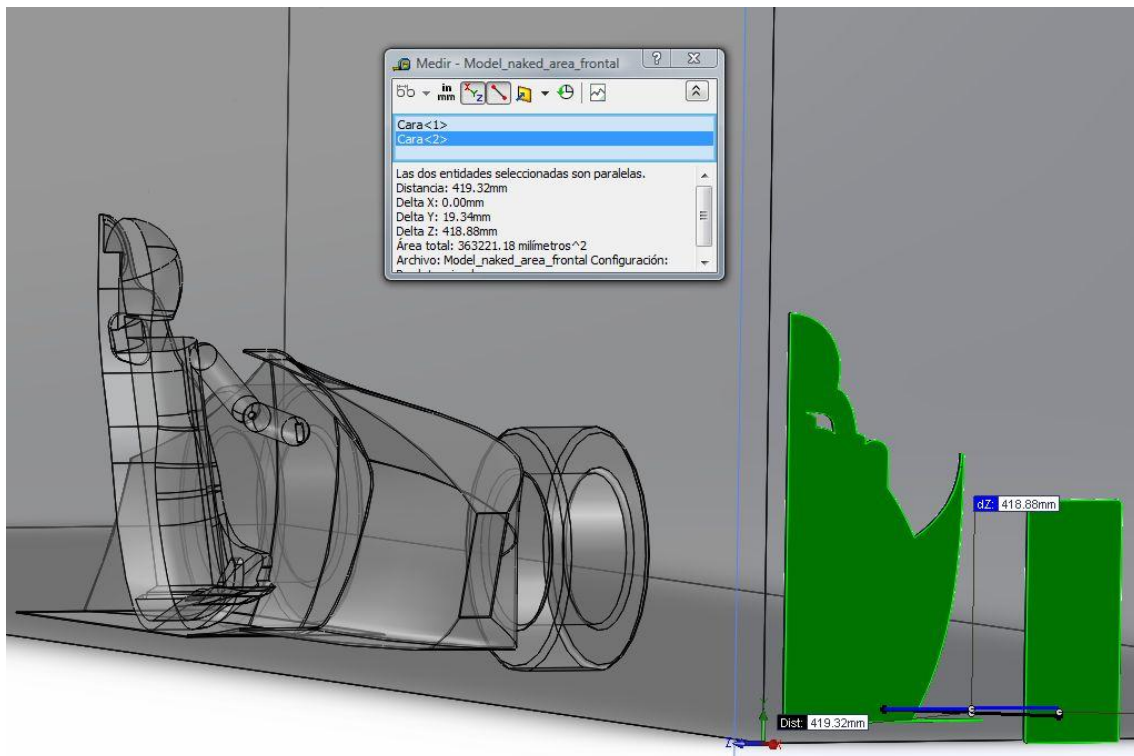


Figura C.1. Càlcul de l'àrea frontal del model sense apèndixs.

D PRESSUPOST

El present projecte és un estudi que es duu a terme de manera íntegrament virtual, per tant en el pressupost es tindran en compte els costos de recerca i desenvolupament, els d'amortització de l'equip utilitzat i el cost de l'elaboració de la pròpia documentació del projecte. A continuació detallem aquets costos:

Costos de recursos humans

En aquest camp es té en compte el treball realitzat per l'enginyer. Aquest consisteix en el desenvolupament dels models, la realització de les simulacions i el posterior anàlisi dels resultats. També s'inclou la recerca de la informació necessària i la redacció del projecte.

Costos d'amortització dels recursos materials

Aquí s'inclouen els costos dels recursos materials utilitzats com les llicències dels programes utilitzats, SolidWorks i ANSYS Workbench, i les despeses d'utilització dels ordinadors del laboratori de mecànica de fluids computacional de l'edifici P-II de l'Escola Politècnica Superior de la Universitat de Girona.

Costos d'elaboració de la documentació

Aquí es recullen els costos derivats d'impressió i enquadernació del projecte.

DESCRIPCIÓ	DURADA (h)	PREU UNITARI (€/h)	COST (€)
Recursos humans			
Recerca d'informació	80	18,00	1.440,00
Desenvolupament dels models	120	18,00	2.160,00
Simulació i anàlisi dels resultats	80	18,00	1.440,00
Redacció del projecte	80	18,00	1.440,00
Amortització dels recursos materials			
Programari informàtic	80	1,00	80,00
Utilització de l'aula i equipament informàtic	80	0,50	40,00
Elaboració de la documentació			
Impressió i enquadernació			50,00
Subtotal			6.650,00 €
Benefici 9%			598,50 €
21% IVA			1.522,19 €
TOTAL			8.770,69 €

El cost total d'elaboració d'aquest projecte és de vuit mil set-cents setanta euros amb seixanta-nou cèntims amb IVA inclòs.