



EPS

Escola Politècnica
Superior

Projecte/Treball Fi de Carrera

Estudi: Enginyeria Tècn. Ind. Mecànica. Pla 2002

Títol: Estudi i simulació aerodinàmica amb programari de dinàmica de fluids computacional (CFD) en un model bàsic de vehicle de competició de la categoria CM (curses de muntanya).

Document: Memòria i Annexos

Alumne: Albert Sánchez Alarcón

Director/Tutor: Lino Montoro Moreno

Departament: Eng. Mecànica i de la Construcció Industrial

Àrea: Mecànica de Fluids

Convocatòria (mes/any): Maig 2009

MEMÒRIA

1. INTRODUCCIÓ	4
1.1. Antecedents	4
1.2. Objecte general del projecte	5
1.3. Especificacions	5
2. PRINCIPIS BÀSICS DE L'AERODINÀMICA	6
2.1. Introducció	6
2.2. Càrrega aerodinàmica	6
2.3. Components de la força aerodinàmica: resistència i sustentació	7
2.4. Adherència provocada per la càrrega aerodinàmica	8
2.5. Tipus de règim i viscositat	9
2.6. Nombre de Reynolds, flux bidimensional i tridimensional	11
3. METODOLOGIA	13
3.1. Esquema global del procés	13
3.2. Obtenció del model i geometries	14
3.3. Simulació bidimensional en seccions	16
3.4. Simulació tridimensional	16
3.5. Obtenció de resultats i conclusions	17
4. ANÀLISI I SIMULACIÓ BIDIMENSIONAL DE CONFIGURACIONS I ELEMENTS AERODINÀMICS	18
4.1. Introducció	18
4.2. Procés General i simulació de les seccions inicials	18
4.2.1. Mallat	18

4.2.2.	Simulació 2D	20
4.2.3.	Resultats	22
4.3.	Simulació del reglatge d' inclinació del vehicle	26
4.3.1.	Introducció	26
4.3.2.	Mallat	27
4.3.3.	Resultats i comparació	28
4.4.	Simulació dels faldons davanters, caixes d'aire i difusors	31
4.4.1.	Introducció	31
4.4.2.	Mallat	32
4.4.3.	Resultats i comparació	33
4.5.	Simulació d'alerons i Flap Gurney	35
4.5.1.	Introducció	35
4.5.2.	Mallat	37
4.5.3.	Resultats i comparació	38
4.6.	Disseny Anàlisi i simulació del deflector lateral	44
4.6.1.	Anàlisi i disseny	44
4.6.2.	Mallat	46
4.6.3.	Resultats i comparació	46
5.	SIMULACIÓ TRIDIMENSIONAL DELS MODELS BASE I MODIFICAT	48
5.1.	Introducció	48
5.2.	Definició de les geometries base i modificada	49
5.2.1.	Conformació 3D dels models	49
5.2.2.	Mallat dels volums	50
5.3.	Simulació	52
5.4.	Resultats i comparacions	53
6.	RESUM DEL PRESSUPOST	63
7.	CONCLUSIONS	64

8. RELACIÓ DOCUMENTS DEL PROJECTE	66
9. BIBLIOGRAFIA	67
10. GLOSSARI	69
ANNEX A. COS AHMED: VALIDACIÓ DEL SOFTWARE	70
A.1. Introducció	70
A.2. Programa STAR CCM+©	71
A.2.1. Introducció al software	71
A.2.2. Estudi del cos d'Ahmed	73
A.2.3. Generació del mallat	75
A.2.4. Simulació numèrica	87
A.2.5. Resultats	90
A.3. Conclusió	91
ANNEX B. AERODINÀMICA D'UN FORMULA 1: ELS ALERONS	93
B.1. Alerons	93
B.2. L'Aleró davanter	94
B.3. L'aleró posterior	94
ANNEX C. FLAP GURNEY – NOLDER	95
ANNEX D. INTRODUCCIÓ A GAMBIT©	98
ANNEX E. MÈTODE DE CàLCUL DEL ÀREA FRONTAL MÀXIMA D'UN VEHICLE	101

1. INTRODUCCIÓ

1.1. Antecedents

L' aerodinàmica als automòbils de competició és una matèria que avarca diferents camps de la ciència, l'enginyeria, la tecnologia i fins i tot l'art. No hi ha cap altre aspecte dins la tecnologia dels automòbils de competició que tingui major influència en el comportament i rendiment final de cada vehicle.

Cal remuntar a 1956 de mans de l'enginyer Suís Michael May, per conèixer el primer intent fallit d'incorporar un element aerodinàmic (en aquest cas un aleró) per tal d'afavorir les prestacions d'un vehicle de competició (Porsche Spyder). No va arribar a ser utilitzat en cursa per decisió dels comissaris de Nurburgring i Monza on es pensava realitzar la cursa. Però no tan sols es va continuar estudiant la incorporació d'elements externs, es va donar un pas endavant, i durant la primera dècada dels 60 es va unir l'esforç d'enginyers i dissenyadors en un sola línia que fos la de reduir la resistència a l'avanç obtenint en certes categories de competició millores en les velocitats màximes. Per contrapartida les categories denominades "Sport" patien també problemes de sustentació positiva o aixecament el qual era totalment indesitjat per motius de seguretat. Va ser en aquests vehicles on van començar a aparèixer els diferents elements i millores que van desenvolupar després un camp d'estudi a la resta de categories del automobilisme de competició.

Actualment qualsevol equip de competició que vulgui estar al cap damunt de qualsevol categoria automobilística, en major o menor mesura, ha de passar per un estudi aerodinàmic del vehicle per tal d'afavorir els aspectes següents:

- Coeficient aerodinàmic de resistència (C_D).
- Coeficient aerodinàmic de sustentació(C_L) de la carrosseria.
- Estudi dels alerons i elements aerodinàmics.

1.2. Objecte general del projecte

L'objectiu del present projecte consisteix en analitzar un conjunt d'elements aerodinàmics emprats en la majoria de disciplines de l'automobilisme de competició, es simularan en dues dimensions (plans 2D) dins d'un programari comercial de simulació de fluids (CFD) i posteriorment s'integraran en un conjunt carrosseria, del qual es realitzarà una simulació tridimensional per obtenir-ne el coeficient aerodinàmic de resistència (C_D) i el coeficient aerodinàmic de sustentació (C_L). Per últim es compararà amb els paràmetres simulats en un model base de disseny propi.

1.3. Especificacions

Per la simulació i l'anàlisi de dades del projecte, s'utilitzaran els següents programaris d'ús comercial:

- Rhinoceros 3D© 3.0. : eina utilitzada per modelar i dissenyar la geometria.
- Gambit 2.2.30. (Fluent©): programari d'elements finits que mallarà el nostre model per el seu posterior processament en les simulacions.
- STAR CCM+ 2.10.013. (Adapco ©): simulador numèric de fluids que ens analitzarà i atorgarà els resultats per extreure'n dades i conclusions.

El disseny de les geometries dels vehicles base i modificat s'ha realitzat seguint la normativa de la Real Federació Espanyola d'Automobilisme (RFEDA) per campionats de muntanya establerta per la categoria CM. També els elements que s'afegeixen i les modificacions realitzades tenen com a base el reglament esmentat anteriorment (**veure bibliografia**).

2. PRINCIPIS BÀSICS DE L'AERODINÀMICA

2.1. Introducció

L'aerodinàmica és un camp que en el món de l'automoció amaga molts secrets donat que no es troba matèria a nivell públic per consultar, els estudis i desenvolupaments cap davanters en el sector tenen firma pròpia i són les pròpies marques i empreses d'automoció que dissenyen, experimenten i milloren constantment però sota la confidencialitat més absoluta per no donar pistes a la competència. A nivell de vehicles de competició és molt més accentuat.

2.2. Càrrega aerodinàmica

Quan parlem de càrrega aerodinàmica com a concepte teòric, cal comprendre la relació a nivell de dinàmica de fluids que existeix entre flux i pressió. L'expressió de Bernoulli següent ens explica aquest fenomen:

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

on : P (pressió), ρ (densitat de l'aire) i v (velocitat del flux)

El que ens ve a explicar l'expressió és que, si s'incrementa la velocitat del flux, la pressió local hauria de decreixer. Aquest fenomen presenta dos paràmetres definits en la "Teoria de la carga aerodinàmica de Newton" que queden representats en la **figura 2.1.**:

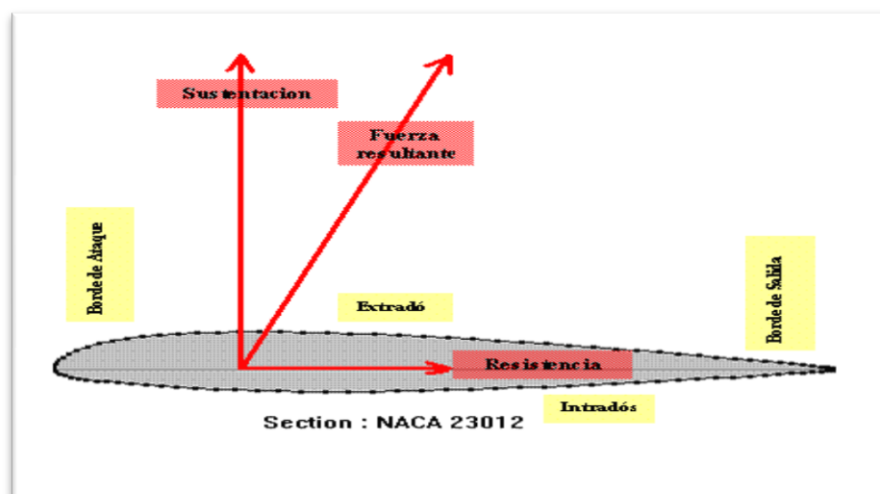


Fig. 2.1. – Forces aplicades en un perfil NACA 23012. <http://media.photobucket.com>

Aquest principi és el que explica la sustentació de l'ala d'un avió per exemple basant-se en la circulació d'aire al voltant del cos tal i com es mostra en la **figura 2.2.** :

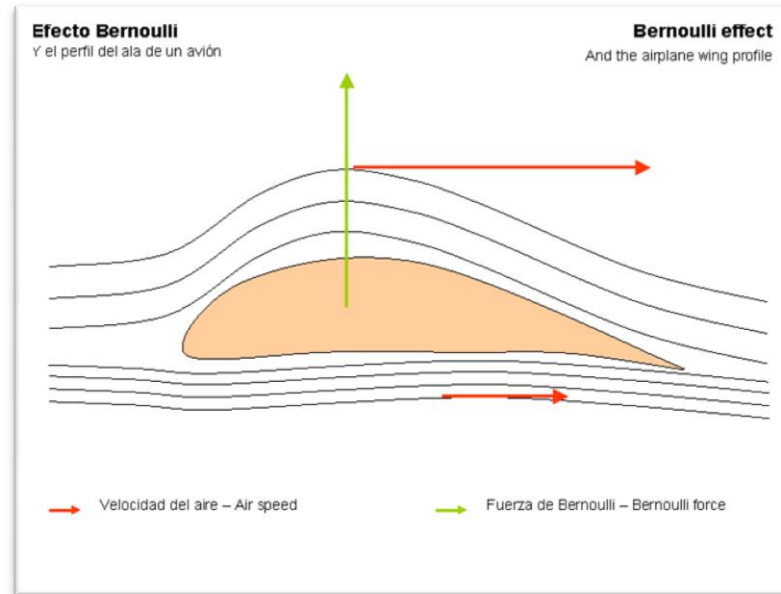


Fig. 2.2. – Flux al voltant de la secció d'un ala d'avió. <http://www.alternatura.com>

2.3. Components de la força aerodinàmica: resistència i sustentació

Les dues components de la força aerodinàmica són la resistència i la sustentació. Les expressions que regeixen aquests dos factors són les següents:

$$Sustentació = C_L \times \frac{1}{2} \rho v^2 \times A \quad (\text{Eq. 2})$$

$$Resistència = C_D \times \frac{1}{2} \rho v^2 \times A \quad (\text{Eq. 3})$$

Com es pot comprovar la diferència entre les dues expressions esdevé en els coeficients C_L (coeficient de sustentació) i el C_D (coeficient de resistència). Ambdues components tenen en compte l'àrea del cos i si això ho portem al frontal de dos vehicles on un té un àrea superior a l'altre, esdevindrà en que tindrà més resistència i sustentació el vehicle amb l' àrea major. Per exemple prendre la **figura 2.3.**:



Fig. 2.3. – Comparativa entre dos frontals de vehicle. <http://www.coches-es.com>

La resistència aerodinàmica provoca que una part de la potència entregada pel vehicle sigui contrarestada i per tan es converteixi en potència absorbida que podem obtenir a través de la següent expressió:

$$P. abs = \frac{C_X \times A \times v^3}{1.225} \quad (\text{Eq. 4})$$

,on: P.abs (potència absorbida en cavalls de vapor)

2.4. Adherència provocada per la càrrega aerodinàmica

La força normal, quan parlem d'un vehicle, és el seu propi pes normalment. Llavors segons l'expressió de la força de fricció on:

$$F_f = \mu R \quad (\text{Eq. 5})$$

,si tenim un vehicle amb un pes (X) i un altre amb un pes de doble magnitud (2X), el segon generarà el doble de força normal i en conseqüència provocarà el doble de frec al desplaçar-se. Per desplaçar-se en un revolt, accelerar o frenar els neumàtics han de ser capaços d'aprofitar el frec amb la superfície de contacte (l'asfalt en el nostre cas). En un cas ideal, el límit màxim d'adherència ve donat doncs segons l'expressió anterior com una funció del pes del vehicle com a força normal i el coeficient de frec entre neumàtic i asfalt. A

continuació mostrem a la **figura 2.4.** el cercle de tracció, on es poden veure gràficament els diferents casos d'adherència possibles:

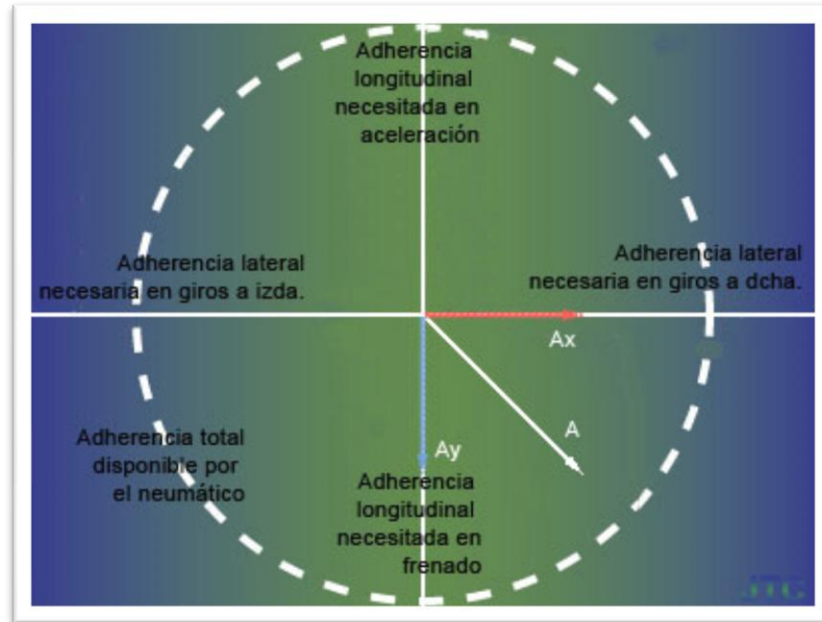


Fig. 2.4. – Cercle de Tracció, que mostra les diferents combinacions d'adherència possibles.

<http://www.todosconferrando.com>

Ara bé, tenint en compte que més endavant tindrem present l'efecte de l'aire on aquest té una densitat i una viscositat característiques que depenen de la temperatura entre d'altres, l'aerodinàmica pren un paper important i pot afavorir o empitjorar aquest factor depenent de si es crea sustentació negativa o positiva respectivament.

En el millor dels casos, la sustentació negativa provocada pel vehicle amb més càrrega aerodinàmica afavoreix l'aprofitament d' aquestes forces generades per passar per un revolt amb una velocitat superior. Si contem que en les curses tenim un nombre de revolts importants, això es multiplica augmentant en efectivitat a cada un d'ells.

2.5 Tipus de regim i viscositat

Quan parlem del flux hem de distingir que existeixen dos tipus: flux laminar i flux turbulent (figura 2.5.):

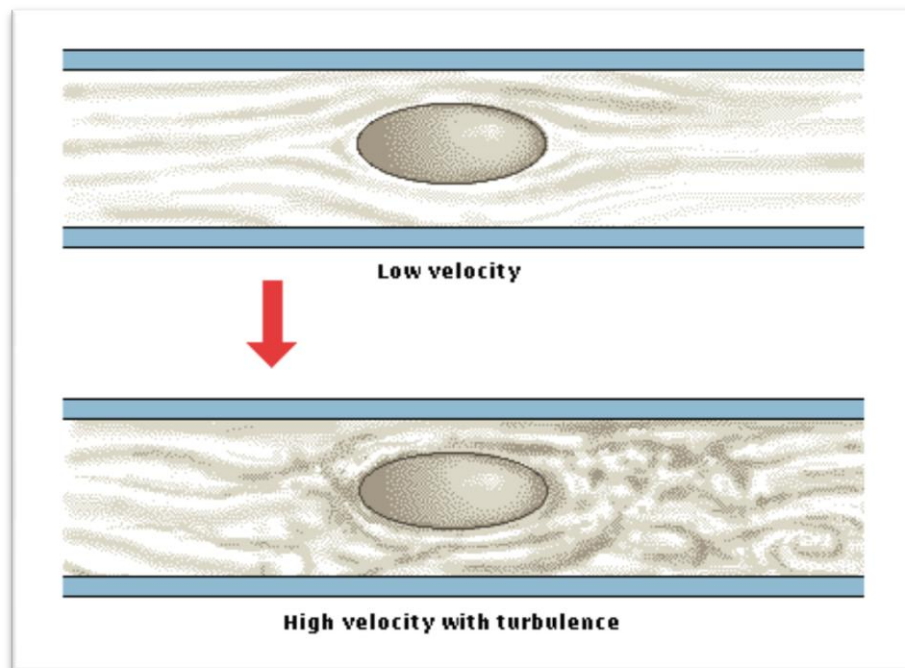


Fig. 2.5. – Regim de flux laminar (a dalt) i turbulent (a baix). <http://library.thinkquest.org/>

S'entén per flux laminar aquell flux on les partícules es mouen orientades en el mateix sentit, en cas contrari és turbulent. El flux pot passar de laminar a turbulent per els següents motius:

- a) Un canvi en la velocitat del flux.
- b) Alteracions del propi flux.
- c) Rugositat de la superfície per la qual es desplaça.
- d) Els gradients de pressió. Quan la pressió estàtica decreix amb la distància del flux, les alteracions en el flux es contraresten; quan aquesta pressió augmenta les alteracions s'amplifiquen. La reducció de pressió estàtica en la secció davantera pot ajudar a mantenir el flux laminar.
- e) Altres factors: densitat fluid, velocitat, longitud, coeficient viscositat o nombre de Reynolds.

Quan un fluid es desplaça a través d'una superfície, degut a la fricció, la capa més propera a la superfície s'atura completament (veure **figura 2.6.**). A aquesta capa se l'anomena capa 0. A sobre de la capa 0 es van acumulant capes on a mesura que creix la

distància amb la superfície disminueix la fricció i per tant es té més velocitat fins que s'arriba a una de les capes, a partir de la qual no hi ha fricció i fa de frontera amb les posteriors que designen capes amb velocitat lliure del fluid.

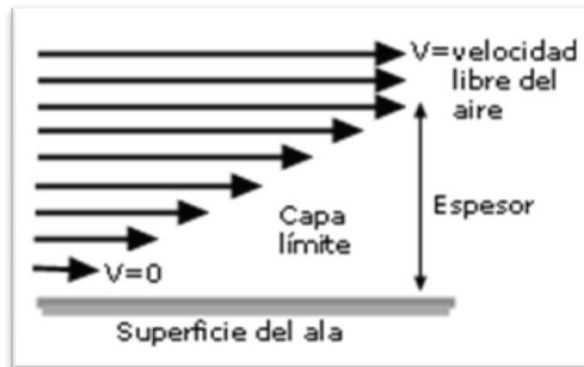
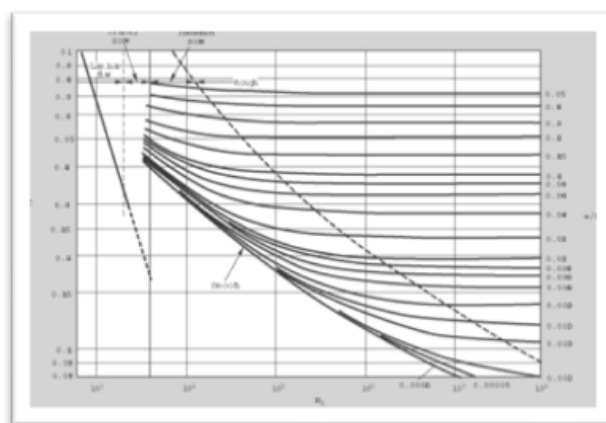


Fig. 2.6. – Parts i capes del flux. <http://www.manualvuelo.com>

2.6. Nombre de Reynolds, flux bidimensional i tridimensional

Abans de passar a les simulacions, és convenient puntualitzar sobre els models i escales de comparació que podem trobar i ens seran útils quan no es disposa de recursos suficients o de models a escala 1:1. Un d'aquests paràmetres és el N^o de Reynolds, (veure expressió i representació en la **figura 7**):



$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

ρ Densitat del fluid
 V Velocitat característica del fluid
 D Diàmetre de la tuberia
 μ viscositat dinàmica del fluid

Fig. 2.7. – Expressió i diagrama de Moody. <http://people.msoe.edu>

Aquest paràmetre sense dimensió és la relació entre els termes convectius i els termes viscosos de les equacions de Navier-Stokes que governen el moviment dels fluids. Com a dada, serveix per comparar amb altres models d'escala i velocitats similars.

Quan procedim a comparar i a fer-nos una idea mental de les línies de flux, velocitat o pressió és comú treballar en el concepte bidimensional, però en la realitat, el flux es desplaça en les tres dimensions per els camins on troba menys resistència. Nosaltres utilitzarem les dues dimensions per donar i exemplificar els diferents estudis que es poden donar alhora de modificar o crear elements aerodinàmics, però per obtenir els coeficients de sustentació, resistència i els resultats òptims més rellevants envers la realitat, simularem amb un model en tres dimensions.

3. METODOLOGIA

3.1. Esquema global del procés

En aquest projecte ens centrarem en desenvolupar coneixements teòrics bàsics sobre la aerodinàmica en l' automoció i aplicar-los a un cas basic tal i com es mostra en el següent esquema:

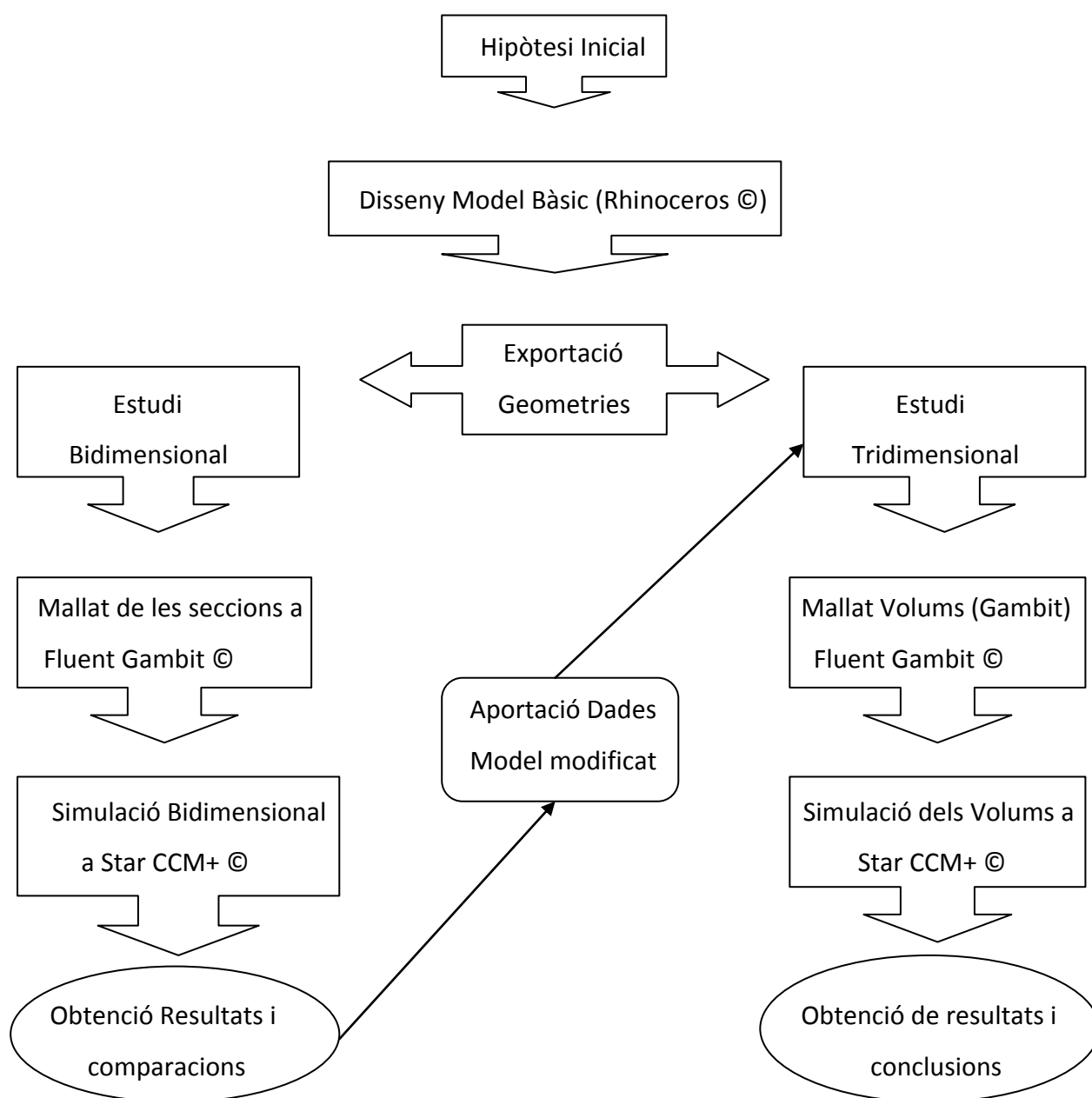


Fig. 3.1. – Esquema del procediment seguit en la realització del present projecte.

3.2. Obtenció del model i geometries

Per poder estudiar i simular els efectes en una geometria cal primer dissenyar-la (com és el nostre cas) o iniciar l'estudi a partir d'una geometria aconseguida per digitalització, cessió de dades (d'empreses col·laboradores), etc.

Per dissenyar la geometria procedirem amb un programari de disseny tridimensional anomenat Rhinoceros 3D®, el qual ens permetrà modelar els cossos i seccions que exportarem al programari de Mallat Fluent Gambit® (exemple **figura 3.2.**). El model final que obtindrem per treballar serà la meitat del model real, i aplicarem l'estudi per simetria en la simulació final de cada cas. Això ens donarà el doble de resolució i fiabilitat donades les limitacions pròpies del maquinari i programari, sabent que en processos industrials i de competició s'utilitzen servidors que poden igualar potències de centenars de processadors alhora i que donen dades i simulacions molt properes a la realitat amb errors de $10e-6$ d'ordre de magnitud.

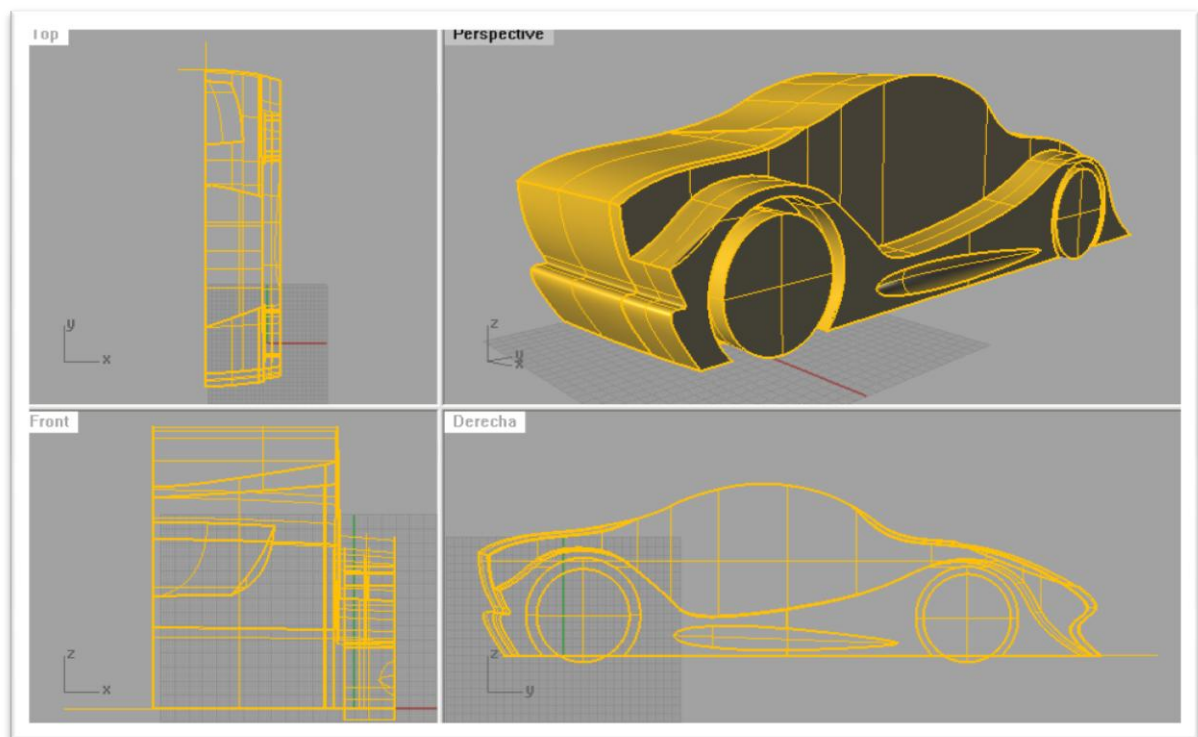


Fig. 3.2. – Imatge del programari Rhinoceros 3D® en el procés de disseny.

A partir del disseny de la carrosseria del nostre vehicle CM basic (model no comercialitzat i de disseny lliure), obrirem dues línies de simulació:

- Simulació en plans de dues dimensions: ens centrarem en diferents seccions i treballarem de forma independent i agafant com a base les seccions del model inicial sense modificar, les diferents configuracions i elements aerodinàmics basant-nos en la teoria cercada.
- Simulació Tridimensional: començarem tractant el model base (sense modificar) i aconseguint una malla que ens permeti obtenir resultats el més fidedignes possibles actuant sobre tot en la precisió dels vèrtexs més propers a la carrosseria i a l'estela de la part posterior.

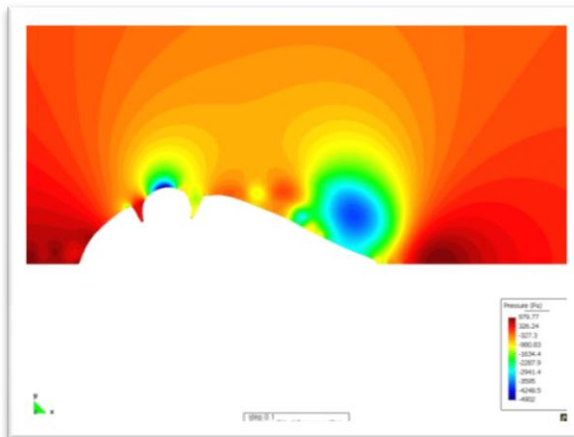


Fig. 3.3. – Exemple simulació 2D.

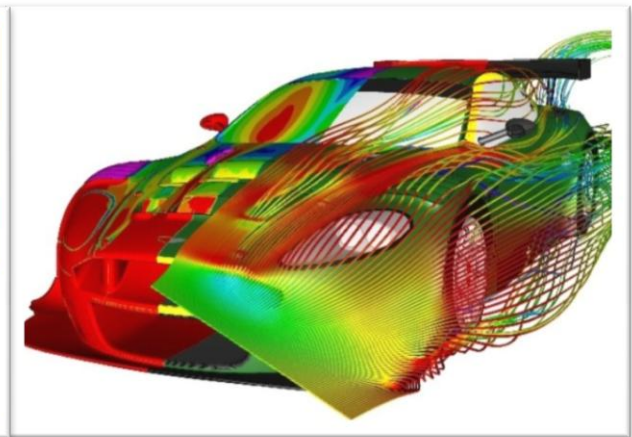


Fig. 3.4. – Exemple simulació 3D.

<http://tecnicaf1.com>

És indispensable fer menció de les limitacions del primer tipus de simulació, on fem conèixer que el flux d'aire es desplaçarà envoltant el sòlid en les tres dimensions del mateix i per tant només es pot adoptar de forma simbòlica els resultats obtinguts en l'estudi bidimensional. És cert que és una forma molt ràpida de poder conèixer el moviment al voltant d'una secció determinada i poder comprovar fàcilment el comportament de la capa límit, de les dades de pressió i velocitat del fluid en cada cas. Per tant aprofitarem els

coneixements aportats en aquesta primera part per combinar-los en el model modificat alhora de fer l'estudi definitiu i real en tres dimensions.

3.3. Simulació bidimensional en seccions

Per la simulació numèrica bidimensional partirem de tres seccions localitzades en l'extrem de la carrosseria, part central de la simetria i pla de simetria (veure **figura 3.5.**). Aquests tres plànols seran els utilitzats per comparar els seus resultats amb els dels diferents casos que descriurem a continuació:

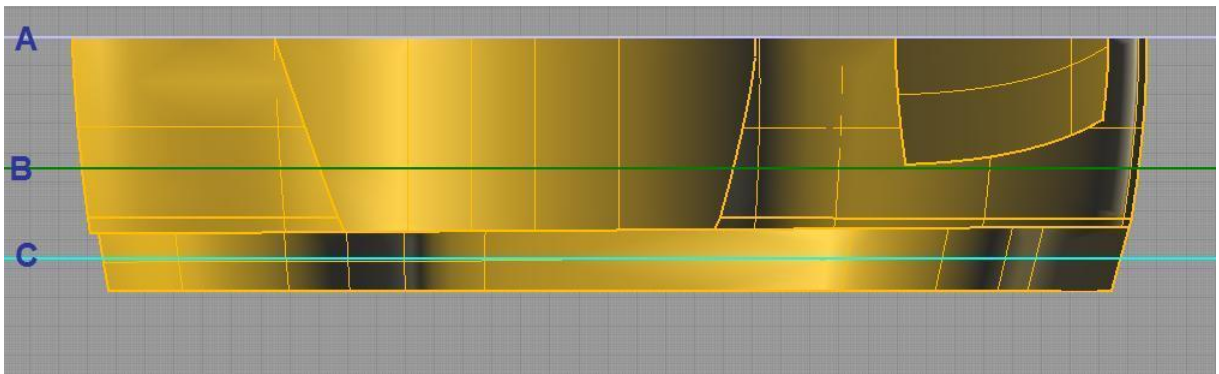


Fig. 3.5. – vista en planta de la localització de les tres seccions d'estudi.

- ▶ Simulació de les tres seccions del model inicial.
- ▶ Simulació de la secció del pla de simetria amb inclinació del vehicle.
- ▶ Simulació de les tres seccions amb la modificació del faldó davanter.
- ▶ Simulació de la secció central amb 3 tipus d'aleró diferents i efecte perfil Gurney.
- ▶ Simulació de la secció lateral amb la incorporació d'un element de disseny propi (aleró lateral).

3.4. Simulació tridimensional del model basic i del model modificat

En la simulació tridimensional seguirem els passos esmentats en l'apartat anterior introduint el càlcul de dos coeficients: coeficient de aerodinàmic de resistència (C_D) i el coeficient aerodinàmic de sustentació (C_L).

3.5. Obtenció de resultats i conclusions

Haurem de diferenciar entre els resultats extrets en la simulació bidimensional i la simulació tridimensional. Segons hem explicat en l'**apartat 3.1.**, només donarem conclusions parcials basades en la teoria i exemplificació a través de les simulacions realitzades. Aquests resultats en serviran de base per fer la configuració del model final.

Un cop es realitzin les simulacions tridimensionals obtindrem paràmetres de sustentació, coeficient aerodinàmic, gradients de velocitat, pressió, etc. que reflectiran en una mesura més real tots els resultats obtinguts i permetran donar conclusions sobre el nostre estudi respecte els efectes que provoca l'aire en les diferents configuracions estudiades.

4. ANALISI I SIMULACIÓ BIDIMENSIONAL DE CONFIGURACIONS I ELEMENTS AERODINÀMICS

4.1. Introducció

Un cop arribats al primer estudi, procedirem a seleccionar les seccions descrites en l'**apartat. 3.3** i farem un petit anàlisi introductori per separat de les configuracions bàsiques i elements aerodinàmics comuns en l'automobilisme de competició, per poder interpretar les posteriors simulacions.

4.2. Estudi seccions inicials

4.2.1. Mallat

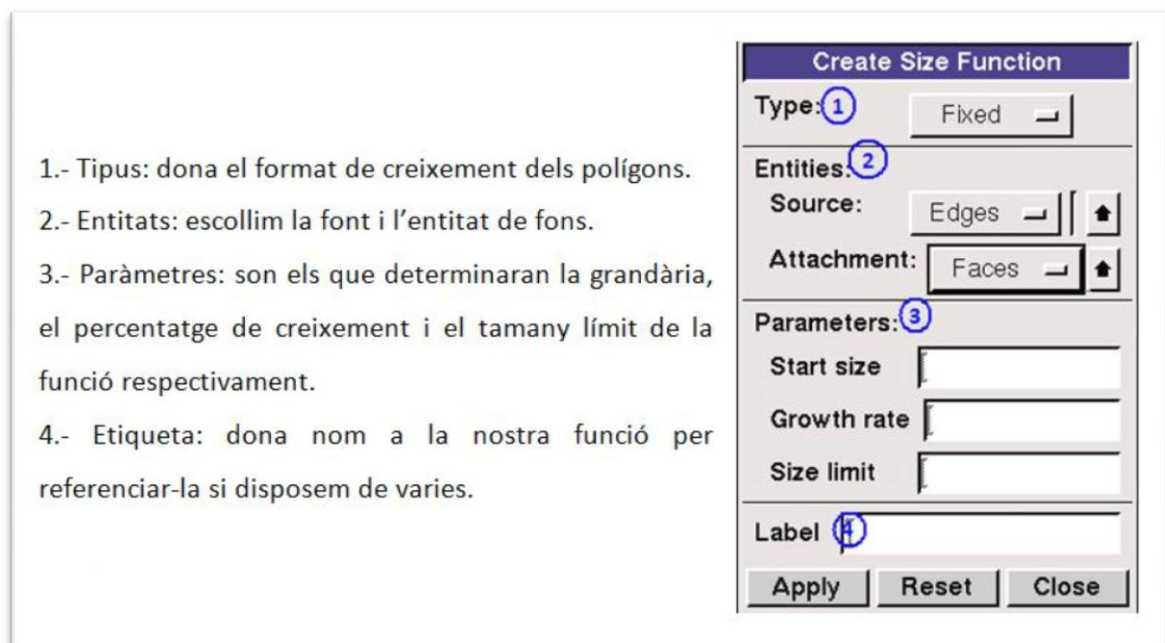


Fig. 4.1. – Quadre de paràmetres.

La realització de Mallat d'una geometria consisteix en fer un tramat finit de polígons que descriguin de forma aproximada la geometria importada. Aquesta malla permetrà exportar-ne i simular-ne en el programari de fluids Star CCM+ d'Adapco®. El procés seguit en les seccions bidimensionals consisteix en associar funcions de mida (size function, veure **figura 4.1.**) a dos zones concretes (mallat fi i túnel) que parteixin dels vèrtexs fins al

creixement màxim en les cares. La creació d'un túnel de dimensions més reduïdes (figura 4.5.) al voltant de la geometria és resultat de cercar una malla de qualitat a prop de les zones d'anàlisi més importants. Un exemple d'aquest tipus d'operació és el detall del mallat en la secció A (figura 4.2.).

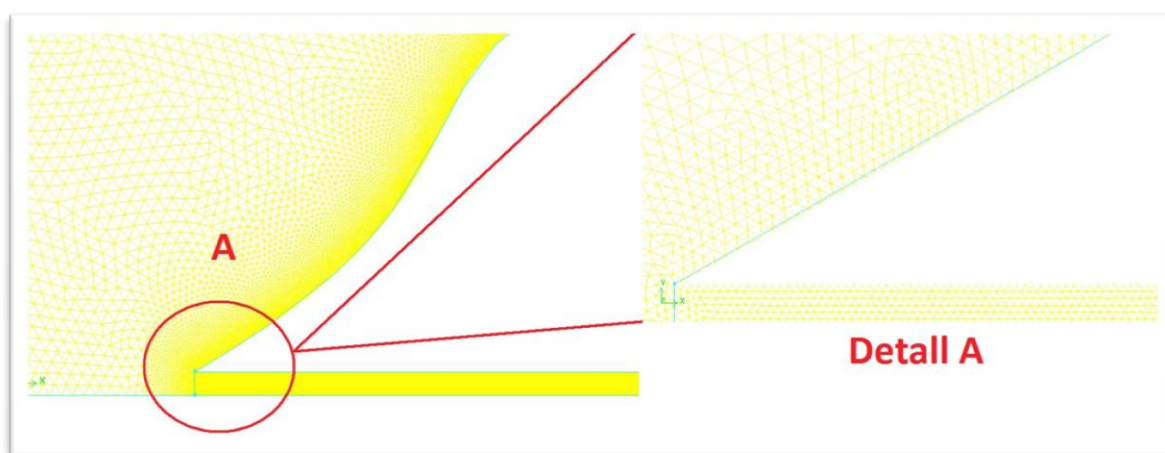


Fig. 4.2. – Creixement de la mida dels triangles amb la funció mida.

La malla en el software Fluent Gambit© s'ha construït amb polígons de geometria tipus "triangle" i els següents paràmetres per les tres primeres seccions:

Nombre de Polígons				Funció Mida			
Secció	1a	1b	1c	Secció	1a	1b	1c
Fons	282.760	260.704	258.396	Fons	0,3	0,1	0,1
Mallat fi	197.488	201.004	198.828	Mallat fi	0,3/1,05/2	0,2/1,1/2	0,2/1,1/2
Túnel	197.874	192.128	192.688	Túnel	2/1,05/5	2/1,1/5	2/1,1/5

Taula 4.1. – Relació nombre de polígons en els diferents cossos.

Un cop s'obtenen les malles, cal comprovar la qualitat del mallat amb l'opció examinar malla (Examine Mesh), per detectar si hi ha possibles triangles molt punti aguts (Highly Skeweend) què es converteixen en problemes al exportar la geometria al simulador.

La qualitat de la malla es verifica per l'escala de colors (blau els triangles desitjables i vermell els mes desfavorables) tal i com mostra en l'exemple la següent figura:

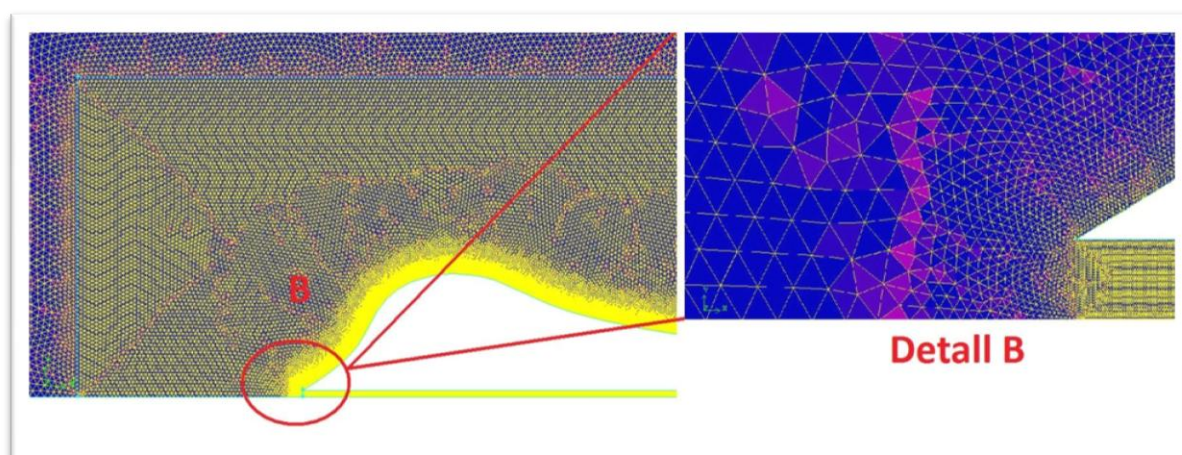


Fig. 4.3. – Qualitat mallat d'una geometria plana (mallat secció C).

4.2.2. Simulació 2D

La simulació requereix exportar la geometria amb les condicions de contorn definides anteriorment. El procediment és senzill, i el descriurem a continuació en la següent figura:

The screenshot shows the 'Specify Boundary Types' dialog box. It has a title bar 'Specify Boundary Types' and a subtitle 'FLUENT 5/6'. Under 'Action:', there are buttons for 'Add', 'Delete', 'Modify', and 'Delete all'. Below this is a table with 'Name' and 'Type' columns. At the bottom, there are 'Show labels' and 'Show colors' checkboxes. The 'Name' field is labeled with a circled '1' and contains the text '1'. The 'Type' dropdown is labeled with a circled '2' and is set to 'WALL'. Below the table, there is an 'Entity:' section with a dropdown set to 'Edges' and a color selection button. At the bottom are 'Apply', 'Reset', and 'Close' buttons.

PAS 1.- Seleccionem la cara o superfície i introduïm el nom

PAS 2.- Seleccionem el tipus de Superfícies (paret, pressió, etc.)

PAS 3.- Apliquem les modificacions

PAS 4.- Repetim el procés fins tenir els contorns determinats

En la figura 13 tenim representat el quadre d'edició de contorn:

- 1.- Nom: etiqueta on posarem el nom de l'entitat (carrosseria, entrada, etc.).
- 2.- Tipus: seleccionarem el tipus d'entitat (WALL, PREASURE, etc.)

Fig. 4.4. – Quadre de condicions de contorn.

En la **taula 4.2.** es mostra com queden definits els contorns de totes les seccions i mantindrem el ordre establert a continuació:

Nº	Nom Etiqueta	Tipus
1	Carrosseria	Wall
2	Entrada	Velocity Inlet
3	Sortida	Pressure Outlet
4	Sostre	Wall
5	Terra	Wall

Taula 4.2. – Definició condicions de contorn.

En la **figura 4.5.** veurem el resultat de la definició de contorn:

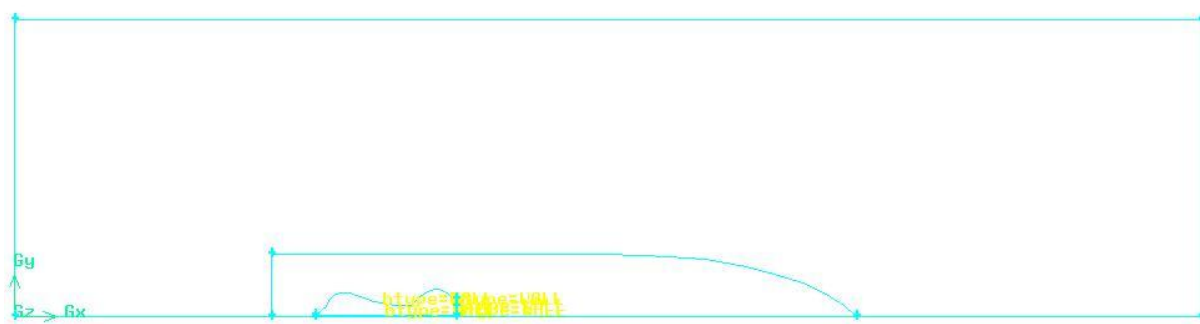


Fig. 4.5. – Resultat de l'edició de contorn en Fluent Gambit.

Per exportar les seccions un cop determinades les condicions de contorn, utilitzarem el format mallat (extensió .mesh) que guardarà totes les propietats de la malla i condicions introduïdes. La importació de l'arxiu al programari de simulació de fluids CFD Star CCM+®, requereix inicialitzar una nova simulació i importar l'arxiu corresponent.

Per iniciar la simulació caldrà definir els models de simulació:

- Fluid del volum: Gas.
- Segregate flow (Flux segregat)
- Motion stationary (Moviment del conjunt sense acceleració)
- Ideal gas (Gas ideal)
- Steady (Flux estacionari)
- Turbulent: Model de turbulència K-Epsilon turbulent.

Aquests models estan basats en la comprovació del cos Ahmed (veure **Annex A.**).

Per últim es defineixen els criteris per parar la simulació segons el temps que per experiència creiem que tardarà a convergir la solució. Donarem per bo els resultats quan les gràfiques donin rangs de residuals amb una estabilització de les mateixes.

4.2.3. Resultats

La simulació de les tres primeres seccions s'ha dut a terme tal i com mostra la següent taula:

Simulació 1

SECCIONS	Nº ITERACIONS	TEMPS UTILITZAT
A	5.510	20 hores
B	5.500	20 hores
C	3.870	16 hores

Taula 4.3. – Nombre d'iteracions i temps empleat en les simulacions.

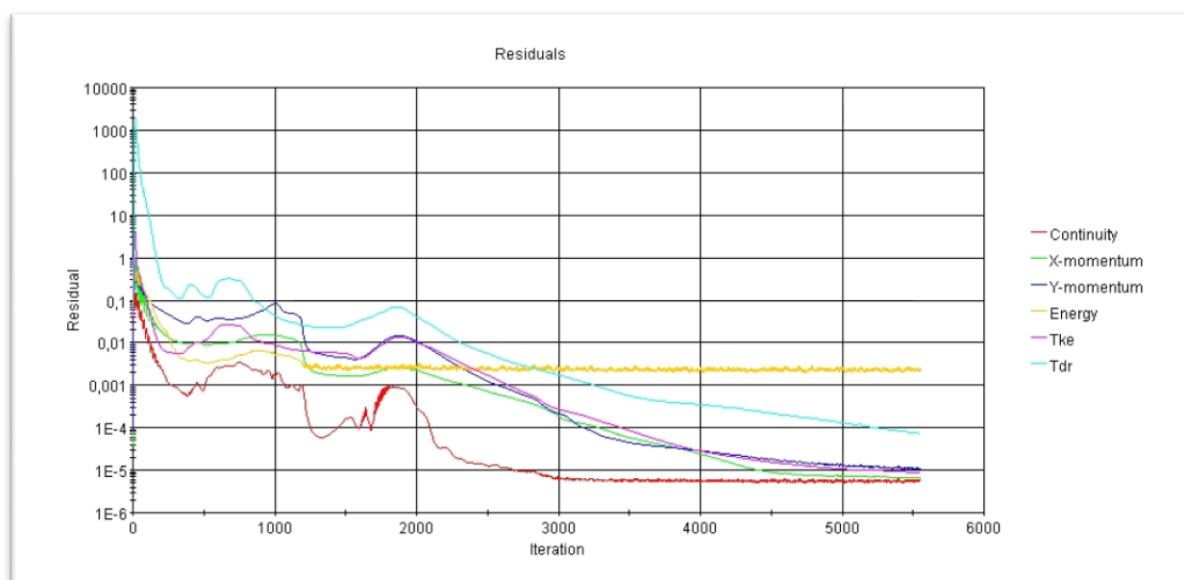


Fig. 4.6. – Exemple gràfic simulació residuals en el cas de la secció A.

Pel que respecte a l' anàlisi de pressions en la secció A tal i com veiem en la figura **4.7.**, tenim una distribució de pressions que va des de la pressió mínima localitzada al sostre de -384.65 Pascals fins al màxim valor donat al frontal del baix de 1.012,2 Pascals. En

aquesta simulació la visualització dels colors és força clara, tot així, tal com es veurà en simulacions posteriors, el fet que el rang de valors de pressió sigui molt ampli pot arribar a perjudicar a la visualització de les pressions al voltant del cotxe, aquest fet s'arregla modificant l'escala de valors de pressió.

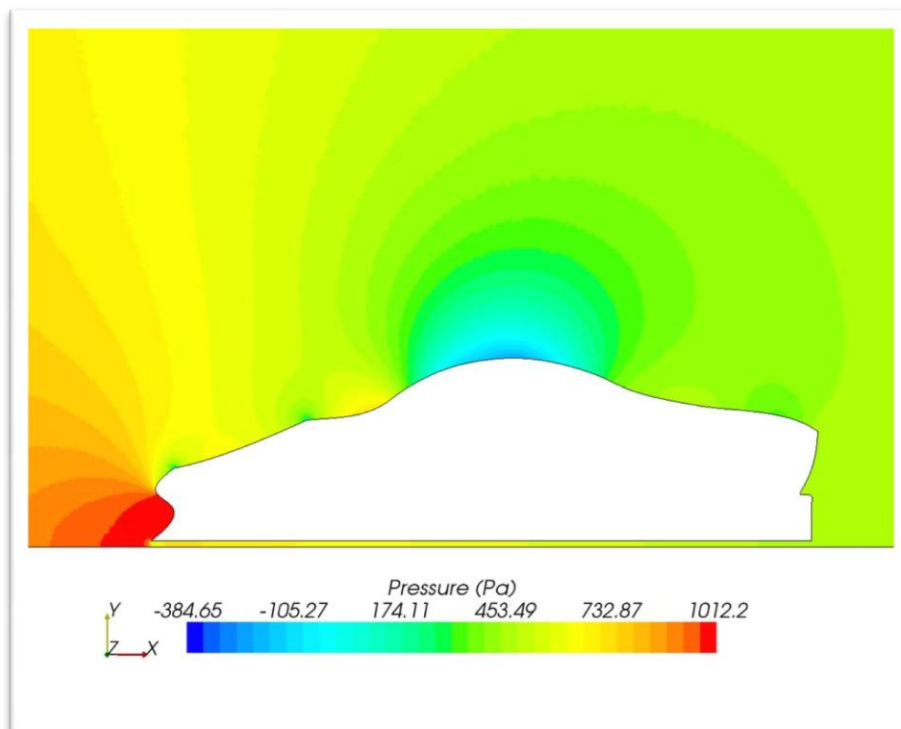


Fig. 4.7. – Diagrama de pressions al voltant de la secció A.

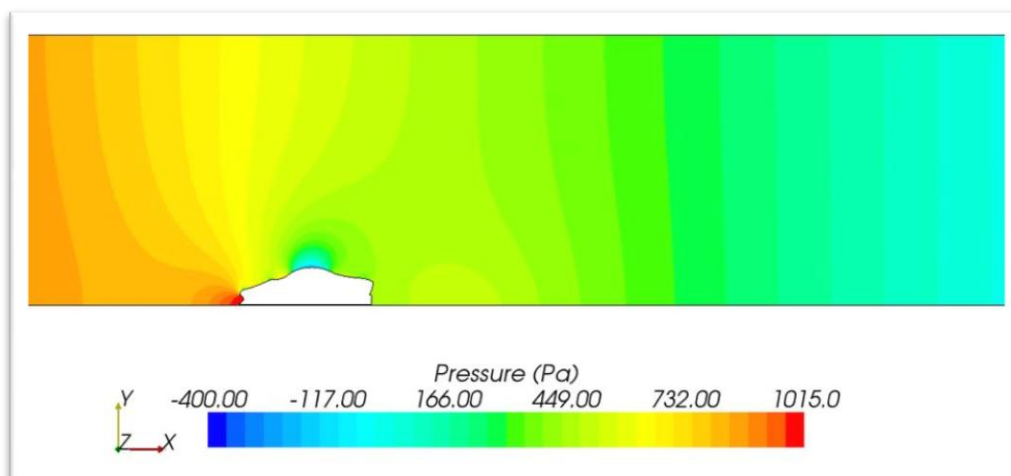


Fig. 4.8. – Diagrama de pressions al túnel de la secció A.

En les seccions B i C obtenim diagrames similars que queden de la següent forma:

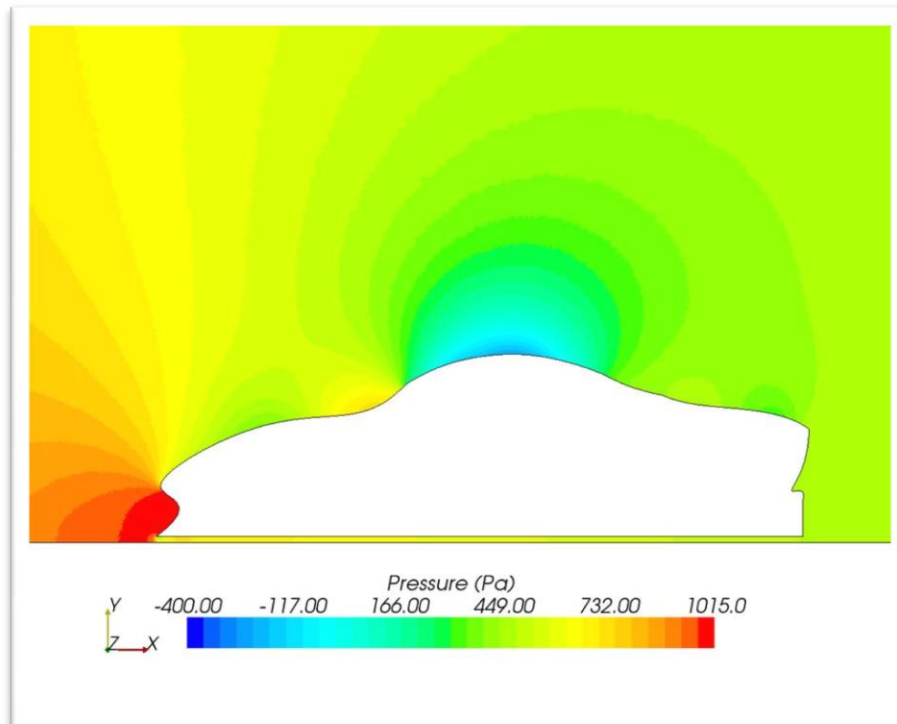


Fig. 4.9. – Diagrama de pressions al voltant de la secció B.

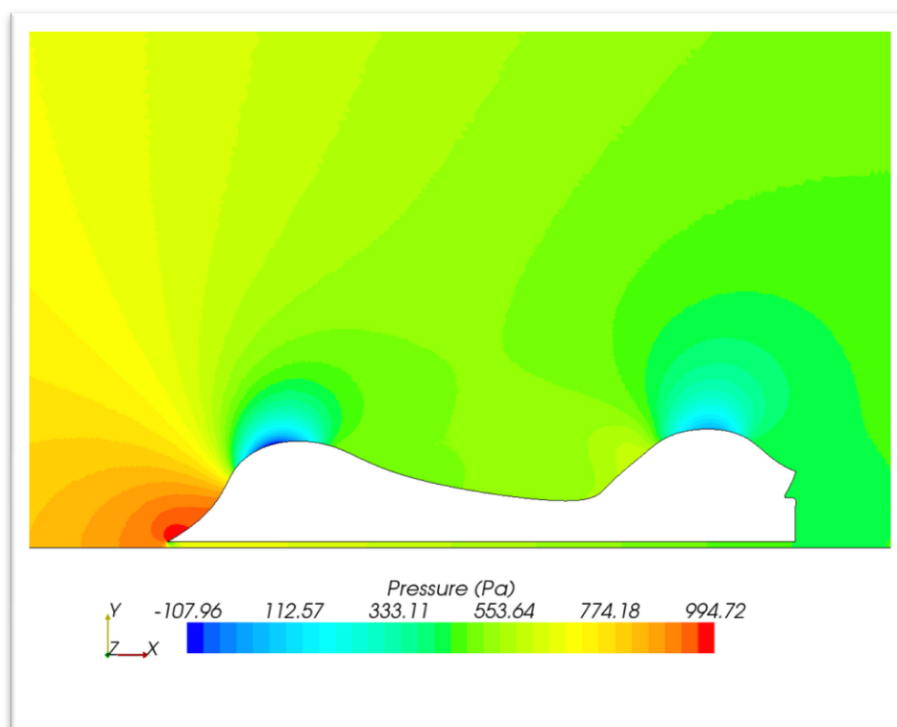


Fig. 4.10. – Diagrama de pressions al voltant de la secció C.

A més dels resultats de pressions, treballarem i compararem sobre els gràfics de velocitats. En les seccions A, B i C del model base obtenim els resultats de la figura **4.11.** :

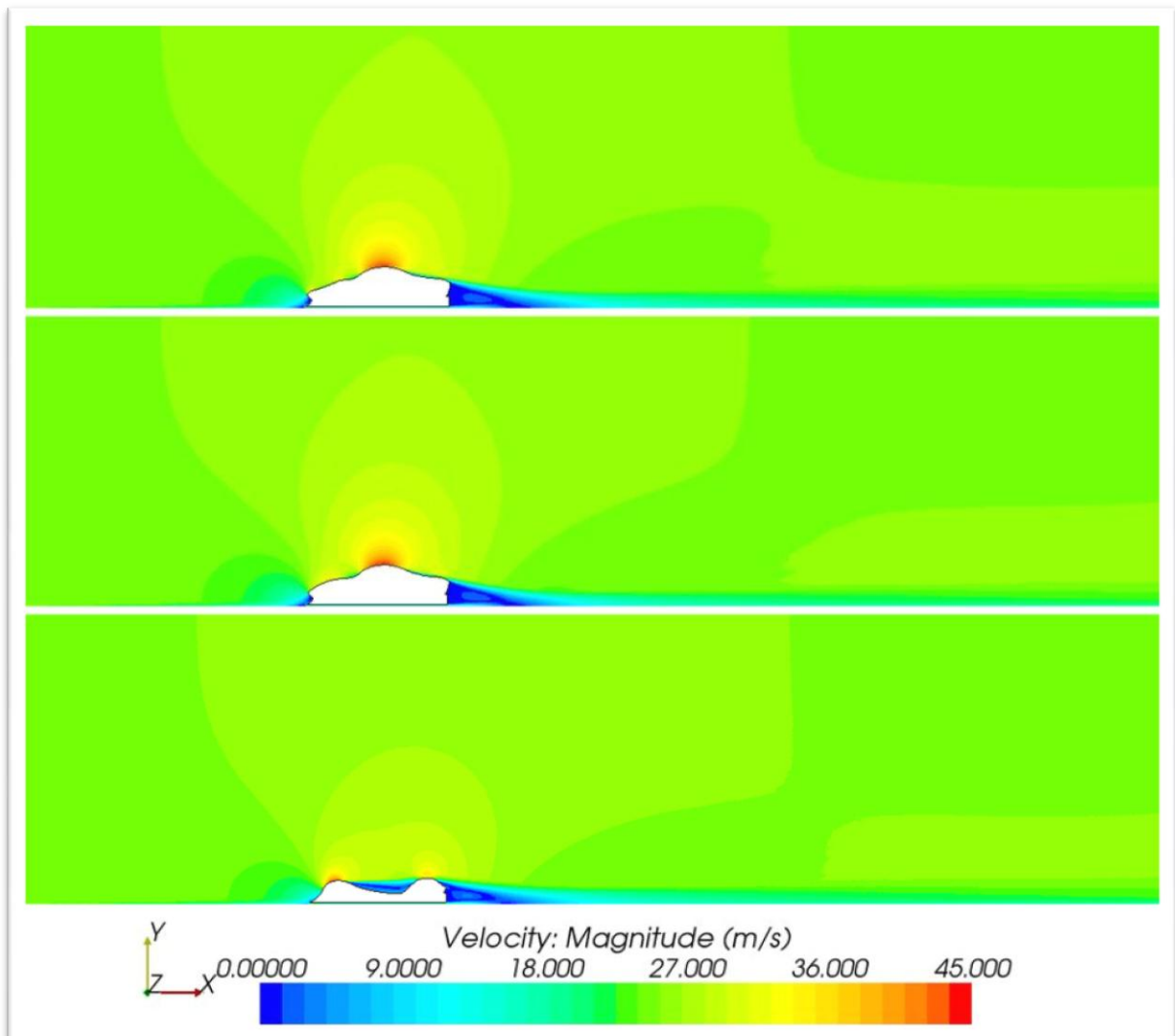


Fig. 4.11. – Diagrama comparatiu de velocitats en les seccions A, B i C respectivament.

Per entendre els fenòmens que es mostren en la **figura 4.11.** hem de fixar-nos en l' impacte del flux en la zona davantera, un cop aquí aquest es divideix en dues parts. La primera passa per la zona superior mentre que la segona es dirigeix cap als baixos del mateix però pateix una forta disminució de la secció donat que la secció entre els baixos i el terra es molt més prima. Aquest estretament provoca una acceleració del flux augmentant la velocitat i per conseqüència disminuint la pressió fet que afavoreix l'adherència del vehicle. En la zona davantera es produeix un petit despreniment del flux que no es tan rellevant com el que succeeix en el sostre.

a)

b)

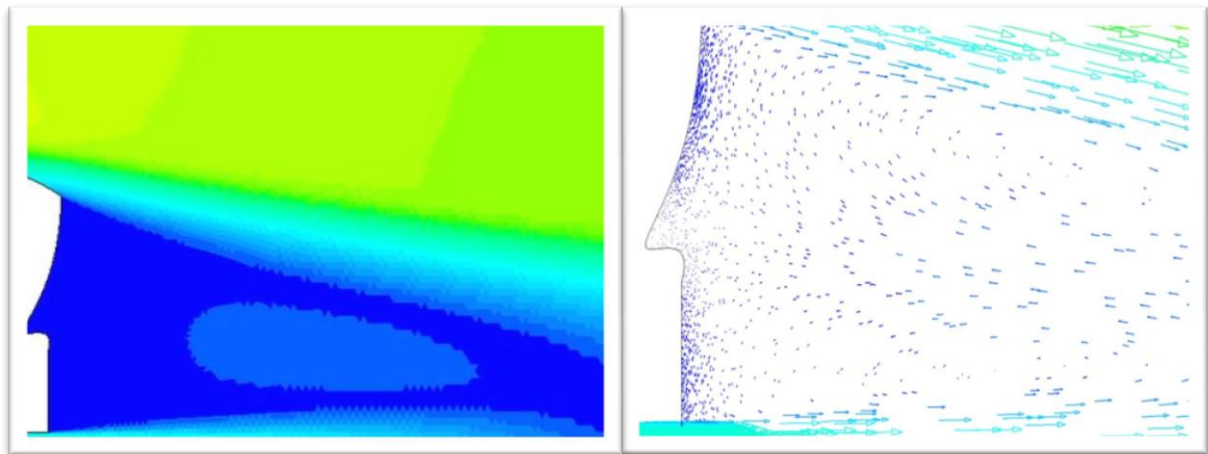


Fig. 4.12. – Detall part posterior secció A: a)diagrama velocitats i b) vectors velocitat.

A part de la zona d'estancament tenim en la zona posterior un altre punt on la distribució de velocitats varia bruscament. La zona blava de la figura **4.12. a)** mostra la zona de baixa velocitat també coneguda com zona del deixant. Aquesta zona provoca que els vèrtexs i l'augment dels vòrtexs frenin l'avanç del cotxe, per això si es redueix aquest efecte s'aconsegueix un millor comportament i augment de l'acceleració i la velocitat punta.

4.3. Anàlisi i simulació reglatge inclinació vehicle

4.3.1. Introducció

La inclinació d'un vehicle és la forma més senzilla de donar-li forma al fons. Sabem que els termes fons pla i forma a priori no són compatibles, però la inclinació negativa (part davantera més baixa que la posterior) conforma una configuració efectiva en quan a sustentació (veure exemple en vehicle de cursa a la **figura 4.13.**).



Fig. 4.13. – Detall inclinació carrosseria. <http://www.powerzone.com.uy>

Per experimentació segons Mc Beath S. Any 2.000 (veure **bibliografia**), s'ha demostrat que no cal una inclinació molt pronunciada per aconseguir uns efectes positius sobre el comportament dinàmic del vehicle. Amb valors entre 0.5° i 2° és suficient per aconseguir un efecte Venturi que fa que a través del fons pla del vehicle s'acceleri el flux que passa d'aire i així s'aconsegueixi una disminució de la pressió. Per contra si l'angle no és l'adequat es pot donar que la sustentació sigui positiva i provoqui la desestabilització del vehicle i en el cas més desfavorable es provoqui una virolla que aixequi la part davantera i el vehicle sencer.

4.3.2. Mallat

El mallat el realitzarem sobre la secció central, que serà la que es compararà amb la mateixa secció localitzada al model base simulat al **apartat 4.2.2.** i queda de la següent manera:

Nombre de Polígons		Funció Mida	
Secció	2	Secció	2
Fons	196.188	Fons	0,2
Mallat fi	155.288	Mallat fi	0,2/1,1/2
Túnel	192.550	Túnel	2/1,1/5

Taula 4.4. - Relació nombre de polígons en els diferents cossos.

Per tal d'aconseguir un mallat igual d'uniforme que el de les seccions base, hem hagut de refer la mida inicial i augmentar el creixement en un 5%. En cas contrari, obtindrem triangles no constants que ens resulten no aptes en la simulació posterior.

La simulació es durà a terme tal i com s'ha explicat en l'**apartat 4.2.2.**, i així podrem passar al següent punt on processarem els resultats i dades a través de varis gràfics.

4.3.3 Resultats i comparació

La simulació de la secció A inclinada s'ha realitzat tal i com mostra la següent taula:

Simulació 2

SECCIONS	Nº ITERACIONS	TEMPS UTILITZAT
A	7.920	24 hores

Taula 4.5. - Relació nombre de polígons i temps utilitzat en els diferents cossos.

Si comparem aquesta secció modificada amb la secció inicial A en l'estudi de pressions tal i com mostra el gràfic de la **figura 4.14.**, es pot comprovar com la secció no inclinada te unes pressions sota el vehicle de l'ordre de uns 650-700 Pascals, mentre que la secció modificada ha baixat segons el gràfic d'escala fins als 500 Pascals aproximadament.

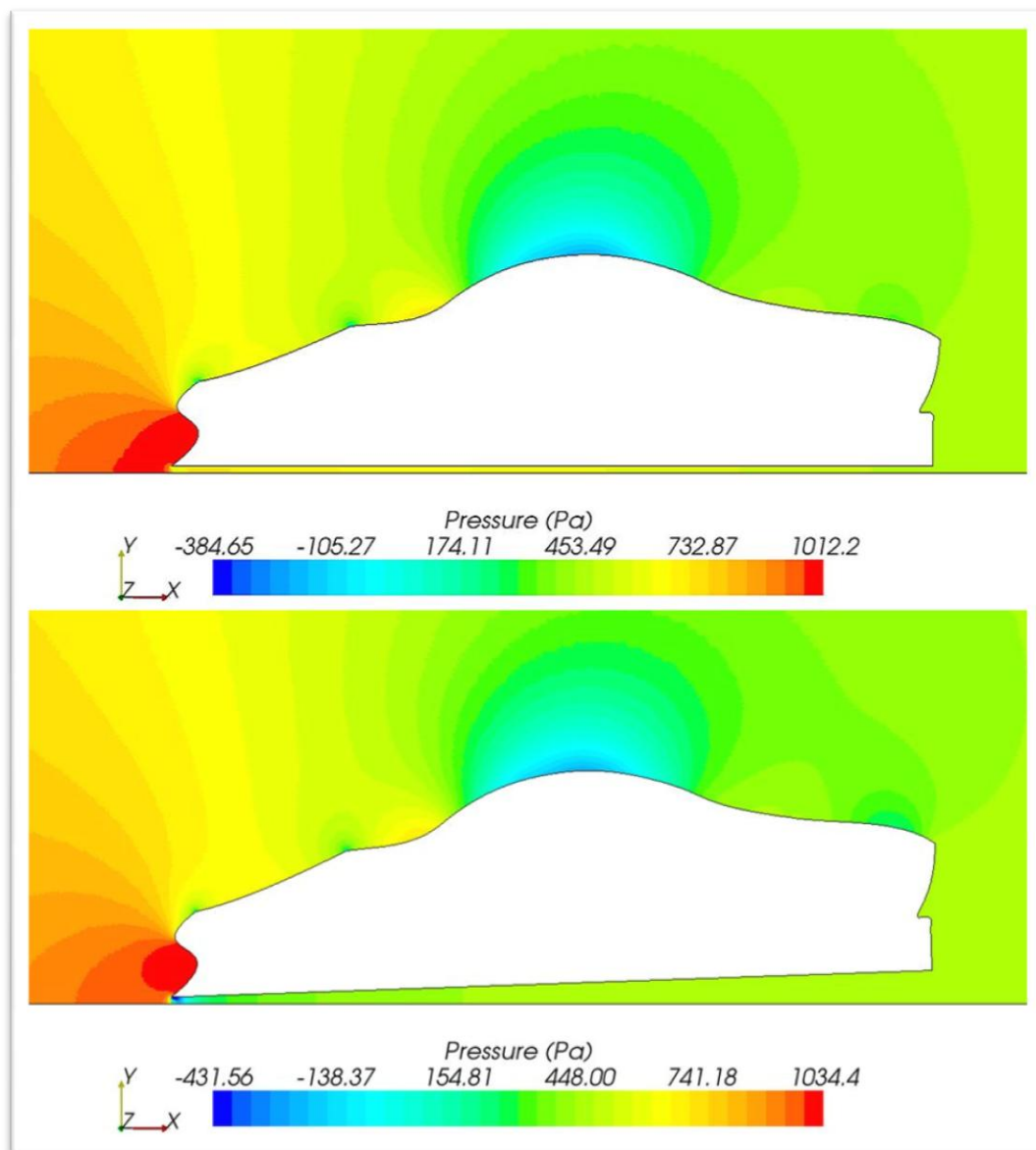


Fig. 4.14. – Comparació pressions seccions A base i secció inclinada.

Per les mateixes seccions visualitzem els gràfics de velocitats (**figura. 4.15.**), i comprovem com l'estela de velocitats ha variat respecte la secció no inclinada, i apareixen uns vòrtexs amb un gradient de velocitat lleugerament superior. Tot i això, la variació es molt substancial i no aporta una millora que adongui a entendre que aquesta configuració sola sense la combinació d'altres elements sigui suficient.

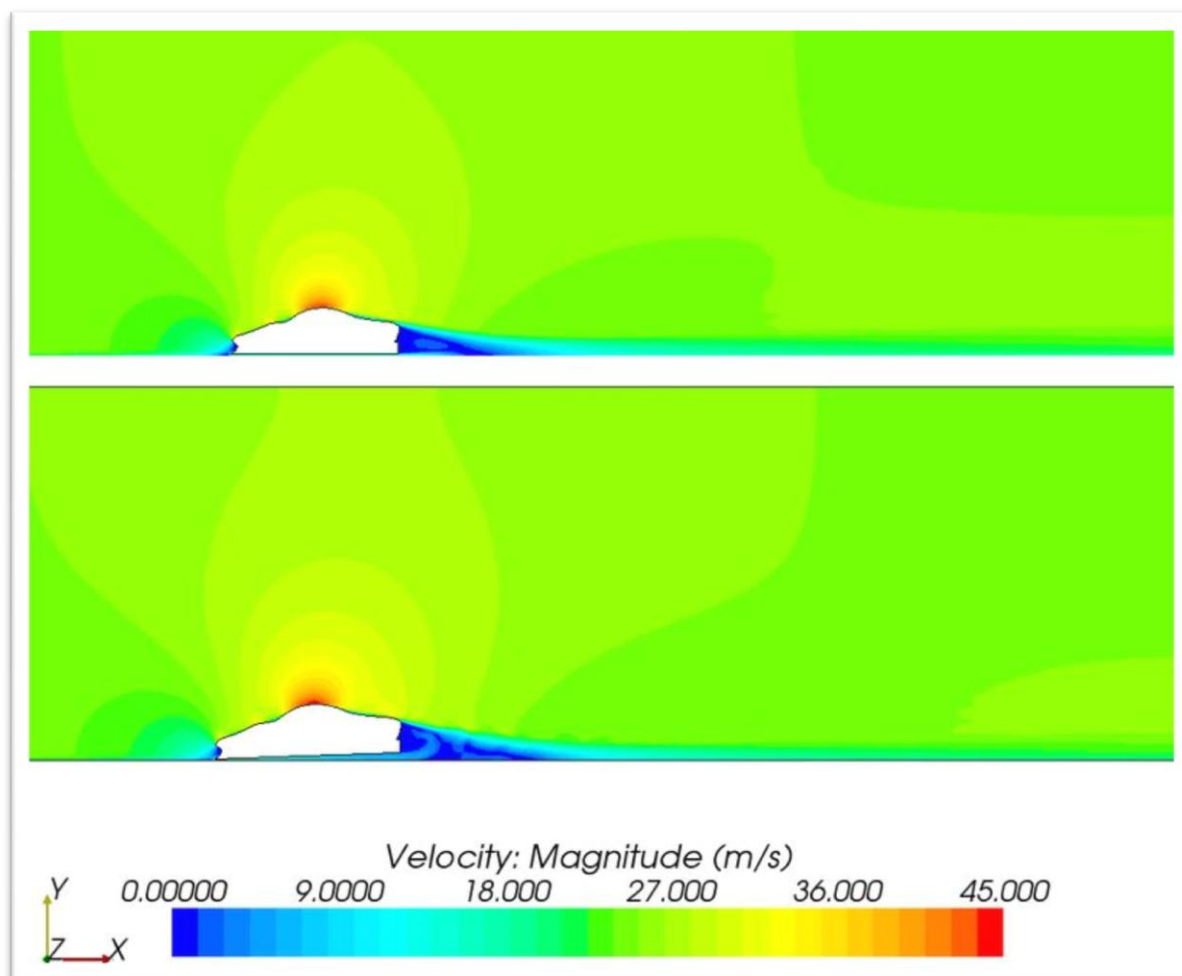


Fig. 4.15. – Comparació velocitats seccions A base i inclinada.

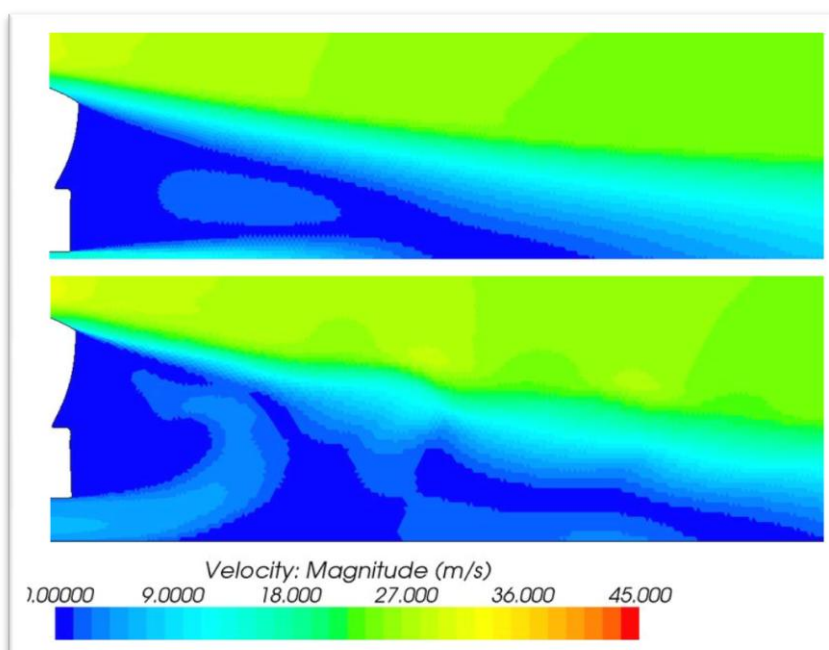


Fig. 4.16. – Comparació part posterior seccions A base i inclinada.

4.4. Anàlisi i simulació de faldons davanters, túnels i difusors

4.5.1 Introducció

Quan parlem dels nostres vehicles i ens fixem en els “spoilers” davanters (més coneguts com faldons davanters), podem comprovar com responen a infinites i diferents formes que moltes vegades contrasten directament amb les formes sinuoses dels faldons muntats en vehicles de competició (**figura 4.17**).

a)



b)



Fig. 4.17. – Comparació faldons davanters: a) vehicle de carrer i b) vehicle de competició.

<http://image.europeancarweb.com>

<http://blog.cibermotor.es>

El principi fonamental dels faldons davanters (també anomenats caixes d'aire) radica en allargar la seva extensió fins a una alçada molt propera al asfalt i provocar que la quantitat d'aire que circuli per sota del vehicle, i en conseqüència, pel fons pla del mateix disminueixi considerablement. Aquesta disminució del pas de flux d'aire per sota del vehicle aconseguirà beneficis diferents si es tracta d'un vehicle sense fons pla (tipus comercial o de carrer on la part de sota té a la vista elements com el càrter, braços de direcció, suspensió, etc.) i d'altres de diferents si podem optar per una configuració de fons el més pla possible (tipus vehicle de competició).

Si el fons no és pla buscarem que la massa d'aire que frena el vehicle contra les parts que hi ha més a la vista del fons sigui la mínima. Si disposem d'un fons pla dissenyat per el model en concret es buscarà conduir l'aire amb ajuda de canalitzadors laterals o centrals

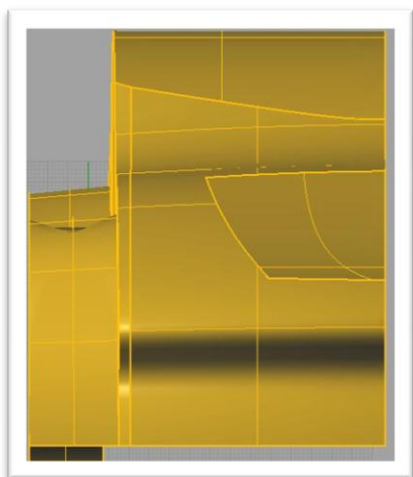
(depenen de la configuració escollida) cap a la part posterior i deixarem que la baixada de pressió i l'acceleració del flux augmentin el coeficient de sustentació negatiu donat que tenim tota l'àrea del fons per actuar.

4.4.2. Mallat

La simulació d'aquest apartat s'ha tingut en compte les tres seccions a, b i c descrites en l'**apartat 3.3.** que hem introduït les modificacions següents:

- Modificació del faldó davanter i inserció d'una caixa d'aire al fons del vehicle.
- Modificació de la part posterior del vehicle i disseny d'un difusor bàsic.
- Inserció tapetes laterals al difusor.

a)



b)



Fig. 4.18. – Detall frontal: a) Sense caixa d'aire – b) Modificació amb caixa d'aire.

Els paràmetres emprats en el mallat d'aquest apartat són els següents:

Nombre de Polígons				Funció Mida			
Secció	3a	3b	3c	Secció	3a	3b	3c
Fons	33.684	187.296	291.504	Fons	0,3	0,2	0,2
Mallat fi	160.528	151.720	198.892	Mallat fi	0,3/1,05/2	0,2/1,1/2	0,1/1,1/2
Túnel	192.714	193.192	192.688	Túnel	2/1,05/5	2/1,1/5	2/1,1/5

Taula 4.6. - Relació nombre de polígons en els diferents cossos.

Cal esmentar la variació de les condicions de mallat en les seccions 3a i 3b per tal d'evitar problemes alhora d'exportar l'arxiu al programari de simulació. Al modificar i crear un fons diferent hem augmentat la mida de la part "fons" fins a 0.3 cm de mida inicial. Això ha provocat una disminució del nombre de polígons en aquest àrea i com a conseqüència la reducció de resolució.

4.4.3. Resultats i comparació

La simulació numèrica d'aquest cas consta de les tres seccions A,B i C amb la modificació del túnel de vent i del fons pla modificat. El temps emprat i el nombre d'iteracions es reflecteixen en la següent taula:

Simulació 3

SECCIONS	Nº ITERACIONS	TEMPS UTILITZAT
A	6.920	22 hores
B	4.270	18 hores
C	12.000	43 hores

Taula 4.7. - Relació nombre de polígons i temps utilitzat en els diferents cossos.

Si comparem les seccions que hem modificat amb la caixa d'aire i el difusor posterior en el gràfic detall de la part posterior veurem els efectes que ha produït aquest conjunt d'elements. En les seccions A (**figura 4.19.**) aquest efecte a fet que la regió de velocitat prop de 0 disminueixi de forma petita.

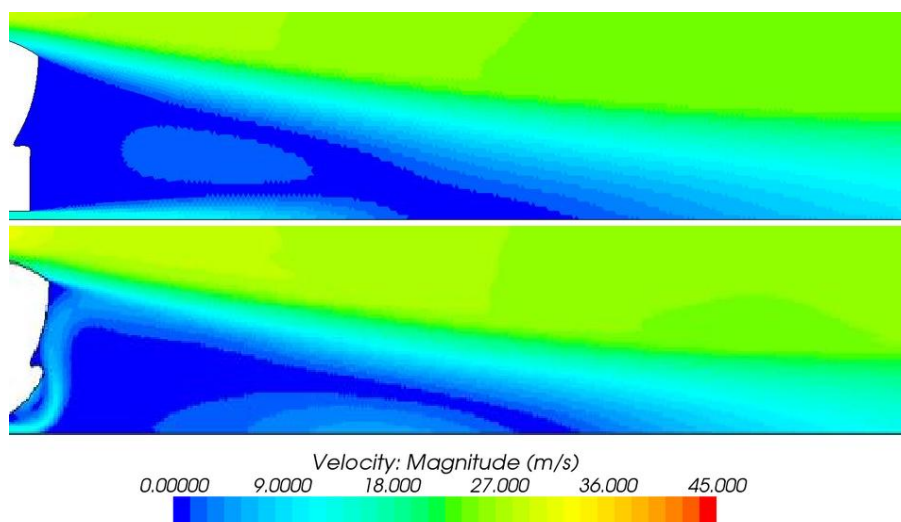


Fig. 4.19. – Gràfic comparatiu seccions A velocitats model base i model modificat amb difusor.

Si comparem les seccions B l'efecte del difusor es molt mes acusat, i veiem com l'estela de velocitats a prop de 0 s'ha disminuït considerablement i per tan s'ha aconseguit millorar el comportament tenint en compte que la secció del difusor ocupa gran part de la secció transversal.

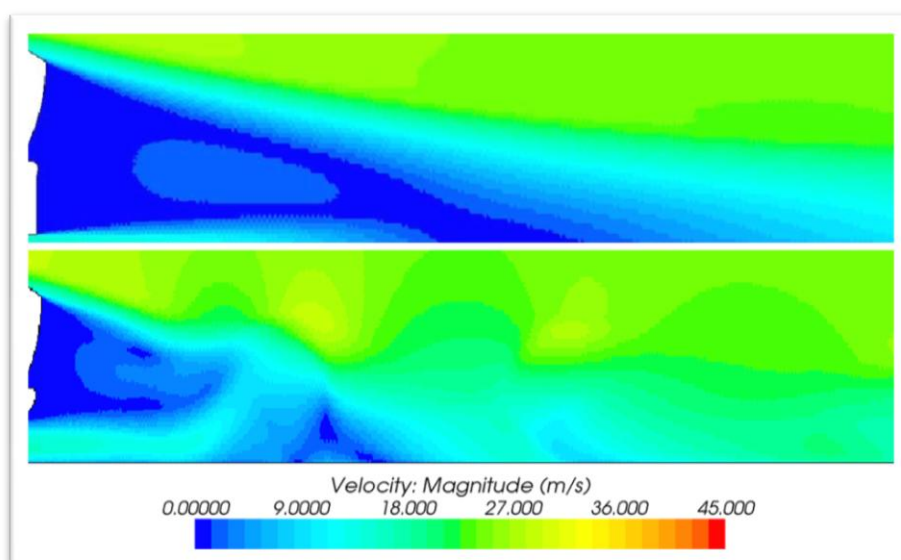


Fig. 4.20. – Gràfic comparatiu seccions B velocitats model base i model modificat amb difusor.

Per últim en la secció C tornem a veure la disminució de l'estela posterior i en conseqüència la millora substancial d'aquesta modificació en les tres seccions.

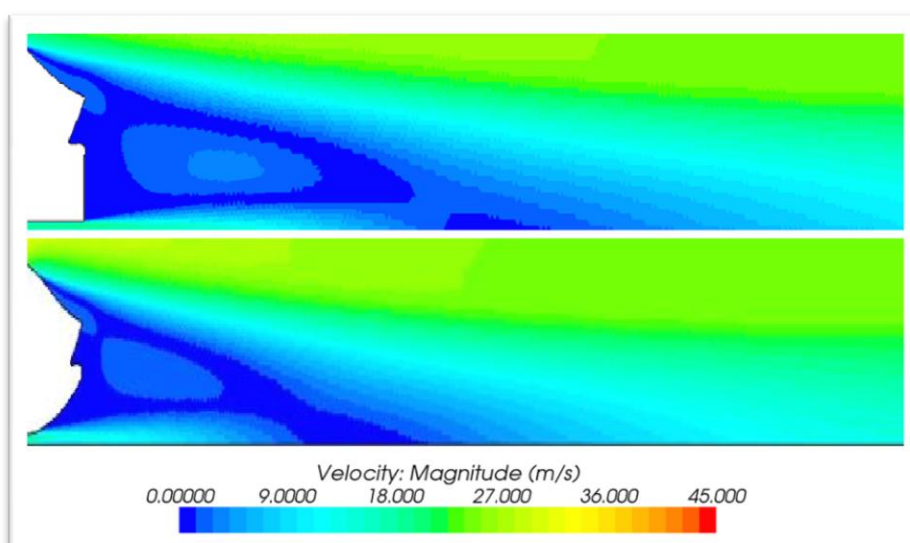


Fig. 4.21. – Gràfic comparatiu seccions C velocitats model base i model modificat amb difusor.

4.5 Anàlisi i simulació d'alerons, derives laterals i Flap Gurney

4.5.1. Introducció

El temps de pas en un revolt s'ha convertit en un, si no el que més, dels factors més importants i transcendents en tota les curses. Evidentment la velocitat màxima és important, però ho és més el temps de pas per corba i és aquí on es guanya moltes curses.

L'eina bàsica utilitzada per a augmentar la Down Force (força d'empenta avall) és l'aleró (**figura 4.22.**). Es tracta d'una superfície que genera una força cap avall, la qual s'encarrega "d'enganxar" el cotxe a l'asfalt, o fer que pesi més, amb la mateixa massa.



Fig. 4.22. – Aleró posterior del BMW Sauber F1 07. <http://mm.motor21.com>

Alhora de dissenyar un aleró hem de tenir en compte que a banda del perfil que en més o menys complexitat donarà la forma a aquest apèndix, per tal d'augmentar l'efectivitat i que l'aire que passa per sota no destorbi l'aire que passa per sobre, s'han de col·locar unes plaques laterals anomenades pantalles d'extremitat o derives laterals (**figura 4.23.**).



Fig. 4.23. – Aleró amb derives laterals específiques. <http://www.kptuning.com>

Existeix un mètode extra per a augmentar la sustentació d'una superfície, es tracta del denominat “Flap Gurney” o “Nolder” (**figura 4.24.**). És d'una placa de petites dimensions (1 cm més o menys) col·locat perpendicularment al perfil que provoca aproximadament un 20% més de sustentació.

a)



b)

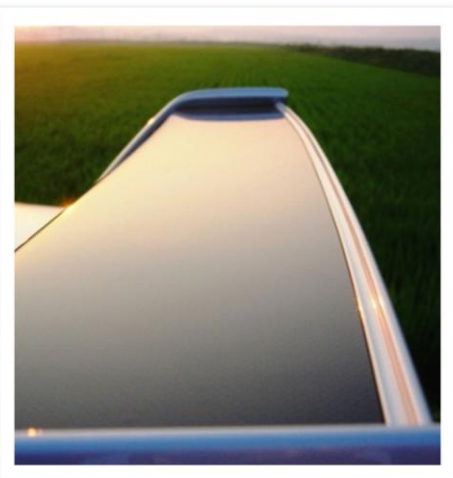


Fig. 4.24. – Detall Flap Gurney: a) Aleró vehicle WRC i b) Aleró vehicle comercial.

<http://www.juwra.com>

<http://www.imageshack.us>

Per tal que el funcionament sigui el correcte cal tenir en compte diferents paràmetres en el disseny. Aquest apèndix, fa que l'aire que passa pel extradós es desenganxi el més tard possible, amb el que la sustentació augmenta, a més d'augmentar aquesta per impacte directe de l'aire.

4.5.2. Mallat

El mallat s'ha realitzat fixant la secció A i instal·lant tres perfils d'aleró diferents (figura 4.25.) sense inclinació ni angle d'atac.

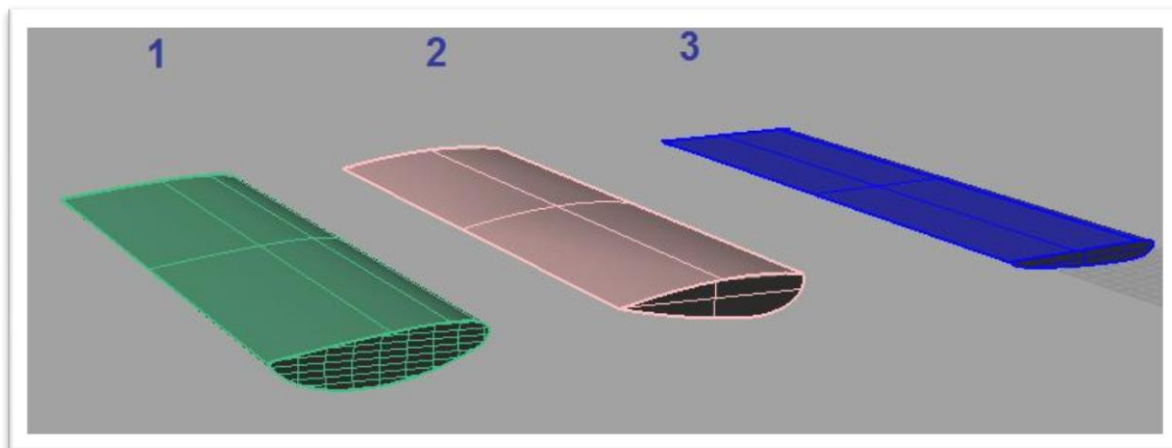


Fig. 4.25. – Part dels 3 alerons dissenyats per l'estudi.

El tres alerons no responen a models comercialitzats, s'han dissenyat amb perfils molt diferenciats per poder comprovar com actuen en general les variacions de geometria en les seccions. El mallat obtingut per aquestes tres simulacions és el mostrat en la següent taula:

Nombre de Polígons				Funció Mida			
Secció	41	42	43	Secció	41	42	43
Fons	251.834	251.834	251.834	Fons	0,1	0,1	0,1
Mallat fi	212.620	213.292	214.100	Mallat fi	0,1/1,1/2	0,1/1,1/2	0,1/1,1/2
Túnel	192.128	192.128	192.128	Túnel	2/1,1/5	2/1,1/5	2/1,1/5

Taula 4.8. - Relació nombre de polígons en els diferents cossos.

A més de comparar el comportament amb les seccions inicials, incorporarem als mateixos perfils el Nolder o Flap Gurney, que podem veure en el detall de la figura 4.26.:

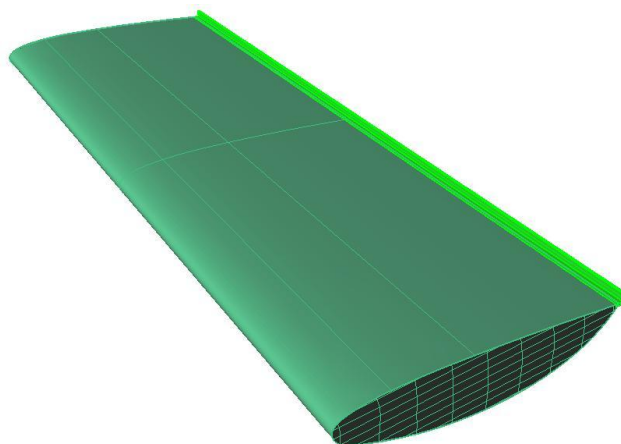


Fig. 4.26. – Aleró amb Perfil Gurney incorporat.

Per últim repetim el procés de mallat de la secció central amb els tres perfils d'aleró diferents incorporant en aquest cas a cadascun el Perfil Gurney. En la següent taula es mostra les característiques de mallat:

Nombre de Polígons				Funció Mida			
Secció	51	52	53	Secció	51	52	53
Fons	251.834	251.834	251.834	Fons	0,1	0,1	0,1
Mallat fi	214.920	214.920	216.134	Mallat fi	0,1/1,1/2	0,1/1,1/2	0,1/1,1/2
Túnel	192.128	192.128	192.128	Túnel	2/1,1/5	2/1,1/5	2/1,1/5

Taula 4.8. – Taula descriptiva de les característiques de mallat.

4.5.3. Resultats i comparació

La següent taula ens descriu les característiques de la simulació en la secció A amb les tres variants d'aleró descrites anteriorment:

Simulació 4

SECCIONS	Nº ITERACIONS	TEMPS UTILITZAT
A1	4.500	18 hores
A2	4.650	18 hores
A3	8.150	24 hores

Taula 4.9. – Descripció iteracions i temps utilitzat en les simulacions.

Els resultats obtinguts donada la posició d'aquest element es en la part posterior, per tant ens centrarem tan sols en els efectes produïts per l'aleró. En l'anàlisi de pressions ajustem l'escala per igual als tres casos i comparem entre ells (**figura 4.27.**):

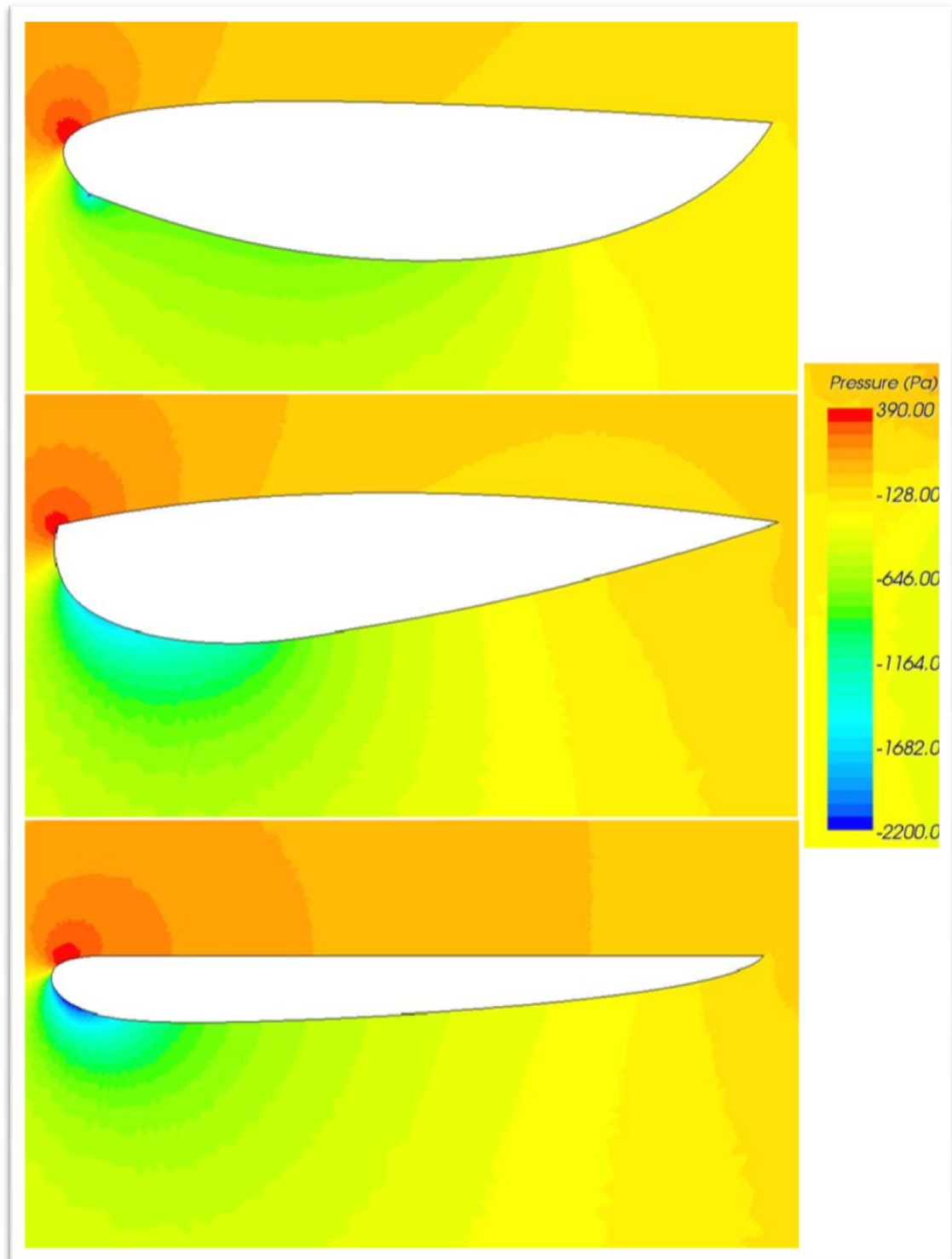


Figura 4.27. – Gràfic de pressions comparatiu de les tres seccions del aleró.

De les tres seccions la secció que manté un augment de la pressió durant més part de la secció és la tercera, tot i ser la secció més prima. En canvi si estudiem les depressions que es formen en la part del intradós tots tenen una pressió negativa però és més accentuada en la secció número 2. Aquesta depressió afavoreix que no es desprengui la capa de flux que incideix en la secció (veure **Annex C**). Es pot deduir que en les tres seccions variant a una inclinació en sentit anti horari podria donar un efecte de major sustentació donat que el flux d'aire tindria més superfície per incidir (veure **figura 4.28.**).

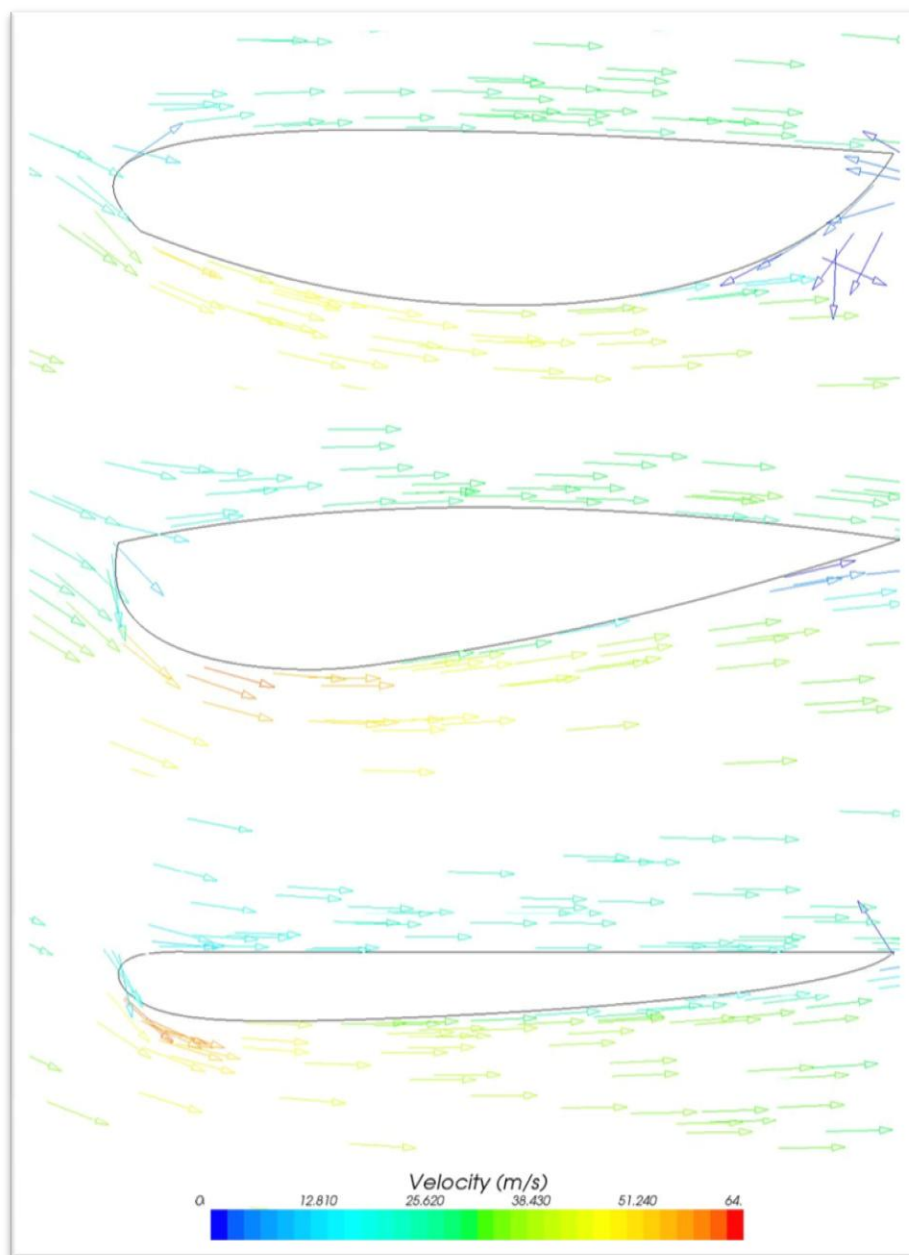


Fig. 4.28. – Diagrama de vectors velocitat en les tres seccions d'aleró.

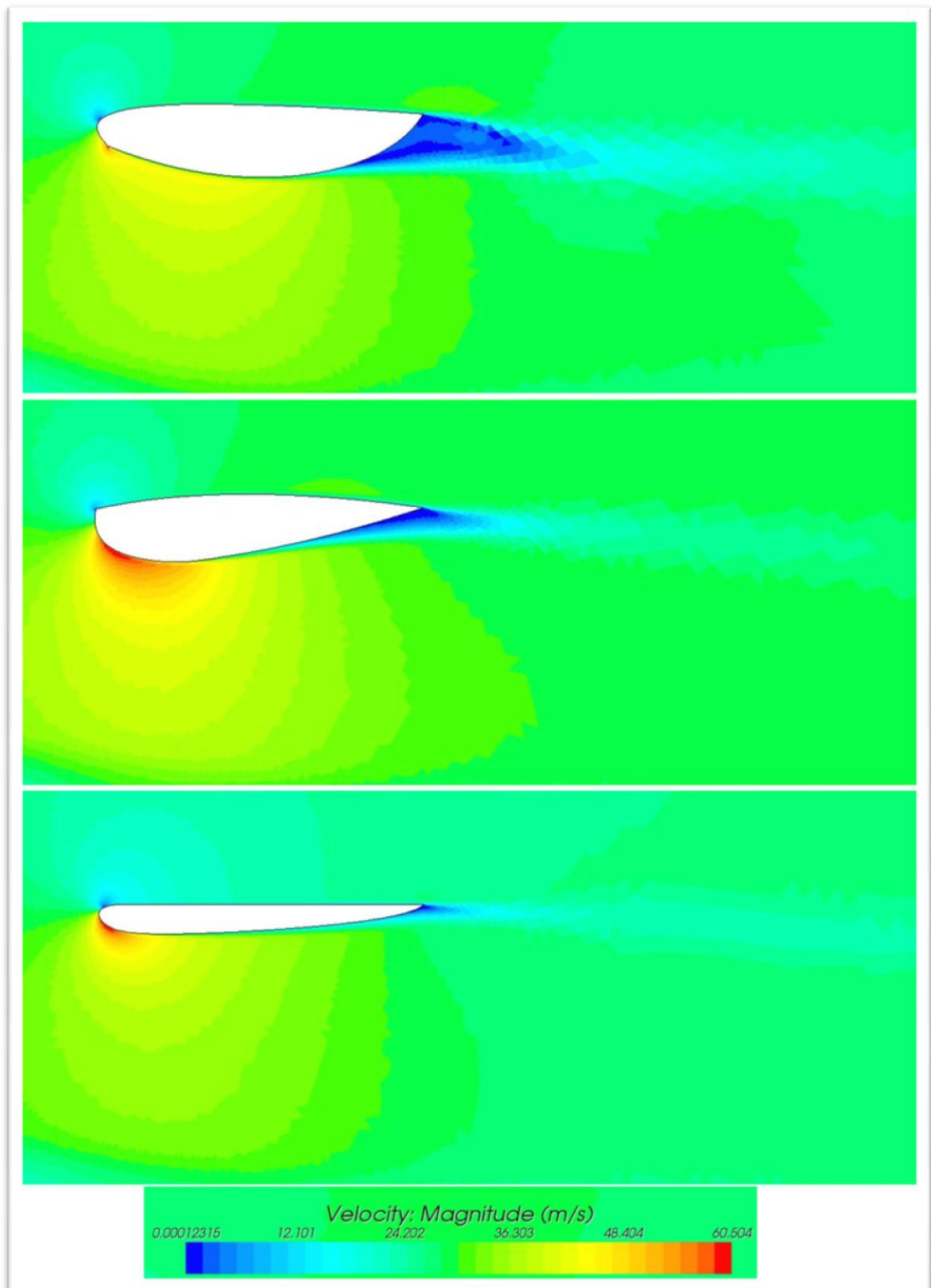


Fig. 4.29. – Diagrama de velocitats en les tres seccions d'aleró.

En el **gràfic 4.29**, es pot comprovar com la tercera secció d'aleró és la que menys zona de velocitat 0 hi afecta i per tan a priori serà més efectiu.

Ara analitzarem els alerons incorporant el Nolder a cada un d'ells. Les simulacions realitzades han emprat el temps i les iteracions indicades en la següent taula:

Simulació 5		
SECCIONS	Nº ITERACIONS	TEMPS UTILITZAT
A1	8.200	23 hores
A2	8.200	23 hores
A3	8.200	23 hores

Taula 4.10. – Taula d'iteracions i temps utilitzat en les simulacions amb Nolder.

Els nous diagrames de pressió presenten l'aspecte següent:

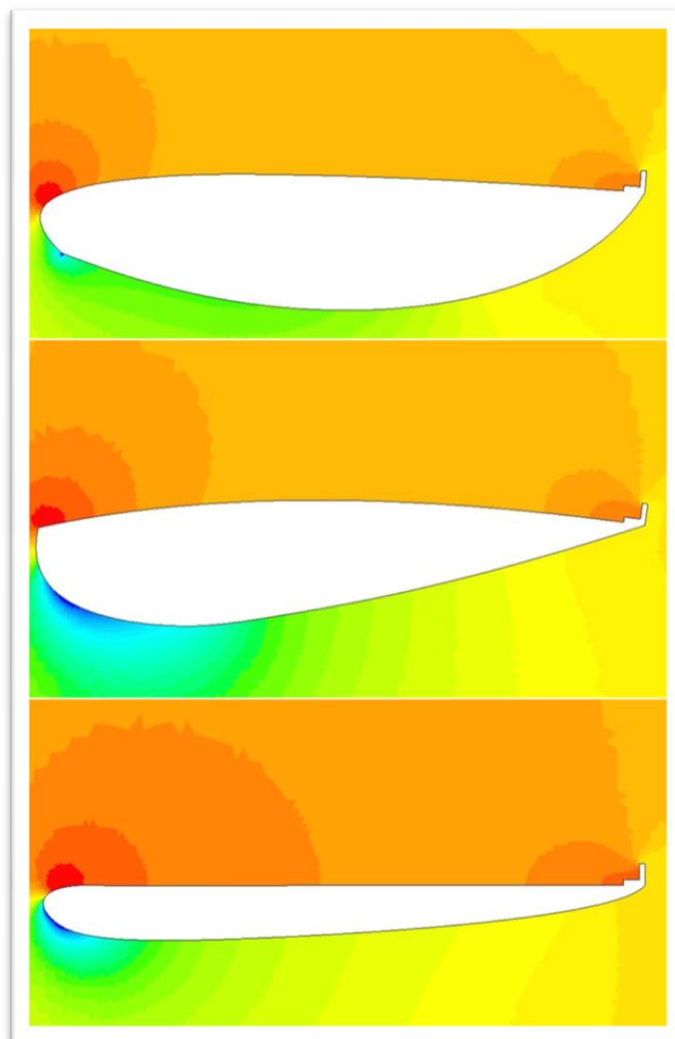


Fig. 4.30. – Diagrama pressions seccions aleró amb Nolder.

La incorporació del flap Gurney ha provocat que tot l'extradós augmenti la seva pressió i en especial la part on s'ha instal·lat aquest element. En diferents competicions es pot variar la mida entre 1cm, 1.5 cm o 2cm (**veure Annex C**).

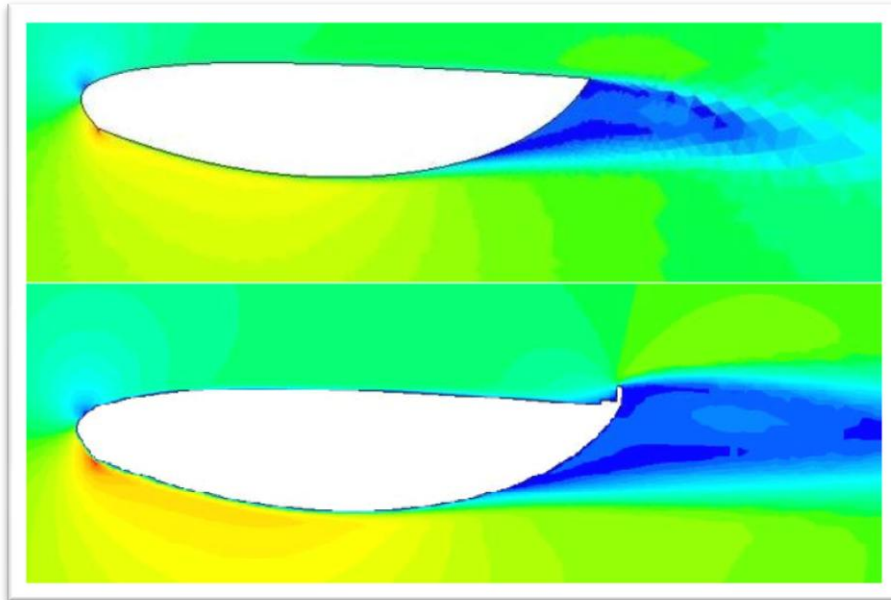


Fig. 4.31. – Comparació diagrama velocitats aleró tipus 1 base i modificat amb Nolder.

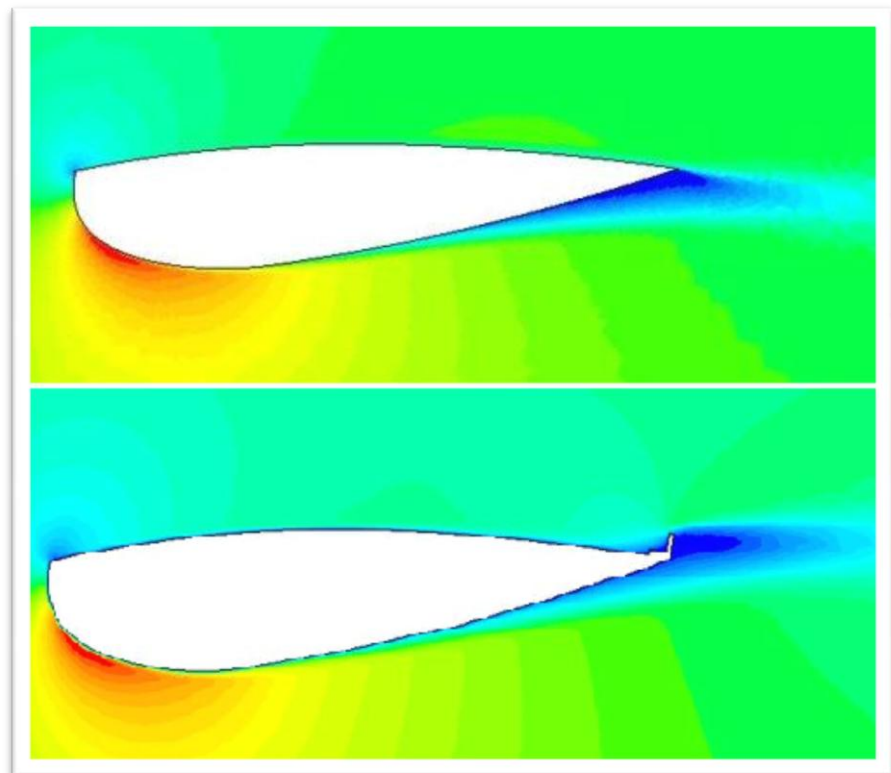


Fig. 4.32. – Comparació diagrama velocitats aleró tipus 2 base i modificat amb Nolder.

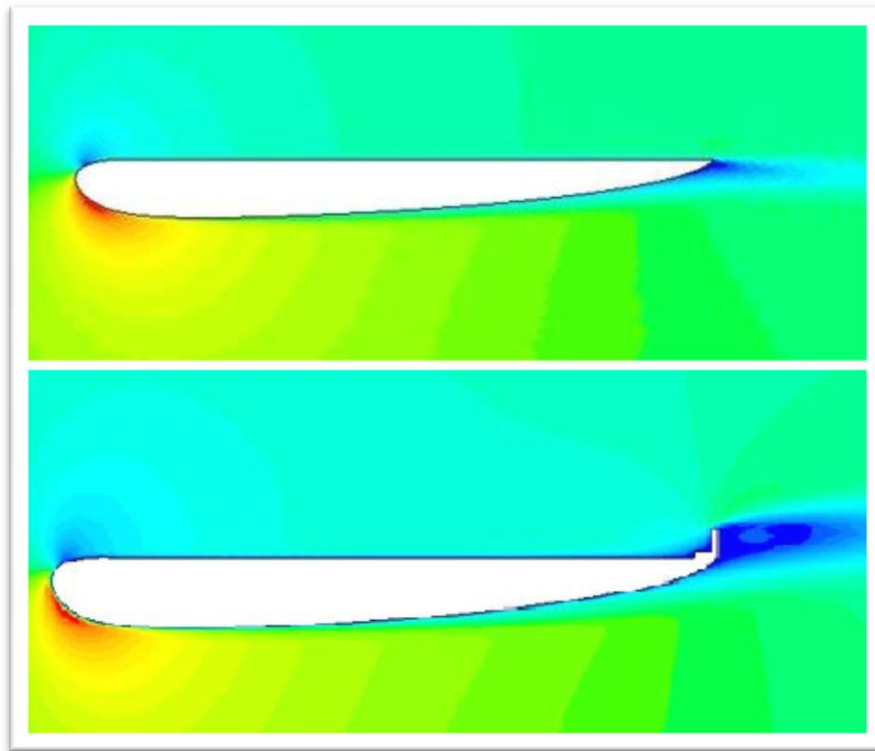


Fig. 4.33. – Comparació diagrama velocitats aleró tipus 3 base i modificat amb Nolder.

Aquest tipus d'apèndix és efectiu quan tenim molta càrrega a l'aleró o zona on col·loquem el Nolder. Quan no tenim configuracions on suportem grans càrregues aerodinàmiques aquest element no és fonamental en la optimització del comportament aerodinàmic d'un vehicle.

4.6. Disseny Anàlisi i simulació de l'aleró lateral

4.6.1. Anàlisi i disseny

En la recerca realitzada per la preparació d'aquest projecte, s'ha estimat aportar i analitzar un element de disseny propi per realitzar la simulació aerodinàmica. La base s'ha inspirat en la categoria del campionat de Turismes Alemany DTM on s'incorporen unes derives laterals als baixos per afavorir la sustentació i l'adherència màxima en els pas per corba (veure exemple en **figura 4.34.**). D'aquesta base s'ha procedit a dissenyar un aleró secundari que es posicionés en la part posterior de la carrosseria. Es realitzarà el disseny

corbat amb la intenció a priori que l'aire impacti sobre ell provocant pressió en la part de tracció del cotxe.



Fig. 4.34. – Part posterior del Audi A4 DTM. <http://produccionescta.diinoweb.com>

Finalment la geometria proposada ha estat invertida respecte la direcció que adopten els vehicles de DTM per intentar comprovar si això augmenta o disminueix la sustentació negativa. El disseny definitiu es mostra en la següent figura:

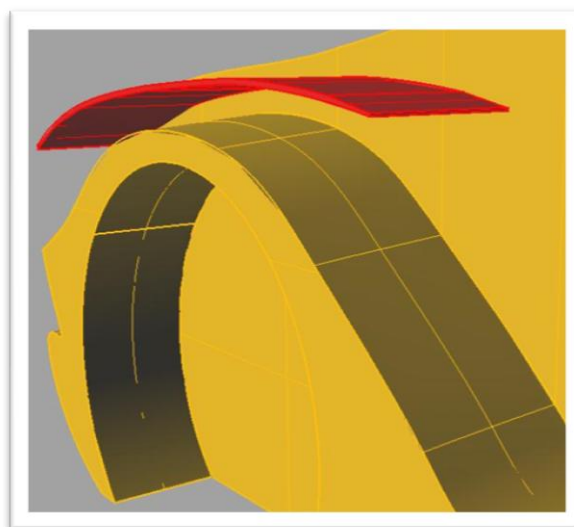


Fig. 4.35. – Detall disseny aleró lateral

4.6.2. Mallat

La secció escollida per l'estudi bidimensional d'aquest element ha estat la secció C on trobem el pas de roda i que és on s'instal·larà aquest element. Els paràmetres de mallat són els descrits a la **taula 4.11.** :

Nombre de Polígons		Funció Mida	
Secció	6	Secció	6
Fons	244.046	Fons	0,1
Mallat fi	155.288	Mallat fi	0,1/1,1/2
Túnel	192.550	Túnel	2/1,1/5

Taula 4.11. – Condicions de mallat.

4.6.3. Resultats i comparacions

L'última simulació d'aquest apartat s'ha realitzat segons els paràmetres mostrats en la taula següent:

Simulació 6

SECCIONS	Nº ITERACIONS	TEMPS UTILITZAT
C	3.750	15 hores

Taula 4.12. – Nombre d'iteracions i temps utilitzat per la simulació

El funcionament d'aquest element dissenyat pren importància en quan a l'estudi de pressions. Es veu una depressió en la superfície del extradós que augmenta l'adherència del flux al pas per aquesta secció.

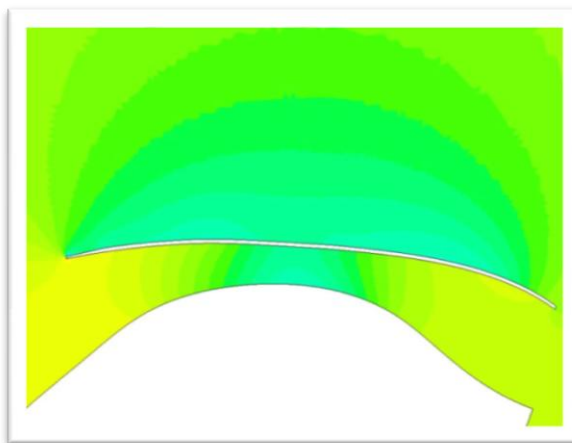


Fig. 4.36. – Distribució de pressions en el deflector lateral.

Segons mostra la **figura 4.37.**, el deixant de la part posterior en el model modificat (part superior del gràfic) a minvat envers el model base, i esdevé una estela amb una lleugera millora.

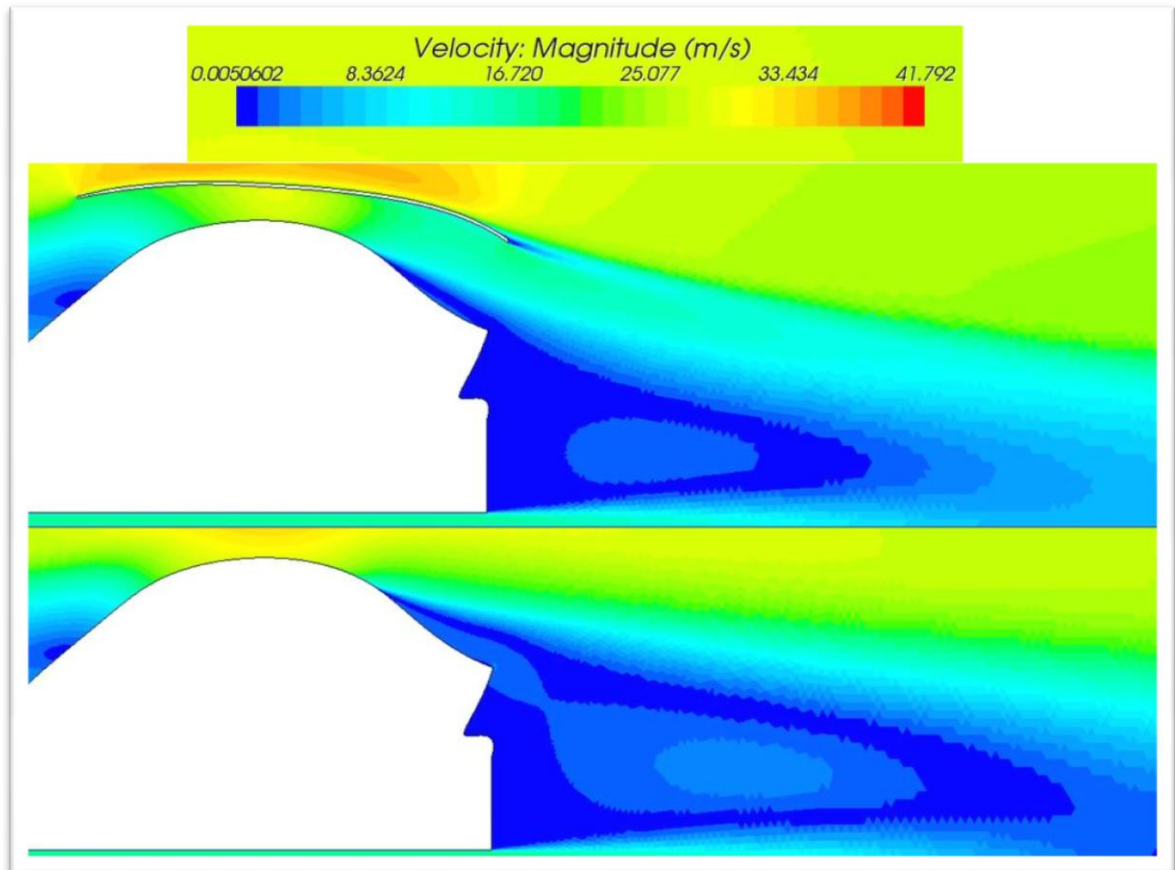


Fig. 4.37. – Comparativa distribució velocitats.

5. SIMULACIÓ TRIDIMENSIONAL DELS MODELS BASE I MODIFICAT

5.1. Introducció

Per la simulació aerodinàmica tridimensional (simulació del conjunt), partirem de la carrosseria inicial i es compararà amb la mateixa carrosseria aplicant conjuntament els elements descrits en els diferents apartats del punt 4.

L'obtenció dels resultats i la posterior comparació es basarà en:

- Càlcul del coeficient aerodinàmic de resistència (C_D).
- Càlcul del coeficient aerodinàmic de sustentació (C_L).
- Diagrama de Velocitats (magnitud i vectors).
- Diagrama de Pressions (magnitud i vectors).
- Diagrama de les línies de flux (en velocitat).

Aquests paràmetres i gràfics ens portaran a conclusions determinant si la modificació concreta realitzada ha millorat o no les qualitats analitzades per separat. En aquest cas el resultat serà un "teòric" reflex de la realitat a diferència de l'estudi bidimensional, però s'ha de remarcar que la qualitat de la malla i l'equip informàtic utilitzat han acotat en part la resolució final de la simulació. Les característiques d'aquest equip són les següents:

- Processador: Pentium IV a 2.8 Ghz.
- Memòria Ram: 3 Gb.
- Tarja Gràfica: Intel 82915G/GV/910GL Express Chipset Family.

La utilització d'un equip informàtic superior pot donar medis per augmentar la resolució i la qualitat del resultat. Per tant aquestes dades seran de referència per futurs estudis si escau.

No s'ha esmentat el càlcul del coeficient lateral donat que s'utilitzarà la funció simetria de la nostra geometria i per tant no obtindriem l'aproximació a 0 (el flux es donarà en la direcció perpendicular a la part frontal del cotxe), que donaria si fos la simulació del cos sencer.

5.2. Definició de les geometries base i modificada

5.2.1. Conformació 3D dels models

En el disseny i conformació dels models en tres dimensions s'ha utilitzat el programari d'ús comercial Rhinoceros 3D®. L'objectiu del disseny d'aquest models és la simplificació d'una geometria que ens permeti treballar amb relativa facilitat per tal de duu a terme les simulacions d'aquest projecte.

Per tal de complir amb la normativa de la Reial Federació Espanyola d'Automobilisme (RFEDA **veure bibliografia**), hem pres com a base varis vehicles comercialitzats de la versió CM speed car (**figura 5.1**). Aquests vehicles responen a diferents constructors i compleixen fidelment la normativa descrita anteriorment.



Fig. 5.1. – Model CM Speed Car del Campionat Nacional de Muntanya. <http://www.pista-i-rallye.com>

En la següent figura mostrem els dos models que simularem en aquest apartat:

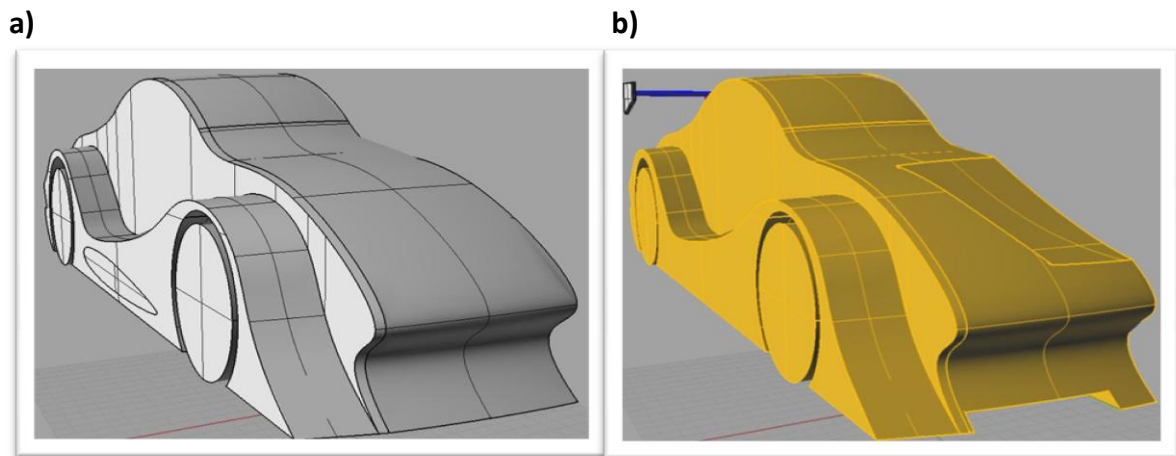


Fig. 5.2 .– a) Geometria model base i b) Geometria model modificat.

Les modificacions realitzades per la comparació han sigut les següents:

- ▶ **Modificació nº 1:** Inclinió de la part posterior del nostre vehicle en 0.5° respecte la llargària total del vehicle.
- ▶ **Modificació nº 2:** Modificació dels baixos del vehicle amb una caixa d'aire frontal i connexió d'un difusor en la part posterior.
- ▶ **Modificació nº 3:** Incorporació d'un aleró amb la secció número 3 descrita en l'apartat 4.5..
- ▶ **Modificació nº 4:** Incorporació del aleró lateral dissenyat en l'apartat 4.6..

5.2.2. Mallat dels volums

La realització del mallat dels volums ha seguit els passos descrits en l'anterior **apartat 4.2.1.**, però la diferència principal és que la malla és projectada omplint el volum generat pels cossos amb tetraedres (**figura 5.3.**). Això indica que a igualtat de polígons la resolució en tres dimensions és inferior a la de dues dimensions.

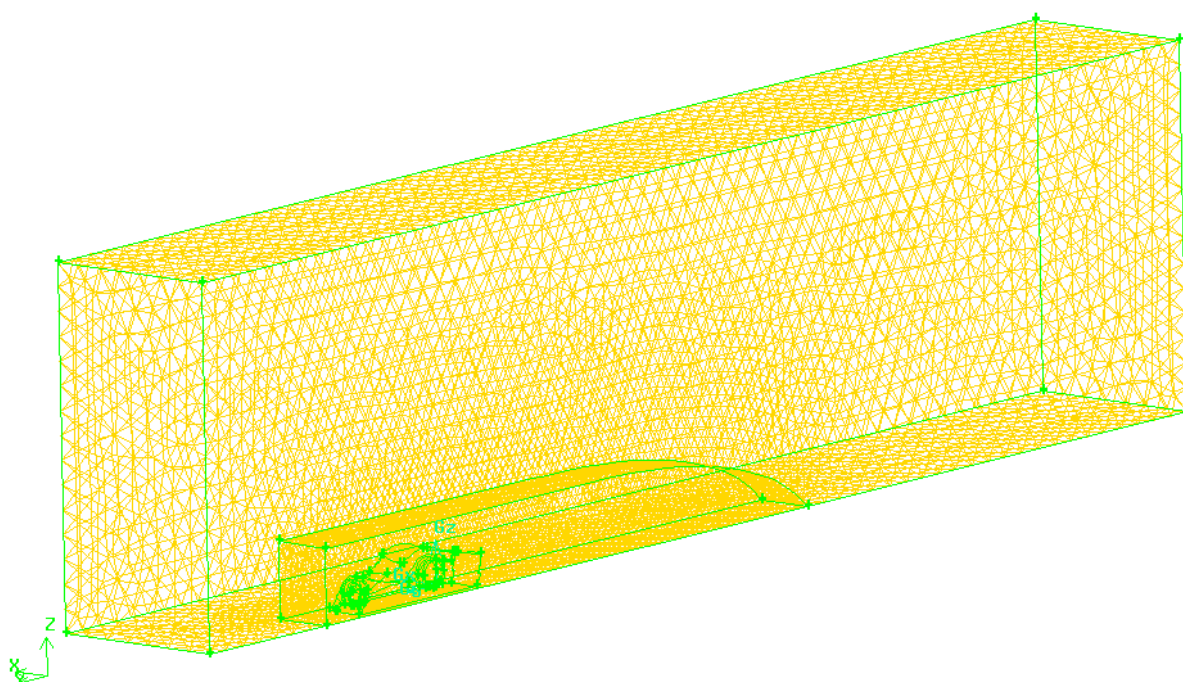


Fig. 5.3. – Mallat amb tetraedres dels cossos principals (Túnel fi i Túnel de vent creat).

En la figura anterior es veu el túnel anomenat “fi” realitzat per donar una malla de més qualitat al voltant de la geometria del vehicle. Així obtindrem uns resultats més acurats en les zones d’anàlisi més importants.

El mallat dels volums ha estat realitzat amb els següents paràmetres descrits en la **taula 5.1.** :

Nombre de Polígons			Funció Mida		
Secció	Base	Modificat	Secció	Base	Modificat
Mallat fi	715.216	792.302	Mallat fi	1,5/1,5/2	1,7/1,4/16
Túnel	215.921	249.052	Túnel	20	30

Taula 5.1. – Definició paràmetres del mallat dels cossos.

En aquest cas a causa de les característiques del equip informàtic utilitzat, s’ha decidit limitar el nombre de polígons a un màxim d’un milió. D’aquesta forma podem realitzar la simulació amb garanties d’èxit pel que fa a l’obtenció de resultats i dades.

5.3. Simulació

El pas següent a l'obtenció del mallat és l'exportació de l'arxiu al programari de simulació de fluids Star CCM+ on definirem les condicions de contorn dels cossos de la següent forma (**Taula 5.2.**):

Nº	Nom Etiqueta	Tipus
1	Carrosseria	Wall
2	Entrada	Velocity Inlet
3	Sortida	Pressure Outlet
4	Sostre	Wall
5	Terra	Wall
6	Dreta	Wall
7	Simetria	Symmetry

Taula 5.2. – Condicions contorn simulacions 3D.

D'aquests paràmetres ens centrarem en modificar i editar el "Sostre" i la "Dreta" indicant que són parets que no són fixes, sinó que es mouen a mesura que avança el vehicle. Aquesta propietat es troba en propietats del Fluid i s'ha de canviar l'estat a "Slip". Per últim comprovarem que la condició "Simetria" estigui activada en la cara número 7, per tal de garantir el correcte funcionament de la simulació donat que treballem amb la meitat del cos per reduir el temps de càlcul.

Donat que el nostre vehicle competeix en curses de muntanya on la velocitat punta no és determinant, s'ha ponderat una mitjana de velocitats mitges al llarg de diferents curses del campionat nacional de muntanya de l'any 2.008 i de diferents cotxes obtenint mitjanes properes als 90 km/h. Les dades de partida per les dues primeres simulacions són les següents:

- Densitat de l'aire: $1,2047 \text{ kg/m}^3$
- Velocitat de l'aire: 90 km/h
- Àrea del frontal màxima del model base: $8.326,07 \text{ cm}^2$ (veure **Annex E**)

- Àrea del frontal màxima del model modificat: $8.281,06 \text{ cm}^2$ (veure **Annex E**)
- Direcció de l'aire : vector perpendicular al frontal del vehicle (segons referència eixos)
- Pressió : $0,0 \text{ Pa}$

El càlcul dels dos coeficients aerodinàmics (sustentació i resistència) es dura a terme amb els paràmetres anteriors variant la direcció del aire.

-Direcció de l'aire en el càlcul del coeficient de resistència (C_d): perpendicular al frontal.

-Direcció de l'aire en el càlcul del coeficient de sustentació (C_L): perpendicular al baix.

Per el segon cas realitzarem la simulació de les dues carrosseries anteriors (base i modificada) tenint en compte la velocitat punta que indicarem com a 170 km/h. La resta de paràmetres restarà igual.

5.4 Resultats i comparacions

Els coeficients obtinguts en les quatre simulacions, on les velocitats són de 90 km/h i 170 km/h respectivament, són els següents (**taula 5.3.**):

A)Velocitat:
90 km/h

	Coeficients	
	C_d	C_x
Base	0,35	0,375
Modificat	0,45	-0,05

B)Velocitat:
170 km/h

	Coeficients	
	C_d	C_x
Base	0,345	0,38
Modificat	0,436	-0,05

Taula 5.3. – Coeficients calculats per les simulacions: A) 90 km/h i B) 170 km/h.

En les taules 5.4. i 5.5. es descriu les dades de les simulacions a 90 km/h i a 170 km/h:

Simulació 7	Velocitat 90 km/h	
SECCIONS	Nº ITERACIONS	TEMPS UTILITZAT
Model Base	4.500	36 hores
Model Modificat	6.300	42 hores

Taula 5.4. – Iteracions i temps utilitzat en les simulacions a 90 km/h.

Simulació 8	Velocitat 170 km/h	
SECCIONS	Nº ITERACIONS	TEMPS UTILITZAT
Model Base	5.510	20 hores
Model Modificat	5.500	20 hores

Taula 5.5. – Iteracions i temps utilitzat en les simulacions a 170 km/h.

Iniciem pel que fa a l'anàlisi de pressions i velocitats al voltant de la carrosseria i dins del túnel, obtenint els següents resultats:

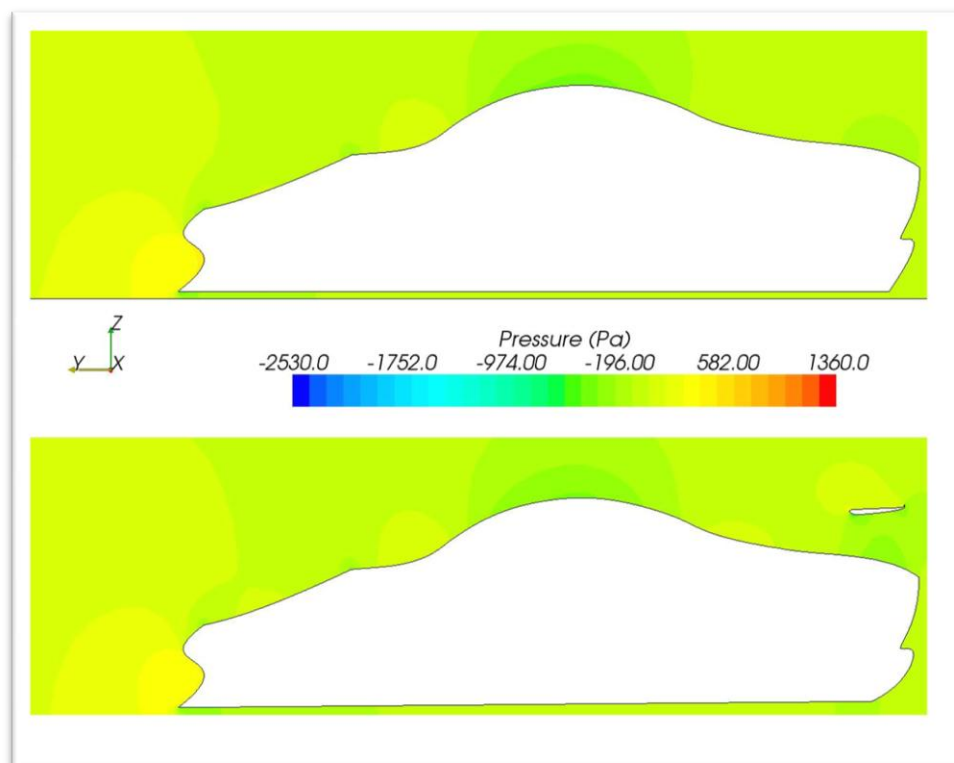


Fig. 5.4. – Comparació pressions a 90 km/h.

Com podem comprovar en les seccions simetria (Secció C **figura 5.4.**), les pressions en els dos models són similars exceptuant la part posterior on l'aleró fa augmentar la pressió al voltant seu per sobre respecte al model que no incorpora aquest element. Un dels punts crítics segueix sent el sostre on es produeix una depressió important que provoca el desprendiment puntual de la capa límit.

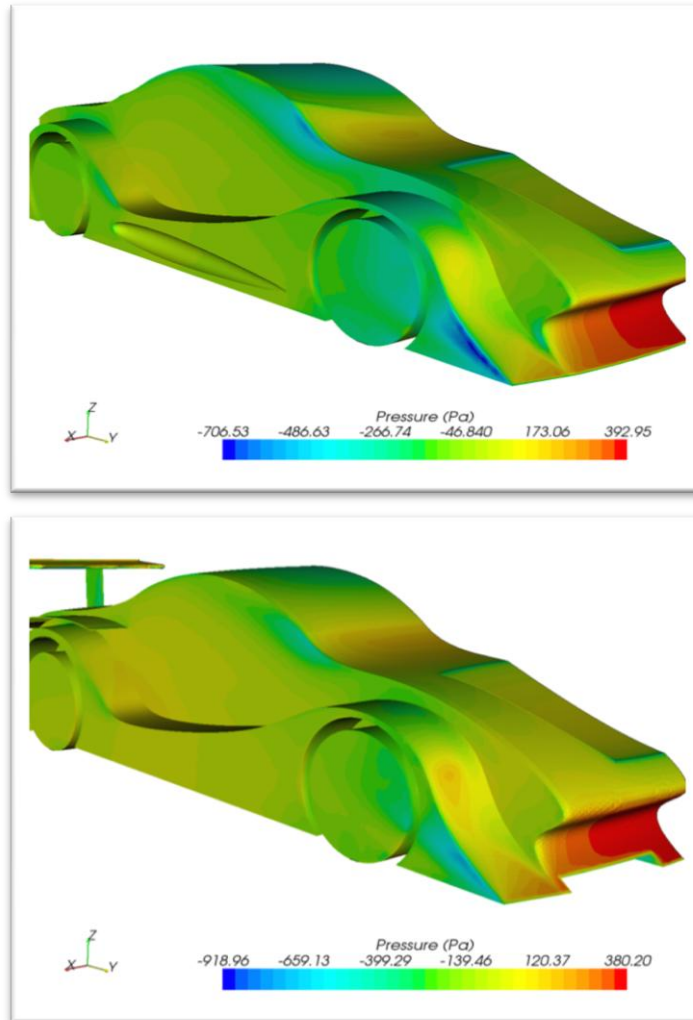


Fig. 5.5. – Comparativa entre el model Base i el model Modificat (gradients de pressió).

Pel que fa a les velocitats en la següent figura veurem com varia la velocitat del flux que passa per la part posterior quan hi ha un apèndix aerodinàmic (en aquest cas un aleró posterior). Pel que fa al funcionament del difusor podem veure com l'estela i el deixant són modificats totalment aconseguint un flux amb velocitat diferent de 0. Amb aquesta modificació estem aconseguint que el vehicle tingui menys resistència al avançament.

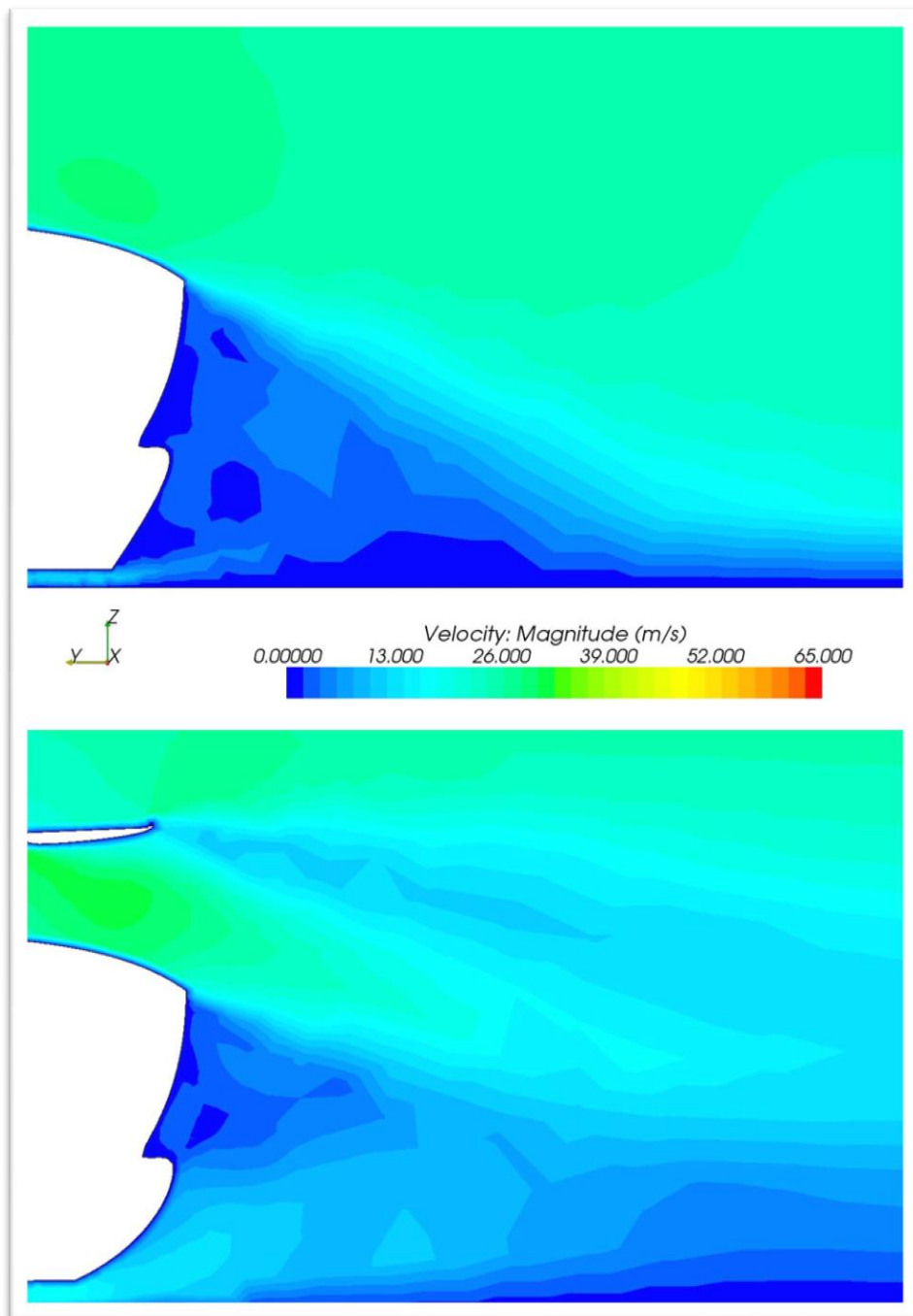


Fig. 5.6. – Esquema comparatiu de les velocitats a la part posterior.

En quan a la simulació a velocitat de 170 km/h, comprovem com augmenten els efectes de la pressió donada una velocitat superior. Aquests efectes afavoreixen el funcionament dels elements aerodinàmics que treballen millor quan més velocitat de flux hi incideixi (**figura. 5.7.**).

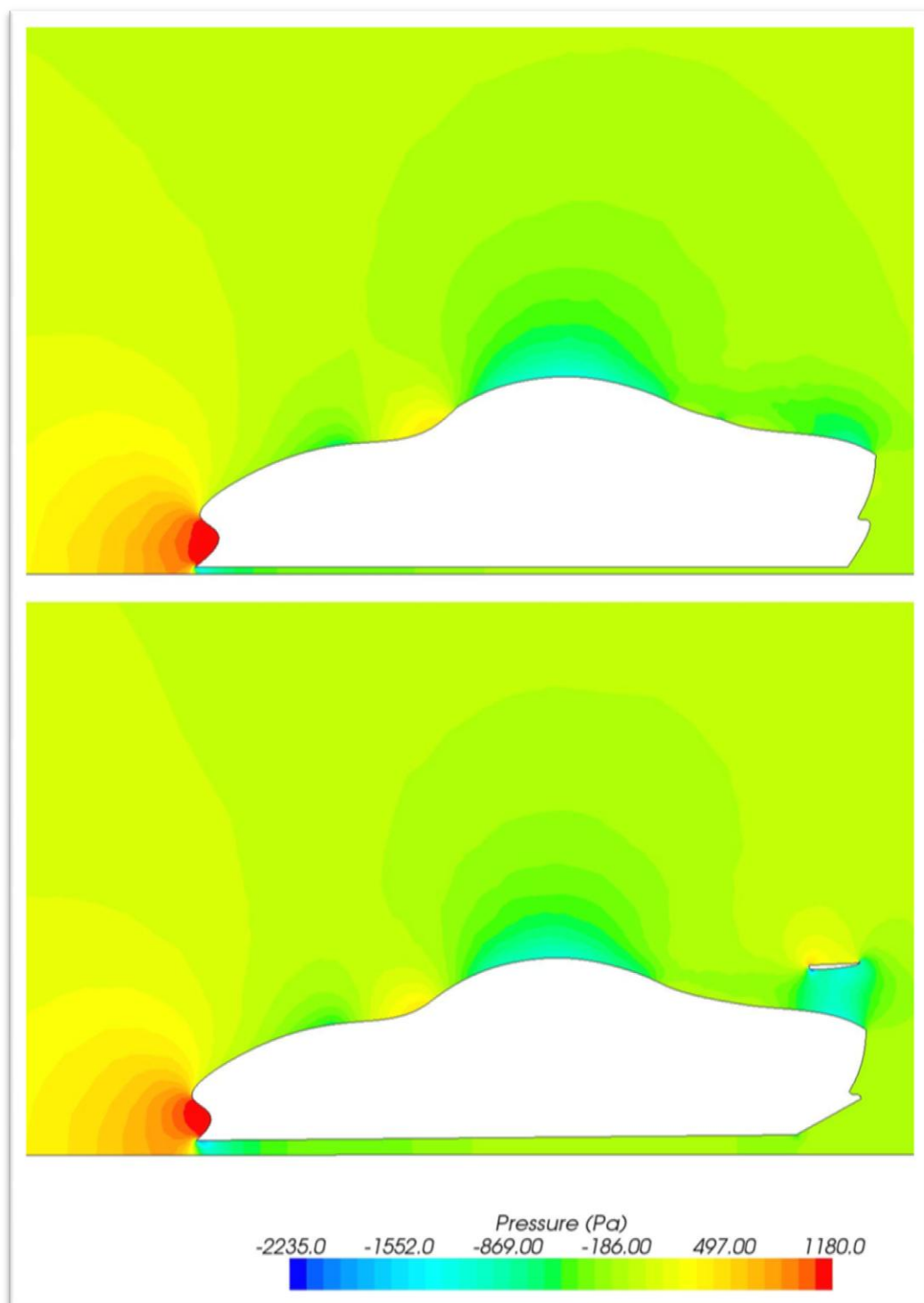


Fig. 5.7. – Comparativa pressions a 170 km/h en la secció B.

Gracies a la modificació de la part davantera s'ha aconseguit que la zona d'estancament en el model modificat sigui reduïda substancialment.

En la zona on s'ha instal·lat l'aleró posterior podem comprovar com es crea una zona de depressió entre la carrosseria i la part inferior de l'aleró. Si comparem a diferents velocitats fent un tall transversal de la secció de la carrosseria en la part posterior (**figura 5.8.**) obtenim com a resultat una visió mes aclaridora del increment d'aquest fenomen.

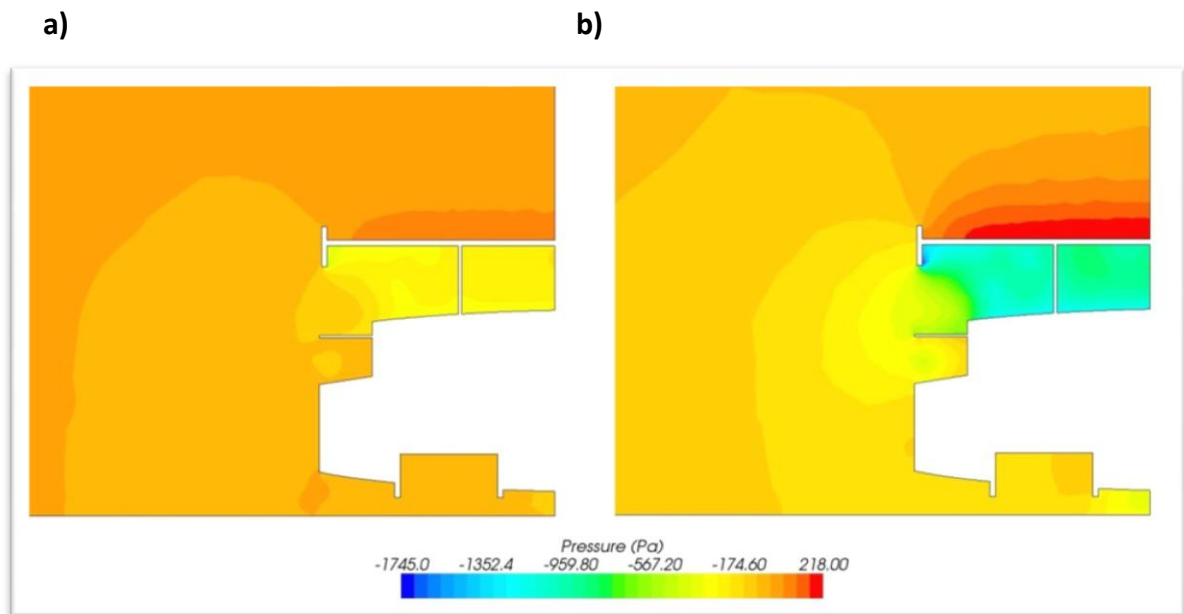


Figura 5.8. – Comparativa de pressions en la zona posterior del model modificat: a) 90 km/h i b) 170 km/h.

Si ens fixem ara en la part superior de la superfície del aleró, es conta amb un augment de pressió a diferència del model que no incorpora aquest element, i aquest fenomen afavoreix l'adherència del vehicle donant pes extra a la part motriu que és realment el que es desitja realitzar amb la incorporació d'aquest perfil.

L'anàlisi de velocitats en els dos models dona una millora respecte als efectes a 90 km/h (que tal i com s'ha assenyalat en la comparativa anterior ja eren correctes) segons mostra la següent figura:

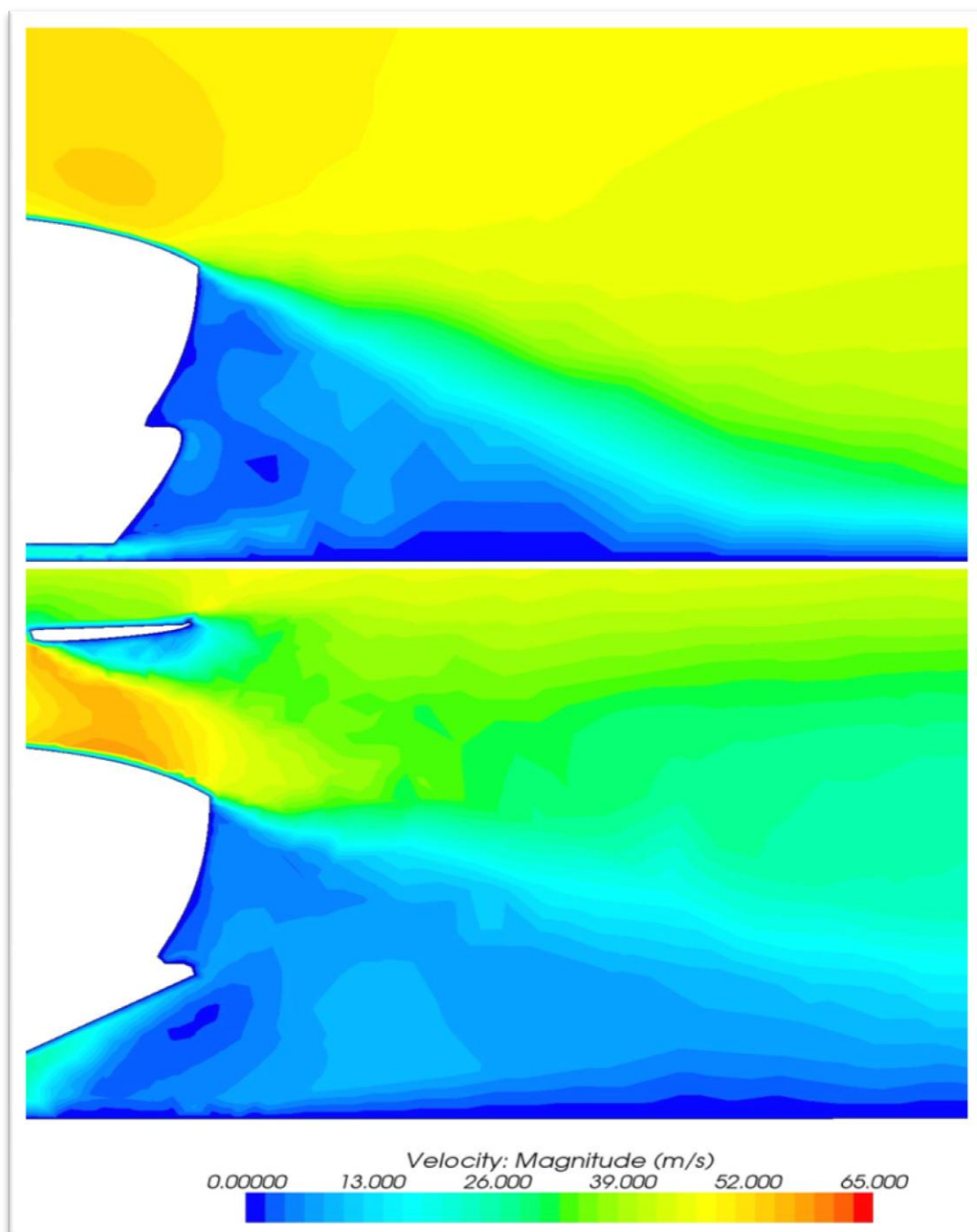


Fig. 5.9. – Comparativa velocitats secció B en model base i modificat a 170 km/h respectivament.

Si visualitzem les línies de corrent de velocitat al voltant de les 4 simulacions anteriors, comprovarem els efectes dels diferents elements aerodinàmics i és aquí on radica la importància de treballar en tres dimensions per comprovar els diferents camins adoptats per l'aire (en aquest cas) i com afecten així les configuracions dels elements aerodinàmics a la dinàmica del vehicle.

Si visualitzem les línies de flux partint del vehicle cap a la sortida del túnel veurem els següents gràfics:

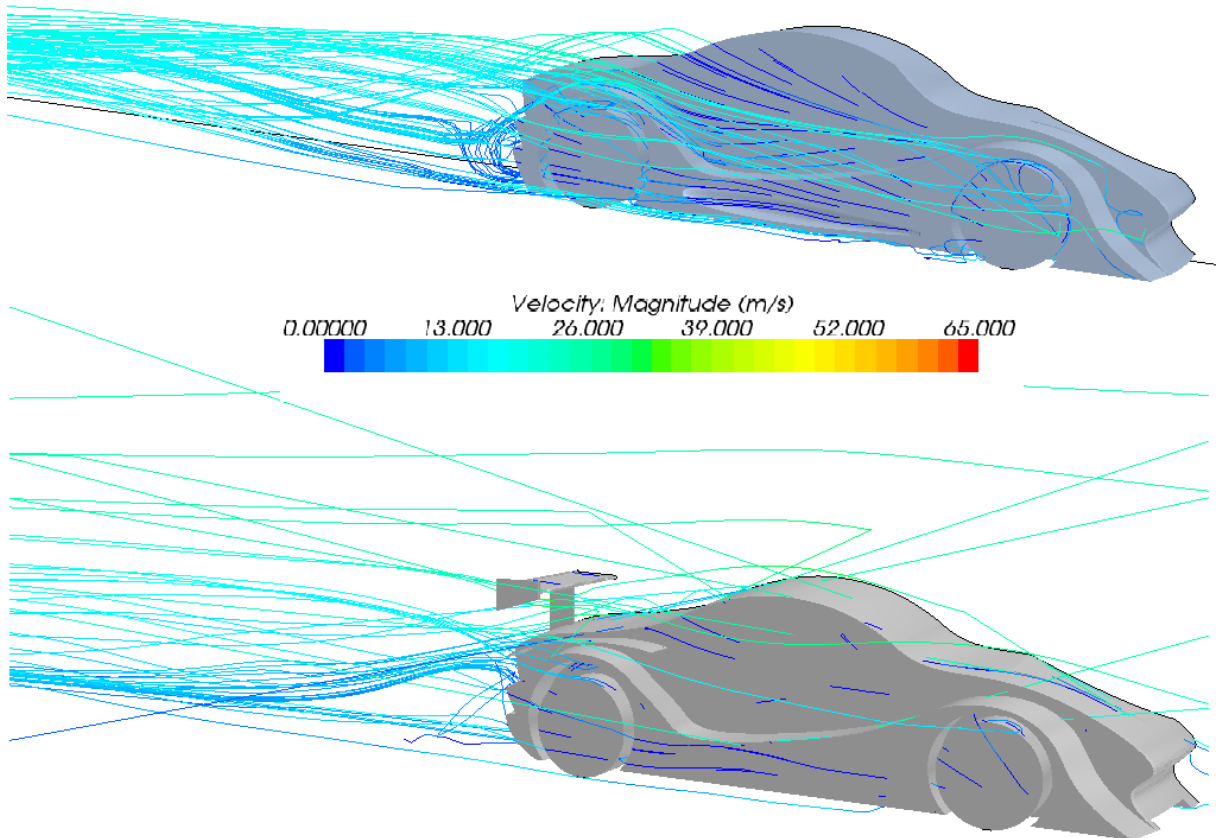


Fig. 5.10. – Comparativa línies de flux a 90 km/h del model base i modificat.

Les línies de flux que provoquen els vòrtexs en la zona del deixant (**figura 5.10. superior**) queden minimitzades degut al efecte de la caixa d'aire central i el difusor posterior (**figura 5.10. inferior**).

Per les simulacions a 170 km/h incorporem la mateixa escala comparativa que a la figura anterior i tindrem dues línies de comparació:

- Entre models base i models modificats a la mateixa velocitat.
- Entre models base a velocitats diferents i models modificats a velocitats diferents.

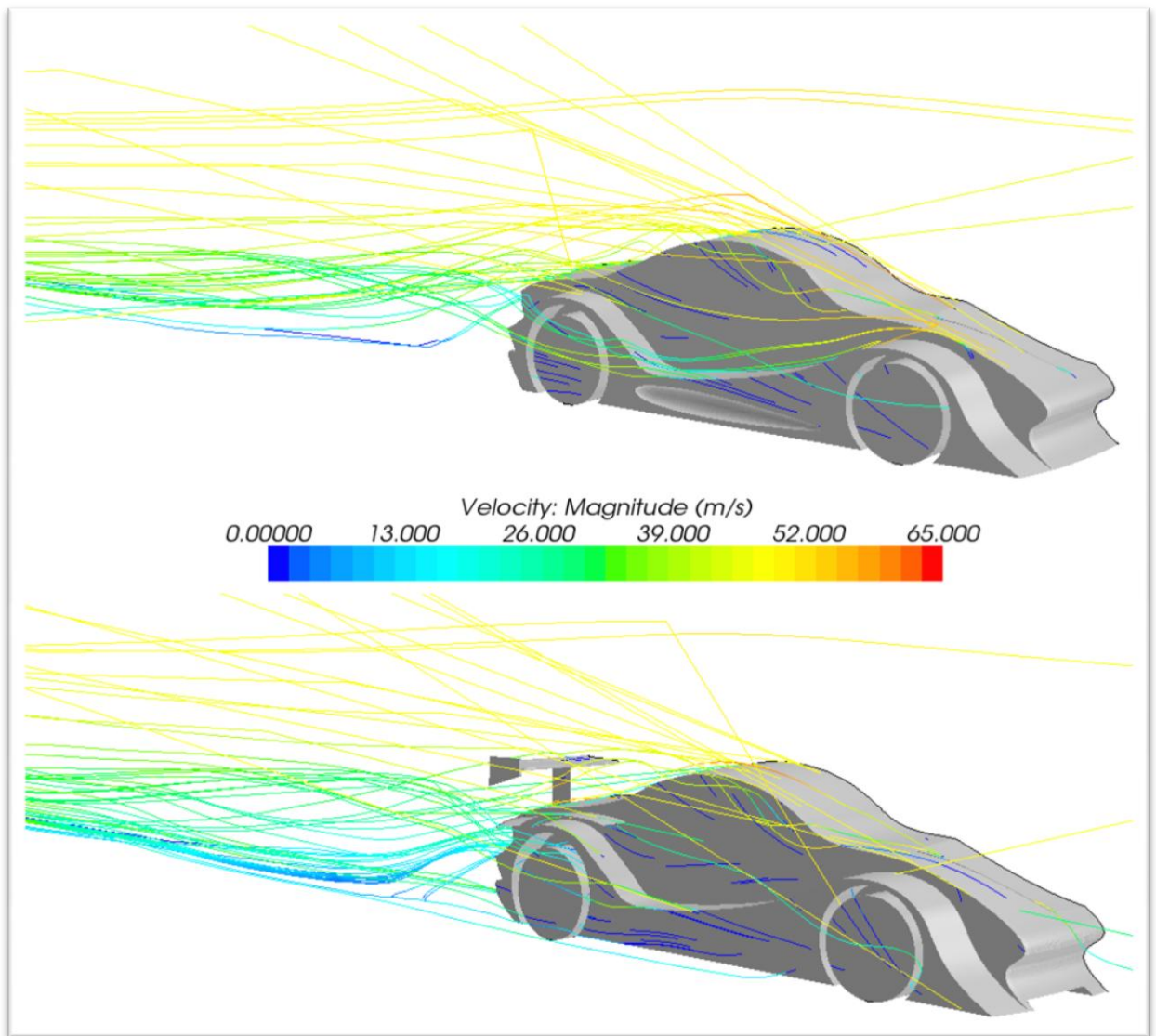


Fig. 5.11. – Comparativa línies de flux a 170 km/h del model base i modificat.

En la **figura 5.11.** trobem les diferències més significatives en les zones on son instal·lats els elements aerodinàmics com l'aleró i el deflector lateral dissenyat en el present projecte. Si els comparem ara amb la **figura 5.10.** deduïm que a l' augmentar la velocitat, i en conseqüència la càrrega aerodinàmica, la dinàmica del vehicle és més estable i aprofita en un nivell superior els elements aerodinàmics.

En la part posterior (comparativa de la **figura 5.13.**) es comprova com les línies de flux s'aconsegueixen dirigir a través de la caixa d'aire i difusor i portar a velocitat diferent de 0 a la part posterior tal i com s'indicava en línies anteriors d'aquest apartat.

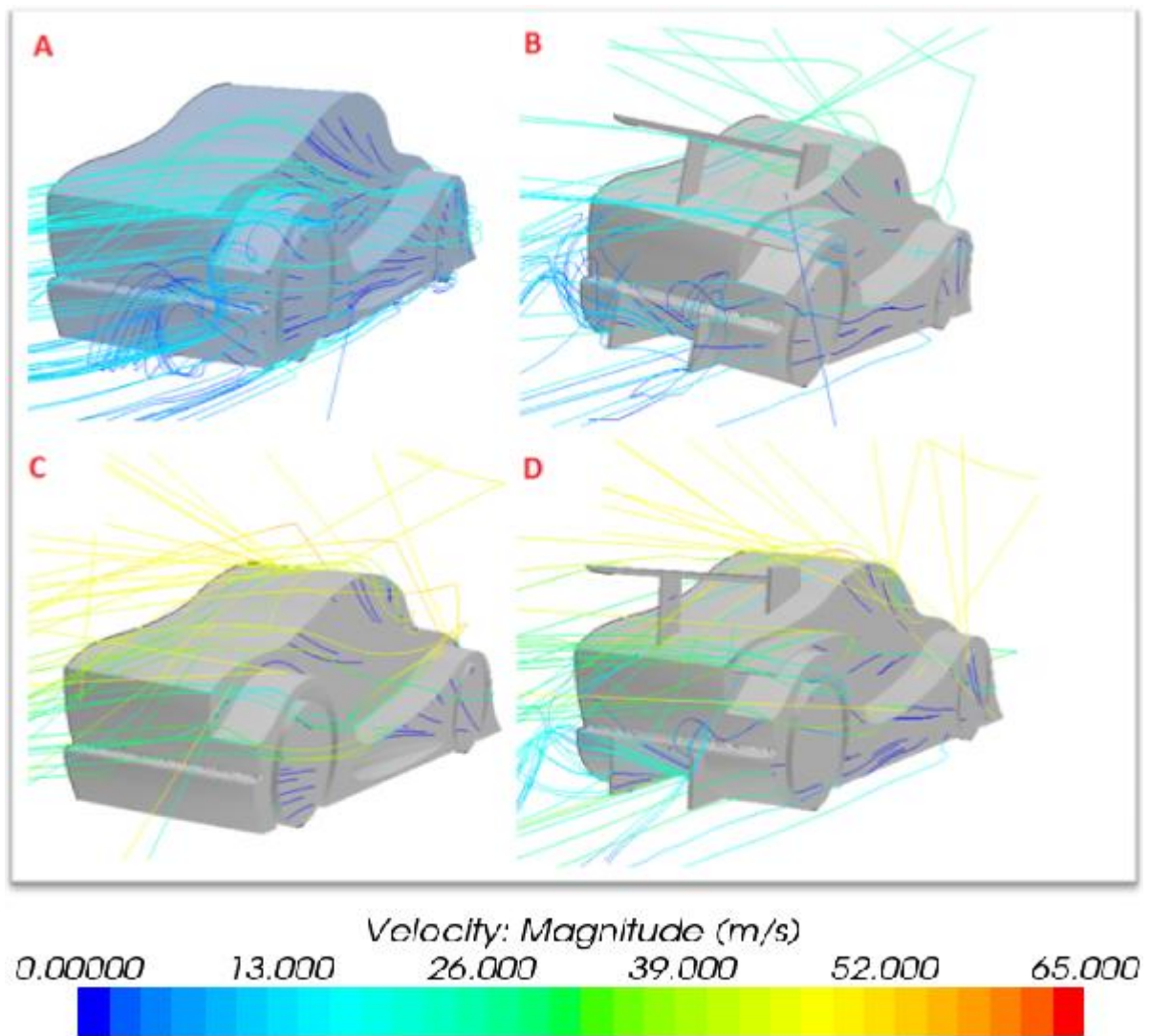


Fig. 5.13. – Comparativa vista posterior línies flux velocitat: a) model base 90 km/h, b) model modificat 90 km/h, c) model base 170 km/h i d) model modificat 170 km/h.

6. RESUM DEL PRESSUPOST

El resum del pressupost del present projecte tenint en compte les despeses associades a la recerca i el desenvolupament, els costos d'amortització i els costos de redactat i impressió incloent l' impost de valor afegit I.V.A. és de onze mil vuit euros amb quaranta cèntims d'euro..... 11.008,40 €

7. CONCLUSIONS

Un cop donats els resultats de les simulacions en dues dimensions i les simulacions dels models tridimensionals (base i modificat) es poden extreure les següents conclusions:

- ▶ Cal tenir en compte que els resultats obtinguts son valors absoluts que en la majoria de simulacions numèriques realitzades amb CFD's s'ajusten correctament a la realitat, i donen tendències del comportament en el disseny abans d'arribar a la construcció del model.
- ▶ El programari de mallat Gambit (Fluent ©) tot i ser un programari d'ús senzill i estable, es podria millorar la part de modificació i edició de volums donat que les geometries son complexes i les eines de que es disposa son bastant bàsiques i no faciliten l'execució del present projecte.
- ▶ En l'estudi en dues dimensions de la configuració per inclinació de la carrosseria s'ha aconseguit millorar el comportament aerodinàmic i reduir la diferencia de pressió entra la zona d'estancament (part davantera) i la zona on es produeix el deixant (localitzat a la part posterior).
- ▶ La modificació del faldó davanter i la inserció d'una caixa d'aire amb un difusor posterior ha millorat notablement els problemes de velocitats amb gradient al voltant de 0 en la part posterior i per tant es dona com a correcta aquesta modificació.
- ▶ Els alerons ,per norma general, comporten una sustentació extra que fa augmentar l'estabilitat. De cares a futures simulacions cal revisar els dissenys i els angles d'inclinació per optimitzar el comportament en cada vehicle en particular i per cada cursa o esdeveniment. El perfil Gurney és un element que no ha aportat millora al nostre vehicle donat que disputa curses de muntanya on la velocitat punta i la càrrega aerodinàmica no son determinants però en la categoria de circuit és un element a tenir en compte.
- ▶ El disseny del component aleró lateral i la seva instal·lació pot ajudar a garantir més sustentació en els pas per corba del vehicle però caldria un nou disseny més acurat i una orientació que fos contraria a la que s'ha dissenyat.

- ▶ Les simulacions del model base i modificat han determinat que el coeficient aerodinàmic de resistència ha incrementat en un 28% cosa indesitjable quan parlem de vehicles on la resistència aerodinàmica es important (vehicle de circuit) però no tan contractual (en vehicles per curses de muntanya). Respecte el coeficient aerodinàmic de sustentació ha patit un decrement important i s'ha aconseguit petits valors de sustentació negativa que donen un comportament amb una millora substancial, donat que la pressió exercida per la superfície del aleró augmenta l'adherència del tren posterior contra la superfície de desplaçament.
- ▶ En base a aquest projecte en futurs estudis de simulació numèrica, les tasques posteriors que s'haurien de desenvolupar, són les de optimització dels components i millora de la geometria modificada per tal d'aconseguir un coeficient aerodinàmic de resistència inferior al obtingut.

En quan a la tasca realitzada a títol personal:

- ▶ La necessitat de crear un model i no simular sobre una geometria real o comercial ha provocat una important pèrdua de temps donat que l'objecte d'aquest projecte és la simulació i tractament dels resultats i dades obtingudes.
- ▶ Es convenient entendre que els errors donats en les simulacions (quan es poden contrastar amb el comportament real) son presents, i cal ser crítics i cercar d' on provenen per donar un correcte tractament a les dades.
- ▶ Gracies a aquest projecte s'ha pogut aprofundir en la simulació numèrica amb programari CFD i s'han pogut entendre fenòmens que succeeixen en la dinàmica d'un vehicle.

Signatura:

Albert Sánchez Alarcón
Girona, 14 d' Abril del 2009

AGRAÏMENTS

És necessari fer menció personal a les persones que han recolzat la realització d'aquest projecte i en major o menor mesura han ajudat a la seva conformació.

- Lino Montoro Moreno, per la seva excel·lent tasca de direcció i recolzament durant tot el procés de mallat i simulació.
- Toni Pujol Sagaró, pel recolzament tècnic i explicacions rebudes.
- Pere Viladomat Bruguera, per l'ajuda rebuda durant les tasques d'anàlisi de dades i les estones compartides realitzant els projectes paral·lelament.
- Laura López Formentí, per la tasca de supervisió i correcció del present projecte i pel recolzament moral durant la realització del mateix.

8. RELACIÓ DE DOCUMENTS

El present Projecte consta dels següents Documents:

Document 1. Memòria i annexos.

Annex A. Validació del software: Cos Ahmed.

Annex B. Aerodinàmica d'un Formula 1: el alerons.

Annex C. Flap Gurney – Nolder.

Annex D. Iniciació a Gambit.

Document 2. Pressupost.

9. BIBLIOGRAFIA

Llibres:

- Aparicio F., Vera C., Diaz, L. Teoria de los vehículos automóviles. Escola Tècnica Superior d'Enginyers Industrials. Universitat Politècnica de Madrid. Any 2001.
- Frank M. White. *Mecánica de fluidos*. L/S 532 WHI.
- J. D. Anderson. Fundamentals of aerodynamics. Editorial Mcgraw-hill. Any 1991.
- Kim M-H. Int. J. Vehicle Design, 34, 3, 203-217 Any 2004
- Mc Beath, S. Aerodinámica del automóvil. Barcelona, CEAC técnico automóvil, any 2000
- Flores Narcís, Estudi de l'eficiència aerodinàmica de vehicles pesants de transport de passatgers. Universitat de Girona ,Maig 2008.
- Staniforth, A. Race and rally car sourcebook: the guide to building or modifying a competition car. Any 1989
- Saiz Vela, Víctor. Estudi de simulació aerodinàmica del Rodaster FS1. Universitat Politècnica de Catalunya. Any 2005.
- Hinterberger M., García-Villalba M. Rodi W. The aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses and Trains. (Ed. R. Mc. Callen, F. Browand, J. Ross). Springer-Verlag. Any 2004.

Adreces web:

- <http://www.rfeda.es>, Primera data consulta: 8/9/2008. Web de la Real Federació Espanyola d'Automobilisme (RFEDA).
- www.cfd-online.com, Primera data consulta: 8/9/2008. Continguts basats en CFD's.
- <http://www.ansys.com>, Primera data consulta: 12/9/2008. Web relacionada amb elements finits.
- <http://venus.ceride.gov.ar/cimec>, Primera data consulta: 15/9/2008. Web relacionada amb la simulació numèrica del cos d'Ahmed.

- http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CCM_plus/, Primera data consulta: 3/10/2008. Continguts basats en el software de simulació numèrica Star CCM+ ©.
- <http://www.es.rhino3d.com.com/index.htm>, Primera data consulta: 3/10/2008. Web relacionada amb el programa Rhinoceros©.
- <http://ca.wikipedia.org/wiki/Aerodin%C3%A0mica>, Primera data consulta: 5/10/2008. Article relacionat amb la aerodinàmica.
- <http://www.windpower.org/en/stat/unitsw.htm#anchor138877>, Primera data consulta: 24/10/2008. Estudi de la sustentació aerodinàmica, taules i valors referencials.
- www.manualvuelo.com/PBV/PBV18.htm , Primera data consulta: 25/10/2008. Referència als tipus de regim d'un fluid i a la capa límit.
- <http://tecnicaf1.com/2009/01/flap-gurney-nolder-o-como-aumentar-la-down-force/>, Primera data consulta: 15/11/2008. Informació Flap Gurney.
- <http://www.f1aldia.com/160/aerodinamica-de-un-formula-1-ii-los-alerones.html>, Primera data consulta: 3/3/2009. Aerodinàmica d'un F1: els alerons.
- <http://www.thef1.com/destacados/tecnica/problemas-de-una-simulacion-cfd> , Primera data consulta: 3/3/2009. Problemes alhora de simular en CFD's.
- <http://fluidos.eia.edu.co/hidraulica/articulos/conceptosbasicosmfluidos/clasificaci%20ondelflujo/clasificaci%20ondelflujo.html> , Primera data de consulta: 6/3/2009. Tipus de flux i règims.
- <http://www.marccosta.es/> , Primera data de consulta: 15/3/2009. Blog personal del Sr. Marc Costa dedicat en part a la aerodinàmica i la F1.
- http://www.encarreraweb.com.ar/datos_tecnicos/AERODINAMICA.pdf , Primera data de consulta: 15/3/2009.

10. GLOSSARI.

Cd:	Coeficient aerodinàmic de resistència a l'avanç.
Cl:	Coeficient aerodinàmic de sustentació.
Deixant:	Zona on es produeix gradient 0 en velocitats.
Down Force:	En anglès força cap avall o força que enganxa el vehicle generada per elements aerodinàmics o per la pròpia configuració de la carrosseria.
Drag:	En dinàmica de fluids es refereix a les forces que s'oposen al moviment relatiu d'un objecte immers en un fluid (líquid o gasos).
Extradós:	Part superior del ala d'un avió.
Flap Gurney:	Extensió de reduïdes dimensions col·locat normalment en apèndix aerodinàmics tals com alerons o faldons del vehicle.
Intradós:	Part inferior del ala d'un avió.
Motion Stationary:	En Anglès moviment del conjunt sense acceleració.
Nolder:	Fa referència al perfil Gurney. Veure Flap Gurney.
Pressure Outlet:	En anglès pressió de sortida.
Segregate Flow:	En anglès flux segregat.
Slip:	Característica que designa que una paret o component es mouen amb el fluid.
Velocity Inlet:	En anglès velocitat d'entrada.
Winglet:	Són un dispositiu aerodinàmic utilitzat en els extrems de les ales dels avions. Bàsicament busquen disminuir la resistència drag produïda per la diferència de pressions entre la superfície superior i inferior de l'ala.
Zona d'estancament:	Zona on el pas del flux queda frenat per un objecte i augmenta la pressió.

ANNEX A. VALIDACIÓ DEL SOFTWARE DE SIMULACIÓ: COS D'AHMED.

A.1 Introducció.

Pel desenvolupament aerodinàmic de vehicles fa falta conèixer el comportament dinàmic del fluid amb l'objectiu de trobar millores en el flux per així poder reduir els factors contraproductius. Un factor clau en l'optimització aerodinàmica és la reducció en el consum que pot tenir el model a dissenyar.

Tots aquests aspectes es poden estudiar de forma experimental mitjançant túnels de vent real i de forma virtual a partir de la simulació numèrica.

El mètode numèric és un sistema més ràpid i pràctic ja que és completament virtual, però cal dir que experimentalment és molt més semblant a la realitat i per tant el més precís en quan a l'obtenció de dades.

Algunes associacions com ERCOFTAC (European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion) i Mova (Models for Vehicle Aerodynamics), realitzen estudis sobre l'aerodinàmica de cossos tipus a través d'estudis experimentals i també amb mètodes numèrics. Gràcies a aquestes associacions podem disposar d'un gran conjunt de dades que ens permeten validar nous programes de simulació numèrica i, així, realitzar nous avenços per millorar l'eficàcia d'aquests programes.

Els socis del consorci MOVA (Universitat de Manchester, Électricité de França, i el grup PSA Peugeot Citroën) es van posar d'acord en estudiar la forma d'un vehicle tipus anomenat cos d'Ahmed, ja que l'estudi experimental d'un vehicle real és molt complex.

Així, aquí tractem la simulació del cos d'Ahmed, dissenyat per Ahmed l'any 1982 i fer la comprovació de que les seves dades experimentals s'ajustin amb les simulades amb el programari que nosaltres utilitzem. El flux al voltant del cos d'Ahmed és semblant als dels

vehicles, permetent obtenir dades molt interessants. Una d'aquestes dades són els coeficients aerodinàmics. A partir d'aquí nosaltres hem desenvolupat l'estudi del cos d'Ahmed a través de CFD (Computational Fluid Dynamics) per comprovar que el programa que utilitzem reproduïx de forma acceptable el comportament real. Concretament compararem els coeficients aerodinàmics (C_D). En aquest apartat explicarem l'estudi numèric realitzat sobre el cos d'Ahmed.

A.2 Programa STAR CCM+.

A.2.1 Introducció al software.

La simulació numèrica com bé diu el nom, fa servir els mètodes numèrics per poder resoldre les equacions de Navier-Stokes que governen la dinàmica del fluid. El programa STAR CCM+ aplica el mètode dels volums finits per resoldre el sistema d'equacions diferencials en derivades parcials que defineixen el moviment dels fluids i, així poder trobar una solució en l'espai i el temps.

Això se'n diu modelat d'elements discrets. La discretització es una divisió del volum de càlcul en petits volums geomètrics anomenats elements, el conjunt d'aquests elements s'anomena malla.

El mallat condiciona els resultats obtinguts a partir del CFD, per tant es requereix una malla de qualitat abans de dur a terme qualsevol simulació. La validesa de la malla depèn de varis paràmetres com la relació de grandària o mida, angles dels vèrtexs i disposició dels elements (capes de prismes, malla hexaèdrica, etc). A la figura A.1. podem veure diferents elements possibles.

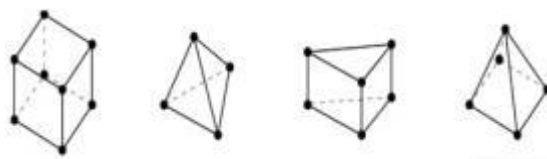


Figura A.1. Diferents elements de malla en volum (hexaedres, tetraedres, prismes i piràmides).

La seva projecció en la superfície són quadrilàters, triangles, triangles i quadrilàters, respectivament. Aquestes malles es generen amb programes denominats malladors que transformen la nostra geometria de partida en una retícula de nodes en l'espai, en els que es resolen les equacions de mecànica de fluids. Mallar es un procediment complex en que s'han de valorar molts aspectes com sensibilitat de malla, qualitat, geometria, etc.

En el nostre cas el mallat no té en general una forma senzilla degut a alguns factors com és per exemple la complexitat de la superfície del vehicle i que s'ha d'adaptar correctament en aquelles regions on el flux presenta irregularitats més grans és a dir menys uniformes. Per aquest motiu, la malla s'ha de posar en funció dels resultats que es vol obtenir. Cal dir que molts detalls necessaris per analitzar el flux amb precisió al voltant d'un vehicle real, junt amb algunes pertorbacions o canvis de forma poden afectar la mesura del flux. Per aquest motiu les simulacions del flux es fa amb models que han petit alguna simplificació pel que respecte a la seva forma original.

Per a la resolució dels estudis utilitzem tres programes. Primer es parteix de la geometria a utilitzar, aquesta es pot realitzar amb programes de disseny 3D, en el vigent projecte s'ha utilitzat el Rhinoceros. Aquest es un modelador que permet una fàcil creació i modificació d'objectes en tres dimensions molt útil per al nostre estudi. Un cop es té la geometria a utilitzar es carrega en l' ICEM, segon programa utilitzat, on s'aplicarà un tipus de mallat per determinar la precisió en què farem la simulació com també les condicions de contorn.

A partir d'aquí ja podem utilitzar l'últim programa, l'STAR CCM+, on es pot exportar la geometria mallada. Aquí es determinaran les condicions del model que, una vegada aplicat el mètode dels volums finits, ens permetran treure solucions i, d'aquí, conclusions. A la figura A.2. veiem millor un esquema de la metodologia que hem seguit.

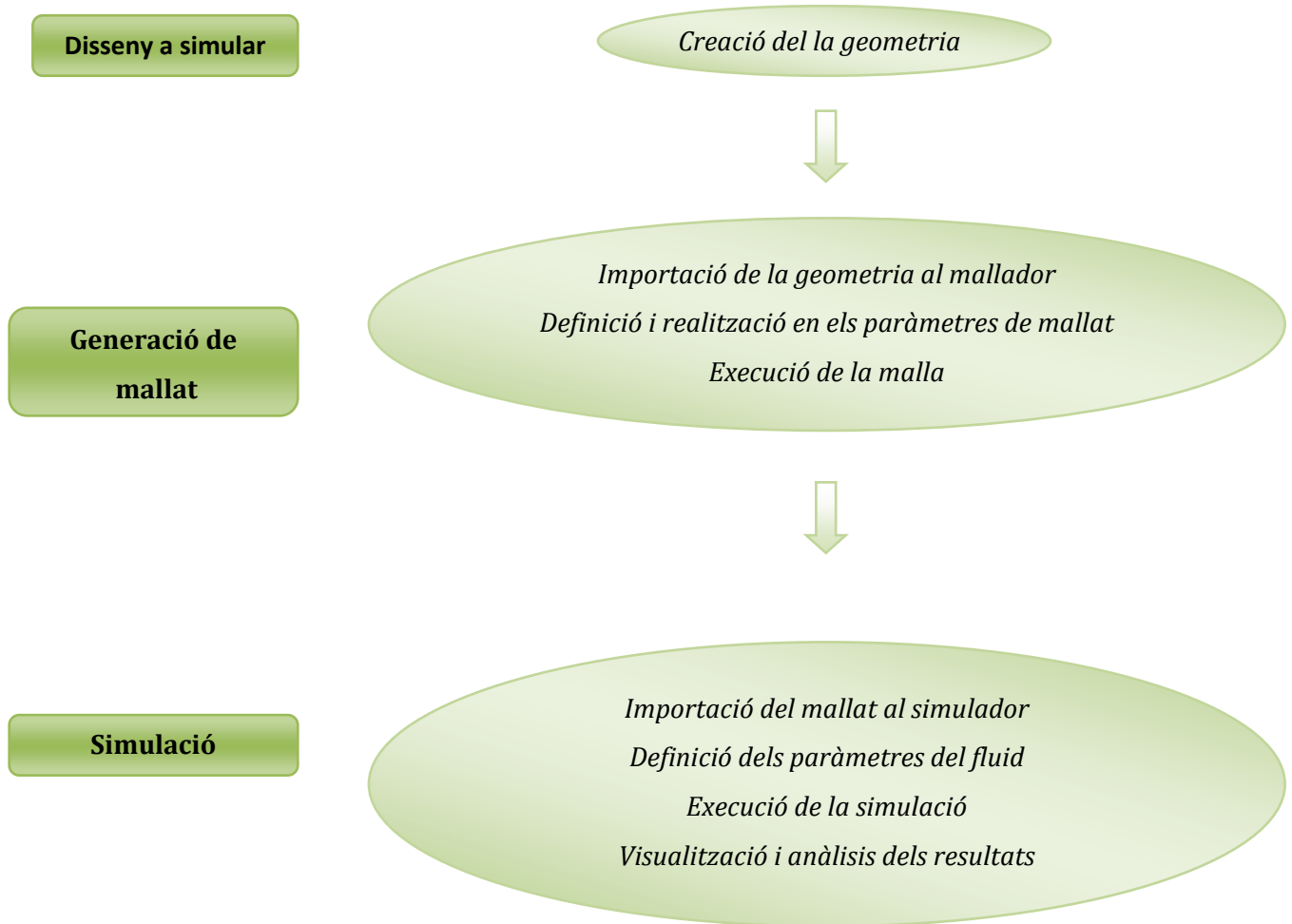


Figura A.2. Esquema general dels passos a seguir.

A.2.2 Estudi del Cos d'Ahmed.

A la figura 3 es poden veure les mides del cos d'Ahmed. A la figura A.3. V representa la direcció en què anirà la velocitat de l'aire.

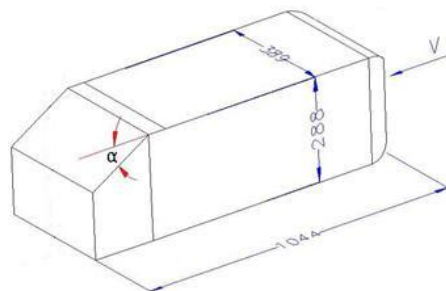


Figura A.3. Mides generals cos d'Ahmed (mm). L'aresta inclinada és de 222 mm per qualsevol angle alpha.

A partir d'estudis experimentals previs (Ahmed et al., 1982), disposem de valors del C_D en funció de l'angle d'inclinació de la part posterior del vehicle (veure taula A.1.). La particularitat més important de l'estudi experimental portat a terme per Ahmed és la dependència del coeficient d'arrossegament C_D en funció de l'angle de caiguda de la part posterior. D'aquesta forma, el comportament del flux a l'estela del vehicle, que és majoritàriament responsable del valor del coeficient d'arrossegament, es pot dividir en dos patrons diferents. Un patró de flux bidimensional per angles $0^\circ < \alpha < 12^\circ$ i $\alpha > 30^\circ$ on la separació del flux es dona quan s'arriba a la part posterior del vehicle (i no en la superfície inclinada). Això comporta que, en aquest rang d'angles, el coeficient d'arrossegament disminueixi a mesura que augmenta l'angle d'inclinació (veieu la taula A.1.). D'altra banda, s'observa un patró de flux tridimensional més complex per angles $12^\circ < \alpha < 30^\circ$ on la separació del flux ja es dona a l'inici de la inclinació de la part superior, la intensitat del qual s'amplifica a mesura que augmenta l'angle. És en aquest rang d'angles on el coeficient d'arrossegament augmenta a mesura que augmenta l'angle (veieu la taula A.1.).

Dades experimentals:

Angle d'inclinació	Cd experimental
0°	0,25
10°	0,229
15°	0,233
20°	0,251
25°	0,2845
30°	0,378 / 0,260
35°	0,257
40°	0,255

Taula A.1. Dades experimentals.

El nostre estudi numèric realitzat amb el cos d'Ahmed s'ha dut a terme amb dos tipus de malles diferents, una la considerem malla "gruixuda", que no és de tanta qualitat, i l'altra malla "fina", on aquesta té molta més precisió i per tant, s'espera que s'ajusti més al valor experimental. Així realitzant les simulacions veurem el patró de la solució quan utilitzem la malla "gruixuda" i la malla "fina".

A continuació expliquem les dades aplicades en l'execució de mallat i en la simulació numèrica.

A.2.3 Generació del mallat.

Abans de procedir amb qualsevol simulació numèrica hem de construir una malla adequada. La construcció de la malla no està relacionada directament amb l'aerodinàmica però si que té una influència indirecta amb els resultats de la simulació numèrica del flux. Per això, cal fer-la bé per obtenir una solució acceptable. Per tant, la modelització de la geometria, el domini "túnel virtual" i el mallat per al càlcul son passos molt importants en qualsevol procés de simulació. A continuació comentarem els paràmetres del mallat utilitzats en l'execució.

La única diferència entre els cossos mallats són alguns paràmetres, com per exemple, el nombre d'elements resultants de la malla, ja que cada cas disposa d'un angle de caiguda de la superfície posterior diferent. A continuació mostrarem les dades emprades per al desenvolupament de la simulació.

Caractéristiques géométriques externes

Seguidament mostrem, a la taula A.2., les dades del domini computacional, una mena de "túnel" virtual, com observem a la figura A.4., definit en funció de la longitud L (llargada aproximada d'1 metre) del cos d'Ahmed. La superfície d'entrada està a $2L$ i la sortida a $5L$, d'acord amb Davidson i Krajnovic (1990).

Cal tenir en compte que a diferència de la geometria, aquest túnel de vent es construeix dins del programa ICEM, ja que no és res més que els límits de mallat que s'aplica al model.

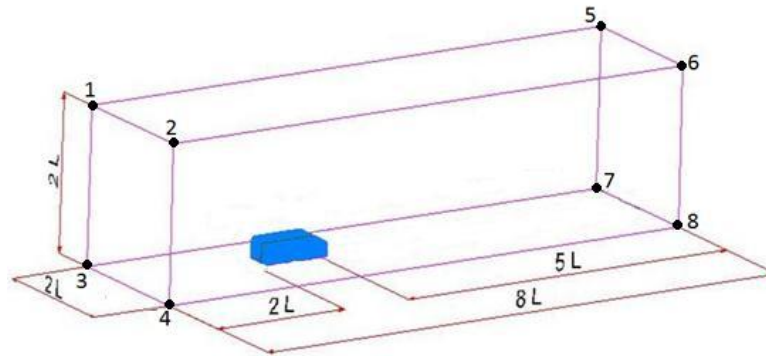


Figura A.4. Paràmetres del domini computacional.

- Coordenades del domini computacional (metres).

Punts	X	Y	Z
1	-3	1	1.5
2	-3	-1	1.5
3	-3	1	0
4	-3	-1	0
5	5	1	1.5
6	5	-1	1.5
7	5	1	0
8	5	-1	0

Taula A.2. Coordenades del domini computacional del cos d'Ahmed. Noteu que en comptes de $2L$, escollim la coordenada Z com $5H$ (on H és l'altura del cos) d'acord amb Hinterberger et al. (2004).

- Noms de les superfícies:

➤ Domini computacional:

- Punts 1,2,3,4 Frontal.
- Punts 5,6,7,8, Darrere.
- Punts 1,3,5,7 Lateral Esquerra.
- Punts 2,4,6,8 Lateral Dret.
- Punts 1,2,5,6, Tapa Superior.
- Punts 3,4,7,8, Base.

➤ Cos d'Ahmed:

- Frontal
- Darrere
- Lateral Esquerra
- Lateral Dret
- Tapa superior
- Base

- Paràmetres de densitat:

Dins el domini hem realitzat una zona més precisa al voltant del model. Aquesta s'anomena "densitat" rebent un valor més alt de precisió per als elements (i.e., mida de malla més petita). A la figura A.5. i a la taula A.3. es pot veure el dimensionament que rep. A continuació mostrem els valors de la mida màxima dels elements en la regió de densitat per a cada tipus de mallat (gruixut o fi).

- Mida màxima dels elements en el mallat gruixut = 0.1 m
- Mida màxima dels elements en el mallat fi = 0.038 m

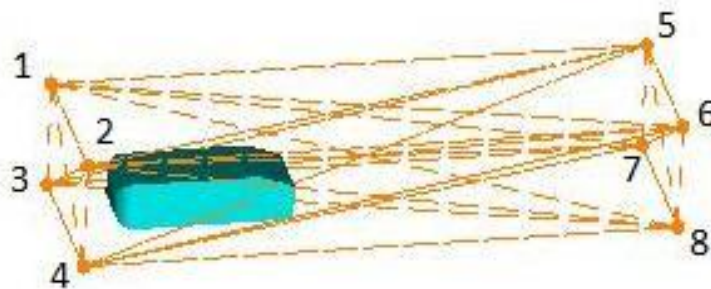


Figura A.5. Ubicació dels punts de la densitat del cos d'Ahmed.

Punts	X	Y	Z
1	-1.3	0.5	0.65
2	-1.3	-0.5	0.65
3	-1.3	0.5	0
4	-1.3	-0.5	0
5	2.2	0.5	0.65
6	2.2	-0.5	0.65
7	2.2	0.5	0
8	2.2	-0.5	0.65

Taula A.3. Coordenades de la regió de densitat del cos d'Ahmed (en metres).

Paràmetres de la malla

Aquí podem veure els paràmetres que hem utilitzat per a la creació dels elements de la malla:

- Mides globals de la malla. Veure taula A.4.

	Mallat gruixut	Mallat fi
Factor d'escala	1	1
Element màxim	1	1
Creixement del prismes	lineal	lineal
Altura inicial	0.015	0.025
Altura total	0.015	0.025

Taula A.4. Mides globals del mallat gruixut i mallat fi.

- Mides per parts dels mallats. Veure taula A.5. i taula A.6.

Mallat gruixut

Parts	Mida màxima(m)	Altura (m)	Proporció d'alçada	Nº capes
<i>Conjunt(Body)</i>	<i>0.2</i>	-	-	-
<i>Cos</i>	<i>0.02</i>	<i>0.015</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Cos/Base</i>	<i>0.02</i>	<i>0.015</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>cos/Tapa superior</i>	<i>0.02</i>	<i>0.015</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Cos/Frontal</i>	<i>0.02</i>	<i>0.015</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Cos/Lateral Dret</i>	<i>0.02</i>	<i>0.015</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Cos/lateral Esquerra</i>	<i>0.02</i>	<i>0.015</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Cos/Tapa Posterior</i>	<i>0.01</i>	<i>0.015</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
<i>Túnel/Base</i>	<i>0.2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Túnel/Tapa Superior</i>	<i>0.2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Túnel/Frontal</i>	<i>0.2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Túnel/Lateral Dret</i>	<i>0.2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Túnel/Lateral Esquerra</i>	<i>0.2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
<i>Túnel/Tapa Post.</i>	<i>0.2</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>

Taula A.5. Mides de mallat gruixut dels cossos d'Ahmed.

Cal notar que, d'acord amb la taula A.5, la mida dels elements en superfície de la tapa posterior del cos d'Ahmed s'escullen més petits que en la resta de la superfície del cos per així poder capturar millor el comportament del flux en l'estela del vehicle.

Mallat fi

Parts	Mida màxima(m)	Altura (m)	Proporció d'alçada	Nº capes
Conjunt(Body)	<i>0.12</i>	-	-	-
Cos	<i>0.008</i>	<i>0.025</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Cos/Base	<i>0.008</i>	<i>0.025</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
cos/Tapa superior	<i>0.008</i>	<i>0.025</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Cos/Frontal	<i>0.008</i>	<i>0.025</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Cos/Lateral Dret	<i>0.008</i>	<i>0.025</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Cos/lateral Esq.	<i>0.008</i>	<i>0.025</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Cos/Tapa Posterior	<i>0.004</i>	<i>0.025</i>	<i>1</i>	<i>1</i>
Túnel/Base	<i>0.15</i>	<i>0.01</i>	<i>0</i>	<i>1</i>
Túnel/Tapa Superior	<i>0.15</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Túnel/Frontal	<i>0.15</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Túnel/Lateral Dret	<i>0.15</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Túnel/Lateral Esq.	<i>0.15</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>
Túnel/Tapa Post.	<i>0.15</i>	<i>0</i>	<i>0</i>	<i>0</i>

Taula A.6. Mides de mallat fi dels cossos d'Ahmed.

Volum de malla

Per fer el mallat de superfície i volum hem utilitzat els paràmetres següents:

- Mallat de superfície. Veure taula A. 7.

	Mallat gruixut	Mallat fi
Nº iteracions	5	5
Qualitat	0.4	0.4

Taula A.7. Paràmetres del mallat de superfície.

- Mallat de volum. Veure taula 8.

	Mallat gruixut	Mallat fi
Factor d'escala	1	1
Factor d'expansió	1.2	1

Taula A.8. Paràmetres del mallat de volum.

Capa límit

Ja que en la capa límit és on tenim variacions de velocitat de l'aire, requereix una precisió més acurada. Per això és necessari disposar d'una capa d'elements que siguin els més uniformes possibles. D'aquesta forma, l'estructura de l'element no distorsiona els resultats. Per efectes pràctics això comporta una extrusió dels triangles de la superfície en alçat. Aquests elements són els prismes (veieu Fig. A.1). Per a la regió de prismes s'han escollit els següents paràmetres:

- Proporció de creixement de la capa de prismes : 1.5
- Nombre de nivells de prismes (capes): 6

Planxat

El planxat es una opció recomanable ja que reordena millor els elements per obtenir una malla de més qualitat (geomètricament no tant complexes). Els paràmetres utilitzats per dur a terme aquest procediment són els següents:

- Nombre d'iteracions : 5
- Qualitat de planxat : 0.2

Condicions de contorn

Qualsevol simulació numèrica necessita determinar les condicions de contorn associades a les regions del domini. A continuació es descriuen les utilitzades en el model, on Wall significa paret i és la condició que volem que sigui la superfície del cos d'Ahmed. Quan definim Wall slip condicionem aquella superfície de que es tracta d'una paret lliscant (velocitat tangent no nul·la), Velocity inlet fa referència a la velocitat d'entrada i Outflow/pressure outlet significa la pressió de sortida del domini. A continuació donem, per a tots dos tipus de mallat, les condicions de contorn a les interfícies utilitzades tant del cos com del túnel de vent. Aquestes condicions de contorn són les usuals en estudis d'aquest tipus (Hinterberger et al., 2004))

➤ Cos :

- Cos/Base : Wall
- cos/Tapa superior : Wall
- Cos/Frontal : Wall
- Cos/Lateral Dret : Wall
- Cos/Tapa Posterior : Wall

➤ Túnel:

- Túnel/Base : Wall
- Túnel/Tapa Superior : Wall slip
- Túnel/Frontal : Velocity-inlet
- Túnel/Lateral Dret : Wall
- Túnel/Lateral Esquerra : Wall slip
- Túnel/Tapa Posterior: Outflow, pressure outlet

A continuació mostrem, a les taules A.9a, A.9b, A.10a i A.10b, la informació de mallat gruixut i mallat fi obtinguda de l'execució per cada un dels cossos orientant-nos així amb la magnitud de cada model mallat.

Cal dir també que a les següents taules la part de *Tipus d'elements* defineix l' informació del que hem explicat anteriorment dels tipus d'elements que utilitza el mallador. D'aquesta forma, NODE fa referència a punts, LINE_2 a corbes, TETRA_4 a tetraedres (elements de volum), TRI_3 a triangles (elements de superfície) i PENTA_6 a prismes (elements de volum).

Mallat gruixut

<i>Inclinació (º)</i>	0º	10º	15º	20º	25º
<i>Tipus d'elements</i>					
NODE	28	30	30	30	30
LINE_2	790	838	848	837	837
TETRA_4	233731	253505	282056	255107	258413
TRI_3	21636	23078	23126	22862	22942
PENTA_6	79800	89628	88452	87132	87576
<i>Element parts (Nº)</i>					
BODY (aire)	313531	343133	370508	342239	345989
COS / CURVES	330	310	388	383	177
COS/BASE	2568	2577	2539	2519	2559
COS/FRONTAL	-	1455	-	-	1134
COS/LATERAL_DRET	2521	2566	2510	2496	2546
COS/LATERAL_ESQ	2531	2586	2545	2492	2551
COS/TAPA		35			81
COS/TAPA/POSTERIOR	2409	4390	4363	4186	4175
COS/TAPA/TAPA	3437	1565	2947	2991	1918
DENSITY	4	4	4	4	4
TUNEL/ CURVES	318	318	324	318	318
TUNEL/BASE	3795	3599	3809	3805	3807
TUNEL/FRONTAL	250	250	268	250	250
TUNEL/LAT_DRET	996	996	1002	996	996
TUNEL/LAT_ESQ	980	980	986	978	978
TUNEL/OUTFLOW	258	258	261	258	258
TUNEL/TAPA	2057	2057	2058	2053	2057
<i>Total elements cos</i>	13466	15174	14904	14684	14964
<i>Total elements del túnel</i>	8336	8140	8384	8340	8346
<i>Total d'elements</i>	335985	367079	394512	365968	369798
<i>Total de nodes</i>	84066	92641	96776	91607	92362

Taula A.9a. Informació del mallat gruixut.

Inclinació (º)	30º	35º	40º	45º	50º
Tipus d'elements					
NODE	30	22	30	30	30
LINE_2	833	851	835	843	834
TETRA_4	259259	259662	281078	258543	245380
TRI_3	22798	22910	22638	22700	22444
PENTA_6	86688	87276	85740	86124	84732
Element parts (Nº)					
BODY (aire)	345947	346938	366818	344667	330112
COS / CURVES	373	547	378	384	377
COS/BASE	2529	2194	2576	2566	2503
COS/FRONTAL	1408	-	-	-	-
COS/LATERAL_DRET	2471	2089	2444	2460	2437
COS/LATERAL_ESQ	2472	2092	2440	2464	2432
COS/TAPA/POSTERIOR	4169	4045	3920	3926	3711
COS/TAPA/TAPA	1567	1649	3073	3103	3202
DENSITY	4	4	4	4	4
TUNEL/ CURVES	318		320	320	320
TUNEL/BASE	3811	3938	3801	3797	3773
TUNEL/FRONTAL	250	286	253	253	253
TUNEL/LAT_DRET	996	1005	997	997	997
TUNEL/LAT_ESQ	980	998	984	984	984
TUNEL/OUTFLOW	256	267	257	257	257
TUNEL/TAPA	2057	2192	2056	2058	2058
Total elements cos	14616	12069	14453	14519	14285
Total elements del túnel	8350	8686	8348	8346	8322
Total d'elements	369608	370721	390321	368240	353420
Total de nodes	92019	92407	95116	91587	88633

Taula A.9b. Informació del mallat gruixut.

Mallat fi

<i>Inclinació (º)</i>	0º	10º	20º	25º
<i>Tipus d'elements</i>				
NODE	28	30	30	30
LINE_2	1533	1680	1651	1657
TETRA_4	1682921	1821113	1789341	1800676
TRI_3	92844	100916	98882	98508
PENTA_6	525042	578452	567224	564648
<i>Element parts (Nº)</i>				
BODY (aire)	2207963	2399565	2356565	2365324
COS / CURVES	814	776	934	398
COS/BASE	13303	13323	13271	13237
COS/FRONTAL	-	8339	-	5805
COS/LATERAL_DRET	9799	9960	9755	9821
COS/LATERAL_ESQ	9919	10104	9786	9883
COS/TAPA		88		197
COS/TAPA/POSTERIOR	16035	28084	26639	26316
COS/TAPA/TAPA	26285	13258	21915	16281
DENSITY	4	4	4	4
TUNEL/ CURVES	408	410	409	409
TUNEL/BASE	10848	10701	10861	10853
TUNEL/FRONTAL	577	582	575	577
TUNEL/LAT_DRET	1888	2177	1888	1888
TUNEL/LAT_ESQ	1820	2113	1821	1821
TUNEL/OUTFLOW	581	583	581	581
TUNEL/TAPA	2124	2124	2124	2124
<i>Total elements cos</i>	75341	83156	81366	81540
<i>Total elements del túnel</i>	17838	18280	17850	17844
<i>Total d'elements</i>	2302368	2502191	2457128	2465519
<i>Total de nodes</i>	564399	616072	604607	605065

Taula A.10a. Informació del mallat fi.

Inclinació (º)	30º	35º	40º	45º	50º
Tipus d'elements					
NODE	30	22	30	30	30
LINE_2	1665	1705	1641	1624	1629
TETRA_4	1797917	1807331	1787876	1876100	1828817
TRI_3	98408	97922	97260	96812	95882
PENTA_6	639961	560812	555996	550046	546182
Element parts (Nº)					
BODY (aire)	2437878	2368143	2343872	2426146	2374999
COS / CURVES	922	1311	921	905	918
COS/BASE	13266	11444	13211	12873	13004
COS/FRONTAL	8304	-	-	-	-
COS/LATERAL_DRET	9569	8238	9574	9436	9448
COS/LATERAL_ESQ	9618	8192	9562	9501	9498
COS/TAPA		14274			
COS/TAPA/POSTERIOR	26173	25367	24715	24293	23325
COS/TAPA/TAPA	13945		22705	22808	23081
DENSITY	4	4	4	4	4
TUNEL/ CURVES	436	436	407	412	407
TUNEL/BASE	10881	11032	10847	10651	10868
TUNEL/FRONTAL	685	607	576	583	577
TUNEL/LAT_DRET	2427	1857	1888	2178	1888
TUNEL/LAT_ESQ	2352	1834	1820	2115	1819
TUNEL/OUTFLOW	692	604	578	583	580
TUNEL/TAPA	2124	2284	2123	2124	2124
Total elements cos	80875	67515	79767	78911	78356
Total elements del túnel	19161	18218	17832	18234	17856
Total d'elements	2539276	2467792	2442803	2524612	2472540
Total de nodes	642823	603974	598246	609222	599056

Taula A.10b. Informació del mallat fi.

A partir de la informació anterior, destacar com el nombre d'elements utilitzats per discretitzar el cos d'Ahmed en el mallat gruixut és de l'ordre de 350.000 i de 2.500.000 en el mallat fi.

A.2.4. Simulació numèrica.

Un cop mallat el model passem a la simulació numèrica a través del programa STAR CCM+ versió 2.10.013. Aquesta tasca també és molt important ja que hem de definir el problema que és vol estudiar, és a dir, determinem les condicions en què es troba el cos i després, n' extraurem conclusions.

La realització d'aquesta simulació consisteix en analitzar tots els 10 models d'Ahmed amb malla gruixuda, malla fina amb un cert grau d'intensitat de turbulència, i després amb el mateix mallat fi variar el aquest grau. Els primers els anomenarem Ahmed 1^a variant, el segon Ahmed 2^a variant, i el tercer Ahmed 3^a variant. Per tant realitzarem 30 simulacions per obtenir tres corbes característiques del coeficient d'arrossegament del cos d'Ahmed per a diferents angles d'inclinació de la part posterior del vehicle.

Metodologia emprada

Models utilitzats:

- Fluid del volum: Gas.
- Segregate flow (Flux segregat)
- Motion stationary (Moviment del conjunt sense acceleració)
- Ideal gas (Gas ideal)
- Stady (Flux estacionari)
- Turbulent: Model de turbulència K-Epsilon turbulent.

A l'hora d'escollir el model de turbulència s'ha de tenir en compte l'experiència, en aquests casos, d'altres treballs realitzats. El model de turbulència s'ha d'escollir ja que en la simulació apareix flux turbulent.

Nosaltres hem escollit el model K-Epsilon turbulent ja que és un dels més senzills, complets i precisos per analitzar flux turbulent. Aquest tipus de model es basa en la

metodologia de les fluctuacions turbulentes desenvolupada per Reynolds. D'aquesta forma, entra dins de la categoria de models de turbulència anomenats RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). A diferència d'altres models RANS, aquest resol dues equacions per separat, una associada a l'energia cinètica turbulenta K i una altra associada a la dissipació Epsilon. Més informació sobre aquest tipus de model es pot trobar a (Hinterberger et al., 2004). En estudis sobre el cos d'Ahmed, aquest és el model més utilitzat. Aquí utilitzem els següents valors per a la intensitat de la turbulència, que determina quina proporció de l'energia cinètica total (multiplicada per 1,5) és turbulenta.

- Intensitat de turbulència I .

Ahmed 1^a variant: $I = 0,01$

Ahmed 2^a variant: $I = 0,01$

Ahmed 3^a variant: $I = 0,10$

Condicions de contorn

En quan a les condicions de contorn finalment aplicades al model, els valors que utilitzem són els següents on quan definim la condició de contorn wall slip o wall no slip ens referim a paret lliscant o paret no lliscant de la superfície. Velocity-inlet ens referim a la velocitat d'entrada, i Pressure outlet a la pressió de sortida.

- Cos : Wall

Ahmed 1^a variant: no slip

Ahmed 2^a variant: no slip

Ahmed 3^a variant: slip

- Túnel/Base : Wall / no slip / velocitat del cos = $[40, 0, 0]$ (m/s)

Com podem veure la direcció de l'aire és en la direcció x , és a dir, frontalment al cos.

- Túnel/Tapa Superior : Wall / slip

- Túnel/Frontal : Velocity-inlet / 40 (**m/s**)

Intensitats de turbulència:

Ahmed 1ª variant: $I = 0,01$

Ahmed 2ª variant: $I = 0,01$

Ahmed 3ª variant: $I = 0,1$

- Túnel/Lateral Dret : Wall / slip
- Túnel/Simetria : Wall / slip
- Túnel/Tapa Posterior: Pressure Outlet / 0.0 **Pa** / slip

Intensitats de turbulència:

Ahmed 1ª variant: $I = 0,01$

Ahmed 2ª variant: $I = 0,01$

Ahmed 3ª variant: $I = 0,1$

Propietats pel coeficient aerodinàmic

Aquí és on definim les variables pel nostre coeficient aerodinàmic del cos. El cos que nosaltres tenim immers sota una corrent de fluid està sotmès a una força d'arrossegament. El coeficient entre aquest arrossegament i el producte de la pressió dinàmica per la superfície resultant de la projecció del vehicle sobre el pla perpendicular a la direcció del moviment ens fa aparèixer el coeficient d'arrossegament anomenat també coeficient aerodinàmic. Veiem l'equació A.1.

$$C_D = \frac{F_D}{P_D} = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} v^2 A_D} \quad \text{(Eq.A.1)}$$

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)

Les nostres variables són les següents:

- Densitat de l'aire: 1.2047 kg/m^3
- Velocitat de l'aire: 40 m/s
- Àrea del cos: 0.112 m^2
- Direcció de l'aire : [1.0, 0.0, 0.0]
- Pressió :0.0 Pa

A.2.5 Resultats.

Com hem esmentat anteriorment comparem els resultats experimentals realitzats per les associacions MOVA i ERCOFTAC amb els nostres resultats numèrics. Veurem si les variants que hem simulat segueixen el mateix patró que ells. Observem-ho a la taula A.11 i a la figura A.6:

Angle inclinació	Cd 1ª variant	Cd 2ª variant	Cd 3ª variant	Cd (experimental)
0	0,351	0,275	0,279	0,25
10	0,311	0,253	0,257	0,229
15	0,312	0,255	0,259	0,233
20	0,324	0,265	0,270	0,251
25	0,34	0,285	0,290	0,285
30	0,348	0,275	0,327	0,378 / 0,260
35	0,325	0,274	0,323	0,257
40	0,332	0,272	0,277	0,255
45	0,318	0,270	0,274	
50	0,336			

Taula A.11.Resultats de les execucions de mallat.

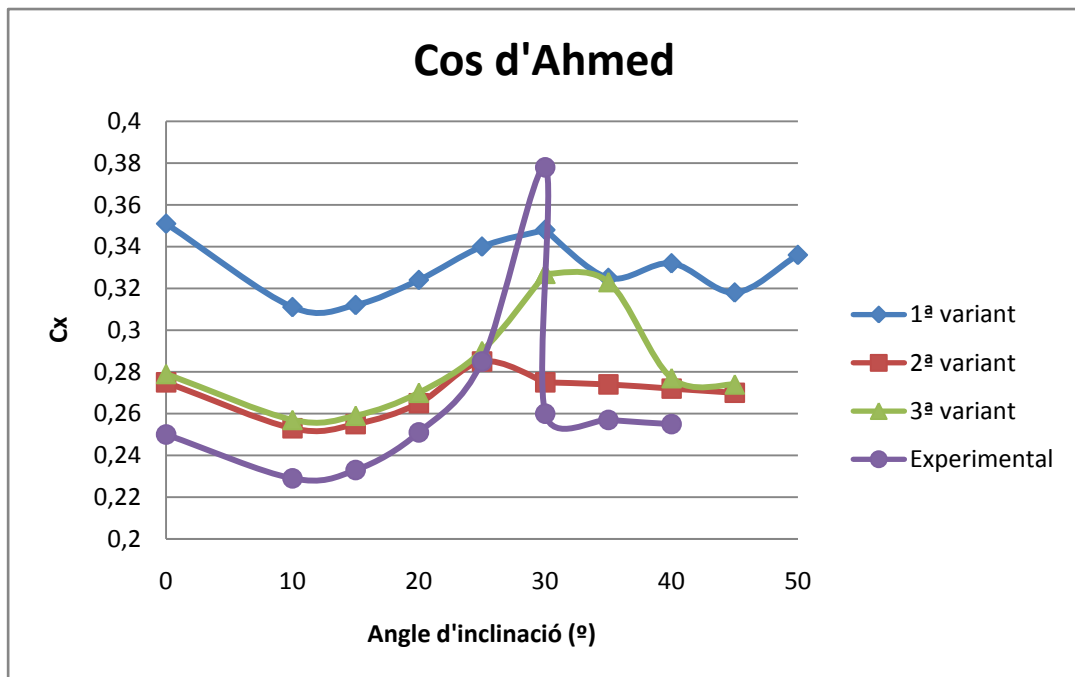


Figura A.6. Gràfica comparativa entre dades experimentals i numèriques dels cossos d'A Ahmed.

A.3 Conclusió.

Tot i que altres autors han utilitzat el programari en què es basa STAR-CCM+ per analitzar aerodinàmiques de vehicles terrestres (veieu, per exemple, Kim, 2004 i 2005), convé realitzar-ne una validació.

Aquest procés de validació consisteix en analitzar una geometria senzilla (el cos d'A Ahmed) de la qual es coneixen valors experimentals del coeficient d'arrossegament per a diferents casos. En total hem simulat 28 cossos d'A Ahmeds amb 10 variacions geomètriques i 2 malles de diferent densitat.

En comparació amb els experiments, observem que el canvi d'angle entre 0° i 10° per al cos d'A Ahmed en la 2ª i 3ª variant descendeix el C_D amb la mateixa pendent per a les simulacions i els experiments. A mesura que l'angle augmenta, concretament fins als 30° el coeficient d'arrossegament també ho fa. De 30° fins a la fi d'aquests, el coeficient d'arrossegament per als mallats fins descendeix. Per a la malla gruixuda (1ª variant) es té una certa desviació.

Angle inclinació	Error % Cd 1ª variant	Error % Cd 2ª variant	Error % Cd 3ª variant
0	40.4	10.0	11.6
10	35.8	10.5	12.2
15	33.9	9.4	11.2
20	29.1	5.6	7.6
25	19.3	0.0	1.8
30	-7.9	-27.2	-13.5
35	26.5	6.6	25.7
40	30.2	6.7	8.6

Taula A.11b. Percentatge d'error en el Cd per a cada cas de la taula A.11 respecte del cas experimental.

La Taula A.11b mostra el percentatge de variació entre el Cd simulat per a cadascun dels tres casos mostrats a la Figura A.6 i el valor experimental (en %). S'observa com l'error en la malla gruixuda súper el 40 % i en 4 dels 8 casos es troba més enllà del 30 %. Per això, la malla gruixuda no és adequada per a l'estudi de l'aerodinàmica del cos d'Ahmed. Els casos 2 i 3 donen resultats substancialment millors, amb un error de l'ordre o inferior al 10 % en la majoria de casos (exceptuant-ne 1). És per això que considerem adequat aquest tipus de model.

ANNEX B. AERODINÀMICA D'UN FÓRMULA 1: ELS ALERONS.

Els alerons

Sens dubte, els alerons són un factor importantíssim de cara a l'adherència. Generen al voltant del 66% de la força cap el terra del cotxe. Lo normal és que portin seccions de perfil aerodinàmic multi element (similar als que es despleguen en els avions en fase d'aterratge o enlairament, en la foto) optimitzats per a velocitats petites (recordem que aquests termes venen de la indústria aeronàutica, on les velocitats punta dels Fórmula 1 són més bé lentes davant a qualsevol vol de creuer).

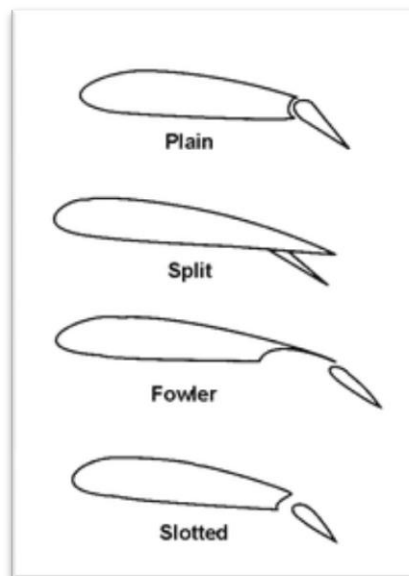


Fig. B.1. – Exemples de seccions d'alerons.

En cada extrem porta superfícies transversals per a reduir la resistència induïda. I què és aquesta resistència? Se sol denominar també resistència de contorn d'ala, de punta d'ala, d'ala finita... varis noms que descriuen el mateix: una resistència inevitable, però sí reductible (amb aquestes superfícies o *winglets*) existent per el fet de que vivim en un món en tres dimensions en el que a l'aire li és més fàcil anar-se'n pel lateral de l'aleró que per on ha d'anar, generant un remolí que dona bastant resistència.

L'aleró davanter

L'aleró davanter (**figura B.2.**) carrega amb el 33% de la força cap a baix total del cotxe (la meitat del grup aleró), i, té la funció afegida d'enviar el flux d'aire a les rodes de forma que no generin molta resistència, i alimentar en part als baixos. Una altra funció interessant que realitza l'aleró davanter gràcies a la seva forma, és la de deflactar aire cap als frens per millorar la seva refrigeració. La idea i el problema principal en disseny és buscar una solució de compromís entre la generació de força vertical i el desviament d'aire a altres parts del cotxe.



Fig. B.2. – Aleró davanter Formula 1.

L'aleró posterior

L'altre meitat de la força vertical del grup aleró el produeix l'aleró posterior (**fig. B.3.**). També és multi element. Com a funció afegida , la part inferior extreu aire dels baixos del cotxe.



Fig. B.3. – Aleró posterior Formula 1.

ANNEX C. FLAP GURNEY-NOLDER

Existeixen altres sistemes que s'encarreguen d'augmentar l'angle de pèrdua d'un aleró. Tots aquests mètodes, es basen a produir una depressió en una zona determinada, de tal forma, que impedeix que el flux se separi de la superfície. En la següent figura es mostra en secció la col·locació del Nolder o Flap Gurney (**figura C.1.**).

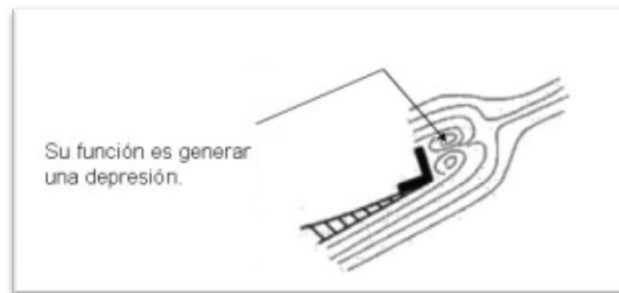


Fig. C.1. – Secció perfil Gurney i efecte de depressió. <http://tecnicaf1.com>

Es tracta d'un sistema amb tot just 1 cm d'alçada (**figura C.2.**). Per exemple en GP2 de l'any 2007, s'utilitzaven 3 alçades de Flap Gurney: 1mm, 1.5 mm i 2 mm.

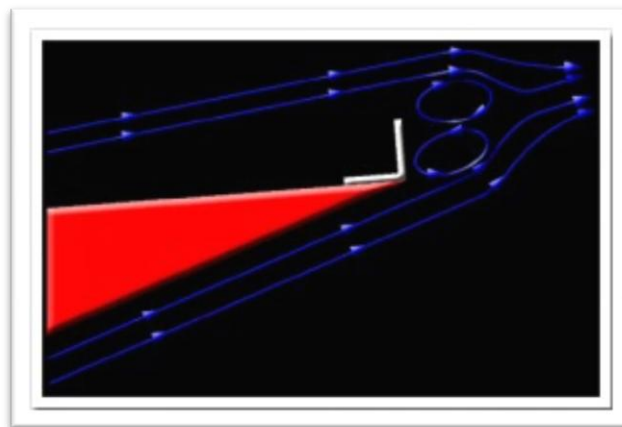


Fig. C.2. – Secció perfil Gurney i vectors velocitat. <http://tecnicaf1.com>

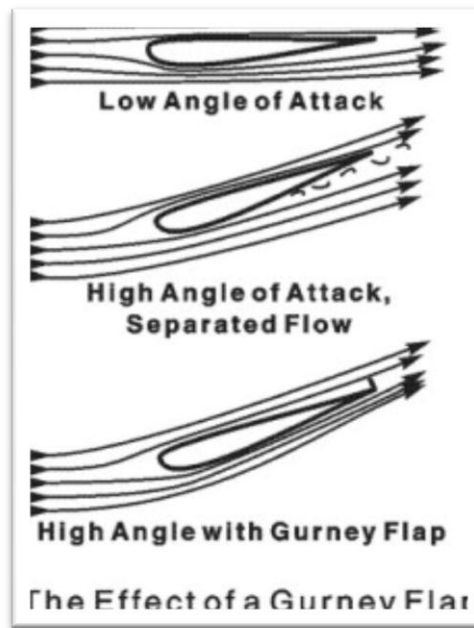


Fig. C.3. – Angles d'atac i configuració del perfil Gurney. <http://tecnicaf1.com>

Només per a angles grans; per a angles petits serveix per a generar una mica de Down Force, doncs la “L” té component vertical (millor que augmentar l’angle). És possible col·locar-lo en altres llocs que no siguin en les ales dels alerons laterals del aleró del darrere GP2 (**figura C.4.**). D’aquesta forma és possible “succionar” el flux on es requereixi o necessiti.



Fig. C.4. – Aleró d'un vehicle de categoria GP2. <http://tecnicaf1.com>

El rendiment o eficiència d'aquests sistemes, és tant major com més càrrega suporta l'ala. Això significa que si tinc un ala amb poca càrrega (o angle) i necessito augmentar-la, el fet de col·locar un flap Gurney no és la solució més idònia. La solució, en aquest cas, seria augmentar l'angle d'incidència de l'ala (**figura C.5.**).

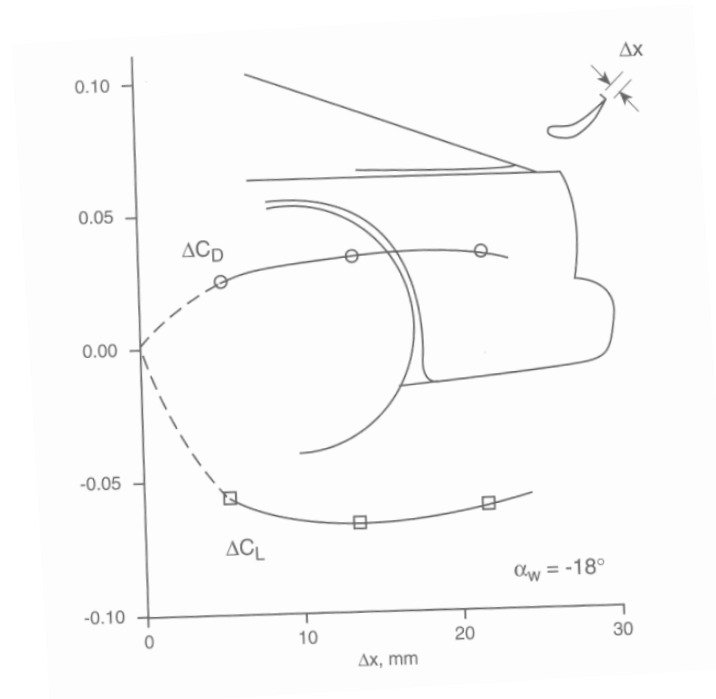


Fig. 1.5. – Gràfic que reflexa increment del mida del Flap Gurney. <http://tecnicaf1.com>

ANNEX D. INTRODUCCIÓ A GAMBIT.

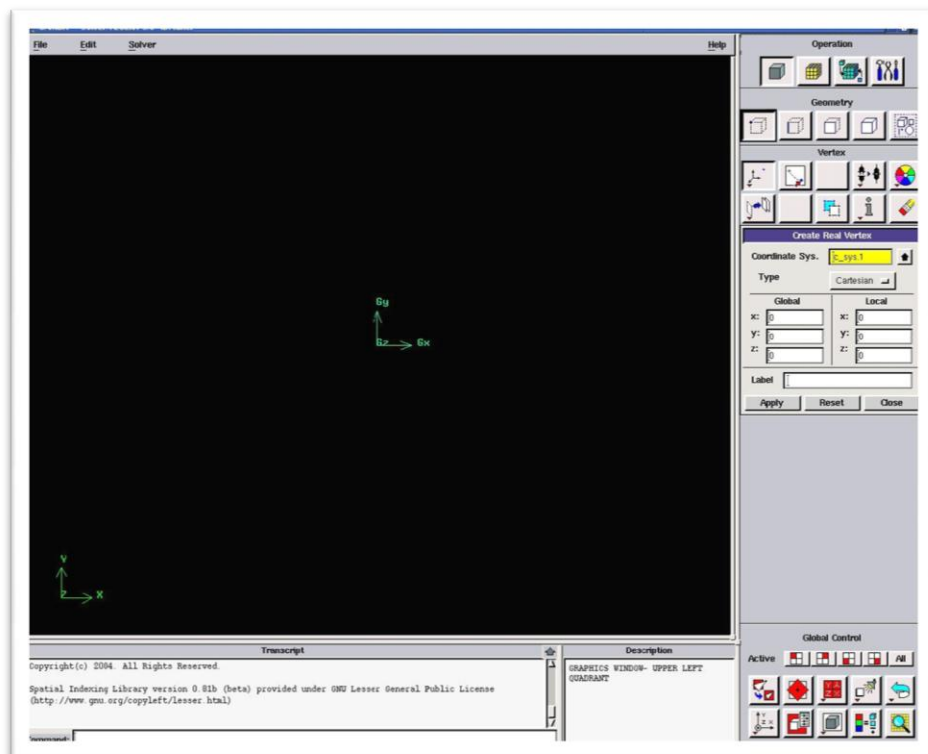


Fig. D.1. – Pantalla inici del programari Gambit.

El programari GAMBIT posseeix una finestra gràfica com la qual s'aprecia en la **figura D.1.** . Cadascun dels panells de la finestra principal són explicats a continuació. La interfície gràfica de GAMBIT té els següents mòduls:

- **Menú Principal:** L'arxiu principal apareix a la barra de menús, i al cantó amb ID apareix el nom de l'arxiu.



Fig. D.2. – Detall quadre menú Gambit.

- **Panell de d'Eines (Operation):** Cada cop que s'escull una ordre apareix un submenú associat. L'aspecte d'aquest menú es detalla a la següent figura:

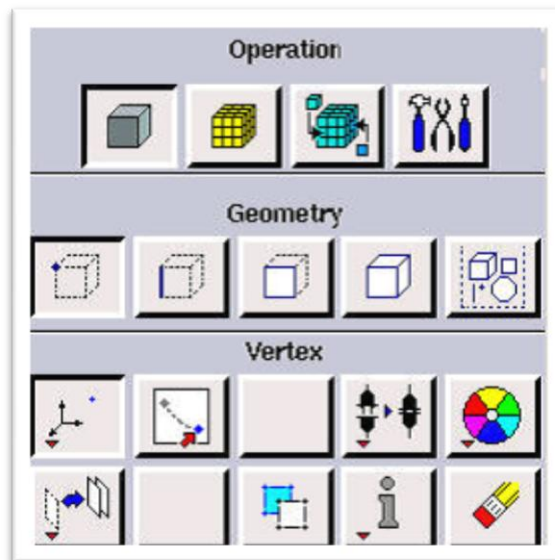


Fig. D.3. Submenú associat a una ordre.

- Panell d' Eines de Control Global (Global Control, figura D.4.):

El panell d'eines conté varies ordres i opcions: **Fit to Screen**  per ampliar el model o reduir al mida de la pantalla, i **Undo**  que serveix per desfer les operacions realitzades a la geometria o mallat del model.

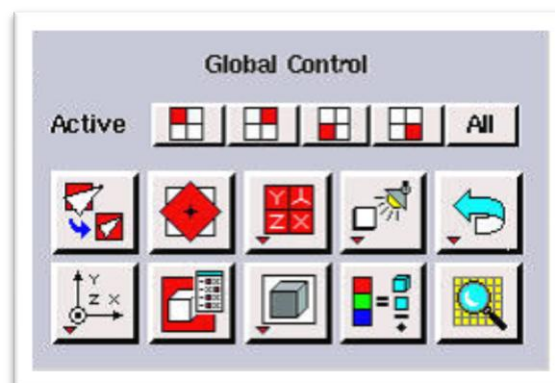


Fig. D.4. – Panell d'Eines.

- La Zona Gráfica de GAMBIT: Tots els resultats de les operacions gràfiques i de mallat apareixen en la zona gràfica i es poden visualitzar de diferents modes (**figura D.5.**).

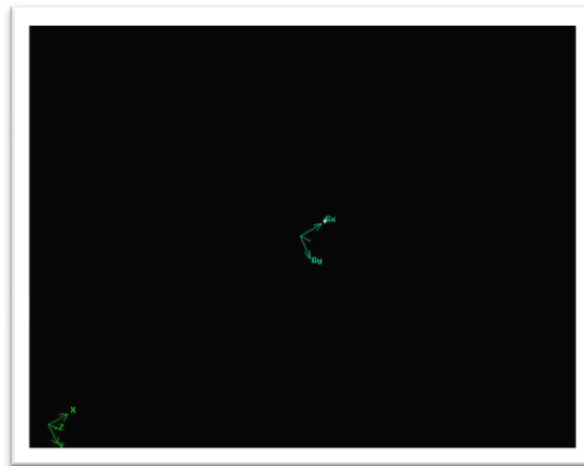


Fig. D.5. – Interfície gràfica.

- Panell d' Ajuda de GAMBIT (Description): El panel d'ajuda desplega informació sobre les ordres utilitzades (**figura D.6.**).

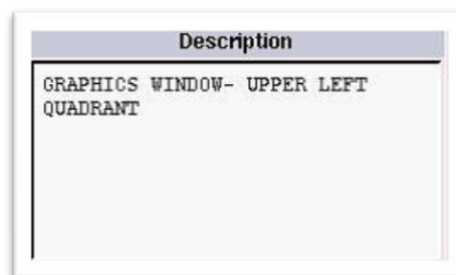


Fig. D.6. – Interfície d'ajuda.

- Finestra de transcripció de GAMBIT (Transcript): En aquesta finestra apareixen les ordres que s'han anat executant i els avisos d'error que s'hagin produït (**figura D.7.**).

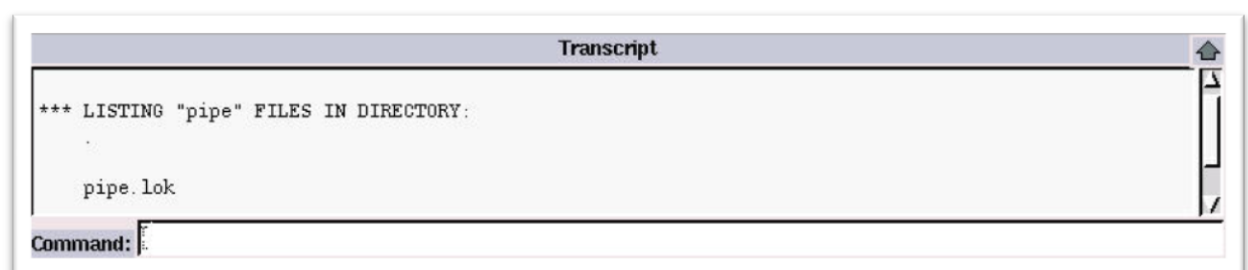


Fig. D.7. – Interfície de transcripció.

ANNEX E. MÈTODE DE CÀLCUL DE L'ÀREA FRONTAL MÀXIMA D'UN VEHICLE

L'àrea frontal màxima és l'àrea que es projectaria perpendicular al frontal del vehicle si col·loquéssim un pla a una certa distància en la mateixa direcció (veure **figura E.1**). En altre paraules, seria el que veuríem del vehicle si ens poséssim al davant del frontal perpendicularment. El mètode utilitzat en aquest projecte ha sigut el descrit a continuació:

- Col·locació d'un pla perpendicular a la vista frontal del vehicle. En aquest cas la distància del pla no es determinant, donat que un cop es projecti l'àrea a sobre ja obtindrem la solució.

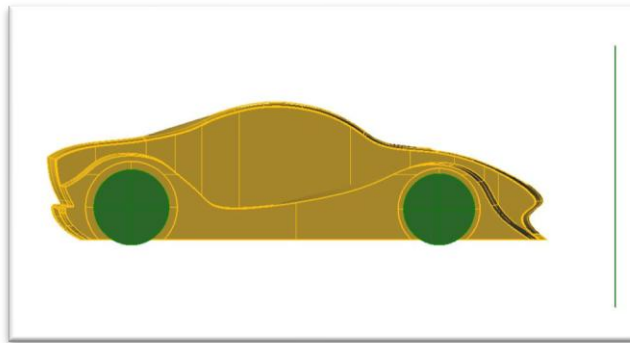


Fig. E.1. – Vista de perfil del vehicle base i pla perpendicular al frontal.

- Impressió o extrusió del cos cap al pla de projecció. Per imprimir la geometria frontal, utilitzarem l'ordre projectar i escollirem el pla creat com a superfície de projecció.

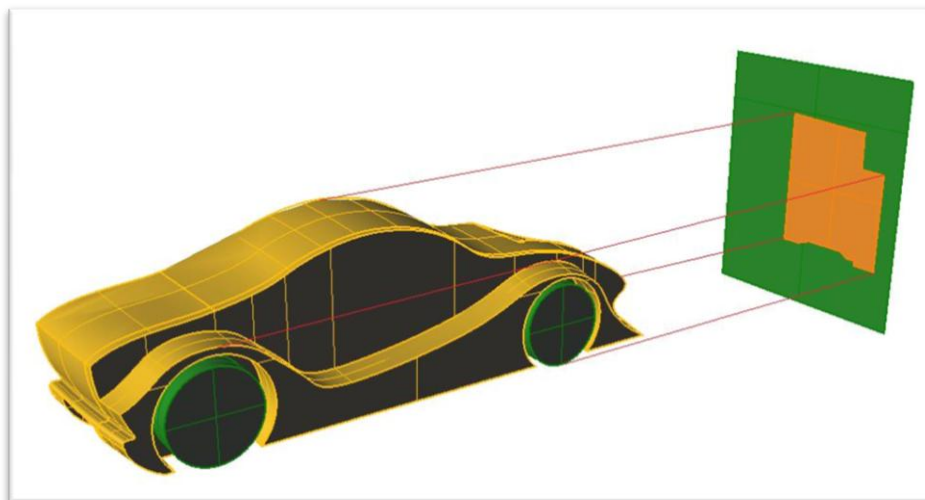


Fig. E.2. – Projecció àrea frontal màxima sobre un pla en model base.

- A continuació retallem l'àrea del pla de projecció i si s'ha convertit en polilínia (línia múltiple) dibuixem la superfície inscrita a l'interior (**figura. E.3.**).

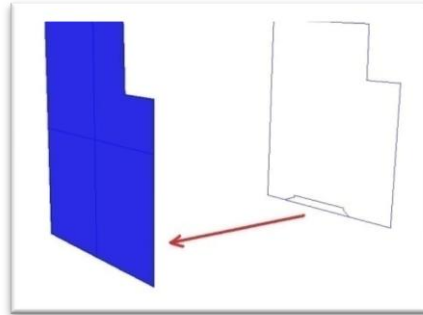


Fig. E.3. – Polilínia i àrea resultants de la projecció del àrea frontal del vehicle model base.

- Per últim seleccionem l'àrea i amb l'opció "àrea" del programari Rhinoceros 3D 3.0. calculem l'àrea que necessitem per introduir en l'equació del càlcul en cada coeficient. Per el model modificat repetim els passos anteriors (exemple figura E.4.)

Els resultats dels dos càlculs són els següents:

- Àrea del frontal màxima del model base: $8.326,07 \text{ cm}^2$
- Àrea del frontal màxima del model modificat: $8.281,06 \text{ cm}^2$

En la figura següent es mostra la comparativa de les àrees frontal màximes del model base i del model modificat:

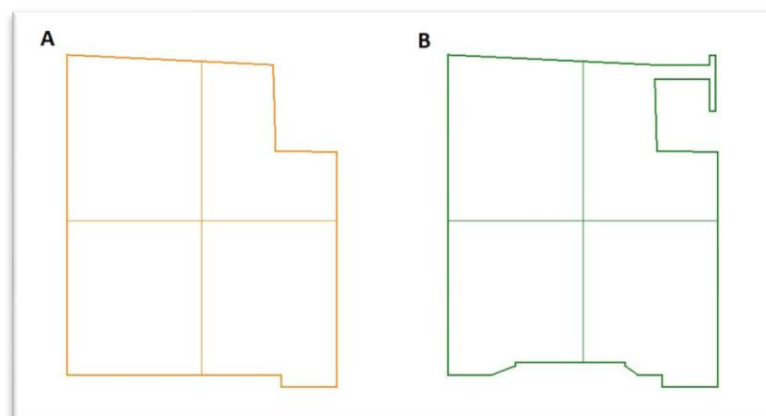


Fig. E.4. – Comparativa àrees frontals màximes dels models: a) base i b) modificat.