

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ.	4
1.1. Antecedents.	4
1.2. Objecte general del projecte.	5
1.3. Especificacions.	6
2. VALIDACIÓ DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓ: COS D'AHMED.	7
2.1. Introducció.	7
2.2. Programa STAR CCM+.	8
2.2.1. Introducció.	8
2.3. Estudi del Cos d'Ahmed.	10
2.3.1.1. Generació del mallat.	12
2.3.1.2. Simulació numèrica.	23
2.3.1.3. Resultats.	26
2.4. Conclusió.	27
3. ESTUDI AERODINÀMIC DE DIFERENTS CARROSSERIES ACTUALS D'AUTOCARS.	28
3.1. Introducció.	28
3.2. Generació de mallat.	30
3.3. Simulació numèrica.	35
3.4. Resultats obtinguts.	36
3.5. Conclusions.	58
4. ESTUDI AERODINÀMIC DE DIFERENTS COMPLEMENTS EN LA CARROSSERIA D'AUTOCARS.	60
4.1. Introducció.	60
4.2. Generació de mallat.	61
4.3. Simulació numèrica.	67
4.4. Resultats obtinguts.	68

4.5. Conclusions.	87
<u>5. RESUM DEL PRESSUPOST.</u>	88
<u>6. RELACIÓ DE DOCUMENTS DEL PROJECTE.</u>	89
<u>7. BIBLIOGRAFIA.</u>	90
<u>8. GLOSSARI.</u>	92
<u>9. AGRAÏMENTS.</u>	94
<u>A. MECÀNICA DE FLUIDS.</u>	96
A.1. Definició de fluid.	96
A.2. Forces i pressions.	96
A.3. Propietats dels fluids.	98
A.4. Flux de fluid.	99
A.5. Classificació dels fluxos.	100
A.6. Equació de continuïtat.	101
A.7. Equació de Bernoulli.	102
A.8. Equació de Navier-Stokes.	103
A.9. Capa límit.	103
A.10. Bibliografia.	105
<u>B. FONAMENTS D'AERODINÀMICA.</u>	107
B.1. Introducció.	107
B.2. Sustentació.	107
B.3. Teorema de Kutta-Jouksky de la sustentació.	108
B.4. Coeficient de sustentació.	110
B.5. Perfils sustentadors.	111
B.6. Resistència.	112
B.7. Coeficient d'arrossegament.	114
B.8. Resistència de les formes.	114
B.9. Resistència a elevats números de Reynolds.	114
B.10. Resistència aerodinàmica a l'avanç.	115

B.11. Bibliografia.	116
<u>C. AERODINÀMICA DE VEHICLES.</u>	118
C.1. Introducció.	118
C.2. El camp de flux al voltant d'un vehicle.	119
C.3. Accions aerodinàmiques sobre vehicles.	122
C.4. Influència de la part davantera.	126
C.5. Influència dels laterals i sostre del vehicle.	128
C.6. Característiques dels laterals i sostre dels vehicles.	131
C.7. Baixos del vehicle.	132
C.8. Rodes.	133
C.9. Sustentació aerodinàmica.	136
C.10. Bibliografia.	137
<u>D. GENERACIÓ DE MALLATS.</u>	139
D.1. Introducció.	139
D.2. Execució del programa.	139
D.3. Bibliografia.	152
<u>E. SIMULACIÓ AMB CFD.</u>	154
E.1. Introducció.	154
E.2. Execució del programa.	154
E.3. Bibliografia.	162
<u>F. ESTUDI EXPERIMENTAL DEL COS D'AHMED.</u>	164
F.1. Introducció.	164
F.2. Estudi experimental.	165
F.3. Bibliografia.	170
<u>G. ANTECEDENTS</u>	172
G.1. Bibliografia.	175
<u>H. ESQUEMES DE DISSENY.</u>	177

1. INTRODUCCIÓ.

1.1. Antecedents.

L'elevat consum de combustible dels vehicles pesats de transport de passatgers per carretera ha generat un gran nombre de projectes a nivell europeu. Aquests estan enfocats a buscar eines per millorar l'eficiència energètica amb diferents aproximacions.

Això ha generat una sèrie de suggeriments d'on, diverses indústries i universitats estan treballant en l'optimització de l'aerodinàmica externa. Aquest aspecte té un paper molt important a l'hora de reduir el consum de combustible en autocars de llarg trajecte.

Per això hi ha l'interès en conèixer l'eficiència aerodinàmica de les carrosseries que ofereix el mercat. Elements externs que es poden afegir per a la millora de l'eficiència aerodinàmica també són d'interès.

La millora d'aquesta eficiència en els vehicles pesants de transport de passatgers ha evolucionat considerablement en els últims anys, comportant, en conseqüència, una reducció en la contaminació.

Tothom sap que l'autocar és un vehicle destinat al transport de persones i els respectius equipatges. Per normativa, l'autocar ha de tenir més de 9 places inclosa la del conductor. Hi han varis tipus de vehicles de transport de passatgers. Aquests rebran el nom de:

- Autocar (quan pot transportar més de 30 persones i es dedica al transport interurbà).
- Autobús (vehicle amb transport de més de 30 persones dedicat al transport urbà).
- Autocar de dos pisos (autocar amb dos nivells).
- Mini bus (autocar amb capacitat entre 10 i 20 passatgers aproximadament).
- Autobús articulat (autobús de dos vagons articulats entre si).
- Trole bus (autobús alimentat elèctricament per dos cables superiors mitjançant dues astes).

En el desenvolupament d'aquest projecte tractarem una sèrie de vehicles del tipus autocar d' aproximadament 12 metres de longitud que són els comercialment més venuts.

1.2. Objecte general del projecte.

L'objectiu d'aquest projecte consisteix en dues parts, primerament es realitza un estudi comparatiu de l'eficiència aerodinàmica de diferents carrosseries d'autocars de llarg recorregut que es troben en el mercat.

L'altra part es tracta d'escollir una carrosseria, concretament la més eficient, i estudiar l'eficàcia d'utilitzar varis afegits externs que han estat proposats per diversos investigadors. El que es pretén és reduir el consum a base de millorar el perfil aerodinàmic del vehicle.

1.3. Especificacions.

En la realització del projecte, l'estudi aerodinàmic es realitzarà de manera virtual a partir d'utilització de programes comercials de dinàmica de fluids. Així com també programes de disseny 3D i programes d'elements finits que siguin compatibles amb el programa de simulació a utilitzar.

En el disseny dels afegits s'utilitzarà programes com Inventor o Rhinoceros, després, en funció del disseny, utilitzarem un programa d'elements finits anomenat ICEM "ANSYS" que mallarà la geometria emprada, finalment la simulació s'efectuarà amb el programa STAR CCM+.

El disseny d'una nova carrosseria queda fora de l'abast del projecte a realitzar.

2. VALIDACIÓ DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓ: COS D'AHMED.

2.1. 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 (veieu, Nihan i Sullivan, 1979).

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 (veieu les referències següents:

- <http://venus.ceride.gov.ar/~mstori/AHMED/tex/ahmed/node1.html>
- <http://venus.ceride.gov.ar/cimec>

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 et al. (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 l'annex B introduïm aquests conceptes).

En aquest apartat explicarem l'estudi numèric realitzat sobre el cos d'Ahmed. L'explicació de l'estudi l'experimental realitzat per aquestes associacions s'explica a l'annex F.

2.2. Programa STAR CCM+.

2.2.1. Introducció.

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 torbar una solució en l'espai i el temps.

Això se'n diu modelat d'elements discrets. La discretització es una divisió del volums 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 tamanys, angles dels vèrtexs i disposició dels elements (capes de prismes, malla hexaèdrica, etc). A la figura 1 podem veure diferents elements possibles.

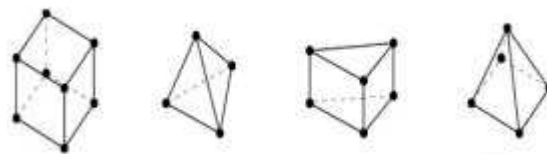


Figura 1. Possibles elements de malla en volum (hexaedres, tetraedres, prismes i piràmides). La seva projecció en la superfície són quadrilàters, triangles, triangles i quadrilàters, respectivament.

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.

pesants de transport de passatgers.

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 2 veiem millor un esquema de la metodologia que hem seguit.

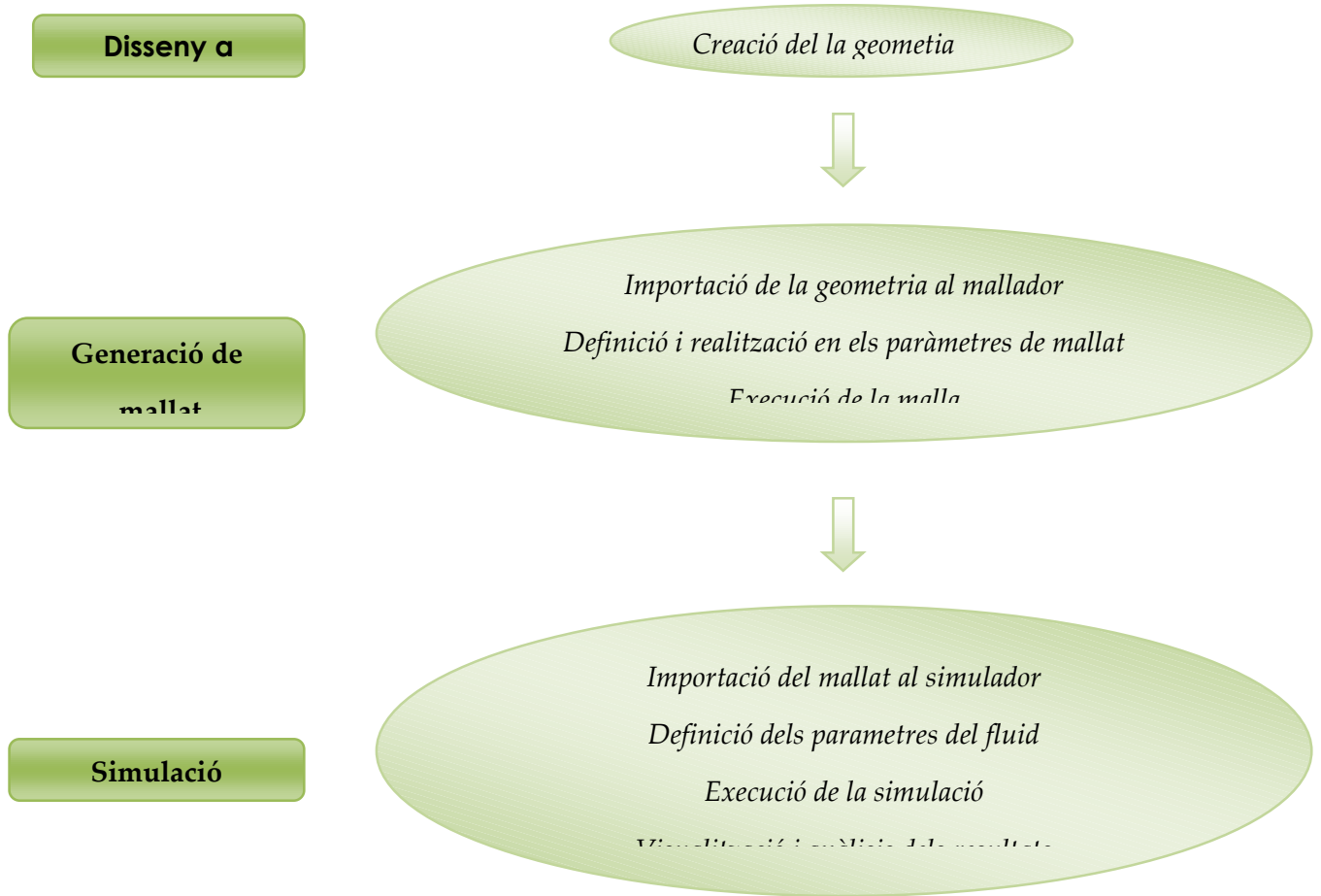


Figura 2. Esquema general dels passos a seguir.

2.3. Estudi del Cos d'Ahmed.

A la figura 3 es poden veure les mides del cos d'Ahmed. A la figura 3, V representa la direcció en què anirà la velocitat de l'aire. Les mides concretes és detallen en l'annex H.

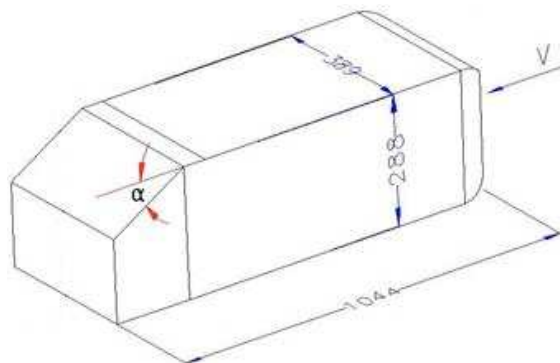


Figura 3. Mides generals del cos d'Ahmed (en mm). L'aresta inclinada és de 222 mm per a qualsevol α .

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 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 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 1).

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".

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

pesants de transport de passatgers.

40°	0,255
-----	-------

Taula 1. Dades experimentals.

A continuació expliquem les dades aplicades en l'execució de mallat i en la simulació numèrica. L'explicació àmplia de la utilització del programa s'explica a l'annex D i annex E.

2.3.1.1. 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 sí 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 són 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.

Característiques geomètriques externes

Seguidament mostrem, a la taula 2, les dades del domini computacional, una mena de "túnel" virtual, com observem a la figura 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.

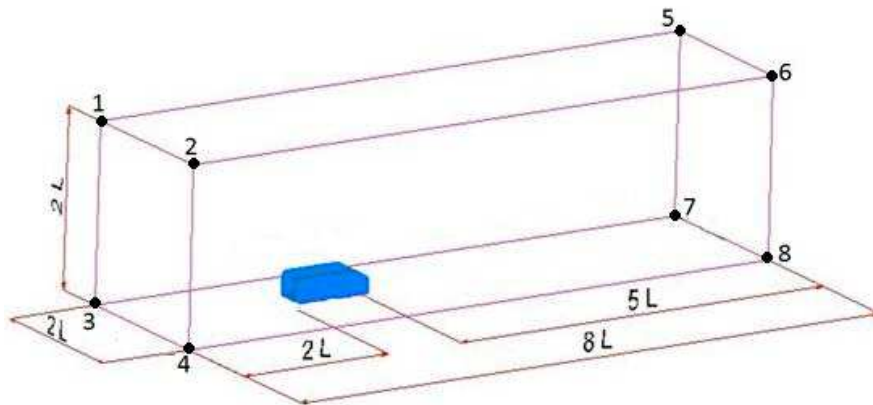


Figura 4. Paràmetres del domini computacional.

- 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 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 5 i a la taula 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

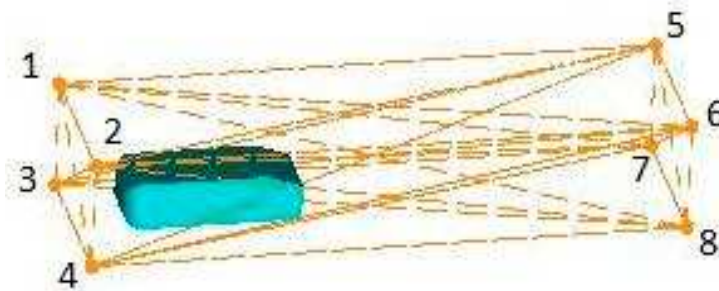


Figura 5. Ubicació dels punts de la densitat del cos d'Ahmed.

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

pesants de transport de passatgers.

6	2.2	-0.5	0.65
7	2.2	0.5	0
8	2.2	-0.5	0.65

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

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

Mallat gruixut

Parts	Mida màxima(m)	Altura (m)	Proporció d'alçada	Nº capes
Conjunt(Body)	0.2	-	-	-
Cos	0.02	0.015	1	1
Cos/Base	0.02	0.015	1	1
cos/Tapa superior	0.02	0.015	1	1
Cos/Frontal	0.02	0.015	1	1
Cos/Lateral Dret	0.02	0.015	1	1

pesants de transport de passatgers.

Cos/lateral Esquerra	0.02	0.015	1	1
Cos/Tapa Posterior	0.01	0.015	1	1
Túnel/Base	0.2	0	0	0
Túnel/Tapa Superior	0.2	0	0	0
Túnel/Frontal	0.2	0	0	0
Túnel/Lateral Dret	0.2	0	0	0
Túnel/Lateral Esquerra	0.2	0	0	0
Túnel/Tapa Post.	0.2	0	0	0

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

Cal notar que, d'acord amb la taula 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)	0.12	-	-	-
Cos	0.008	0.025	1	1
Cos/Base	0.008	0.025	1	1
cos/Tapa superior	0.008	0.025	1	1
Cos/Frontal	0.008	0.025	1	1
Cos/Lateral Dret	0.008	0.025	1	1
Cos/lateral Esq.	0.008	0.025	1	1
Cos/Tapa Posterior	0.004	0.025	1	1
Túnel/Base	0.15	0.01	0	1
Túnel/Tapa Superior	0.15	0	0	0
Túnel/Frontal	0.15	0	0	0
Túnel/Lateral Dret	0.15	0	0	0
Túnel/Lateral Esq.	0.15	0	0	0
Túnel/Tapa Post.	0.15	0	0	0

Taula 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 7.

Mallat gruixut
Mallat fi

Nº iteracions

5
5

Qualitat

0.4
0.4

Taula 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 8. Paràmetres del mallat de volum.

Capa límit

pesants de transport de passatgers.

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. 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 recomenable 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

pesants de transport de passatgers.

- 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 9a, 9b, 10a i 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

Inclinació (°)	0°	10°	15°	20°	25°
Tipus d'elements					
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

Element parts (Nº)

pesants de transport de passatgers.

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
Total d'elements	335985	367079	394512	365968	369798
Total de nodes	84066	92641	96776	91607	92362

Taula 9a. Informació del mallat gruixut.

Inclinació (°)	30°	35°	40°	45°	50°
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 (N°)					

pesants de transport de passatgers.

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
<i>Total elements cos</i>	14616	12069	14453	14519	14285
<i>Total elements del túnel</i>	8350	8686	8348	8346	8322
Total d'elements	369608	370721	390321	368240	353420
Total de nodes	92019	92407	95116	91587	88633

Taula 9b. Informació del mallat gruixut.

<u>Mallat fi</u>				
<i>Inclinació (°)</i>	0°	10°	20°	25°
<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

pesants de transport de passatgers.

Element parts (Nº)

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
Total d'elements	2302368	2502191	2457128	2465519
Total de nodes	564399	616072	604607	605065

Taula 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

pesants de transport de passatgers.

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
<i>Total elements cos</i>	80875	67515	79767	78911	78356
<i>Total elements del túnel</i>	19161	18218	17832	18234	17856
Total d'elements	2539276	2467792	2442803	2524612	2472540
Total de nodes	642823	603974	598246	609222	599056

Taula 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 350000 i de 2500000 en el mallat fi.

2.3.1.2. 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'extreurem 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 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

pesants de transport de passatgers.

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 reslitzats. 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 1^a variant: I = 0,01

Ahmed 2^a variant: I = 0,01

Ahmed 3^a 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 1^a variant: I = 0,01

Ahmed 2^a variant: I = 0,01

Ahmed 3^a 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 inmers 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 1.

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

On:

$C_D = \text{coeficient d'arrossegament (adimensional)}$

$F_D = \text{força d'arrossegament (N)}$

$P_D = \text{pressió dinàmica (Pa)}$

$A_D = \text{superfície (m}^2\text{)}$

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

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

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

2.3.1.3. 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 11 i a la figura 6:

Angle inclinació Cd 1^a variant Cd 2^a variant Cd 3^a variant Cd (experimental)

pesants de transport de passatgers.

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 11. Resultats de les execucions de mallat.

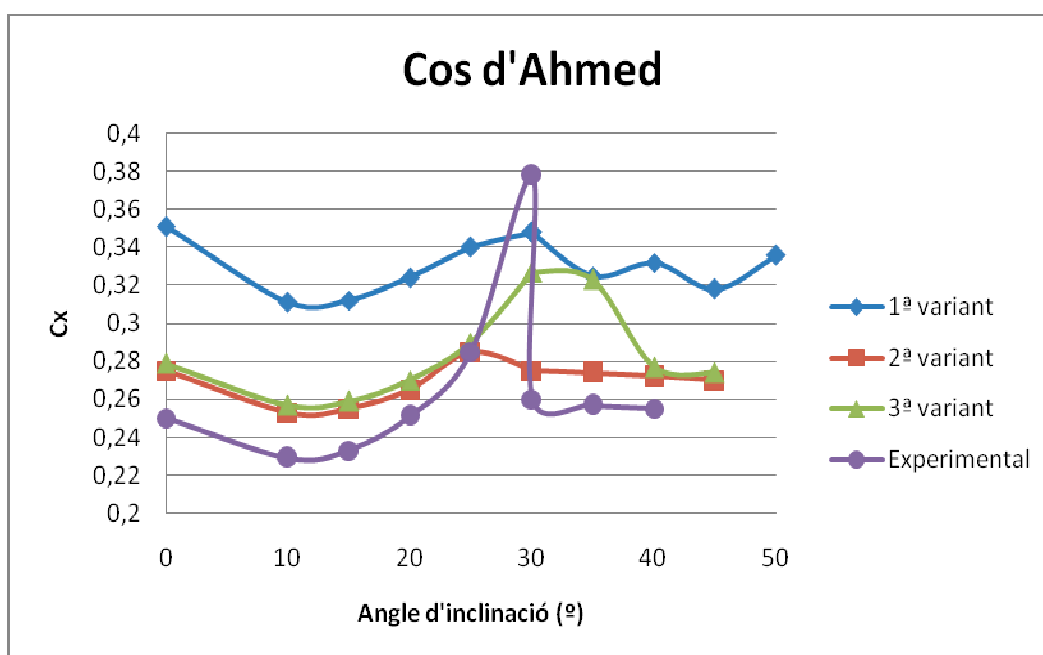


Figura 6. Gràfica comparativa entre dades experimentals i numèriques dels cossos d'Ahmed.

2.4. 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'Ahmed) de la qual es coneixen valors experimentals del coeficient d'arrossegament per a diferents casos. En total hem simulat 28 cossos d'Ahmeds amb 10 variacions geomètriques i 2 malles de diferent densitat.

pesants de transport de passatgers.

En comparació amb els experiments, observem que el canvi d'angle entre 0° i 10° per al cos d'Ahmed en la 2^a i 3^a 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 (1^a variant) es té una certa desviació.

Angle inclinació	Error % Cd 1 ^a variant	Error % Cd 2 ^a variant	Error % Cd 3 ^a 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 11b. Percentatge d'error en el Cd per a cada cas de la taula 11 respecte del cas experimental.

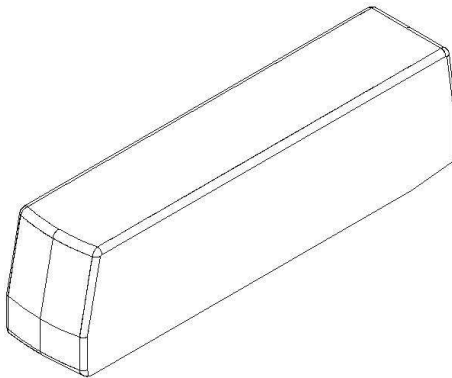
La Figura 11b mostra el percentatge de variació entre el Cd simulat per a cadascun dels tres casos mostrats a la Figura 11 i el valor experimental (en %). S'observa com l'error en la malla gruixuda supera el 40 % i en 4 dels 8 casos es troba més enllà del 30 %. Per això, la malla gruixuda no és adequada 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.

3. ESTUDI AERODINÀMIC DE DIFERENTS CARROSSERIES ACTUALS D'AUTOCARS.

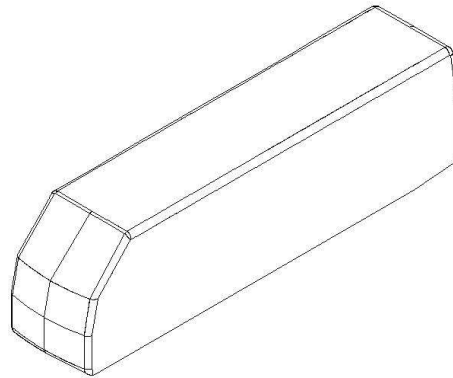
3.1. Introducció.

En aquest apartat mostrarem els estudis realitzats de quatre models de carrosseria actual d'autocar amb la diferència entre ells de la part frontal i observar-ne la diferència en els coeficients aerodinàmics.

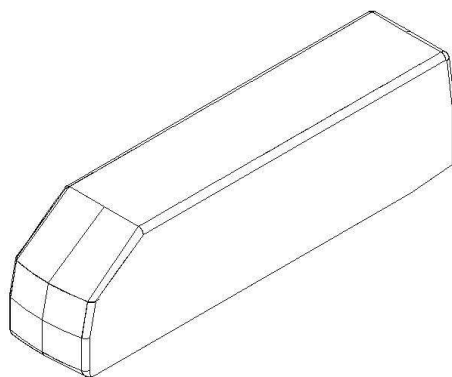
Bus N°1



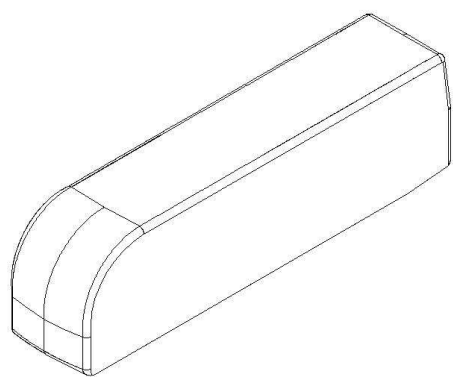
Bus N°2



Bus N°3



Bus N°4



Conceptes bàsics.

En un vehicle pesant, la resistència aerodinàmica és la força més important a vèncer a partir d' aproximadament uns 60 Km/h. Com el consum augmenta en funció de la velocitat al quadrat (veure annex B), qualsevol modificació en l'aerodinàmica del vehicle tindrà conseqüències directes en l'eficiència energètica del vehicle. La resistència que oposa l'aire depèn de la forma de la carrosseria.

En l'estudi caldran termes com velocitat de l'aire, densitat, pressió, etc..., a partir d'on es determinaran les característiques del coeficient aerodinàmic.

La facilitat amb què un cos o vehicle es mou en el corrent d'aire ve indicada pel producte de la superfície frontal i el coeficient aerodinàmic C_D .

Per això doncs, dos vehicles d'igual C_D poden tenir diferent resistència a l'avanç contra l'aire, d'on s'obté de multiplicar la secció frontal de la carrosseria pel coeficient aerodinàmic.

Per això no podem dir que un vehicle de gran envergadura amb un C_D relativament baix en comparació amb un de petita i C_D inferior tingui menys resistència a l'aire.

3.2. Generació de mallat.

La generació de mallat de les diferents carrosseries es molt semblant a la realitzada per el cos d'Ahmed i comentada en la secció 2. Aquesta rep alguna variant d'algun paràmetre que veurem a continuació. També, com amb el cos d'Ahmed, la generació de la malla ha de fer-se amb cura per obtenir un bon resultat, especialment a la zona de la capa límit.

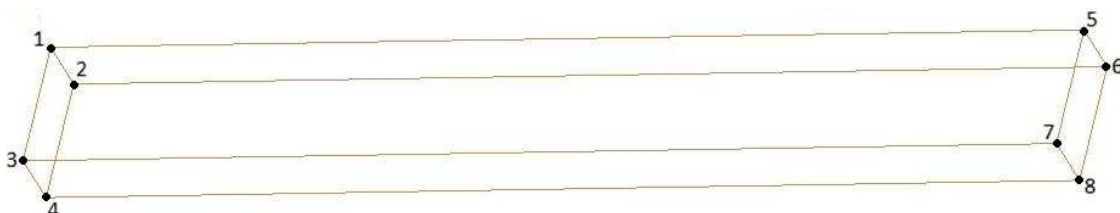
Les quatre carrosseries tenen les mateixes característiques de mallat. Per tant, els paràmetres corresponents seran comuns per a tots.

A diferència del cos d'Ahmed, però, aquí simulem els busos amb un pla de simetria per així estalviar hores de càlcul, tal i com ho realitza Kim en estudis semblants (Kim 2004, 2005).

Característiques geomètriques externes

Igual que el domini computacional del cos d'Ahmed, hem establert unes proporcions semblants en la dimensió del túnel de vent virtual en funció de la longitud de l'autocar. Els quatre autocars tenen una longitud total de 12,2 metres, una alçada de 3,4 metres i una amplada de 2,55 metres (1,275 metres quan l'introduïm en el túnel amb simetria). L'entrada respecte la part frontal de l'autocar es dues vegades la seva longitud, l'alçada és de l'ordre 4 vegades l'altura del cos. L'amplada del túnel correspon a 5 vegades l'amplada de l'autocar aproximadament. La distància entre la part posterior del vehicle i el túnel és de cinc vegades la seva longitud. Si observem la figura 7 i la taula 12 sabrem justament la ubicació dels punts.

- *Coordenades del domini computacional (metres).*



pesants de transport de passatgers.

Figura 7. Ubicació dels punts. L'origen de coordenades en x es situa a la part frontal del vehicle.

Punts	X	Y	Z
1	-25	0	12
2	-25	-6	12
3	-25	0	0
4	-25	-6	0
5	75	0	12
6	75	-6	12
7	75	0	0
8	75	-6	0

Taula 12. Coordenades del domini computacional dels autocars (m). L'origen en x correspon a la part frontal del vehicle.

- *Noms de les superfícies:*

- Domini computacional:

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

- Tipus de casos:

- Bus 1
- Bus 2
- Bus 3
- Bus 4

També cal dir que hem considerat autocars com un sol bloc, es a dir, sense superfícies separades.

- Paràmetres de densitat:

Aquest pren per valor 0,4. A la figura 8, taula 13 podem veure la ubicació dels punts.

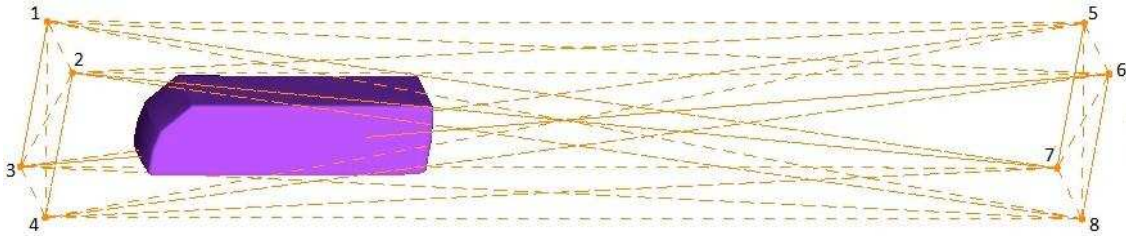


Figura 8. Ubicació dels punts de la densitat dels autocars.

Punts	X	Y	Z
1	-5	0	7
2	-5	-4	7
3	-5	0	0
4	-5	-4	0
5	40	0	7
6	40	-4	7
7	40	0	0
8	40	-4	0

Taula 13. Coordenades de densitat dels quatre autocars (m).

Paràmetres de la malla

- Mides globals de la malla:
 - Factor d'escala = 1
 - Element màxim = 1
 - Creixement dels prismes = Exponencial
 - Altura inicial = 0.015
- Mides per parts de la malla (veure taula 15).

Parts	Mida màxima(m)	Altura (m)	Proporció d'alçada	Nº capes
<i>Fluid</i>	1.0	-	-	-
<i>Bus 1, 2, 3 i 4</i>	0.1	0	0	1
<i>Túnel/Base</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Tapa Superior</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Frontal</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Lateral Dret</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Simetria</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Tapa Post.</i>	1	0	0	0

Taula 14. Mides del mallat dels busos.

Volum de malla

- Superfície:
 - iteracions = 5
 - Qualitat = 0.4
- Volum:
 - Factor d'escala: 1
 - Factor d'expansió: 1

Capa límit

- Proporció dels prismes = 1.5
- Nº capes = 6

Planxat

- Nº iteracions = 5
- Qualitat de planxat = 0.2

Condicions de contorn

➤ Autocars:

- Bus 1: Wall
- Bus 2: Wall
- Bus 3: Wall
- Bus 4: Wall

➤ Túnel:

- Túnel/Base : Wall / velocitat = 28 (m/s)
- Túnel/Tapa Superior : Wall
- Túnel/Frontal : Velocity-inlet
- Túnel/Lateral Dret : Wall
- Túnel/Simetria : Simetry
- Túnel/Tapa Posterior: Otflow, pressure outlet

A continuació a la taula 15 mostrem la informació de mallat obtinguda de l'execució per a cadascun dels autocars.

Busos	Bus 1	Bus 2	Bus 3	Bus 4
Tipus d'elements				
NODE	50	55	46	14
LINE_2	2462	2654	2679	2704
TETRA_4	738352	778151	670158	744320
TRI_3	63128	64052	62104	64346
PENTA_6	166644	82293	161388	174252
QUAD_4	2244	1119	2160	2268

pesants de transport de passatgers.

Element parts (Nº)

BODY (aire)	904996	860444	831546	918572
BUS	29421	29276	28766	30896
TUNEL/CURVES	858	858	858	850
TUNEL/BASE	12294	12322	13117	12288
TUNEL/DARRERE	376	376	375	376
TUNEL/FRONTAL	375	375	6202	375
TUNEL/LAT_DRET	6203	6198	15129	6201
TUNEL/SIMETRIA	15324	15444	376	15305
TUNEL/TAPA	3027	3025	3024	3027
<i>Total elements cos</i>	29421	29276	28766	30896
<i>Total elements del túnel</i>	37599	37740	38223	37572
Total d'elements	972880	928324	898535	987904
Total de nodes	222308	186618	208232	227428

Taula 15. Informació del tipus de mallat dels busos.

3.3. Simulació numèrica.

Metodologia emprada

- Gas: Aire.
- Segregate flow: Flux segregat
- Motion stationari: Moviment es estacionari.
- Ideal gas: Gas ideal.
- Stady: Flux estacionari.
- Turbulent: K-Epsilon turbulent.

L'elecció del model de turbulència és la mateixa que l'explicada del cos d'Ahmed.

- Intensitat de turbulència : 0,1

Condicions de contorn

- Cos : Wall / slip
- Túnel/Base : Wall / no slip / amb velocitat = [28, 0, 0] (*m/s*)

pesants de transport de passatgers.

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

- Túnel/Tapa Superior : Wall / slip
- Túnel/Frontal : Velocity-inlet / 28 (m/s) / Intensitat de turbulència = 0,1
- Túnel/Lateral Dret : Wall / slip
- Túnel/Simetria : Wall / slip
- Túnel/Tapa Posterior: Pressure Outlet / 0.0 Pa /Intensitat de turbulència = 0,1

Propietats pel coeficient aerodinàmic

- Densitat de l'aire: 1.2047 Kg/m^3
- Velocitat de l'aire: 28 m/s
- Àrea del cos: 4.2585 m^2
- Direcció de l'aire : [1.0, 0.0, 0.0]
- Pressió :0.0 Pa

Cal destacar que, aquí i amb diferència al que s'havia fet per al cos d'Ahmed, el terra del túnel es mou amb una velocitat idèntica a la incident del flux. Això intenta simular un vehicle realment en moviment, tal i com realitza Kim (2004, 2005) en els seus estudis sobre aerodinàmica en autocars. Val a dir, també, que la malla utilitzada en el nostre estudi és molt semblant al de l'estudi de Kim (2004, 2005) on utilitzava una versió del mateix programari aquí utilitzat anomenat STAR-CD.

3.4. Resultats obtinguts.

En aquest apartat mostrarem els resultats numèrics obtinguts. El coeficient d'arrossegament es pot veure a la taula 19, com també els resultats visuals desde diferents magnituds i diferents plans de tall.

En les simulacions, els residus assoleixen valors de l'ordre de 10^{-3} o inferiors amb un nombre d'iteracions superior a 3000 per a cada cas.

	Coeficient d'arrossegament C_d	Coeficient de sustentació C_l
Bus 1	0,251	- 0,326

Bus 2	0,227	-0,459
Bus 3	0,262	-0,359
Bus 4	0,174	-0,370

Taula 16. Valors dels diferents coeficients aerodinàmics obtinguts com les mitjanes en les 100 últimes iteracions quan els residus s'han estabilitzat amb un valor inferior a 10^{-3} .

Dels resultats de la taula 16 cal destacar que el bus 3 no comporta una millora en el coeficient aerodinàmic. Aquest resultat, sorprenent a priori, haurà d'ésser analitzat amb més detall en estudis posteriors.

A continuació mostrem el mòdul de la velocitat en diferents plans transversals per als quatre autocars. A més, per poder visualitzar el flux, també es mostra la projecció del vector velocitat sobre el pla. Veiem previament en la figura 24 la distància de plans que hem escollit, la major part a l'estela del cos.

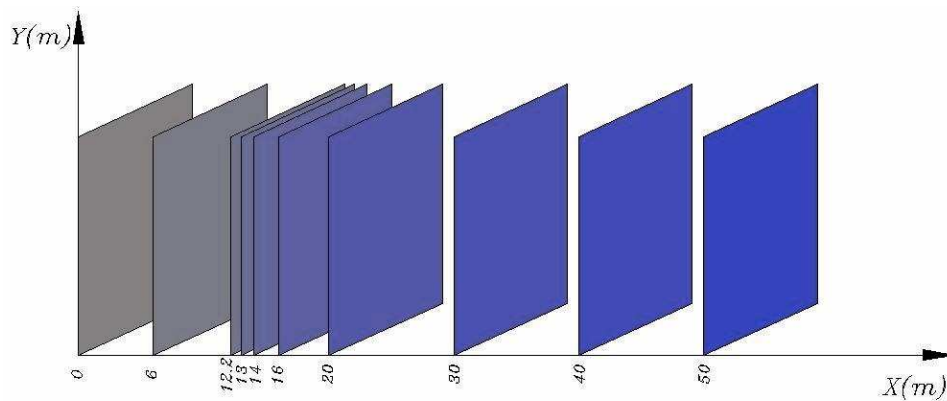


Figura 9. Posicionament dels plans de tall realitzats. La distància $x = 0$ correspon al davant del vehicle.

Bus Nº 1

A la figura 9(a) i figura 9(b) observem les característiques de l'aire en cada un dels plans de tall anomenats anteriorment (veieu Figura 9). Aquest plans són la projecció d'aproximadament la meitat de l'alçada del túnel i la totalitat de l'amplada vist frontalment.

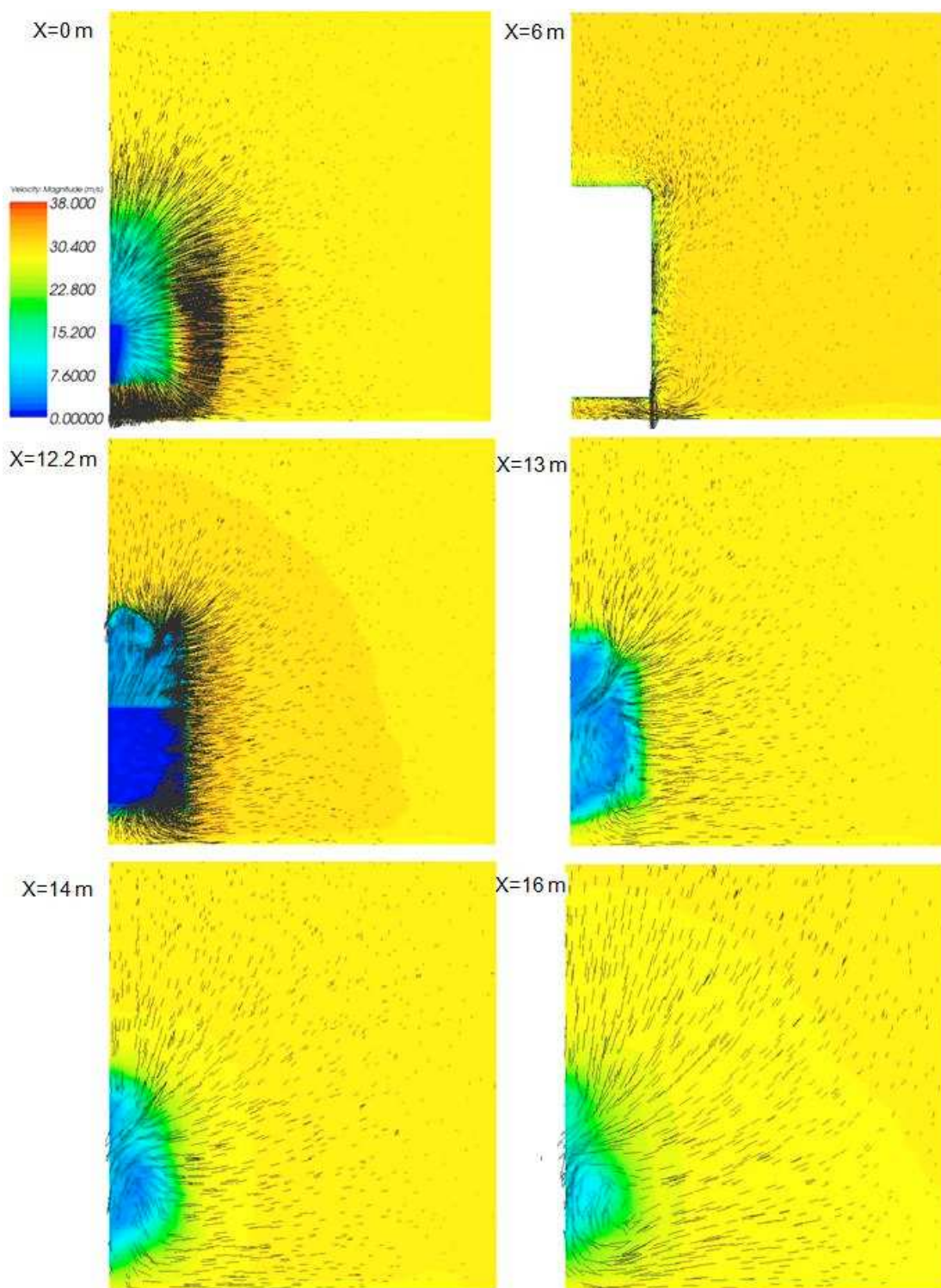


Figura 9(a). Bus N° 1. Vectors velocitat i mòdul de velocitats (colors) en diferents posicions transversals. Per a cada gràfic, l'eix y correspon al pla de simetria.

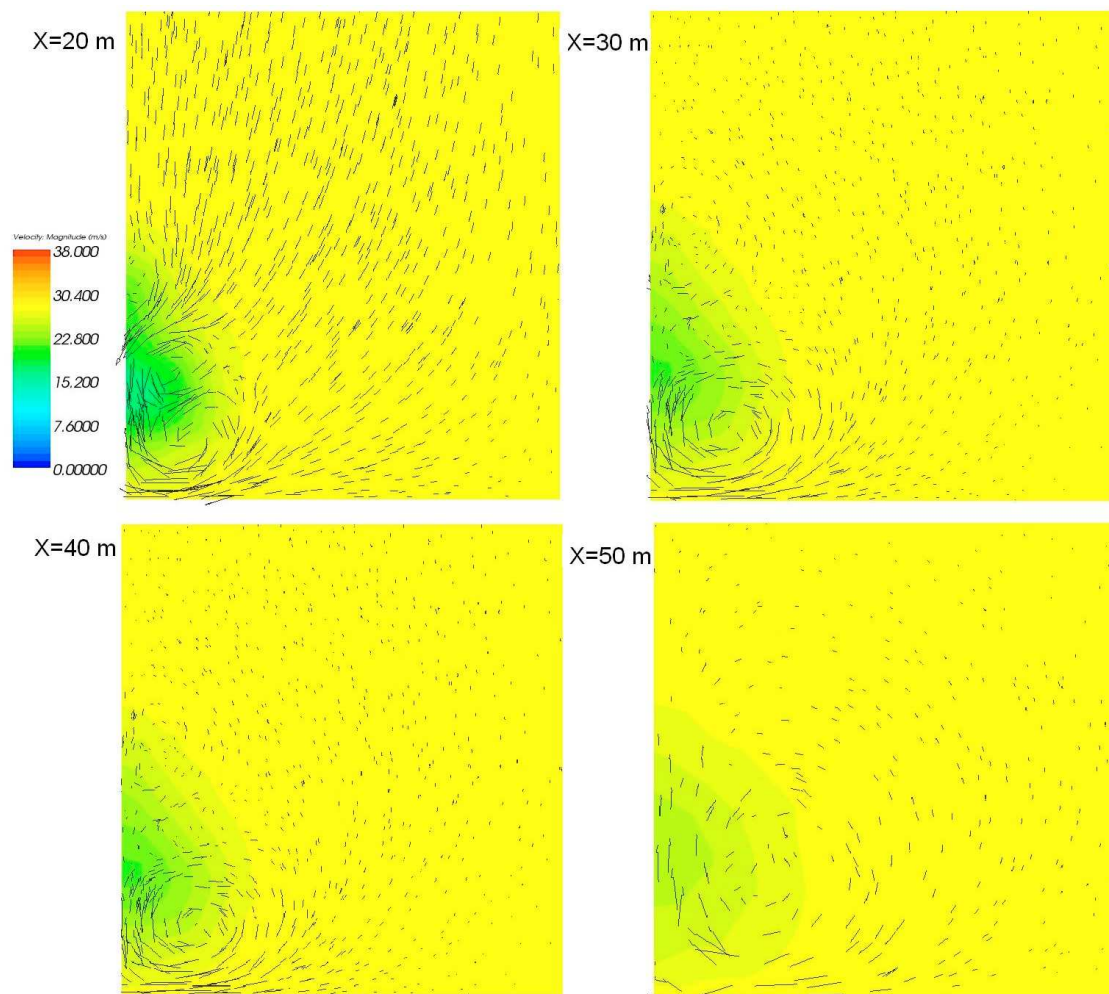


Figura 9(b). Bus N° 1. Vectors velocitat i mòdul de velocitats (colors) en diferents posicions transversals. Per a cada gràfic, l'eix y correspon al pla de simetria.

De la Figura 9 s'observa l'existència del vòrtex característic de la part inferior del vehicle i, com aquest va desapareixent a mesura que ens allunyem en l'estela. Alhora, el centre d'aquest vòrtex augmenta en altura i en separació horitzontal del vehicle a mesura que ens allunyem de la part posterior. Aquests resultats són molt semblants als obtinguts per Kim (2004, 2005) en l'estudi d'un autocar de dimensions més reduïdes.

També és pot observar a la figura 10, figura 11 la magnitud de la velocitat en el pla de tall longitudinal al la zona del bus i a l'estela respectivament.

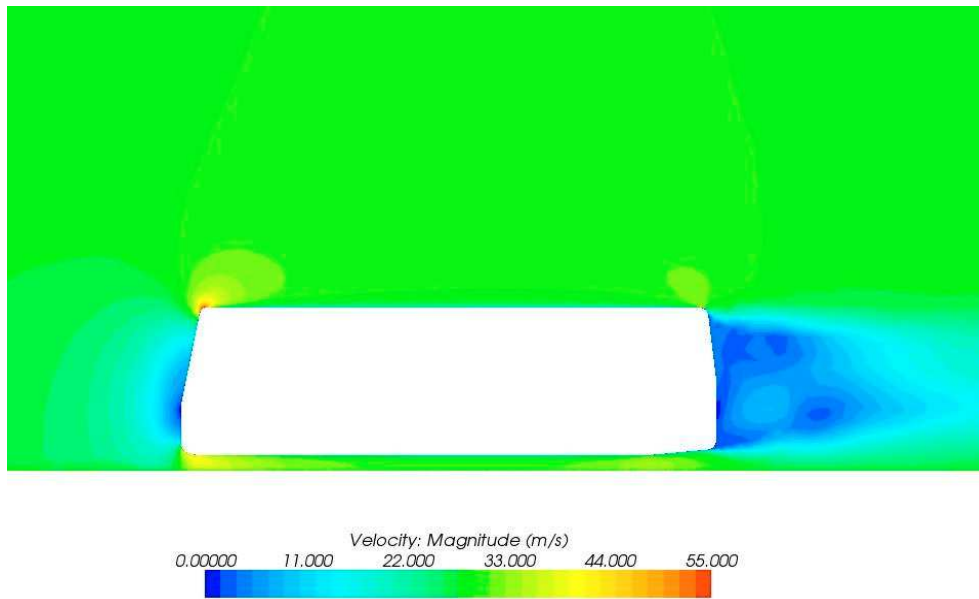


Figura 10. Mòdul de la velocitat al pla de simetria del bus N° 1. El sentit del flux és cap a la dreta.

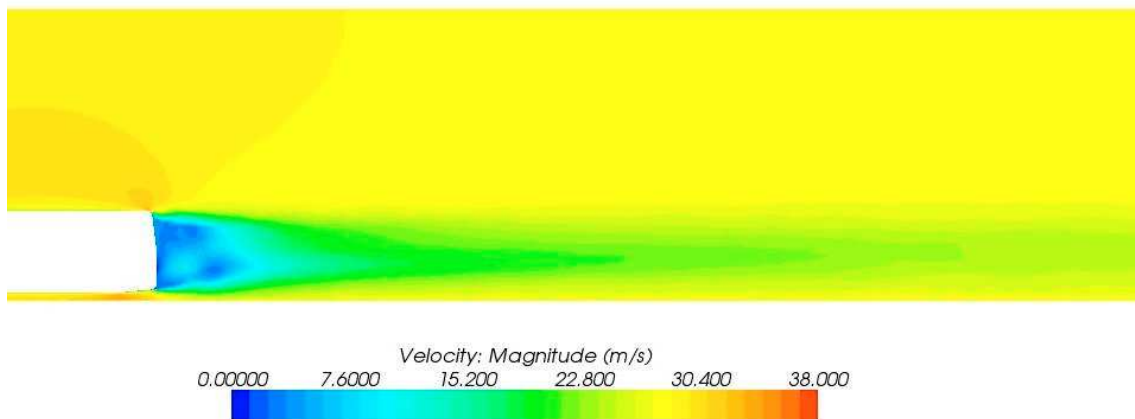


Figura 11. Mòdul de la velocitat a la zona de l'estela del bus N° 1.

A la figura 12 es pot veure la direcció dels vectors de velocitat en el pla de simetria.

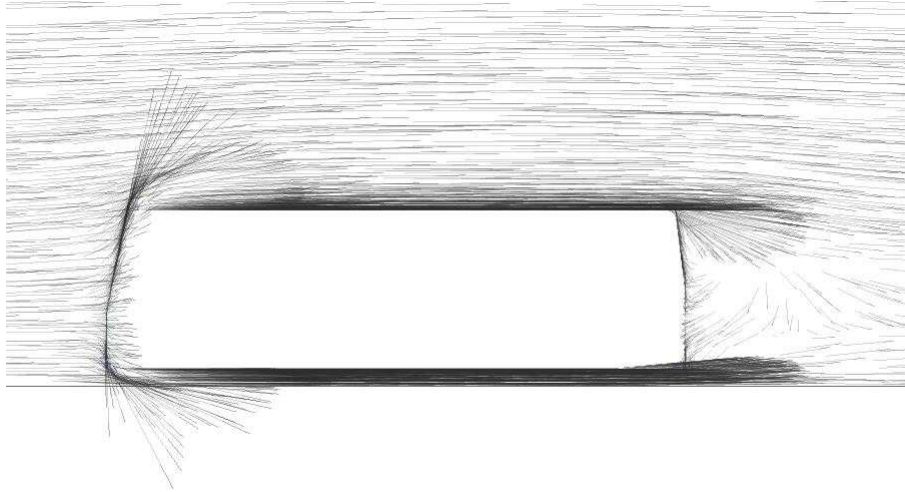


Figura 12. Direcció dels vectors de velocitat del bus N° 1.

La Figura 12 també revela un comportament del flux molt semblant al trobat per Kim (2004, 2005) en l'estudi aerodinàmic de vehicles autocars en situacions semblants. Això dóna un cert grau de confiança vers el resultat aquí obtingut.

Les figura 13, figura 14 i figura 15 mostra l'estat de pressions a la superfície frontal, superfície posterior i a la simetria respectivament del bus N°1. Observem com els valors són positius a la part frontal, exceptuant les vores, on l'acceleració de l'aire provoca una reducció en la pressió estàtica.

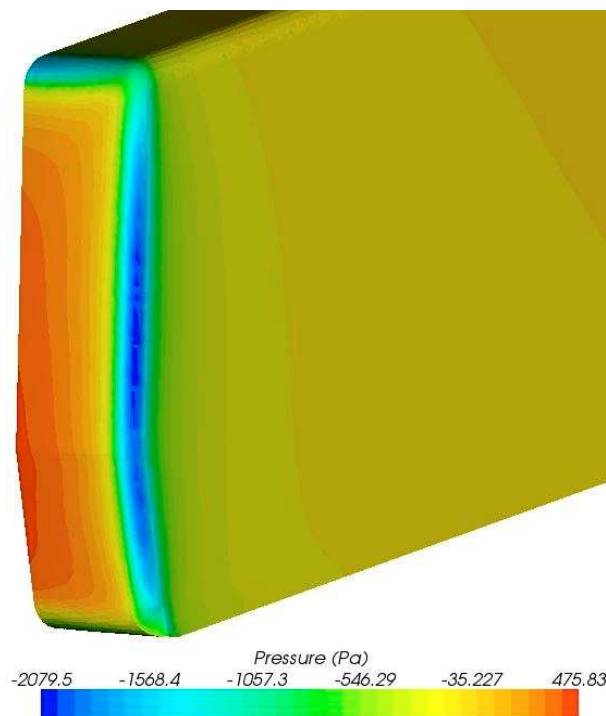


Figura 13. Estat de pressions a la superfície frontal del bus N° 1.

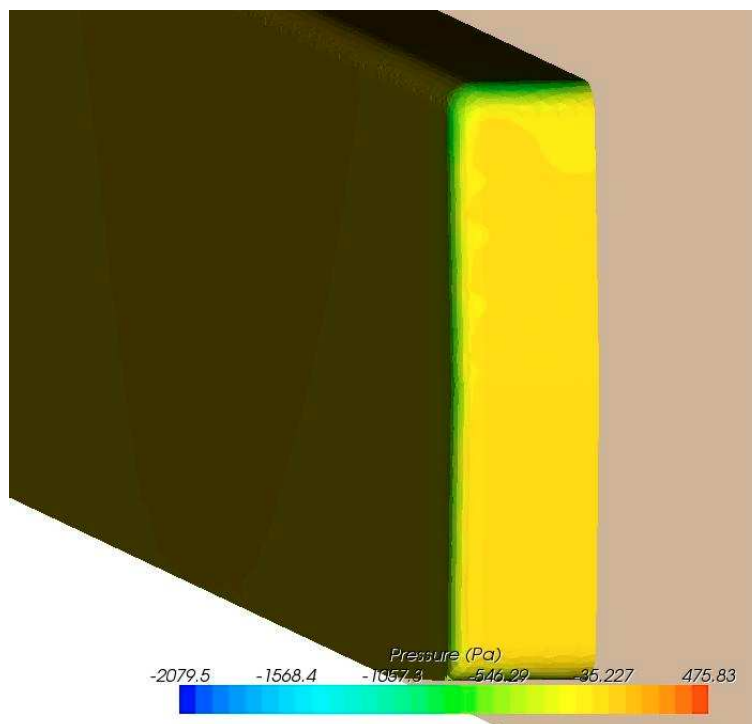


Figura 14. Estat de pressions a la superfície posterior del bus Nº 1.

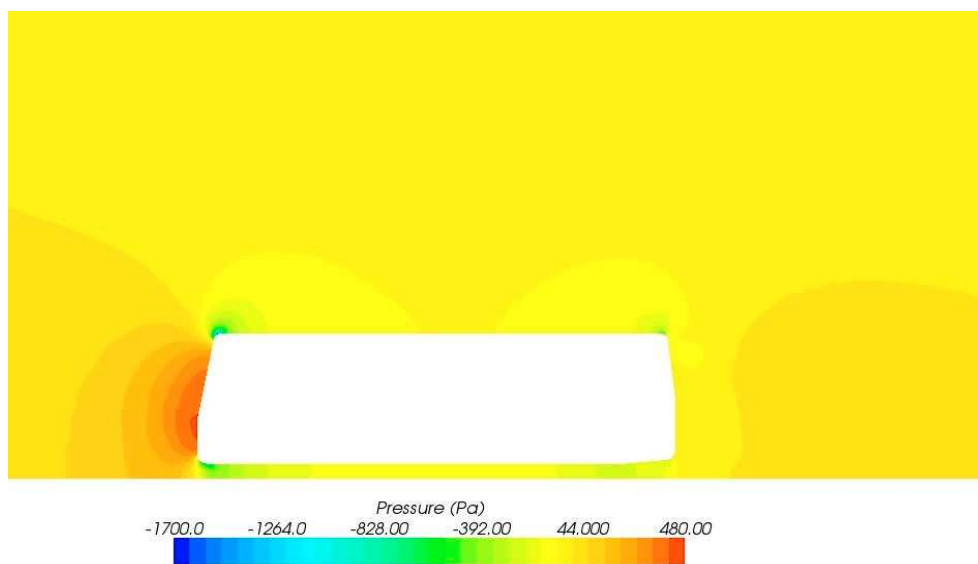


Figura 15. Estat de pressions al pla de simetria del bus Nº 1. El sentit del flux és cap a la dreta. La longitud del bus és de 12.2 m.

Especialment interessant és la Figura 15 on s'observa com la pressió al frontal del bus és molt elevada. Una reducció d'aquest valor en nous dissenys podria reduir el coeficient aerodinàmic i, d'aquí, millorar l'eficiència del vehicle.

Bus Nº 2

A continuació, reproduïm per al bus 2 les Figures mostrades per al bus 1.

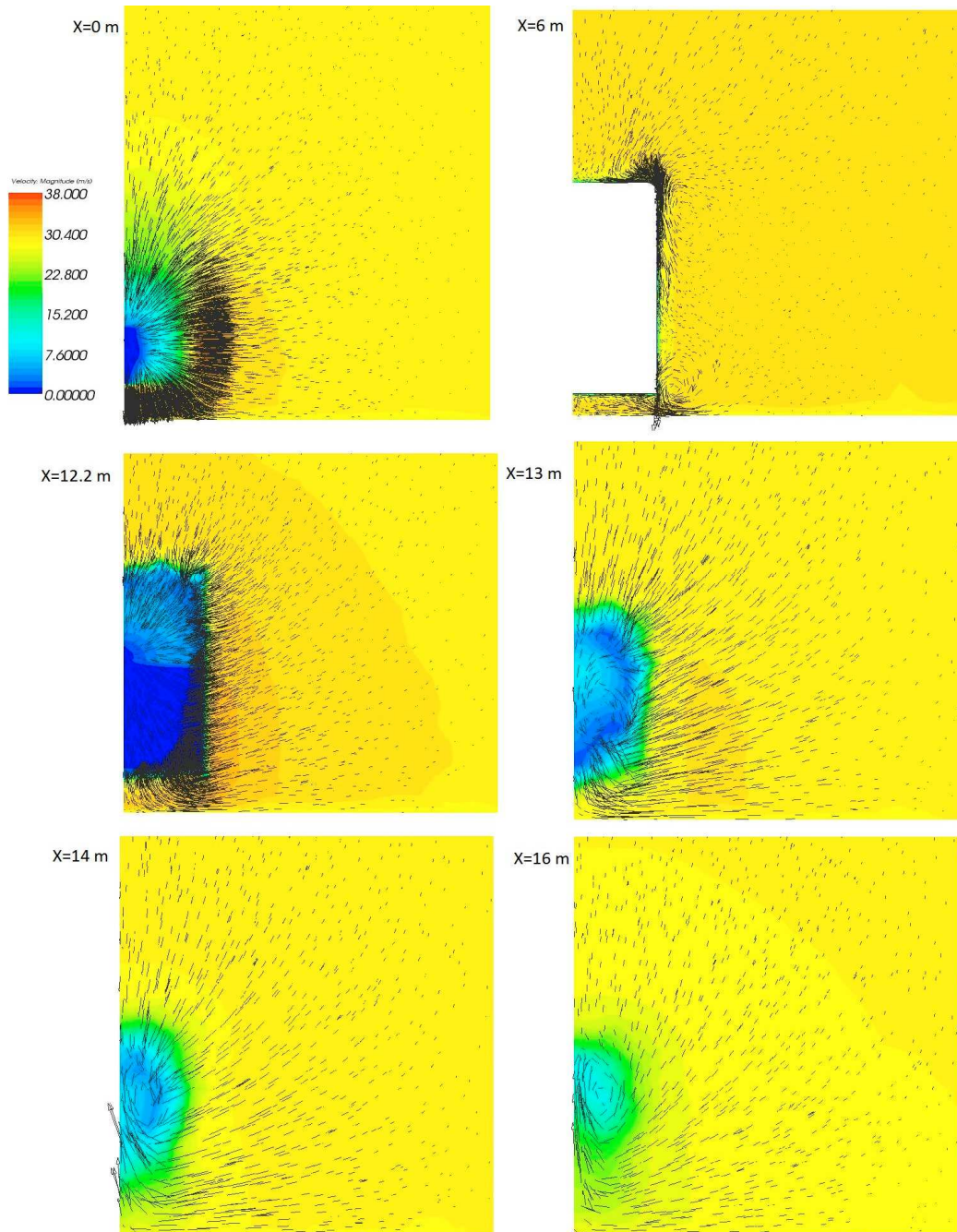


Figura 16(a). Bus Nº 2. Vectors velocitat i mòdul de velocitats (colors) en diferents posicions transversals. Per a cada gràfic, l'eix y correspon al pla de simetria.

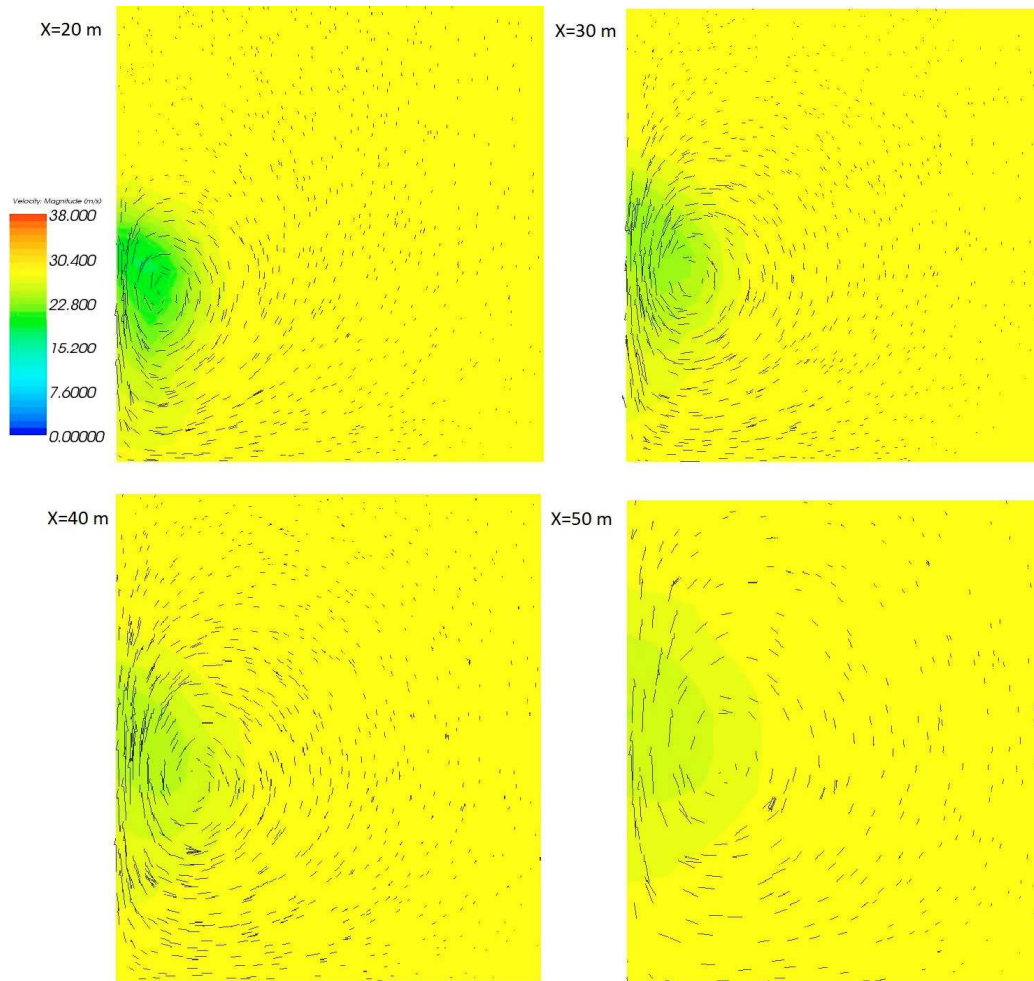


Figura 16(b). Bus N° 2. Vectors velocitat i mòdul de velocitats (colors) en diferents posicions transversals. Per a cada gràfic, l'eix y correspon al pla de simetria.

En comparació amb la carrosseria estàndard del bus 1, la modificació en la carrosseria a partir d'augmentar l'angle d'inclinació de la part frontal superior comporta una variació molt important en el patró del flux en l'estela.

En efecte, en aquest cas, el vòrtex no s'observa arran de terra sinó que evoluciona a una certa altura. Això comporta una separació de la capa límit més allunyada del cos i, per tant, una reducció en el coeficient d'arrossegament, tal i com es confirma en la taula 16.

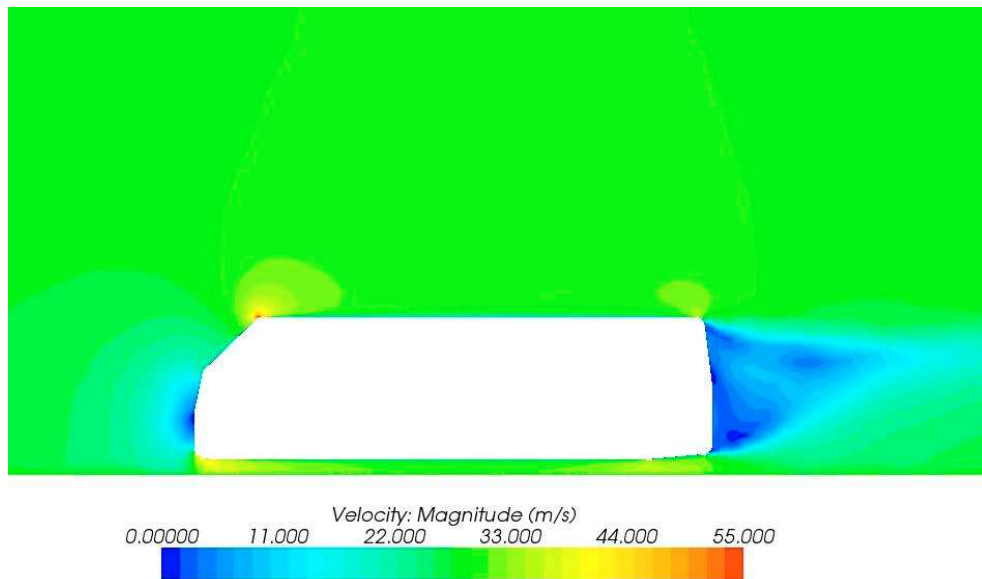


Figura 17. Mòdul de la velocitat al pla de simetria del bus N° 2. El sentit del flux és cap a la dreta. El bus té 12,2 m de longitud.

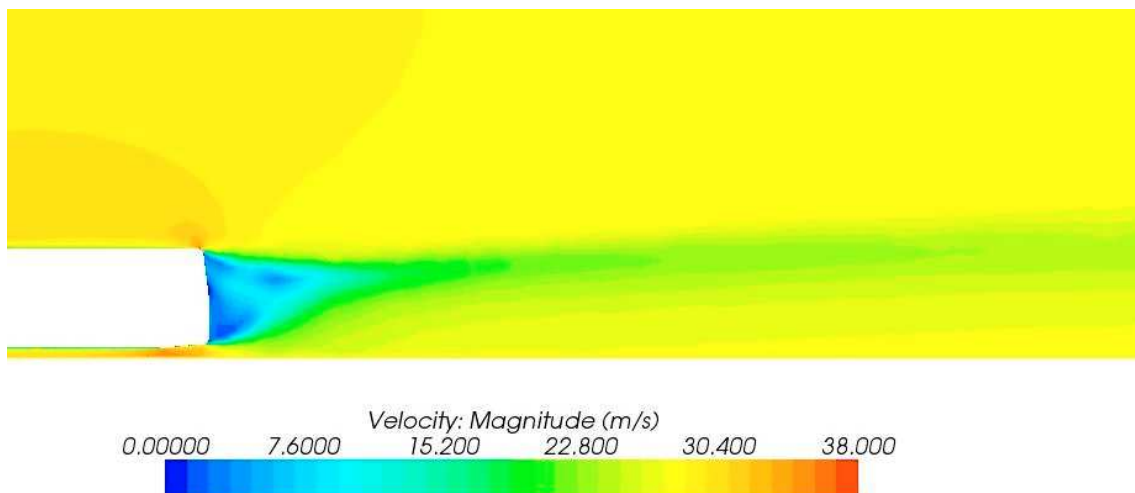


Figura 18. Mòdul de la velocitat a la zona de l'estela del bus N° 2.

És molt interessant observar com, en comparació amb la figura 11, la figura 18 mostra que l'estela assoleix una altura superior al del bus 11. A més, que la zona de contraflux és més elevada.

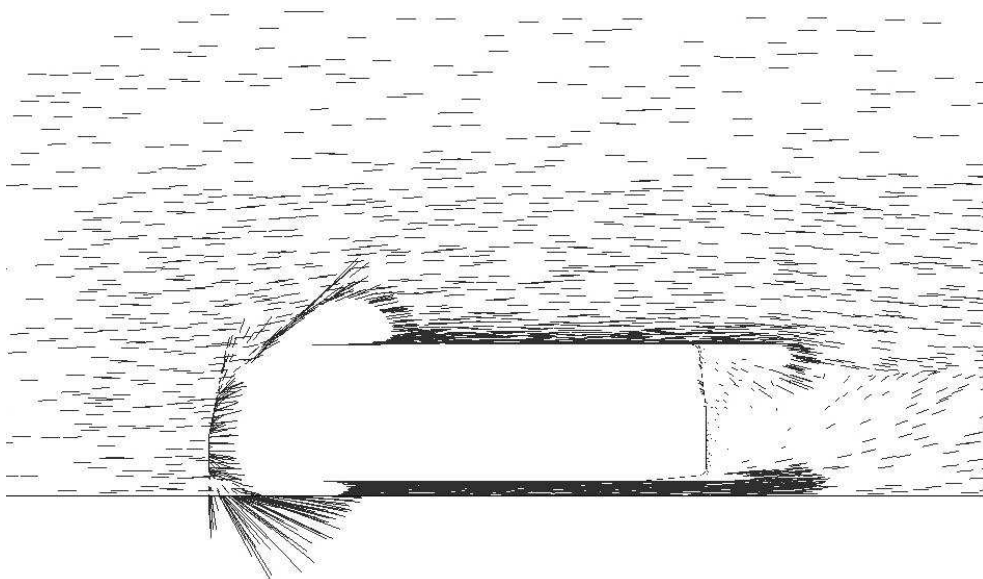


Figura 19. Direcció dels vectors de velocitat del bus N° 2.

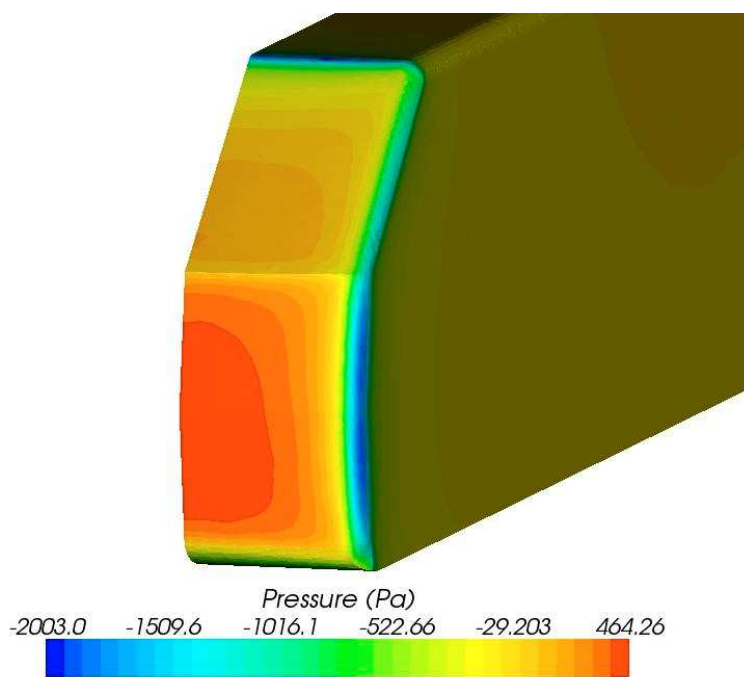


Figura 20. Estat de pressions a la superfície frontal del bus N° 2.

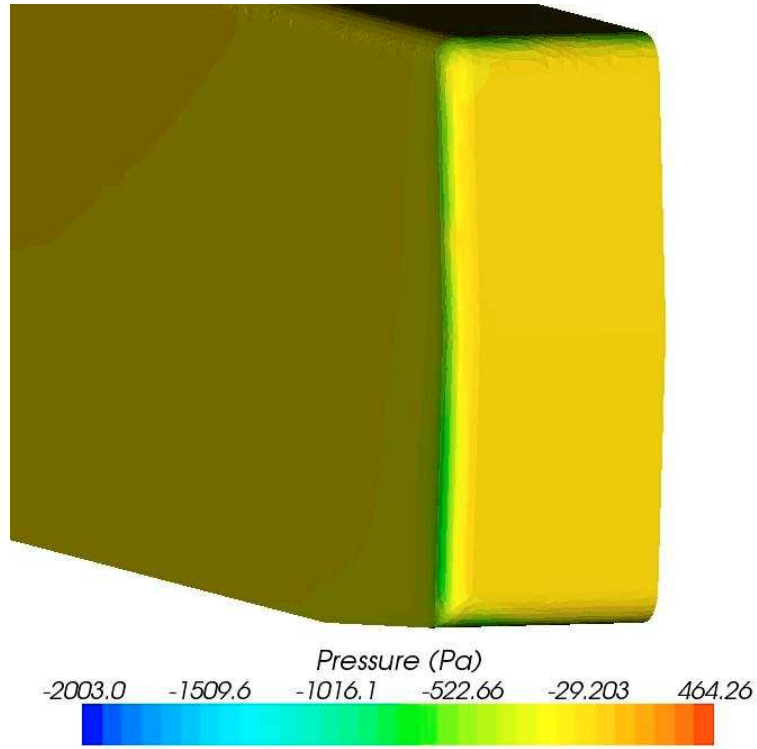


Figura 21. Estat de pressions a la superfície posterior del bus Nº 2.

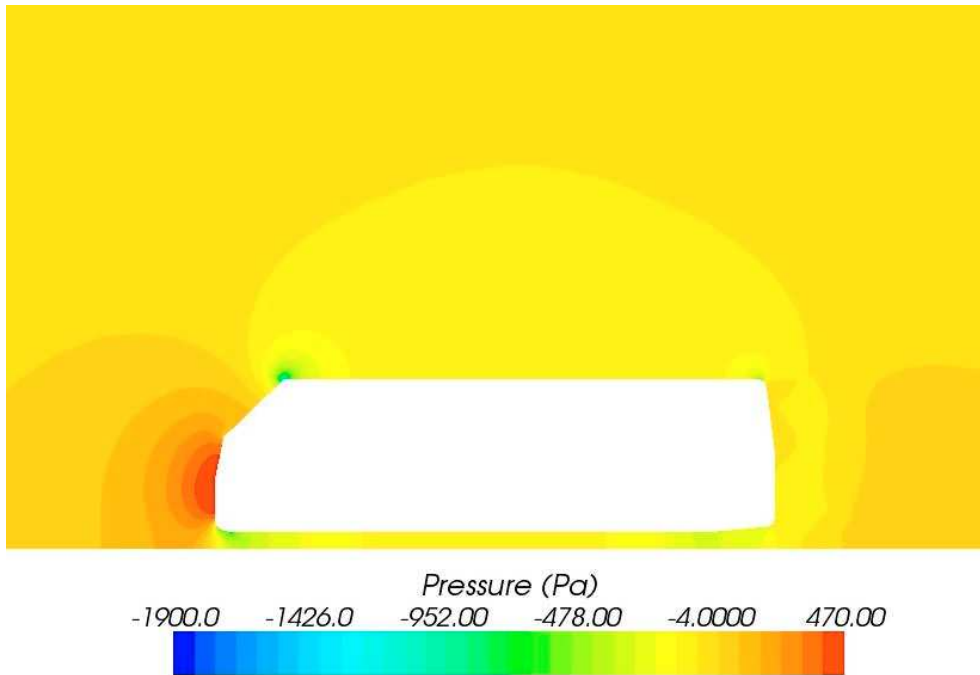


Figura 22. Estat de pressions al pla de simetria del bus Nº 2. . El sentit del flux és cap a la dreta. La longitud del bus és de 12.2 m.

Cal notar que, en comparació amb la figura 15, la figura 22 mostra una reducció en la pressió frontal de l'autocar, afavorida per la inclinació de la part superior del

frontal. Això és una de les principals causes de la reducció en el coeficient d'arrossegament.

Bus Nº 3

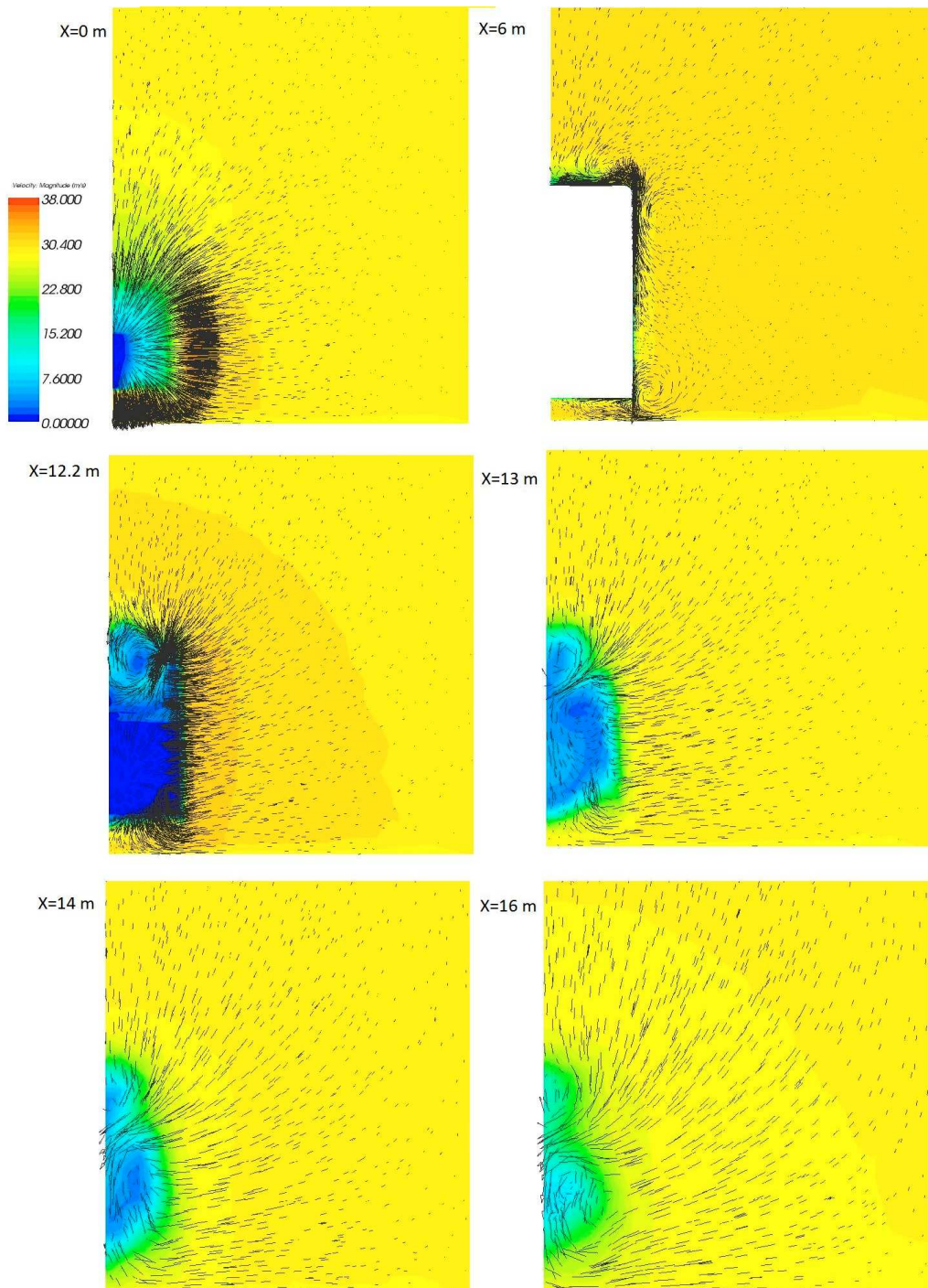


Figura 23(a). Bus Nº 3. Vectors velocitat i mòdul de velocitats (colors) en diferents posicions transversals.
Per a cada gràfic, l'eix y correspon al pla de simetria.

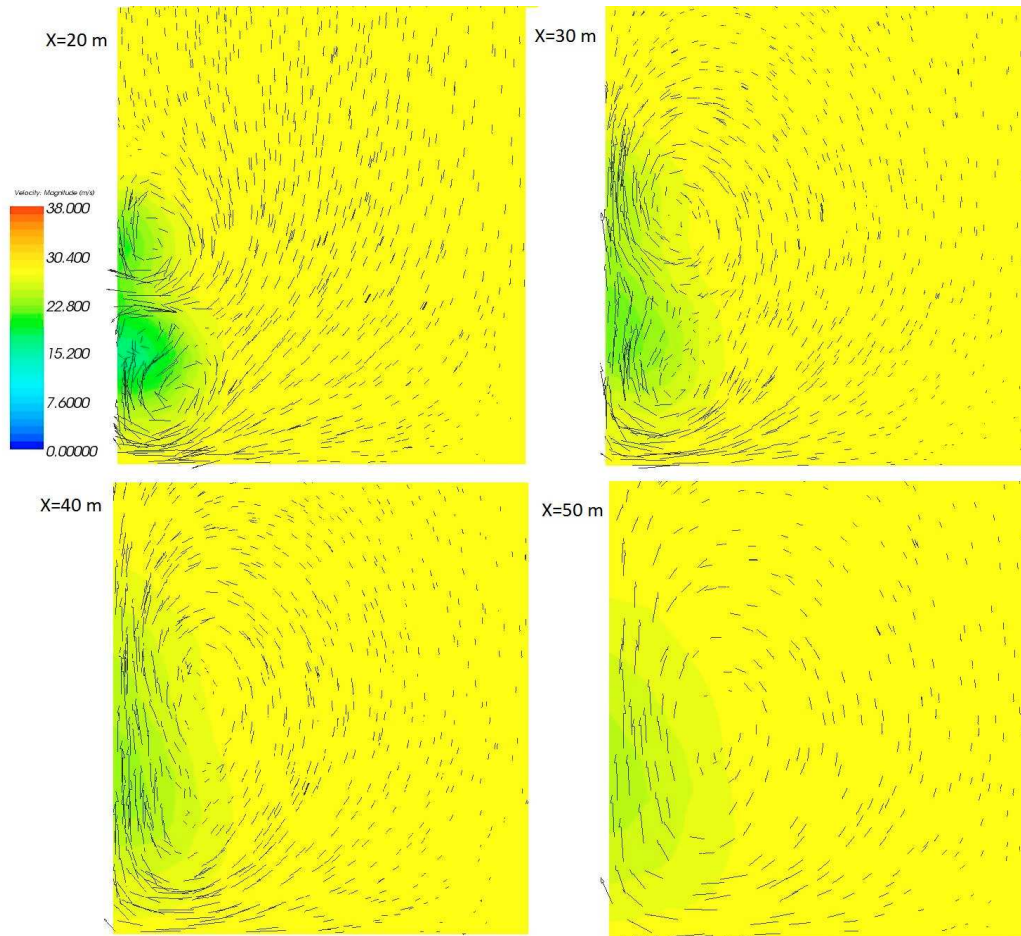


Figura 23(b). Bus N° 3. Vectors velocitat i mòdul de velocitats (colors) en diferents posicions transversals.
Per a cada gràfic, l'eix y correspon al pla de simetria.

A diferència dels casos per als busos 1 i 2, aquesta superior inclinació del frontal de l'autocar, genera no un sinó dos vòrtexs que produeixen una millor fricció i un superior coeficient d'arrossegament. Això també s'observa amb la figura associada a l'estela del cos (Figures 25 i 25). Aquest cas, però, haurà d'ésser estudiat amb més detall en estudis posteriors.

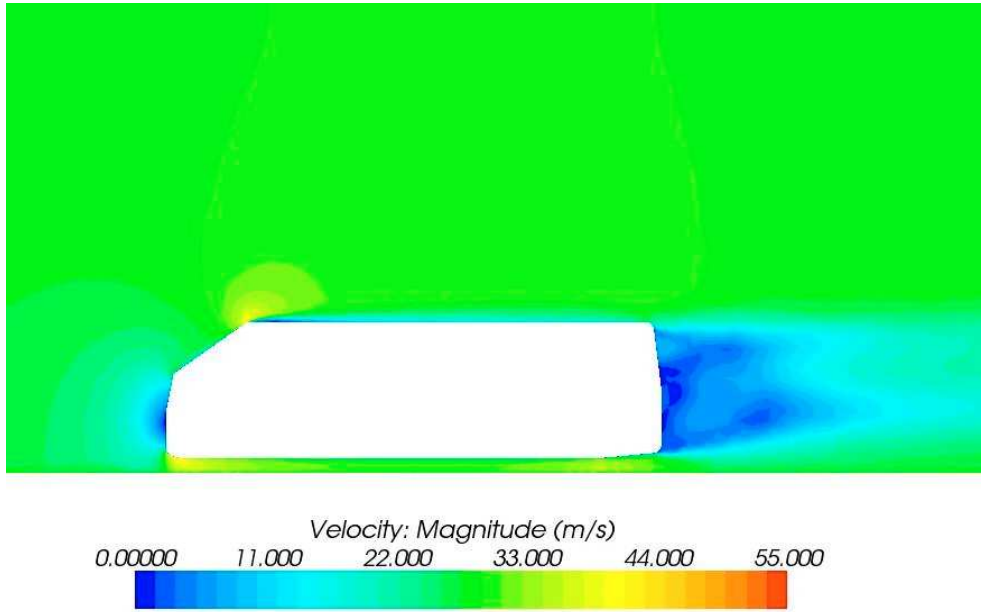


Figura 24. Mòdul de la velocitat al pla de simetria del bus N° 3.

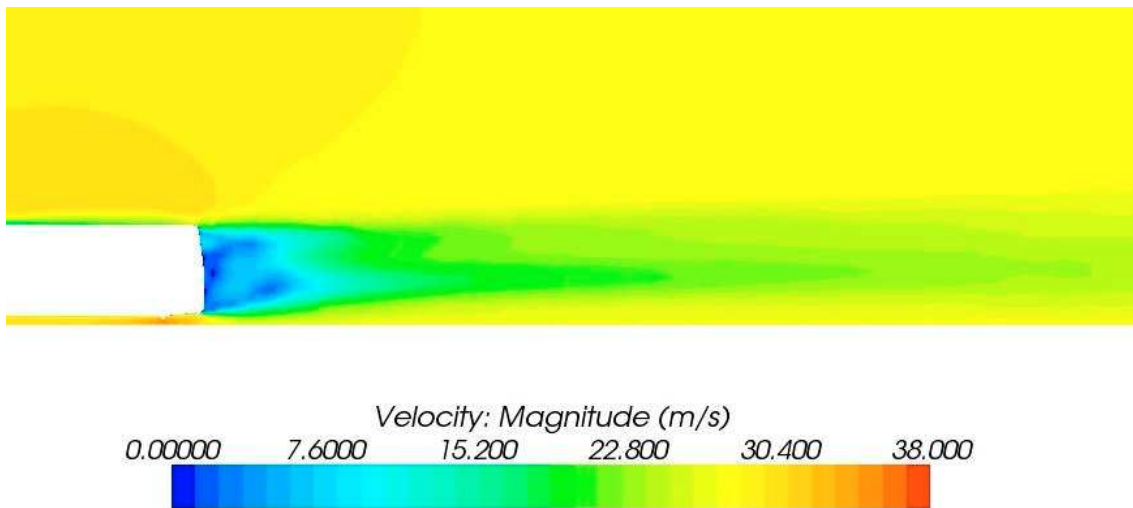


Figura 25. Mòdul de la velocitat a la zona de l'estela del bus N° 3.

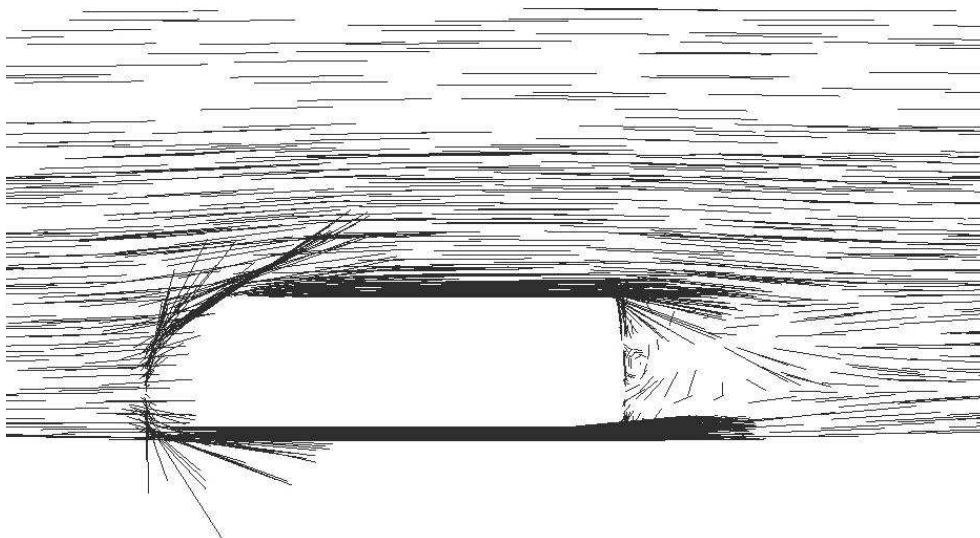


Figura 26. Direcció dels vectors de velocitat del bus N° 3.

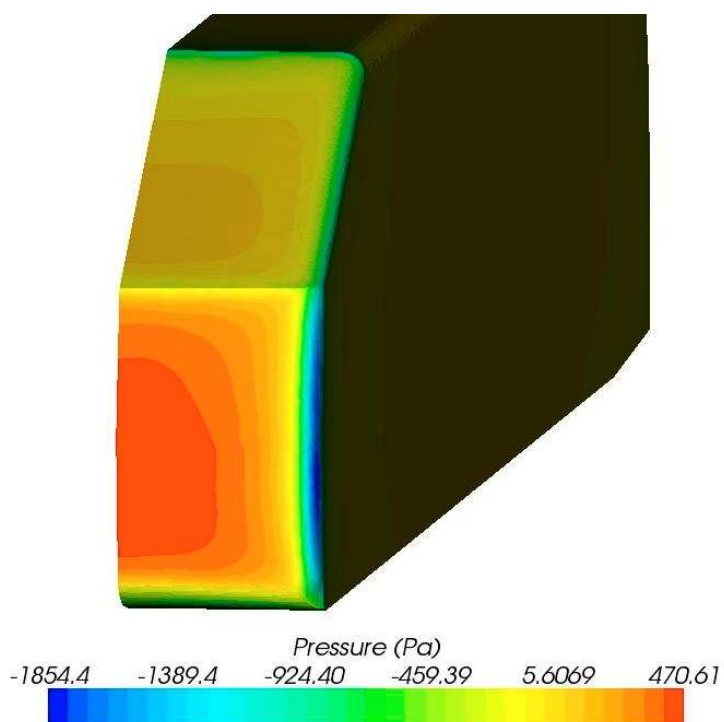


Figura 27. Estat de pressions a la superfície frontal del bus N° 3.

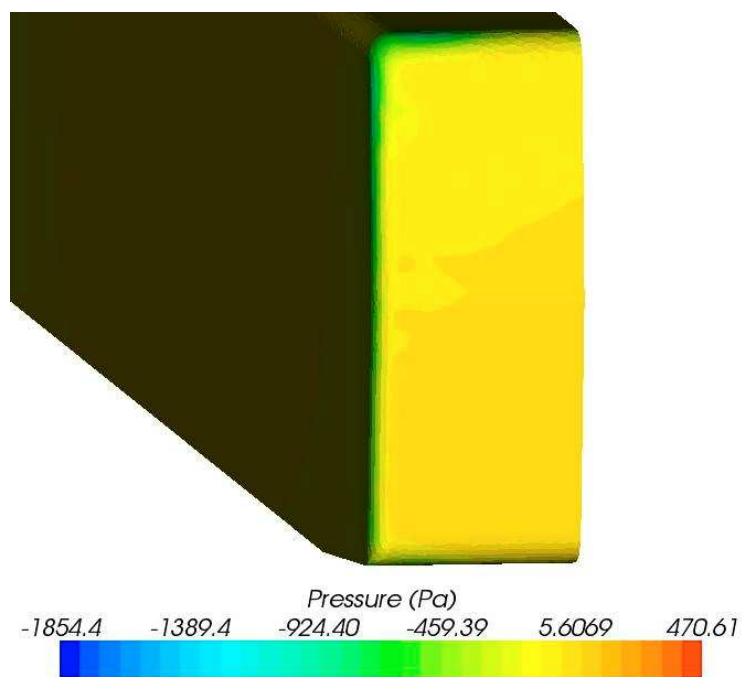


Figura 28. Estat de pressions a la superfície posterior del bus N° 3.

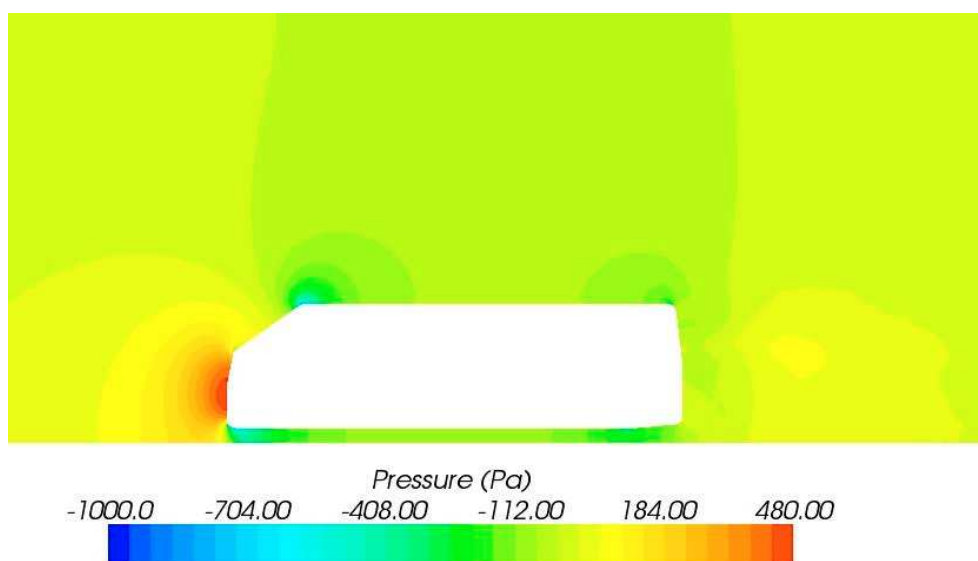


Figura 29. Estat de pressions al pla de simetria del bus N° 3.

Bus Nº 4

Com en els tres casos anteriors, aquí mostrem els resultats del mòdul de la velocitat i de la pressió en diferents plans.

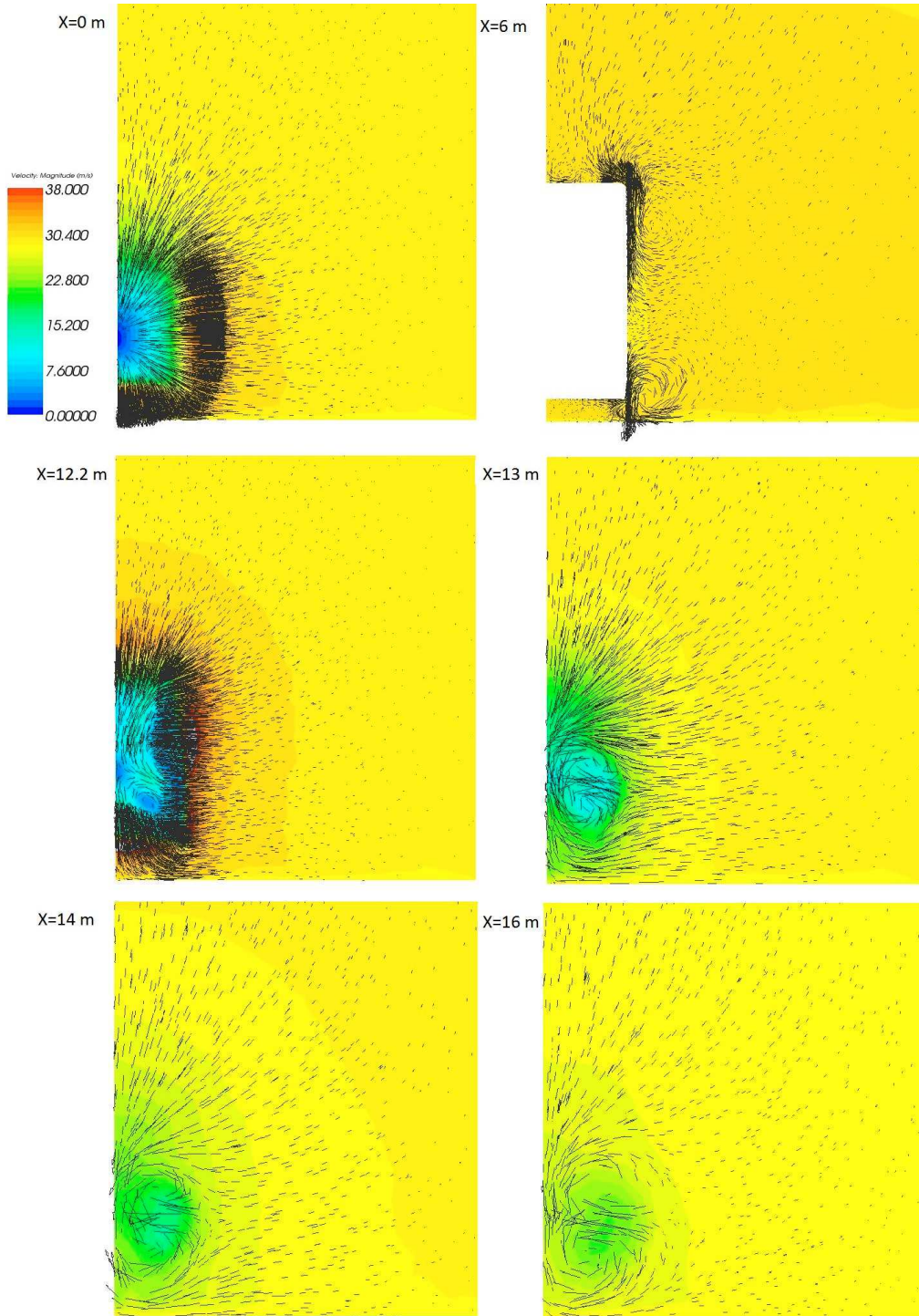


Figura 30(a). Bus Nº 4. Vectors velocitat i mòdul de velocitats (colors) en diferents posicions transversals. Per a cada gràfic, l'eix y correspon al pla de simetria.

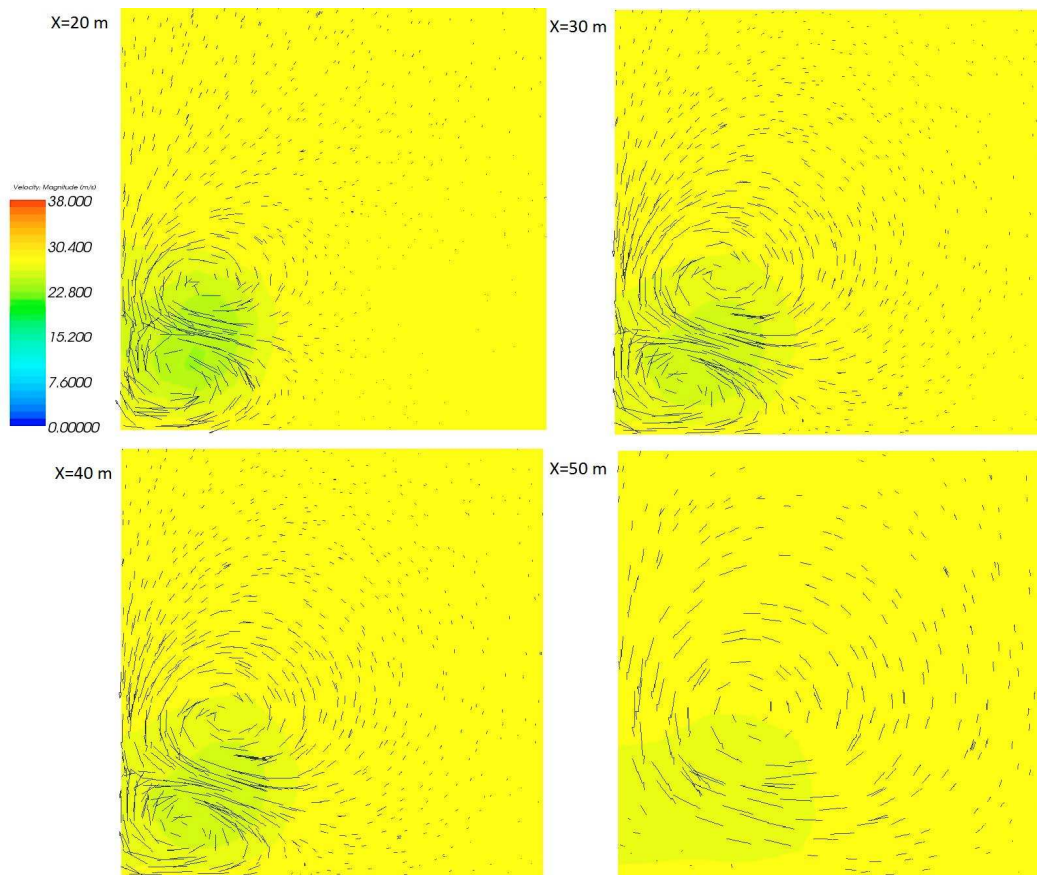


Figura 30(b). Visualització Bus N° 3. Vectors velocitat i mòdul de velocitats (colors) en diferents posicions transversals. Per a cada gràfic, l'eix y correspon al pla de simetria.

En les Figures 30a-b s'observa, també, que la inclinació del frontal provoca dos vòrtexs (a diferència dels casos 1 i 2). Tanmateix, el vòrtex superior es separa més de la superfície que en el cas 3. Això comporta una fricció menor que en el cas 3. És molt interessant observar, aquí, com l'estela es redueix de forma molt apreciable degut a la influència del vòrtex superior, tal i com s'observen a les Figures 31 i 32. Aquest fet es confirma en la Figura 33, on es representen els vectors del mòdul de velocitat.

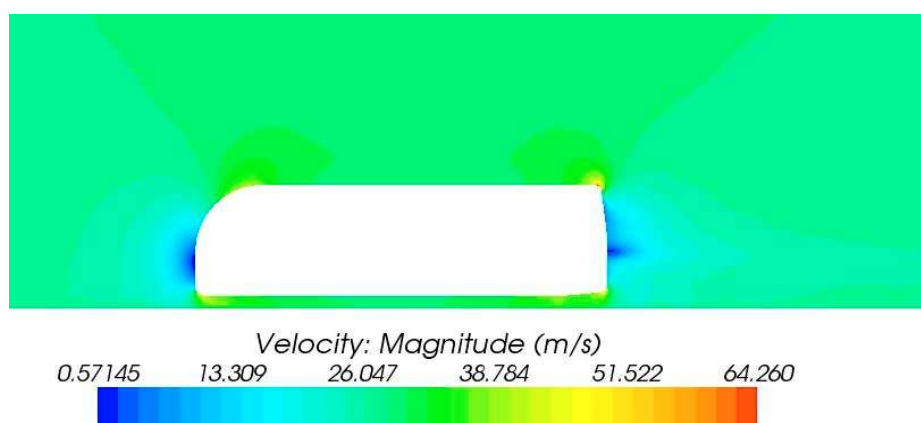


Figura 31. Mòdul de la velocitat al pla de simetria del bus N° 4.

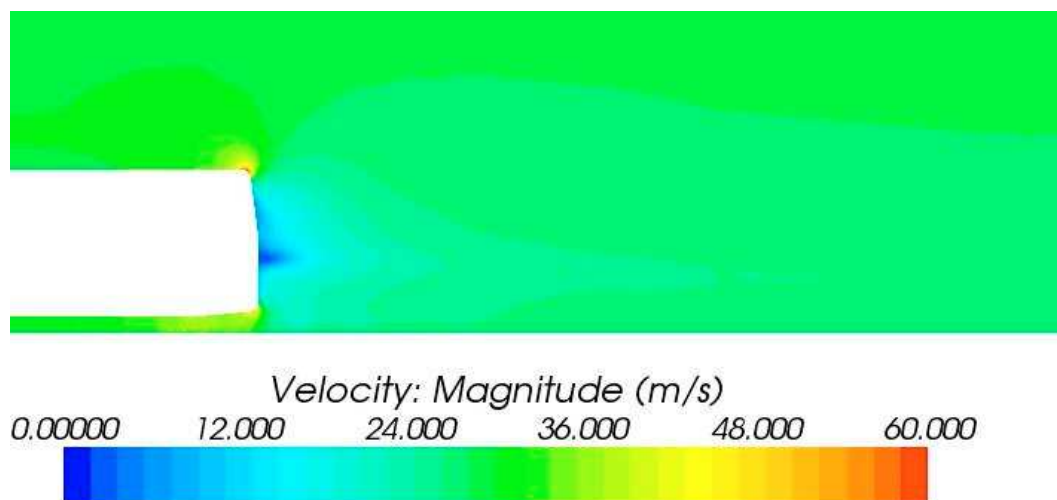


Figura 32. Mòdul de la velocitat a la zona de l'estela del bus N° 4.

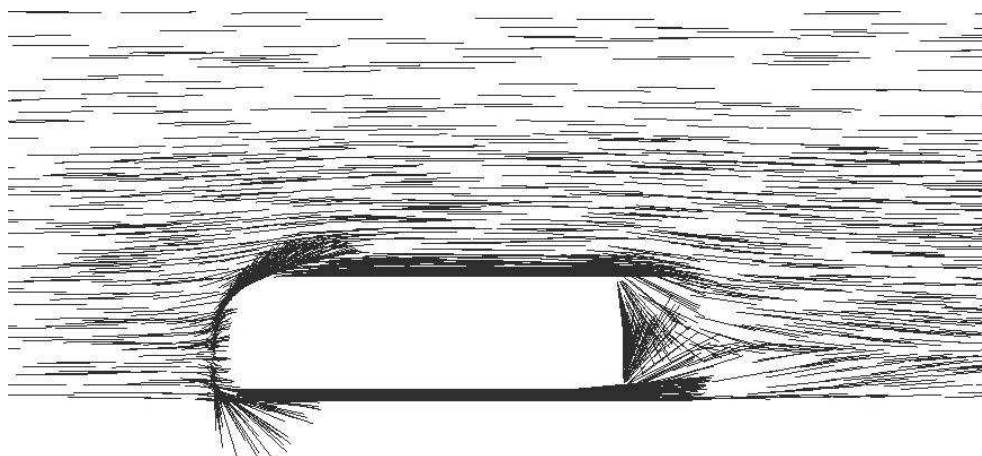


Figura 33. Direcció dels vectors de velocitat del bus N° 4.

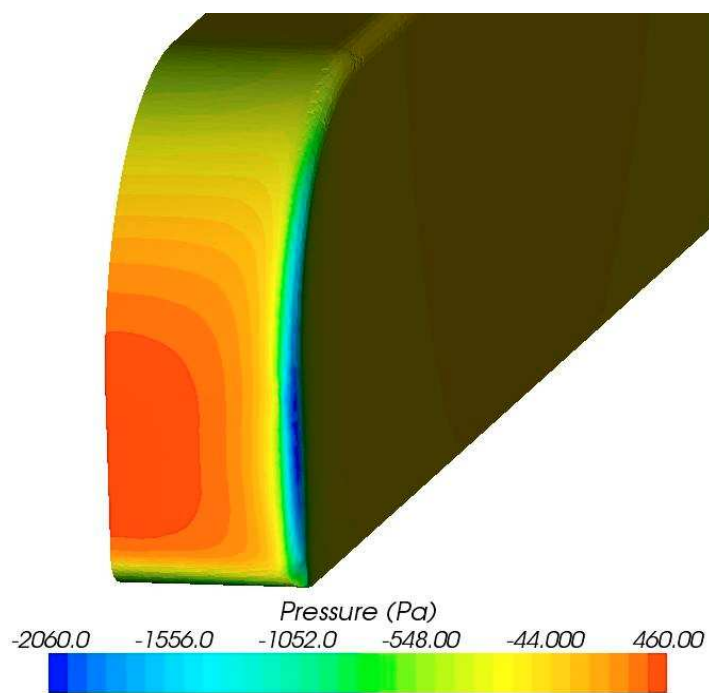


Figura 34. Estat de pressions a la superfície frontal del bus N^o4.

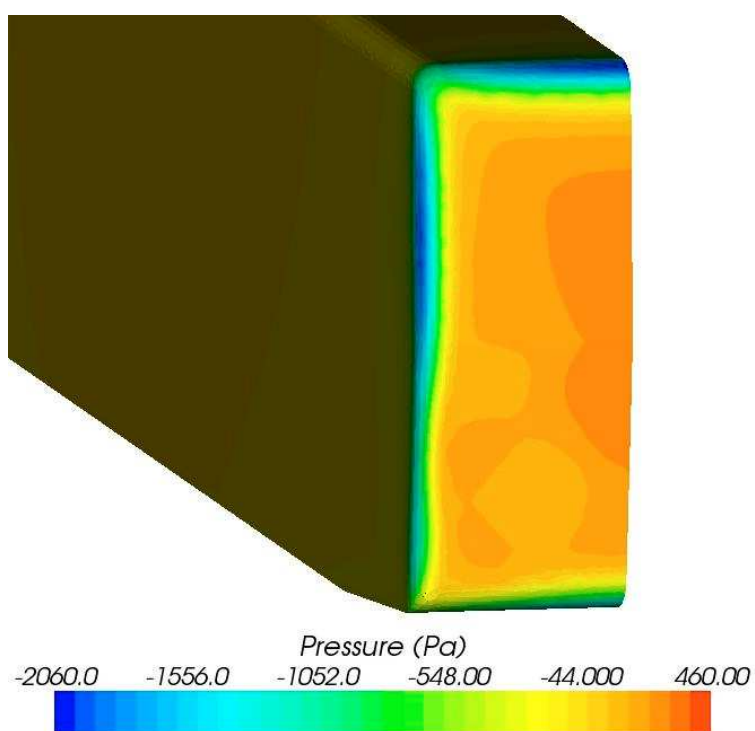


Figura 35. Estat de pressions a la superfície posterior del bus N^o 4.

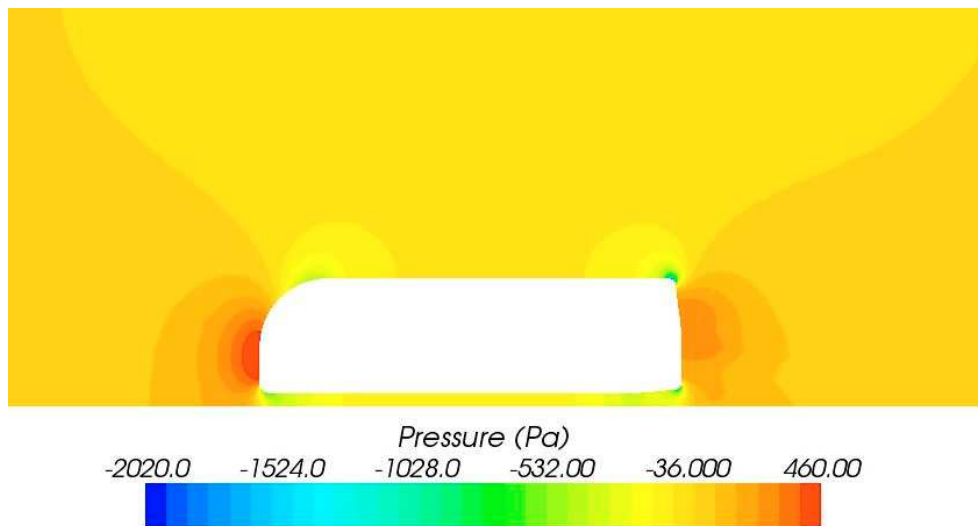


Figura 36. Estat de pressions al pla de simetria del bus N° 4.

Especialment significativa és la Figura 36 on, tot i que la pressió a la part frontal és semblant a la dels casos anteriors, la pressió a la part posterior del vehicle és considerablement elevada, reduint de forma significativa el coeficient d'arrossegament. Aquest augment de pressió en la part posterior del vehicle és produït per l'entrada d'un gran flux lateral a mitja altura, tal i com s'observen en les figures anteriors.

3.5. Conclusions.

Hem analitzat quatre carrosseries diferents d'autocar de mercat amb una malla de dimensions i qualitat semblants a les utilitzades per Kim (2004, 2005) en estudis similars. S'ha aplicat el programari STAR – CCM+ per obtenir el camp de velocitats i per al càlcul dels coeficients aerodinàmics.

El bus 1 correspona a una carrosseria tipus clàssica, estudiada per diversos autors com Kim (2004, 2005). El bus 2 conté una petita modificació en la part superior frontal del vehicle que disposa d'un major angle d'inclinació. El bus 3 és com el bus 2 però encara amb més inclinació. Finalment, el bus 4 correspon a un disseny més arrodonit de la part frontal sense arestes vives.

Els resultats per al bus 1 són molt semblants als que obté Kim (2004, 2005) en una carrosseria semblant, malla similar i model de simulació basat en el mateix tractament numèric. Això dóna indicacions del bon comportament de la simulació.

Per al bus 2, s'observa un patró de flux lleugerament diferent al del bus 1, sobretot pel que respecte a la forma de l'estela del vehicle que fa reduir el coeficient d'arrossegament.

Per al bus 3, però, la major inclinació de la part frontal superior genera dos vòrtexs i no un com en els busos 1 i 2. Aquests dos vòrtexs en contacte amb la superfície del cos augmenten la fricció i, a la part posterior, modifiquen l'estela del vehicle. Això comporta un augment en el coeficient d'arrossegament. Per suposat, un resultat d'aquestes característiques s'haurà d'analitzar amb detall en estudis posteriors.

Per al bus 4, també es formen dos vòrtexs però un d'ells més allunyat de la superfície. Això genera un flux d'entrada important a la part posterior del vehicle que n'augmenta la pressió. D'aquesta forma, el coeficient d'arrossegament es redueix considerablement.

De forma més concreta podem observar que el bus N^o 2 té un 9.64% menys de coeficient aerodinàmic que el bus N^o 1. El bus N^o 4 és el que menys coeficient de resistència té. Aquest respecte el bus N^o 1 baixa un 30.89%, respecte el N^o 2 un 23.47%, i respecte el bus N^o 3 un 33.68%. Cal notar que, d'acord amb els suggeriments de Nihan i Sullivant (1979), una reducció del 40% en el coeficient aerodinàmic comporta una reducció en el consum de combustible del 20%. D'aquesta forma, la carrosseria de disseny N^o 4 comportaria una reducció del 15% en el consum de combustible, en referència al disseny convencional del bus 1. Això vol dir un estalvi de combustible d'uns 4 a 5 litres cada 100 km, comportant un estalvi econòmic i energètic molt important al cap de l'any.

Val a dir, però, que l'acceptació del bus 4 com a disseny òptim hauria d'incloure altres elements que aquí, per simplificar, no s'han inclòs. Per exemple, els efectes dels miralls retrovisors, de l'equip d'aire condicionat al sostre del vehicle, etc., poden variar els resultats aquí obtinguts i reduir el nivell d'eficàcia de la carrosseria del bus 4. S'haurien de dur a terme nous estudis en aquest camp.

4. ESTUDI AERODINÀMIC DE DIFERENTS COMPLEMENTS EN LA CARROSSERIA D'AUTOCARS.

4.1. Introducció.

En aquest apartat realitzem l'última part del projecte, on s'han analitzat diferents afegits aerodinàmics proposats per diversos autors per intentar reduir el coeficient aerodinàmic del bus número 4.

Hem comprovat anteriorment que l'autobús 4 és el que té menys coeficient aerodinàmic, per tant el que menys resistència oposa a l'aire.

S'ha escollit aquest perquè al tenir menys resistència voldrà dir que si s'aconsegueix baixar aquest, els altres tres també s'aconseguirien reduir amb el mateix sistema emprat, però això si amb diferent proporció de reducció ja que els frontals del busos son diferents.

L'estudi desenvolupat consisteix en quatre dissenys posteriors amb força semblança entre ells però variant petites factors tal i com proposen diversos autors.

Si ens fixem amb l'annex G veurem la diferència que hi ha en cadascú d'ells. El primer consisteix en un afegit posterior seguint la mateixa línia que l'autobús de sèrie però variant l'angle final del vehicle tant per la part de sobre com per als laterals.

A la figura 37 es pot veure l'afegit realitzat. A simple vista es veu el canvi que s'hi ha fet (veure annex H). Aquests tipus de modificacions són semblants a les que s'apliquen en semiremolcs de grans dimensions.

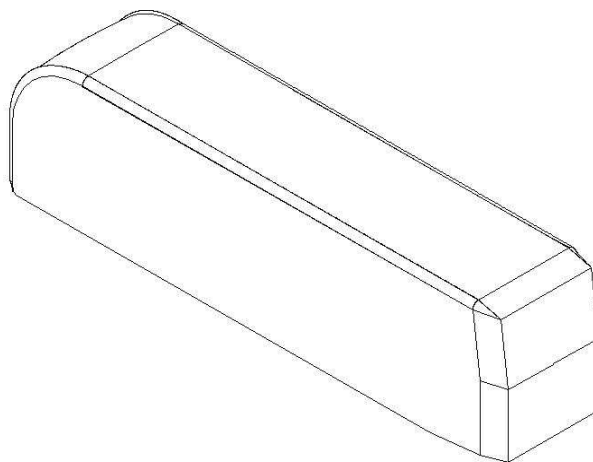


Figura 37. Modificació del bus N°4.

Les característiques generals dels autobusos son:

- Primera modificació:

Els angles de fi del vehicle son de 15° respecte l'horitzontal amb un increment de la longitud total de 50 centímetres.

- Segona modificació:

Igual que l'anterior però amb la variant de que els angles de fi son de 35° respecte l'horitzontal, amb el mateix increment de longitud de 50 centímetres.

- Tercera modificació:

Exactament com la primera modificació però sense cap increment de longitud, mantinguent-ne així la longitud inicial de 12,20 metres.

- Quarta modificació:

Exactament com la segona modificació però, al igual que la tercera modificació, sense cap increment de longitud.

4.2. Generació de mallat.

La generació de mallat de totes quatre modificacions han estat realitzades com en l'estudi de les quatre carrosseries, amb mig domini computacional, ja que així es pot arribar a la mateixa conclusió amb menys temps de càlcul (veieu Kim, 2004 i 2005).

Com veurem a continuació els paràmetres del mallat s'apliquen per igual a les quatre modificacions.

Característiques geomètriques externes

Igual que el domini computacional de les diferents carrosseries s'han establert les mateixes proporcions del domini. L'entrada respecte la part frontal de l'autobús és dues vegades la seva longitud, igual que l'alçada, l'amplada rep la mateixa longitud que el vehicle. La distància entre la part posterior del vehicle i el túnel és de cinc vegades la seva longitud. Si observem la figura 38 i la taula 17 sabrem justament la ubicació dels punts.

pesants de transport de passatgers.

- *Coordenades del domini computacional (metres).*

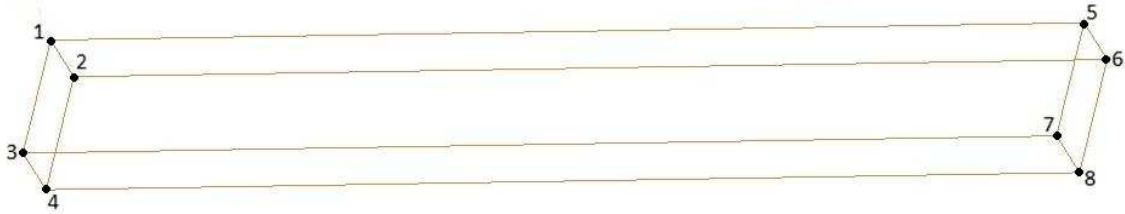


Figura 38. Ubicació dels punts.

Punts	X	Y	Z
1	-25	0	12
2	-25	-6	12
3	-25	0	0
4	-25	-6	0
5	75	0	12
6	75	-6	12
7	75	0	0
8	75	-6	0

Taula 17. Coordenades del domini computacional de les modificacions (metres). $X = 0$ correspon al frontal del vehicle.

- *Noms de les superfícies:*

➤ Domini computacional:

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

➤ Tipus de busos:

- Bus 1^a modificació.
- Bus 2^a modificació.
- Bus 3^a modificació.
- Bus 4^a modificació.

També, com amb l'apartat anterior, s'han considerat els models com a un sol bloc.

- Paràmetres de densitat:

A la figura 39 i a la taula 18 podem veure la ubicació dels punts. A continuació mostrem el valor que rep.

Valor de densitat = Mida màxima dels elements 0,4 metres.

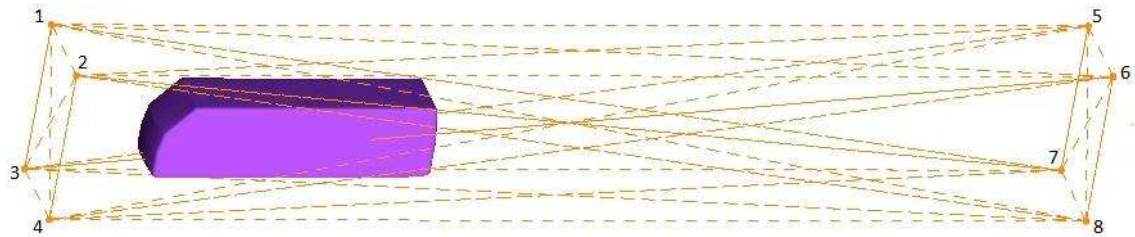


Figura 39. Ubicació dels punts de la densitat dels busos.

Punts	X	Y	Z
1	-5	0	7
2	-5	-4	7
3	-5	0	0
4	-5	-4	0
5	40	0	7
6	40	-4	7
7	40	0	0
8	40	-4	0

Taula 18. Coordenades de densitat de les modificacions (metres). X = 0 correspon al frontal del vehicle.

Paràmetres de la malla

- Mides globals de la malla:
 - Factor d'escala = 1
 - Element màxim = 1
 - Creixement dels prismes = Exponencial
 - Altura inicial = 0.015 m

pesants de transport de passatgers.

- Mides per parts de la malla (veure taula 19):

Parts	Mida màxima(m)	Altura (m)	Proporció d'alçada	Nº capes
<i>Fluid</i>	1.0	-	-	-
<i>Modificació 1, 2, 3, 4 i 5</i>	0.1	0	0	1
<i>Túnel/Base</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Tapa Superior</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Frontal</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Lateral Dret</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Simetria</i>	1	0	0	0
<i>Túnel/Tapa Posterior</i>	1	0	0	0

Taula 19. Mides del mallat dels busos.

Volum de malla

- Superfície:

-iteracions = 5

-Qualitat = 0.4

- Volum:

-Factor d'escala = 1

-Factor d'extensió = 1

Capa límit

-Proporció dels prismes = 1.5

-Nº capes = 6

Planxat

-Nº iteracions = 5

-Qualitat de planxat = 0.2

Condicions de contorn

➤ Busos :

- Bus 1^a modificació: Wall – no slip
- Bus 2^a modificació: Wall – no slip
- Bus 3^a modificació: Wall – no slip
- Bus 4^a modificació: Wall – no slip

➤ Túnel:

- Túnel/Base : Wall / velocitat = 28 (**m/s**)
- Túnel/Tapa Superior : Wall - slip
- Túnel/Frontal : Velocity-inlet
- Túnel/Lateral Dret : Wall - slip
- Túnel/Simetria : Wall - slip
- Túnel/Tapa Posterior: Outflow, pressure outlet

A continuació a la taula 20 mostrem la informació de mallat obtinguda de l'execució per a cada una de les modificacions.

pesants de transport de passatgers.

Modificacions Bus	1^a	2^a	3^a	4^a
Tipus d'elements				
NODE	14	14	14	14
LINE_2	3451	3423	2414	2509
TETRA_4	693451	697230	569215	569002
TRI_3	65618	66456	50152	50148
PENTA_6	181728	187242	125766	125526
QUAD_4	2196	2412	2118	2046
PYRA_5	348	114		
Element parts (Nº)				
BODY (aire)	875527	884586	694981	694528
BUS	32997	33814	22588	22640
TUNEL/CURVES	859	851	787	790
TUNEL/BASE	12260	12233	7300	7316
TUNEL/DARRERE	376	376	376	376
TUNEL/FRONTAL	375	375	375	375
TUNEL/LAT_DRET	6203	6201	6201	6201
TUNEL/SIMETRIA	15175	15418	14029	13980
TUNEL/TAPA	3028	3023	3028	3025
<i>Total elements cos</i>	32997	33814	22588	22640
<i>Total elements del túnel</i>	37417	37626	31309	31273
Total d'elements	946806	956891	749679	749245
Total de nodes	223122	226796	170606	170595

Taula 20. Informació del mallat de les modificacions.

4.3. Simulació numèrica.

Metodologia emprada

- Gas: Aire.
- Segregate flow: Flux segregat
- Motion stationari: Moviment es estacionari.
- Ideal gas: Gas ideal.
- Stady: Flux estacionari.
- Turbulent: K-Epsilon turbulent.

L'elecció del model de turbulència és la mateixa que l'explicada pel cos d'Ahmed i els quatre autobusos.

- Intensitat de turbulència : 0,1

Condicions de contorn

- Cos : Wall / slip
- Túnel/Base : Wall / no slip / amb velocitat = [28, 0, 0] (m/s). Com podem veure la direcció de l'aire és en la direcció x, és a dir frontalment al busos modificats.
- Túnel/Tapa Superior : Wall / slip
- Túnel/Frontal : Velocity-inlet / 28 (m/s) / Intensitat de turbulència = 0,1
- Túnel/Lateral Dret : Wall / slip
- Túnel/Simetria : Wall / slip
- Túnel/Tapa Posterior: Pressure Outlet / 0.0 Pa /Intensitat de turbulència = 0,1

Propietats pel coeficient aerodinàmic

- Densitat de l'aire: 1.2047 Kg/m^3
- Velocitat de l'aire: 28 m/s
- Àrea del cos: 4.2585 m^2
- Direcció de l'aire : [1.0, 0.0, 0.0]
- Pressió :0.0 Pa
- Parts : Nomes el Bus.

4.4. Resultats obtinguts.

En aquest apartat, com amb l'estudi dels quatre busos, mostrarem els resultats numèrics obtinguts (veure la taula 21), com també els resultats visuals desde diferents magnituds i diferents plans de tall.

	<i>Coefficient d'arrossegament</i> Cd	<i>Coefficient de sustentació</i> Cl
1^a modificació	0,245	- 0,2630
2^a modificació	0,236	-0,1760
3^a modificació	0,259	-0,2830
4^a modificació	0,293	-0,3048

Taula 21. Valors coeficients aerodinàmics obtinguts com les mitjanes en les 100 últimes iteracions quan els residus s'han estabilitzats amb un valor inferior a 10^{-3} .

Primer mostrem diferents plans transversals per a les quatre modificacions per a poder visualitzar que s'hi crea en aquella regió. Aquests mostren el mòdul de la velocitat i els vectors, amb la projecció sobre el pla de l'aire. Observem previament la figura 40 la distància de plans que hem escollit.

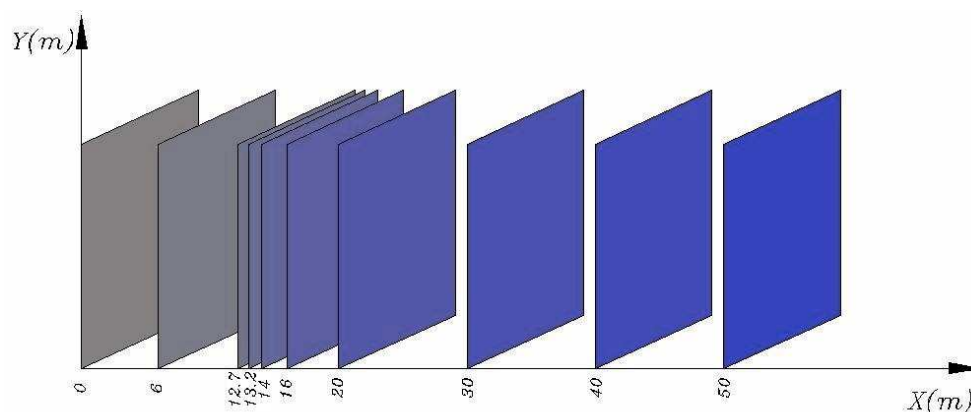


Figura 40. Posicionament dels plans de tall realitzats.

1ª modificació

A la figura 41(a) i figura 41(b), com amb l'estudi anterior, observem les característiques de l'aire en cada un dels plans de tall anomenats anteriorment.

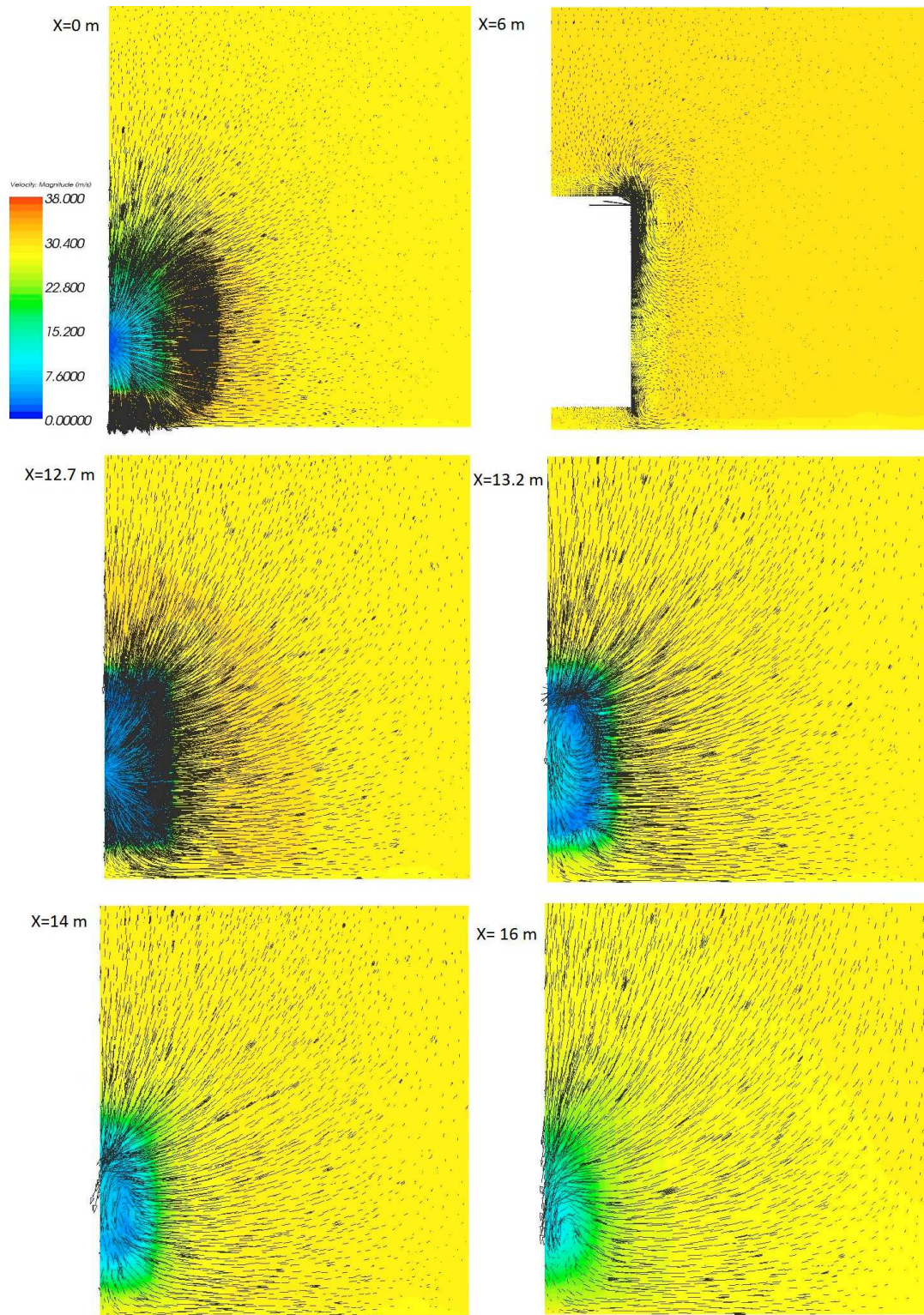


Figura 41(a). Mòdul de la velocitat (colors) i vectors per a la 1ª modificació.

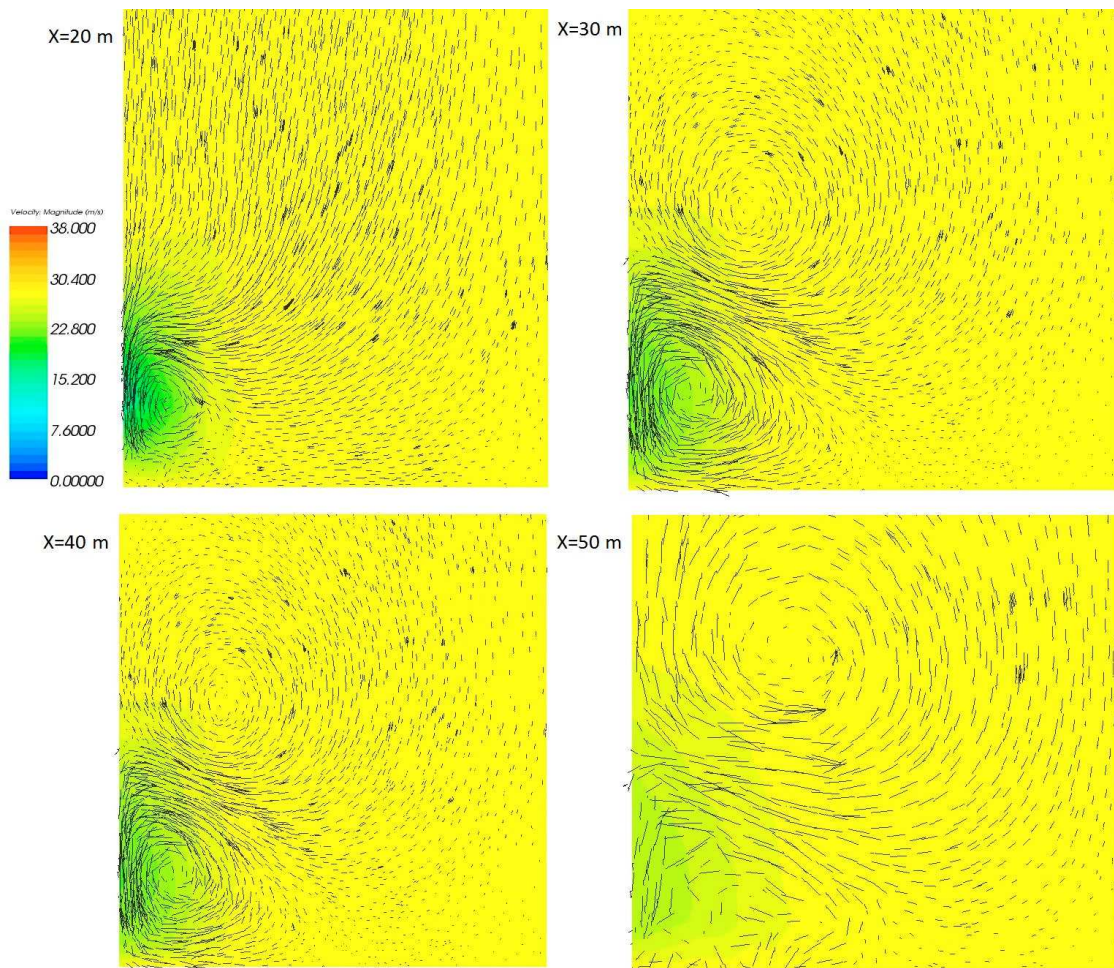


Figura 41(b). Mòdul de la velocitat (colors) i vectors per a la 1^a modificació.

És pot observar també a la figura 42 i figura 43 el mòdul de la velocitat en el pla de tall longitudinal al la zona total del bus modificat i l'estela respectivament.

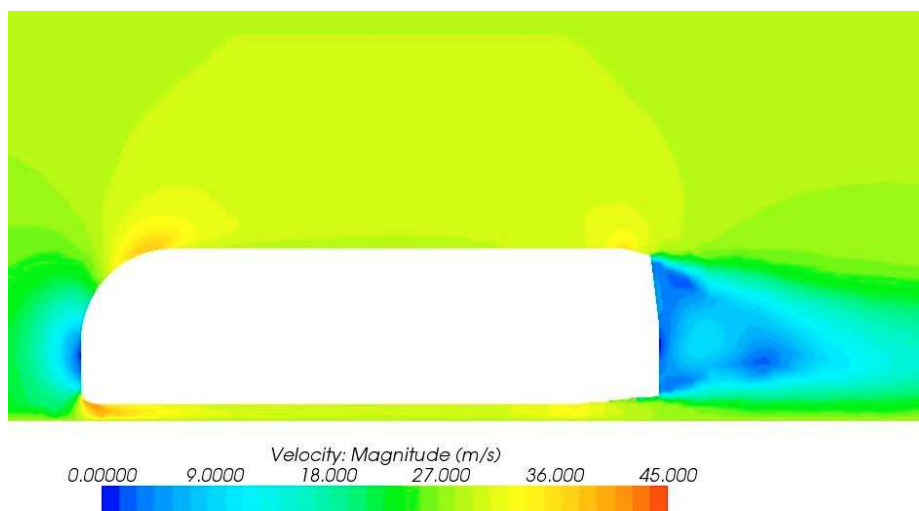


Figura 42. Mòdul de la velocitat al pla de simetria de la 1^a modificació.

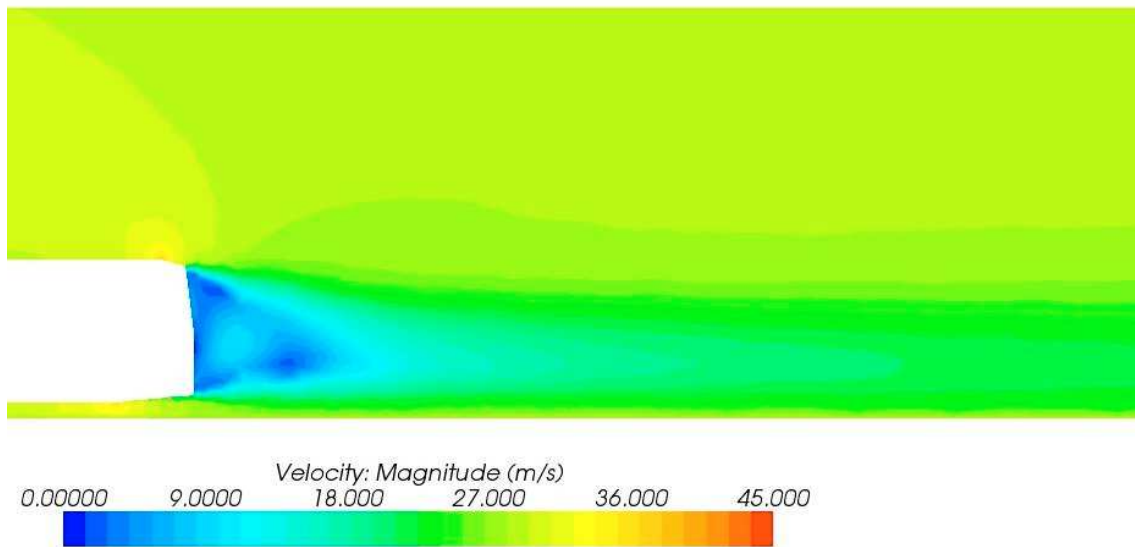


Figura 43. Mòdul de la velocitat a la zona de l'estela de la 1ª modificació.

A la figura 44 es pot veure la direcció dels vectors de velocitat en el pla de simetria.

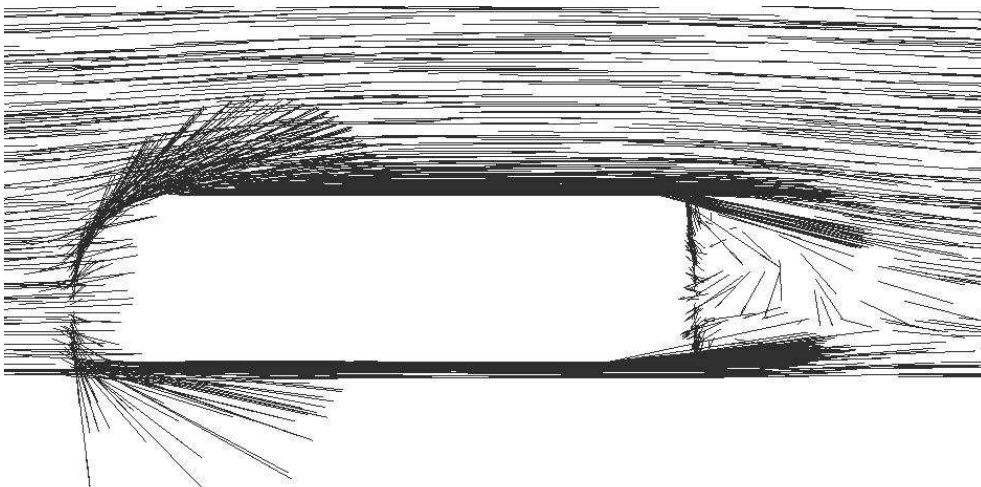


Figura 44. Direcció dels vectors de velocitat de la 1ª modificació.

Les figura 45, 46 i figura 47 mostra l'estat de pressions a la superfície frontal, superfície posterior i a la simetria respectivament del bus modificat.

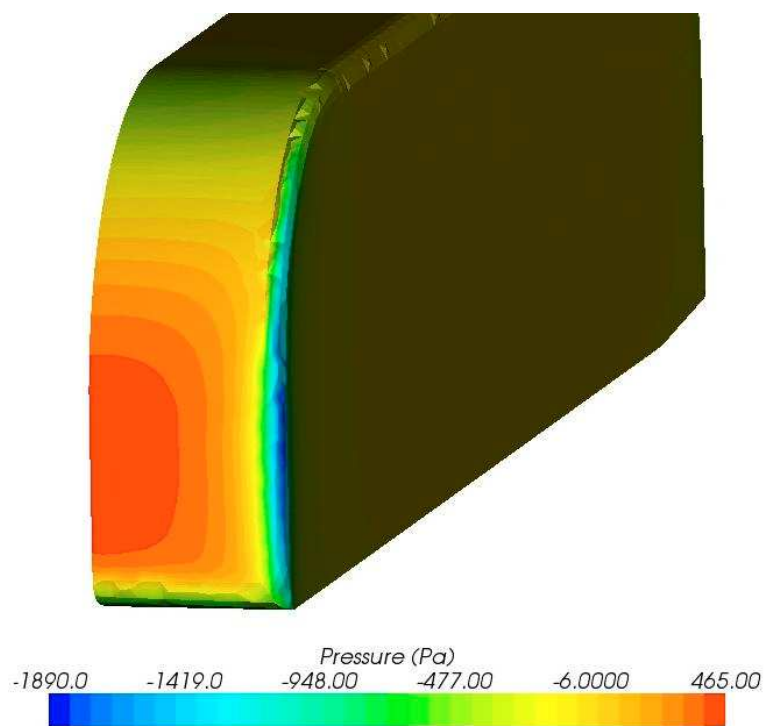


Figura 45. Estat de pressions a la superfície frontal de la 1^a modificació.

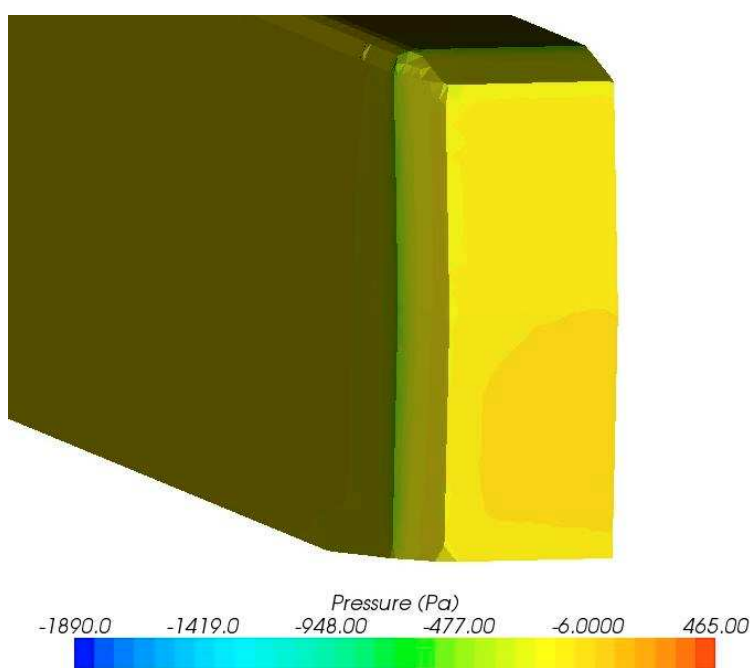


Figura 46. Estat de pressions a la superfície posterior de la 1^a modificació.

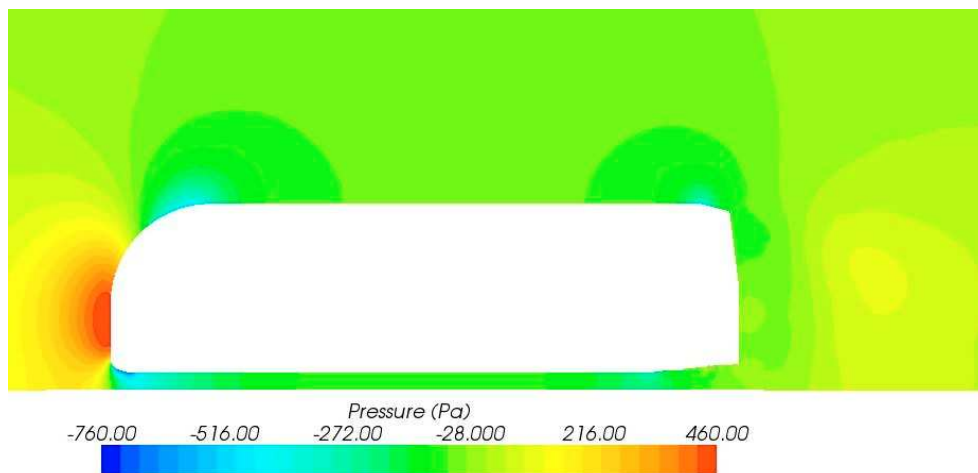


Figura 47. Estat de pressions al pla de simetria de la 1^a modificació.

En aquest cas, l'afegit extern no millora el coeficient d'arrossegament sinó que l'empitjora degut a que, tot i no haver-hi separació de la capa límit, la major longitud comporta una millor fricció.

Alhora, els vòrtexs són molt més intensos i, per tant, l'estela és molt més llarga. Això comporta un augment en el coeficient d'arrossegament.

2^a modificació

A continuació mostrem els resultats per aquest cas:

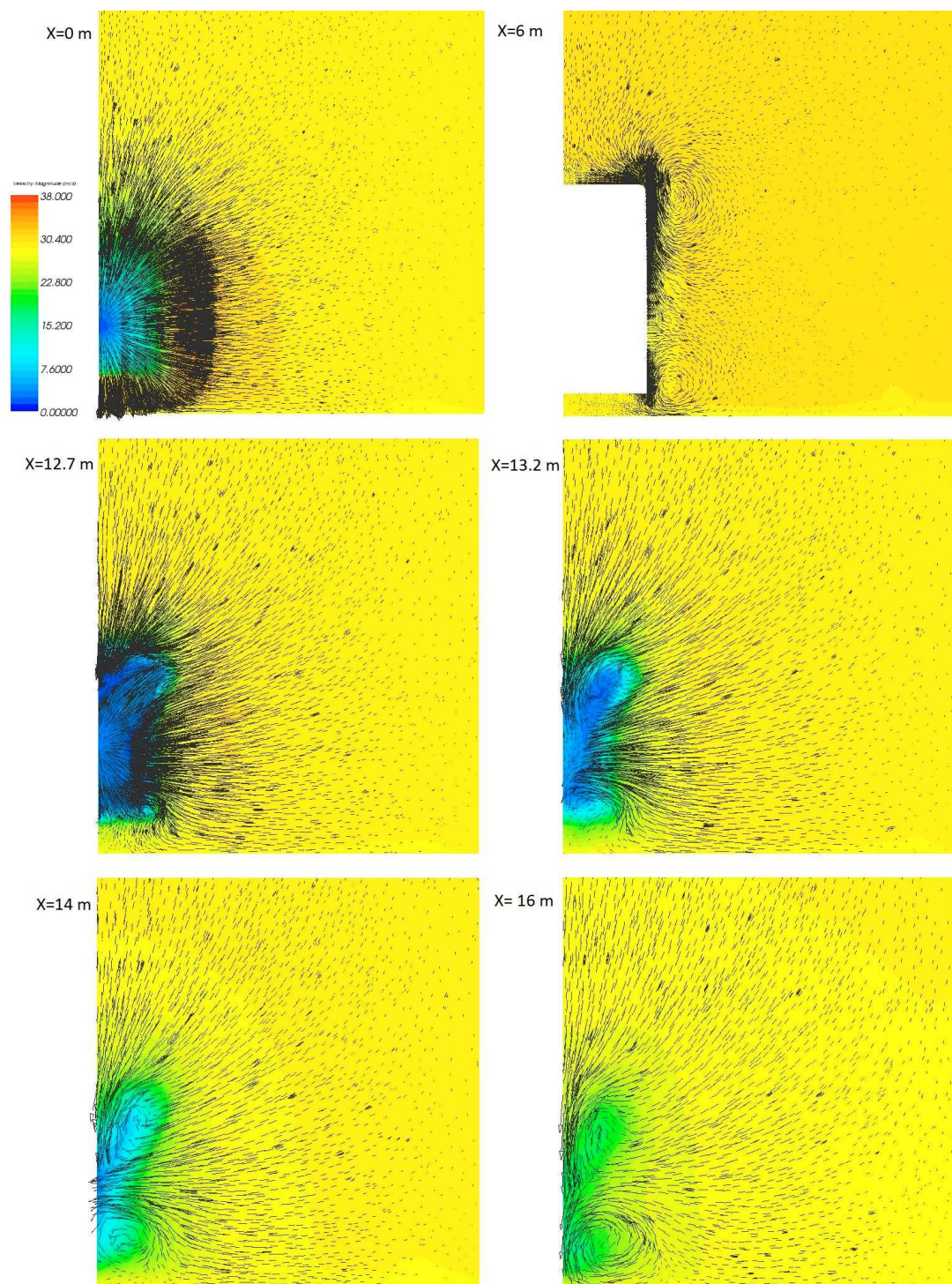


Figura 48(a). Mòdul de la velocitat (colors) i vectors per a la 2^a modificació.

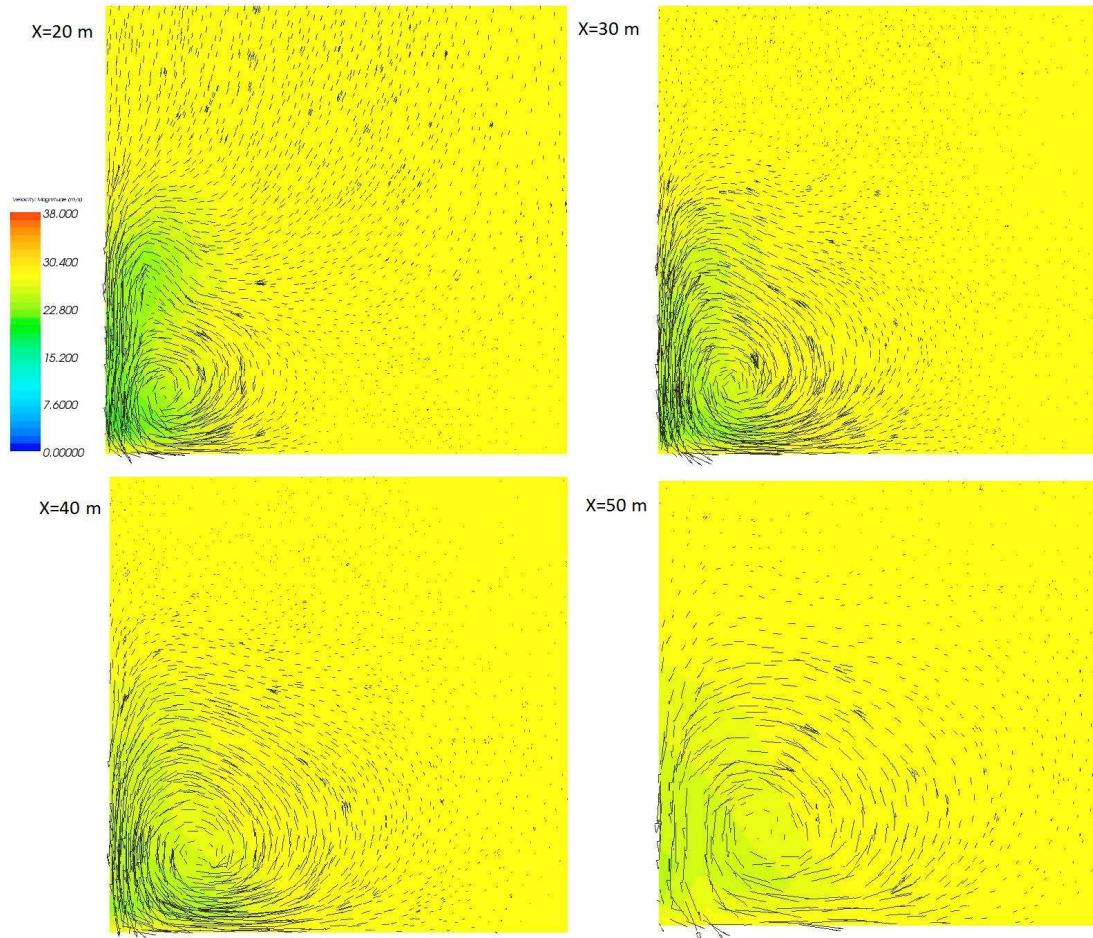


Figura 48(b). Mòdul de la velocitat (colors) i vectors per a la 2^a modificació.

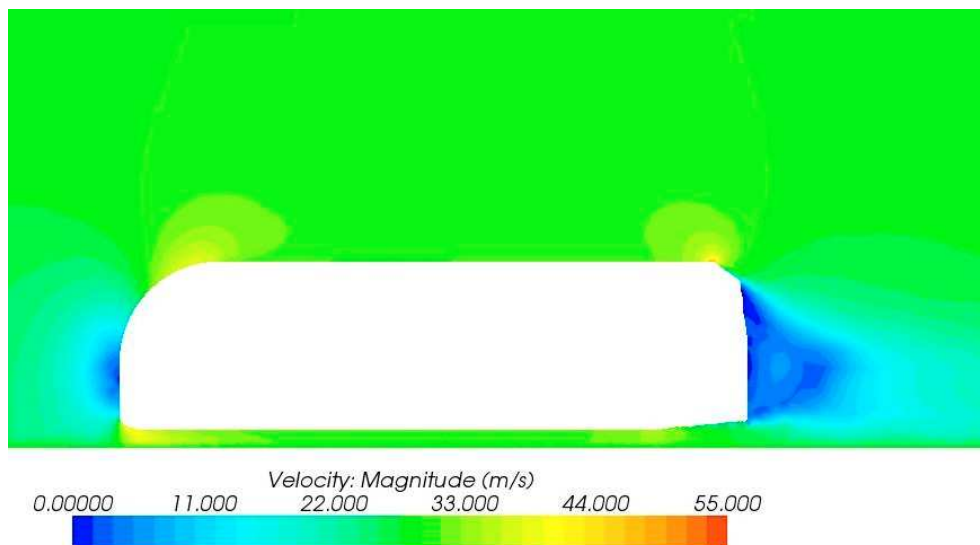


Figura 49. Mòdul de la velocitat al pla de simetria de la 2^a modificació.

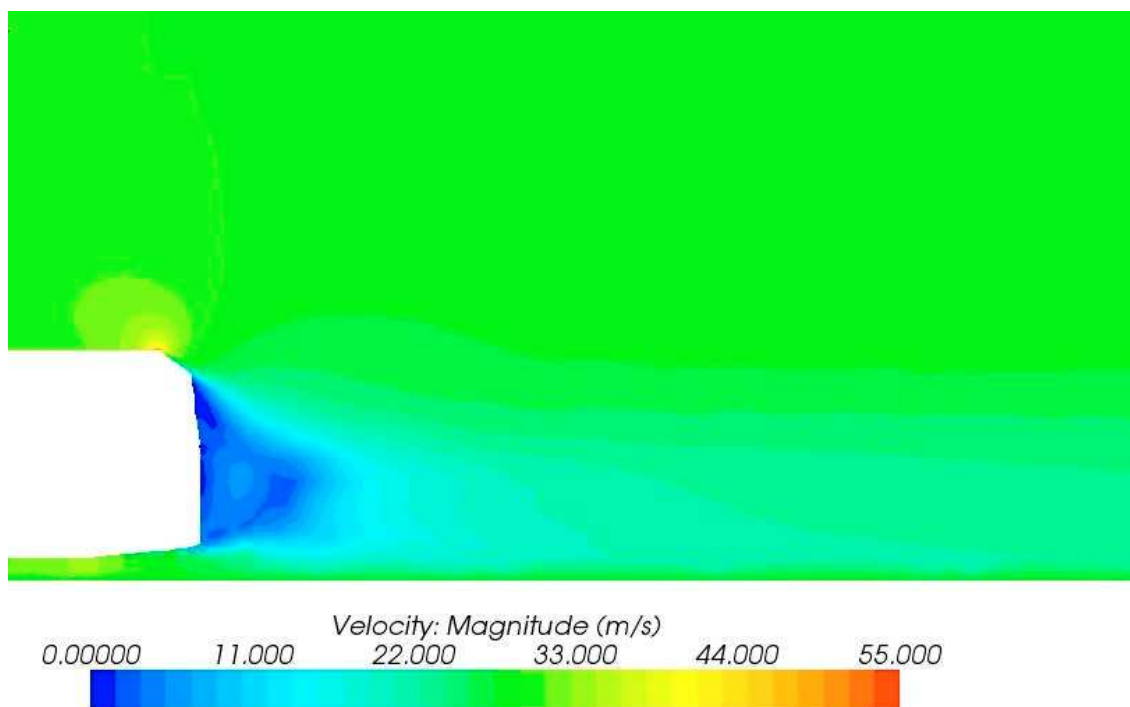


Figura 50. Mòdul de la velocitat a la zona de l'estela de la 2^a modificació.

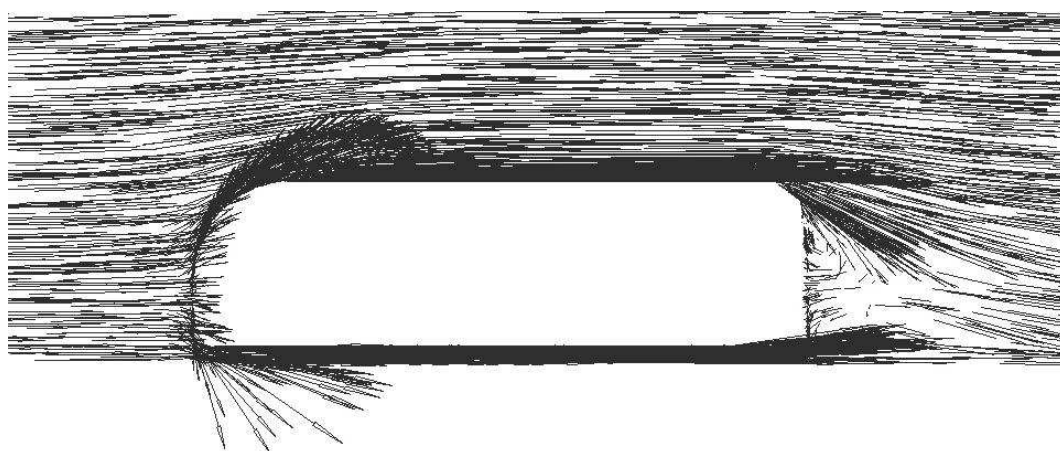


Figura 51. Direcció dels vectors de velocitat de la 2^a modificació.

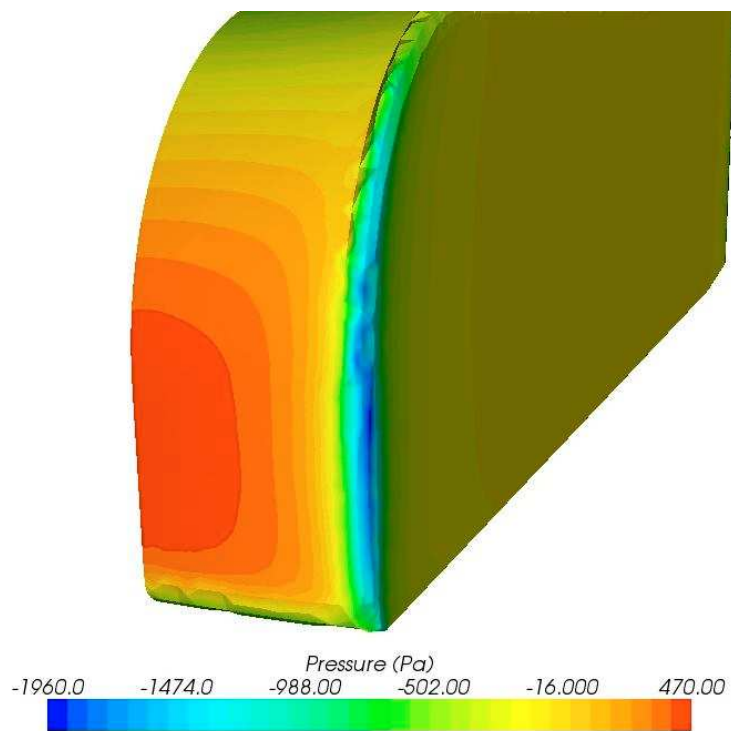


Figura 52. Estat de pressions a la superfície frontal de la 2^a modificació.

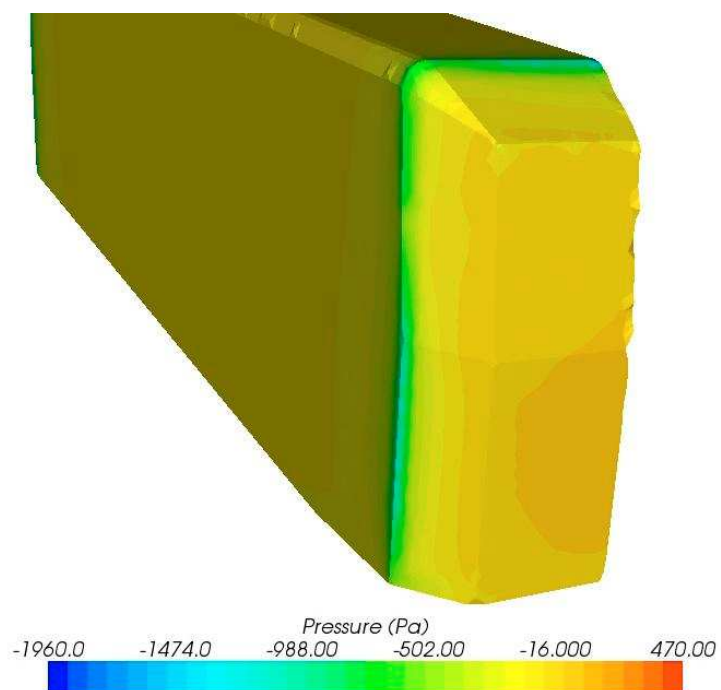


Figura 53. Estat de pressions a la superfície posterior de la 2^a modificació.

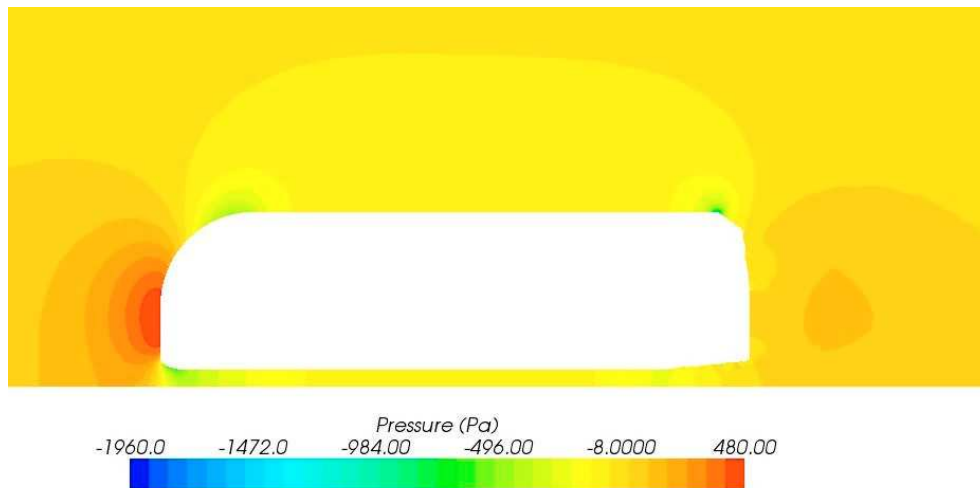


Figura 54. Estat de pressions al pla de simetria de la 2^a modificació.

Aquesta segona modificació tampoc millora el coeficient d'arrossegament de la carrosseria inicial ja que s'alimenta el contraflux de l'estela per la part superior, amb un desprendiment de la capa límit més a la superfície del cos.

La 3^a i 4^a modificació consisteix amb el mateix criteri de visualització però al tenir la longitud total del bus 0.5 metres més petita varia la distància dels plans realitzats.

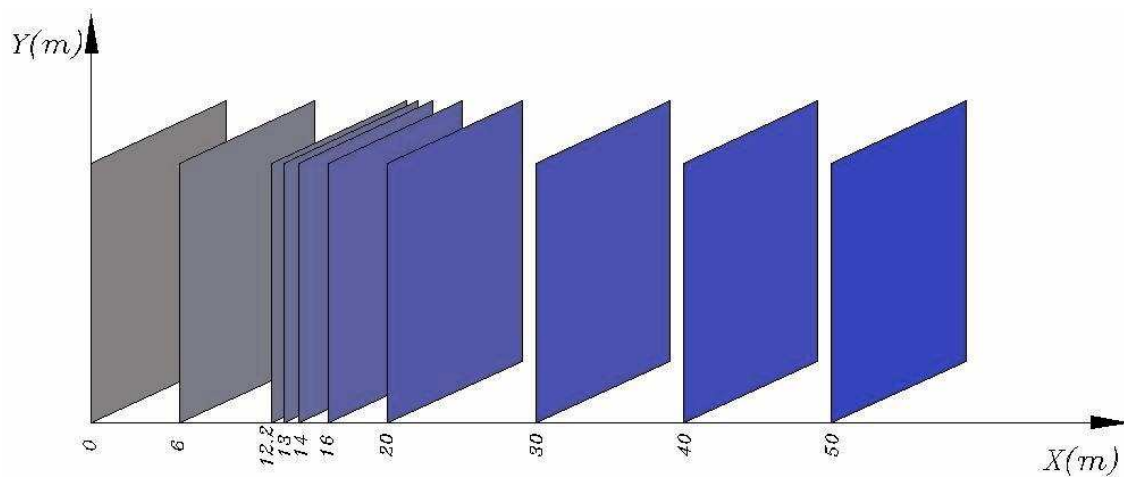


Figura 55. Posicionament dels plans de tall realitzats.

3^a modificació

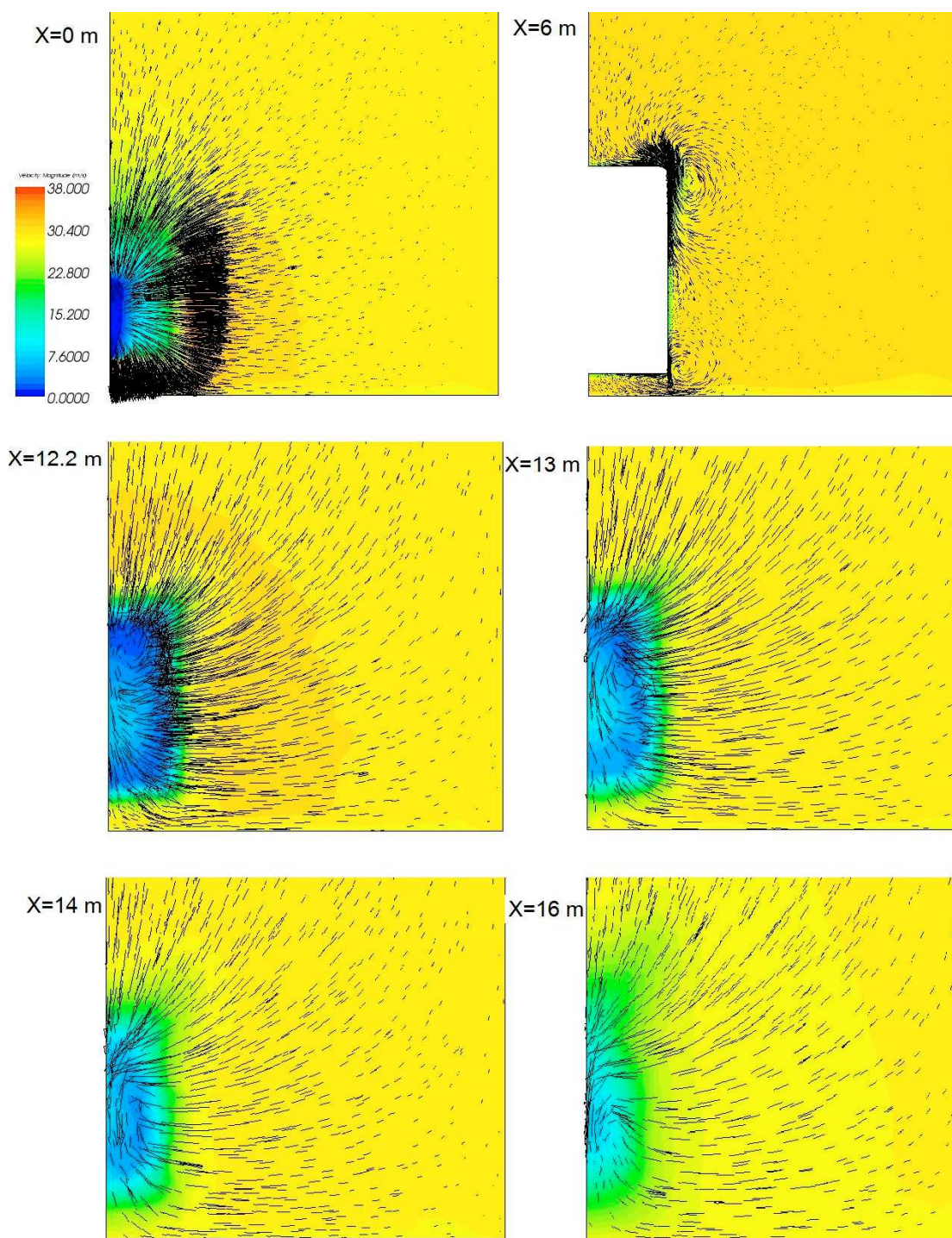


Figura 56(a). Mòdul de la velocitat (colors) i vectors per a la 3^a modificació.

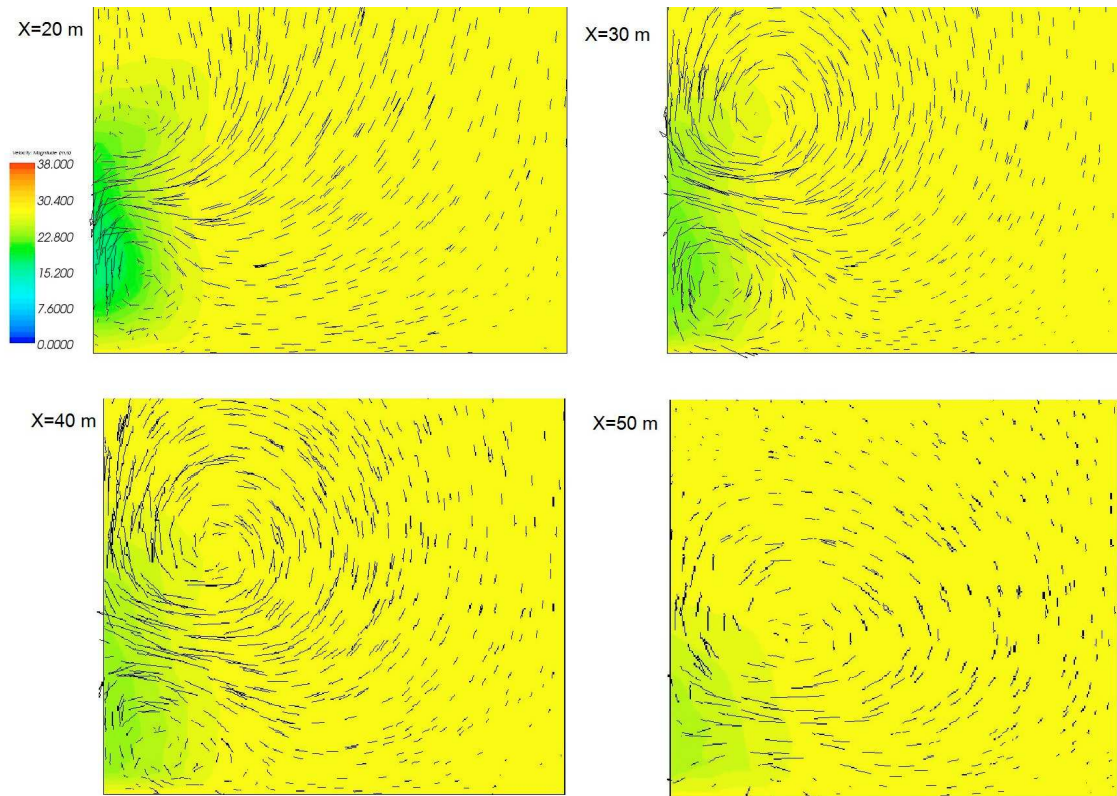


Figura 56(b). Mòdul de la velocitat (colors) i vectors per a la 3^a modificació.

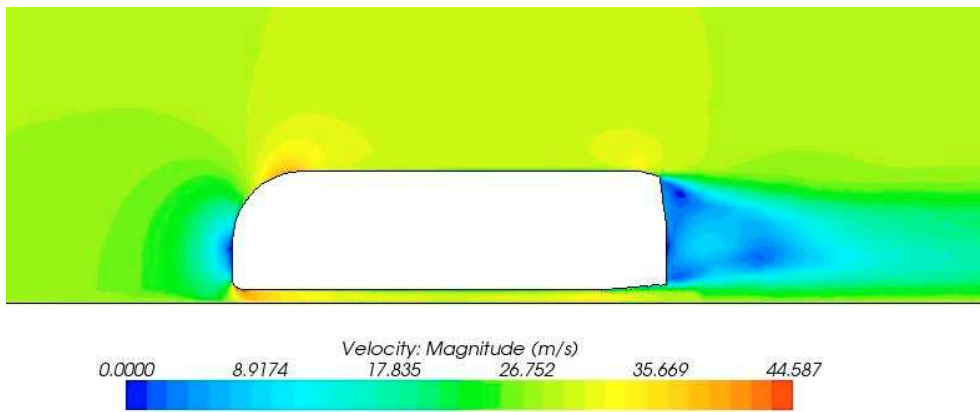


Figura 57. Modul de la velocitat al pla de simetria de la 3^a modificació.

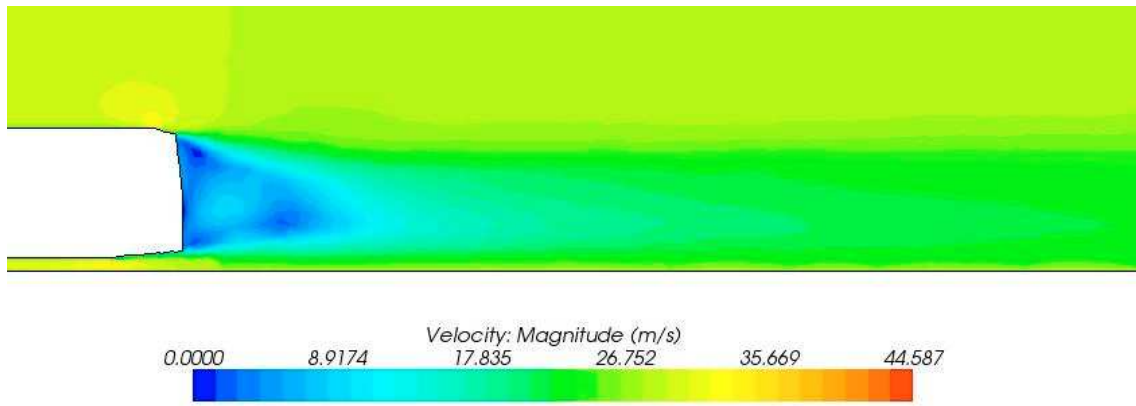


Figura 58. Mòdul de la velocitat a la zona de l'estela de la 3^a modificació.

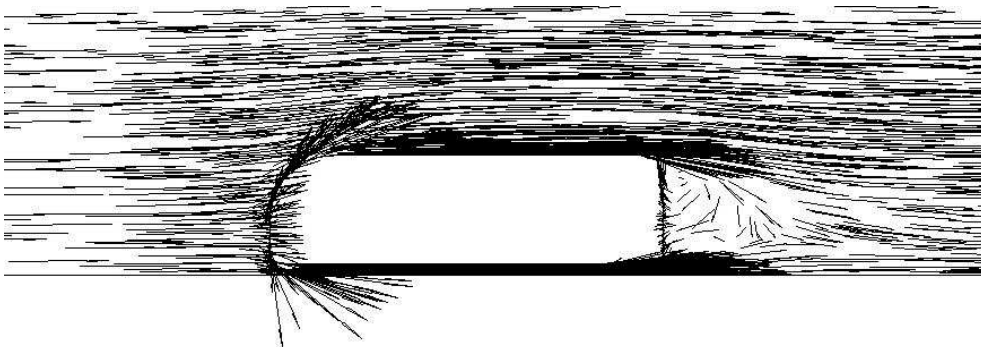


Figura 59. Direcció dels vectors de velocitat de la 3^a modificació.

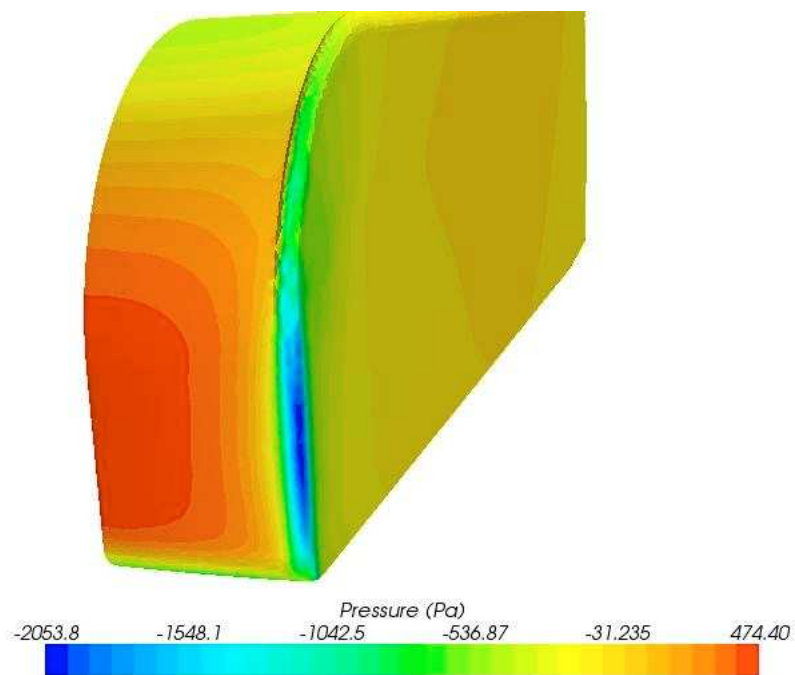


Figura 60. Estat de pressions a la superfície frontal de la 3^a modificació.

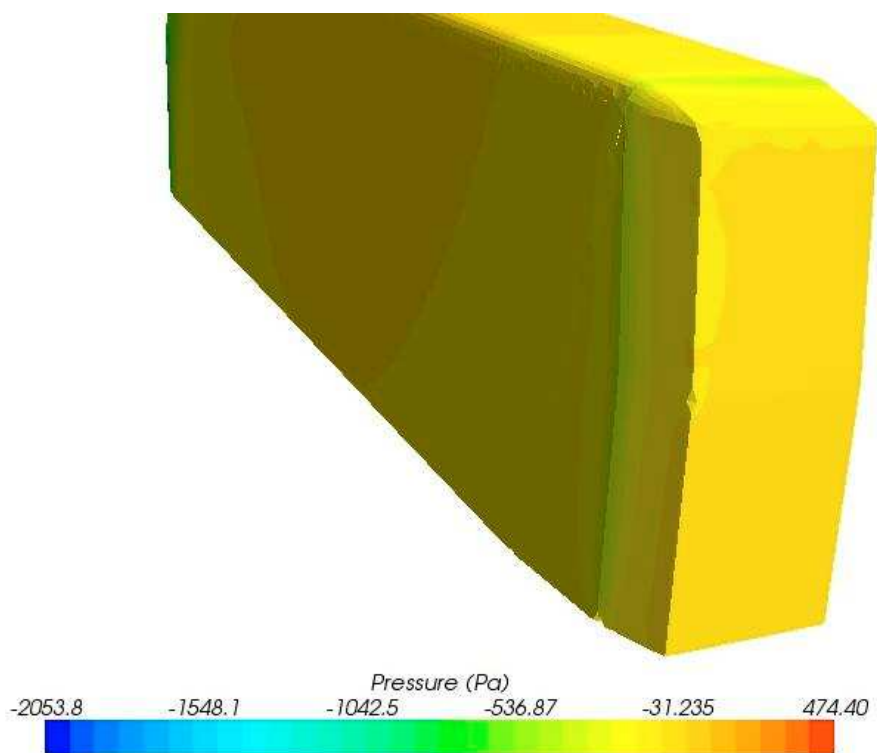


Figura 61. Estat de pressions a la superfície posterior de la 3^a modificació.

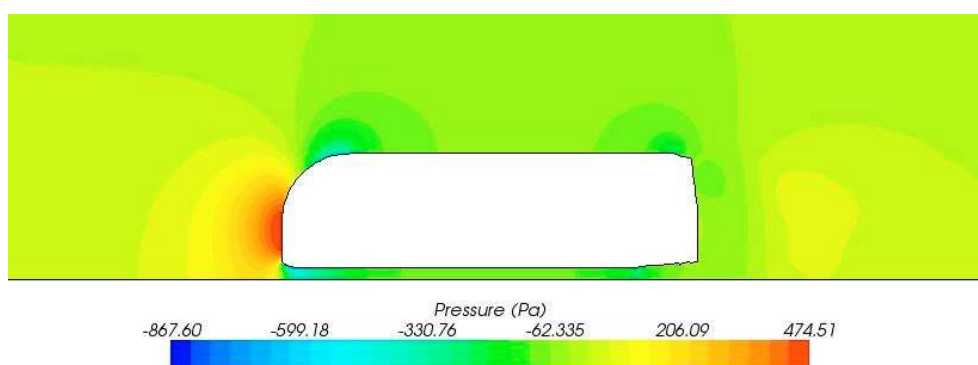


Figura 62. Estat de pressions al pla de simetria de la 3^a modificació.

4^a modificació

A continuació mostrem els mateixos perfils que en els casos anterior però per a la 4a modificació.

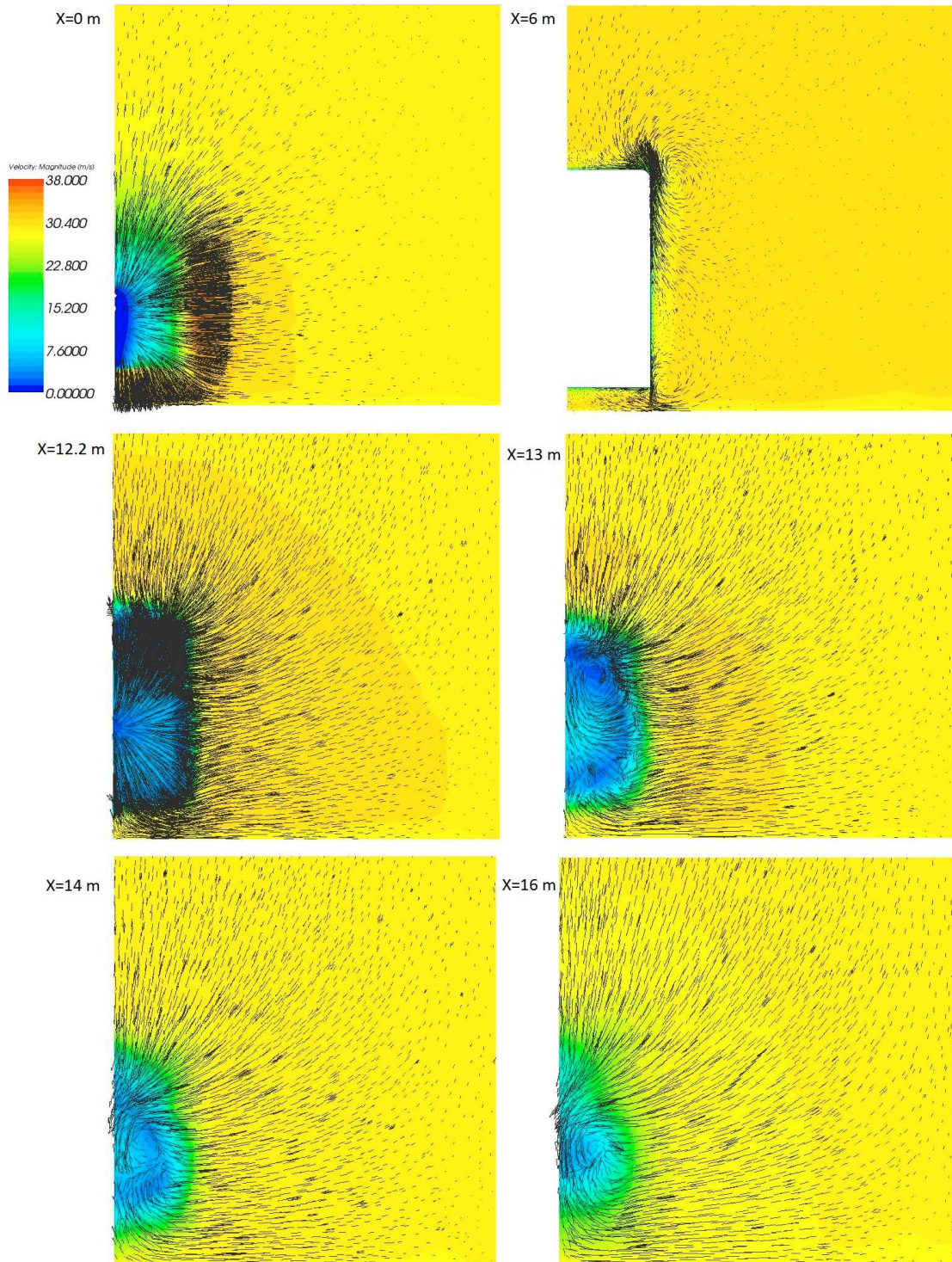


Figura 63(a). Mòdul de la velocitat (colors) i vectors per a la 4^a modificació.

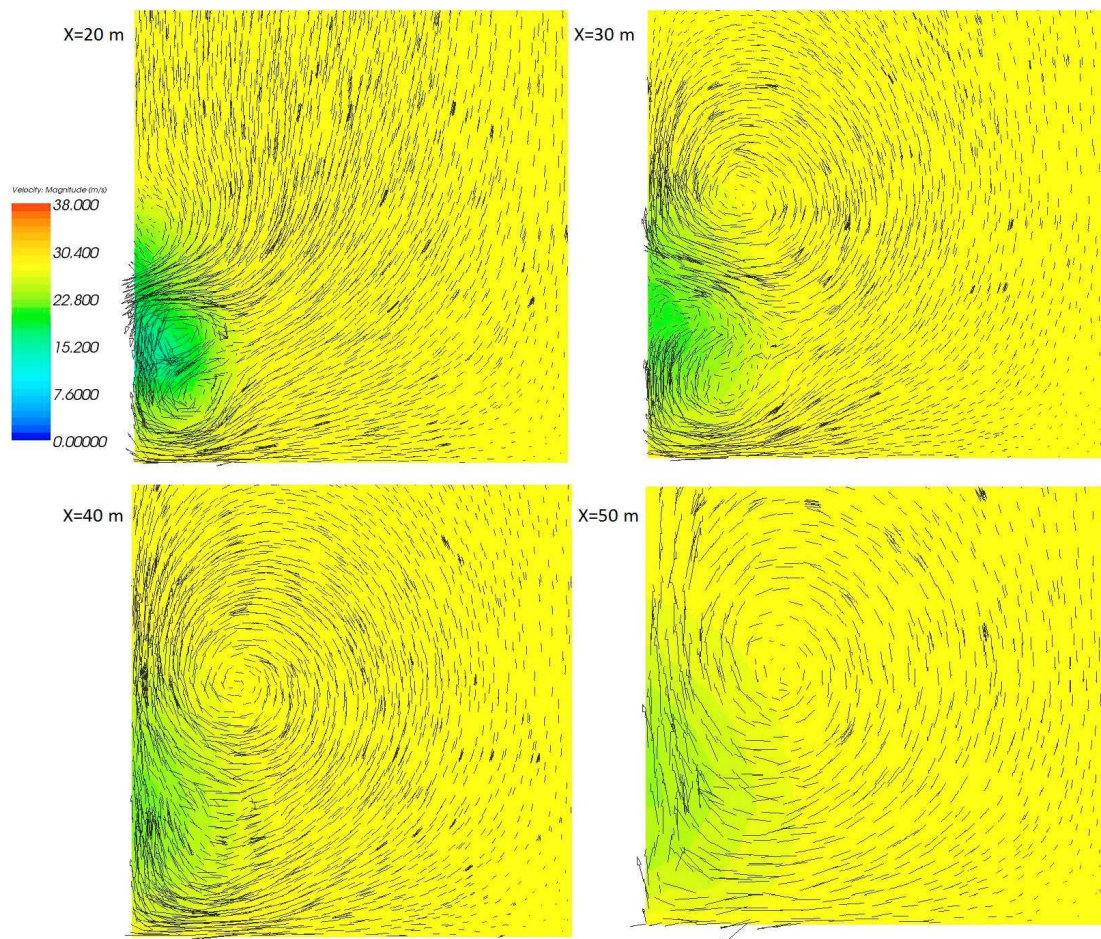


Figura 63(b). Mòdul de la velocitat (colors) i vectors per a la 4^a modificació.

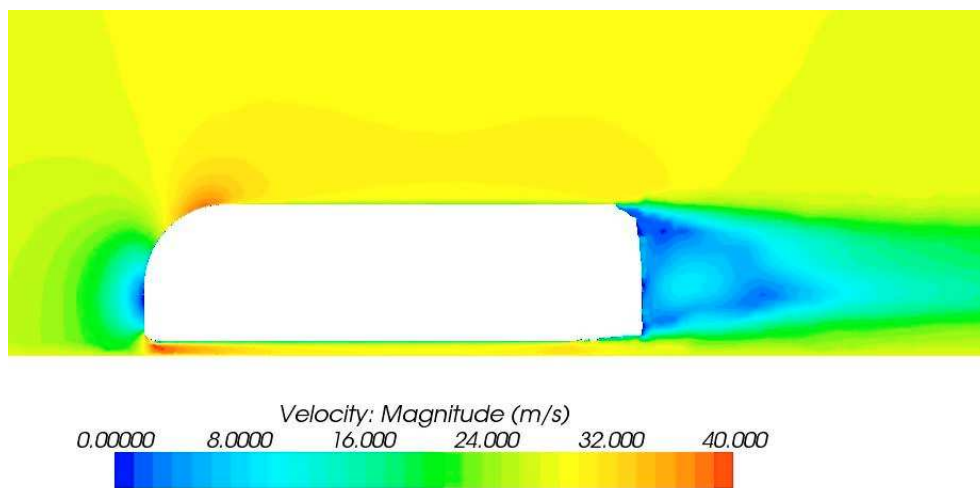


Figura 64. Mòdul de la velocitat al pla de simetria de la 4^a modificació.

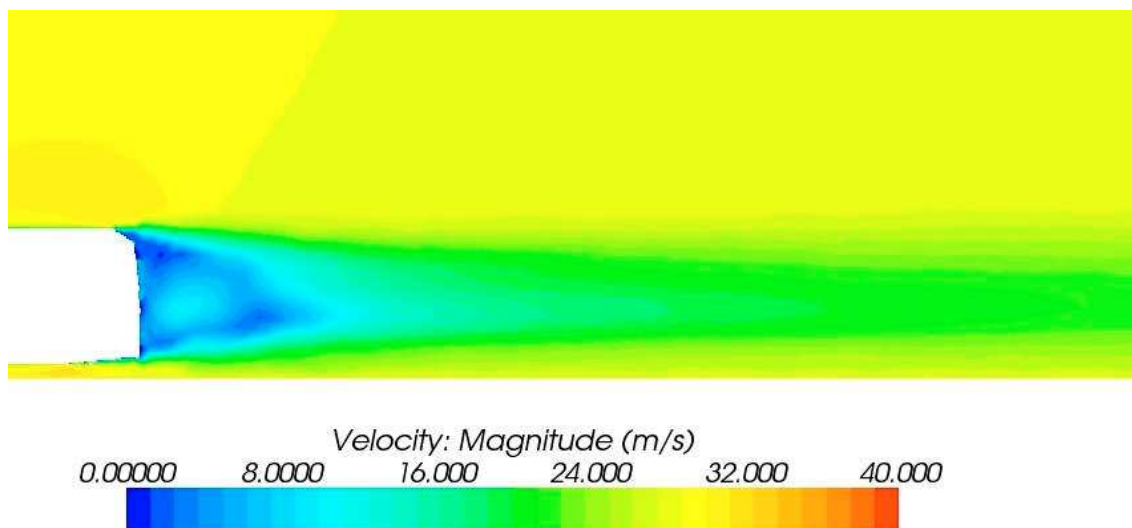


Figura 65. Mòdul de la velocitat a la zona de l'estela de la 4^a modificació.

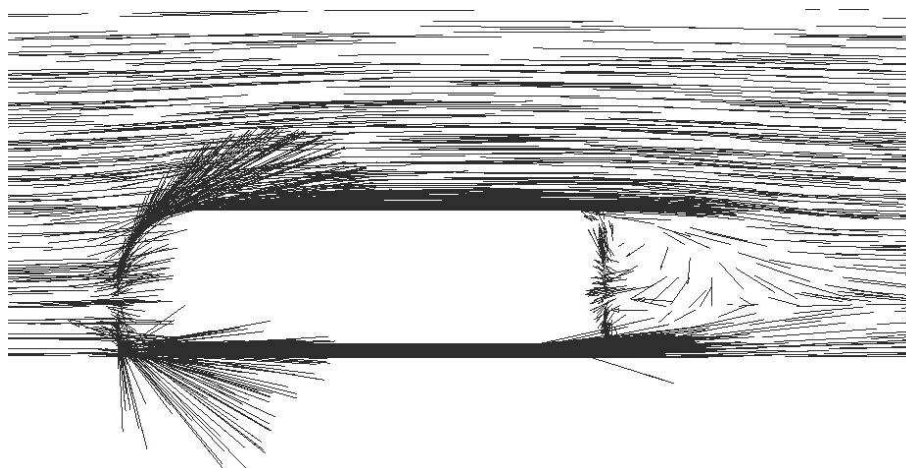


Figura 66. Direcció dels vectors de velocitat de la 4^a modificació.

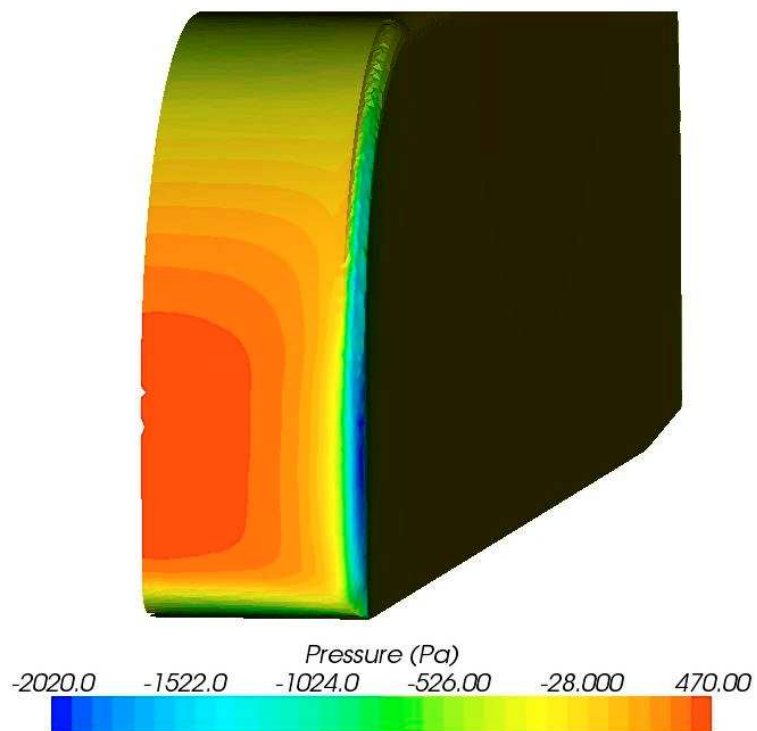


Figura 67. Estat de pressions a la superfície frontal de la 4^a modificació.

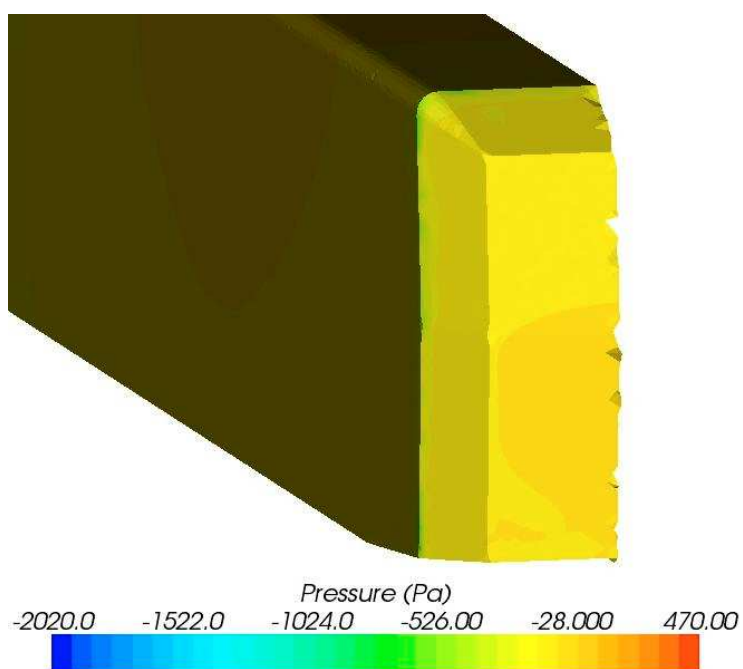


Figura 68. Estat de pressions a la superfície posterior de la 4^a modificació.

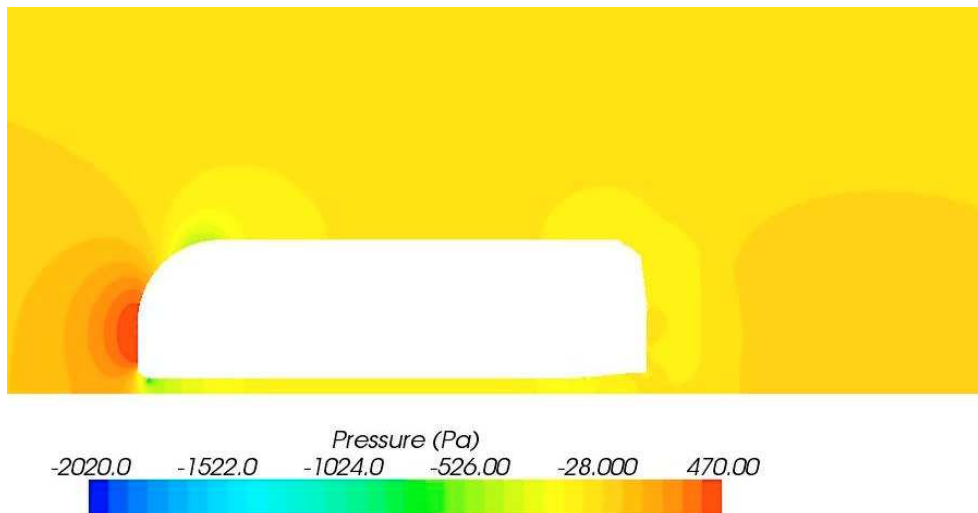


Figura 69. Estat de pressions al pla de simetria de la 4ª modificació.

De forma semblant als altres casos, aquestes modificacions tampoc milloren el coeficient d'arrossegament del bus estàndard, ja que l'estela augmenta de forma molt apreciable degut a un despreniment de la capa límit més propera a la superfície.

4.5. Conclusions.

Diversos autors han proposat la utilització d'afegits externs per millorar l'eficiència aerodinàmica de vehicles pesants. En semiremolcs, s'ha proposat una major inclinació de la part posterior (Iaccarino et al., 2004). Aquí s'han analitzat quatre modificacions per al cas amb millor comportament aerodinàmic.

Els resultats no mostren cap millora en el coeficient d'arrossegament. En tots els casos es mostra una ampliació de l'estela produïda per l'element afegit. Això contradiu alguns resultats numèrics obtinguts per a tractores més semiremolcs (Iaccarino et al., 2004). Així, convindrà analitzar amb més detall aquests tipus d'elements, fent-ho, també, per al disseny de carrosseria estàndard. D'aquesta forma es podria avaluar la dependència de la solució en la geometria del sistema.

5. RESUM DEL PRESSUPOST.

El pressupost global de l'estudi realitzat de l'eficiència aerodinàmica de vehicles pesants de transport de passatgers, tenint en compte els costos de desenvolupament i recerca, costos d'amortització, costos de redactat i el percentatge de l'IVA, es de cinc mil quatre-cents vint-i-set euros.....**5427€.**

6. RELACIÓ DE DOCUMENTS DEL PROJECTE.

La relació de documents d'aquest projecte es la següent:

- Document número 1: Memòria i Annexos.
 - Annex A: Mecànica de fluids.
 - Annex B: Fonaments d'aerodinàmica.
 - Annex C: Aerodinàmica de vehicles.
 - Annex D: Generació de mallats.
 - Annex E: Simulació amb CFD.
 - Annex F: Estudi experimental del cos d'Ahmed.
 - Annex G: Antecedents.
 - Annex H: Esquemes de disseny.

- Document número 2: Pressupost.

7. BIBLIOGRAFIA.

Libres:

- Aparicio F., Vera C., Diaz, L. Teoria de los vehículos automóviles. Escola Tècnica Superior d'Enginyeris Industrials. Universitat Politècnica de Madrid. Any 2001.
- Bruce R, Munson, Donald F Young, Theodore H. Okijshi. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Edición Limusa Wiley.
- Frank M. White. *Mecánica de fluidos*. L/S 532 WHI.
- Gerahart P, Gross R, Hochstein. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Addison Wesley Iberoamericana. Any 1995.
- 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.
- J. D. Anderson. Fundamentals of aerodynamics. Editorial Mcgraw-hill. Any 1991.
- Kim M-H. Int. J. Vehicle Design, 34, 3, 203-217 Any 2004
- Kim M-H. Int. J. Heavy Vehicle Systems, 12, 3, 207-224 Any 2005
- Iaccarino G, de Maio B, Verzicco R, Khalaghi B. The aerodynamics of Heavy Vehicles: Trucks, Buses and Trains. (Ed. R. Mc Callen, F. Browand, J. Ross) Springer-Verlag Any 2004.
- Mataix C. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ediciones el Castillo, S. A. Any 1982.
- Mc Beath, S. Aerodinámica del automóvil. Barcelona, Ediciones CEAC. Any 2000.
- Saiz Vela, Víctor. Estudi de simulació aerodinàmica del Rodaster FS1. Universitat Politècnica de Catalunya. Any 2005.

Adreces web:

- www.cfd-online.com, Web de recursos relacionats amb CFD.
- <http://aerodyn.org>, Web relacionada amb l'aerodinàmica.
- <http://www.es.rhino3d.com.com/index.htm>, Web relacionada amb el programa Rhinoceros.

pesants de transport de passatgers.

- <http://www.ansys.com>, Web relacionada amb elements finits.
- <http://venus.ceride.gov.ar/cimec>, Web relacionada amb la simulació numèrica del cos d'Ahmed.
- <http://venus.ceride.gov.ar/~mstori/AHMED/tex/ahmed/node1.html>, Web relacionada amb l'experimentació del cos d'Ahmed.
- http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CCM_plus/, Web relacionada amb el programa de simulació numèric.
- www.cd-adapco.com/minisites/ugm_us/seattle-agenda.pdf, Web relacionada amb el programa de simulació numèric.
- <http://www.ansys.com/products/icemcfid.asp>, Web relacionada amb el programa de mallar.
- <http://www.ingeciber.com/productos/icem.php>, Web relacionada amb el programa ANSYS ICEM CFD™/AI*Environment™.

8. GLOSSARI

Aerodinàmica: És la part de la mecànica de fluids que estudia els gasos en moviment i les forces o reaccions a les que estan sotmesos els cossos quan estan dins d'ells.

C_D : És un valor adimensional que mesura la resistència aerodinàmica que ofereix un cos al moure's a través de l'aire en direcció a la velocitat relativa entre l'aire i el cos.

C_L : És un valor adimensional que mesura la força generada sobre un cos que es desplaça a través d'un fluid, de direcció perpendicular a la velocitat de la corrent incident.

Drag: És força de resistència aerodinàmica que ofereix un cos al moure's a través de l'aire en direcció a la velocitat relativa entre l'aire i el cos.

Lift: És la força generada sobre un cos que es desplaça a través d'un fluid, de direcció perpendicular a la velocitat de la corrent incident.

Túnel de vent: És una eina d'investigació desenvolupada per ajudar en l'estudi dels efectes del moviment de l'aire en objectes sòlids.

Turbulència: És un regim de flux caracteritzat per baixa difusió de moment, alta convecció i canvis espai-temporal molt ràpids de pressió i velocitat.

Fluid: És una substància que es deforma contínuament en el temps davant d'una sol·licitació o tensió tangencial sense importar la magnitud d'aquesta.

Flux: Correspon a un fluid en moviment.

CFD: (Computational Fluid Dynamics). Programa de simulació numèrica mitjançant càlculs basats en equacions de Navier-Stokes, formant així un sistema d'equacions diferencials en derivades parcials que defineixen el moviment dels fluids.

ICEM ANSYS: Programa encarregat de fer el mallat del model a simular.

Elements finits: És un modelat d'elements discrets del volum i superfícies a estudiar.

Mallat: Divisió del volums de càlcul en petits volums geomètrics anomenats elements units per nodes.

Nodes: Són els punts de unió entre els elements que formen la malla.

STAR CCM+: Programa de simulació numèrica CFD.

Cos d'ahmed: Cos de geometria simple que reté les principals característiques del flux semblant a la d'un automòbil. Utilitzat i creat com a banc de proves, per les associacions MOVA i ERCOFTAC amb la finalitat de validar programes de CFD.

ERCOFTAC: (European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion). És una associació que realitza estudis d'aerodinàmica a través d'estudis experimentals i mètodes numèrics.

MOVA: (Models for Vehicle Aerodynamics). És una associació que realitzen estudis sobre l'aerodinàmica a través d'estudis experimentals i mètodes numèrics.

9. AGRAÏMENTS

Per aquest Projecte Final de Carrera agraeixo moltíssim tota l'ajuda que m'ha aportat el meu tutor, el Dr. Antoni Pujol Sagaró.

Agraïments a la Universitat de Girona per la bona experiència i pels nous coneixements, amics i sentiments que he adquirit duran l'enginyeria, que han sigut molts.

També ha les persones que van confiar amb mi per cursar l'enginyeria, especialment a les persones: Ramir Coma, Joan Toca, Xavi Simón, Albert Bayot, Miquel Graboleda, Martí Font, Santi Coll, Rosa Surroca, Josep Masdevall, Gavi Amores i per sobre de tot, en especial, la meva mare, l'avi i la família de Sant Esteve de Guialbes en general, on sense ells i el seus consells res hagués resultat possible.

ANNEX A

A. MECÀNICA DE FLUIDS.

A.1. Definició de fluid.

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

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

A.2. Forces i pressions.

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

- **Força màssica:** Són les forces externes que actuen sobre tot el fluid (Gerahart P, Gross R, Hochstein, 1995). Veiem la seva expressió a través de l'Equació 1.1.

$$f = \frac{mg}{V} \quad (\text{Eq.1.1})$$

On:

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

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

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

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

- **Força superficial:** Són les forces efectuades sobre el contorn del fluid per la resta del fluid, pel recipient o qualsevol altre substància, mitjançant contacte directe (Gerahart P, Gross R, Hochstein, 1995). La figura 70 ens ho mostra amb més claredat. Veiem les expressions a través de les Equacions 2 i 3.

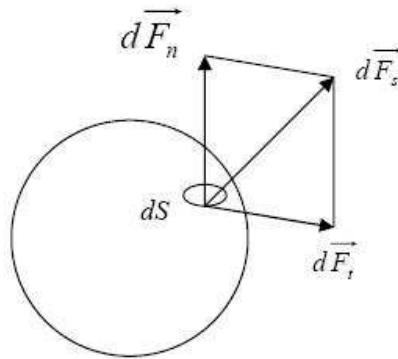


Figura 70. Forces superficiales.

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

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

On:

σ_n = esforç normal (N/m^2)

F_n = força normal (N)

σ_t = esforç tallant (N/m^2)

F_t = força tallant (N)

S = superfície (m^2)

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

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

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

On :

p = pressió (N/m^2)

F_n = força normal (N)

S = superfície (m^2)

A.3. Propietats dels fluids.

Les principals propietats del fluid en mecànica de fluids són les següents:

Densitat

La densitat es representa normalment amb el símbol ρ , és el quocient entre la massa i el seu volum. Veiem la seva expressió a través de l'Equació 1.

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

On:

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

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

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

Viscositat

La viscositat d'un fluid es la mesura de la resistència a una deformació tallant o angular. En la figura 71 es pot veure com la velocitat del fluid varia linealment amb l'altura entre les plaques, aquesta variació es denominada perfil de velocitats.

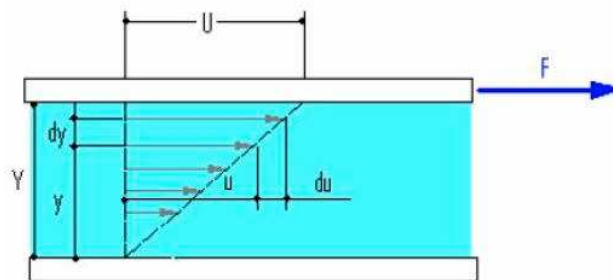


Figura 71. Fluid comprès entre dues plaques.

S'ha observat en experiments que una gran varietat de fluids en les condicions anteriors compleix la relació de l'Equació 6, tenint en compte els paràmetres de la figura anterior (Mataix, 1982).

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

Per semblança de triangles de la figura 71 el terme $\frac{U}{Y}$ es pot substituir pel gradient de velocitats $\frac{du}{dy}$. Per tant ara s'introdueix una constant de proporcionalitat, la viscositat dinàmica o absoluta μ , de tal manera que l'esforç tallant σ_t entre dues capes fines de fluid, es pot expressar com l'Equació 7.

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

A.4. Flux de fluid.

Un flux correspon a un fluid en moviment (Mataix, 1982). Si el fluid és ideal, la viscositat és nul·la. En canvi, si el fluid és real la viscositat fa aparèixer esforços tallants entre les partícules (veiem la figura 72)

Quasi sempre que parlem de flux de fluid ens referim a un fluid ideal, això vol dir que es considera sense viscositat, en canvi, el fluid real si que està afectat per aquesta, donant a lloc l'aparició d'esforços tallants entre les partícules. Veiem la figura 72.

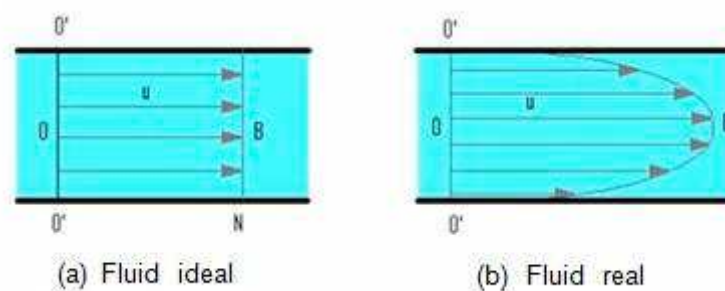


Figura 72. Perfils de velocitats per a diferents fluids en canonades.

També es poden classificar els fluids com a compressibles o incompressibles. En els segons la densitat (ρ) té una variació reduïda. Els líquids es solen considerar incompressibles. Els gasos sí són compressibles i la seva densitat varia en funció de la pressió absoluta i de la temperatura absoluta. Veiem l'equació 8 del gas ideal.

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

On:

P = *pressió absoluta (Pa)*

ρ = *densitat (Kg/m³)*

v = *volum específic (1/ ρ = m³/Kg)*

R = *constant del gas ideal (Nm/K⁻¹gk)*

T = *temperatura absoluta (K)*

A.5. Classificació dels fluxos.

Flux estacionari i flux no estacionari

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

Flux laminar i flux turbulent

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

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

On:

Re = *numero de Reynolds (adimensional)*

D = *longitud característica del problema (m)*

v = *velocitat característica del problema (m/s)*

ρ = *densitat (Kg/m³)*

μ = *viscositat (Pa·s)*

En canonades de secció circular, quan el N^o de Reynolds es menor de 2000 el règim es considera **laminar** i quan és més gran es considera **turbulent**.

El primer tipus s'anomena **flux laminar**. En aquest el fluid es mou degut al desplaçament de les làmines d'espessor infinitesimal sobre làmines adjacents.

En segon tipus s'anomena **flux turbulent**, on el moviment irregular de les partícules en un breu instant de temps es pot observar en la figura 73a. La figura 73b mostra la trajectòria seguida per una partícula en el transcurs de temps.

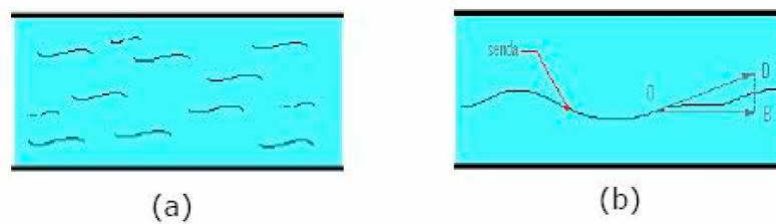


Figura 73. Moviment de les partícules d'un fluid (a), trajectòria d'una partícula fluida (b).

A.6. Equació de continuïtat.

La conservació de la massa és un principi fonamental en mecànica de fluids. Aquest principi diu que la massa no pot ésser creada ni destruïda, és a dir, que la massa d'un volum de control s'ha de que conservar (Gerahart P, Gross R, Hochstein, 1995). Veiem la figura 74.

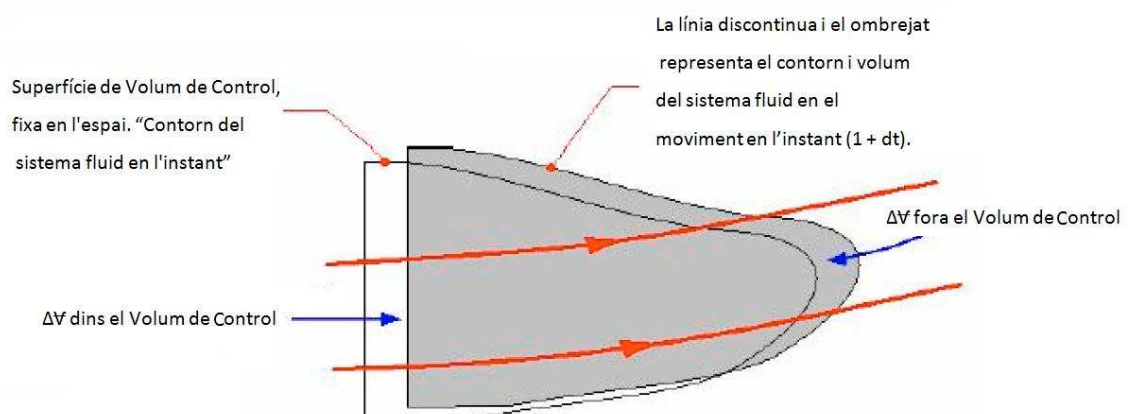


Figura 74. Sistema fluid, Volum de Control i diferències.

Observant la figura 74, la massa del sistema s'ha de conservar. Si considerem el flux estacionari ($\partial \rho_{VC} / dt = 0$), obtenim l'Equació 10 anomenada equació de continuïtat.

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

On:

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

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

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

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

A l'equació (10) s'ha suposat que les velocitats són uniformes en tota la secció a 1 i 2.

A.7. Equació de Bernoulli.

L'equació de Bernoulli relaciona la pressió, elevació i velocitat d'un flux constant no viscos en un fluid incompressible. Per a una mateixa altura a mesura que la velocitat del fluid augmenta, la seva pressió decreix (Munson, 2000). Veiem l'Equació 11; equació de Bernoulli.

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

On:

$p = \text{pressió absoluta (Pa)}$

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

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

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

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

A.8. Equació de Navier-Stokes.

Són un conjunt d'equacions diferencials que descriuen la variació de la velocitat, tenint en compte que la força actua sobre un element infinitesimal. Les equacions de Navier-Stokes es mostren a les equacions (12), (13) i (14), per a les components u , v , w (x , y , z) de la velocitat respectivament.

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

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

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

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

A.9. Capa límit.

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

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

Al comparar les capes límits, la laminar i turbulenta, s'observa en la figura 75 que la distribució de velocitats en la capa límit turbulenta mostra un gradient de velocitats més pronunciat prop de la superfície i un gradient més planer en la resta de la capa. Llavors l'esforç tallant en la superfície es major en la capa límit turbulenta que en la laminar.

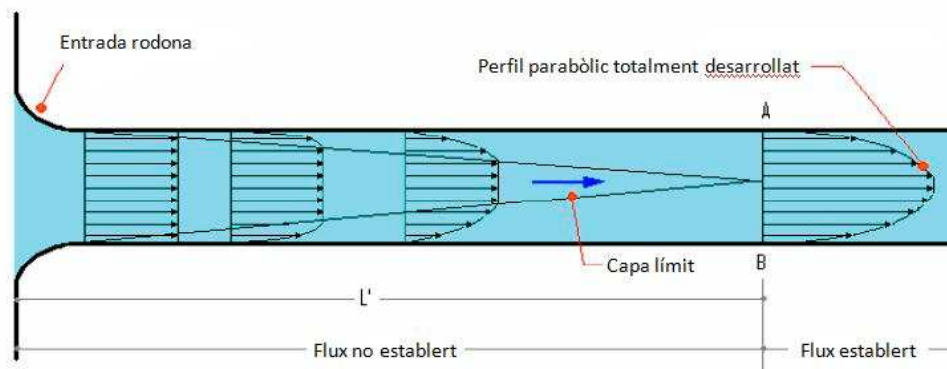


Figura 75. Evolució de la capa límit en l'entrada a un conducte de secció circular.

Cal destacar una diferència important entre el flux al voltant de cossos submergits i flux en conductes. En el cas de conductes, les capes límit de les parets oposades del conducte s'uneixen a una certa distància i el flux arriba a desenvolupar-se en l'interior de la capa límit. En el cas dels vehicles, avions, etc., la capa límit pot arribar a tenir varis centímetres d'espessor, però serà molt petita comparada amb el dimensionament del volum de control. Veiem la figura 76.

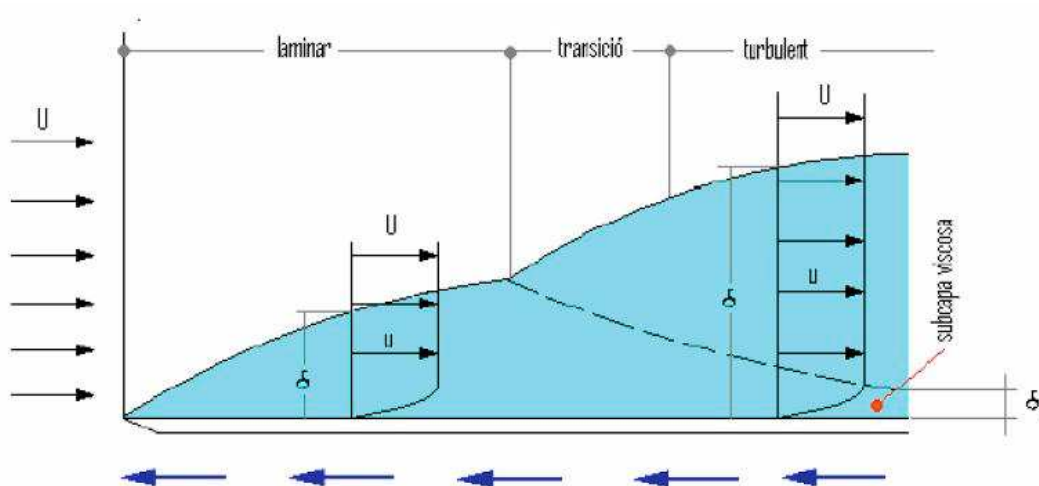


Figura 76. Capa laminar i turbulenta d'una placa llisa.

A.10. Bibliografia.

- Bruce R, Munson, Donald F Young, Theodore H. Okijshi. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Editorial Limusa Wiley. Any 2000.
- Frank M. White. *Mecánica de fluidos*. L/S 532 WHI.
- Gerahart P, Gross R, Hochstein. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Addison Wesley Iberoamericana. Any 1995.
- Mataix C. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ediciones el Castillo, S. A. Any 1982.

ANNEX B

B. FONAMENTS D'AERODINÀMICA.

B.1. Introducció.

L'objectiu d'aquest annex és introduir els principals paràmetres de disseny que han de tenir els cossos per tractar-los aerodinàmicament.

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

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

B.2 Sustentació.

Si un fluid amb una velocitat relativa u incideix sobre un sòlid (veure figura 77), es pot observar que la seva acció repercuteix en la formació de la força resultant R normal al pla d'incidència AB .

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

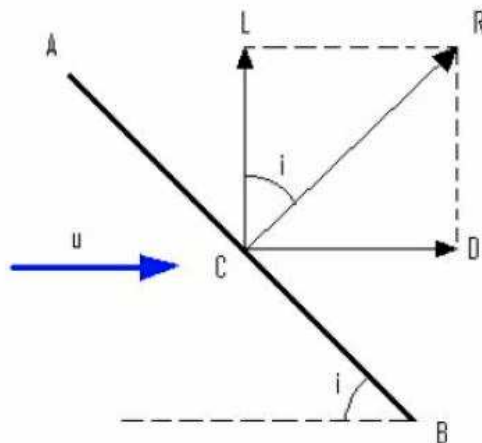


Figura 77. Força R de pressió que es crea sobre un pla AB per la incidència d'un fluid.

pesants de transport de passatgers.

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

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

Si observem la figura 78, en la part inferior del pla on xoquen les partícules del fluid, es denomina intradós i és on es creen pressions positives. En canvi la part superior és on es generen pressions negatives i es denomina extradós, de manera que la sustentació es produeix degut a la diferència de pressions entre l'intradós i l'extradós.

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

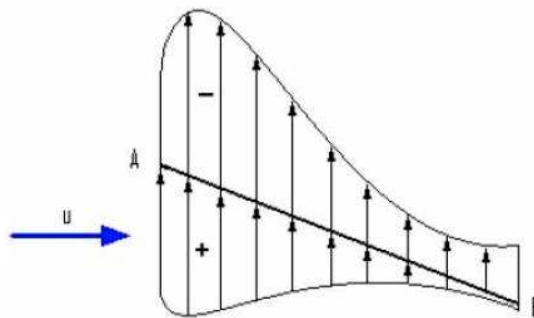


Figura 78. Distribucions de pressió sobre un pla.

B.3. Teorema de Kutta-Jouksky de la sustentació.

La fórmula de la força de sustentació d'un cilindre va ser deduïda per Kutta-Jouksky per perfils d'ala d'avió, on la circulació Γ en el cas general be donada per l'equació 15.

$$\Gamma = v \pi l k \sin \alpha \quad (\text{Eq. 15})$$

On:

$\Gamma = \text{circulació (m}^2/\text{s)}$

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

$l = \text{corda del perfil (m)}$

$k = \text{coeficient que idealment només depèn de la geometria del perfil.}$

$\alpha = \text{angle d'atac (}^\circ\text{)}$

La corda del perfil és la distància que en cada perfil uneix la borda d'atac i la borda de sortida.

També cal dir que en aquesta fórmula l'angle d'atac és mesura a partir de la línia neutra, o sigui la paral·lela a u que passa per la borda de sortida del perfil. L'Equació 16 mostra la fórmula de Kutta-Jouksky per a la determinació de la força de sustentació.

$$F_L = b\Gamma\rho v \quad (\text{Eq.16})$$

On:

$F_L = \text{força de sustentació (N)}$

$b = \text{envergadura (distància en m d'extrem a extrem del perfil)}$

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

$\Gamma = \text{circulació (m}^2/\text{s)}$

Substituint el valor de Γ en l'equació de Kutta-Jouksky s'obté l'equació 17.

$$F_L = \frac{\rho}{2} v^2 A_L 2\pi \sin\alpha \quad (\text{Eq.17})$$

On:

$A_L = lb$, anomenada també àrea projectada del perfil.

Podem observar millor els paràmetres a la figura 79.

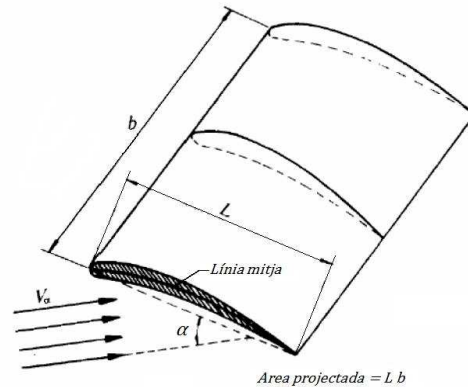


Figura 79. Perfil d'una ala amb els seus paràmetres característics.

Per tant, la força de sustentació es pot veure a l'equació 18.

$$F_L = A_L \frac{\rho}{2} v^2 C_L \quad (\text{Eq.18})$$

On:

C_L = coeficient de sustentació

Aquest idealment només depèn del coeficient de forma i de l'angle d'atac, i es descriu matemàticament com

$$C_L = 2\pi \sin\alpha \quad (\text{Eq.19})$$

B.4. Coeficient de sustentació.

El coeficient de sustentació és la relació, com es pot veure en l'equació 20, entre la força vertical F_L i la pressió dinàmica per la superfície resultant de la projecció del vehicle sobre la direcció del moviment A_L .

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{\rho}{2} v^2 A_L} \quad (\text{Eq.20})$$

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

En funció de si la circulació que envolta el perfil, el flux abandonarà el cos per la seva borda de fuga amb més o menys suavitat. Si observem la figura 80 s'aprecia millor.

La forma que afavoreix la sustentació és una borda de fuga aguda, punt on l'aire deixa de tocar el perfil, de manera que l'intradós i l'extradós tinguin la mateixa velocitat a l'abandonar el perfil.

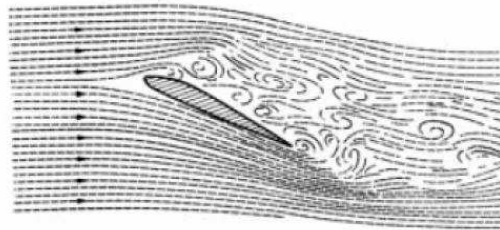


Figura 80. Flux al voltant d'un perfil.

B.5. Perfils sustentadors.

Les superfícies sustentadores es defineixen per una sèrie de paràmetres que es poden apreciar en la figura 81.

En l'aspecte geomètric, la corda, és la línia de curvatura mitja respecte a les distàncies de l'intradós i extradós.

En aspecte aerodinàmic els valors dels coeficients de sustentació C_L i de resistència a l'avanç C_D són en funció de l'angle d'incidència que forma la velocitat relativa amb la corda, el centre de pressions o punt d'aplicació de la resultant aerodinàmica R.

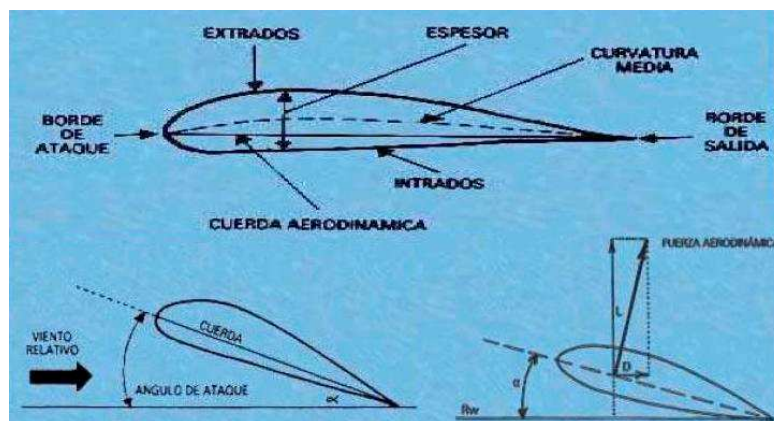


Figura 81. Elements que constitueixen les diferents parts d'un perfil.

B.6. Resistència.

La resistència és l'oposició que exerceix un sòlid al pas del fluid a través d'ell (Munson, 2000). Segons la forma que tingui un sòlid, les partícules no el podran contornejar totalment.

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

A certa distància, abans i després del sòlid, i lateralment, per l'acció de la viscositat, el fluid notarà la pertorbació produïda pel sòlid. A la figura 82 tenim un exemple d'un cos al voltant del flux.

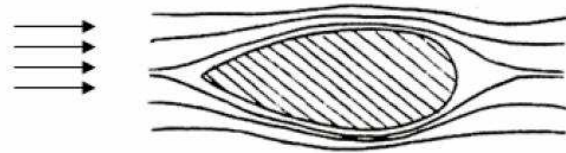


Figura 82. Flux al voltant d'un sòlid.

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

Tanmateix, en fluids reals, la viscositat juga un paper molt important. A l'estar el sòlid en repòs, la velocitat del fluid en la superfície de contacte és nul·la, augmentant progressivament a mesura que s'allunya del sòlid. Això genera un gradient de velocitats (veure figura 83). El gruix de la capa on el gradient de velocitats és apreciable es denomina capa límit (Mataix, 1982).

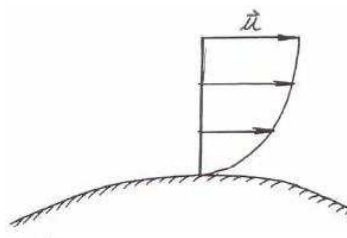


Figura 83. Gradient de velocitat.

Si la velocitat és elevada i, especialment, si el cos que ha de ser estudiat té xamfrans aguts, els límits per on el flux abandona el sòlid penetren en una zona de

pesants de transport de passatgers.

depressió posterior, donant origen a la formació de remolins que es desprenen de la superfície del sòlid de forma alternada (veure figura 84).

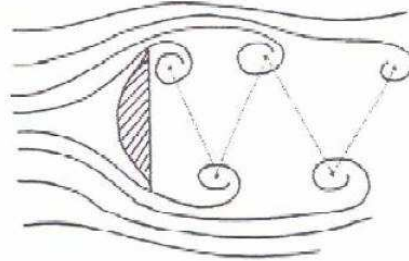


Figura 84. Formació de remolins alternats.

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

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

Les formes aerodinàmiques fonamentals solen ser sòlids de revolució, amb proa (la part anterior) de formes rodones i popa (la part posterior) molt allargades per evitar el desprendiment de la capa límit.

Per la importància de la forma, aquesta contribució a la resistència a l'avanç també es denomina **resistència de forma**.

La presència de la capa límit i de les forces tangencials dona origen a una altra contribució a la resistència, que s'oposa al moviment del cos. Aquesta s'anomena resistència de superfície. De manera que, la suma de les resistències de forma, i de superfície dona la resistència total. Aquesta resistència total es pot disminuir resolent-la per separat amb les seves components.

Així que:

- Es pot deixar la superfície del vehicle amb una de rugositat la més petita possible.
- S'ha de tenir en compte la resistència a la viscositat i de forma, amb l'inconvenient que quan es millora una d'aquestes resistències l'altre empitjora. Un exemple seria amb la longitud del vehicle perquè aquest provoca un desprendiment de la capa límit més retardada evitant la formació de remolins, però, per contra la resistència viscosa ha de recórrer major longitud.

B.7. Coeficient d'arrossegament.

Qualsevol cos immers en una corrent de fluid real 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 dóna lloc al coeficient d'arrossegament (Munson, 2000). Veiem l'equació 21.

$$C_D = \frac{F_D}{P_D} = \frac{F_D}{\frac{\rho}{2} v^2 A_D} \quad (\text{Eq.21})$$

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)

B.8. Resistència de les formes.

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

B.9. Resistència a elevats números de Reynolds.

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

Si el cos no té punta la resistència principal es la de forma (pressió). Experimentalment s'ha demostrat que el coeficient de resistència es basa en l'àrea frontal (veure la figura 85).

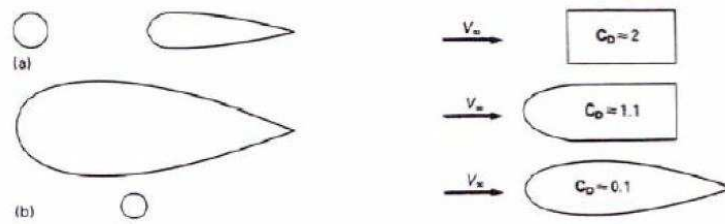


Figura 85. La figura (a) mostra un cilindre i un fuselatge a la dreta, amb la mateixa area frontal, però el C_D del cilindre es 5 cops mes gran que el fuselatge, la figura (b) mostra un cilindre i un cos fuselat amb el mateix C_D .

B.10. Resistència aerodinàmica a l'avanç.

La força aerodinàmica mes important sobre un vehicle és la resistència a l'avanç com també els factors i característiques dels que depèn. Aquestes són per exemple:

- Característiques del vehicle, com podria ser la forma i area frontal, etc.
- Factors del medi, com per exemple la densitat de l'aire, condicions mediambientals.
- Factors operatius, com la velocitat del vehicle, etc.

La resistència aerodinàmica es produeix per dues raons:

- Una és la pressió que apareix quan les molècules xoquen contra una superfície, de tal manera que experimenten una variació en la seva quantitat de moviment i exerceixen una força normal a la superfície.
- L'altre tipus de forces és quan apareix moviment lliscant de les molècules de l'aire al voltant de les superfícies quan l'aire circula al seu voltant.

El coeficient de resistència a l'avanç es compon de dos sumands. Una part de la resistència és deguda a la fricció (*tensions tangencials*), mentre que l'altra s'origina com a conseqüència de les diferències de pressió generades pel desprendiment.

Per tant és pot expressar com l'equació 30.

$$C_D = C_{DV} + C_{DP} \quad (\text{Eq.30})$$

On:

C_{Dv} = es la part del coeficient de resistència a l'avançada a la fricció.

C_{Dp} = es la originada per les forces de pressió.

B.11. Bibliografia.

- Bruce R, Munson, Donald F Young, Theodore H. Okijshi. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Edición Limusa Wiley. Any 1990.
- J. D. Anderson. *Fundamentals of aerodynamics*. Editorial Mcgraw-hill. Any 1991.
- Mataix C. *Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas*. Ediciones el Castillo, S. A. Any 1982.

ANNEX C

C. AERODINÀMICA DE VEHICLES.

S'ha de tenir en compte que no hi ha models teòrics precisos per predir la resistència aerodinàmica i per això l'experimentació ha estat la millor forma per obtenir dades i coneixements sobre la influència de varies variables geomètriques sobre el comportament aerodinàmic dels vehicles.

C.1. Introducció.

L'objectiu de l'aerodinàmica en automoció és estudiar un conjunt d'accions i efectes que l'aire realitza sobre l'automòbil quan aquest està en moviment.

Els esforços tenen una gran importància pel que fa al funcionament i estabilitat del vehicle.

Els motius que fan que els fabricants destinin recursos en l'estudi aerodinàmic és en gran part la necessitat de reduir el consum, com també la reducció de soroll. Nosaltres ens centrem en el primer.

Podem veure en la figura 86 un exemple de comparació entre la resistència al rodament, la de transmissió i la resistència aerodinàmica en funció de la velocitat d'un cotxe urbà.

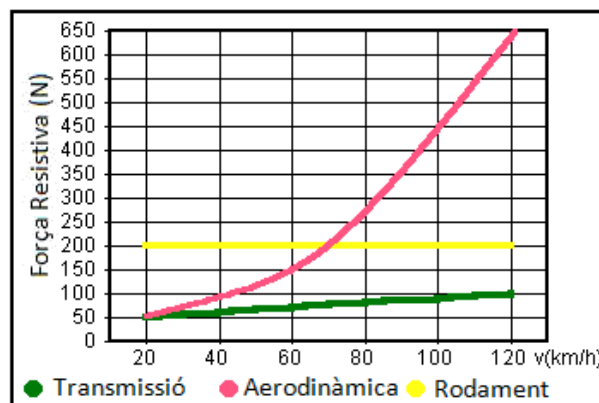


Figura 86. Exemple aproximat entre diferents resistències possibles d'un cotxe urbà.

La resistència aerodinàmica a baixes velocitats és petita, la major resistència és a causa del rodament, es veu clarament que la resistència aerodinàmica és elevada a velocitats altes. Més concretament, la resistència aerodinàmica segueix una expressió de forma, $F_a \propto v^2$.

A causa de varis factors com la posició dels ocupants, equipatge, etc, fa que el disseny d'un vehicle aerodinàmicament òptim sigui complicat.

C.2. El camp de flux al voltant d'un vehicle.

El flux provocat pel moviment d'un vehicle és molt complex i això fa que la descripció d'aquest s'hagi de fer a partir de velocitats i pressions mesurades, com també observacions del flux realitzades a la superfície del vehicle.

Com a norma general, el flux al voltant d'un vehicle en moviment és asimètric. La velocitat del fluid U_{∞} resulta de la velocitat del vehicle V i de la velocitat V_w del vent, on dóna lloc a un angle β relatiu a la direcció del moviment del vehicle (veure figura 87).

Quan s'estudia el flux d'un vehicle, primer es considera un flux simètric i després es planteja l'influència del vent lateral. Tanmateix cal dir que el flux asimètric s'estudia dins el context de l'estabilitat direccional.

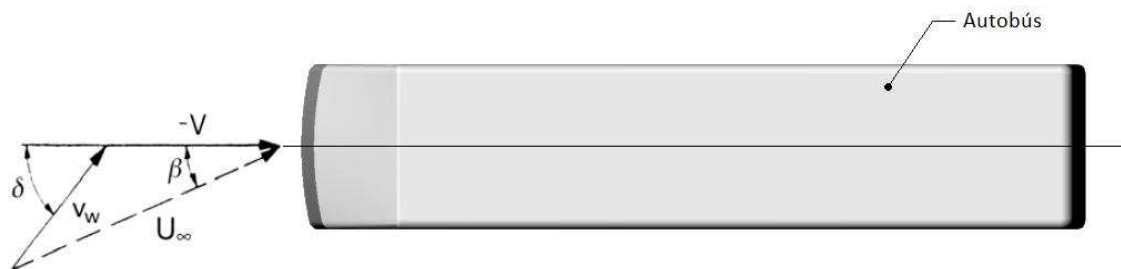


Figura 87. Incidència d'un flux asimètric en un vehicle "autobús".

En el flux al voltant dels vehicles hi han nombrosos desprendiments de capa límit. Depenent de la regió, són més o menys grans i solen ser de tipus bidimensional o tridimensional.

Sovint la separació és bidimensional amb una línia de separació perpendicular local al flux, tot i que el comportament del flux sigui tridimensional. A partir d'aquestes separacions el flux torna a adherir-se a la superfície, on es produeixen vòrtex localitzats i tancats dins del flux extern (tal i com especifica Víctor Saiz Vela, 2005).

Les separacions locals es donen en els accessoris que no formen part de la carrosseria del vehicle com, per exemple, antenes, retrovisors, etc.

Les separacions globals tenen lloc a la part de darrere del vehicle on el flux és pertorbat per l'existència d'elements mecànics com, per exemple, rodes, etc. (Veure figura 88).

pesants de transport de passatgers.

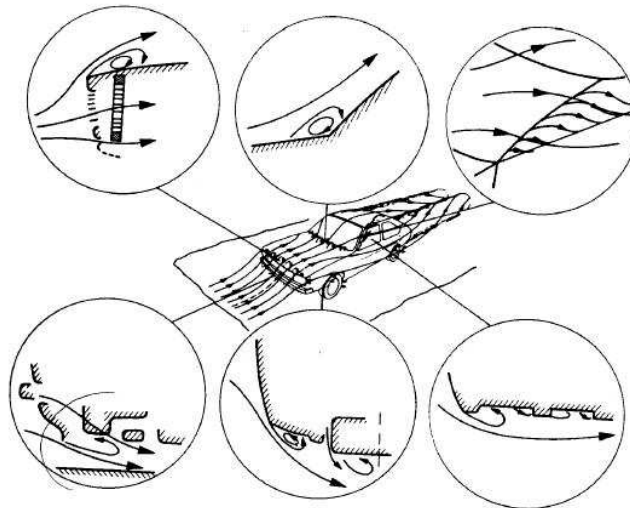


Figura 88. Detalls del flux al voltant d'un vehicle.

També hi han efectes de tipus ambiental que modifiquen el flux existent en el vehicle, aquets poden ser el vent, interacció amb altres vehicles, túnels, ponts, etc. En la figura 89, es pot observar el flux extern al voltant d'un vehicle. Els corrents d'aire que incideixen sobre el vehicle tenen que equiparar-se tant en la part davantera com posterior.

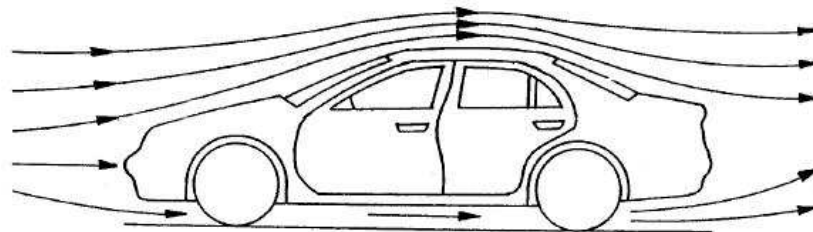


Figura 89. Línies de flux al voltant d'un vehicle.

El corrent exterior normalment és la responsable de la força de resistència a l'avanç i de la pressió principal, mentre que la corrent de sota del cos fa elevar el vehicle (força de sustentació).

La resistència per interferència s'origina per elements que surten del propi vehicle com per exemple miralls, manetes i altres elements complementaris.

Tots aquets elements experimenten resistència per si mateixos i també pertorben el flux sobre la forma bàsica del cos, el que influeix també en la seva resistència (tal i com s'especifica Víctor Saiz Vela, 2005).

pesants de transport de passatgers.

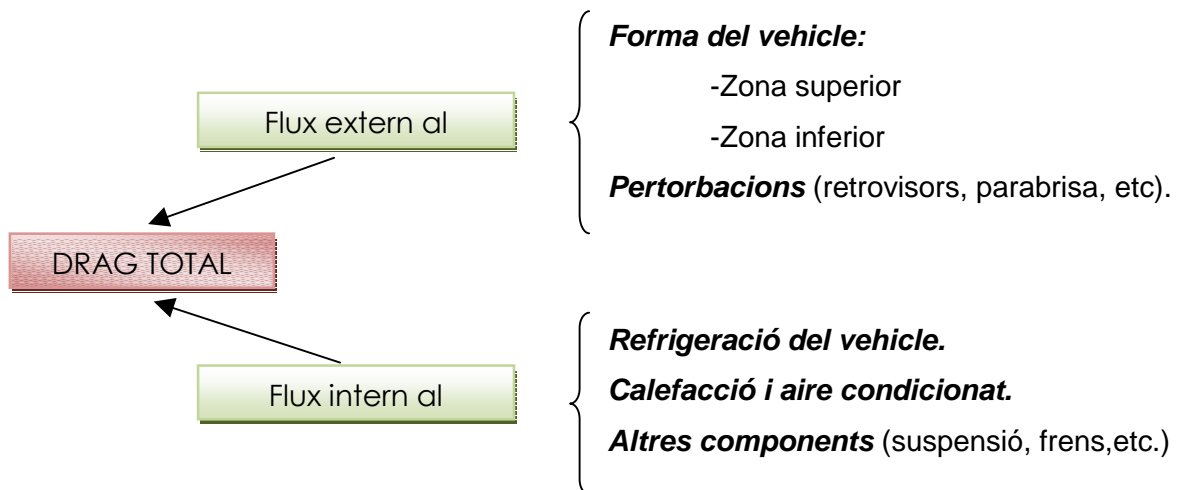
Es poden identificar els fluxos que actuen sobre un vehicle de la següent manera:

- Flux d'aire extern al vehicle (per sota i laterals). Veiem l'exemple de la figura 90.



Figura 90. Exemple d'aire inferior extern.

- Flux d'aire que passa a través dels compartiments interiors:
Per veure-ho més clarament observem figura 91 (Drag total) següent:



Esquema 91. Relació entre la força de resistència i els components que l'originen.

C.3. Accions aerodinàmiques sobre vehicles.

Per modelitzar les accions aerodinàmiques que actuen sobre un vehicle i poder analitzar-les, les forces i moments es poden representar esquemàticament per una resultant general de força i una altre de moment aplicades sobre el centre de gravetat del vehicle (veure figura 92). Aquestes es poden descompondre en la direcció de cadascun dels eixos del vehicle.

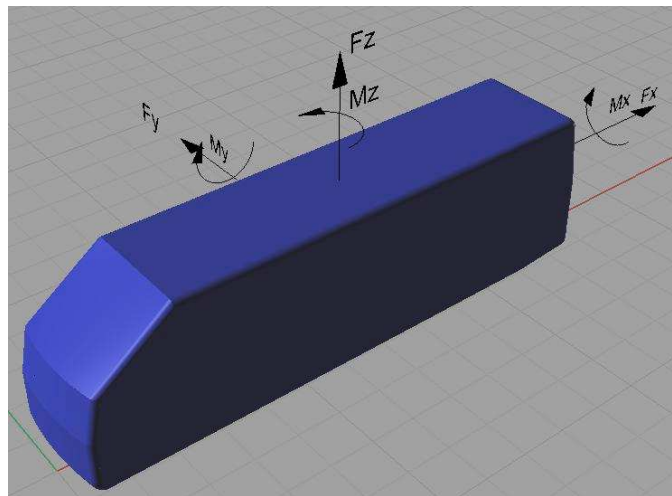


Figura 92. Descomposició de forces i moments sobre un vehicle.

Cada una d'aquestes forces té el seu origen en la pròpia geometria del vehicle, o bé degut a la variació de l'angle d'incidència β . Aquestes forces i moments es poden obtenir a partir d'expressions matemàtiques que es basen en la pressió dinàmica del flux no pertorbat, uns coeficients adimensionals associats, i en l'àrea característica del vehicle. En el cas dels moments les expressions utilitzen la mateixa característica, es a dir, l'àrea frontal del vehicle (veure figura 92), però a més s'utilitza una dimensió característica L , que es pren com a longitud mes gran.

Tipus de forces :

Resistència aerodinàmica a l'avanç (veure l'equació 22).

$$F_D = A_f \frac{\rho}{2} v^2 C_D \quad (\text{Eq.22})$$

On:

$F_D = \text{força de resistència aerodinàmica a l'avanç}(N).$

$C_D = \text{coeficient de resistència a l'avanç (adimensional)}.$

$A_f = \text{àrea característica del vehicle (m}^2).$

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

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

Empenta lateral aerodinàmica (veure l'equació 23).

$$F_L = A_f \frac{\rho}{2} v^2 C_L \quad (\text{Eq.23})$$

On:

$F_L = \text{força d'empenta lateral aerodinàmica (N)}.$

$C_L = \text{coeficient de sustentació aerodinàmica (adimensional)}.$

$A_f = \text{àrea característica del vehicle (m}^2).$

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

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

Sustentació aerodinàmica (veure l'equació 24).

$$F_y = A_f \frac{\rho}{2} v^2 C_y \quad (\text{Eq.24})$$

On:

$F_y = \text{força de sustentació aerodinàmica (N)}.$

$C_y = \text{coeficient de resistència lateral (adimensional)}.$

$A_f = \text{àrea característica del vehicle (m}^2).$

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

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

Tipus de moments:

Moment aerodinàmic de bolcada (veure l'equació 25).

$$M_x = A_f \frac{\rho}{2} v^2 C_{mx} L \quad (\text{Eq.25})$$

On:

M_x = moment aerodinàmic de bolcada (Nm).

C_{mx} = coeficient de resistència al balanceig (adimensional).

A_f = àrea característica del vehicle (m^2).

ρ = densitat (Kg/m^3)

v = velocitat (m/s)

L = longitud característica (m)

Moment aerodinàmic de capcineig (veure l'equació 26).

$$M_y = A_f \frac{\rho}{2} v^2 C_{my} L \quad (\text{Eq.26})$$

On:

M_y = moment aerodinàmic de capcineig (Nm).

C_{my} = coeficient de resistència al capcineig (adimensional).

A_f = àrea característica del vehicle (m^2).

ρ = densitat (Kg/m^3)

v = velocitat (m/s)

L = longitud característica (m)

Moment aerodinàmic de guinyada (veure l'equació 27).

$$M_z = A_f \frac{\rho}{2} v^2 C_{mz} L \quad (\text{Eq.27})$$

On:

M_z = moment aerodinàmic de guinyada (Nm).

C_{mz} = coeficient de resistència de guinyada (adimensional).

A_f = àrea característica del vehicle (m^2).

ρ = densitat (Kg/m^3)

v = velocitat (m/s)

L = longitud característica (m)

A_f és l'àrea on es pren la major secció transversal que es denomina àrea frontal (veure figura 93).

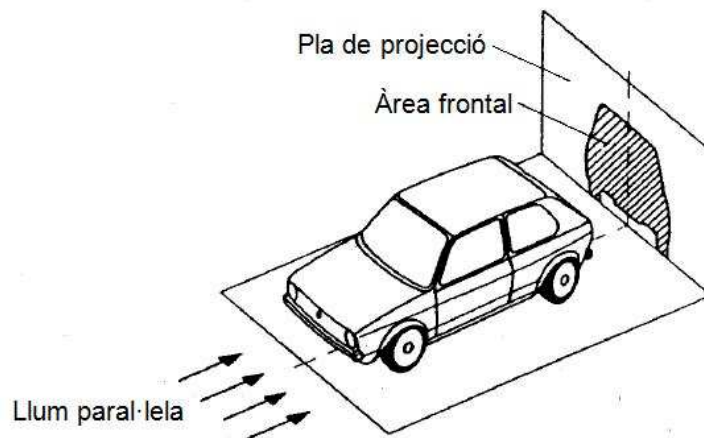


Figura 93. Àrea frontal d'un vehicle.

Normalment, la mida del vehicle i per tant l'àrea frontal A_f ve determinada per raons de disseny, on els esforços per disminuir la resistència a l'avanç es dirigeixen a reduir el coeficient de resistència a l'avanç C_D .

Si el flux incident és simètric respecte l'eix ($\beta = 0$), és a dir l'angle d'incidència és nul, les úniques forces que hi ha són F_D i F_L , i el moment de M_y .

Quan l'angle d'incidència sigui diferent de zero ($\beta \neq 0$) apareix un flux asimètric al voltant del vehicle, per tant les sis components tindran, en general, valors diferents de zero i aquets esforços determinaran la resultant total.

pesants de transport de passatgers.

En aquestes condicions es poden presentar problemes d'inestabilitat, el moment de guinyada M_z tendeix a fer girar el vehicle respecte l'eix vertical z. Si l'augment d'aquest moment tendeix a reduir l'angle d'incidència, el vehicle és aerodinàmicament estable, el fet contrari seria inestable, veiem les equacions 28 i 29.

- Si, $\frac{\partial C_{mz}}{\partial \beta} < 0$, el vehicle es aerodinàmicament estable. (Eq.28)

- Si, $\frac{\partial C_{mz}}{\partial \beta} > 0$, el vehicle es aerodinàmicament inestable. (Eq.29)

Per tant, les formes del vehicle han de ser tals que les forces i moments exercides pel flux externs no afectin a l'estabilitat del vehicle.

Els coeficients aerodinàmics depenen de paràmetres adimensionals de flux com per exemple el número de Reynolds (Re) o l'angle d'incidència (β).

En la suposició del cas bidimensional, l'acció d'un fluid és la força de resistència a l'avanç (F_D), sempre existeix, i té sentit dels corrent aigües avall. La component de la força perpendicular al flux és la força de sustentació F_L i es produeix quan el cos, és asimètric en la direcció axial o pot tenir sentit cap amunt o cap avall.

La forma aerodinàmica òptima és aquella que permet aconseguir un arrossegament total mínim (J. D. Anderson, 1991).

C.4. Influència de la part davantera.

Si es consideren tancades totes les entrades de ventilació, el flux al voltant de la part davantera del vehicle es caracteritza per un punt d'estancament i una àrea d'alta pressió que l'envolta.

El coeficient de resistència a l'avanç i el de sustentació tendeixen a disminuir a l'augmentar el valor dels radis o xamfrans del perfil de la part davantera (veure figura 94).

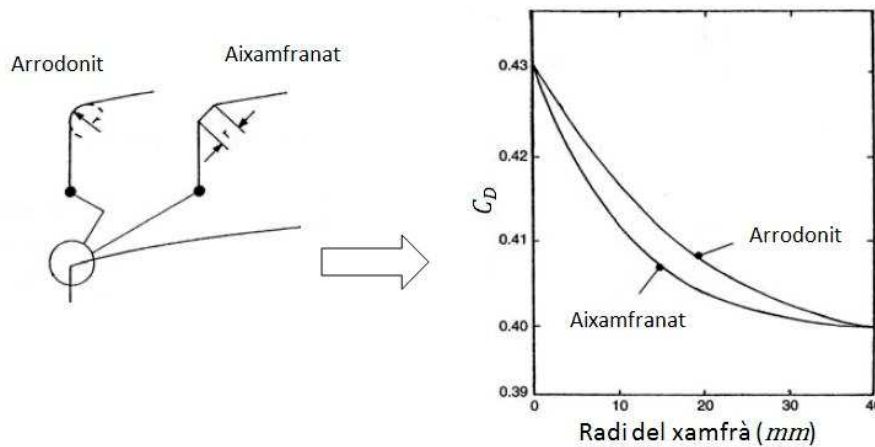


Figura 94. Influència sobre la forma.

Per la reducció de la resistència, a més de dissenyar el frontal, de manera que el flux d'aire passi pel vehicle sense separació, s'ha de tenir en compte la posició del punt d'estancament. Aquest punt determina quina és la proporció d'aire que passa per sobre i per sota del vehicle i dependrà de la forma i disseny dels baixos (tal i com s'especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

Generalment es pot dir que un punt d'estancament és favorable per tenir una baixa resistència a l'avanç. El més adient és arrodonir les formes entre el punt d'estancament i el capó.

Inclinació frontal

La inclinació entre el vidre i el sostre són paràmetres que també influeixen a la resistència a l'avanç del vehicle, a la figura 95 es pot veure com aquest queda afectat en funció de l'angle α .

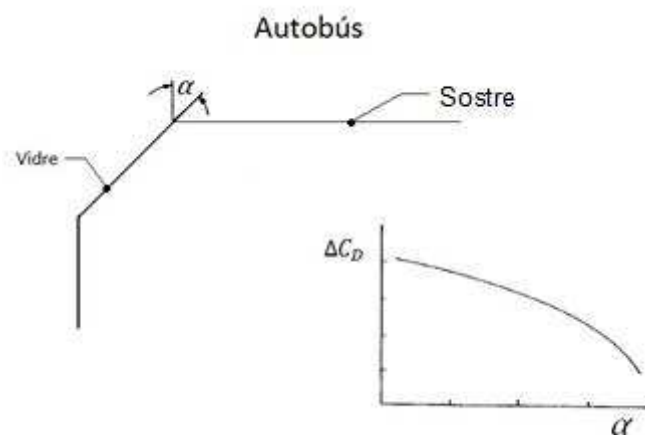


Figura 95. Efectes sobre el C_D entre el vidre i sostre d'un autobús.

Observem que el C_D es redueix a l'augmentar l'angle α . Aquest angle té un límit per qüestions practiques, i és que a més de 60° es produeix una difusió de llum massa intensa al vehicle i empitjora la visibilitat.

Aquesta inclinació té un efecte favorable sobre la part de darrere del vehicle. Si augmentem la inclinació del vidre, la depressió en la zona de transició entre el parabrisa i el sostre és menor, com a conseqüència el gradient de pressió al llarg del sostre és menor. Aquest efecte provoca que la pèrdua de quantitat de moviment disminueixi i la pressió en la part de darrere sigui més gran.

Es pot considerar, que encara, que la inclinació del parabrisa tingui un efecte directe "moderat" en la reducció del C_D , al millorar el flux en la part posterior millora considerablement el valor global del C_D .

C.5. Influència dels laterals i sostre del vehicle.

La separació que apareix a la part de darrere depèn molt de les diferents inclinacions. A continuació expliquem els varis rangs d'inclinacions (tal i com s'especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005):

- Quan la superfície de darrere del vehicle té un angle d'inclinació des de 90° a 50° s'anomena **Squareback** (veure la figura 96).

Podem observar en la gràfica que pels angles de la superfície de darrere el comportament de les línies de corrent té canvis molt petits i es pot afirmar que no hi ha variació en la resistència a l'avanç (veure figura 100).

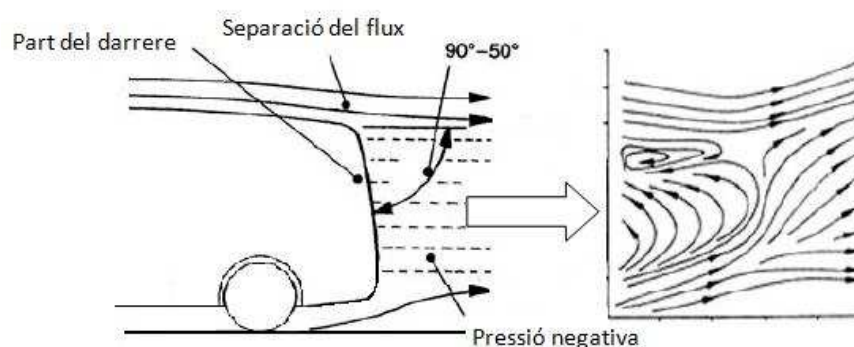


Figura 96. Comportament entre 90° i 50° (Configuració Squareback).

- Quan la superfície de darrere del vehicle té un angle d'inclinació inferior a 25° s'anomena **Fastback**.

pesants de transport de passatgers.

Les línies de corrent flueixen a través del sostre i de la superfície de darrere, per tant el flux es desplaça adherit fins arribar a la part final del vehicle. Es per això que la única succió que hi ha prové de la turbulència generada en la superfície vertical de la part de darrere del vehicle. Per tant, a mesura que l'angle d'inclinació és proper a zero hi ha un augment del coeficient de resistència. Llavors si augmentes més seria una del tipus Squareback(veure la figura 97).

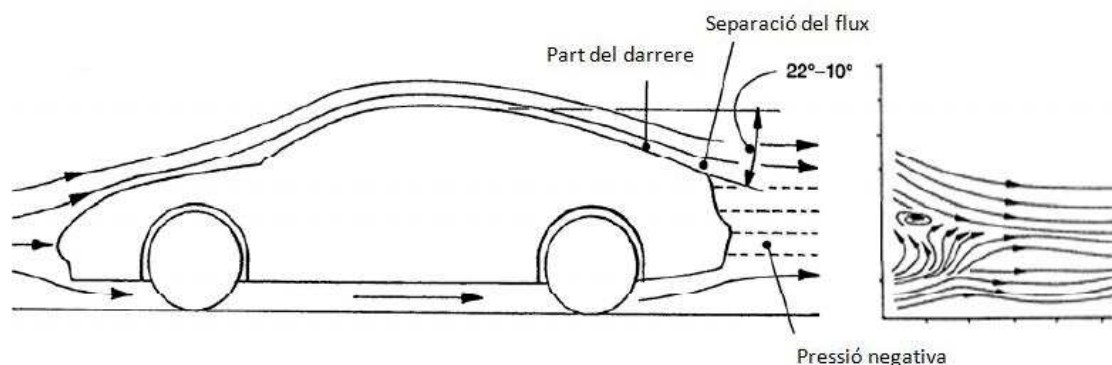


Figura 97. Comportament inferior a 25° (Configuració Fastback).

- **Notchback** és una configuració que correspon a un vehicle del tipus berlina, on el perfil de darrere està unit per una inclinació entre el sostre i el capó.

Amb aquesta distribució de flux es manté adherit a la part de darrere de la superfície a excepció de la bombolla de separació que es genera el contacte entre la finestra i el maleter. Segons la inclinació i l'alçada del maleter es millora o es perjudica la resistència a l'avanç(veure figura 98).

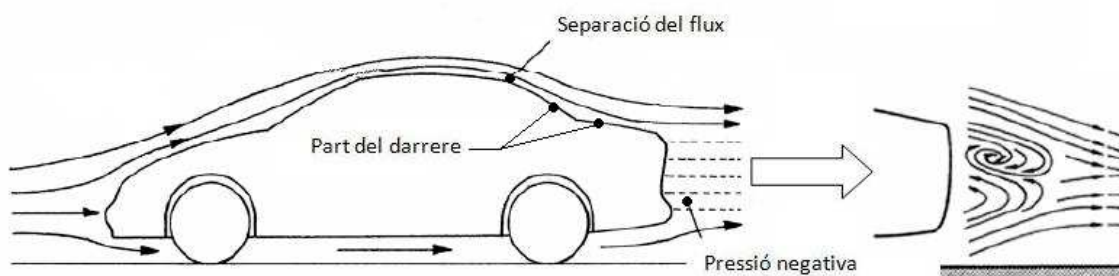


Figura 98 Configuració Notchback.

- Els vehicles amb una inclinació de darrere entre 50° i 25° s'anomenen **Hatchback**, aquesta es caracteritza perquè l'aire flueix a través del sostre del vehicle fins al començament de la superfície de darrere, degut al fort pendent que té(veure figura 99).

pesants de transport de passatgers.

Aproximadament l'angle 30° és crític perquè el coeficient de resistència a l'avanç augmenta considerablement i per tant s'ha d'evitar des del punt de vista aerodinàmic (veure figura 100).

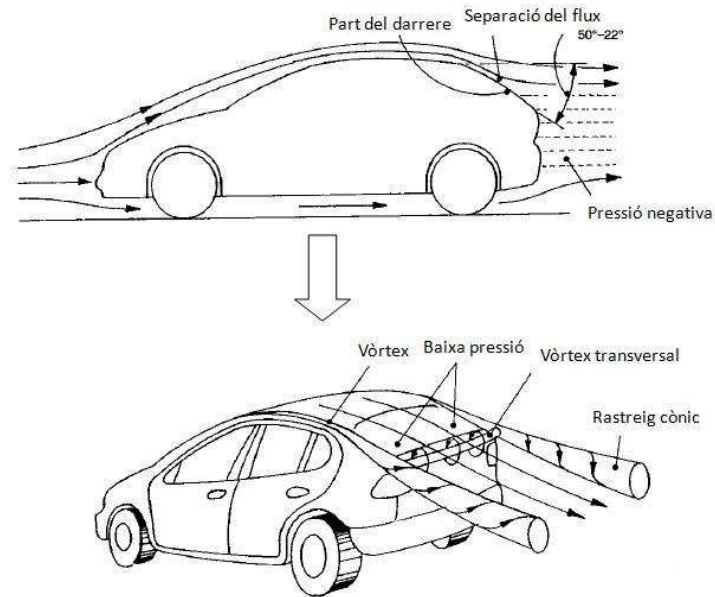


Figura 99. Configuració Hatchback.

A les figures de les diferents configuracions es veuen el parell de vòrtex que es formen en les diferents configuracions dels vehicles. El vòrtex inferior gira antihoràriament i és el que fa arrossegar la brutícia a la part de darrere del vehicle, mentre que el vòrtex superior gira en sentit oposat. Llavors les bombolles de separació es tanquen i un parell de vòrtex antihoraris longitudinals formen el deixant.

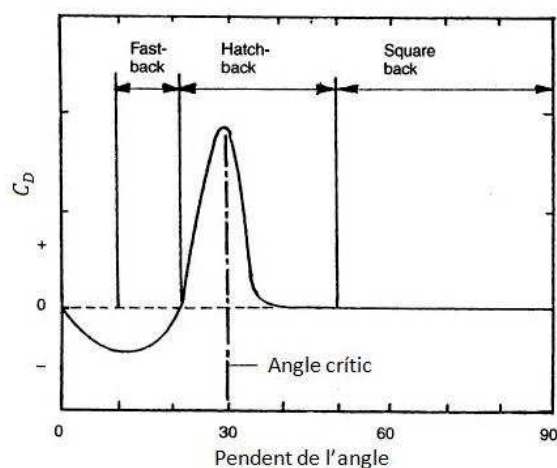


Figura 100. Efecte de la inclinació de la part de darrere del vehicle en C_D .

C.6. Característiques dels laterals i sostre dels vehicles.

El disseny dels laterals i el sostre del vehicle poden ajudar a millorar el comportament aerodinàmic del vehicle. Experimentalment s'ha comprovat que la curvatura dels laterals i del sostre afecten a la resistència a l'avanç.

Normalment si augmentem un cert límit la curvatura del sostre i laterals del vehicle redueix el valor del coeficient C_D . En la figura 101 es pot veure que a mesura que augmenta la curvatura del sostre es redueix el C_D . Aquest efecte té un cert límit ja que amb curvatura excessiva el C_D torna a augmentar.

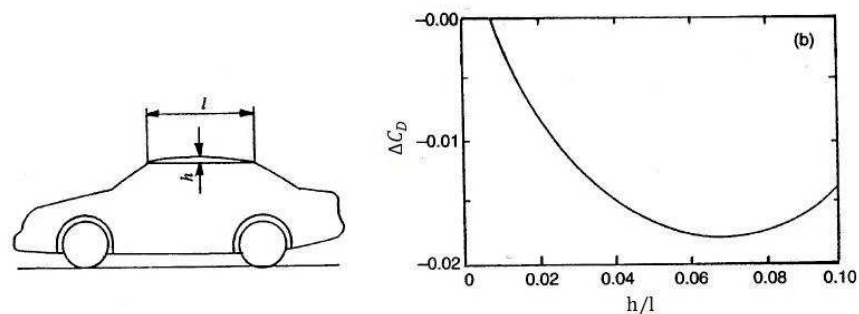


Figura 101. Efecte de la curvatura del sostre en C_D .

Quan augmentem la curvatura dels laterals del vehicle ens implica una reducció del coeficient de resistència a l'avanç. En la figura 102 podem veure la reducció significativa davant l'augment de dita curvatura. En cas de augmentar excessivament la curvatura, la reducció de la resistència aerodinàmica és quasi inexistent.

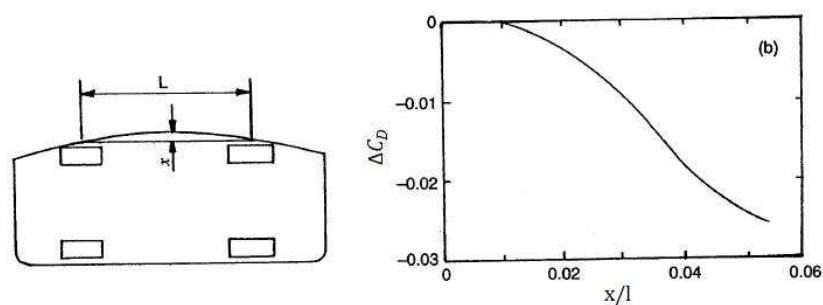


Figura 102. Efecte de la curvatura dels laterals en C_D .

La causant del límit de la curvatura tant del sostre com dels laterals és perquè a l'augmentar la curvatura també s'augmenta l'àrea frontal del vehicle.

Un altre dels aspectes on es pot millorar és la part de darrere dels laterals del vehicle, a través d'una certa inclinació (veure figura 103).

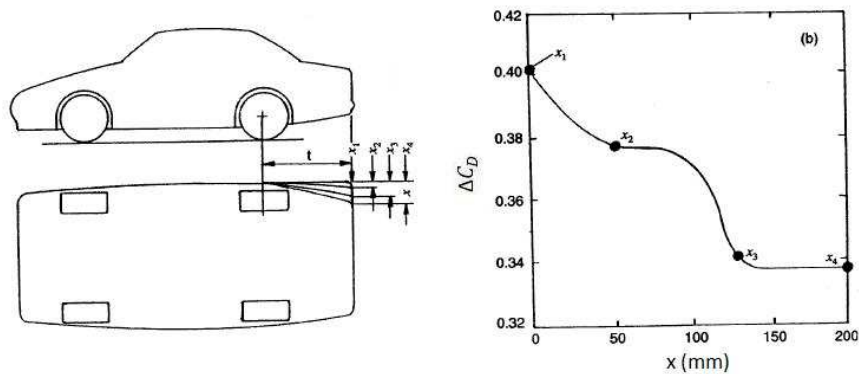


Figura 103. Efecte del C_D en funció de la inclinació.

Observem que mostra una reducció considerable del coeficient de resistència a l'avanç, on també cal dir que hi ha un cert límit, ja que si sobrepassem no tindrem millora.

C.7. Baixos del vehicle.

En la resistència aerodinàmica a part de l'efecte que hi ha en les formes de la part superior del vehicle també influeixen de manera significativa la part de sota del vehicle, és a dir, les formes i acabats que tenen les superfícies. A causa de la col·locació d'elements imprescindibles com per exemple suspensió, canvi, etc, fa que s'hagi de posar panells per suavitzar la resistència a l'avanç i la generació de turbulències.

Part de inferior del darrera

Una altra millora de la resistència aerodinàmica és inclinant la part posterior inferior del vehicle (veure figura 104). Això és a causa de que es produeix un efecte difusor en la part de darrere del vehicle, és a dir, un efecte Venturi.

El que es vol és que l'aire no surti de cop dels baixos i hi hagi molta diferència de pressions i que s'origini turbulències. La inclinació a la part posterior fa que a poc a poc augmenti la pressió i que el flux segueixi adherit al perfil del vehicle i es disminueixin les pèrdues. Tanmateix és important triar una relació adequada entre els

pesants de transport de passatgers.

paràmetres que intervenen per aconseguir uns bons resultats. Els paràmetres a tenir en compte són:

t = longitud dels baixos.

L = longitud del vehicle.

β = angle d'inclinació.

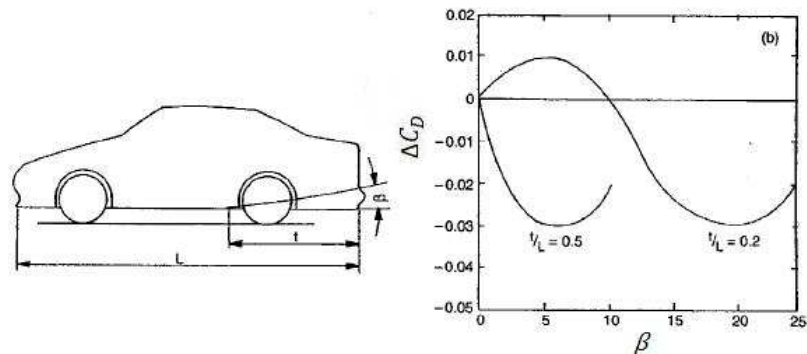


Figura 104. Efecte de la inclinació dels baixos a la part de darrere.

C.8. Rodes.

Les rodes tenen un efecte aerodinàmic important. Si la roda gira al voltant del seu eix i està separada del terra, l'aire que es troba a la part més propera de la banda de rodament serà arrossegada per la rotació de la roda i s'indueix el moviment en les partícules de l'aire que hi ha al seu voltant. Això provoca un vòrtex (veure figura 105).

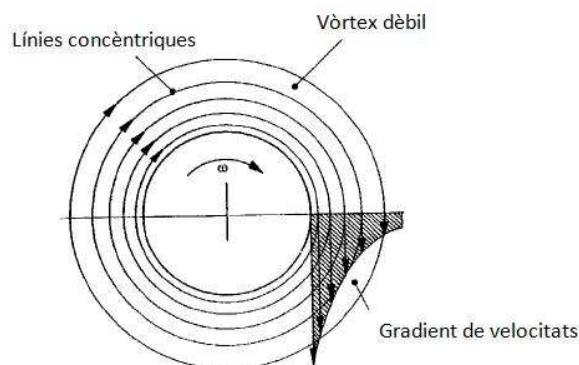


Figura 105. Vòrtex creat per una roda en rotació a l'aire.

A la figura 106 podem veure millor el que passa amb el flux d'aire que circula al voltant d'una roda quan està girant sobre el terra i es troba al descobert.

Com podem veure, el vòrtex que es forma degut a la pròpia rotació de la roda distorsiona i interactua amb el moviment del flux incident sobre el vehicle. Aquesta incidència es caracteritza perquè quan es troba en contacte amb la roda la major part flueix a través del contorn superior, mentre que la part inferior de la roda el flux s'estanca i es creen uns vòrtexs turbulents sota de les línies de corrent.

El punt d'estancament es desplaça cap a la part de darrera a mesura que augmenta la velocitat de rotació de la roda (tal i com s'especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

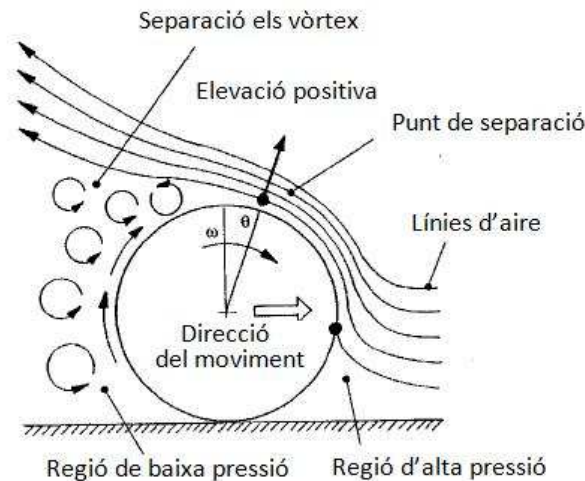


Figura 106. Flux d'aire a través d'una roda en rotació en contacte amb el terra.

A la figura 107 es pot veure la distribució de pressions que es produeix al voltant de la roda. Es mostra una pressió positiva a la zona d'estancament del flux d'aire, però que canvia ràpidament a alts valors de pressió negativa, sobretot en la zona on el flux principal d'aire es separa del perfil de la roda. També podem observar com la pressió baixa fins un cert punt mes lluny de la part de la roda, llavors la pressió es manté aproximadament constant a la part de darrera de la roda on es crea el deixant.

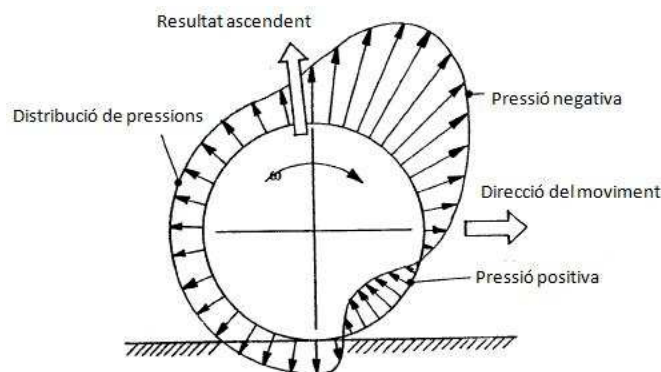


Figura 107. Distribució de pressions de l'aire al voltant d'una roda en moviment.

La roda produeix una força sustentadora ascendent que tendeix a disminuir el contacte entre la banda de rodament del pneumàtic i el terra.

A continuació veurem el que succeeix amb el flux d'una roda d'automòbil. Cal tenir en compte l'efecte que produeix el parafang i el pas de roda.

El flux d'aire que passa per sota del cotxe inicialment es mou més ràpidament que les línies de corrent que incideix sobre el vehicle, per tant es genera una pèrdua de pressió local en aquesta zona.

Podem observar en la figura 108 les línies de corrent al voltant de l'aire que passa a través d'una roda de vehicle.

Degut a efectes viscosos l'aire de la part de darrere de la roda és mogut fins l'espai que hi ha a la part superior del pneumàtic i el pas de roda.

L'aire que hi ha estancat en la cavitat del pas de roda circula fins la part superior del pneumàtic degut a una lleugera intensificació de pressió i aleshores és expulsat cap a la part frontal del pneumàtic per la separació del pas de roda. En aquesta zona l'aire es troba a una pressió inferior en direcció descendent, per tant es produeix una recirculació de l'aire.

En la direcció lateral passa un fenomen semblant que provoca la separació del flux que augmenta la resistència a l'avanç.

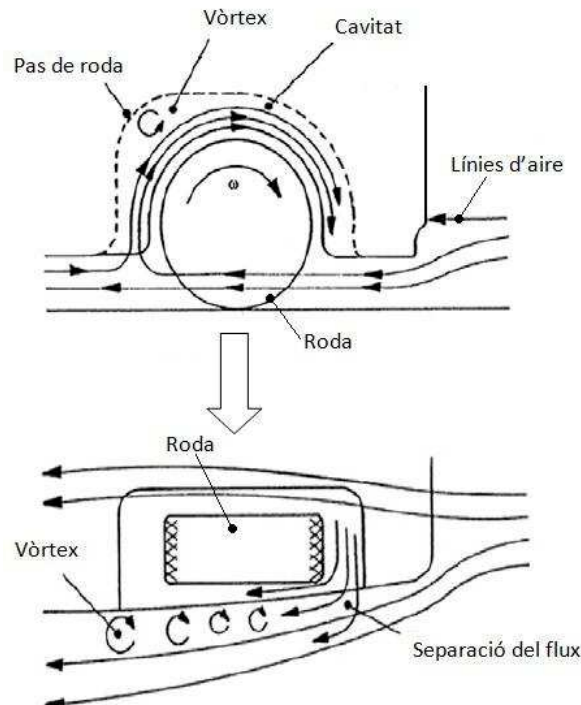


Figura 108. Línies de corrent d'aire al voltant d'una roda de vehicle.

Per millorar la resistència a l'avanç a causa del flux que passa al voltant de les rodes, és recomanable la disminució de l'espai entre els baixos del vehicle i el terra. L'objectiu és aconseguir una circulació adequada del flux incident per disminuir el impuls de l'aire de manera que es redueixin les zones on es formen petites turbulències, ja que això provoca una reducció dels coeficients aerodinàmics (veure figura 109), on els coeficients que es presenten son referents únics a la roda.

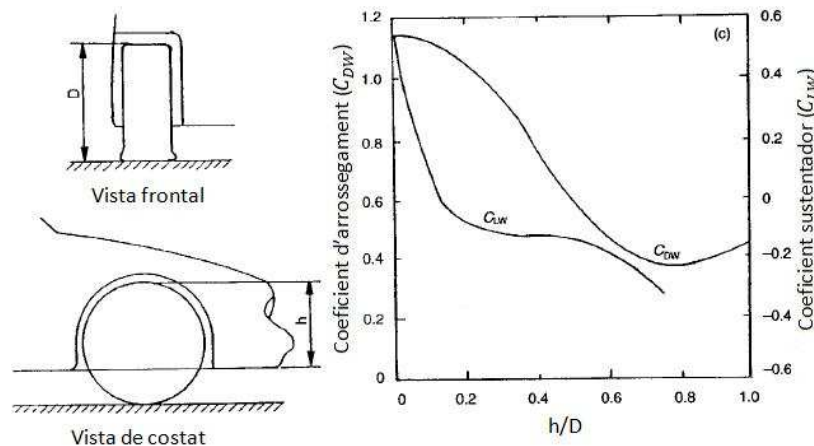


Figura 109. Efecte del disseny dels baixos sobre els coeficients de resistència a l'avanç i sustentació de les rodes.

C.9. Sustentació aerodinàmica.

Quan tenim una diferència de pressions entre la part superior i la inferior del vehicle dóna lloc a una força resultant vertical, perpendicular a la direcció del moviment, que rep el nom de força de sustentació aerodinàmica. Cal saber també que la força de sustentació d'una ala d'avió és positiva (sentit ascendent), però en els vehicles interessa el contrari (sentit descendent).

El coeficient de sustentació C_L indica la capacitat d'un cos per crear una força en direcció perpendicular al perfil de l'objecte.

En la sustentació aerodinàmica cal dir que un automòbil corrent es produeix una sustentació positiva, encara que no suficient gran com perquè superi al pes provocant una elevació del vehicle.

En la figura 110 podem veure la distribució teòrica de pressions que es té al voltant d'un vehicle i la relació amb les línies de corrent.

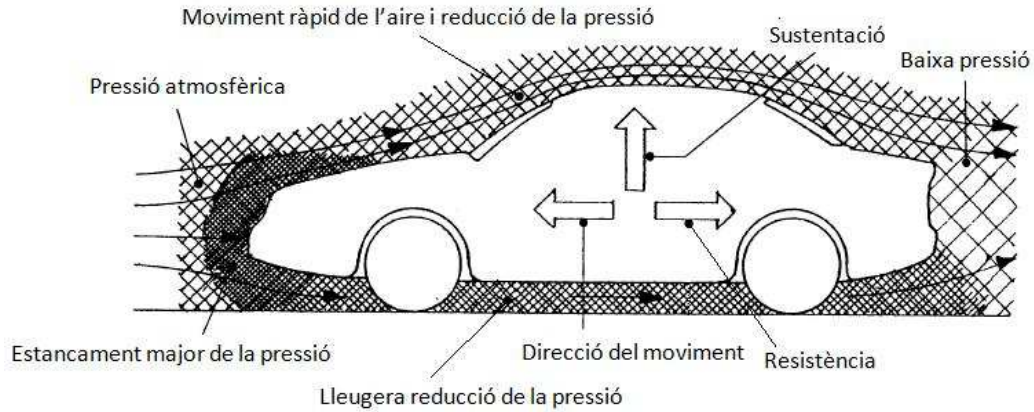


Figura 110. Distribució teòrica de pressions al voltant d'un vehicle.

C.10. Bibliografia.

- Aparicio F., Vera C., Diaz, L. Teoría de los vehículos automóviles. Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial. Universitat Politècnica de Madrid. Any 2001.
- Bruce R, Munson, Donald F Young, Theodore H. Okijshi. *Fundamentos de Mecánica de Fluidos*. Edición Limusa Wiley. Any 1990.
- J. D. Anderson. *Fundamentals of aerodynamics*. Editorial Mcgraw-hill. Any 1991.
- Mc Beath, S. *Aerodinámica del automóvil*. Barcelona, Ediciones CEAC. Any 2000.
- Saiz Vela, Víctor. *Estudi de simulació aerodinàmica del Rodaster FS1*. Universitat Politècnica de Catalunya. Any 2005.

ANNEX D

D. GENERACIÓ DE MALLATS.

D.1. Introducció.

En aquest apartat explicarem la manera en què generem el mallat, posant exemples d'imatges per familiaritzar-nos correctament amb el programa.

Com que en el projecte malleu forces cossos aquí explicarem el procés, però, sense donar tots els valors concrets de cada model, si se'n dona algun és perquè és comú per a tots els casos.

La resta de paràmetres de cada model s'expliquen en l'apartat corresponent d'aquesta memòria.

Avanç d'entrar amb més detall cal tenir en compte l'aspecte general del funcionament del programa.

El mallador emprat fa servir la tècnica dels elements finits per obtenir així solució en l'espai i el temps. Aquest s'anomena modelat d'elements discrets. La discretització és una divisió del volum de càlcul en petits volums geomètrics anomenats elements, el conjunt d'aquests s'en diu malla. Aquesta malla depèn de varis paràmetres com la qualitat, relació de tamany, angles, disposició dels elements (capes de prismes, malla hexaèdrica, etc). A la figura 111 podem veure els elements possibles.

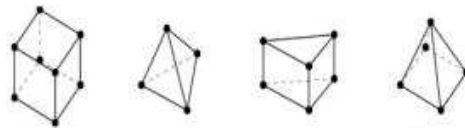


Figura 111. Possibles elements de malla.

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 és un procediment complex en que s'han de valorar molts aspectes com, sensibilitat de malla, qualitat, geometria, etc. Per això cal definir bé els valors.

D.2. Execució del programa.

Una vegada feta la geometria a simular, aquesta la importem al programa de mallar (ICEM d'ANSYS) triant l'arxiu corresponent en el programa. En el nostre cas el format és ".iges".

A partir d'aquí podem visualitzar la geometria desde l'angle i distància que es desitgi per apreciar els detalls. Veiem un model, com per exemple el de la figura 112.

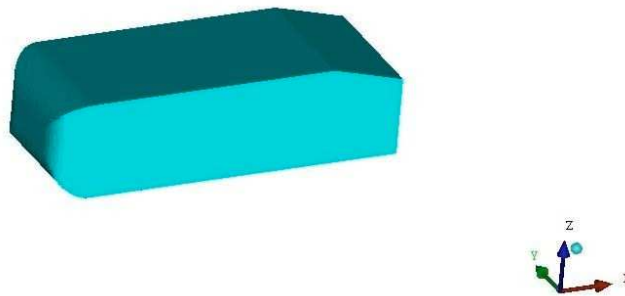


Figura 112. Exemple visual d'un model exportat.

Cal dir que també podem construir, modificar i borrar un cos a través de l'ICEM. La realització es fa mitjançant punts, corbes i superfícies tal i com es pot veure a la figura 113 però aquests passos són molt més laboriosos.

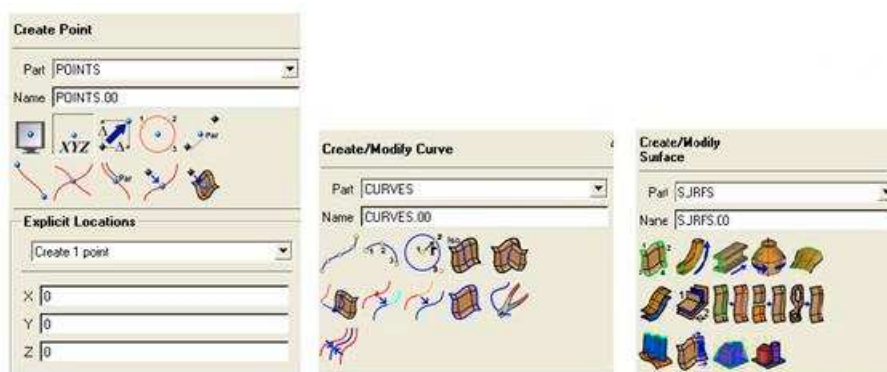


Figura 113. Ubicació per realitzar punts, corbes i superfícies.

Quan volem generar el mallat hi han bàsicament dues parts diferents a realitzar, una són les característiques geomètriques externes que envoltaran el model i l'altre els paràmetres de mallat. A continuació expliquem més específicament cada part.

Característiques geomètriques externes.

Expliquem en primer lloc el domini computacional. Aquest no és res més que una espècie de "túnel virtual" a on determinen la final del mallat que volem realitzar.

pesants de transport de passatgers.

Per determinar el domini per complert, requereix certes mides que aniran en funció del volum de la peça a mallar. La realització de dit domini es fa de manera que la figura anterior 113.

Primerament es marquen els punts en les coordenades X,Y,Z adients pel nostre cos, concretament són 8. Un cop posats els unim i creem la superfície. A partir d'aquí ja hem determinat els límits del mallat.

Cada una d'aquestes superfícies rep un nom. Aquest és important perquè al final s'han de posar certes condicions de contorn que condicionaran el següent programa a utilitzar. Un exemple de domini es el de la figura 114.

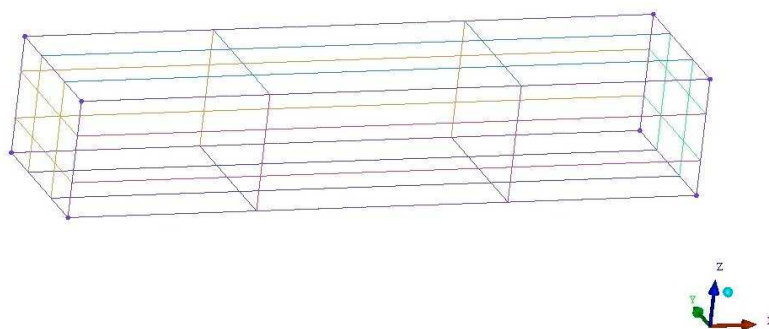


Figura 114. Exemple visual del túnel.

Encara que en la figura 114 no es vegi el cos no vol dir que no hi sigui, sinó és perquè es pot ocultar qualsevol de les creacions que fem durant el procés, agilitzant la visualització.

Una vegada realitzats els límits del túnel cal dir-li en el programa que dins el túnel hi ha un cos. En la figura 115 veiem la manera de com es posa aquesta condició, i en la figura 116 l'efecte visual després de crear-la.

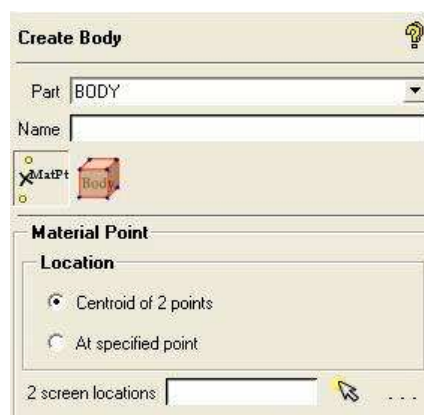


Figura 115. Aplicació del cos.

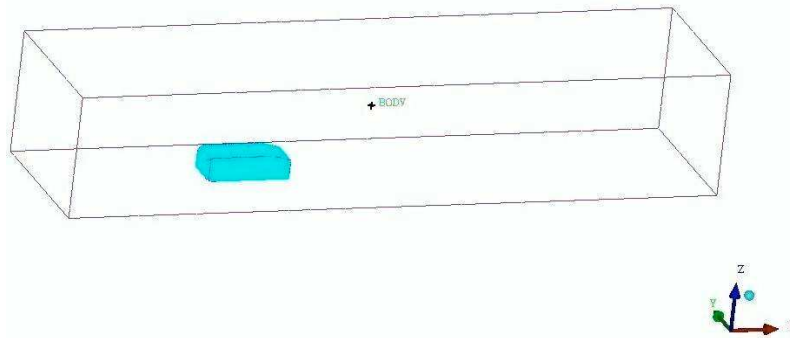


Figura 116. Efecte visual de la condició del cos (body).

A continuació cal fer un túnel de densitat dins el domini, que envoltarà tot el model per tenir més precisió alhora de mallar. Aquesta espècie de subtúnel també tindrà 8 punts i cert valor, però la manera de crear-lo no és amb superfícies sinó amb un apartat, concretament el de la figura 117.

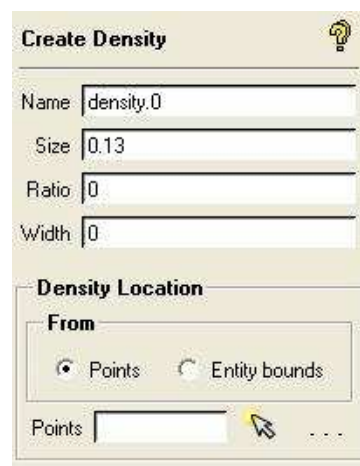


Figura 117. Ubicació del paràmetre de densitat.

A la figura 118 veiem la densitat que envolta el model a mallar.

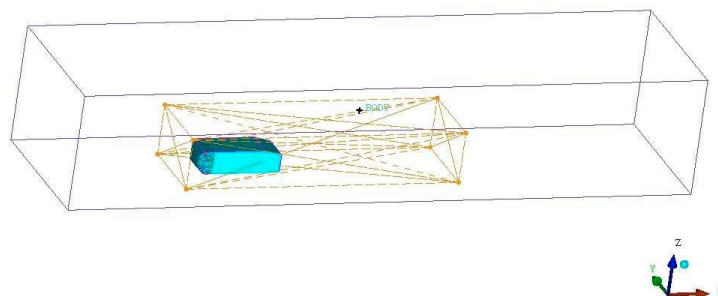


Figura 118. Exemple visual del túnel de densitat.

Paràmetres de la malla.

Un cop es tenen aquestes característiques podem posar els paràmetres de la malla. Dintre els paràmetres a posar tenim que tenir en compte certes mides:

- *Mides globals de la malla:*

Aquí determinem factors com, el d'escala, l'element màxim i també el creixement dels prismes (Growth low) amb l'altura inicial (initial height). En els dos primers 1 per defecte. A la figura 119 podem veure la ubicació de tots aquets paràmetres.

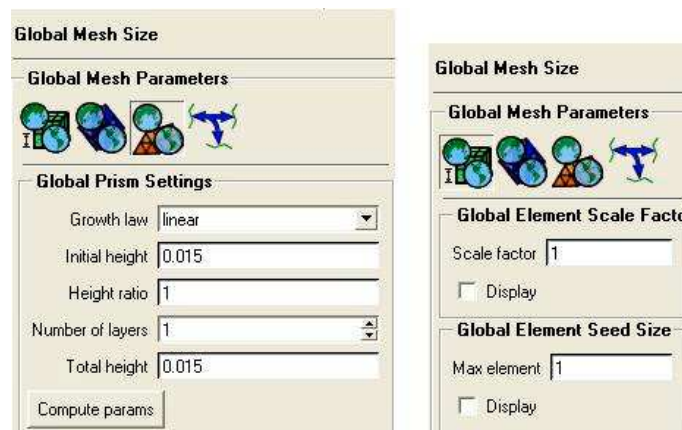


Figura 119. Ubicació de les mides globals de la malla.

En aquests paràmetres tenim l'avantatge que el total ja ens queda definit executant l'ordre compute params.

- *Mides per parts de la malla:*

En aquest apartat posem les mides que volem de l'element en cada superfície. (veure figura 120).

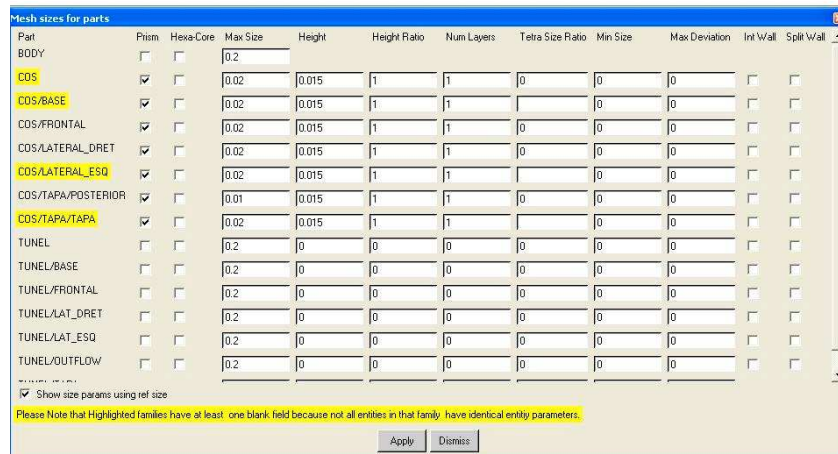


Figura 120. Ubicació dels paràmetres.

Abans de començar a executar el mallat hem de dir el volum de malla.

Volum de malla

En la gran majoria dels casos el tipus d'element serà tetraèdric, ja que és el més adient, tret de la capa límit, on serà prismàtica.

Aquets passos consten, primer en mallar la superfície, on els paràmetres ja s'han determinat anteriorment, i després tot el volum sencer.

Superfície:

Aquí posem les iteracions que volem que faci per executar la malla, com també la qualitat que ha de tenir. És aconsellable suavitzar-la. Veiem la figura 121.



Figura 121. 1ª part del mètode.

Una vegada executat ja es pot visualitzar les superfícies mallades, a les figures 122 i 123 es pot veure un exemple de superfícies mallades d'un cos i el domini respectivament.

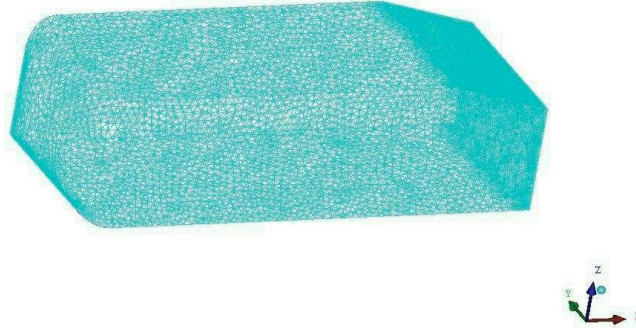


Figura 122. Exemple de superfície d'un cos mallada.

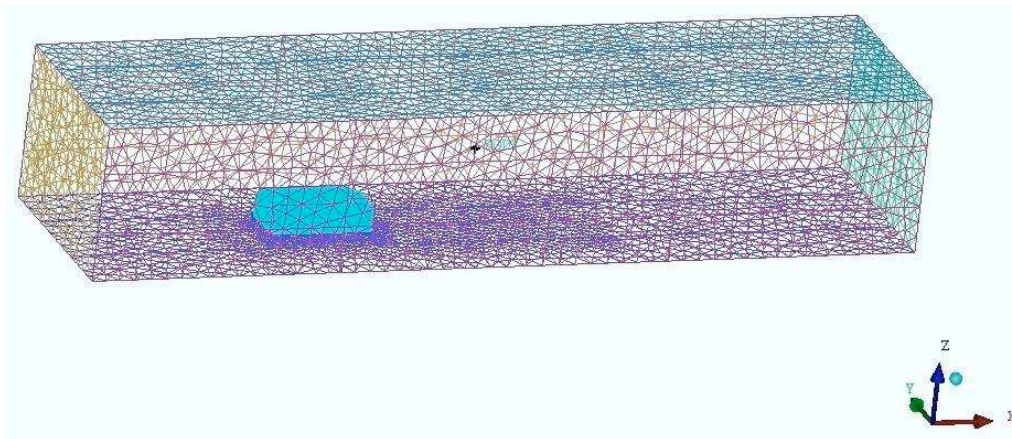


Figura 123. Exemple de superfícies del domini mallades.

Volum:

Aquí determinem el nom de la part del volum, el factor d'escala i el factor d'expansió que volem des del cos fins a la superfície del túnel.

Aquests factors ens determina, en gran part, el número d'elements que es formarà en el volum (Veure figura 124).

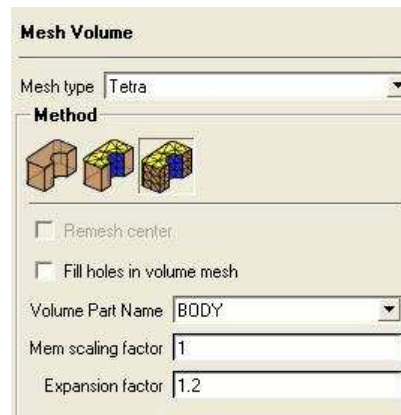


Figura 124. 2ª part del mètode.

Un cop posats tots els paràmetres ja es pot començar l'execució. Posteriorment visualitzarem una imatge semblant a la de la figura 125.

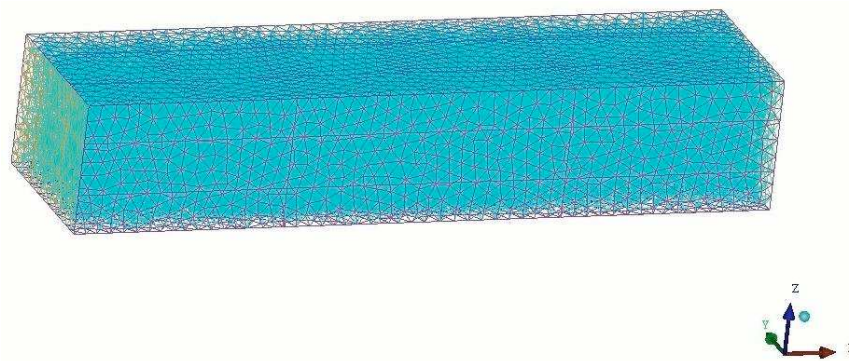


Figura 125. Exemple de mallat complet.

Veurem que ja hem fet el mallat, però per visualitzar millor la situació es recomana observar-ho des d'una altra forma més entenedora.

Es tracta de fer un tall transversal o longitudinal al pla en funció del que volem visualitzar. A la figura 126 podem veure a on determinem les coordenades dels plans per poder realitzar aquesta acció, i a la figura 127(a) i figura 127(b) un exemple de visualització del pla.

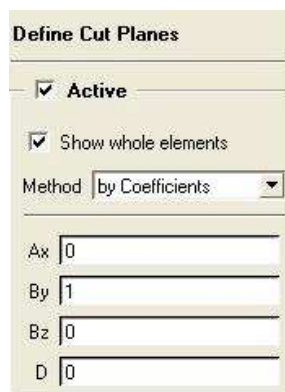


Figura 126. Parametrització per visualitzar els talls.

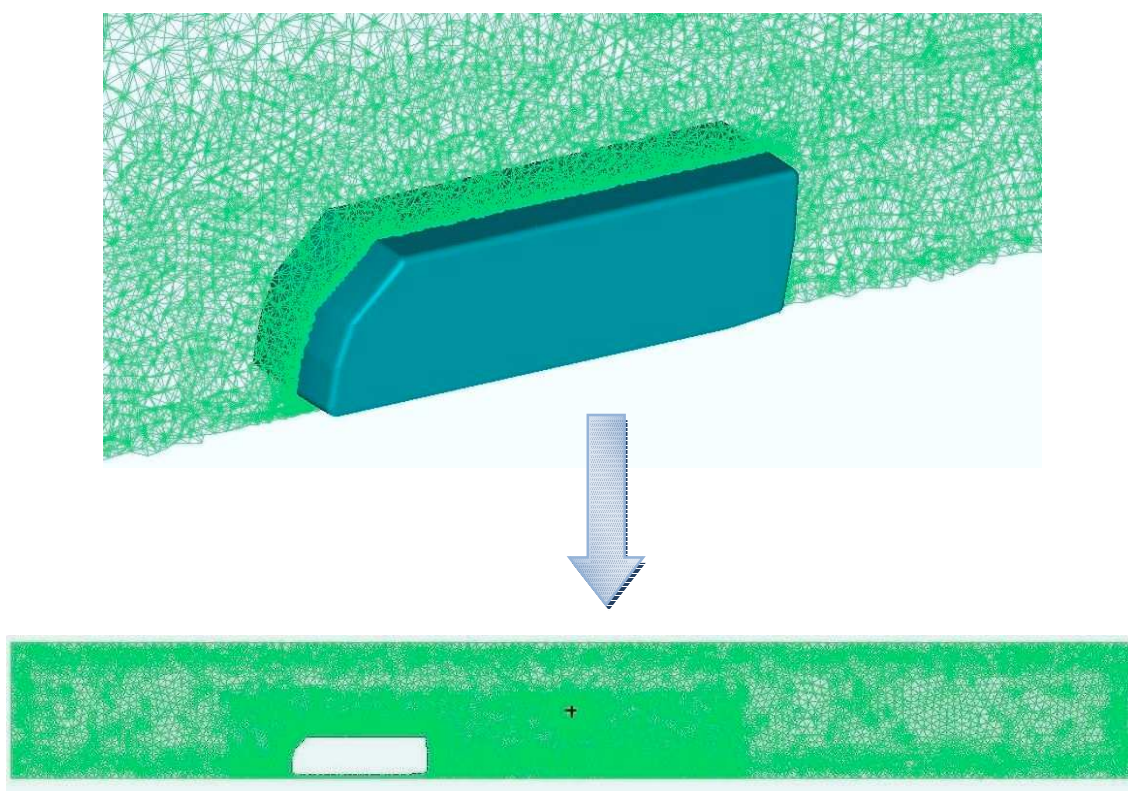


Figura 127(b). Exemples de visualitzacions de tall.

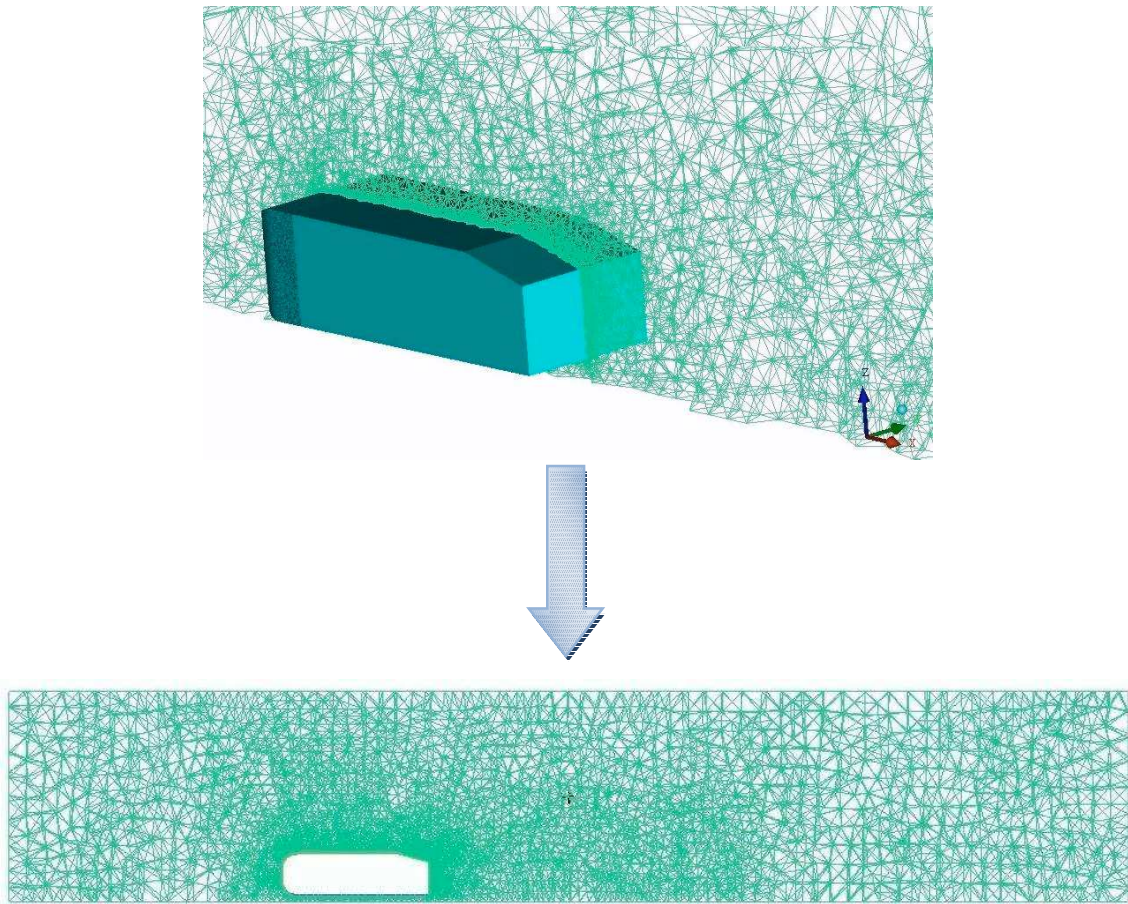


Figura 127(b). Exemples de visualitzacions de tall.

Aquí ja tenim bona part del mallat. A simple vista es diferencien les zones on el mallat està més concentrat, però cal fer quatre ajustatges que ens permetrà tenir una malla més precisa.

Un aspecte molt important en la mecànica de fluids és la capa límit. És per aquest motiu que aquesta zona rebrà una atenció més acurada que la resta de mallat.

Capa límit:

Dins la capa límit és on hi ha un gradient de velocitat important (mirem la distribució de velocitat entre la superfície del cos i la capa límit de la figura 128). (Veure annex B, Fonaments d'aerodinàmica).

pesants de transport de passatgers.

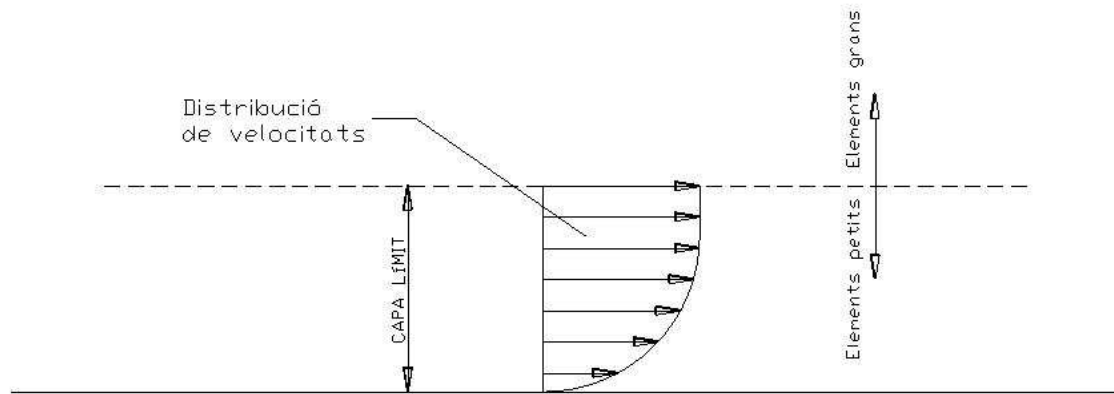


Figura 128. Distribució de velocitats en la capa límit.

Just a la superfície, el fluid té la mateixa velocitat que el cos, és a dir nul·la, i a mesura que augmentem l'altura, la velocitat també ho fa i amb un grau d'intensitat important.

Aquesta variació brusca s'ha de simular correctament i, per això, el mallat s'ha de precisar més en aquesta zona.

D'aquesta forma tenim una capa d'elements més uniforme, posant elements del tipus prisma, on els prismes i els tetraedres s'ajusten molt bé entre ells.

El procés a continuació es dividir la capa en varies parts, determinant la proporció del prisma i el número de capes (veure figura 129).



Figura 129. Precisió de la capa límit.

A partir d'aquí s'executa a la generació de malla, on també podem apreciar-ho en el pla de tall. En la figura 130 observem que just per sobre de la superfície el mallat és diferent que la resta, i es diferencia el mallat més acurat del que ha de ser la capa límit.

pesants de transport de passatgers.

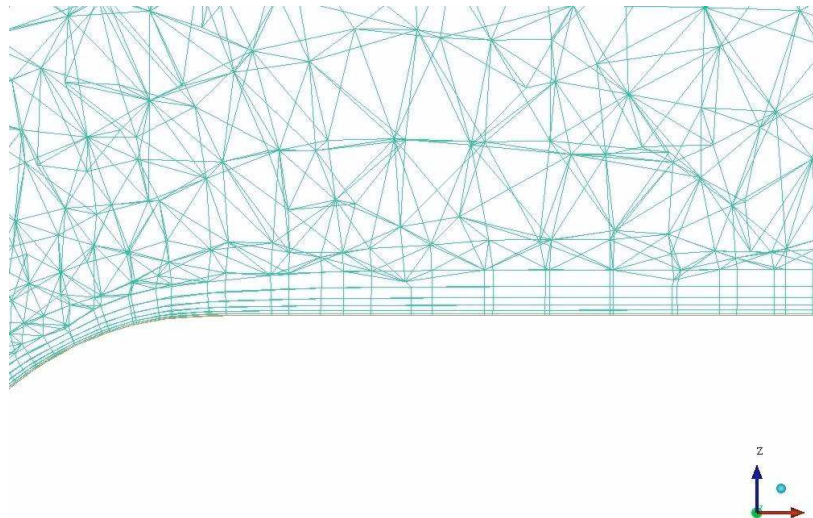


Figura 130. Visualització de la zona de la capa límit.

Una vegada acabada aquesta zona cal realitzar un ajustatge general a tota la malla.

Aquest procés se'n diu planxat, i el que fem és donar una mica més d'uniformitat a tota la malla. Cal posar una certa qualitat de malla i una xifra d'iteracions adequada perquè hi arribi. Podem veure els passos i com s'ha de visualitzar després del planxat a la figura 131 i 132.

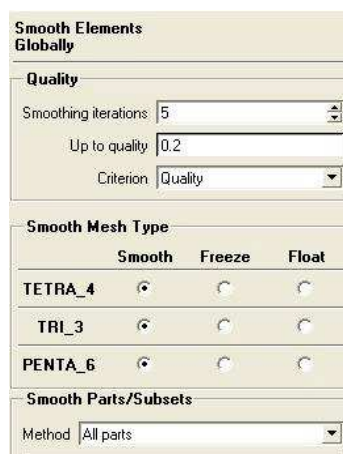


Figura 131. Ubicació dels paràmetres de planxat.

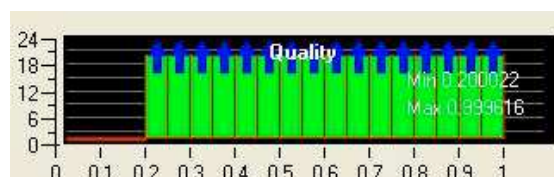


Figura 132. Visualització del planxat.

pesants de transport de passatgers.

Per últim només ens cal definir les condicions de contorn. Prèviament s'ha de definir per a quin programa volem la posterior simulació. Dintre de la gran quantitat de programes compatibles escollim l'Star ccm+.

Per a les condicions de contorn, el que fem és donar una condició per a cada part creada, com per exemple la tapa del túnel, el frontal del túnel, el cos, la base, etc.

Tot i que les condicions són força semblants en tots els casos hi ha petites diferències que es veuran amb els paràmetres individuals de cadascun del models estudiats. En la figura 133 podem veure a on es parametrizen aquestes condicions.

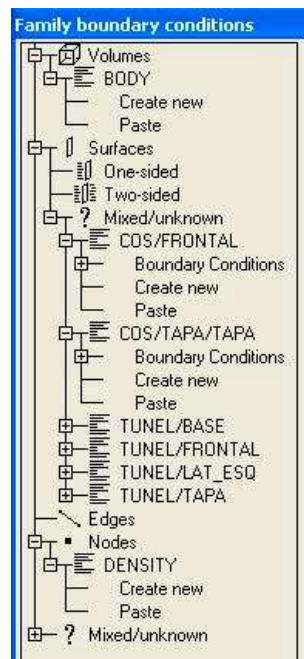


Figura 133. Ubicació de les condicions de contorn.

També si ens cal podem disposar d'informació general de tot el que s'ha aconseguit durant l'execució, com per exemple el N^o d'elements per cada part, nodes, etc. En la figura 134 tenim un exemple de la informació de mallat.

```
Deleting empty part CREATED_FACES
14 surfaces
38 curves
58 prescribed points
1 bodies
1 densities
17 parts
Element types :
  NODE : 30
  LINE_2 : 837
  TETRA_4 : 255107
  TRI_3 : 22862
  PENTA_6 : 87132
Element parts :
  BODY : 342239
  COS : 383
  COS/BASE : 2519
  COS/LATERAL_DRET : 2496
  COS/LATERAL_ESQ : 2492
  COS/TAPA/POSTERIOR : 4186
  COS/TAPA/TAPA : 2991
  DENSITY : 4
  TUNEL : 318
  TUNEL/BASE : 3805
  TUNEL/FRONTAL : 250
  TUNEL/LAT_DRET : 996
  TUNEL/LAT_ESQ : 978
  TUNEL/OUTFLOW : 258
```

Figura 134. Exemple d'informació d'una execució.

Finalment ho guardem tot en una carpeta per després utilitzar-ho al programa de simulació Star ccm+.

D.3. Bibliografia.

Adreçes web:

- <http://www.ansys.com/products/icemcfd.asp>, Web relacionada amb el programa d'elements finits.
- <http://www.ingeciber.com/productos/icem.php>, Web relacionada amb el programa ANSYS ICEM CFD™/AI*Environment™.

ANNEX E

E. SIMULACIÓ AMB CFD.

E.1. Introducció.

La simulació numèrica com bé diu el nom fa servir els mètodes numèrics. Aquets càlculs es basen en les equacions de Navier-Stokes, formant així un sistema d'equacions diferencials en derivades parcials que defineixen el moviment dels fluids.

Igual que en l'apartat anterior aquí també explicarem la manera en què executem la simulació, posant alguna imatge d'exemple per facilitar la comprensió. El programari utilitzat és l'STAR-CCM+.

Durant el projecte s'executen molts models, per tant en aquest apartat explicarem el procés general que em realitzat per a la simulació numèrica, on també donarem el valor d'algun paràmetre que serà, sinó es comenta el contrari, general per a tots. La resta de paràmetres de cada model s'expliquen en els respectius apartats de cada model simulat.

E.2. Execució del programa.

A partir del model mallat ja podem començar la simulació numèrica CFD. Primerament diem que volem fer una nova simulació i carreguem la malla que volem.

Per a la nova simulació els paràmetres idonis ja venen per defecte, en canvi per importar la malla hem de posar unes opcions de malla. Tenim tres opcions, les idònies són seleccionar-les totes tres, el diagnòstic de la malla després de la importació, que ens obri la escena per veure la geometria després de la importació i que no ens mostri el diàleg durant la importació (veure figura 135).



Figura 135. Opcions de malla.

pesants de transport de passatgers.

En aquest programa com amb l'anterior, podem visualitzar qualsevol posició per si ens interessa entrar en detall sobre el que estem executant, veiem un exemple com el de la figura 136.

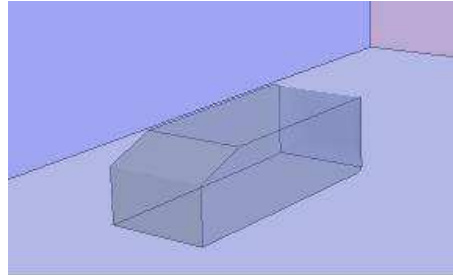


Figura 136. Exemple d'un model importat.

El programa consta de varis apartats en que ens permet veure i posar en forma d'arbre tots els valors i també donar ordres per observar en tot moment el que s'està simulant. A la figura 137 podem veure una part de l'arbre.



Figura 137. Arbre d'apartats.

Els apartats que hem utilitzat en la nostre simulació son els següents:

- **Continua**: És l'apartat on posem la metodologia corresponent per a la correcta simulació. Aquesta metodologia és vàlida per a tots els casos estudiats.
 - Metodologia:
 - Gas: El tipus de gas es aire.
 - Segregate flow: Flux del tipus segregat, aquest es un acoblament entre equacions.
 - Motion stationary: El moviment es estacionari.

pesants de transport de passatgers.

- Ideal gas: El gas és ideal.
- Stady: Flux del tipus estacionari.
- Turbulent: Regim turbulent del fluid a la capa límit i escollim un model de turbulència de tipus K-Epsilon turbulent (d'acord amb altres estudis similars).

A la figura 138 podem veure un exemple de tota una selecció de la metodologia que es pot fer.

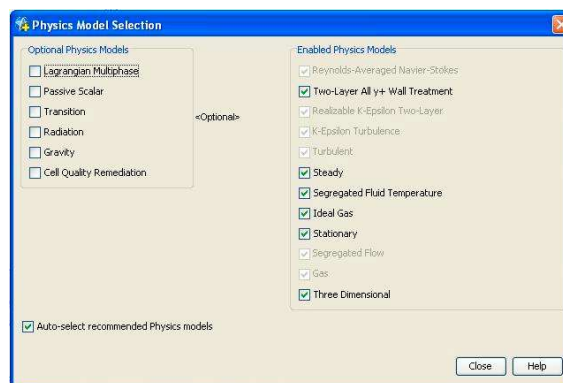


Figura 138. Exemple d'una selecció de la metodologia.

- **Regions:** Aquí definim les condicions de contorn amb les diferents superfícies que hem anat formant en l'ICEM.

Es pot comprovar que ja s'han determinat en el programa anterior, però aquí es poden canviar i podem donar-hi valors més concrets com, per exemple, la velocitat de l'aire ja que a l'ICEM no podem determinar paràmetres del fluid.

Aquestes condicions són, com podem veure en la figura 139, el cos, les parets, la tapa, el terra, l'entrada i la sortida del túnel.

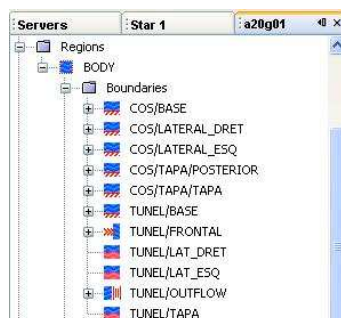


Figura 139. Exemple de les condicions.

El nom ja l'hem definit amb l'ICEM, però si volem podem modificar-lo. La definició d'aquests paràmetres són si les parets les considerem lliscants o no lliscants, velocitat del flux, pressió, etc. També en aquesta branca, per treure millors anàlisis, podem visualitzar un pla de secció transversalment al cos, aquesta aplicació la realitzem a "parts derivades". Es pot veure un exemple a la figura 140.

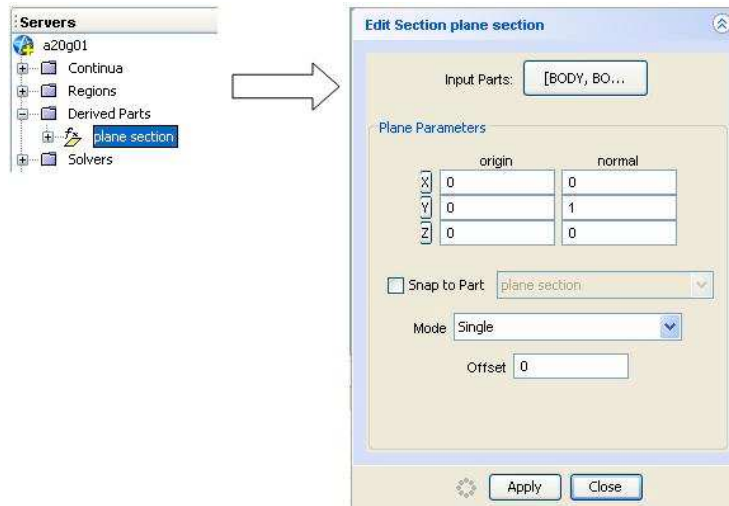


Figura 140. Exemple de pla de secció

- **Stopping criteria:** A partir de les condicions, diem el valor d' iteracions que haurà de fer el programa. Cada iteració va establint la simulació fins arribar a un valor constant, que serà quan ja podem decidir si s'ha acabat l'execució. També cal dir que cada cas tindrà un valor diferent (veure figura 141).

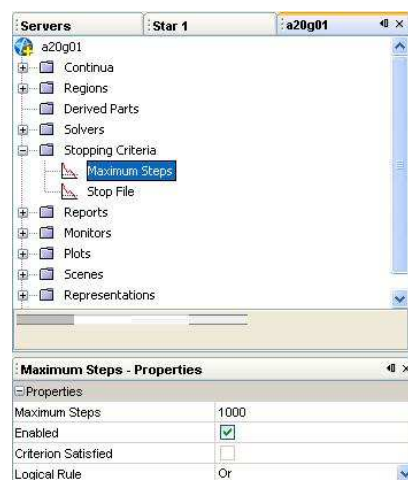


Figura 141. Exemple de paràmetres per iterar.

pesants de transport de passatgers.

- **Reports:** Aquí seleccionem la variable que volem que ens doni la simulació, tal i com es pot veure a la figura 142, en tots els nostres casos volem el Force coefficient (el C_D).

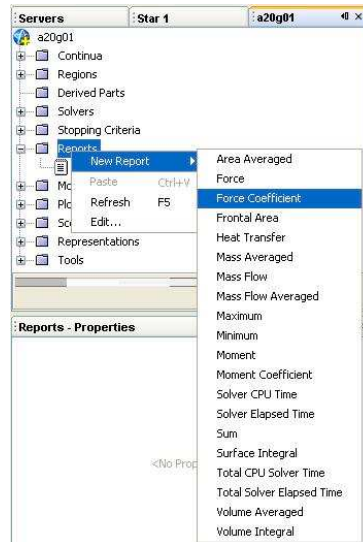


Figura 142. Selecció del paràmetre que desitgem de la simulació.

Un cop triat el C_D posem les propietats corresponents, tal i com es pot veure en la figura 143.

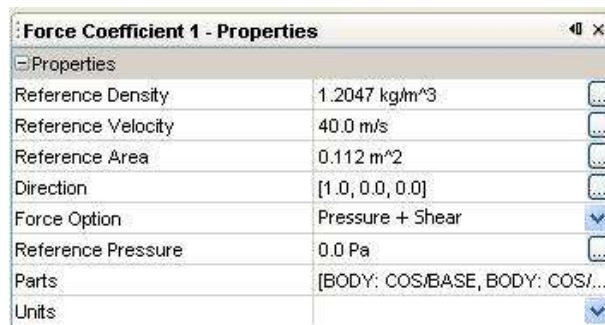


Figura 143. Exemple dels paràmetres pel C_D .

pesants de transport de passatgers.

Dins d'aquest apartat definim els valors següents:

- Àrea del model.
- Densitat de l'aire.
- Velocitat de l'aire.
- Pressió relativa.
- Direcció de l'aire.

La pressió serà 0 perquè està a l'ambient del túnel. També cal dir a on volem que ens calculi les forces d'arrossegament (Parts). En tots els casos triem el cos que estem estudiant, com podem veure la figura 144.

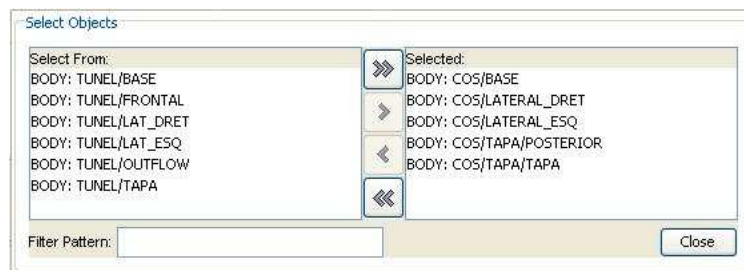


Figura 144. Selecció de les parts per les forces d'arrossegament.

Per visualitzar si la simulació és estable, quan s'estigui iterant, activem la opció des de force coeficient. Aquest pas es pot veure a la figura 145 i la visualització en l'exemple de la figura 146.

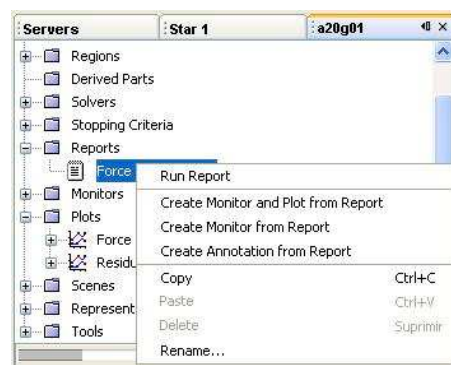


Figura 145. Aplicació de les gràfiques.

pesants de transport de passatgers.

Així podem observar la gràfica, o els valors en tabulats en concret, dels residus i del C_D .

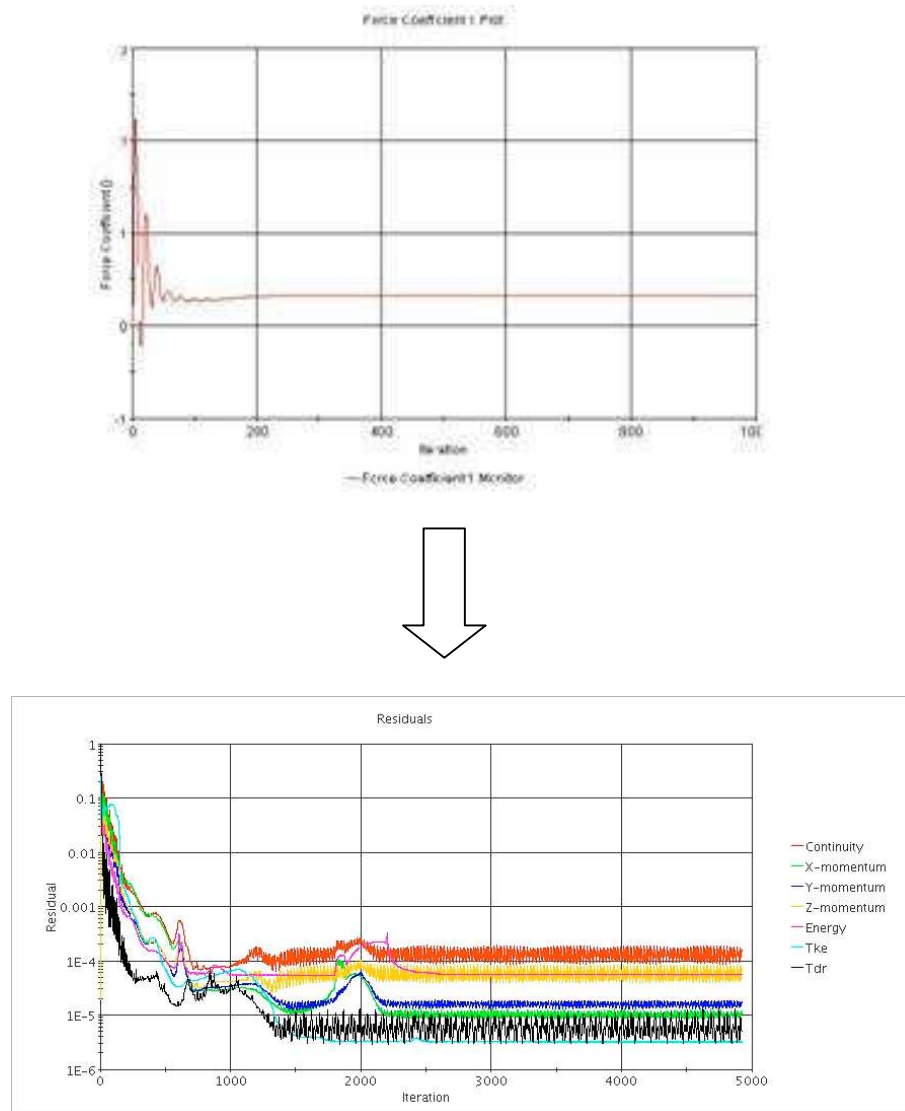


Figura 146. Exemple dels residus i coeficient d'arrossegament d'una simulació.

Els residus no són res més que la suma de la diferència ponderada de les variables que hi ha entre iteració i com més alt es el valor pitjor, es a dir la simulació no seria prou precisa.

A partir d'aquí ja està preparat i podem començar a córrer el programa. Mentre el programa s'està executant, a la part baixa de la pantalla podrem veure els valors en cada iteració.

Sempre que es vulgui es pot parar la iteració en qualsevol valor i veure el que s'ha executat fins aquell moment.

pesants de transport de passatgers.

Aquest programa té l'avantatge que disposa d'un auto-guardat cada x iteracions, ja que aquest programa requereix, segons el que es vol simular, moltes hores de càlcul i agilitza qualsevol problema de guardat que pugui tenir l'ordinador quan està executant.

Una vegada executada tota la simulació, podem visualitzar els vectors de velocitat, estat de pressions, línies de flux, etc, a partir de les escenes (veure figura 147).

Primer cal fer, tal i com s'observa a la figura 148, una visualització del pla transversal a través de la branca "parts derivades" (derived parts) i després seleccionar la funció que volem veure.

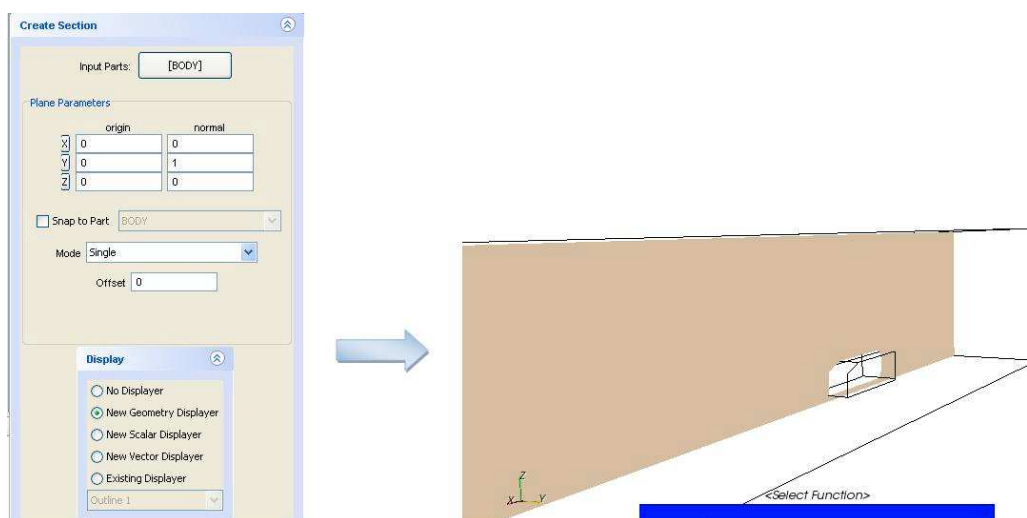


Figura 147. Exemple d'un pla transversal

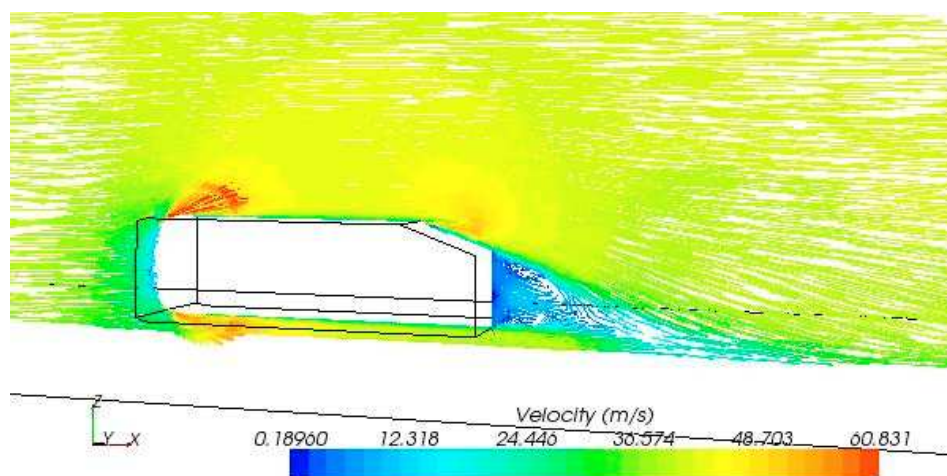


Figura 148. Exemple de vectors de velocitats.

Un cop executat, amb el valors obtinguts i la visualització de les magnituds que desitgem veure, podem arribar a treure les conclusions.

E.3. Bibliografia.

Adreces web:

- http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CCM_plus/, Web relacionada amb el programa de simulació numèric.
- www.cd-adapco.com/minisites/ugm_us/seattle-agenda.pdf, Web relacionada amb el programa de simulació numèric.

ANNEX F

F. ESTUDI EXPERIMENTAL DEL COS D'AHMED.

En aquest apartat explicarem l'estudi experimental que han dut a terme altres autors sobre el cos d'Ahmed.

F.1. Introducció.

En el desenvolupament de dissenys de vehicles cal un coneixement alt d'aerodinàmica per controlar i millorar el flux i per reduir múltiples factors com, per exemple, el consum. Això es pot aconseguir mitjançant experiments en túnels de vent i en simulació numèrica.

La via experimental té com a objectiu mostrar les condicions reals amb què reacciona el flux davant del cos. En comparació, les simulacions numèriques són un sistema més pràctic, ràpid i econòmic.

Hi ha associacions com per exemple MOVA (Models for Vehicle Aerodynamics) i ERCOFTAC (European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion), que tracten i estudien tot aquest tema a través d'estudis experimentals i mètodes numèrics.

A partir d'associacions com aquestes podem validar els programes CFD que s'utilitzen, com també conèixer nous avenços que es vulguin realitzar.

En la validació, el que es fa és simular numèricament el mateix cos i comprovar si les dades obtingudes s'ajusten amb els valors experimentals.

Tanmateix, en la vida real un vehicle es molt complex per modelar i estudiar experimentalment. Per tant els socis del consorci MOVA (Universitat de Manchester, LSTM, Electricite de França, AVL i PSA Peugeot Citroen) van estar d'acord en estudiar la forma d'un vehicle estàndard anomenat cos d'Ahmed.

En aquest model, el flux que l'envolta s'aproxima al dels vehicles reals. Per al cos d'Ahmed es disposen d'una sèrie molt extensa de dades, forces d'arrossegament, etc.

A partir d'aquí nosaltres hem desenvolupat l'estudi del cos d'Ahmed a través de CFD per comprovar la validesa del programari que utilitzem.

A continuació explicarem l'estudi experimental que van dur a terme diversos membres de l'associació MOVA. En la memòria mostrem l'estudi numèric.

F.2. Estudi experimental.

Primer observem la figura 149, per veure millor el que és el cos d'Ahmed, on es veu l'esquema utilitzat en l'experiment. Les unitats d'aquest estan amb mil·límetres.

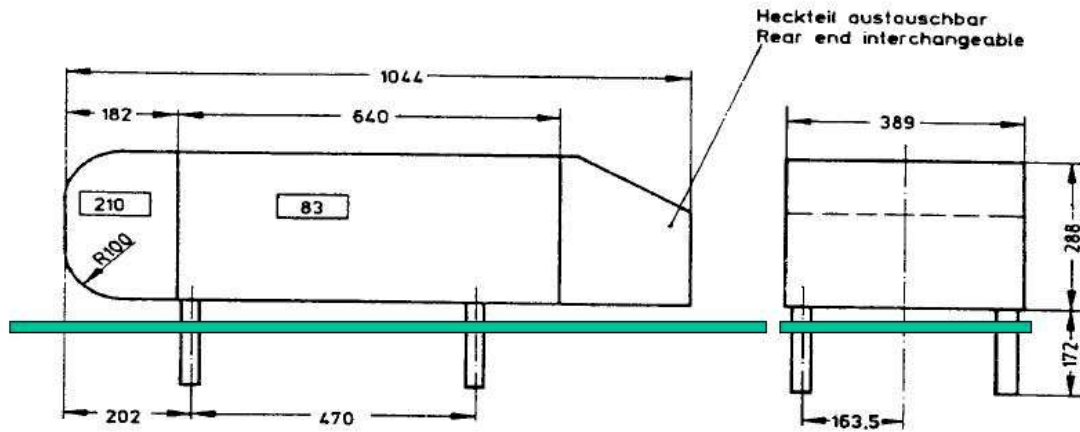


Figura 149. Esquema del cos d'Ahmed.

La regió del flux al voltant d'un vehicle ens presenta varis problemes per a les prediccions experimentals i numèriques.

La característica del cos d'Ahmed és que es pot variar l'angle de la superfície de darrere. La corrent de flux posterior, que apareix, és la que realment ens condiciona els valors com, per exemple, la força d'arrossegament.

Per tant la posició a on es crea i es separa aquest corrent és molt important, ja que ens marcarà l'exactitud de la predicció sobre arrossegament.

Aquest fenomen es diferencia bé en els angles entre 25° i 35° . Observem la figura 150, on podem veure la variació del C_d en funció de l'angle.

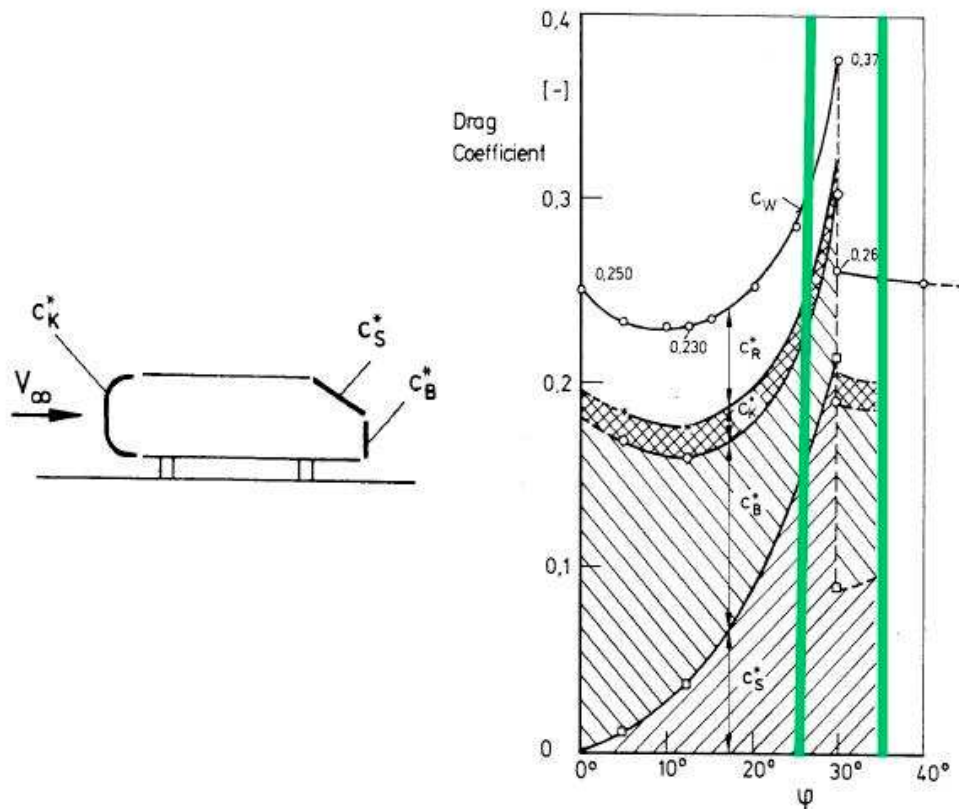


Figura 150. Característiques dels coeficients d'arrossegament del cos d'Ahmed per diferents angles d'inclinació de la part posterior.

El cos d'Ahmed va ser muntat en la secció de proves de túnel de vent (figura 151) on van determinar les magnituds de velocitat a través del seu entorn.



Figura 151. Fotografia del cos d'Ahmed muntat en el túnel de vent.

La secció d'obertura del túnel era de $\frac{3}{4}$ parts amb un rang de velocitats entre 3 i 55 *m/s* amb intensitats de turbulència de 0.25% o menor.

Totes les magnituds en relació amb el cos d'Ahmed van ser a velocitats de 40 *m/s*.

pesants de transport de passatgers.

Per garantir la constància de la prova que es realitzava, es va utilitzar un ordinador basat en un sistema de control d'informació per emmagatzemar tota la informació.

Es va utilitzar un sistema de mesura a partir d'un fil calent de de 2 components de 400mm posat de manera que es pogués obtenir les velocitats correctament, per determinar els perfils de velocitat.

Per poder visualitzar el flux es va fer servir un oli, així es podia veure físicament el que havia succeït amb el flux per sobre del cos (veure figura 152 i 153).



Figura 152. Visualització del flux a la part posterior del cos d'Ahmed a 25°.



Figura 153. Visualització del flux a la part posteriors del cos d'Ahmed a 35°.

També es va utilitzar un anemòmetre laser-Doppler (LDA), compostat de fibra Òptica i electrònica de dos components controlada per ordinador que travessava el sistema per obtenir els valors.

En l'experiment es volien resultats en les tres dimensions. Ja que només es disposava d'un anemòmetre de dos components, van orientar en el sentit de la tercera

pesants de transport de passatgers.

component que desitjaven tenir, un altre anemòmetre laser-Doppler de dos components.

Es van utilitzar dues longituds d'ona laser diferents, la de color verd de 514,5 μm i la de color blau de 488 μm . Això els permetia distingir un anemòmetre de l'altre.

Un dels problemes és que els sistemes de mesures estaven força propers a la superfície del cos. El que es va fer es fer servir una configuració òptica d'orientació dispersa.

Les medicions del LDA es van realitzar per a les tres components de la velocitat, aigües amunt del cos d'Ahmed, per algunes distàncies aigües avall i varis plans transversals.

Amb l'experiment fet a 25° i 35° es visualitzava el resultat i es podien treure les conclusions en funció de l'angle de la part posterior.

S'observava anteriorment que un petit canvi en l'angle d'inclinació al voltant de 30° provocava un canvi espectacular en el patró del flux.

A partir d'aquí es va descriure la distribució de velocitats amb els valors obtinguts (veure figura 154), com també la comparació entre les diferent inclinacions de superfície (veure figura 155 i 156).

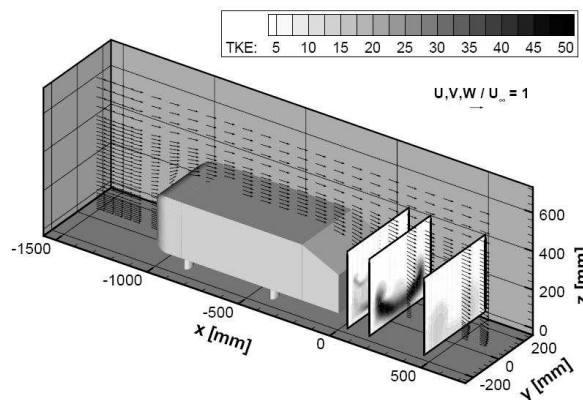


Figura 154. Descripció de la distribució de velocitats.

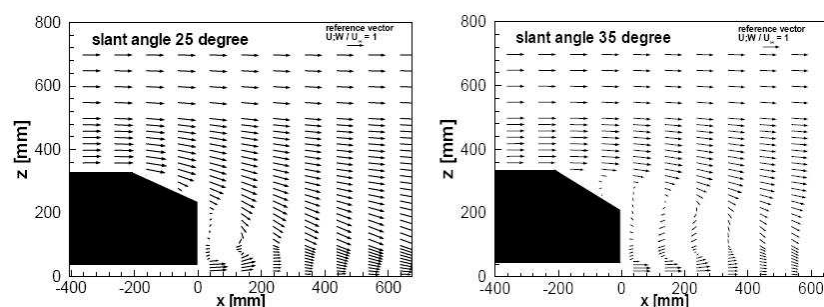


Figura 155. Comparació de la regió després de la recirculació del flux en funció de la distància.

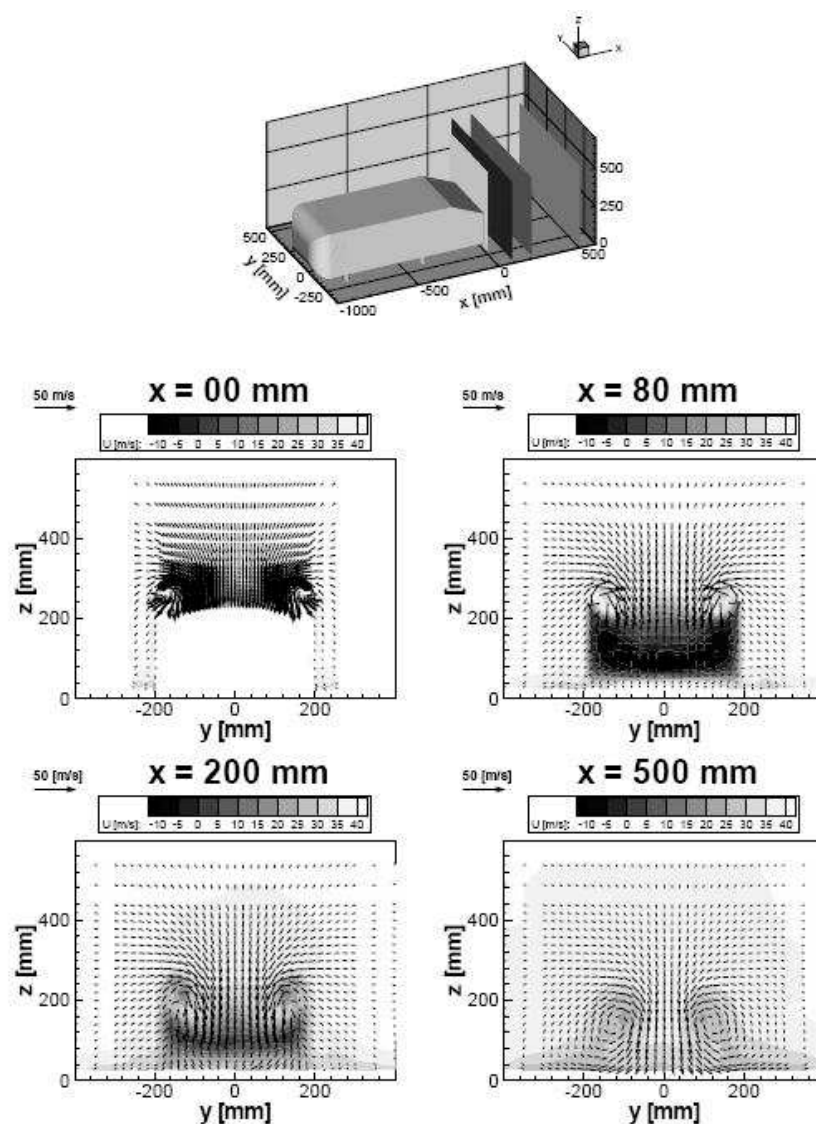


Figura 156. Desenvolupament de la contra-rotació del rastre.

A partir d'aquí la informació que es pot obtenir d'aquest cos, és molt àmplia per la gran similitud que presenta envers la realitat.

Val a dir que no només s'han estudiat aquestes inclinacions sinó que diversos autors també han fet varies més, d'on hem pogut disposar de les dades per poder comprovar les simulacions.

Per saber si la validació és correcta, es compararan els resultats numèrics obtinguts en el programa junt amb els resultats experimentals. Normalment, el que es compara és el coeficient aerodinàmic per diferents inclinacions de la part posterior per així poder validar el nostre programa.

F.3. Bibliografia.

Adreçes web:

- <http://venus.ceride.gov.ar/~mstori/AHMED/tex/ahmed/node1.html>, Web relacionada amb l'experimentació del cos d'Ahmed.

ANNEX G

G. ANTECEDENTS

A causa del consum elevat dels vehicles pesants de transport comercial i de passatgers per carretera, s'ha generat la necessitat de tècniques per millorar l'eficiència energètica en viatges interurbans. Un mitjà econòmic de conservar el combustible, és mitjançant la reducció del coeficient aerodinàmic. Això es pot aconseguir amb la utilització d'afegits externs.

En aquest annex explicarem una mica l'evolució que hi ha hagut entre varis estudis per aconseguir aquest objectiu.

N.L. Nihan i M.C. Sullivan l'any 1979 van estudiar la *Conservació de l'energia i reducció del coeficient aerodinàmic d'autobusos interurbans*.

Van aplicar algunes tècniques per reduir aquest coeficient aerodinàmic a partir d'afegits externs com per exemple àleps, cortines frontals i laterals. Amb les proves que van realitzar van aconseguir una reducció del 40% en el coeficient aerodinàmic. Això significava una reducció del combustible gairebé del 20%. A partir d'aquí van assegurar que l'ingrés net per les companyies especialitzades en els viatges entre ciutats augmentaria substancialment a l'utilitzar aquests afegits.

A continuació l'any 1981, K. P. Garry va fer l'estudi sobre *Desenvolupament de dispositius de cortines muntades per la reducció del coeficient aerodinàmic en vehicles comercials*.

L'estudi que va realitzar va ser a partir d'unes proves en un túnel de vent, portades a terme per determinar l'efectivitat de diversos models per trobar alguna possible reducció del coeficient d'arrossegament. Aquests models van estar muntats en un vehicle, de tal manera que es pogués determinar si actuaven correctament per reduir el coeficient d'arrossegament.

Es va utilitzar un xassís del model Ford D1614, a escala 1/6 per fer les proves dels motlles a muntar. Aquest motlles van ser condicionats mòbilment per tal de que l'espai entre el remolc i la cabina pogués ser modificat per simular un vehicle rígid o bé un vehicle articulat.

Els motlles van ser muntats en la part davantera del remolc i van prendre forma de: (1) un motlle convex de diversos radis externs; (2) àleps deflectors muntats tant davant com al voltant de les vores principals del remolc amb variació d'espai d'aire; (3) Seccions semicirculars i quadrades al voltant de les vores del remolc.

pesants de transport de passatgers.

Totes aquestes proves van ser realitzades al departament d'aerodinàmica de Cranfield amb un túnel de vent d'aproximadament 2.4 metres de llargada i 1.8 metres d'alçada. Aquest túnel era de baixa velocitat i feia servir una tècnica de simulació "ground plate", a unes velocitats del túnel donant un N^o de Reynolds a una escala completa de 1/3 i a una velocitat de creuer típica d'autopista de 80 Km/h.

Quan l'angle de guinyada era de 0°, les reduccions en el coeficient aerodinàmic van ser aproximadament un 33% per vehicles articulats. Quan l'angle de guinyada era de 20° les reduccions eren del 21% en vehicles rígids i del 11% en articulats.

Entre les proves es van incloure estudis de visualització del flux d'oli superficial i de flux de filament de fum.

Altres cop, un any més tard, K. P. Garry juntament amb Stollery, van realitzar l'estudi de *Reducció del coeficient aerodinàmic de vehicles comercials*.

L'augment del cost del combustible en aquells anys va incrementar la importància del coeficient aerodinàmic dels vehicles. Fins i tot reduccions modestes podien mostrar beneficis significatius en costos operatius de camions. Aquets beneficis potencials van incitar un programa de recerca ampli amb l'objectiu de reduir el coeficient aerodinàmic en els vehicles existents i la definició de canvis de forma que necessitaven la següent generació de vehicles. Els resultats de les proves de túnel de vent van ser amb diversos models d'escala per tal d'identificar tant els problemes en els dissenys que existien com les oportunitats de millora. Les àrees d'interès eren la geometria del remolc, cabina i el disseny de la part davantera del remolc, també van incloure estudis relacionats amb els mètodes de variació del coeficient aerodinàmic. Normalment ho feien amb la incorporació d'afegits externs.

Els problemes característics d'arrossegament del vent creuat van ser coberts juntament amb la mesura de l'efectivitat en el control de flux d'espai i en les modificacions dels baixos del vehicle per millorar les característiques del vehicle.

L'any 1985 el mateix Garry va realitzar l'estudi de *Revisió de les Tècniques de reducció del coeficient aerodinàmic en vehicles comercials*.

Aquest va realitzar un desenvolupament potencial aerodinàmic, fent servir el concepte d'aparellar el flux de camp de la cabina i el remolc i dels faldons laterals dels tràilers. Ambdues estaven destinades a reduir el coeficient en condicions de vent creuat.

L'any 1997 Zoran Zunic i Leopard Skerget van fer un estudi d'*Anàlisi numèric d'aerodinàmica de vehicles autocars*.

pesants de transport de passatgers.

Aquest anàlisi va ser una comparació entre tres models diferents de turbulència, concretament de baix flux turbulent. El model era el K-Epsilon dels tipus Lam-Bremhorst, de Nagano i de Fan-Lakshminrayana-Barnett's.

Van resoldre equacions de Reynolds per flux variable amb temps mig per mitjà del mètode d'elements finits. Tots els models van ser provats dins un rang de mesures per Ruck i Makiola per flux encarat inversament. Es va ser escollir el millor model i es va calcular el coeficient aerodinàmic.

Stephen Latham l'any 1998 va fer l'estudi de *Perspectiva per la reducció de consum de combustible amb camions i autobusos en el Regne Unit*.

En el laboratori d'investigació de transport van fer una revisió pel departament de transport del Regne Unit en relació a les perspectives de millores en el consum de combustible de camions i autobusos. L'estudi abastava un àmbit divers d'àrees d'estudi on incloïa: disseny de motor i vehicle, textura de la carretera, telemàtica, logística operativa i psicologia de conducció.

Sinsa Krajnovic i Lars Davison del departament de Termodinàmica i Dinàmica de fluids de la Universitat de Chalmers, l'any 2001 van realitzar l'estudi de *Simulació de grans remolins de flux al voltant d'un autobús simplificat*.

L'estudi consistia en dues simulacions per un vehicle semblant a un autobús. Els resultats van ser comparats amb dades experimentals. Van determinar que la representació dels vèrtex primers formats al autobús els conduïa a uns resultats semblants a la regió normal del deixant del vehicle. Aquest estudi indicava que la resolució normal té poca importància en el coeficient aerodinàmic de la cara posterior.

Min-Ho Kim, l'any 2004 va realitzar l'*Estudi numèric en les característiques del flux posterior i de la reducció del coeficient aerodinàmic en autobusos grans fent servir afegits posteriors*.

L'estudi es va dur a terme fent una simulació numèrica per flux turbulent i tridimensional al voltant del cos d'un autobús comercial. També va ser investigat l'efecte de posar un aleró posterior per avaluar les forces aerodinàmiques, la velocitat i la distribució de pressions. Es va utilitzar un model de turbulència RNG K-Epsilon. Els resultats van mostrar que es confirmava una estructura complexa del deixant en la part immediatament posterior de l'autobús. L'aleró posterior modificava l'estructura propera al deixant i feia decreixer el coeficient aerodinàmic, aconseguint també una millora del coeficient de sustentació.

pesants de transport de passatgers.

Un any més tard, el 2005, el mateix Min-Ho Kim va realitzar l'estudi d'una *Simulació aerodinàmica en el dispositiu de reducció del coeficient d'un model gran d'autobús*.

L'estudi va consistir en fer la simulació numèrica per un flux turbulent tridimensional al voltant d'un cos similar a un autobús i d'un cos real d'autobús.

El primer pas en l'estudi va ser verificar l'efectivitat de l'anàlisi CFD. En segon lloc, per tal de reduir el coeficient aerodinàmic del model real de l'autobús, es van fer servir paràmetres d'estudi amb la intenció d'utilitzar un aleró posterior col·locat al final del sostre de l'autobús. En els resultats de l'estudi realitzat va quedar clar que l'adopció d'un model de turbulència RNG k-Epsilon i d'un model de turbulència quadràtica no lineal amb una descratització de segon ordre en l'esquema, predeia força bé els coeficients aerodinàmics. Els resultats mostraven que es pot reduir el coeficient aerodinàmic d'un autobús comercial en un 14% amb la utilització d'afegits externs.

G.1. Bibliografia.

- Journal of Advanced Transportation. Vol 13, núm. 3. 1979.
- Journal of Wind Engineering and industrial Aerodynamics. Aachen. Any 1981.
- Int. J. Of Vehicle Design, vol. 3, nº 2. Any 1982.
- Proc. Instn Mech Engrs Vol 199 nº D3. Any 1985.
- Journal of Advanced Transportation. Vol 43, núm. 11-12. Any 1979.
- Int. J. Vehicle Design, Vol. 20, Nos 1-4 (Special Issue), 1998.
- Third afosr internatonal conference on DNS and LES, university of Texas at Arlington, Texas, U.S.A., Agost 5-9. Any 2001.
- Int. J. Vehicle Design, Vol. 34. Nº 34. Any 2004.
- Int. J. Heavy Vehicle Systems, Vol. 12. Nº 3. Any 2005.

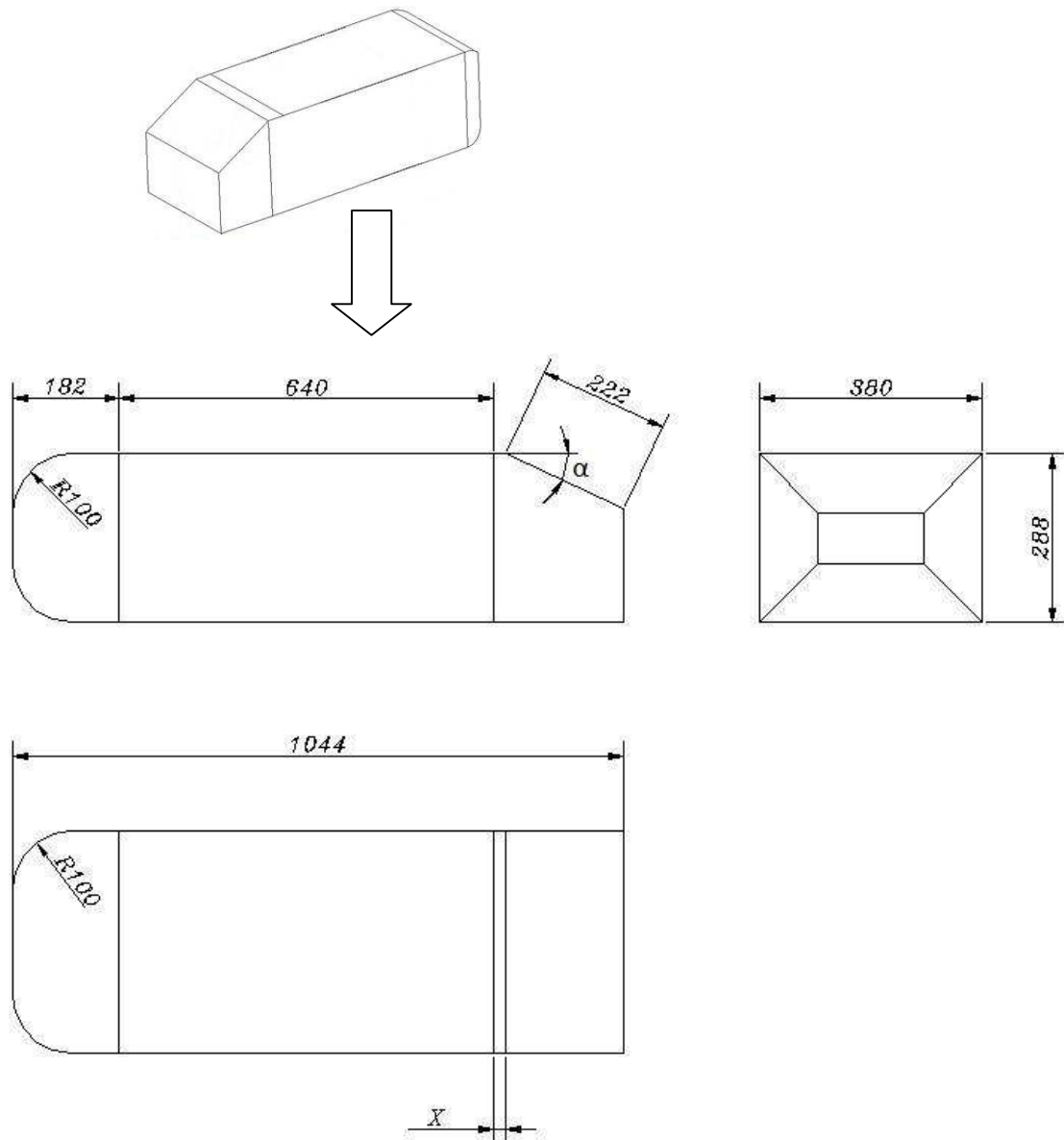
ANNEX H

H. ESQUEMES DE DISSENY.

Aquí tenim representats esquemàticament en mil·límetres els models utilitzats en el projecte. Aquets són els cossos d'Ahmed, les quatre carrosseries, i les carrosseries amb el disseny de reducció respectivament.

COSSOS D'AHMED

El cos d'Ahmed només té una única variant, l'angle α , que en el nostre cas pren els valors: 0° , 10° , 15° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° , 50° . La variable X va en funció de l'angle α .

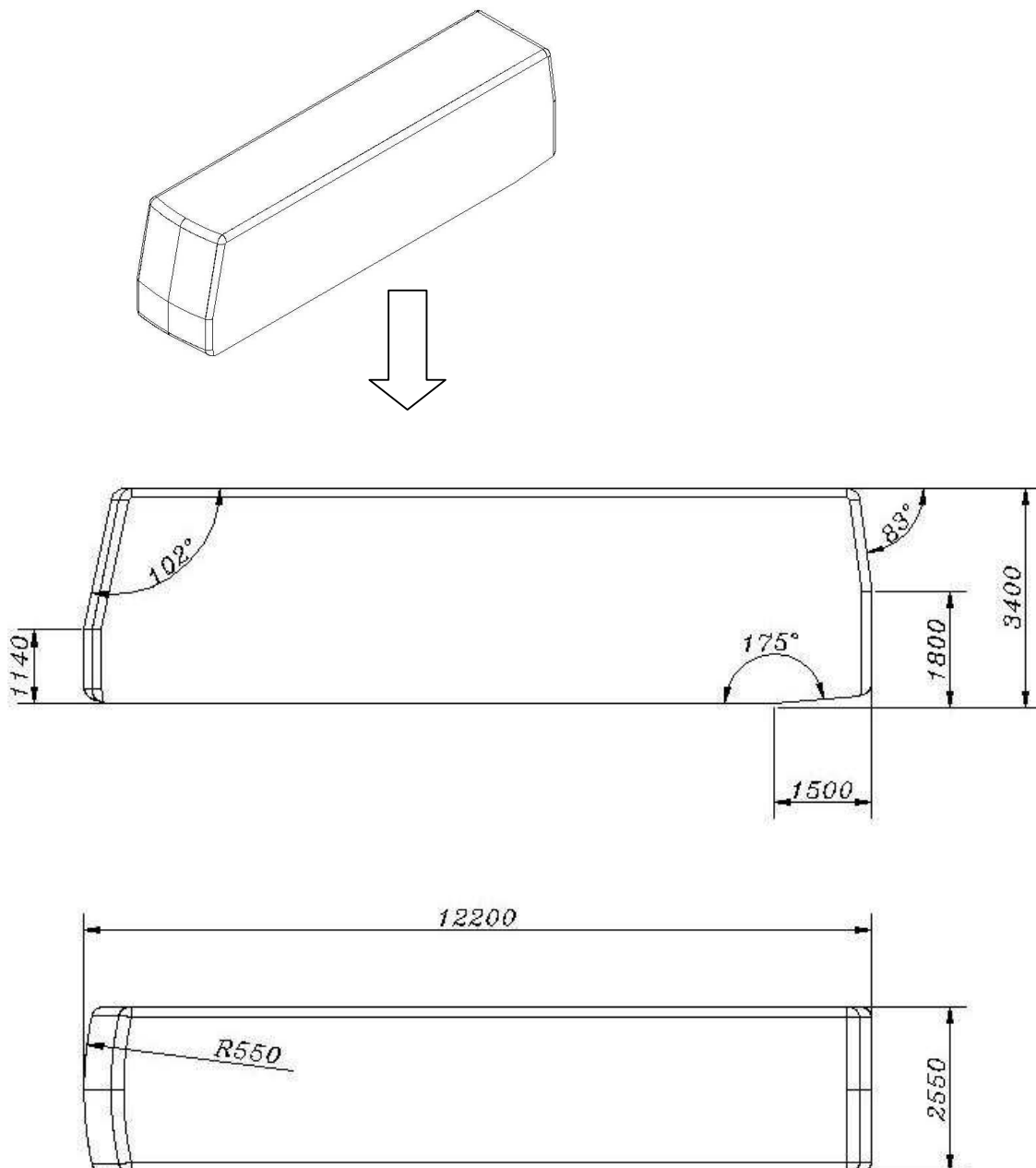


DIFERENTS CARROSSERIES

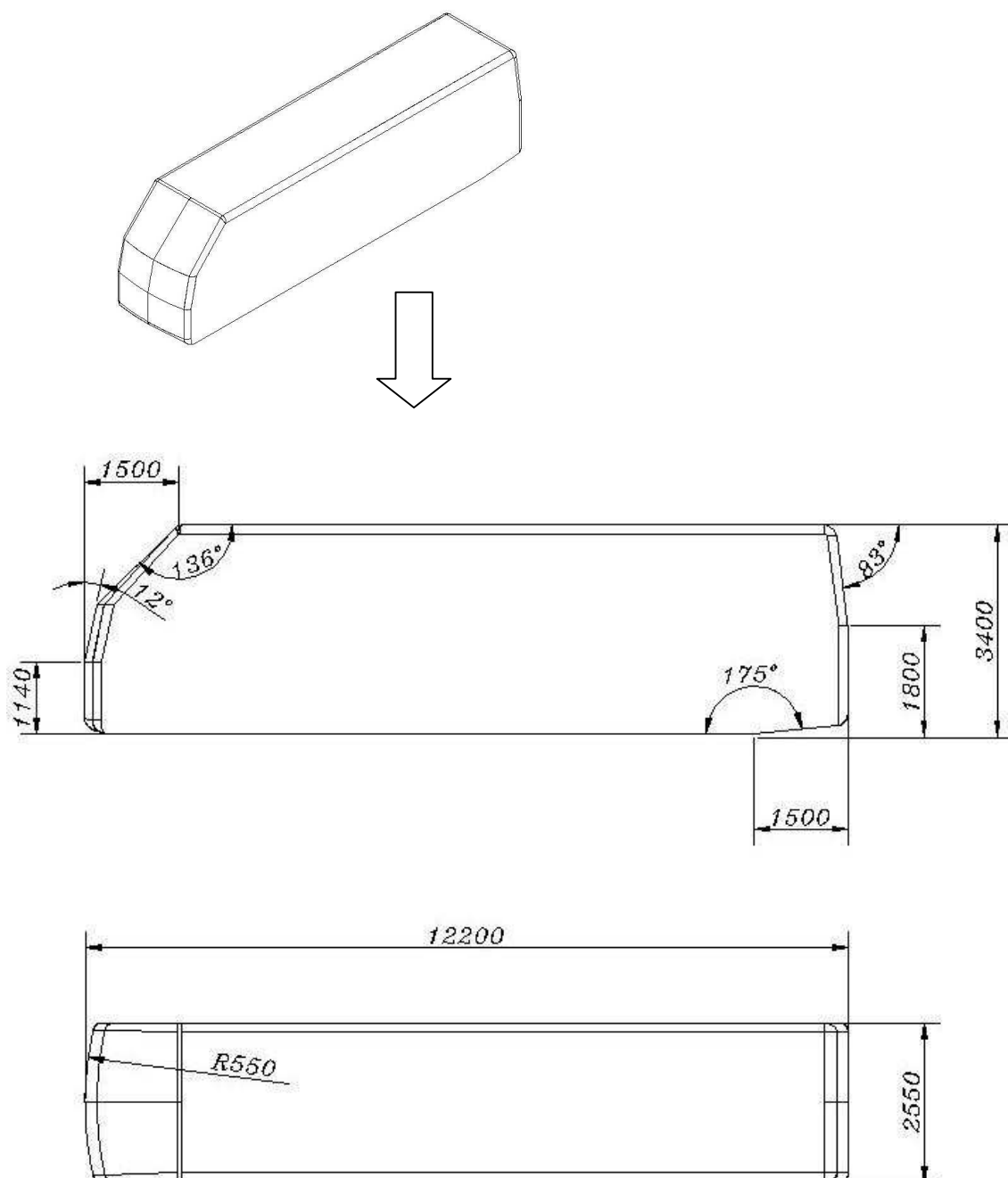
L'estudi ha estat amb quatre models diferents. Entre aquests tenen la similitud de la part posterior i on la única variant és la part frontal.

S'observa que disposa de cantonades rodones, aquets tenen un radi aproximat de 200 mil·límetres.

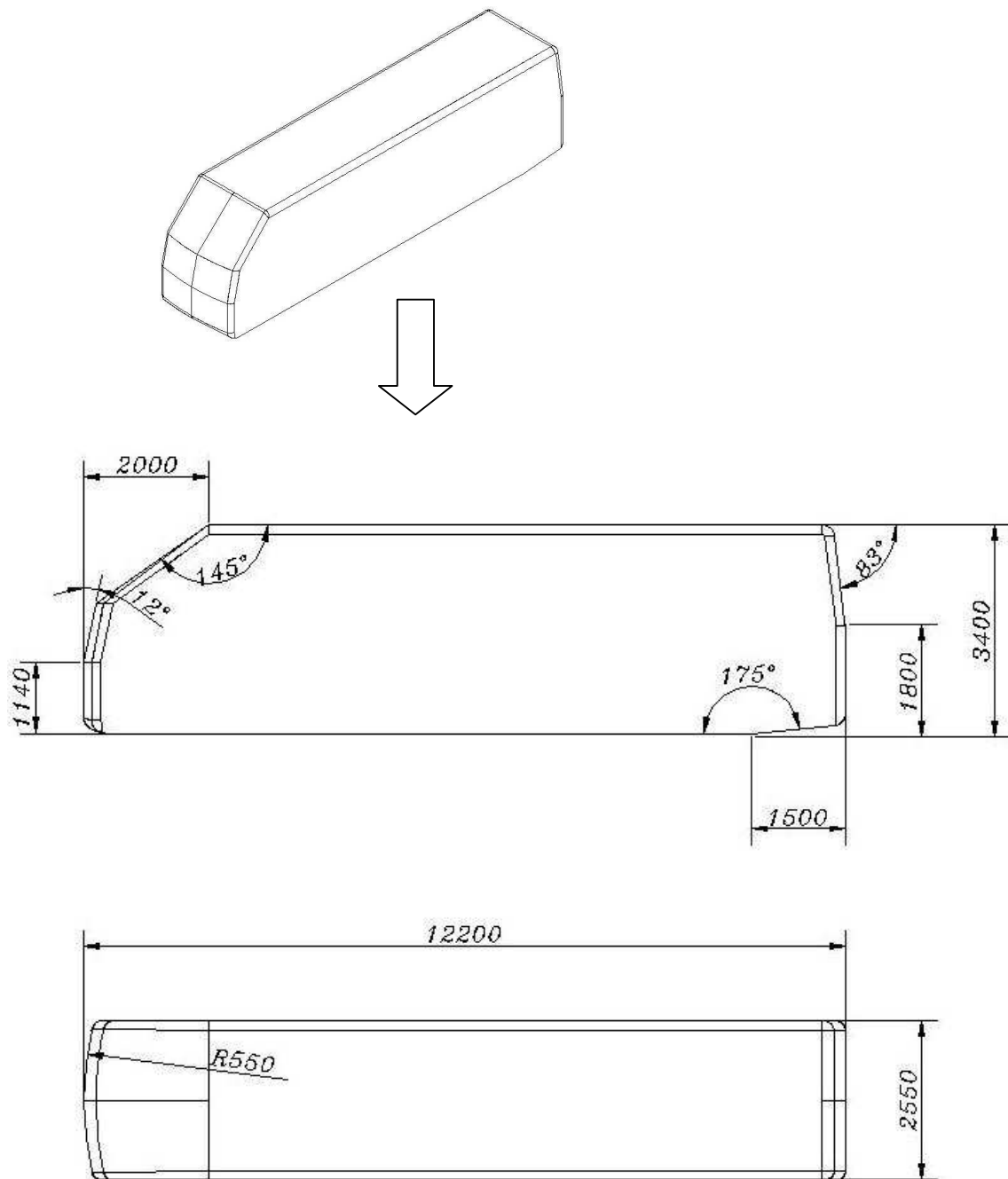
- **BUS Nº 1**



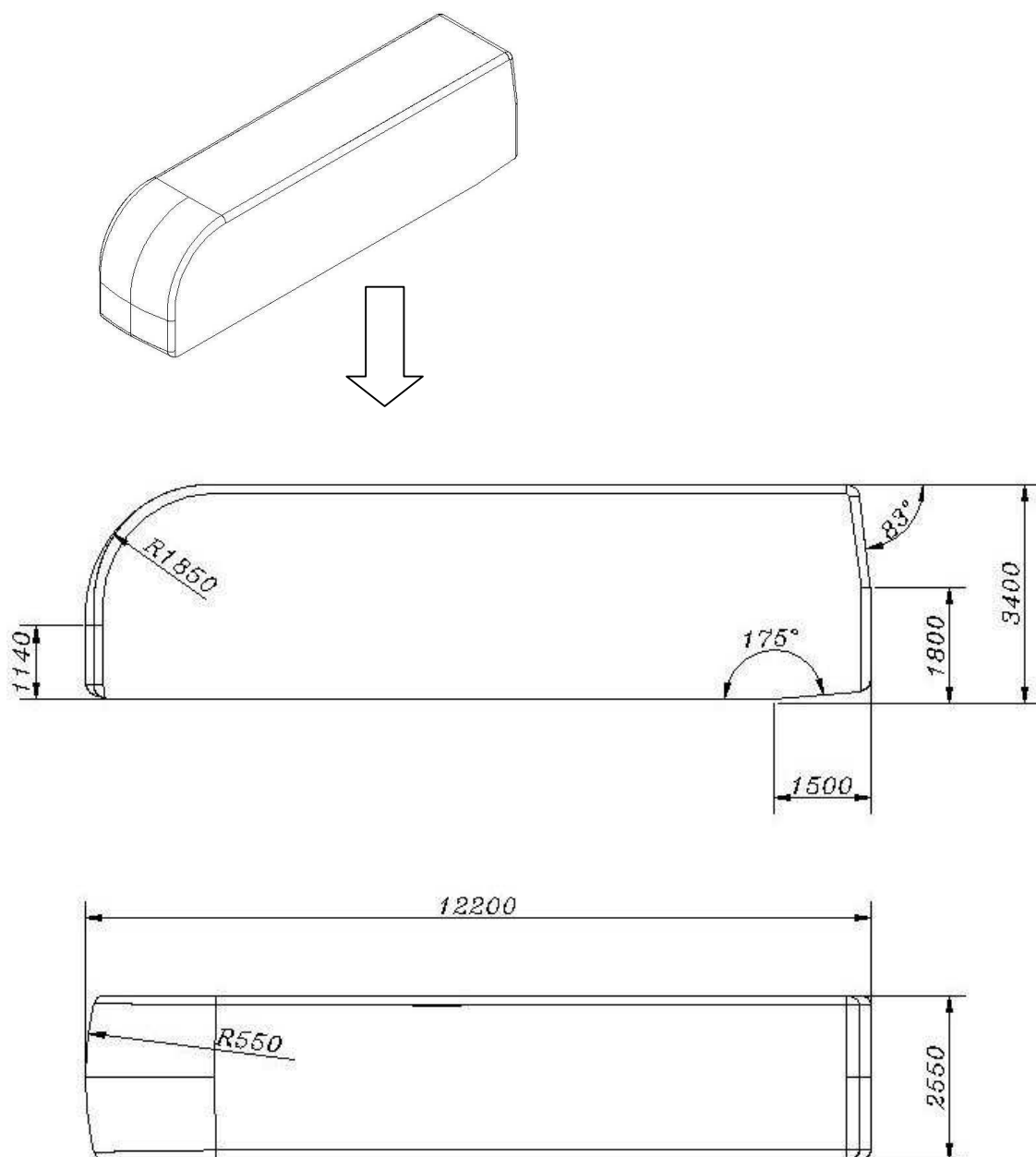
- **BUS Nº 2**



- BUS Nº 3**



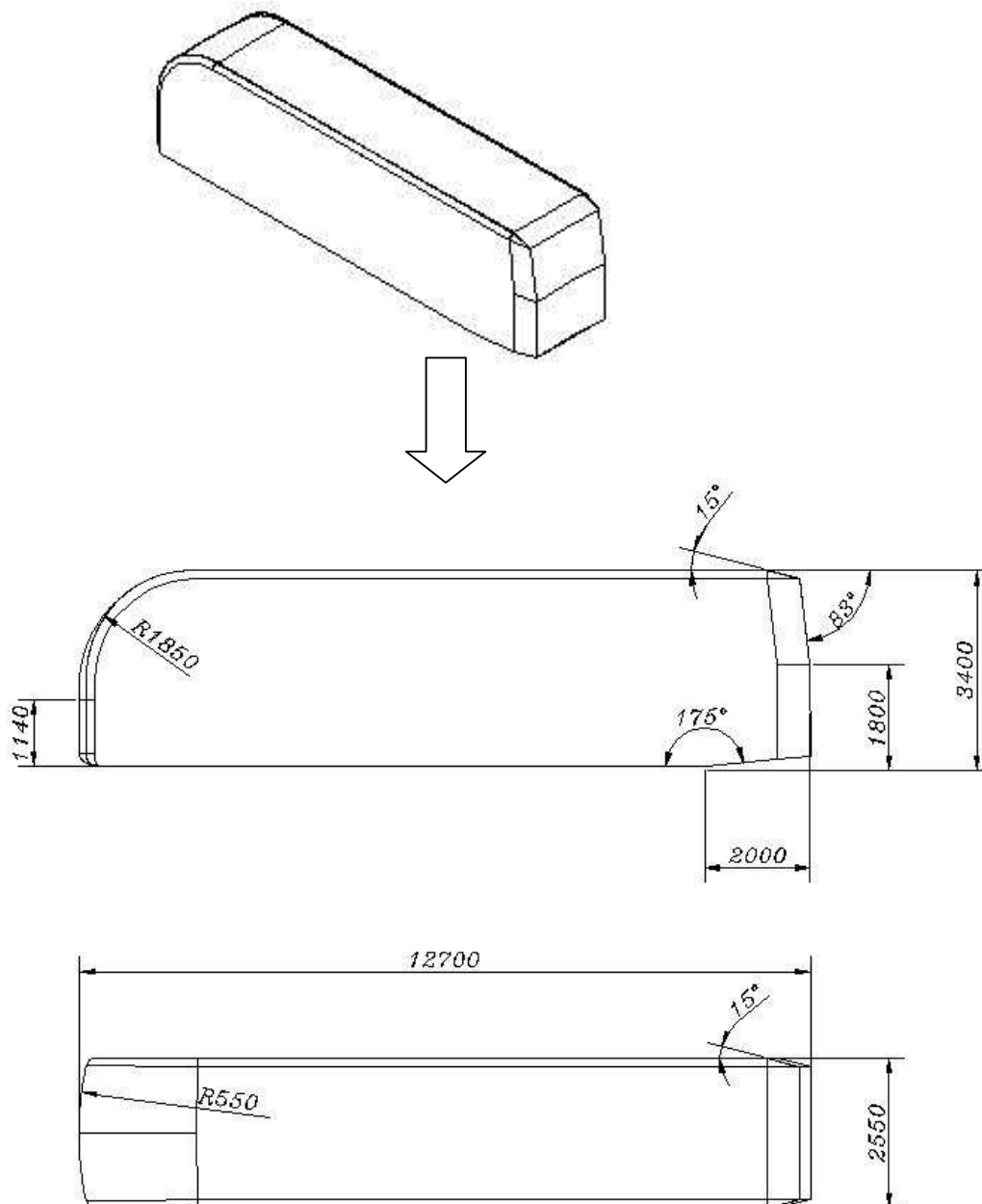
- **BUS Nº 4**



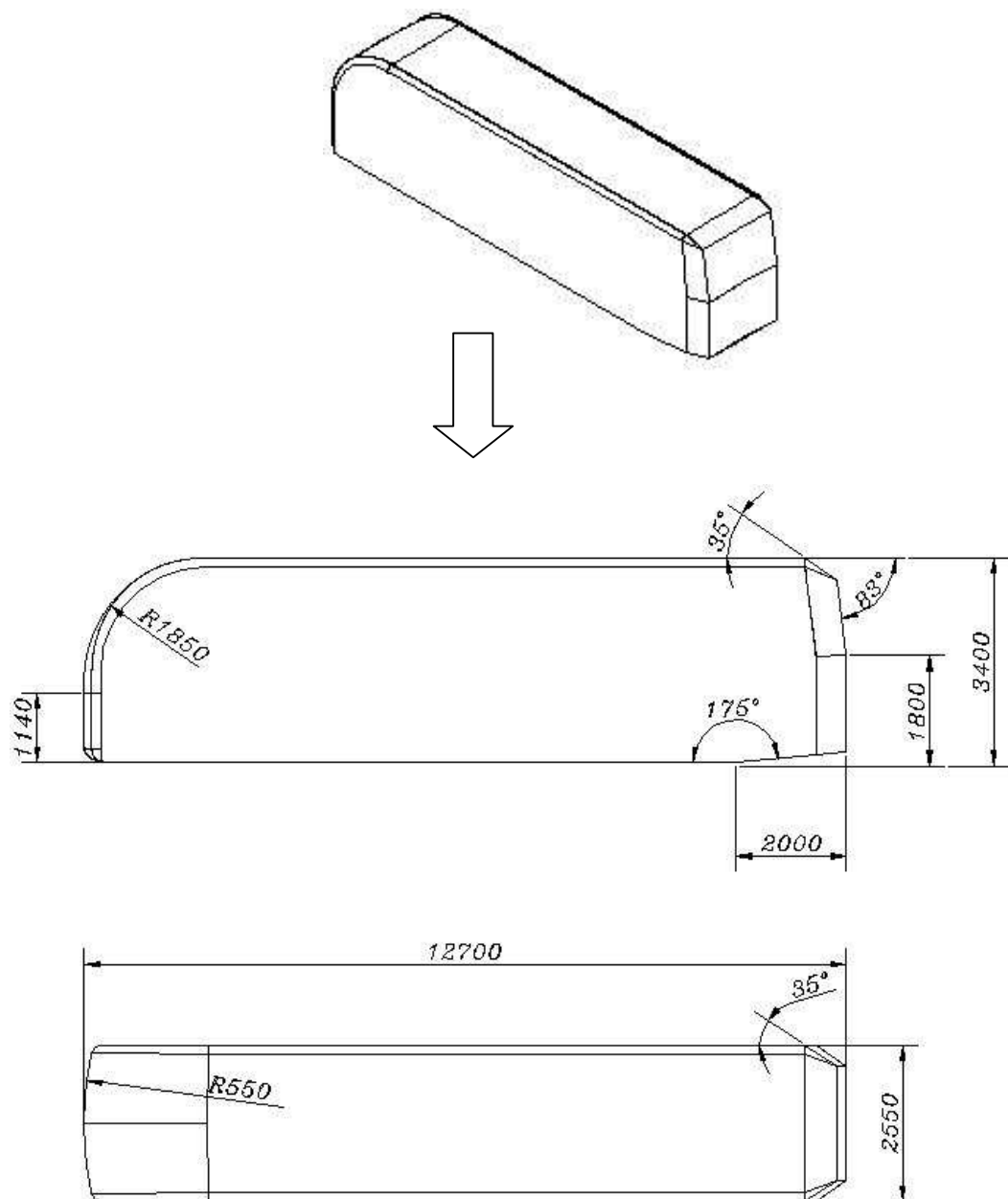
CARROSSERIES AMB EL DISSENY DE REDUCCIÓ

Aquí mostrem els dissenys realitzats per l'estudi de reducció.
El bus utilitzat es el N° 4 amb la variant de darrere. Simplement s'ha fet un petit afegit de 15° i 35°.

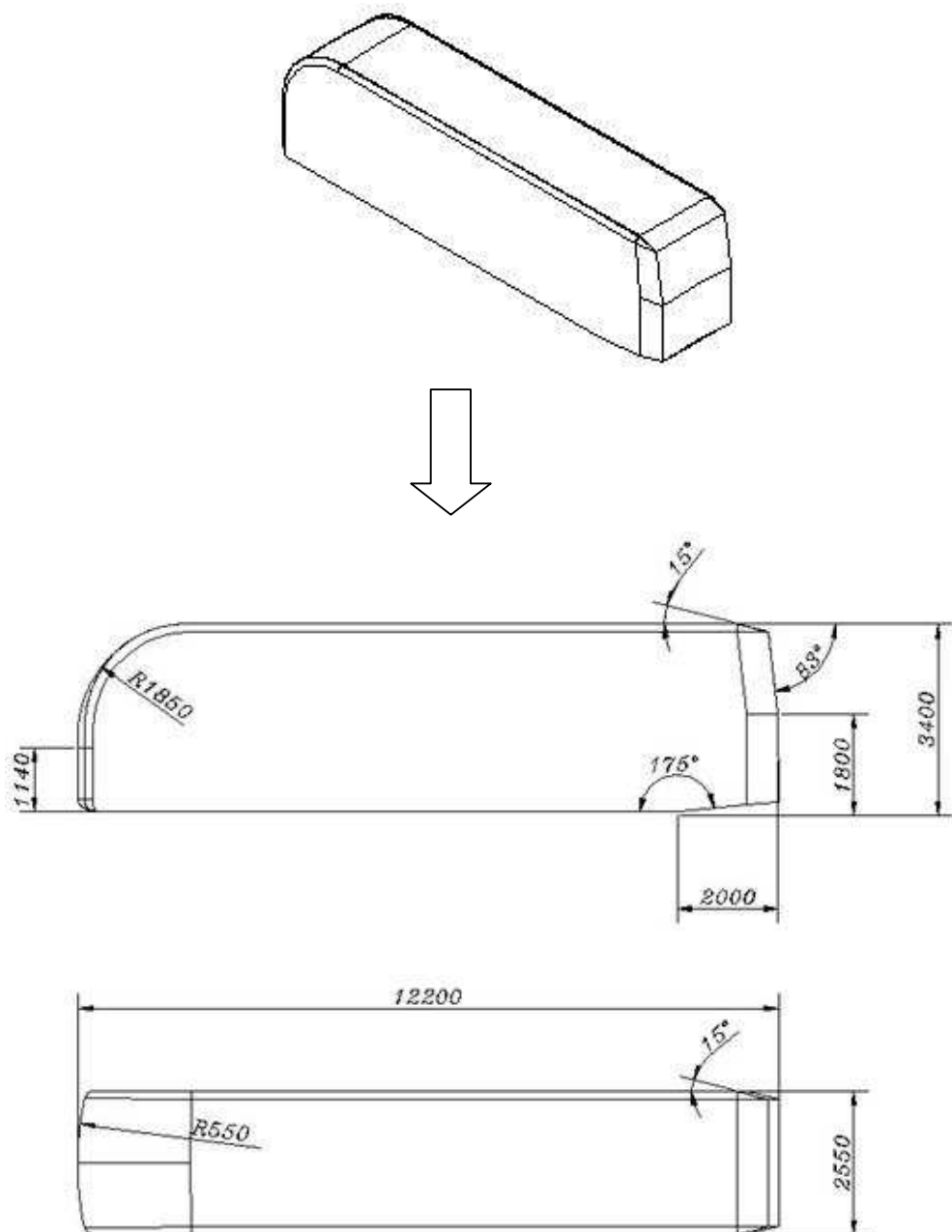
- **BUS 1ª MODIFICACIÓ.**



- **BUS 2ª MODIFICACIÓ.**



- **BUS 3ª MODIFICACIÓ.**



- **BUS 4ª MODIFICACIÓ.**

