

ÍNDIX

1.- INTRODUCCIÓ	7
1.1.- Antecedents	7
1.2.- Objecte	12
1.3.- Especificacions i abast	12
1.4.- Metodologia.....	13
2.- VALIDACIÓ DEL PROGRAMA DE SIMULACIÓ: EL COS D'AHMED	15
2.1.-Introducció.....	15
2.2.- Introducció al CFD.....	16
2.3.- Estudi del cos d'Ahmed	19
2.3.1.- Generació del mallat.....	21
2.3.2.- Simulació numèrica.....	34
2.3.3.- Resultats obtinguts	38
2.4.- Conclusions	39
3.- SIMULACIÓ CFD DE LES FORCES DEL VENT EN AUTOCARS	40
3.1.- Introducció.....	40

3.2.- Ràfegues de vent en els autobusos.....	43
3.3.- Generació del mallat	45
3.4.- Simulació numèrica.....	57
3.5.-Resultats	62
3.5.- Conclusions	80
4.- MODEL DINÀMIC D'AUTOCAR.....	83
4.1.- Introducció.....	83
4.2.- Model 2D.....	83
4.3.- Programació MATLAB.....	86
4.4.- Resultats	86
4.5.- Índex de perillositat.....	104
5.- CONCLUSIONS.....	107
6.- RESUM DEL PRESSUPOST.....	112
7.- RELACIÓ DE DOCUMENTS.....	113
8.- BIBLIOGRAFIA	114
9.- GLOSSARI	117
10.- AGRAÏMENTS.....	120

ANNEX A: ANTECEDENTS DEL COS D'AHMED	122
 A.1.- Interès del cos d'Ahmed	122
 A.2.- Estudi experimental de cos d'Ahmed.....	123
 A.2.1.- Introducció	123
 A.2.2.- Resultats de les mesures amb LDA (segons MOVA)	127
 A.2.3.- Conclusions	132
 A.3.- Bibliografia	133
 ANNEX B: MECÀNICA DE FLUIDS	135
 B.1.- Definició de fluid	135
 B.2.- Propietats dels fluids i definició de forces	135
 B.3.- Tipus de fluids	139
 B.4.- Tipus de fluxos	140
 B.5.- Equació de continuïtat	141
 B.6.- Equació de Bernoulli	142
 B.7. Equació de Navier-Stokes	143
 B.8.- Capa límit	143
 B.9.- Bibliografia	145

ANNEX C: FONAMENTS D'AERODINÀMICA	147
C.1.- Introducció	147
C.2. Sustentació	147
C.3.- Teorema de Kutta-Joukowski de la sustentació	149
C.4.- Coeficient de sustentació	151
C.5.- Perfils sustentadors.....	151
C.6.- Resistència	152
C.7.- Coeficient d'arrossegament	155
C.9.- Resistència a elevats nombres de Reynolds.....	155
C.10.- Resistència aerodinàmica a l'avanç.....	156
C.11.- Bibliografia	157
ANNEX D: AERODINÀMICA DE VEHICLES.....	159
D.1.- Introducció.....	159
D.2.- El camp de flux al voltant d'un vehicle.....	160
D.3.- Accions aerodinàmiques sobre vehicles	164
D.4.- Influència de la part davantera.....	169
D.4.1.- Inclinator del capó i el parabrises	170

D.5.- Influència de la geometria de la part posterior	171
D.6.- Influència dels laterals i sostre del vehicle	174
D.7.- Baixos del vehicle	176
D.7.1.- Part posterior dels baixos	176
D.8.- Rodes	177
D.9.- Sustentació aerodinàmica	181
D.10.- Bibliografia	182
ANNEX E: PREPROCÉS DE LA SIMULACIÓ CFD.....	184
E.2.- Càlcul de les coordenades del domini computacional (túnel de vent).....	189
E.3.- Càlcul de les coordenades de la densitat.....	194
ANNEX F: MODEL DINÀMIC DEL VEHICLE	199
F.1.- Introducció.....	199
F.2.- Equacions del comportament dinàmic	200
F.3.- Dades del vehicle	205
F.3.- Bibliografia.....	208
ANNEX G: PROCÉS DE MALLAT AMB “ANSYS ICEM 10.0”	210
G.1.- Procés de mallat	210

G.2.- Bibliografia	227
ANNEX H: PROCÉS DE SIMULACIÓ AMB “STAR CCM+”	229
H.1.- Procés de simulació	229
H.2.- Bibliografia	240
ANNEX I: REALITZACIÓ DE CÀLCULS AMB MATLAB	242
ANNEX J: ESQUEMES DE DISSENY	247
J.1.- Cos d’Ahmed	247
J.2.- Carrosseries d’autobús.....	248

1.- INTRODUCCIÓ

1.1.- Antecedents

Investigacions recents revelen com l'acció del vent lateral és un efecte molt important en bona part dels accidents ocorreguts en vehicles pesants de transport per carretera. És per això que el perfil aerodinàmic del vehicle esdevé determinant en l'avaluació de les forces laterals que hi actuen.

La majoria dels estudis actuals, però, es basen en pocs estudis de models a escala en túnels de vent i en anàlisis de simulacions numèriques de vehicles lleugers (turismes i furgonetes).

S'observa, així, la necessitat d'estendre l'estudi a vehicles pesants utilitzant les eines informàtiques més actuals.

A la Unió Europea, cada any es produeixen aproximadament 1.300.000 accidents de tràfic que causen més de 40.000 morts i 1.700.000 ferits (segons el llibre blanc del transport de la Unió Europea, 2001) . El cost directe i indirecte, s'ha avaluat en 160 mil milions d'euros. És per això que la unió europea (UE) s'ha marcat com a objectiu reduir el número d'accidents a les carreteres d'aquí al 2010. Tots els estats membres s'enfronten als mateixos problemes de seguretat vial, és a dir, una velocitat excessiva, el consum d'alcohol, la no utilització del cinturó de seguretat, l'existència de punts negres, el no compliment dels períodes de conducció i descans en el transport professional i els efectes climatològics com poden ser el vent, la pluja, la boira, etc. (segons el llibre blanc del transport de la Unió Europea, 2001)

Pel que fa a l'estat Espanyol, el parc nacional d'autobusos i autocars a 31 de desembre de 2006 constava de 58.286 unitats, que suposen aproximadament el 0,21% del total de vehicles a Espanya. El problema que s'origina, és que la mitjana d'antiguitat dels autobusos i autocars és aproximadament de 9,4 anys enfront dels 8,4 anys dels turismes. A més, el 25% dels autocars en circulació té més de 15 anys d'antiguitat. Tot i representar només el 0,21% del parc de vehicles, l'autobús concentra el 13,4% dels quilòmetres recorreguts per als viatgers a Espanya. Podem dir, per tant, que és un mitjà de transport per carretera d'ús intensiu. A la figura 1 podem veure el gràfic del parc de vehicles a Espanya de l'any 2006.

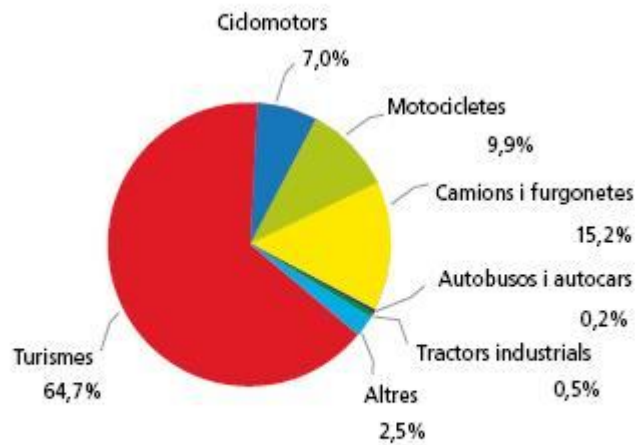


Figura. 1 Parc de vehicles a Espanya de l'any 2006.

Dels anys 2003 al 2006, la xifra de morts en accidents de circulació s'ha reduït en un 24%. Això vol dir que en el 2006 van morir 1.259 persones menys que en el 2003. El nombre de ferits greus també es va reduir considerablement en aquest període; en el 2006 es van enregistrar 4.923 ferits greus menys que el 2003. Això és un descens del 19%.

Tanmateix, les xifres d'accidents amb víctimes i de ferits lleus es van incrementar del 2005 al 2006. Això pot ser degut a que l'any 2006 es va implementar un nou sistema de recollida d'informació d'accidents que utilitza les possibilitats que ofereixen les noves tecnologies enregistrant l'accident des del mateix moment i lloc que ha succeït. A la taula 1 es poden observar el nombre d'accidents amb víctimes i ferits que hi ha hagut a Espanya entre el 2003 i el 2006.

Total	2003	2004	2005	2006	2006/2005	2006/2003
Accidents amb víctimes	99.987	94.009	91.187	99.797	9%	0%
Morts	5.399	4.741	4.442	4.104	-8%	-24%
Ferits greus	26.305	21.805	21.859	21.382	-2%	-19%
Ferits lleus	124.330	116.578	110.950	122.068	10%	-2%
Morts per 100 accidents	5,4	5,0	4,9	4,1		

Taula. 1 Nombre d'accidents amb víctimes i ferits a Espanya entre l'any 2003 i 2006 (segons la Direcció General de Tràfic).

El 2006, els autobusos/autocars es van veure implicats en 2.008 accidents amb víctimes, dels quals el 76% van succeir en zona urbana. En aquests accidents van morir 100 persones, de les quals 35 (el 35%) eren ocupants d'aquest tipus de vehicle. A la figura 2 es pot veure un gràfic amb el nombre d'accidents amb víctimes a Espanya de l'any 2006 classificats segons els tipus de vehicle.

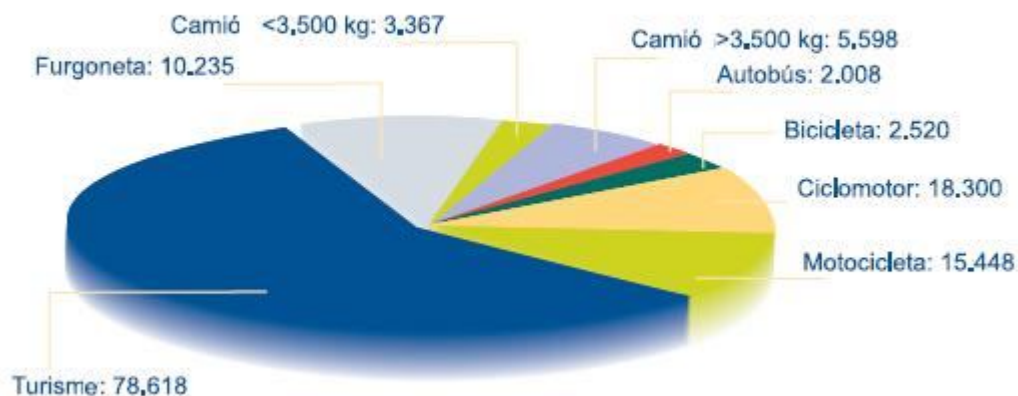


Figura. 2 Nombre d'accidents amb víctimes a Espanya de l'any 2006 classificats segons el tipus de vehicle (Segons la Direcció General de Tràfic).

De les dades anteriors, es dedueix que la probabilitat que té el passatger d'un autobús de resultar ferit en un accident és del 16%, en canvi, en un turisme, aquesta probabilitat és del 66%.

Pel que fa a Catalunya, i gràcies al nou sistema integral de recollida de dades d'accidents de trànsit del servei català de trànsit (SCT), hem pogut conèixer les xifres dels vehicles implicats i les causes d'accidentalitat a Catalunya. De la lectura de les dades, se n'extreu, que, el nombre d'accidents i de morts es va reduint. D'aquesta forma, mica en mica es va apropant a l'objectiu de la Unió Europea de reduir en un 50% el número d'accidents a les carreteres d'aquí al 2010.

Si ens centrem a Catalunya, podem saber que el 69% dels accidents a la ciutat són col·lisions. A la carretera, aquest xifra ha passat del 57% de 2005 al 53,3% de 2006. Les sortides de la calçada han augmentat tant en zona urbana com en zona interurbana. En conjunt han passat de ser el 8,9% al 15,5% del total d'accidents. Els atropellaments representen un 17,2% en zona urbana i un 1,4% en zona interurbana. La taula 2 classifica els accidents amb víctimes per tipus d'accident. Tots aquests accidents es poden classificar segons els factors concurrents, a la taula 3 tenim els accidents amb víctimes segons els factors concurrents. S'ha de dir que hi pot haver més d'un factor concurrent per accident.

		Zona urbana	Zona interurbana	Total	% ZU	% ZI	% Total
Col·lisions		11.652	4.239	15.891	69,0	53,3	63,9
Atropellaments		2.900	115	3.015	17,2	1,4	12,1
Bolcades		459	322	781	2,7	4,0	3,1
Sortides de calçada		1.113	2.730	3.843	6,6	34,3	15,5
Altres		771	553	1.324	4,5	7,0	5,4
Total		16.895	7.959	24.854	100,0	100,0	100,0

Taula. 2 Classificació dels accidents amb víctimes per tipus d'accident a Catalunya de l'any 2006
(segons el Servei Català de Trànsit).

Factors concurrents	Zona urbana	Zona Interurbana	Total	% ZU	% ZI	% Total
Distracció	2.350	1.539	3.889	10,5	14,3	11,7
Conductor/a inexpert/a	139	2	141	0,6	0,0	0,4
Alcohol o drogues	619	350	969	2,8	3,2	2,9
Malaltia, cansament o son	444	303	747	2,0	2,8	2,3
Velocitat inadequada	2.368	1.113	3.481	10,6	10,4	10,5
Infracció d'una norma de circulació	10.386	2.186	12.572	46,4	20,4	38,0
Estat o condició de la via	548	317	865	2,4	3,0	2,6
Estat o condició de la senyalització	10	0	10	0,0	0,0	0,0
Tram en obres	29	7	36	0,1	0,1	0,1
Mal estat del vehicle	552	115	667	2,5	1,1	2,0
Avaria mecànica	15	0	15	0,1	0,0	0,1
Mal temps	89	230	319	0,4	2,1	1,0
Un altre factor	471	288	759	2,1	2,7	2,3
Errada conductor	2.574	2.231	4.805	11,5	20,8	14,5
Sense opinió precisa	1.731	2.049	3.780	7,7	19,1	11,4
Cap factor	56	0	56	0,3	0,0	0,2
Total factors concurrents*	22.381	10.730	33.111	100,0	100,0	100,0
Total accidents	16.895	7.959	24.854	-	-	-

Taula. 3 Accidents amb víctimes a Catalunya durant el 2006 segons els factors concurrents (segons el Servei Català de Trànsit).

Cada any el servei català de trànsit, recull les dades d'accidentalitat, tant a les vies urbanes com a les interurbanes i les recopila en un document anomenat *Anuari estadístic d'accidents de trànsit a Catalunya*. Gràcies a aquests anuaris hem pogut saber el nombre d'autobusos implicats en accidents amb víctimes des del 1998 fins al 2006. La taula 4 és una taula que recopila el nombre d'autobusos implicats en accidents amb víctimes des del 1998 al 2006 i classificats en zones urbanes i interurbanes.

ANY	ZONA URBANA	ZONA INTERURBANA	TOTAL
1998	594	56	650
1999	601	62	663
2000	509	50	559
2001	554	49	603
2002	537	50	587
2003	582	35	617
2004	533	27	560
2005	605	37	642
2006	580	64	644

Taula. 4 Nombre d'autobusos implicats en accidents amb víctimes entre els anys 1998 i 2006 (Segons els anuaris estadístics d'accidents de trànsit a Catalunya).

1.2.- Objecte

L'objecte d'aquest projecte consisteix en determinar les forces laterals que s'exerceixen en vehicles pesants de transport de viatgers degut a l'acció del vent i investigar-ne la seva perillositat. Per fer-ho s'utilitzaran models numèrics de dinàmica de fluids i, per diferents velocitats del vehicle, es simularan vents amb diferent intensitat i direcció.

D'aquí es determinaran unes condicions de perillositat en funció, entre d'altres variables, de l'angle d'incidència del vent i de la seva velocitat.

1.3.- Especificacions i abast

En la realització del projecte, l'estudi aerodinàmic es realitzarà de forma virtual, mitjançant la utilització de programaris comercials de dinàmica de fluids.

1.4.- Metodologia

En aquest apartat procedirem a explicar d'una manera senzilla i clara les diferents etapes que es desenvolupen en el present projecte.

1 – Validació del programari de simulació de dinàmica de fluids

Abans d'estudiar el cas que ens ocupa, hem fet una validació del programari de simulació de dinàmica de fluids utilitzat mitjançant l'estudi aerodinàmic d'un model de referència anomenat cos d'Ahmed. Així, per a diferents variacions geomètriques del cos d'Ahmed, hem comparat les dades experimentals obtingudes per altres autors amb les dades que hem extret del programa de simulació numèrica. En total hem realitzat 28 simulacions per aquest cos que ens han permès obtenir una resposta satisfactòria del programa. Una vegada efectuada la validació del programari per estudis aerodinàmics procedirem a explicar els passos seguits per realitzar l'estudi que es presenta en el present projecte.

2- Simulació de l'efecte del vent sobre els vehicles

Com a primer pas en aquest apartat, s'han creat les geometries de dos models d'autobús actualment en el mercat mitjançant el programa de disseny 3D Rhinoceros.

Una vegada hem creat les geometries dels dos models d'autobús, hem procedit a crear el mallat de cada geometria per a cada cas amb el programa d'elements finits ANSYS ICEM. Aquí, els casos plantejats varien en funció de l'angle d'impacte del vent i de la velocitat del vehicle. En total hem analitzat 29 casos diferents.

Tot seguit, hem importat les geometries mallades al programa de simulació numèrica Star CCM+, d'on hem extret els resultats de les forces d'impacte del vent sobre la carrosseria i dels seus moments associats.

3. Simulació dinàmica del vehicle

Després de realitzar la simulació numèrica i extreure'n els valors de les forces i moments associats al vent per a cada cas (29 en total), hem utilitzat un model dinàmic de vehicle molt simple anomenat model de bicicleta (Noguchi, 1986) que, entre d'altres variables, ens permet avaluar els angles de bolcada, derrapada, etc. La solució d'aquest model s'ha dut a terme a partir de crear un programa amb el programari Matlab que ens ha permès extreure els valors de l'angle de bolcada, l'angle de guinyada, l'angle de desviament, la velocitat angular de guinyada, la velocitat angular de bolcada i l'acceleració lateral.

Finalment a partir dels valors extrets del Matlab i en funció l'estudi realitzat per Liu et al. (1998) hem determinat les condicions de perillositat dels vehicles analitzats en funció de l'angle de bolcada i de l'acceleració lateral que, ahora, depenen de la intensitat i direcció del vent. D'aquí n'hem extret les conclusions finals.

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

2.1.-Introducció

Amb el propòsit d'optimitzar el treball experimental i disminuir els costos de disseny, els experts en aerodinàmica de vehicles busquen constantment respostes als objectius plantejats per el cada vegada més exigent mercat de consumidors. En aquest sentit, les propietats aerodinàmiques són significatives per al rendiment, conducció, seguretat i confort dels vehicles actuals. Per exemple, un valor baix del coeficient d'arrossegament afavoreix una major economia de combustible i redueix les emissions de gasos d'efecte hivernacle, repercutint en una millora mediambiental.

En els últims anys han anat apareixent resultats amb suficient precisió gràcies a la combinació d'estudis experimentals mitjançant túnels de vent real i de forma virtual a partir de la simulació numèrica.

Tot i això, la millor forma de realitzar una simulació realista del problema consisteix en realitzar l'assaig a escala real en les pròpies condicions en què posteriorment funcionarà el vehicle, és a dir a la carretera. Tanmateix, les dificultats associades a la variabilitat de l'entorn, fan que els resultats obtinguts no siguin sempre definitius i són, sovint, motiu de debat. A més, el cost que suposa realitzar aquests tipus d'assajos durant la fase de disseny i concepció del vehicle fan que es prefereixi utilitzar tècniques de simulació.

En efecte, els avenços aconseguits des de fa més d'una dècada en la simulació numèrica de la dinàmica de fluids han aclarit, en part, el comportament del flux al voltant dels vehicles terrestres. Tanmateix, encara que aquests fluxos de característiques turbulentes es poden descriure adequadament a partir de les equacions de Navier-Stokes, la seva resolució per mètodes numèrics resulta cara des del punt de vista computacional. Per això, cal saber del cert que el programari de simulació numèrica utilitzat dona unes respostes el més acurades possibles.

Amb l'objectiu de validar el gran nombre de programaris de simulació de fluids que existeixen en el mercat, l'associació "Models for Vehicle Aerodynamics" (MOVA) amb els

seus socis de consorci (TU Delft, Univeristat de Manchester, LSTM, Electricite de France, AVL List i PSA Peugeot Citroen) van estar d'acord en promoure l'estudi del flux al voltat del vehicle tipus analitzat experimentalment per Ahmed (conegut com el cos d'Ahmed). Cal apuntar que el flux d'aire que es produeix al voltant del cos d'Ahmed conserva algunes de les principals característiques del flux al voltant dels vehicles reals.

D'aquesta forma, associacions com “ European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion” (ERCOFTAC) i MOVA han ofert als grups de recerca un gran nombre de resultats experimentals en túnel de vent sobre el cos d'Ahmed, molt útils per validar els models de turbulència que, posteriorment, seran utilitzats en l'estudi de l'aerodinàmica externa de vehicles comercials.

Per tant, en aquest apartat tractarem la simulació del cos d'Ahmed, dissenyat per Ahmed et al. (1984) i farem la comprovació de que les dades simulades amb el programari que hem utilitzat s'ajustin amb les seves dades experimentals. D'aquesta manera comprovarem que el programa de dinàmica de fluids computacional (CFD) utilitzat reproduïx de forma acceptable el comportament real a partir de comparar els valors del coeficient aerodinàmic d'arrossegament (C_D).

Cal notar que en aquest apartat explicarem l'estudi numèric que hem realitzat sobre el cos d'Ahmed. L'estudi experimental realitzat per altres autors sobre el cos d'Ahmed es comenta a l'annex A.

2.2.- Introducció al CFD

La dinàmica de fluids computacional o també anomenada CFD, és una de les branques de la mecànica de fluids que fa servir mètodes numèrics i algorismes per resoldre i analitzar problemes de fluxos de fluids utilitzant una discretització de l'espai. Aquesta discretització es fa per resoldre numèricament les equacions dinàmiques del fluid en una sèrie de punts separats unes distàncies prou petites per obtenir una solució acceptable.

Per fer aquesta discretització hi han diverses estratègies. En problemes amb molta simetria es poden calcular les variables que defineixen l'estat del fluid en una sèrie de punts en l'espai

que es consideren representatius dels volums de fluid que els envolten. Aquest mètode és conegut com de “diferències finites”. En problemes reals, però, sovint les formes són complexes i el mètode de les diferències finites no és el més adequat. L'alternativa en aquests casos és el mètode dels elements finits i, com a cas particular, el de volums finits, on l'espai es divideix en volums adjacents de formes arbitràries. En el mètode dels volums finits, les equacions d'evolució de les variables s'expressen en termes d'equacions de balanç a partir dels fluxos que travessen les parets d'aquests elements de volum i les seves fonts i embornals. D'aquesta forma s'obtenen, per a cada volum, les expressions per a les equacions de conservació de la massa, moment i energia.

És per culpa d'aquesta discretització que els resultats o solucions trobades amb CFD sempre són aproximacions i en aplicacions reals, és molt recomanable de comprovar-les experimentalment amb alguns valors de punts de referència. Tot i això, en els casos en què la disponibilitat de dades experimentals no sigui possible, si el càlcul es fa amb prou resolució espacial i el programari s'ha validat prèviament per a simulacions semblants, el resultat de la simulació s'espera que sigui força aproximat a la realitat.

L'estudi d'un problema de CFD pel mètode dels volums finits segueix el següent procés:

- ***Etapas de pre-procés:***

- Construcció de la geometria: per la construcció de la geometria, generalment es realitza un model CAD del cos que es desitja estudiar i es limita el camp al seu voltant mitjançant un contorn (és a dir, es dibuixa el túnel de vent). Al llarg d'aquest contorn exterior (el túnel de vent) es definiran les condicions adequades per descriure correctament el problema.
- Generació del mallat: la generació del mallat és necessària per a la solució numèrica del problema ja que equival a discretitzar el domini. En aquest procés es creen un nombre finit d'elements en què es determinaran les variables del flux. Segons les necessitats de cada treball es poden generar mallats estructurats o no estructurats.
- Definició de zones: L'últim pas del pre-procés consisteix en establir les zones de contorn del problema a resoldre. Cada zona presentarà propietats diferents.

- ***Resolució numèrica:***

La resolució numèrica és un procés iteratiu que consumeix la major part del temps computacional. En aquest pas es calculen els valors de les variables del flux en els elements de volum en què hem dividit el problema.

- ***Etapas de post-procés:***

Una vegada obtinguda la simulació del problema, es processen els resultats per tal d'extreure'n la informació adequada. D'aquesta forma, es calculen coeficients de força, visualitzacions mitjançant gràfiques del flux, es realitzen animacions i es redacten informes que faciliten la tasca d'interpretació dels resultats.

Per a la realització d'aquestes tres etapes, utilitzem tres programes. Primer partim de la geometria a utilitzar. Aquesta, com s'ha dit anteriorment, es pot realitzar amb programes de disseny 3D. En el present projecte s'ha utilitzat el programari Rhinoceros. Aquest és un modelador que permet una fàcil creació i modificació d'objectes en 3D.

Una vegada tenim la geometria creada, l'exportarem al segon programari utilitzat, en el nostre cas l'ANSYS ICEM, el qual permet aplicar un tipus de mallat a la geometria exportada, que és clau per establir la precisió dels resultats i determinar les condicions en què farem la simulació.

Finalment exportarem la geometria mallada al programari STAR-CCM+, on determinarem les condicions de contorn i inicials del model i realitzarem la simulació. Una vegada aplicat el mètode dels volums finits, en podrem treure les solucions i les conclusions que se'n deriven.

A continuació, a la figura 3 es mostra un esquema de la metodologia a seguir per a la resolució de la part de simulació fluídica en el present projecte.



Figura. 3 Esquema de la metodologia per a la part de simulació fluídica.

2.3.- Estudi del cos d'Ahmed

El cos d'Ahmed és un cos tridimensional que es pot entendre com la suma de tres geometries senzilles que es divideixen de la següent manera: una zona davantera o frontal, una zona central i una zona posterior.

La superfície frontal compta amb unes arestes arrodonides per aconseguir que es formi un corrent suau al seu damunt. La zona central és un ortoedre que fa d'unió entre el frontal i la zona posterior. Finalment, la zona posterior incorpora una superfície mòbil que permet variar l'angle de sortida α , conservant sempre la mateixa longitud per a l'aresta d'aquesta base inclinada (222 mm).

A la figura 4 es poden veure les dimensions del cos d'Ahmed, així com també podem diferenciar les tres parts geomètriques, comentades anteriorment, en què es divideix. A la figura 4, U representa la direcció en què anirà la velocitat de l'aire, L és la longitud total del cos i té un valor de 1044 mm, H és l'altura i té un valor de 288 mm i B és l'amplada i té un valor de 389 mm. La totalitat de les mides queden detallades en l'annex J.

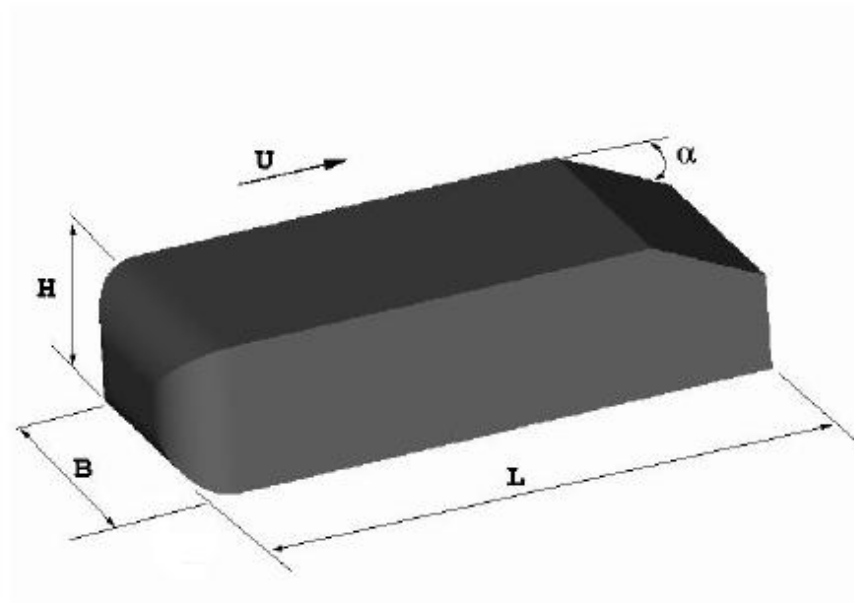


Figura. 4 Dimensions del cos d'Ahmed

A partir de l'estudi experimental realitzat per Ahmed et al. (1984) disposem de valors del coeficient d'arrossegament (C_D) en funció de l'angle d'inclinació de la part posterior del vehicle (veure taula 5).

La particularitat més important de l'estudi experimental portat a terme per Ahmed et al. (1982) 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 compresos entre $0^\circ < \alpha < 12^\circ$ i $\alpha > 30^\circ$ on la separació del flux es dona quan s'arriba al final i a l'inici, respectivament, de la superfície inclinada. Això comporta que, en aquest rang d'angles, el coeficient

d'arrossegament disminueixi a mesura que augmenta l'angle d'inclinació (veure taula 5). D'altra banda, s'observa un patró de flux tridimensional més complex per angles compresos entre $12^\circ < \alpha < 30^\circ$ on la separació del flux es dona a l'inici de la inclinació i també al final de la inclinació, amb una intensitat que 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 (veure taula 5).

L'estudi numèric realitzat per nosaltres amb el cos d'Ahmed s'ha dut a terme amb dos tipus de mallat diferent, un l'hem considerat mallat gruixut, perquè no és de tanta qualitat, i l'altre mallat fi. S'espera que aquest últim s'ajusti millor als resultats del cas experimental. Així, realitzant les simulacions veurem el patró de la solució quan utilitzem el mallat gruixut i per a dues variacions del mallat fi.

Angle Inclinació	Cd experimental
0°	0,250
10°	0,229
15°	0,233
20°	0,251
25°	0,285
30°	0,378 / 0,260
35°	0,257
40°	0,255

Taula. 5 Dades de l'experiment del cos d'Ahmed (Ahmed et al. 1984)

Tot seguit expliquem els paràmetres i les dades aplicades en l'execució del mallat i en la simulació numèrica. L'explicació detallada de la utilització dels programaris s'expliquen en l'annex G i en l'annex H.

2.3.1.- Generació del mallat

El primer pas abans de realitzar qualsevol simulació numèrica és construir una malla adequada. La construcció de la malla no està relacionada directament amb l'aerodinàmica, però sí que té una influència important amb els resultats que s'obtenen de la simulació numèrica del flux. Per això la realització d'una bona malla és un aspecte determinant per obtenir uns valors correctes. Per tant, la modelització de la geometria del cos a estudiar, la

definició de les mides del domini computacional (el túnel de vent) i el mallat són passos molt importants en qualsevol procés de simulació.

A continuació mostrem les dades emprades per al desenvolupament de la simulació.

➤ **Característiques geomètriques externes**

A la figura 5 observem les proporcions del domini computacional (túnel virtual) que està definit en funció de la longitud L del cos d'Ahmed que és aproximadament d'1 metre. La superfície d'entrada està situada a $2L$ respecte el començament del cos d'Ahmed i la sortida a $5L$ respecte el final del mateix, l'altura total del túnel està situada a $5H$ respecte la base del cos d'Ahmed. Aquestes dimensions del túnel són idèntiques al de Pujol et al. (2007). Seguidament, a la taula 6 mostrem les coordenades del domini computacional.

També s'ha de dir que aquest túnel de vent es construeix dins el programa ANSYS ICEM.

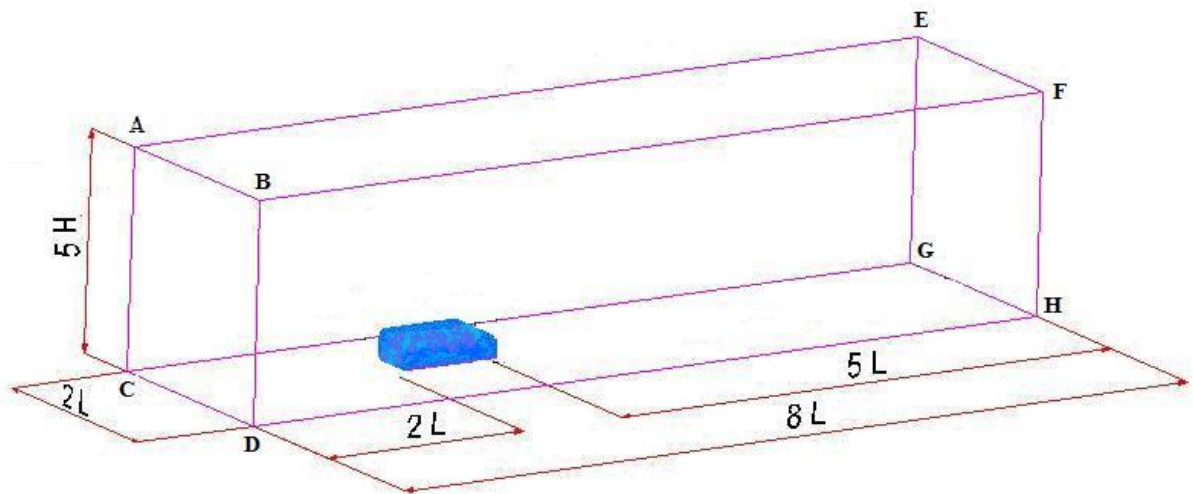


Figura. 5 Paràmetres del domini computacional. A partir de Pujol et al. (2007).

- **Coordenades del domini computacional:**

PUNT	X	Y	Z
A	-3	1	1,5
B	-3	-1	1,5
C	-3	1	0
D	-3	-1	0
E	5	1	1,5
F	5	-1	1,5
G	5	1	0
H	5	-1	0

Taula. 6 Coordenades del domini computacional (m).

- **Noms de les superfícies:**

- Domini computacional:

Punts (A,B,C,D) → Túnel/Frontal

Punts (E,F,G,H) → Túnel/Posterior

Punts (A,E,G,C) → Túnel/ Lateral Esquerra

Punts (B,F,H,D) → Túnel/Lateral Dret

Punts (A,B,F,E) → Túnel/Tapa

Punts (C,D,H,G) → Túnel/Base

- Cos d'Ahmed:

Cos/Frontal

Cos/Posterior

Cos/Lateral Dret

Cos/Lateral Esquerra

Cos/Tapa

Cos/Base

- **Paràmetres de densitat:**

Dins del domini computacional que hem creat, hem dissenyat una zona més precisa al voltant del model. Aquesta zona l'hem anomenat "túnel de densitat", rebent un valor més alt de precisió dels elements que el formen (és a dir, amb una mida dels elements

més petita que en la resta del volum). A la figura 6 podem observar les proporcions del túnel de densitat i a la taula 7 observem les coordenades del mateix.

D'altra banda, la mida màxima dels elements en aquesta regió de densitat varia en funció de la malla analitzada. Així tenim que:

- La mida màxima dels elements en la regió de densitat del mallat gruixut és de 0,1 m.
- La mida màxima dels elements en la regió de densitat del mallat fi és de 0,038 m.

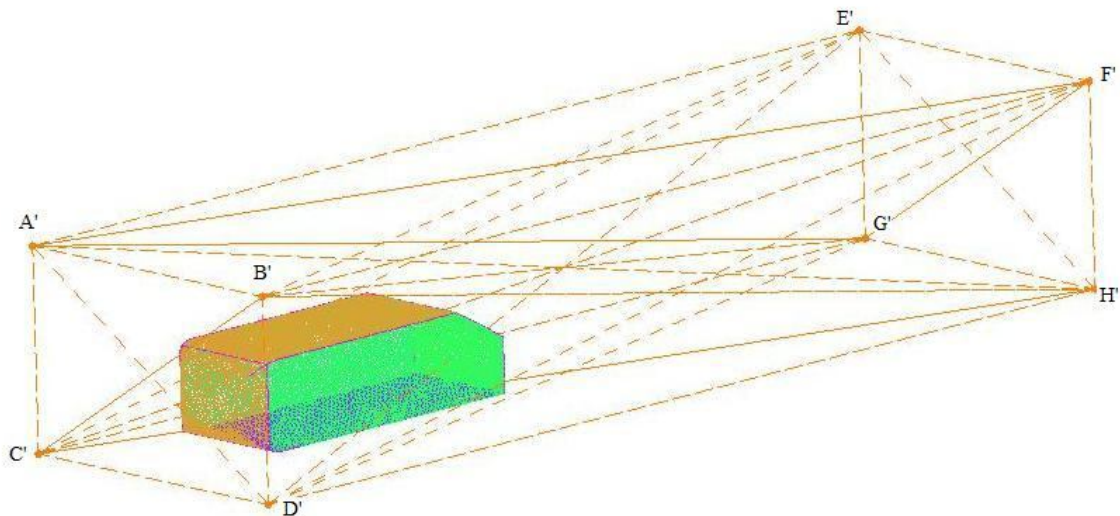


Figura. 6 Paràmetres de densitat.

PUNT	X	Y	Z
A'	-1,3	0,5	0,65
B'	-1,3	-0,5	0,65
C'	-1,3	0,5	0
D'	-1,3	-0,5	0
E'	2,2	0,5	0,65
F'	2,2	-0,5	0,65
G'	2,2	0,5	0
H'	2,2	-0,5	0

Taula. 7 Coordenades del túnel de densitat del cos d'Ahmed (m).

➤ Paràmetres del mallat

En aquest apartat podem observar els paràmetres utilitzats per la creació dels elements del mallat. Aquesta malla depèn de paràmetres com la qualitat, angles, disposició dels elements

(capes de prismes, malla hexaèdrica, etc). A la figura 7 podem veure els diferents tipus d'elements de volum que pot utilitzar el programari per generar la malla que són: hexaedres, tetraedres, prismes i piràmides (veure figura 7, ordenats d'esquerra a dreta).

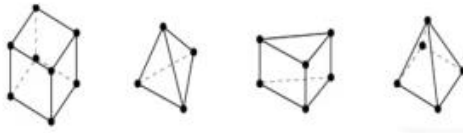


Figura. 7 Possibles elements volumètrics de la malla. D'esquerra a dreta: hexaedres, tetraedres, prismes i piràmides.

- Mides globals de la malla. Veure taula 8.

Paràmetre	Malla gruixuda	Malla fina
Factor d'escala	1	1
Creixement prismes	Lineal	Lineal
Altura inicial (m)	0,015	0,025
Altura total (m)	0,015	0,025

Taula. 8 Mides globals de la malla gruixuda i la malla fina

El factor d'escala a la taula 8 fa referència al possible escalat de mides que hi pot haver entre les dimensions del dibuix i les de l'objecte real. El paràmetre de creixement de prismes fa referència a la ràtio de creixement entre capes successives de prismes que es poden aplicar a partir d'una superfície. L'altura total i inicial fa referència a l'alçada de tota la capa de prismes i a la capa inicial, respectivament. En la taula 8 aquesta és la mateixa ja que és més eficient, en temps de càlcul, crear primer una única capa de prismes i després subdividir-la.

- Mides per parts dels elements. Aquí posem les mides màximes que volem de l'element en cada superfície (veure taula 9 i taula 10).

Part	Mida màxima (m)	Altura (m)	Proporció d'alçada	Nº de capes
Aire	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/Lat. Dret	0,02	0,015	1	1
Cos/Lat. 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/Lat. Dret	0,2	0	0	0
Túnel/Lat. Esquerra	0,2	0	0	0
Túnel/Tapa posterior	0,2	0	0	0

Taula. 9 Mides de cada part del mallat gruixut del cos d'Ahmed

Part	Mida màxima (m)	Altura (m)	Proporció d'alçada	Nº de capes
Aire	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/Lat. Dret	0,008	0,025	1	1
Cos/Lat. Esquerra	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/Lat. Dret	0,15	0	0	0
Túnel/Lat. Esquerra	0,15	0	0	0
Túnel/Tapa posterior	0,15	0	0	0

Taula. 10 Mides de cada part del mallat fi del cos d'Ahmed

➤ Volum de malla

Per realitzar el mallat del volum hem utilitzat elements tetraèdrics ja que són els més adients, tret de la capa límit que hem utilitzat elements prismàtics. Per crear el mallat de la superfície i el del volum hem utilitzat els següents paràmetres:

- Mallat de la superfície: Aquí és on determinem les iteracions que volem que faci per executar la malla i la qualitat que ha de tenir aquesta (veure taula 11).

Paràmetre	Malla Gruixuda	Malla Fina
Nº. Iteracions	5	5
Qualitat	0,4	0,4

Taula. 11 Paràmetres del mallat de la superfície

La qualitat de la malla és un paràmetre que inclou múltiples elements dels elements com són els angles dels vèrtexs, relació volum – àrea i àrea – perímetre, etc., i que donen compte de si la discretització del volum finalment assolida pot donar problemes d'interpretació una vegada importada en el programa de simulació.

- Mallat del volum: Aquí és on determinem el factor d'escala i el factor d'expansió (equivalent a la taxa de creixement dels elements de volum) que volem que hi hagi des del cos fins a la superfície del túnel (veure taula 12). Aquests factors ens determinen en gran part el numero d'elements que es formaran en el volum.

Paràmetre	Malla Gruixuda	Malla Fina
Factor d'escala	1	1
Factor d'expansió	1,2	1

Taula. 12 Paràmetres del mallat del volum

➤ Capa límit

Ja que en la capa límit és on tenim importants variacions de velocitat de l'aire, és en aquesta zona on es requereix una precisió més acurada. Per això, necessitem disposar d'una capa d'elements el més uniforme possible perquè a mesura que ens apropem al cos disposem d'elements, l'estructura geomètrica dels quals no distorsioni els resultats. A efectes pràctics això equival a una extrusió en alçat dels triangles de la superfície. Aquests elements són els prismes.

El procés a seguir és dividir la capa límit amb varies parts, determinant la proporció de creixement del prisma i el número de capes. Per a la regió dels prismes s'han escollit els següents paràmetres:

- Proporció de creixement de la capa de prismes = 1,5
- Nombre de nivells de prismes = 6

Això vol dir, que hem dividit la capa límit en 6 nivells i que els prismes a cada nivell tenen una altura 1,5 vegades més gran que en el nivell anterior.

➤ **Planxat dels elements**

La funció del planxat és reordenar els elements per obtenir un mallat de més qualitat. O sigui, obtenir una malla amb elements geomètricament més uniformes. Per poder realitzar aquest procés cal posar una certa qualitat de malla i una xifra d'iteracions adequada perquè arribi a obtenir la qualitat desitjada. Els paràmetres utilitzats en aquest procés són els següents:

- Qualitat mínima del planxat = 0,2
- Nombre d'iteracions = 5

➤ **Condicions de contorn**

En qualsevol simulació numèrica és necessari determinar les condicions de contorn associades a les regions del domini. Tot seguit es descriuen les que s'han utilitzat en el model, on Wall, significa paret i és la condició associada a la superfície del cos d'Ahmed. Velocity Inlet fa referència a la velocitat d'entrada en el túnel de vent, Pressure Outlet significa la pressió de sortida del domini (el túnel de vent) i Symmetry significa simetria. A continuació s'exposen les condicions de contorn a les interfícies utilitzades tant del cos com del túnel de vent per a tots els tipus de malla.

- Cos:

Cos/Frontal → Wall

Cos/Posterior → Wall

Cos/Lateral Dret → Wall

Cos/Lateral Esquerra → Wall

Cos/Tapa → Wall

Cos/Base → Wall

- Túnel:

Túnel/Frontal → Velocity-Inlet
Túnel/Posterior → Pressure Outlet
Túnel/ Lateral Esquerra → Symmetry
Túnel/Lateral Dret → Symmetry
Túnel/Tapa → Symmetry
Túnel/Base → Wall

Si observem les taules 13.A i 13.B podem veure la informació del mallat gruixut i a les taules 14.A i 14.B es mostra la informació del mallat fi per a cada un dels cossos d'Ahmed analitzats.

Si ens fixem en l'apartat on es defineixen els tipus d'elements a les taules següents, es mostra la informació del que hem explicat anteriorment pel que respecta als tipus d'elements que utilitza el programari utilitzat per generar el mallat. Per tant, NODE significa punts, LINE_2 fa referència a les corbes, TETRA_4 als tetraedres (elements de volum), TRI_3 als triangles (elements de superfície) i PENTA_6 als prismes (elements de volum en la regió de la capa límit).

Inclinació part posterior (°)	0°	10°	15°	20°	25°
Tipus d'elements					
NODE	28	30	30	30	30
LINE_2	790	838	848	837	837
TETRA_4	233.731	253.505	282.056	255.107	258.413
TRI_3	21.636	23.078	23.126	22.862	22.942
PENTA_6	79.800	89.628	88.452	87.132	87.576
Nº d'elements per part					
BODY	313.531	343.133	370.508	342.239	345.989
COS/CURVES	330	310	388	383	177
COS/BASE	2.568	2.577	2.539	2.519	2.559
COS/FRONTAL	-	1.455	-	-	1.134
COS/LATERAL_DRET	2.521	2.566	2.510	2.496	2.546
COS/LATERAL_ESQ	2.531	2.586	2.545	2.492	2.551
COS/TAPA	-	35	-	-	81
COS/TAPA/POSTERIOR	2.409	4.390	4.363	4.186	4.175
COS/TAPA/TAPA	3.437	1.565	2.947	2.991	1.918
DENSITY	4	4	4	4	4
TUNEL/CURVES	318	318	324	318	318
TUNEL/BASE	3.795	3.599	3.809	3.805	3.807
TUNEL/FRONTAL	250	250	268	250	250
TUNEL/LAT_DRET	996	996	1.002	996	996
TUNEL/LAT_ESQ	980	980	986	978	978
TUNEL/OUTFLOW	258	258	261	258	258
TUNEL/TAPA	2.057	2.057	2.058	2.053	2.057
Total elements del cos	13.466	15.174	14.904	14.684	14.964
Total elements del túnel	8.336	8.140	8.384	8.340	8.346
Total elements	335.985	367.079	394.512	365.968	369.798
Total nodes	84.066	92.641	96.776	91.607	92.362

Taula. 13.A. Informació dels elements del mallat gruixut de 0° a 25° per a l'angle d'inclinació.

Inclinació part posterior (°)	30°	35°	40°	45°	50°
Tipus d'elements					
NODE	30	22	30	30	30
LINE_2	833	851	835	843	834
TETRA_4	259.259	259.662	281.078	258.543	245.380
TRI_3	22.798	22.910	22.638	22.700	22.444
PENTA_6	86.688	87.276	85.740	86.124	84.732
Nº d'elements per part					
AIRE	345.947	346.938	366.818	344.667	330.112
COS/CURVES	373	547	378	384	377
COS/BASE	2.529	2.194	2.576	2.566	2.503
COS/FRONTAL	1.408	-	-	-	-
COS/LATERAL_DRET	2.471	2.089	2.444	2.460	2.437
COS/LATERAL_ESQ	2.472	2.092	2.440	2.464	2.432
COS/TAPA	-	-	-	-	-
COS/TAPA/POSTERIOR	4.169	4.045	3.920	3.926	3.711
COS/TAPA/TAPA	1.567	1.649	3.073	3.103	3.202
DENSITY	4	4	4	4	4
TUNEL/CURVES	318		320	320	320
TUNEL/BASE	3.811	3.938	3.801	3.797	3.773
TUNEL/FRONTAL	250	286	253	253	253
TUNEL/LAT_DRET	996	1.005	997	997	997
TUNEL/LAT_ESQ	980	998	984	984	984
TUNEL/OUTFLOW	256	267	257	257	257
TUNEL/TAPA	2.057	2.192	2.056	2.058	2.058
Total elements del cos	14.616	12.069	14.453	14.519	14.285
Total elements del túnel	8.350	8.686	8.348	8.346	8.322
Total elements	369.608	370.721	390.321	368.240	353.420
Total nodes	92.019	92.407	95.116	91.587	88.633

Taula 13.B. Informació dels elements del mallat gruixut de 30° a 50° per a l'angle d'inclinació.

Inclinació part posterior (°)	0°	10°	15°	20°	25°
Tipus d'elements					
NODE	28	30	30	30	30
LINE_2	1.533	1.680	1.680	1.651	1.657
TETRA_4	1.682.921	1.821.113	1.821.113	1.789.341	1.800.676
TRI_3	92.844	100.916	100.916	98.882	98.508
PENTA_6	525.042	578.452	578.452	567.224	564.648
Nº d'elements per part					
AIRE	2.207.963	2.399.565	2.399.565	2.356.565	2.365.324
COS/CURVES	814	776	776	934	398
COS/BASE	13.303	13.323	13.323	13.271	13.237
COS/FRONTAL	-	8.339	8.339	-	5.805
COS/LATERAL_DRET	9.799	9.960	9.960	9.755	9.821
COS/LATERAL_ESQ	9.919	10.104	10.104	9.786	9.883
COS/TAPA	-	88	88	-	197
COS/TAPA/POSTERIOR	16.035	28.084	28.084	26.639	26.316
COS/TAPA/TAPA	26.285	13.258	13.258	21.915	16.281
DENSITY	4	4	4	4	4
TUNEL/CURVES	408	410	410	409	409
TUNEL/BASE	10.848	10.701	10.701	10.861	10.853
TUNEL/FRONTAL	577	582	582	575	577
TUNEL/LAT_DRET	1.888	2.177	2.177	1.888	1.888
TUNEL/LAT_ESQ	1.820	2.113	2.113	1.821	1.821
TUNEL/OUTFLOW	581	583	583	581	581
TUNEL/TAPA	2.124	2.124	2.124	2.124	2.124
Total elements del cos	75.341	83.156	83.156	81.366	81.540
Total elements del túnel	17.838	18.280	18.280	17.850	17.844
Total elements	2.302.368	2.502.191	2.502.191	2.457.128	2.465.519
Total nodes	564.399	616.072	616.072	604.607	605.065

Taula. 14.A. Informació dels elements del mallat fi de 0° a 25° per a l'angle d'inclinació.

Inclinació part posterior (°)	30°	35°	40°	45°	50°
Tipus d'elements					
NODE	30	22	30	30	30
LINE_2	1.665	1.705	1.641	1.624	1.629
TETRA_4	1.797.917	1.807.331	1.787.876	1.876.100	1.828.817
TRI_3	98.408	97.922	97.260	96.812	95.882
PENTA_6	639.961	560.812	555.996	550.046	546.182
Nº d'elements per part					
AIRE	2.437.878	2.368.143	2.343.872	2.426.146	2.374.999
COS/CURVES	922	1.311	921	905	918
COS/BASE	13.266	11.444	13.211	12.873	13.004
COS/FRONTAL	8.304	-	-	-	-
COS/LATERAL_DRET	9.569	8.238	9.574	9.436	9.448
COS/LATERAL_ESQ	9.618	8.192	9.562	9.501	9.498
COS/TAPA	-	-	-	-	-
COS/TAPA/POSTERIOR	26.173	25.367	24.715	24.293	23.325
COS/TAPA/TAPA	13.945	14.274	22.705	22.808	23.081
DENSITY	4	4	4	4	4
TUNEL/CURVES	436	436	407	412	407
TUNEL/BASE	10.881	11.032	10.847	10.651	10.868
TUNEL/FRONTAL	685	607	576	583	577
TUNEL/LAT_DRET	2.427	1.857	1.888	2.178	1.888
TUNEL/LAT_ESQ	2.352	1.834	1.820	2.115	1.819
TUNEL/OUTFLOW	692	604	578	583	580
TUNEL/TAPA	2.124	2.284	2.123	2.124	2.124
Total elements del cos	80.875	67.515	79.767	78.911	78.356
Total elements del túnel	19.161	18.218	17.832	18.234	17.856
Total elements	2.539.276	2.467.792	2.442.803	2.524.612	2.472.540
Total nodes	642.823	603.974	598.246	609.222	599.056

Taula 14.B. Informació dels elements del mallat fi de 30° a 50° per a l'angle d'inclinació.

A partir de la informació anterior podem observar com el nombre d'elements utilitzats per discretitzar el cos d'Ahmed és de l'ordre de 350.000 en el mallat gruixut i de 2.500.000 en el mallat fi. Els nodes en les taules anteriors fan referència als punts corresponents als vèrtexs dels elements.

2.3.2.- Simulació numèrica

Després de realitzar el mallat del model, el pas següent consisteix en importar la malla des del programa de simulació numèrica. En el nostre cas, el CFD utilitzat és l'STAR-CCM+ versió 2.10.013. Aquest pas és molt important perquè és en el programa de simulació on definim, de forma quantitativa, les condicions de contorn del problema que es vol estudiar, on s'estableixen les condicions inicials del sistema, l'estat en què es troba el cos, definim quins models de turbulència escollim, etc., per, finalment, extreure'n les conclusions.

En aquest capítol realitzem un total de 28 simulacions, d'on obtindrem els valors característics del coeficient d'arrossegament del cos d'Ahmed per a diferents angles d'inclinació de la part posterior del vehicle. Aquestes 28 simulacions queden distribuïdes de la següent manera: 10 per a models del cos d'Ahmed amb malla gruixuda, 8 per a models amb malla fina amb un valor d'intensitat de turbulència del flux a l'entrada igual a l'1% i finalment 8 més amb malla fina però variant el valor de la intensitat de turbulència del flux a l'entrada, ara igual al 10%. Els primers casos els anomenarem Ahmed gruixut, els segons Ahmed fi 1 i els tercers Ahmed fi 2.

➤ Metodologia

- **Models utilitzats**

- Fluid del volum → Gas (aire)
- Flux → Segregate Flow (flux segregat; la part tèrmica no es calcula)
- Moviment → Motion stationary (Moviment de les parts en repòs)
- Equació per resoldre el sistema → Ideal gas (gas ideal)
- Temps → Steady (flux estacionari)
- Règim → Turbulent (règim del fluid a la capa límit)
- Model de turbulència → K-Epsilon turbulent

Com que el nombre de Reynolds del problema supera clarament 2000, el flux a estudiar és turbulent. Per això, en la simulació numèrica hem d'escollir un model de turbulència adequat.

En el nostre cas hem escollit el model $K - \epsilon$ *Epsilon turbulent* ja que és un dels models més comuns, més complets i més robustos per simular la turbulència. Aquest model es basa en la metodologia de les fluctuacions turbulentes desenvolupada per Reynolds. D'aquesta forma, entra dins la categoria dels models de turbulència anomenats RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes). En essència es tracta d'un model de turbulència de dues equacions d'evolució. És a dir, a més de les equacions d'evolució per a la quantitat de moviment del flux mig, inclou dues equacions de transport addicionals per resoldre K (l'energia cinètica turbulenta per unitat de massa) i ϵ (la velocitat de dissipació de l'energia cinètica turbulenta K).

En aquests models de turbulència es pot fixar una intensitat de turbulència en les superfícies d'entrada del flux. Aquesta intensitat turbulenta I està relacionada amb l'energia cinètica turbulenta K i el mòdul de la velocitat mitjana del flux U a partir de l'expressió:

$$K = \frac{3}{2} \cdot I \cdot U^2 \quad (\text{Eq.1})$$

D'aquesta forma, definint la intensitat de la turbulència en la superfície d'entrada del flux, queda establert el valor de l'energia cinètica turbulenta a l'entrada. Aquesta intensitat de la turbulència es sol donar en tant per u. A continuació es mostren els valors utilitzats en els estudis del cos d'Ahmed. Estudis de vehicles en condicions normals, solen utilitzar valors d' I compresos entre el 2% i el 30% (Cheli et al., 2006).

- **Intensitat de turbulència (I)**

- Ahmed gruixut $\rightarrow I = 0,01$
- Ahmed fi 1 $\rightarrow I = 0,01$
- Ahmed fi 2 $\rightarrow I = 0,10$

➤ **Condicions de contorn**

Arribat a aquest punt, és on acabem de definir les condicions de contorn aplicades al model en l'apartat de la generació del mallat. Tot seguit es descriuen les que s'han utilitzat en el model, on Wall slip o Wall no-slip, significa que la paret és lliscant (el flux disposa d'una velocitat tangent a la paret no nul·la) o no ho és (la velocitat és nul·la sobre la superfície del cos), Velocity Inlet fa referència a la velocitat d'entrada i Pressure Outlet significa la pressió de sortida.

- Cos → Wall

Ahmed gruixut → Wall no-slip

Ahmed fi 1 → Wall no-slip

Ahmed fi 2 → Wall slip

- Túnel/Base → Wall no-slip

- Túnel/Tapa → Symmetry

- Túnel/Frontal → Velocity-inlet [40,0,0] m/s

Intensitat de turbulència:

- Ahmed gruixut → $I = 0,01$

- Ahmed fi 1 → $I = 0,01$

- Ahmed fi 2 → $I = 0,10$

- Túnel/Lateral Dret → Symmetry

- Túnel Lateral Esquerre → Symmetry

- Túnel/Posterior → Pressure Outlet [0,0 Pa]

Intensitat de turbulència:

- Ahmed gruixut → $I = 0,01$

- Ahmed fi 1 → $I = 0,01$

- Ahmed fi 2 → $I = 0,10$

➤ **Propietats per determinar el coeficient aerodinàmic (C_d)**

En aquest apartat definim les variable per calcular el coeficient aerodinàmic del cos d'Ahmed.

Qualsevol cos que està immers en una corrent d'un fluid real esta sotmès a una força d'arrossegament. El quocient entre aquesta força d'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, dona lloc al coeficient d'arrossegament (veure equació 2).

$$C_d = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A_D} \quad (\text{Eq.2})$$

On:

$C_d \rightarrow$ Coeficient d'arrossegament

$F_D \rightarrow$ Força d'arrossegament (N)

$A_D \rightarrow$ Superfície d'impacte de l'aire (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

• **Variables del cos d'Ahmed**

- Àrea del cos $\rightarrow 0,112 \text{ m}^2$

- Densitat de l'aire $\rightarrow 1,2047 \text{ Kg} / m^3$

- Velocitat de l'aire $\rightarrow 40 \text{ m} / s$

- Pressió relativa $\rightarrow 0,0 \text{ Pa}$

- Direcció de l'aire $\rightarrow [1.0,0.0,0.0]$

2.3.3.- Resultats obtinguts

Com ja hem comentat anteriorment, en aquest apartat comparem els resultats obtinguts de l'estudi experimental del cos d'Ahmed realitzat per les associacions MOVA i els seus socis de consorci (TU Delft, Univeristat de Manchester, LSTM, Electricite de France, AVL List i PSA Peugeot Citroen) amb els nostres resultats numèrics. Si observem la taula 15, podem veure els diferents valors del coeficient d'arrossegament dels casos estudiats i si ens fixem en la figura 8 podem veure una gràfica comparativa entre les dades experimentals i les numèriques.

Angle Inclinació	Cd experimental	Cd Ahmed gruixut	Cd Ahmed fi 1	Cd Ahmed fi 2
0°	0,250	0,351	0,275	0,279
10°	0,229	0,311	0,253	0,257
15°	0,233	0,312	0,255	0,259
20°	0,251	0,324	0,265	0,27
25°	0,2845	0,339	0,285	0,29
30°	0,378 / 0,260	0,348	0,275	0,327
35°	0,257	0,325	0,274	0,323
40°	0,255	0,332	0,272	0,277
45°	-	0,318	0,27	0,274
50°	-	0,336	-	-

Taula. 15 Valors de les diferents simulacions aquí efectuades i dels valors experimentals obtinguts d'altres autors.

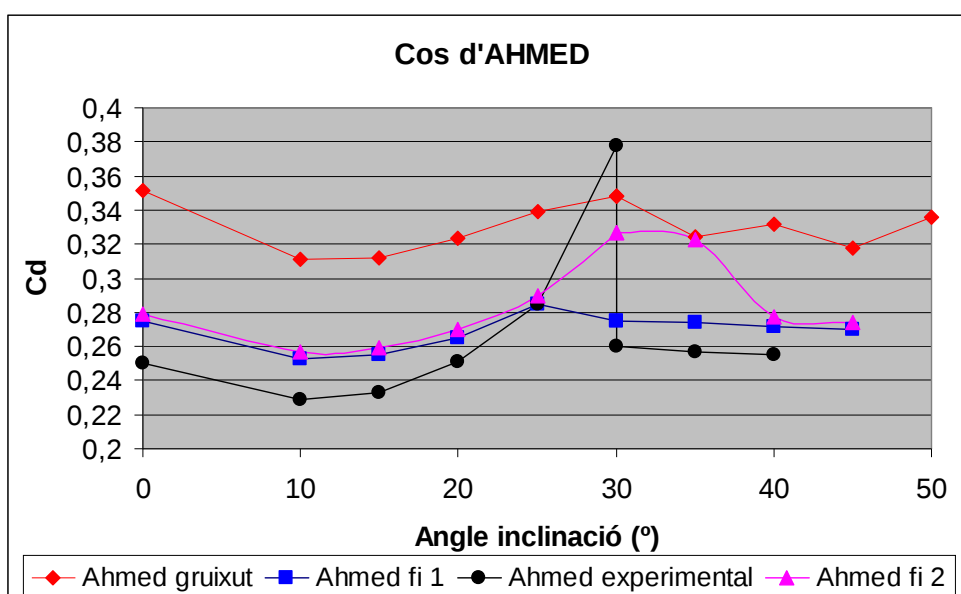


Figura. 8 Gràfica comparativa entre les dades experimentals (de les associacions MOVA i ERCOFTAC) i simulades en el nostre estudi del cos d'Ahmed.

2.4.- Conclusions

Per poder validar el programari utilitzat hem comparat els nostres resultats simulats numèricament amb els resultats experimentals del cos d'Ahmed cedits per MOVA i ERCOFTAC. Aquest apartat s'ha realitzat conjuntament amb el Treball Final de Carrera d'en Narcís Flores (2008). En total s'han realitzat 28 simulacions numèriques pel cos d'Ahmed, d'aquestes 28, 10 les hem realitzat amb una malla gruixuda, 8 amb una malla fina amb un valor d'intensitat de turbulència ($I = 0,01$) i les 8 restants també les hem realitzat amb la mateixa malla fina però variant el valor de la intensitat de turbulència ($I = 0,10$).

Si ens fixem en els casos de Ahmed fi 1 i Ahmed fi 2 en comparació amb el cas experimental, podem observar com fins a un angle d'inclinació de 10° el C_d descendeix de valor amb el mateix pendent que el mesurat experimentalment. Aleshores el C_d augmenta a mesura que l'angle va augmentat fins a 25° en el cas 1 ($I = 0,01$) i fins a 30° en el cas 2 ($I = 0,10$). A partir de 40° el coeficient d'ambdós casos descendeix de forma semblant al cas experimental. En canvi, si observem la gràfica de l'Ahmed gruixut i la comparem amb el cas experimental, observem que fins a un angle d'inclinació de 10° el coeficient baixa però amb diferent pendent. A mesura que l'angle va augmentant fins a 30° el coeficient també ho fa, però a partir d'aquí el valor del coeficient fluctua. Queda clar, així, que la mida dels elements en el mallat és essencial per a una correcta simulació del procés.

D'entre els casos d'Ahmed fi 1 i Ahmed fi 2, observem a la Figura 8 que la solució per a una intensitat de turbulència petita ($I = 0,01$) no reproduïx el pic en el C_d observat experimentalment. Tanmateix, un augment d'aquesta intensitat de la turbulència a $I = 0,10$ sí que mostra un augment considerable en el C_d per angles de l'ordre de 30° , per bé que, a diferència dels resultats experimentals, la regió on es preveuen elevats valors del C_d és molt més àmplia. Cal notar que Ahmed et al. (1984) no varen determinar el valor de la intensitat de la turbulència en les seves mesures experimentals. Els estudis numèrics per al cos d'Ahmed, solen acceptar valors d' I de l'ordre de 0,10 (un 10%). En aquest cas, la figura 8 sí que mostra una certa capacitat del programari de reproduir el patró global del comportament del C_d en el cos d'Ahmed. En el capítol següent, utilitzarem un valor de la intensitat de turbulència $I = 0,05$ tal i com utilitza Cheli et al. (2006) en l'estudi de l'efecte del vent en vehicles pesants de transport de mercaderies.

3.- SIMULACIÓ CFD DE LES FORCES DEL VENT EN AUTOCARS

3.1.- Introducció

En aquest capítol estudiem les forces laterals que s'exerceixen en vehicles pesants de transport de viatgers degut a l'acció del vent amb l'objectiu d'investigar-ne la seva perillositat en el capítol 4. Per fer-ho utilitzem dos models diferents de carrosseries d'autocar que es troben actualment en el mercat (veure figura 9). A la figura 9, el model de l'esquerra l'anomenem bus 1 i el model de la dreta bus 2. Tant per al bus 1 com per al bus 2 simularem l'acció de vents amb diferents intensitat i direcció i n'extreurem les forces i moments que es produeixen sobre el vehicle.

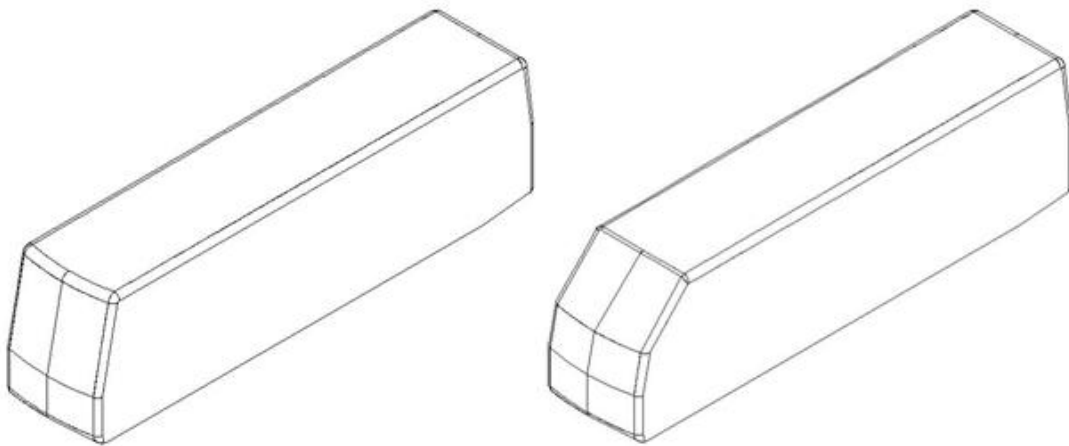


Figura. 9 Models de carrosseria d'autocar estudiats en el present projecte.

Si ens fixem en la figura 10 podem observar l'esquema de les diferents velocitats i angles que ens apareixen sobre un vehicle quan investiguem l'acció d'un flux d'aire extern. Normalment, en estudis d'aerodinàmica de vehicles, es suposa que l'aire es troba en repòs. D'aquesta forma, si estudiem el problema des d'un sistema de referència mòbil amb el vehicle, la situació equival a analitzar el vehicle parat amb un flux d'aire que disposi d'una velocitat incident igual en mòdul però de sentit contrari a la velocitat del vehicle mesurada per un observador extern en un sistema de referència fix. Aquest és el procediment usual per a obtenir valors del coeficient d'arrossegament en vehicles (e.g., Flores, 2008). A més, aquest procediment és el que s'utilitza en l'estudi experimental d'aerodinàmiques de vehicles

mitjançant túnels de vent. Aquí, però, ens interessa observar quins són els efectes del vent sobre el vehicle i, per tant, l'aire no es pot trobar en repòs.

Des d'un sistema de referència mòbil amb el vehicle, la figura 10 mostra l'angle i velocitat total V_{TOTAL} del flux incident sobre el vehicle, que és la suma vectorial de la velocitat del vehicle V_{bus} (en sentit contrari a l'observat en un sistema de referència extern i fix) més la velocitat de l'aire V_w .

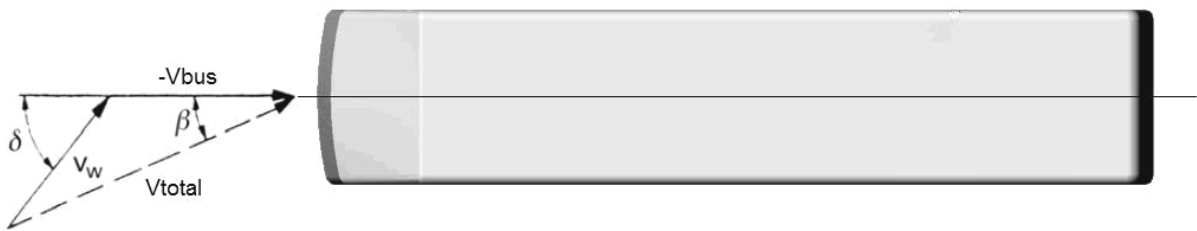


Figura. 10 Mòdul i direcció del flux d'aire vist des d'un sistema de referència mòbil amb el vehicle.

En el nostre treball hem estudiat cinc casos per a diferents valors de la velocitat del bus i de la velocitat de l'aire. Les característiques d'aquests casos s'indiquen a continuació. Per a cada cas, hem investigat els efectes de variar l'angle d'incidència de l'aire per a un observador en repòs δ entre 0° i 180° . Amb tot això, s'han pogut calcular les diferents velocitats totals del flux per a cada cas que, conjuntament amb els diferents valors de β també calculats, ens han permès calcular les coordenades dels diferents dominis computacionals (i.e., dimensions dels túnels de vent).

Tot seguit expliquem les característiques principals dels cinc casos que hem estudiat per realitzar la simulació numèrica. Els corresponents valors de β i de V_{TOTAL} es poden veure en l'annex E.

- **Cas 1:**

- Model utilitzat: Bus 1
- Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 180° en intervals de 30°
- Condició de contorn més significativa: terra del túnel parat
- $V_{BUS} = 28m/s$
- $V_{AIRE} = 20m/s$

- **Cas 2:**

- Model utilitzat: Bus 2
- Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 180° en intervals de 30°
- Condició de contorn més significativa: terra del túnel parat
- $V_{BUS} = 28m/s$
- $V_{AIRE} = 20m/s$

- **Cas 3:**

- Model utilitzat: Bus 1
- Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 180° en intervals de 30°
- Condició de contorn més significativa: terra del túnel en moviment
- $V_{BUS} = 28m/s$
- $V_{AIRE} = 20m/s$

- **Cas 4:**

- Model utilitzat: Bus 1
- Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 90° en intervals de 30°
- Condició de contorn més significativa: terra del túnel en moviment
- $V_{BUS} = 28m/s$
- $V_{AIRE} = 10m/s$

- **Cas 5:**
 - Model utilitzat: Bus 1
 - Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 90° en intervals de 30°
 - Condició de contorn més significativa: terra del túnel en moviment
 - $V_{BUS} = 22,22m/s$
 - $V_{AIRE} = 20m/s$

Cal destacar que, ens els casos 3, 4 i 5, el terra del túnel es mou amb una velocitat idèntica a la del bus però en sentit contrari. Aquest és un cas més realista per simular un vehicle en moviment. Tanmateix, els casos 1 i 2 són adients per reproduir les condicions que es donen en estudis experimentals en túnels de vent, ja que aquests, majoritàriament, disposen de terres sense moviment.

3.2.- Ràfegues de vent en els autobusos

El vent, a l'actuar sobre la secció lateral del vehicle, en modificarà les condicions normals d'estabilitat. En general, quan un vehicle s'està conduint a altes velocitats, el seu comportament transitori sota l'impacte d'una ràfega sobtada de vent esdevé un problema més important que la seva resposta a un flux d'aire constant i uniforme. D'aquí el nostre interès en estudiar l'efecte d'una ràfega de vent sobre el vehicle.

Quan un vehicle circula per una via en línia recta, sense que hi influeixi cap tipus d'acció exterior, la direcció de la velocitat forma un angle nul respecte la direcció del vehicle. Això no es satisfà necessàriament en el cas que sobre el vehicle, inicialment circulant en línia recta, hi actuï obliquament a la seva direcció de marxa una ràfega de vent. Així, la trajectòria del vehicle es pot desviar un determinat angle que serà funció de certes variables (que s'estudien a l'annex F) i que poden provocar una inestabilitat del vehicle que pot causar la bolcada, el desplaçament o el derrapatge del mateix.

D'acord amb Noguchi (1986), aquí estudiem l'efecte d'una ràfega de vent sobre l'estabilitat del vehicle a partir de simular les forces i moments associats a un vent constant que, sobtadament desapareix al cap d'un cert temps (0,5 segons; Naguchi, 1986). D'aquesta forma,

un esquema representatiu de les forces i moments aerodinàmics que ens apareixen en l'impacte lateral d'una ràfega de vent de durada 0,5 segons es mostra a la figura 11 (vist des d'un sistema de referència fix i amb vent incident perpendicularment a la direcció del vehicle).

La força representada a la figura 11 correspon a la força lateral sobre el vehicle (cal observar l'orientació dels eixos coordinats a la part superior de la figura 11). Aquesta força és la que ens produeix un desplaçament lateral del bus. També ens apareixen dos moments que són especialment importants: el moment que ens pot produir la bolcada del bus (moment de bolcada) i el moment que ens pot produir que el bus derrapi (moment de guinyada).

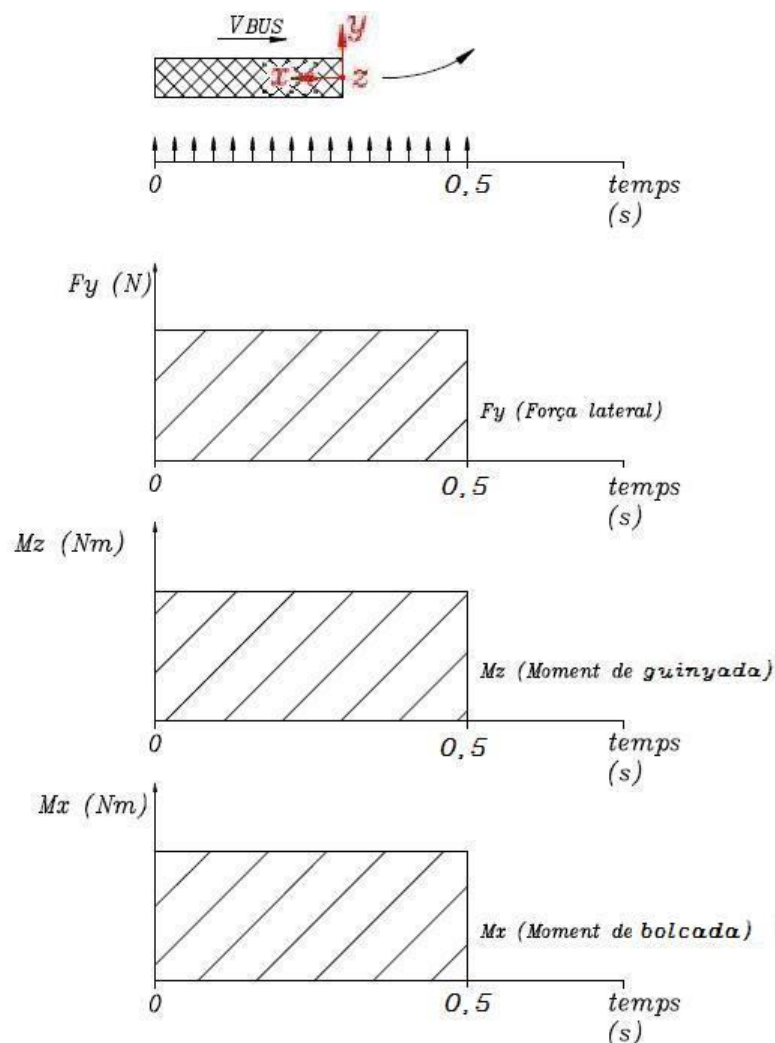


Figura. 11 Concepte de forces aerodinàmiques per l'acció lateral d'un flux d'aire uniforme d'incidència perpendicular a la direcció inicial del vehicle durant un interval de 0,5 s (Noguchi, 1986).

3.3.- Generació del mallat

Tal i com s'ha comentat en el capítol 2, el primer pas abans de realitzar qualsevol simulació numèrica és construir una malla adequada. Aquest és un procés molt important i que s'ha de fer de la forma més acurada possible perquè si no és així, els resultats obtinguts a partir de la simulació numèrica poden ser imprecisos. Els passos que hem seguit per mallar les diferents carrosseries són molt semblants als realitzats pel cos d'Ahmed explicats al capítol 2 del present projecte. Tot i això, l'anàlisi de l'efecte de l'aire sobre els autocars presenta alguna particularitat que destacarem a continuació.

Tal i com veurem més endavant, les dues carrosseries tenen les mateixes característiques de malla. Per a cada carrosseria, el canvi més significatiu és el del domini computacional per als diferents angles d'incidència β de la velocitat total.

➤ Característiques geomètriques externes

A la figura 12 observem les proporcions del domini computacional (túnel virtual) que estan definides en funció de la longitud L i de l'amplada C de l'autobús. La longitud de l'autobús té un valor de 12,2 metres, una alçada de 3,4 metres i una amplada de 2,55 metres. Hem de dir que l'origen de coordenades (0,0,0) està situat al centre de la part frontal inferior del vehicle.

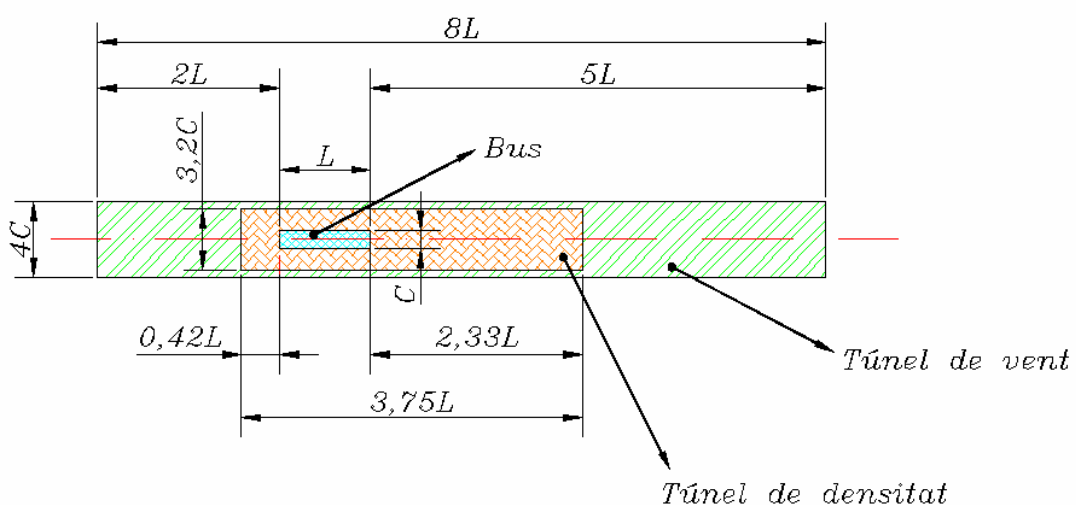


Figura. 12 Proporcions en planta del domini computacional per els diferents models d'autobús.

L'altura del túnel de vent és de 12m i la del túnel de densitat de 7m. La longitud del bus és L i la seva amplada C . Les dimensions del domini computacional mostrades anteriorment s'han extret d'estudis característics sobre el cos d'Ahmed (Pujol et al., 2007).

Si observem la figura 13 veurem la ubicació de cada punt dins el domini computacional.

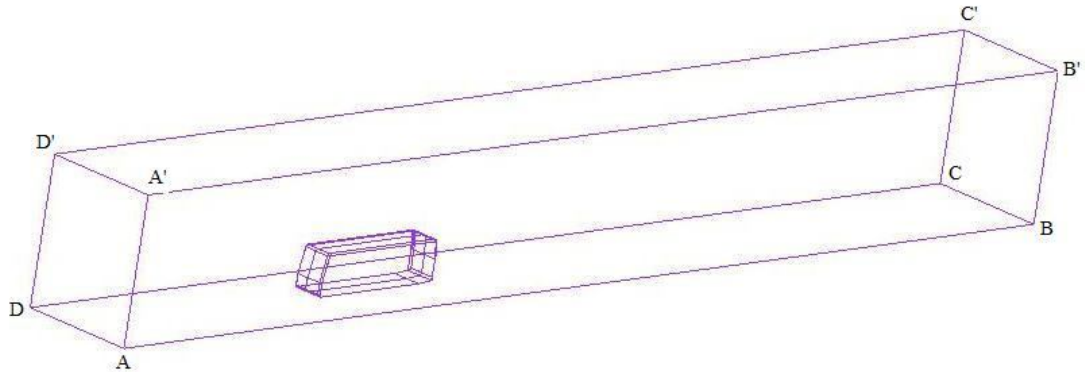


Figura. 13 Ubicació dels punts que defineixen el domini computacional (túnel de vent).

- **Coordenades del domini computacional:**

Els paràmetres i els càlculs per determinar les coordenades dels diferents dominis computacionals queden reflectits i explicats en l'annex E.

- Cas 1: veure taules 16.A i 16.B

Hem de dir que les coordenades pels casos 2 i 3 seran les mateixes que pel Cas 1.

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-24,00	-5,00	0,00	-24,00	-5,00	12,00	-24,00	5,00	0,00	-24,00	5,00	12,00
30°	-21,76	-16,42	0,00	-21,76	-16,42	12,00	-26,09	3,22	0,00	-26,09	3,22	12,00
60°	-15,19	-25,59	0,00	-15,19	-25,59	12,00	-27,21	0,80	0,00	-27,21	0,80	12,00
90°	-6,35	-30,96	0,00	-6,35	-30,96	12,00	-27,29	-1,64	0,00	-27,29	-1,64	12,00
120°	1,34	-32,58	0,00	1,34	-32,58	12,00	-26,74	-3,41	0,00	-26,74	-3,41	12,00
150°	0,61	-32,53	0,00	0,61	-32,53	12,00	-26,81	-3,25	0,00	-26,81	-3,25	12,00
180°	-24,00	-5,00	0,00	-24,00	-5,00	12,00	-24,00	5,00	0,00	-24,00	5,00	12,00

Taula. 16.A. Coordenades del domini computacional pels casos 1, 2 i 3 (unitats en metres)

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	72,00	-5,00	0,00	72,00	-5,00	12,00	72,00	5,00	0,00	72,00	5,00	12,00
30°	74,00	4,71	0,00	74,00	4,71	12,00	69,66	24,34	0,00	69,66	24,34	12,00
60°	71,85	14,07	0,00	71,85	14,07	12,00	59,82	40,47	0,00	59,82	40,47	12,00
90°	66,68	21,20	0,00	66,68	21,20	12,00	45,73	50,53	0,00	45,73	50,53	12,00
120°	61,17	25,00	0,00	61,17	25,00	12,00	33,10	54,17	0,00	33,10	54,17	12,00
150°	61,73	24,72	0,00	61,73	24,72	12,00	34,32	53,99	0,00	34,32	53,99	12,00
180°	72,00	-5,00	0,00	72,00	-5,00	12,00	72,00	5,00	0,00	72,00	5,00	12,00

Taula 16.B. Coordenades del domini computacional pels casos 1,2 i 3 (unitats en metres)

- Cas 4: veure taules 17.A i 17.B

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-24,00	-5,00	0,00	-24,00	-5,00	12,00	-24,00	5,00	0,00	-24,00	5,00	12,00
30°	-23,18	-12,26	0,00	-23,18	-12,26	12,00	-25,40	3,99	0,00	-25,40	3,99	12,00
60°	-20,83	-18,33	0,00	-20,83	-18,33	12,00	-26,37	2,80	0,00	-26,37	2,80	12,00
90°	-18,29	-22,24	0,00	-18,29	-22,24	12,00	-26,88	1,83	0,00	-26,88	1,83	12,00

Taula. 17.A. Coordenades del domini computacional pel cas 4 (unitats en metres)

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	72,00	-5,00	0,00	72,00	-5,00	12,00	72,00	5,00	0,00	72,00	5,00	12,00
30°	73,74	0,97	0,00	73,74	0,97	12,00	71,53	17,22	0,00	71,53	17,22	12,00
60°	73,90	6,52	0,00	73,90	6,52	12,00	68,35	27,65	0,00	68,35	27,65	12,00
90°	73,19	10,42	0,00	73,19	10,42	12,00	64,59	34,49	0,00	64,59	34,49	12,00

Taula 17.B. Coordenades del domini computacional pel cas 4 (unitats en metres)

- Cas 5: veure taules 18.A i 18.B

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-24,00	-5,00	0,00	-24,00	-5,00	12,00	-24,00	5,00	0,00	-24,00	5,00	12,00
30°	-21,26	-17,50	0,00	-21,26	-17,50	12,00	-26,25	2,99	0,00	-26,25	2,99	12,00
60°	-12,42	-27,80	0,00	-12,42	-27,80	12,00	-27,35	-0,02	0,00	-27,35	-0,02	12,00
90°	-0,46	-32,41	0,00	-0,46	-32,41	12,00	-26,91	-3,02	0,00	-26,91	-3,02	12,00

Taula. 18.A. Coordenades del domini computacional pel cas 5 (unitats en metres)

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	72,00	-5,00	0,00	72,00	-5,00	12,00	72,00	5,00	0,00	72,00	5,00	12,00
30°	73,96	5,72	0,00	73,96	5,72	12,00	68,97	26,20	0,00	68,97	26,20	12,00
60°	70,40	16,72	0,00	70,40	16,72	12,00	55,47	44,50	0,00	55,47	44,50	12,00
90°	62,53	24,27	0,00	62,53	24,27	12,00	36,09	53,66	0,00	36,09	53,66	12,00

Taula 18.B. Coordenades del domini computacional pel cas 5 (unitats en metres)

- **Noms de les superfícies:**

- Domini computacional:

Punts (A,A',D',D) → Túnel/Frontal

Punts (B,B',C',C) → Túnel/Posterior

Punts (C',D',D,C) → Túnel/ Lateral Esquerra

Punts (A',B',B,A) → Túnel/Lateral Dret

Punts (A',B',C',D') → Túnel/Tapa

Punts (A,B,C,D) → Túnel/Base

Hem de dir que per cada cas hem anomenat d'igual manera les diferents superfícies i que hem considerat l'autobús com un sol bloc, és a dir, sense separar les superfícies que el conformen.

- **Paràmetres de densitat:**

A la figura 14 podem observar la ubicació dels punts del túnel de densitat.

- Mida màxima dels elements dins el túnel de densitat = 0,4m

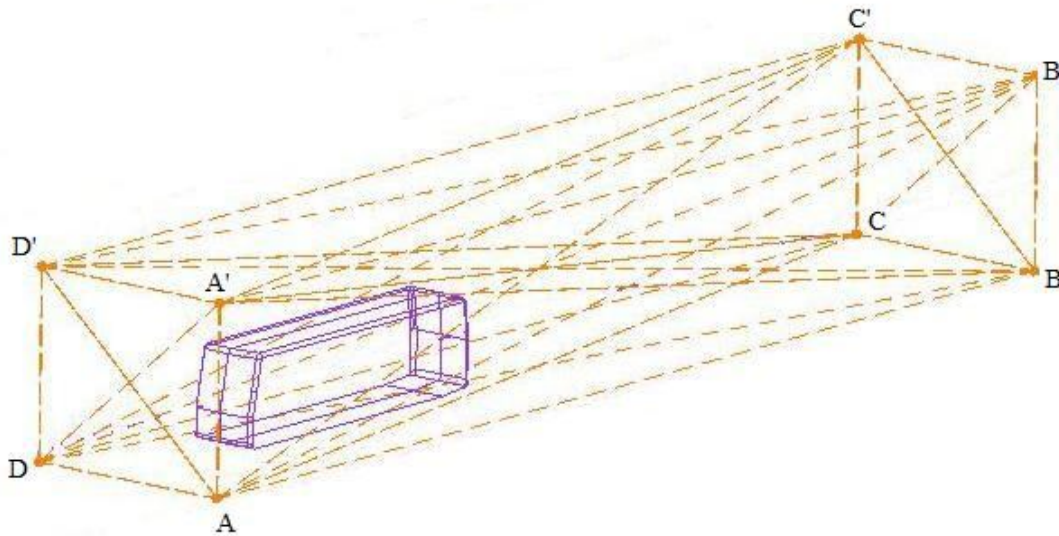


Figura. 14 Ubicació dels punts del túnel de densitat.

Els paràmetres i els càlculs per determinar les coordenades dels diferents túnels de densitat queden reflectits i explicats en l'annex E.

- Cas 1: veure taules 19.A i 19.B

Hem de dir que les coordenades pels casos 2 i 3 seran les mateixes que pel cas 1.

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-5,04	-4,00	0,00	-5,04	-4,00	7,00	-5,04	4,00	0,00	-5,04	4,00	7,00
30°	-3,28	-10,28	0,00	-3,28	-10,28	7,00	-6,74	5,42	0,00	-6,74	5,42	7,00
60°	0,80	-15,12	0,00	0,80	-15,12	7,00	-8,82	6,00	0,00	-8,82	6,00	7,00
90°	5,98	-17,73	0,00	5,98	-17,73	7,00	-10,78	5,73	0,00	-10,78	5,73	7,00
120°	10,35	-18,29	0,00	10,35	-18,29	7,00	-12,11	5,05	0,00	-12,11	5,05	7,00
150°	9,94	-18,29	0,00	9,94	-18,29	7,00	-12,00	5,13	0,00	-12,00	5,13	7,00
180°	-5,04	-4,00	0,00	-5,04	-4,00	7,00	-5,04	4,00	0,00	-5,04	4,00	7,00

Taula. 19.A. Coordenades de la densitat pels casos 1, 2 i 3 (unitats en metres).

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	39,96	-4,00	0,00	39,96	-4,00	7,00	39,96	4,00	0,00	39,96	4,00	7,00
30°	41,60	-0,38	0,00	41,60	-0,38	7,00	38,14	15,33	0,00	38,14	15,33	7,00
60°	41,60	3,47	0,00	41,60	3,47	7,00	31,98	24,59	0,00	31,98	24,59	7,00
90°	40,21	6,72	0,00	40,21	6,72	7,00	23,45	30,18	0,00	23,45	30,18	7,00
120°	38,40	8,70	0,00	38,40	8,70	7,00	15,94	32,04	0,00	15,94	32,04	7,00
150°	38,59	8,54	0,00	38,59	8,54	7,00	16,66	31,96	0,00	16,66	31,96	7,00
180°	39,96	-4,00	0,00	39,96	-4,00	7,00	39,96	4,00	0,00	39,96	4,00	7,00

Taula 19.B. Coordenades de la densitat pels casos 1, 2 i 3 (unitats en metres).

- Cas 4: veure taules 20.A i 20.B

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-5,04	-4,00	0,00	-5,04	-4,00	7,00	-5,04	4,00	0,00	-5,04	4,00	7,00
30°	-4,26	-8,02	0,00	-4,26	-8,02	7,00	-6,03	4,98	0,00	-6,03	4,98	7,00
60°	-2,68	-11,31	0,00	-2,68	-11,31	7,00	-7,11	5,60	0,00	-7,11	5,60	7,00
90°	-1,08	-13,38	0,00	-1,08	-13,38	7,00	-7,96	5,87	0,00	-7,96	5,87	7,00

Taula. 20.A. Coordenades de la densitat pel cas 4.

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	39,96	-4,00	0,00	39,96	-4,00	7,00	39,96	4,00	0,00	39,96	4,00	7,00
30°	41,17	-1,82	0,00	41,17	-1,82	7,00	39,40	11,18	0,00	39,40	11,18	7,00
60°	41,73	0,34	0,00	41,73	0,34	7,00	37,29	17,25	0,00	37,29	17,25	7,00
90°	41,80	1,93	0,00	41,80	1,93	7,00	34,92	21,18	0,00	34,92	21,18	7,00

Taula 20.B. Coordenades de la densitat pel cas 4.

- Cas 5: veure taules 21.A i 21.B

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-5,04	-4,00	0,00	-5,04	-4,00	7,00	-5,04	4,00	0,00	-5,04	4,00	7,00
30°	-2,95	-10,86	0,00	-2,95	-10,86	7,00	-6,95	5,52	0,00	-6,95	5,52	7,00
60°	2,45	-16,23	0,00	2,45	-16,23	7,00	-9,50	5,99	0,00	-9,50	5,99	7,00
90°	9,33	-18,28	0,00	9,33	-18,28	7,00	-11,82	5,24	0,00	-11,82	5,24	7,00

Taula. 21.A. Coordenades de la densitat pel cas 5.

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	39,96	-4,00	0,00	39,96	-4,00	7,00	39,96	4,00	0,00	39,96	4,00	7,00
30°	41,68	0,02	0,00	41,68	0,02	7,00	37,69	16,40	0,00	37,69	16,40	7,00
60°	41,27	4,64	0,00	41,27	4,64	7,00	29,33	26,86	0,00	29,33	26,86	7,00
90°	38,86	8,29	0,00	38,86	8,29	7,00	17,71	31,81	0,00	17,71	31,81	7,00

Taula 21.B. Coordenades de la densitat pel cas 5.

➤ Paràmetres del mallat

En aquest apartat detallem els paràmetres utilitzats per la creació dels elements del mallat. La definició dels paràmetres ja s'ha dut a terme en el capítol 2 d'estudi del cos d'Ahmed.

- Mides globals de la malla: (veure taula 22).

Paràmetre	Malla
Factor d'escala	1
Element màxim	1
Creixement prismes	exponencial
Altura inicial	0,15
Altura total	0,15

Taula. 22 Mides globals de la malla

- Mides per parts dels elements de la malla: (veure taula 23).

Part	Mida màxima (m)	Altura (m)	Proporció d'alçada	Nº de capes
Fluid	0,1	-	-	-
Bus	1	0	0	1
Túnel/Base	1	0	0	0
Túnel/Frontal	1	0	0	0
Túnel/Lateral Dret	1	0	0	0
Túnel/Lateral Esquerra	1	0	0	0
Túnel/Posterior	1	0	0	0
Túnel/Tapa	1	0	0	0

Taula. 23 Mides de cada part del mallat.

➤ **Volum de malla**

Per crear el mallat de la superfície i el del volum hem utilitzat els següents paràmetres:

- Mallat de la superfície: (veure taula 24).

Paràmetre	Malla
Nº. Iteracions	5
Qualitat	0,4

Taula. 24 Paràmetres del mallat de la superfície

- Mallat del volum: (veure taula 25).

Paràmetre	Malla
Factor d'escala	1
Factor d'expansió	1,2

Taula. 25 Paràmetres del mallat del volum

➤ **Capa límit**

Ja que en la capa límit és on hi tenim importants variacions de velocitat de l'aire, requereix una precisió més acurada. Tal i com s'ha comentant en l'estudi del cos d'Ahmed del capítol 2, necessitem disposar d'una capa prismàtica prop de la superfície del bus per capturar correctament els efectes de la capa límit. Per a aquesta regió de prismes s'han escollit els següents paràmetres (explicats en el capítol 2):

- Proporció de creixement de la capa de prismes = 1,3
- Nombre de nivells de prismes = 6

➤ **Planxat dels elements**

Els paràmetres utilitzats en aquest procés són els següents:

- Qualitat del planxat = 0,2
- Nombre d'iteracions = 5

A continuació mostrem les diferents informacions del mallat (per a la definició dels paràmetres, consultar el capítol 2 d'estudi del cos d'Ahmed).

- Cas 1: veure taula 26.

Hem de dir que la informació del mallat del cas 1 és la mateixa que pel cas 3.

Angle d'incidència de l'aire (δ)	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
Tipus d'elements							
NODE	12	12	12	12	12	12	12
LINE_2	8.117	3.583	3.700	3.702	3.752	3.889	8.117
TETRA_4	899.914	1.120.384	1.440.000	1.631.464	1.662.292	1.672.502	899.914
TRI_3	173.550	106.186	112.342	115.770	121.720	119.496	173.550
PENTA_6	333.978	340.824	321.600	298.704	326.034	336.348	333.978
PYRA_5	198	-	156	-	66	168	198
Nº de parts dels elements							
AIRE	1.234.090	1.461.208	1.761.756	1.930.168	1.988.392	2.009.018	1.234.090
CURVES	-	719	823	887	883	873	-
BUS	63.837	59.668	56.517	52.609	57.225	59.116	63.837
TUNEL/BASE	39.912	30.811	32.265	35.040	41.575	37.752	39.912
TUNEL/FRONTAL	4.286	1.012	1.442	2.070	2.387	2.342	4.286
TUNEL/LATERAL_DRET	24.073	4.995	4.898	5.154	4.908	4.853	24.073
TUNEL/LATERAL_ESQ	24.098	5.023	4.909	5.158	4.904	4.877	24.098
TUNEL/POSTERIOR	4.236	1.019	1.426	2.065	2.384	2.331	4.236
TUNEL/TAPA	21.225	6.522	13.762	16.499	11.206	11.241	21.225
Total elements del cos	63.837	59.668	56.517	52.609	57.225	59.116	63.837
Total elements del túnel	117.830	50.101	59.525	66.873	68.247	64.269	117.830
Total elements	1.415.769	1.570.989	1.877.810	2.049.652	2.113.876	2.132.415	1.415.769
Total nodes	361.896	382.590	427.367	448.110	468.334	474.573	361.896
Volum túnel (m^3)	11.520	23.666	33.284	38.802	40.345	40.313	11.520

Taula. 26 Informació dels elements del mallat pels casos 1 i 3.

- Cas 2: veure taula 27.

Angle incidència aire (δ)	0°	30°	60°	90°	120°	150°	180°
Tipus d'elements							
NODE	12	12	12	12	12	12	12
LINE_2	4.074	3.988	4.147	4.086	4.173	4.299	4.074
TETRA_4	715.953	1.136.580	1.459.216	1.647.056	1.677.927	1.686.290	715.953
TRI_3	88.102	106.260	112.428	116.002	121.664	119.110	88.102
PENTA_6	333.774	340.080	321.324	298.524	325.320	333.564	333.774
PYRA_5	114	-	60	-	48	204	114
Nº de parts dels elements							
AIRE	1.049.841	1.476.660	1.780.600	1.945.580	2.003.295	2.020.058	1.049.841
CURVES	666	722	823	884	885	873	666
BUS	59.064	59.946	56.894	52.956	57.522	59.080	59.064
TUNEL/BASE	20.095	30.994	32.413	35.261	41.630	37.804	20.095
TUNEL/FRONTAL	464	1.016	1.444	2.066	2.393	2.342	464
TUNEL/LATERAL_DRET	3.953	5.001	4.898	5.168	4.910	4.857	3.953
TUNEL/LATERAL_ESQ	3.939	5.026	4.909	5.161	4.905	4.879	3.939
TUNEL/POSTERIOR	450	1.019	1.426	2.075	2.385	2.331	450
TUNEL/TAPA	3.545	6.524	13.768	16.517	11.207	11.243	3.545
Total elements del cos	59.064	59.946	56.894	52.956	57.522	59.080	59.064
Total elements del túnel	33.112	50.302	59.681	67.132	68.315	64.329	33.112
Total elements	1.415.769	1.586.920	1.897.187	2.065.680	2.129.144	2.143.479	1.415.769
Total nodes	361.896	383.584	429.063	449.412	469.203	474.006	361.896
Volum túnel (m^3)	11.520	23.666	33.284	38.802	40.345	40.313	11.520

Taula. 27 Informació dels elements del mallat del cas 2.

- Cas 4: veure taula 28.

Angle d'incidència de l'aire (δ)	0°	30°	60°	90°
Tipus d'elements				
NODE	12	12	12	11
LINE_2	8.117	3.655	3.661	3.636
TETRA_4	899.914	1.152.786	1.198.386	1.438.382
TRI_3	173.550	104.842	103.934	106.106
PENTA_6	333.978	328.344	299.712	319.428
PYRA_5	198			
Nº de parts dels elements				
AIRE	1.234.090	1.481.130	1.498.098	1.757.810
CURVES		703	749	759
BUS	63.837	57.676	52.864	56.115
TUNEL/BASE	39.912	30.716	30.772	28.012
TUNEL/FRONTAL	4.286	818	1.116	1.345
TUNEL/LATERAL_DRET	24.073	4.930	4.957	4.948
TUNEL/LATERAL_ESQ	24.098	4.769	5.047	4.921
TUNEL/POSTERIOR	4.236	839	1.141	1.307
TUNEL/TAPA	21.225	8.046	10.949	12.335
Total elements del cos	63.837	57.676	52.864	56.115
Total elements del túnel	117.830	50.821	54.731	53.627
Total elements	1.415.769	1.589.639	1.605.705	1.867.563
Total nodes	361.896	381.206	373.087	424.168
Volum túnel (m^3)	11.520	19.252	25.696	29.562

Taula. 28 Informació dels elements del mallat del cas 4.

- Cas 5: veure taula 29.

Angle d'incidència de l'aire (δ)	0°	30°	60°	90°
Tipus d'elements				
NODE	12	12	12	12
LINE_2	8.117	3.391	3.574	3.789
TETRA_4	899.914	1.117.994	1.600.601	3.937.720
TRI_3	173.550	95.598	110.800	118.046
PENTA_6	333.978	313.536	291.840	298.662
PYRA_5	198			54
Nº de parts dels elements				
AIRE	1.234.090	1.431.530	1.892.441	4.236.436
CURVES		718	756	911
BUS	63.837	54.929	51.458	52.668
TUNEL/BASE	39.912	24.375	38.167	36.549
TUNEL/FRONTAL	4.286	1.089	1.782	2.334
TUNEL/LATERAL_DRET	24.073	5.020	5.304	5.001
TUNEL/LATERAL_ESQ	24.098	4.969	5.289	5.022
TUNEL/POSTERIOR	4.236	1.100	1.787	2.322
TUNEL/TAPA	21.225	6.789	9.831	17.028
Total elements del cos	63.837	54.929	51.458	52.668
Total elements del túnel	117.830	44.060	62.916	69.167
Total elements	1.415.769	1.530.531	2.006.827	4.358.283
Total nodes	361.896	364.654	438.054	839.142
Volum túnel (m^3)	11.520	24.803	35.585	40.206

Taula. 29 Informació dels elements del mallat del cas 5

A partir de la informació anterior podem observar com el nombre d'elements utilitzats per discretitzar els diferents casos va augmentant considerablement de valor a mesura que l'angle d'incidència del vent també augmenta, això és degut a que a mesura que l'angle d'incidència del vent augmenta el volum del domini computacional també ho fa, per tant, cada vegada necessitem més elements per mallar el domini computacional.

3.4.- Simulació numèrica

➤ Metodologia

- *Models utilitzats*

- Fluid del volum → Gas
- Flux → Segregate Flow (flux segregat)
- Moviment → Motion stationary (Moviment del conjunt sense acceleració)
- Equació per resoldre el sistema → Ideal gas (gas ideal)
- Temps → Implicity Unsteady (flux estacionari)
- Règim → Turbulent (règim del fluid a la capa límit)
- Model de turbulència → K-Epsilon turbulent
- Intensitat de turbulència:
 - Cas 1 → $I = 0,01$
 - Cas 2 → $I = 0,01$
 - Cas 3 → $I = 0,05$
 - Cas 4 → $I = 0,05$
 - Cas 5 → $I = 0,05$

Hem triat el model de turbulència K-Epsilon turbulent per les mateixes raons que el cas del cos d'Ahmed estudiat en el capítol 2.

➤ Condicions de contorn

En aquest apartat explicarem les condicions de contorn per cada cas. Cal tenir present que les tipologies de les condicions de contorn ja s'han comentat en el capítol 2 (estudi del cos d'Ahmed). Per això, aquí no es tornen a detallar. Sí, però, que s'indica quina condició de contorn s'ha utilitzat per a cadascuna de les superfícies de què disposem.

- **Cas 1 i Cas 2:** Les condicions de contorn pels casos 1 i 2 són les mateixes.

- Cos $\rightarrow$ Wall/ No-slip
- Túnel/Base $\rightarrow$ Wall/ No-slip (terra parat)
- Túnel/Tapa $\rightarrow$ Wall/ Slip
- Túnel/Frontal $\rightarrow$ Velocity-inlet

$$\delta = 0^\circ \rightarrow v = [48, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 30^\circ \rightarrow v = [46.41, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 60^\circ \rightarrow v = [41.76, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 90^\circ \rightarrow v = [34.41, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 120^\circ \rightarrow v = [24.98, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 150^\circ \rightarrow v = [14.63, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 180^\circ \rightarrow v = [8, 0, 0] \text{ m/s}$$

- Túnel/Lateral Dret $\rightarrow$ Wall/Slip
- Túnel Lateral Esquerre $\rightarrow$ Wall/Slip
- Túnel/Posterior $\rightarrow$ Pressure Outlet [0,0 Pa]

- **Cas 3:**

- Cos $\rightarrow$ Wall/ No-slip
- Túnel/Base $\rightarrow$ Wall/ No-slip (terra mòbil) velocitat $\rightarrow v = [28, 0, 0] \text{ m/s}$
- Túnel/Tapa $\rightarrow$ Wall/ Slip
- Túnel/Frontal $\rightarrow$ Velocity-inlet / Intensitat de turbulència $\rightarrow I = 0,05$

$$\delta = 0^\circ \rightarrow v = [48, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 30^\circ \rightarrow v = [46.41, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 60^\circ \rightarrow v = [41.76, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 90^\circ \rightarrow v = [34.41, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 120^\circ \rightarrow v = [24.98, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 150^\circ \rightarrow v = [14.63, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 180^\circ \rightarrow v = [8, 0, 0] \text{ m/s}$$

- Túnel/Lateral Dret $\rightarrow$ Wall/Slip

- Túnel Lateral Esquerre → Wall/Slip
- Túnel/Posterior → Pressure Outlet [0,0 Pa] / Intensitat de turbulència → $I = 0,05$

- **Cas 4:**

- Cos → Wall/ No-slip
- Túnel/Base → Wall/ No-slip, (terra mòbil) velocitat → $v = [28, 0, 0]$ m/s
- Túnel/Tapa → Wall/ Slip
- Túnel/Frontal → Velocity-inlet / Intensitat de turbulència → $I = 0,05$

$$\delta = 0^\circ \rightarrow v = [38, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 30^\circ \rightarrow v = [37, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 60^\circ \rightarrow v = [34.12, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 90^\circ \rightarrow v = [29.73, 0, 0] \text{ m/s}$$

- Túnel/Lateral Dret → Wall/Slip
- Túnel Lateral Esquerre → Wall/Slip
- Túnel/Posterior → Pressure Outlet [0,0 Pa] / Intensitat de turbulència → $I = 0,05$

- **Cas 5:**

- Cos → Wall/ No-slip
- Túnel/Base → Wall/ No-slip (terra mòbil) velocitat → $v = [22.22, 0, 0]$ m/s
- Túnel/Tapa → Wall/ Slip
- Túnel/Frontal → Velocity-inlet / Intensitat de turbulència → $I = 0,05$

$$\delta = 0^\circ \rightarrow v = [42.22, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 30^\circ \rightarrow v = [40.79, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 60^\circ \rightarrow v = [36.58, 0, 0] \text{ m/s}$$

$$\delta = 90^\circ \rightarrow v = [29.90, 0, 0] \text{ m/s}$$

- Túnel/Lateral Dret → Wall/Slip
- Túnel Lateral Esquerre → Wall/Slip
- Túnel/Posterior → Pressure Outlet [0,0 Pa] / Intensitat de turbulència → $I = 0,05$

➤ **Propietats per determinar les forces**

Aquí és on definim les variables per calcular les forces del cos. El cos que nosaltres tenim immers sota un corrent de fluid està sotmès a una empenta lateral que ens provocarà uns moments. En el nostre cas estudiarem l'empenta lateral aerodinàmica (F_Y), el moment aerodinàmic de bolcada (M_x), i el moment aerodinàmic de guinyada (M_z).

Per poder 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 de moment aplicades sobre el centre de gravetat del vehicle. Aquestes es poden descompondre en la direcció de cadascun dels eixos del vehicle.

Cada una d'aquests forces depèn, entre d'altres factors, de la geometria del vehicle i 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 associats que són adimensionals, i en l'àrea característica del vehicle. En el cas dels moments les expressions utilitzen la mateixa característica, és a dir, l'àrea frontal del vehicle, però a més utilitzen una dimensió característica L , que es pren com a la longitud més gran.

- **Empenta lateral aerodinàmica (F_Y):**

$$\boxed{F_Y = A_f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \cdot C_L} \quad (\text{Eq.3})$$

On:

$F_Y \rightarrow$ Força d'empenta lateral aerodinàmica (N)

$C_L \rightarrow$ Coeficient d'arrossegament lateral aerodinàmic

$A_f \rightarrow$ Àrea característica del vehicle (normalment la secció transversal) (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

- **Moment aerodinàmic de bolcada (M_x):**

$$M_x = A_f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \cdot C_{mx} \cdot L \quad (\text{Eq.4})$$

On:

$M_x \rightarrow$ Moment aerodinàmic de bolcada ($N \cdot m$)

$C_{mx} \rightarrow$ Coeficient de resistència al balanceig

$A_f \rightarrow$ Area característica del vehicle (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

$L \rightarrow$ Longitud característica (m)

- **Moment aerodinàmic de guinyada (M_z):**

$$M_z = A_f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \cdot C_{mz} \cdot L \quad (\text{Eq.5})$$

On:

$M_z \rightarrow$ Moment aerodinàmic de guinyada ($N \cdot m$)

$C_{mz} \rightarrow$ Coeficient de resistència de guinyada

$A_f \rightarrow$ Area característica del vehicle (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

$L \rightarrow$ Longitud característica (m)

En el nostre cas, però, la simulació en CFD dona directament els valors de les forces i moments sobre el vehicle sense necessitat d'aplicar les equacions (3)-(5). En efecte, a partir dels valors de pressió i cisallament de velocitat en els elements en què s'ha discretitzat el vehicle, el programari determina la força i el moment totals sobre el vehicle. A partir d'aquí es podrien calcular els coeficients de resistència que apareixen a les equacions (3)-(5) però és del tot innecessari. Això sí, per determinar quina component de la força i dels moments ens

interessen, hem d'establir el centre de gravetat del vehicle. A partir d'estudiar la distribució de pesos d'un vehicle real, s'arriben als valors que es descriuen a continuació (veure l'Annex F per a més detalls).

- ***Paràmetres per definir el càlcul de forces i moments sobre els vehicles:***

- Empenta lateral aerodinàmica (F_L):
 - Direcció $\rightarrow [0,1,0]$
- Moment aerodinàmic de bolcada (M_x):
 - Eix de simetria $\rightarrow [1, 0, 0]$
 - Centre de gravetat $\rightarrow [6.38 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1.67 \text{ m}]$
- Moment aerodinàmic de guinyada (M_z):
 - Eix de simetria $\rightarrow [0, 0, 1]$
 - Centre de gravetat $\rightarrow [6.38 \text{ m}, 0 \text{ m}, 1.67 \text{ m}]$

3.5.-Resultats

En aquest apartat mostrem els resultats de les simulacions per a tots els 5 casos analitzats. Per bé que només ens interessen els valors de la força lateral i del moment aerodinàmic de bolcada i de guinyada, aquí mostrem alguns resultats relatius a la pressió i al camp de velocitats. En les simulacions, els residuals assoleixen valors de l'ordre de 10^{-3} o inferiors (veure figura 15) amb un nombre d'iteracions aproximadament igual a 5.000 per a cada cas, llevat del cas 5 amb l'angle d'incidència $\delta = 90^\circ$ que degut al seu extens domini computacional hem hagut de realitzar aproximadament 40.000 iteracions .

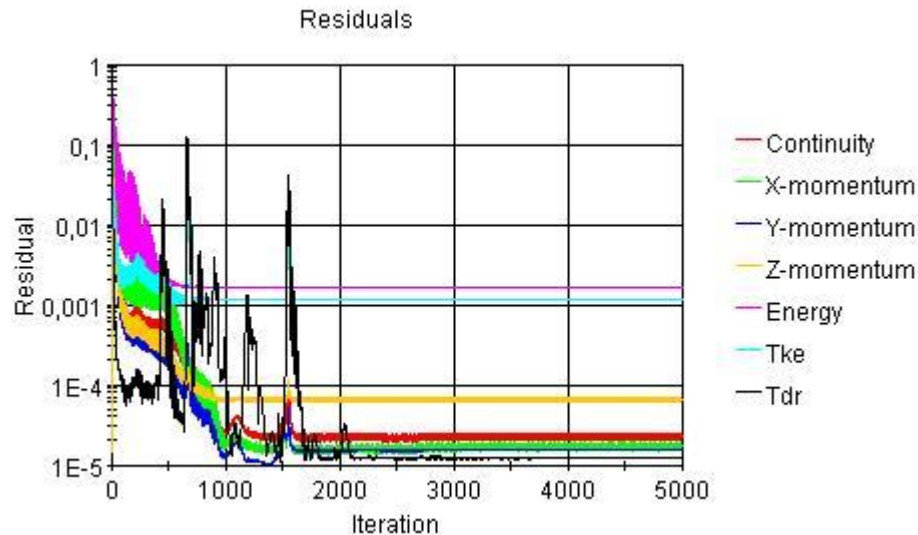


Figura. 15 Gràfica dels residuals.

Els residuals no són res més que la suma de la diferència ponderada dels valors de les variables entre iteració i iteració. Com més alt és el valor del residual, més fluctuació per a la variable entre iteració i iteració. Així, pitjor és la simulació. Els residuals, d'aquesta forma, també ens serveixen per visualitzar si la simulació és estable. En la situació estacionària final, esperem uns valors dels residuals el més petits possibles i de valor constant, on la única diferència per al valor de la variable entre una iteració i la següent correspongui a problemes intrínsecs del tractament numèric com l'arrodoniment o el truncament dels valors.

A continuació mostrem els resultats una vegada els valors dels residuals són estables i petits (de l'ordre de 10^{-3} o inferiors). Per a cada cas simulat mostrem l'estat de pressions i els vectors de velocitats en diferents plans de tall. Aquests plans de visualització es poden veure a la figura 16.

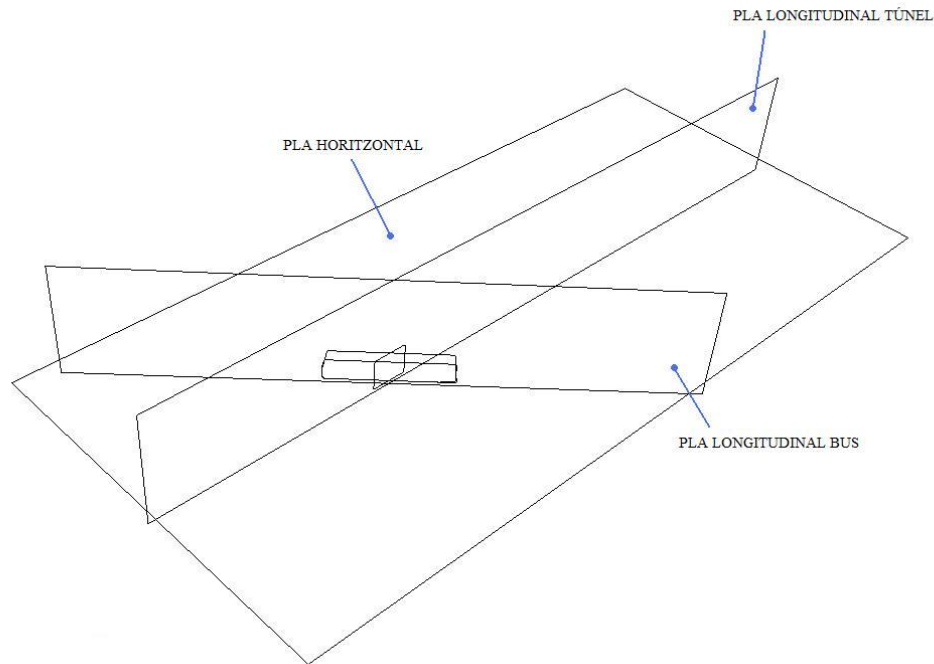


Figura. 16 Plans de tall per a la visualització de resultats.

Abans de mostrar els resultats obtinguts de la simulació numèrica per cada cas, però, hem d'explicar que quan un vehicle circula per una via en línia recta, i en ell hi impacta un ràfega de vent en la mateixa direcció del moviment, el valor de l'empenta lateral i dels moments associats haurien de ser nuls. Si ens fixem en els casos estudiats això no és compleix, encara que els valors obtinguts són propers a zero. Per tant, hem considerat associar el % d'error de les nostres simulacions amb els resultats que s'obtenen per $\delta = 0^\circ$ i $\delta = 180^\circ$. Tot seguit expliquem com hem calculat aquest % d'error:

Primer de tot, acceptem que l'error varia linealment en funció de l'angle δ . Per a $\delta = 0^\circ$, l'error el considerem igual al valor simulat i, idènticament per a $\delta = 180^\circ$. D'aquesta forma, amb els valors simulats a $\delta = 0^\circ$ i $\delta = 180^\circ$, obtenim el valor del pendent b i del terme independent a de la relació lineal: $\text{error} = a + b \delta$. Una vegada determinats els valors d' a i de b , calculem els errors per als altres angles δ . El procés és el mateix per trobar el % d'error dels moments. Com s'observa, els errors així calculats per a angles d'incidència del vent diferents de $\delta = 0^\circ$ i $\delta = 180^\circ$ són poc importants i no afectaran sensiblement a les conclusions que obtinguem de l'estudi.

- Cas 1: veure taula 30.

δ	F_L (N)	Error % F_L	M_x (N.m)	Error % M_x	M_z (N.m)	Error % M_z
0°	-404		112		-1.494	
30°	14.220	2,7	-955	11,3	-43.121	3,3
60°	25.497	1,3	-4.821	2,0	-48.751	2,6
90°	23.232	1,2	-3.860	1,9	-45.174	2,2
120°	13.570	1,3	-1.474	3,4	-30.604	2,1
150°	4.566	1,6	-468	4,6	-10.947	2,5
180°	-9		3		-32	

Taula. 30 Valors numèrics del cas 1 amb el % d'error.

En les següents figures mostrem els resultats obtinguts per a cada angle d'incidència (δ). La imatge (a) visualitza l'estat de pressions juntament amb els vectors velocitat en el pla de tall horitzontal, la imatge (b) il·lustra l'estat de pressions en el pla longitudinal del túnel, en la imatge (c) es pot observar la magnitud de la velocitat en el pla longitudinal del bus i finalment en la imatge (d) podem veure com incideix el flux d'aire sobre la carrosseria del vehicle a partir de representar diverses línies de corrent.

- $\delta = 0^\circ$: veure figura 17.

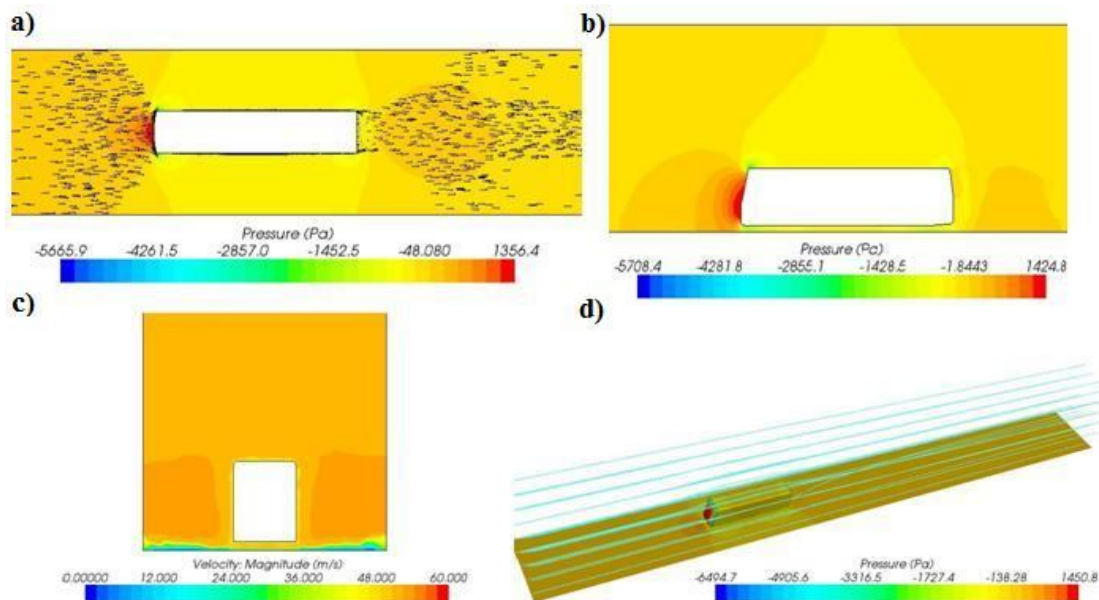


Figura. 17 Resultats obtinguts del cas 1 per $\delta = 0^\circ$.

- $\delta = 30^\circ$: veure figura 18.

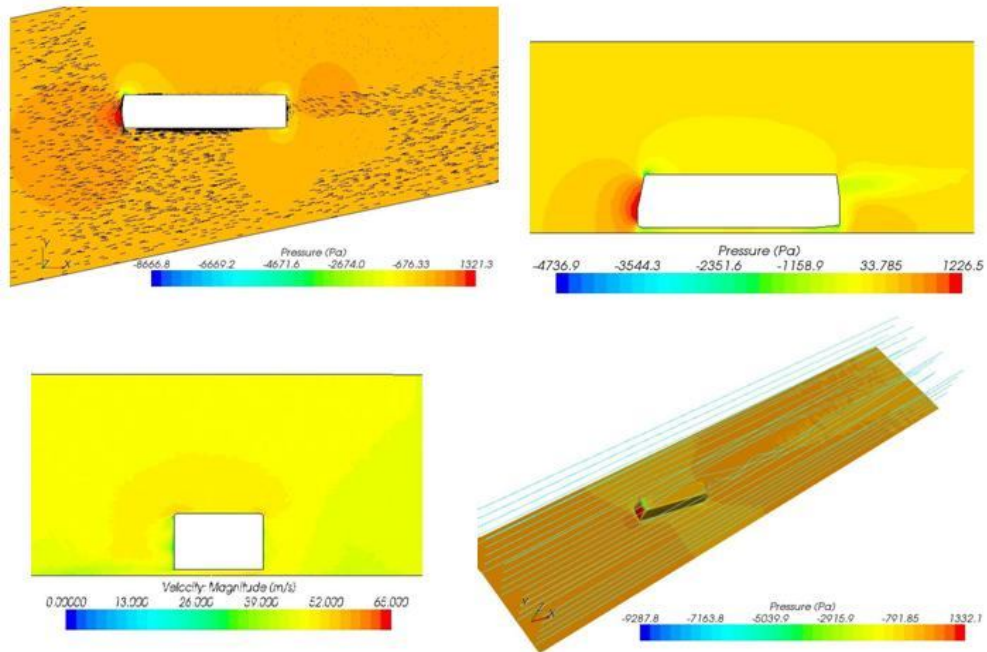


Figura. 18 Resultats obtinguts del cas 1 per $\delta = 30^\circ$.

- $\delta = 60^\circ$: veure figura 19.

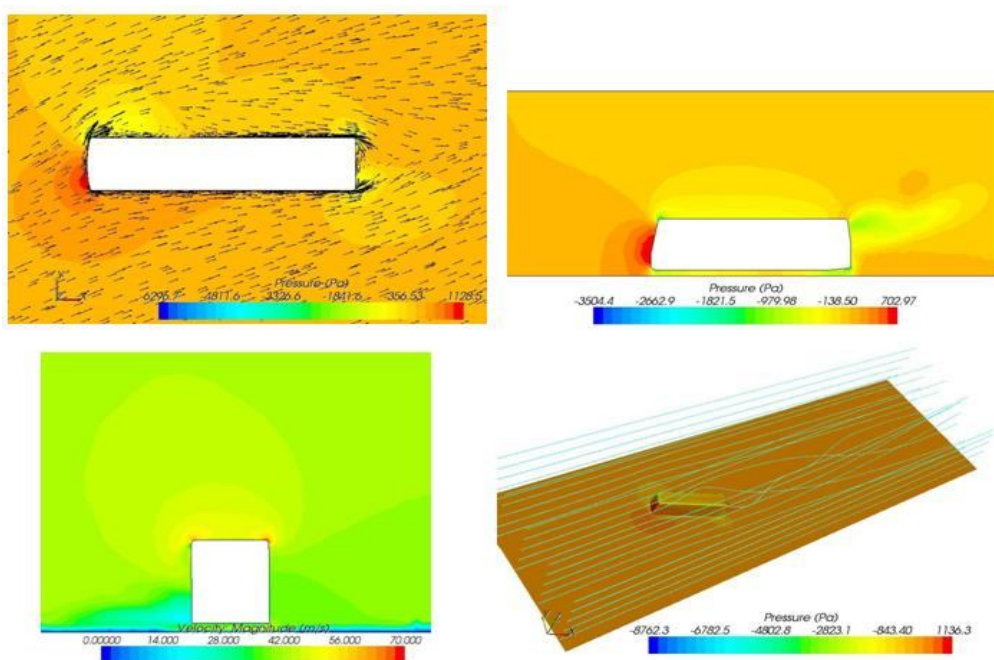


Figura. 19 Resultats obtinguts del cas 1 per $\delta = 60^\circ$.

- $\delta = 90^\circ$: veure figura 20.

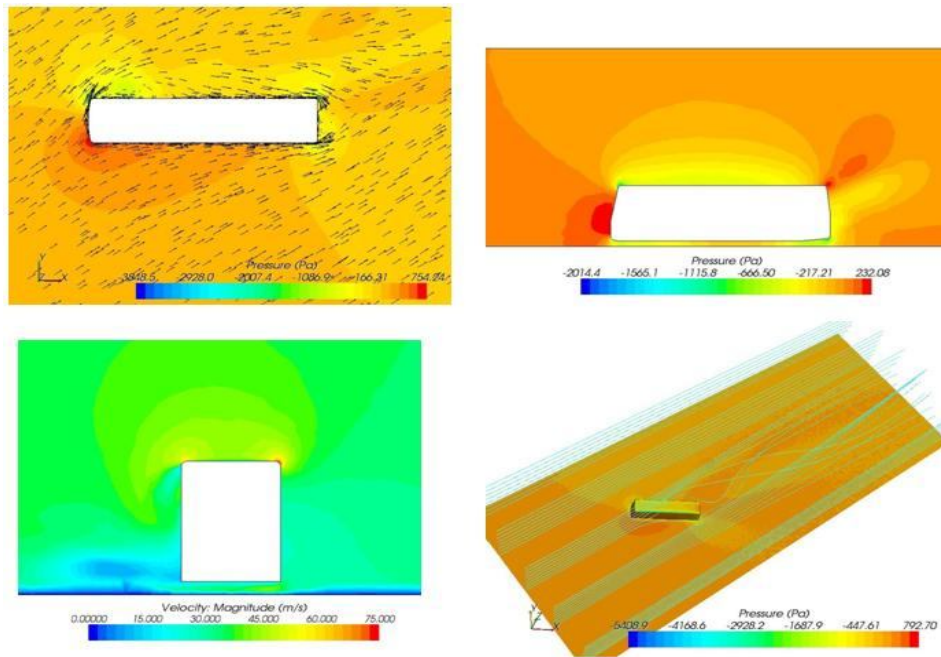


Figura. 20 Resultats obtinguts del cas 1 per $\delta = 90^\circ$

- $\delta = 120^\circ$: veure figura 21.

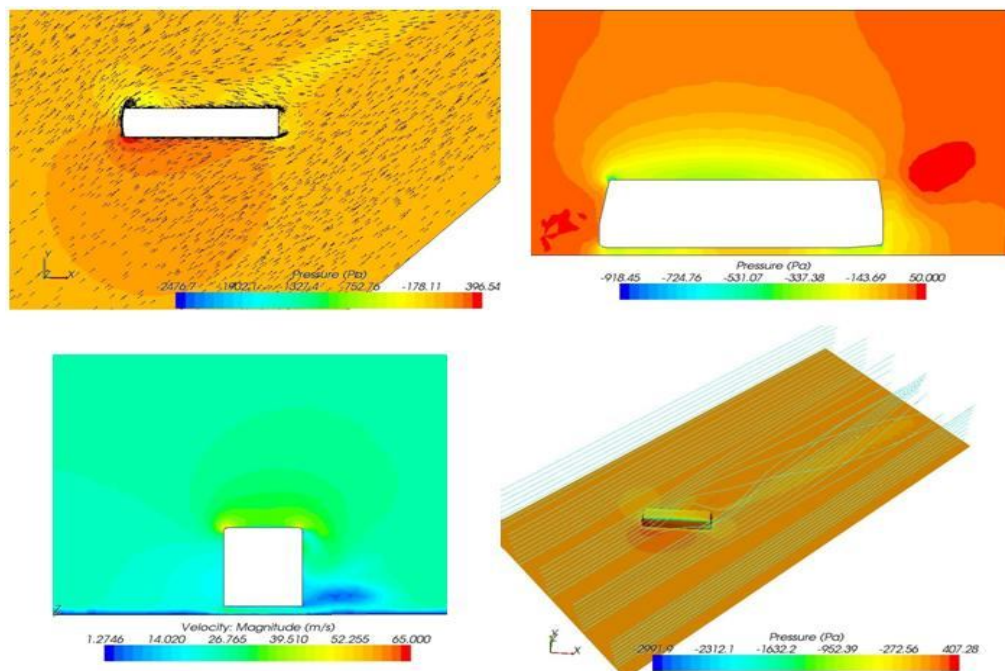


Figura. 21 Resultats obtinguts del cas 1 per $\delta = 120^\circ$.

- $\delta = 150^\circ$: veure figura 22.

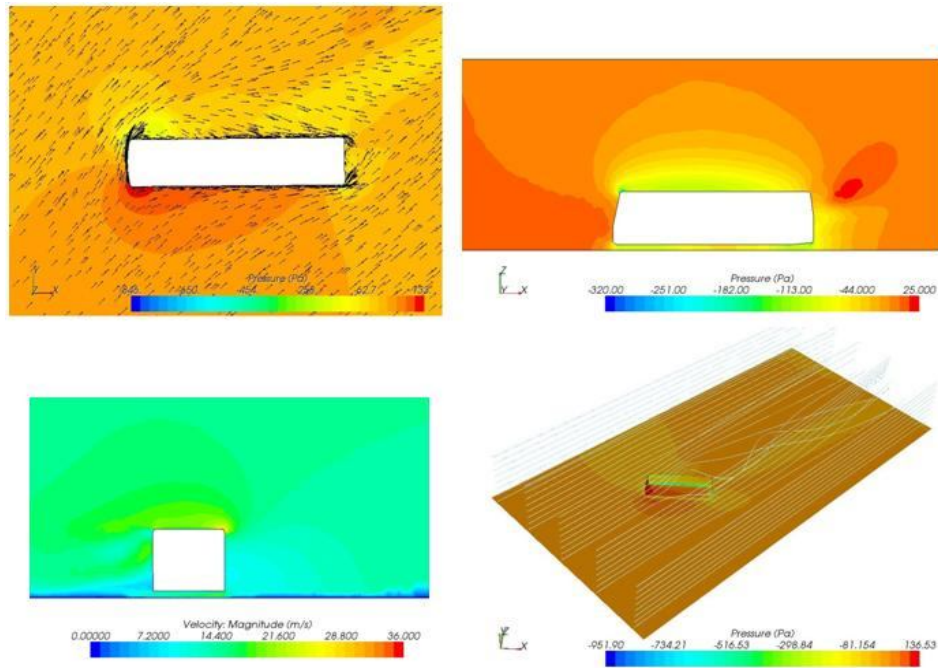


Figura. 22 Resultats obtinguts del cas 1 per $\delta = 150^\circ$.

- $\delta = 180^\circ$: veure figura 23.

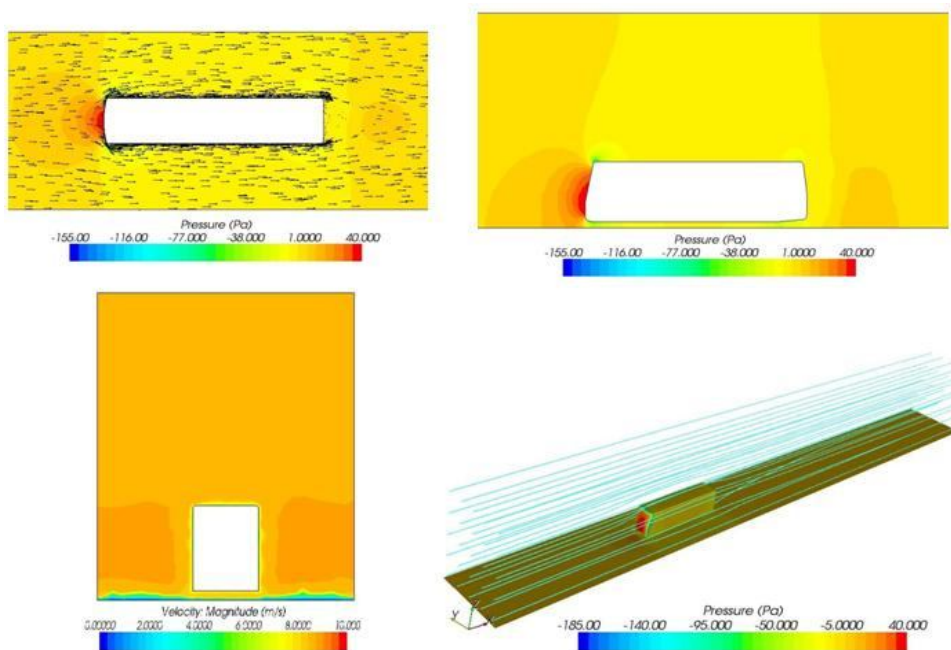


Figura. 23 Resultats obtinguts del cas 1 per $\delta = 180^\circ$.

- Cas 2: veure taula 31.

δ	F_L (N)	Error % F_L	M_x (N.m)	Error % M_x	M_z (N.m)	Error % M_z
0°	85		-10		50	
30°	18.149	0,4	-1.229	0,8	-28.003	0,2
60°	24.732	0,3	-981	0,8	-60.551	0,1
90°	24.089	0,2	-454	1,2	-55.144	0,04
120°	14.036	0,2	421	0,5	-36.082	0,003
150°	4.798	0,1	74	2,2	-12.030	0,2
180°	-11		4		-38	

Taula. 31 Valors numèrics del cas 2 amb el % d'error.

- Cas 3: veure taula 32.

δ	F_L (N)	Error % F_L	M_x (N.m)	Error % M_x	M_z (N.m)	Error % M_z
0°	-188		72		-726	
30°	12.915	1,4	-783	8,8	-47.686	1,5
60°	25.607	0,6	-4.787	1,3	-48.195	1,3
90°	23.366	0,5	-4.362	1,1	-44.493	1,1
120°	13.587	0,6	-1.374	2,2	-31.012	1,0
150°	4.600	0,8	-493	2,4	-10.503	1,3
180°	-5		0		-19	

Taula. 32 Valors numèrics del cas 3 amb el % d'error.

- Cas 4: veure taula 33.

δ	F_L (N)	Error % F_L	M_x (N.m)	Error % M_x	M_z (N.m)	Error % M_z
0°	137		-44		294	
30°	5.557	2,4	-690	6,2	-18.062	1,6
60°	11.098	1,1	-1.130	3,5	-20.966	1,3
90°	10.005	1,1	-2.205	1,6	-20.579	1,1

Taula. 33 Valors numèrics del cas 4 amb el % d'error.

- Cas 5: veure taula 34.

δ	F_L (N)	Error % F_L	M_x (N.m)	Error % M_x	M_z (N.m)	Error % M_z
0°	164		-43		380	
30°	14.489	1,1	-1.371	3,1	-28.750	1,3
60°	23.512	0,6	-5.398	0,7	-41.305	0,8
90°	-2.527	4,6	-40.086	0,1	19.460	1,4

Taula. 34 Valors numèrics del cas 5 amb el % d'error.

A continuació mostrem els resultats més significatius per a cada cas en funció de l'angle d'incidència del vent. Com ja hem dit anteriorment la imatge (a) visualitza l'estat de pressions juntament amb els vectors velocitat en el pla de tall horitzontal, la imatge (b) il·lustra l'estat de pressions en el pla longitudinal del túnel, en la imatge (c) es pot observar la magnitud de la velocitat en el pla longitudinal del bus i finalment en la imatge (d) podem veure com incideix el flux d'aire sobre la carrosseria del vehicle a partir de les línies de corrent.

- $\delta = 30^\circ$: veure figura 24.A i 24.B.

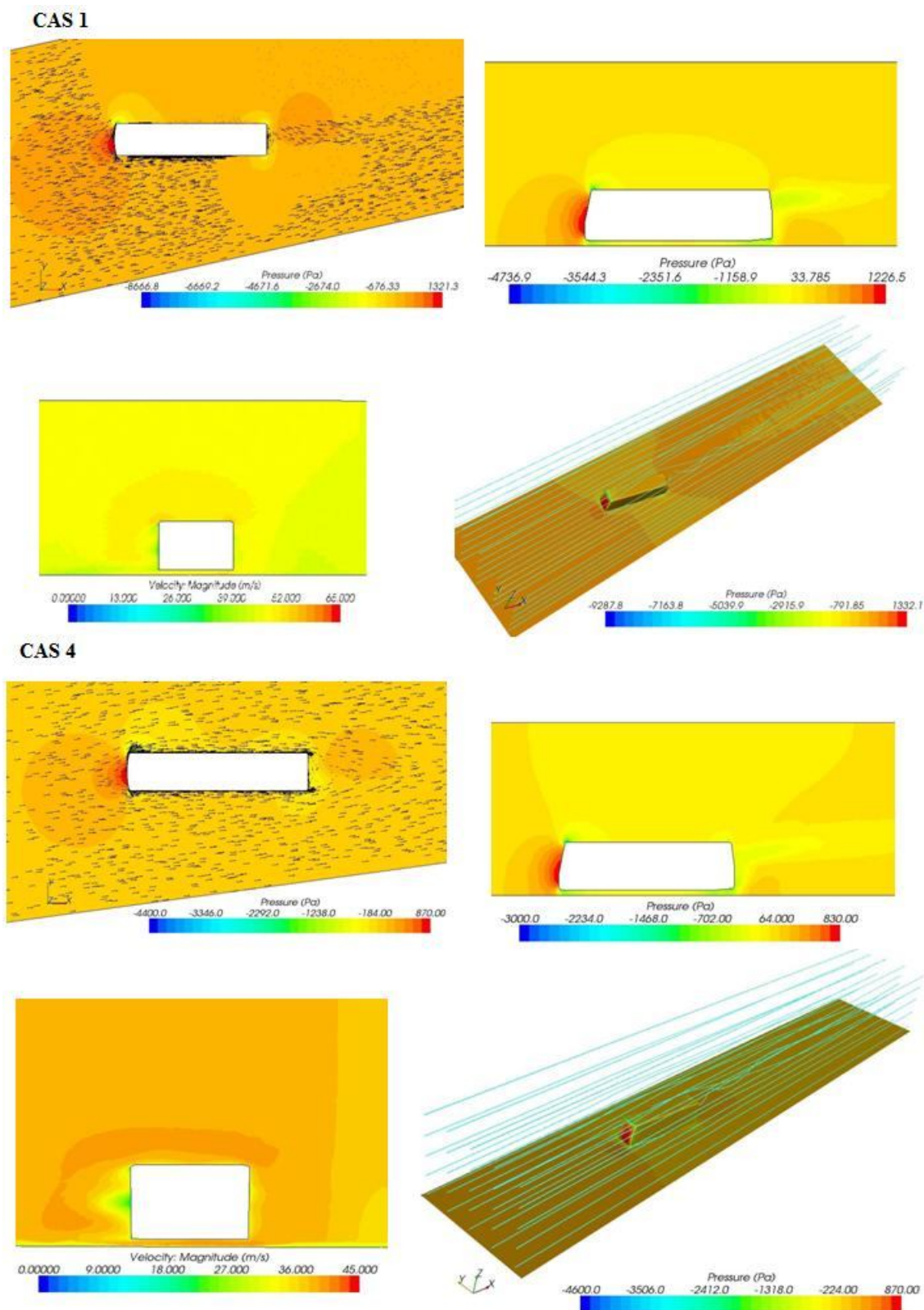


Figura. 24.A. Resultats més significatius per $\delta = 30^\circ$ dels casos 1 i 4.

CAS 5

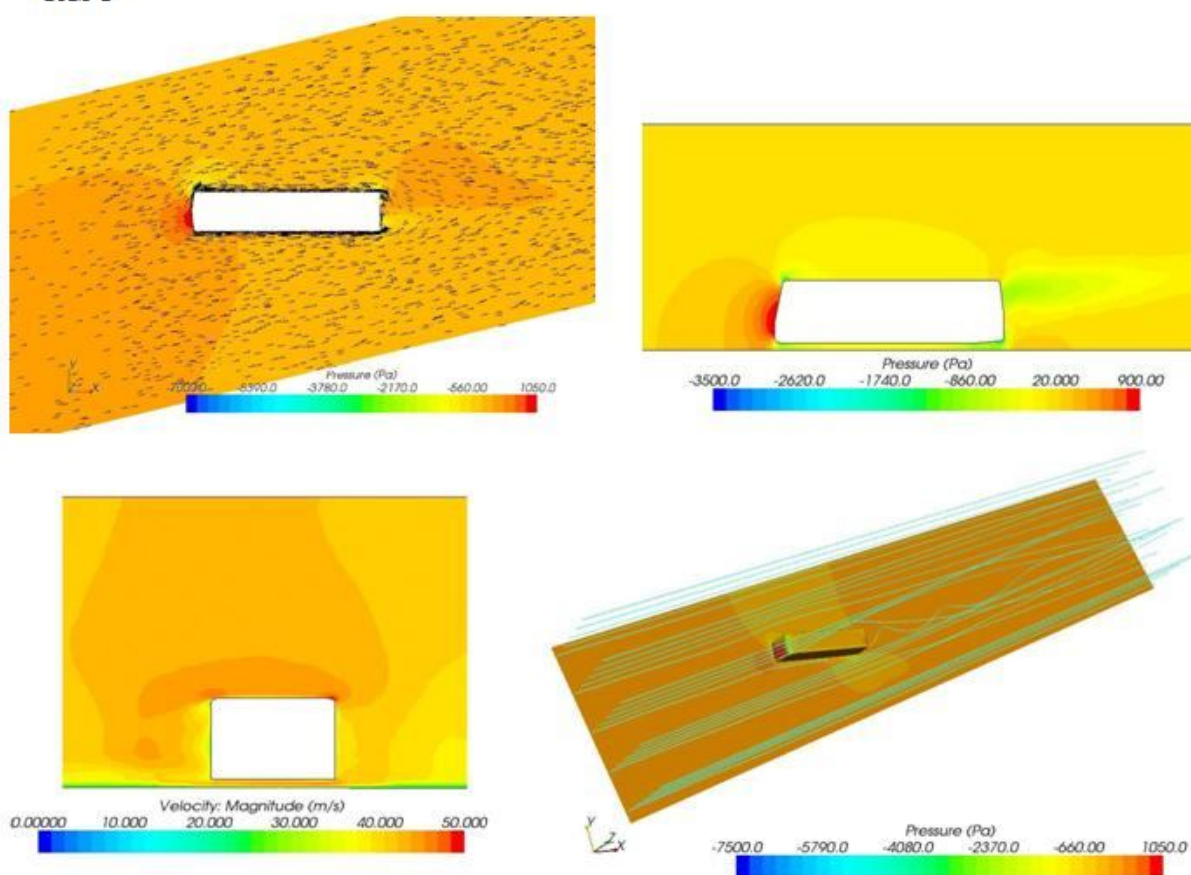


Figura 24.B. Resultats més significatius per $\delta = 30^\circ$ del cas 5.

- $\delta = 60^\circ$: veure figura 25.A, 25.B i 25.C.

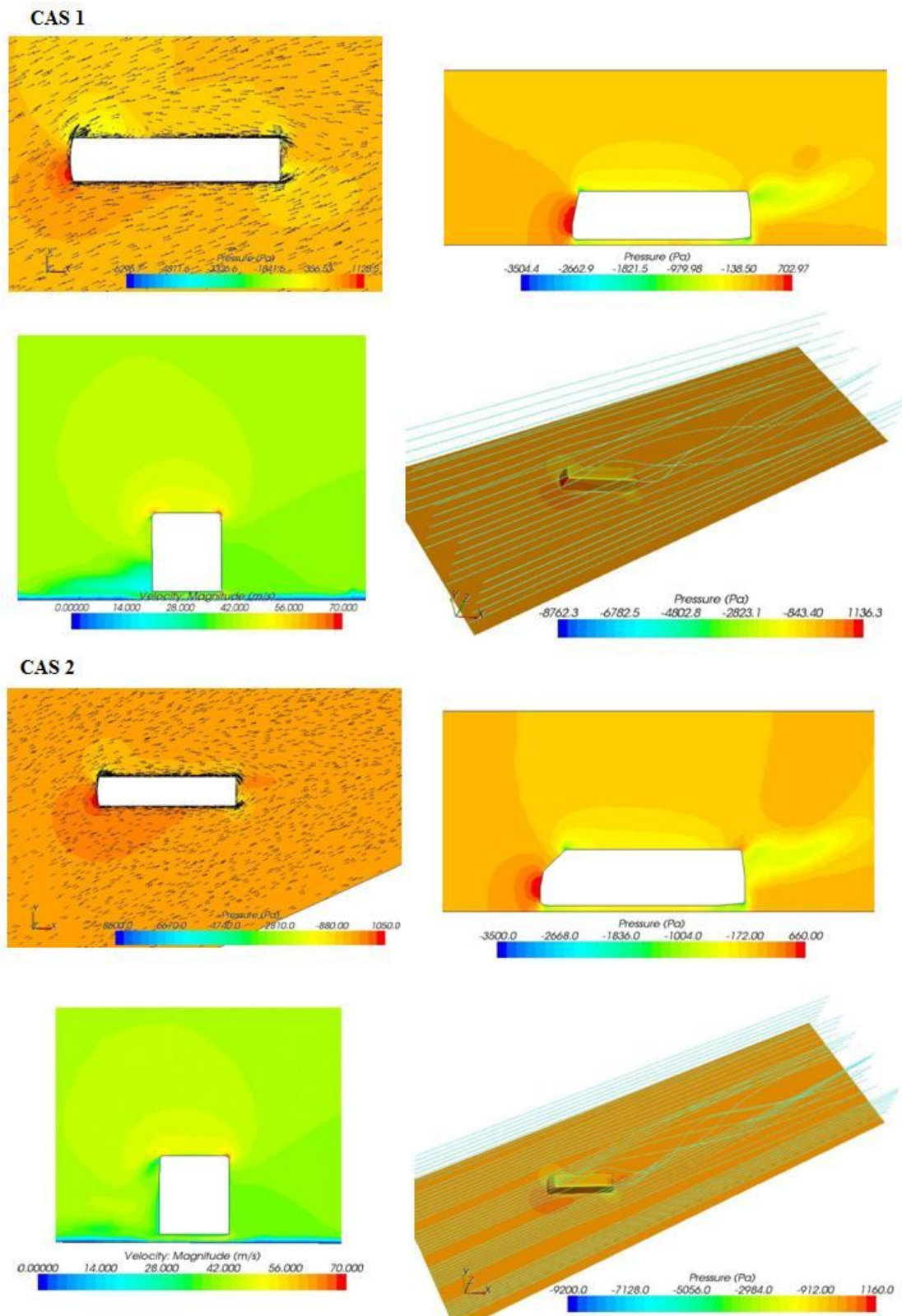
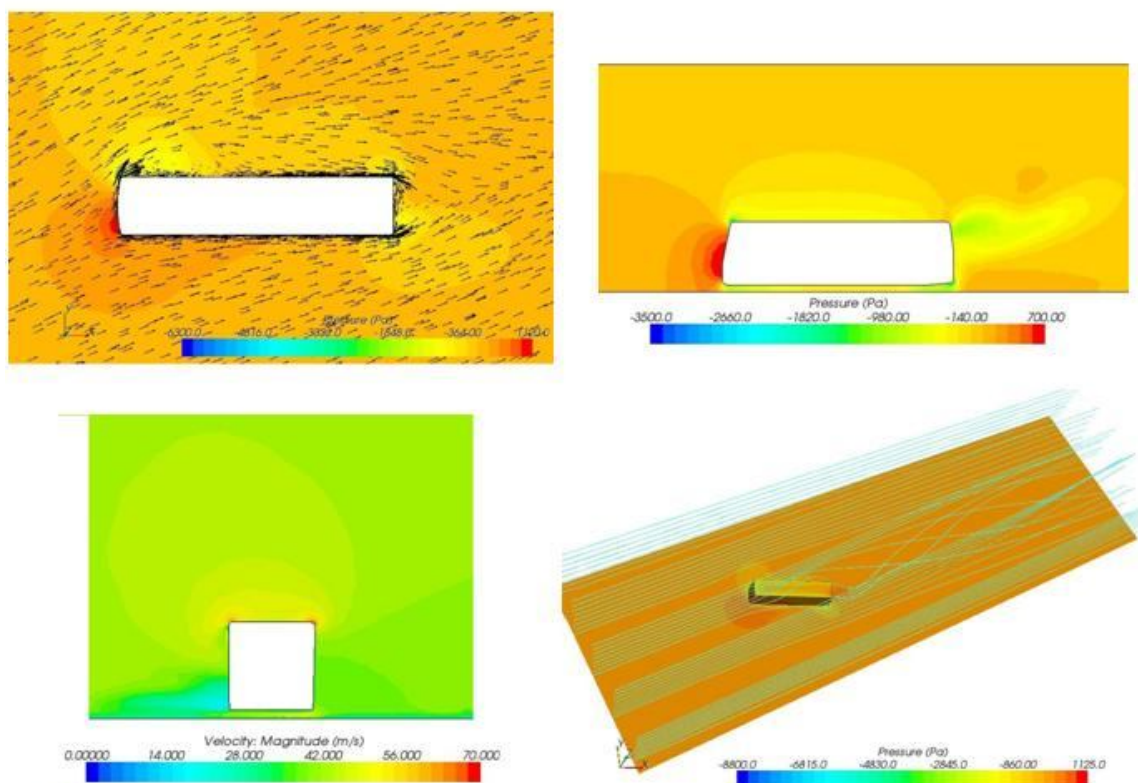


Figura. 25.A. Resultats més significatius per $\delta = 60^\circ$ dels casos 1 i 2.

CAS 3



CAS 4

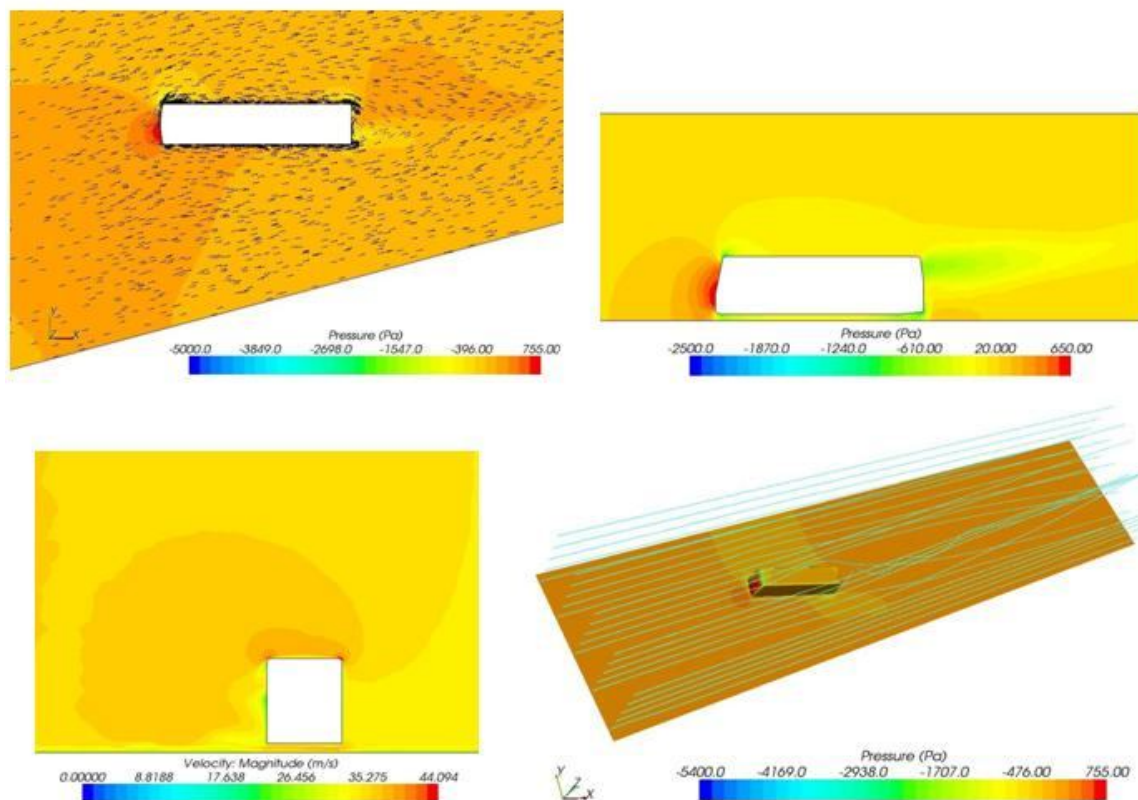


Figura 25.B. Resultats més significatius per $\delta = 60^\circ$ dels casos 3 i 4.

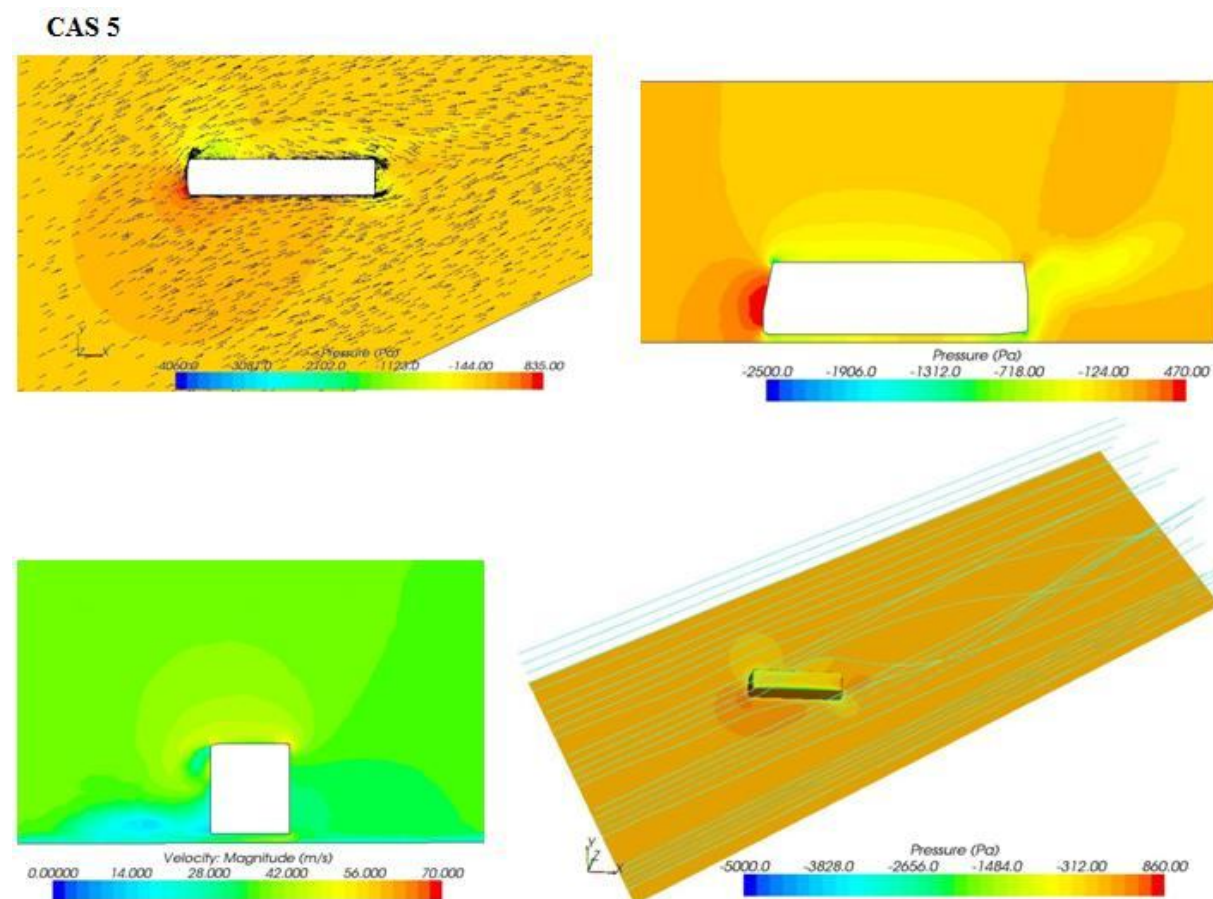


Figura 25.C. Resultats més significatius per $\delta = 60^\circ$ del cas 5.

- $\delta = 90^\circ$: veure figura 26.A, 26.B i 26.C.

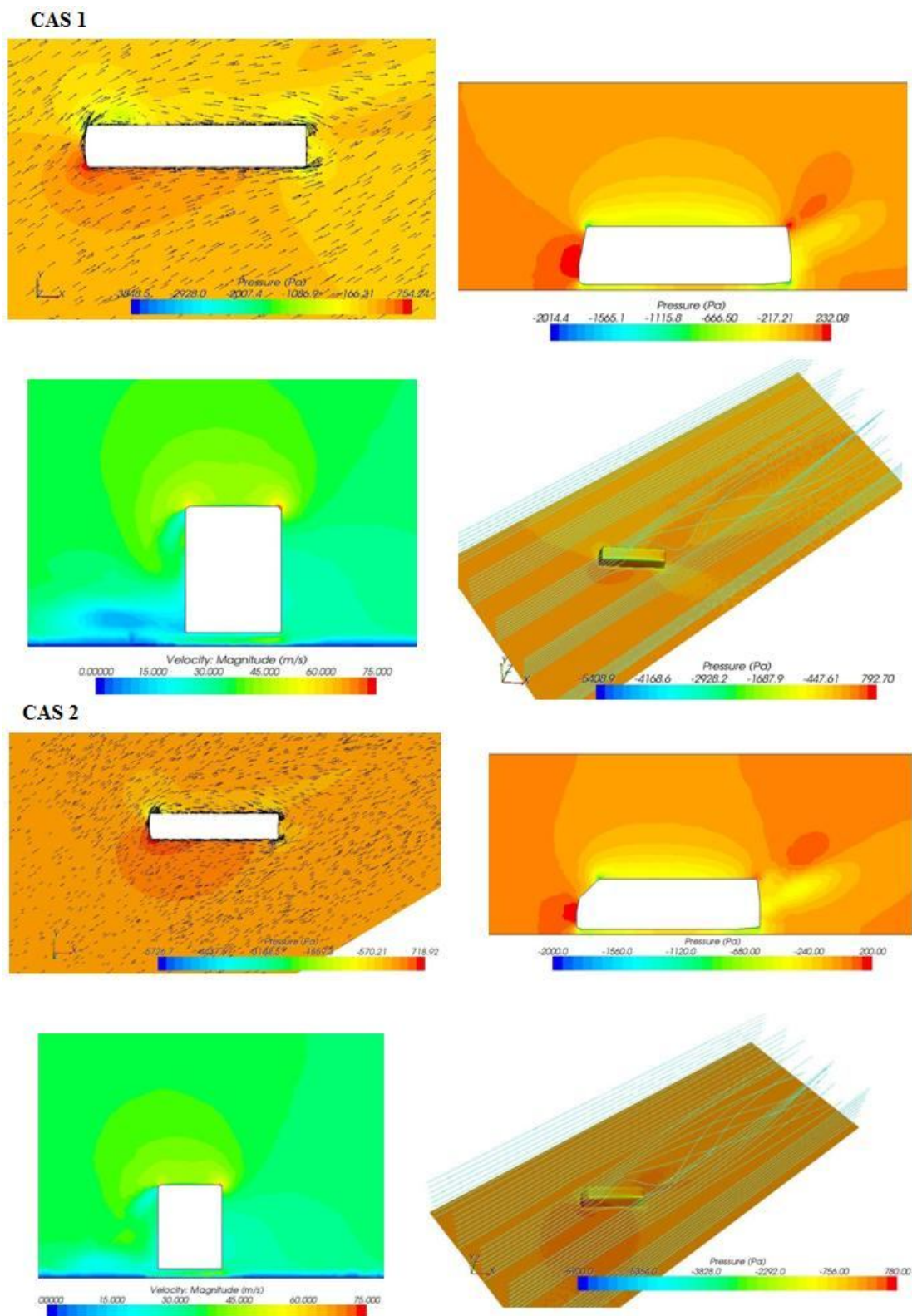
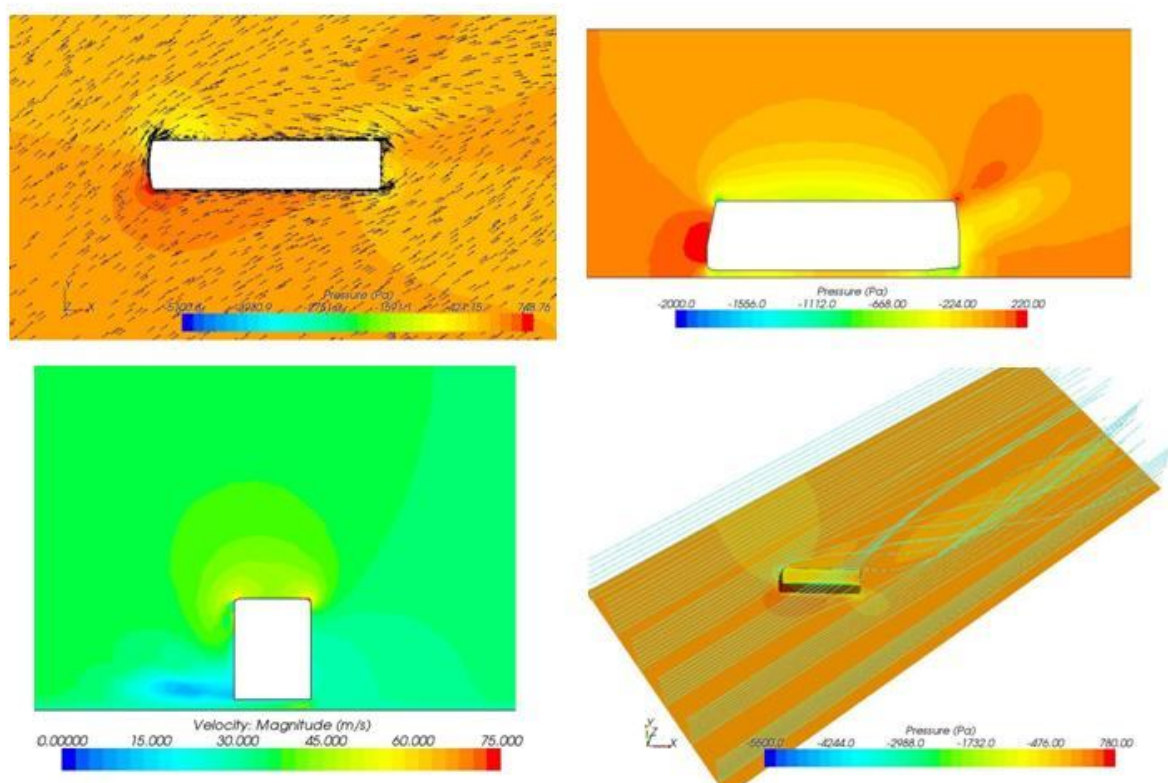


Figura. 26.A. Resultats més significatius per $\delta = 90^\circ$ dels casos 1 i 2.

CAS 3



CAS 4

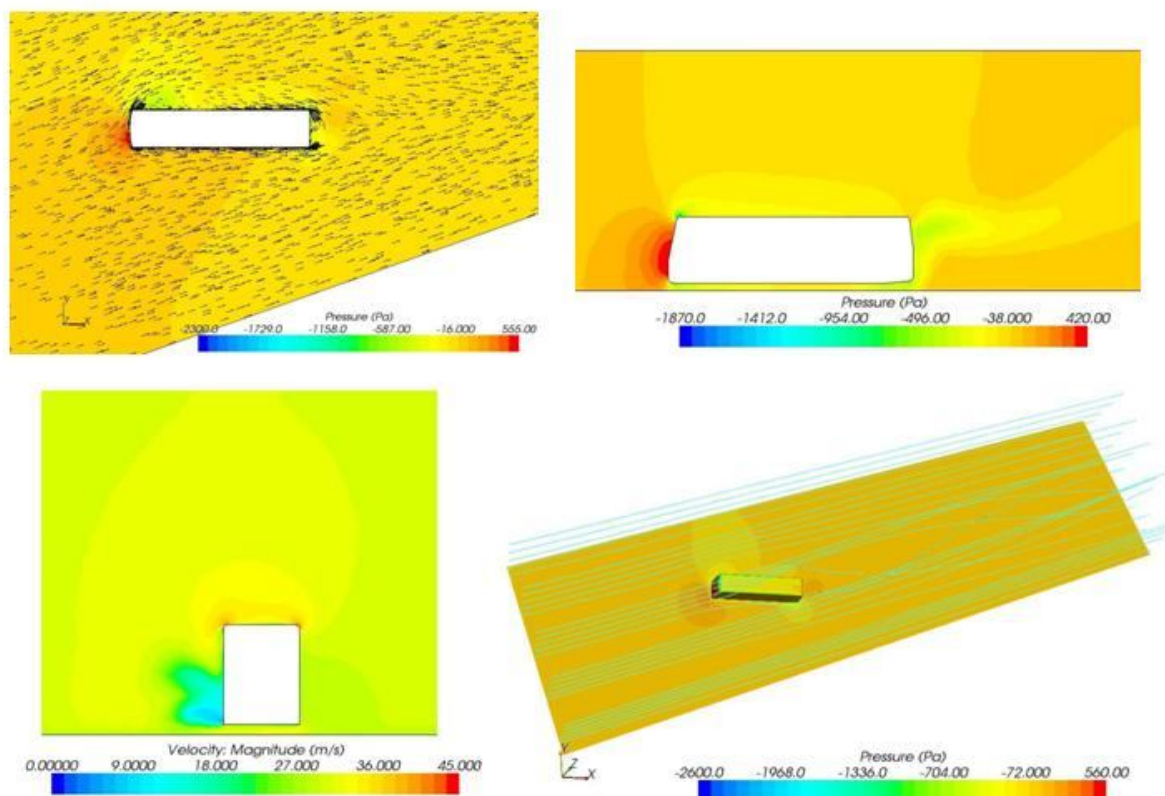


Figura 26.B. Resultats més significatius per $\delta = 90^\circ$ dels casos 3 i 4.

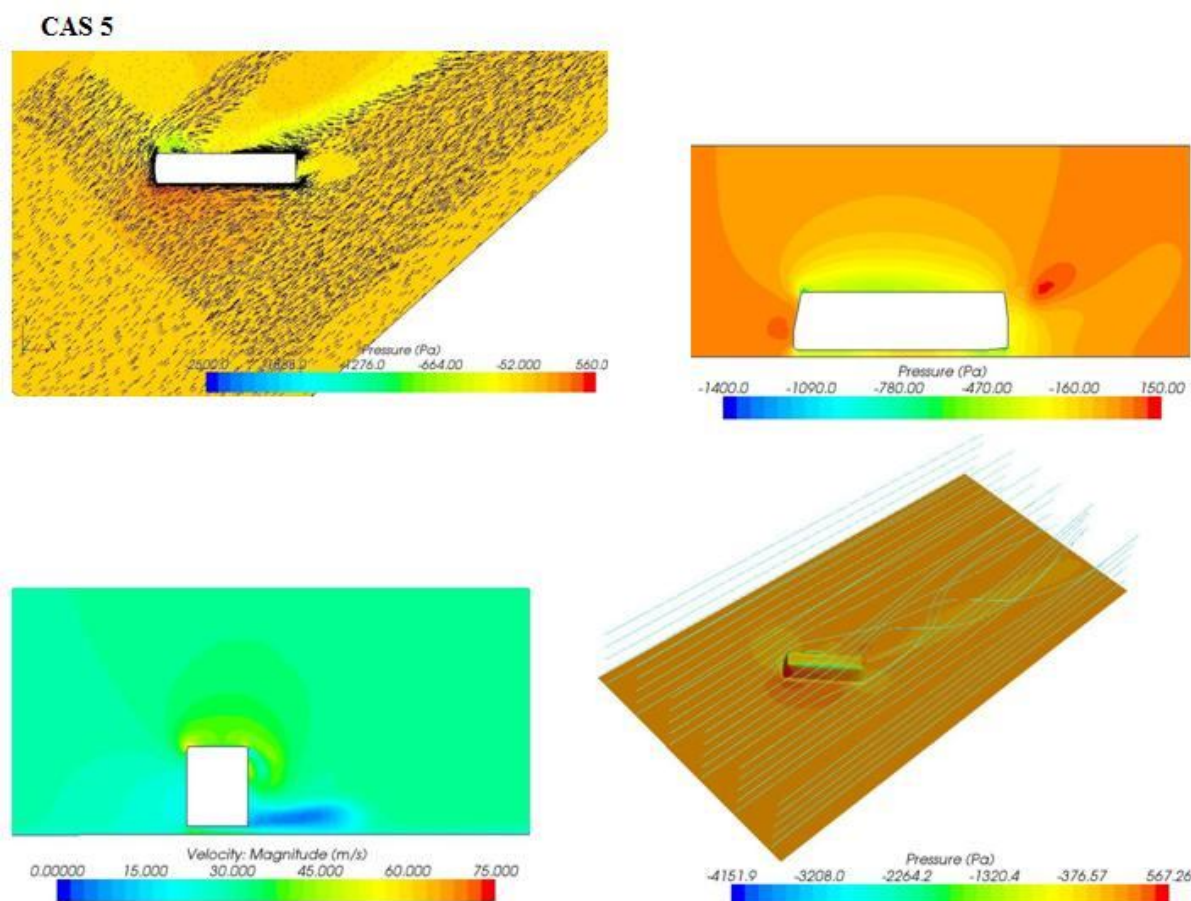


Figura 26.C. Resultats més significatius per $\delta = 90^\circ$ del cas 5.

- $\delta = 120^\circ$: veure figura 27.A i 27.B.

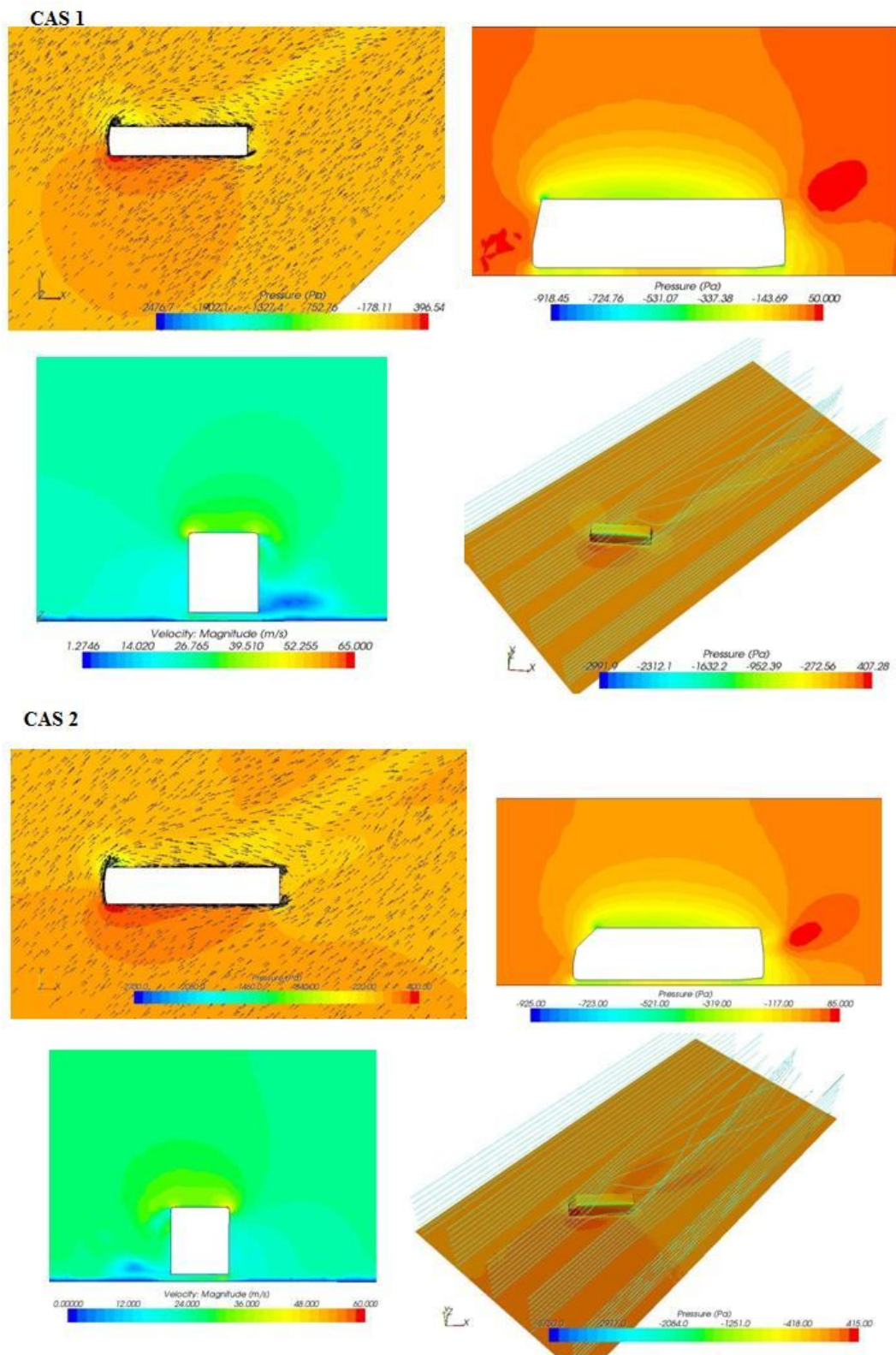


Figura. 27.A. Resultats més significatius per $\delta = 120^\circ$ dels casos 1 i 2.

CAS 3

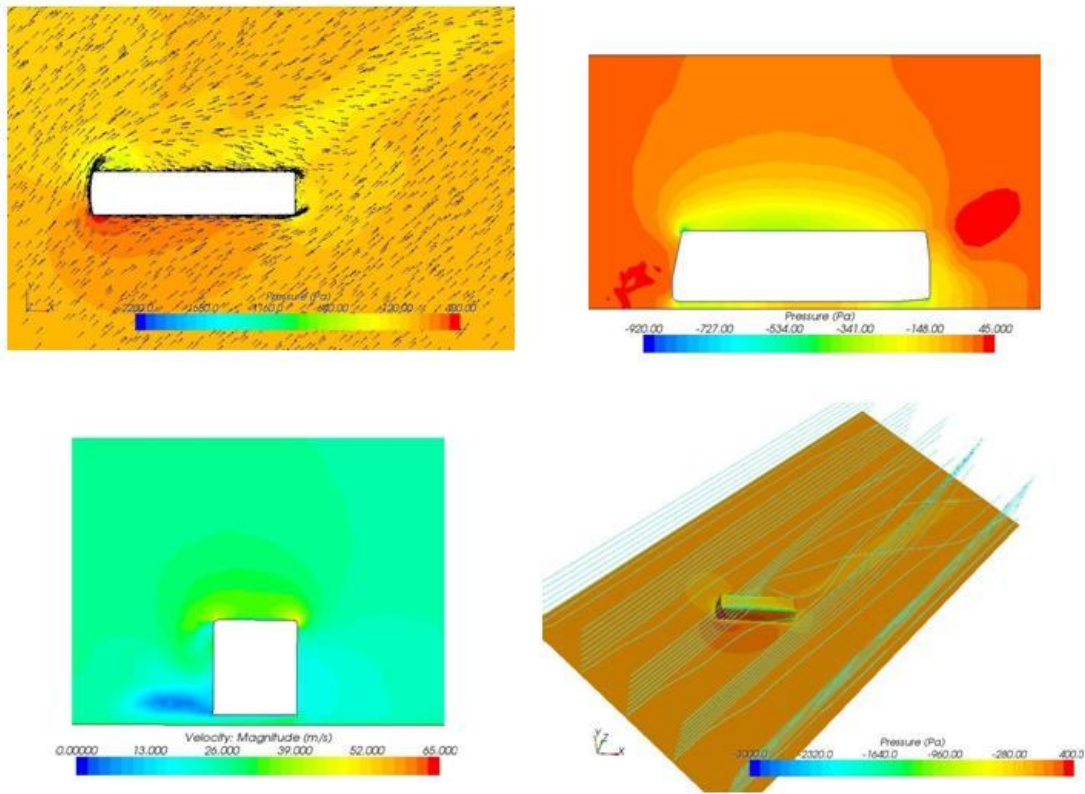


Figura 27.B. Resultats més significatius per $\delta = 120^\circ$ del cas 3.

3.5.- Conclusions

En aquest capítol s'han realitzat 29 simulacions per determinar la força del vent lateral, el moment de guinyada i el de bolcada (també associats al vent) per a cinc casos diferents. Aquests són:

Cas 1: Carrosseria bus 1. Velocitat del vent: 72 km/h. Velocitat del bus: 100 km/h. Terra parat

Cas 2: Com el cas 1 però amb carrosseria bus 2.

Cas 3: Com el cas 1 però amb el terra mòbil.

Cas 4: Com el cas 3 però amb velocitat del vent: 36 km/h.

Cas 5: Com el cas 3 però amb velocitat del bus: 80 km/h.

- Per a cada cas i angle d'incidència s'ha redissenyat la orientació del túnel de vent virtual per estar alineat amb la direcció de la velocitat total del vent. D'aquesta forma, s'han obtingut malles amb el nombre d'elements que es mostra a la taula 35.

Angle d'incidència δ	CASOS				
	1	2	3	4	5
0°	1.415.769	1.415.769	1.415.769	1.415.769	1.415.769
30°	1.570.989	1.586.920	1.570.989	1.589.639	1.530.531
60°	1.877.810	1.897.187	1.877.810	1.605.705	2.006.827
90°	2.049.652	2.065.680	2.049.652	1.867.563	4.358.283
120°	2.113.876	2.129.144	2.113.876	-	-
150°	2.132.415	2.143.479	2.132.415	-	-
180°	1.415.769	1.415.769	1.415.769	-	-

Taula. 35 Nombre total d'elements del mallat per a cada cas segons l'angle d'incidència del vent δ .

- Els resultats per a la força lateral del vent (força lateral aerodinàmica) es mostren a la taula 36, on els valors per els angles 0° i 180° s'han utilitzat per determinar l'error de la simulació. D'aquesta forma, es conclou que l'error en les simulacions es poc rellevant per a l'objectiu del nostre estudi.

Angle d'incidència δ	CASOS				
	1	2	3	4	5
0°	-404	85	-188	137	164
30°	14.220	18.149	12.915	5.557	14.489
60°	25.497	24.732	25.607	11.098	23.512
90°	23.232	24.089	23.366	10.005	19.460
120°	13.570	14.036	13.587	-	-
150°	4.566	4.798	4.600	-	-
180°	-9	-11	-5	-	-

Taula. 36 Valor de l'empenta lateral aerodinàmica F_L (unitats en N) per a cada cas i segons l'angle d'incidència del vent δ .

- Els valors del moment aerodinàmic de bolcada M_x ($N \cdot m$) es mostren a la taula 37.

Angle d'incidència δ	CASOS				
	1	2	3	4	5
0°	112	-10	72	-44	-43
30°	-955	-1.229	-783	-690	-1.371
60°	-4.821	-981	-4.787	-1.130	-5.398
90°	-3.860	-454	-4.362	-2.205	-2.527
120°	-1.474	421	-1.374	-	-
150°	-468	74	-493	-	-
180°	3	4	0	-	-

Taula. 37 Valor del moment aerodinàmic de bolcada M_x (unitats en $N \cdot m$) per a cada cas i segons l'angle d'incidència del vent δ .

- Els valors per al moment aerodinàmic de guinyada M_z ($N \cdot m$) es mostren a la taula 38.

- Finalment, comentar com les visualitzacions gràfiques dels resultats revelen com les dimensions del túnel de vent han estat adientment escollides ja que, en cap de les 29 simulacions realitzades, les línies de corrent es veuen sotmeses a canvis sobtats prop dels contorns del domini computacional.

Angle d'incidència δ	CASOS				
	1	2	3	4	5
0°	-1.494	50	-726	294	380
30°	-43.121	-28.003	-47.686	-18.062	-28.750
60°	-48.752	-60.551	-48.195	-20.966	-41.305
90°	-45.174	-55.144	-44.493	-20.579	-40.086
120°	-30.604	-36.082	-31.012	-	-
150°	-10.947	-12.030	-10.503	-	-
180°	-32	-38	-19	-	-

Taula. 38 Valor del moment aerodinàmic de guinyada M_z (unitats en $N \cdot m$) per a cada cas i segons l'angle d'incidència del vent δ .

4.- MODEL DINÀMIC D'AUTOCAR

4.1.- Introducció

A partir de les dades obtingudes de l'apartat anterior, fent una simplificació del model dinàmic de l'autocar a un model 2D (anomenat model de bicicleta; Noguchi 1986) i utilitzant el programari Matlab hem obtingut els valors que ens han permès determinar l'índex de perillositat basat en les conclusions de Liu et al. (1998).

4.2.- Model 2D

Hem simplificat el xassís del vehicle, transformant-lo d'un sistema 3D a un sistema 2D segons Noguchi (1986), tal i com es pot veure a la figura 28, on també podem veure el sistema de coordenades utilitzat. Aquest és el que s'anomena model de bicicleta.

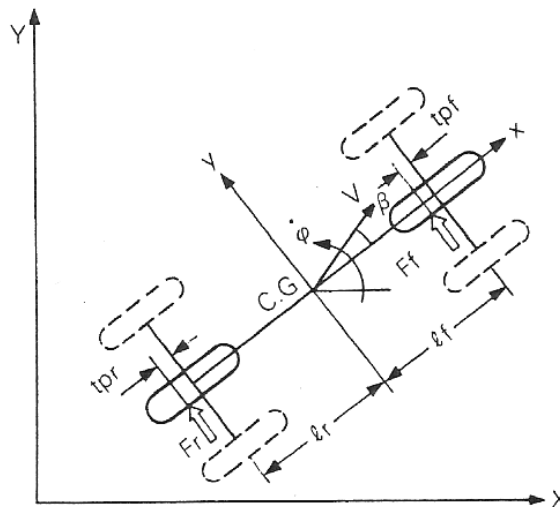


Figura. 28 Model 2D de bicicleta d'un vehicle (Noguchi, 1986).

A partir d'aquí hem definit les equacions que ens han permès extreure els gràfics de l'angle de bolcada, l'angle de guinyada, l'angle de desviament, la velocitat angular de guinyada, la velocitat angular de bolcada i l'acceleració lateral (veure annex F). Gràcies a les següents equacions:

- **Moviment lateral:**

$$\frac{d\beta}{dt} = \frac{F_{VENT\ y} - (C_F + C_R) \cdot \beta - \frac{1}{V_{BUS}} (a \cdot C_F - b \cdot C_R) \cdot \dot{\phi}}{m_{BUS} \cdot V_{BUS}} - \dot{\phi} \quad (\text{Eq.6})$$

On:

$F_{VENT\ y} \rightarrow$ empenta lateral aerodinàmica en direcció y (N)

$V_{BUS} \rightarrow$ velocitat del bus (m / s)

$m_{BUS} \rightarrow$ massa del bus (Kg)

$C_F \rightarrow$ coeficient cornering stiffness del pneumàtic anterior (N / rad)

$C_R \rightarrow$ coeficient cornering stiffness del pneumàtic posterior (N / rad)

$a \rightarrow$ distància entre l'eix anterior i el cdg (m)

$b \rightarrow$ distància entre l'eix posterior i el cdg (m)

$\beta \rightarrow$ angle de desplaçament lateral del vehicle (rad)

$M_z\ vent \rightarrow$ moment aerodinàmic de guinyada (N · m)

$\dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}$

$\phi \rightarrow$ angle de derrapatge (rad)

- **Derrapatge:**

$$\frac{d\dot{\phi}}{dt} = \frac{-(a \cdot C_F - b \cdot C_R) \cdot \beta - \frac{1}{V_{BUS}} \cdot (a^2 \cdot C_F + b^2 \cdot C_R) \cdot \dot{\phi} + M_{z\ VENT}}{I_z} \quad (\text{Eq.7})$$

On:

$I_z \rightarrow$ moment d'inèrcia respecte l'eix z d'origen en el c.d.g (Kg · m²)

- **Bolcada:**

$$\frac{d\dot{\lambda}}{dt} = \frac{-\frac{1}{2} \cdot (t_F^2 \cdot C_{FD} + t_R^2 \cdot C_{RD}) \cdot \dot{\lambda} - (R_F + R_R) \cdot \lambda + M_{x\ VENT} + L \cdot \left[F_{VENT\ y} - (C_F + C_R) \cdot \beta - \frac{1}{V_{BUS}} (a \cdot C_F - b \cdot C_R) \cdot \dot{\phi} \right]}{I_x} \quad (\text{Eq.8})$$

On:

$\lambda \rightarrow$ angle de bolcada (rad)

$$\dot{\lambda} = \frac{d\lambda}{dt}$$

$C_{FD} \rightarrow$ coeficient amortidor davanter ($N \cdot s / m$)

$C_{RD} \rightarrow$ coeficient amortidor posterior ($N \cdot s / m$)

$I_x \rightarrow$ moment d'inèrcia respecte l'eix x d'origen en el c.d.g ($Kg \cdot m^2$)

$R_F \rightarrow$ coeficient de la molla de l'amortidor davanter ($N \cdot m / rad$)

$R_R \rightarrow$ coeficient de la molla de l'amortidor posterior ($N \cdot m / rad$)

$t_f \rightarrow$ distància entre els centres dels pneumàtics en l'eix davanter (m)

$t_r \rightarrow$ distància entre els centres dels pneumàtics en l'eix posterior (m)

$L \rightarrow$ longitud del bus (m)

A la taula 39 podem observar el valors del paràmetres i dels coeficients de les equacions anteriors.

Paràmetres	CAS 1, 2,3 i 4	CAS 5	Unitats	Font
Longitud bus (L)	12,2	12,2	m	Mesurat
Massa del bus (m)	18.000	18.000	Kg	Fitxa Tècnica
Moment d'inèrcia de derrapatge (I_z)	144.000	144.000	$Kg \cdot m^2$	Càlcul: Annex F
Moment d'inèrcia de bolcada (I_x)	1.500	1.500	$Kg \cdot m^2$	Càlcul: Annex F
Distància entre l'eix anterior i el c.d.g (a)	3,805	3,805	m	Càlcul: Annex F
Distància entre l'eix posterior i el c.d.g (b)	2,195	2,195	m	Càlcul: Annex F
Distància entre els centres dels pneumàtics de l'eix davanter (t_f)	2,2	2,2	m	Mesurat
Distància entre els centres dels pneumàtics de l'eix posterior (t_r)	1,91	1,91	m	Mesurat
Coef. Pneumàtic anterior (C_F)	213.000	213.000	N / rad	Hingwe i Tomizuka 1996
Coef. Pneumàtic posterior (C_R)	425.000	425.000	N / rad	Hingwe i Tomizuka 1996
Coeficients de la molla de l'amortidor ($R_F + R_R$)	7.910.000	7.910.000	$N \cdot m / rad$	Segel et al., 1972
Velocitat del bus (V)	28	22,22	m / s	Estimat
Coef. Amortidor davanter (C_{FD})	20.000	20.000	$N \cdot s / m$	Hedrick i Yi 1991
Coef. Amortidor posterior (C_{RD})	20.000	20.000	$N \cdot s / m$	Hedrick i Yi 1991

Taula. 39 Valors dels coeficients de les equacions anteriors que no depenen de la magnitud de l'empenta lateral o els moments.

4.3.- Programació MATLAB

Al capítol 3 hem obtingut els valors de l'empenta lateral aerodinàmica (F_Y), el moment aerodinàmic de bolcada (M_X) i el moment aerodinàmic de guinyada (M_Z) per a cada cas que, conjuntament amb les equacions (6)-(8), permeten obtenir la dinàmica del vehicle. Per integrar les equacions diferencials ordinàries (6)-(8) s'ha creat un programa amb MATLAB versió 6.5 (veure annex I per a detalls del programa) que ens ha permès obtenir els resultats que es presenten a continuació. Aquestes figures mostren els valors en cada instant de temps de l'angle de bolcada, l'angle de guinyada, l'angle de desviament, la velocitat angular de guinyada, la velocitat angular de bolcada i l'acceleració lateral acceptant que durant els primers 0,5 segons actua el vent provocant les forces i moments simulades en el capítol 3. A continuació, per a temps superiors a 0,5 s, es suposa que les forces i moments associats al vent són nul·les (la ràfega de vent s'ha extingit).

4.4.- Resultats

En aquest apartat mostrem els resultats obtinguts de la integració numèrica del model dinàmic utilitzant els valors de les forces i moments aerodinàmics obtinguts en el capítol 3.

- Cas 1:

- $\delta = 0^\circ$, veure figura 29.A

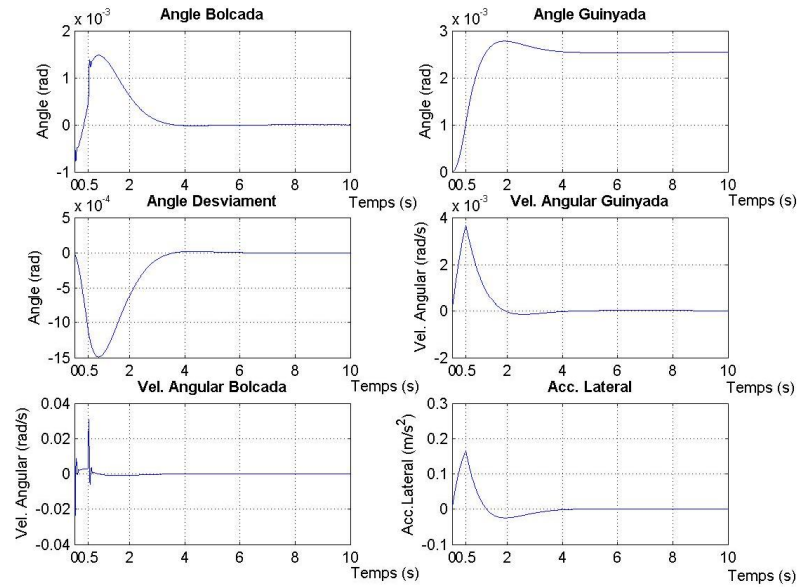


Figura. 29.A. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 0^\circ$ del cas 1.

- $\delta = 30^\circ$, veure figura 29.B.

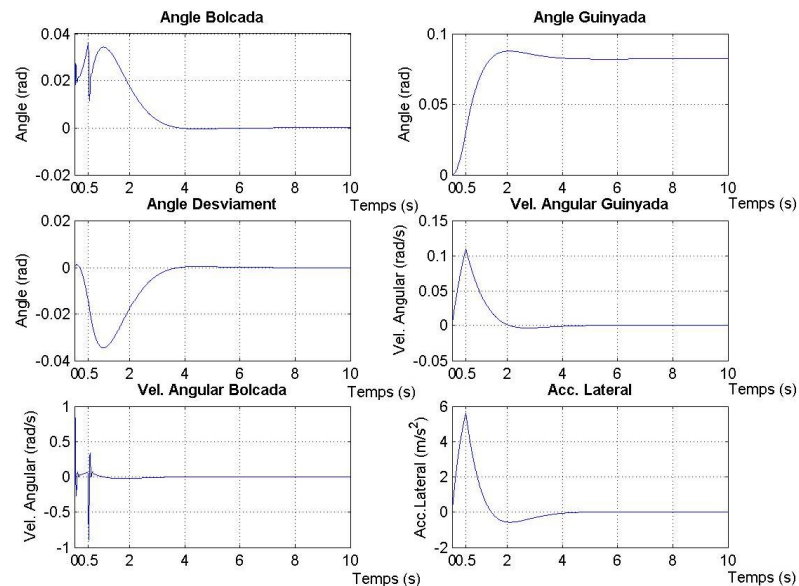


Figura 29.B. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 30^\circ$ del cas 1.

- $\delta = 60^\circ$, veure figura 29.C.

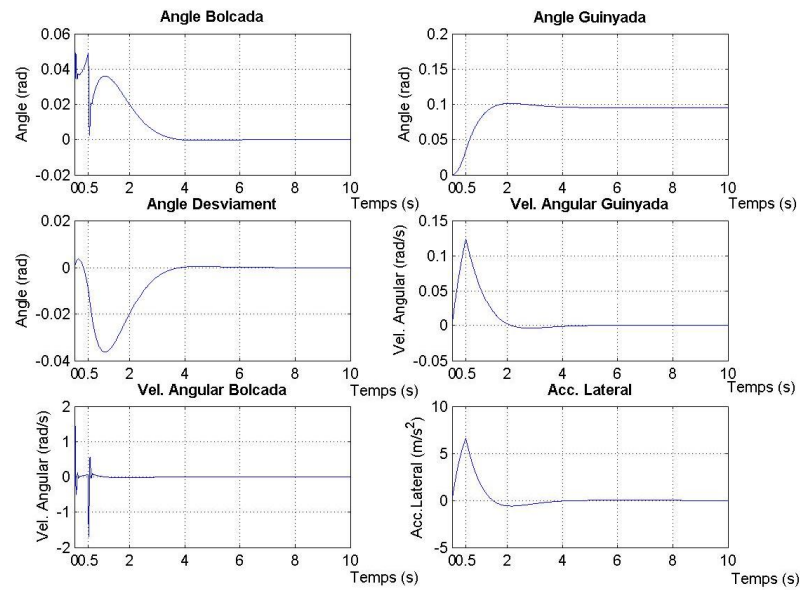


Figura 29.C. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$\delta = 60^\circ$ del cas 1.

- $\delta = 90^\circ$, veure figura 29.D.

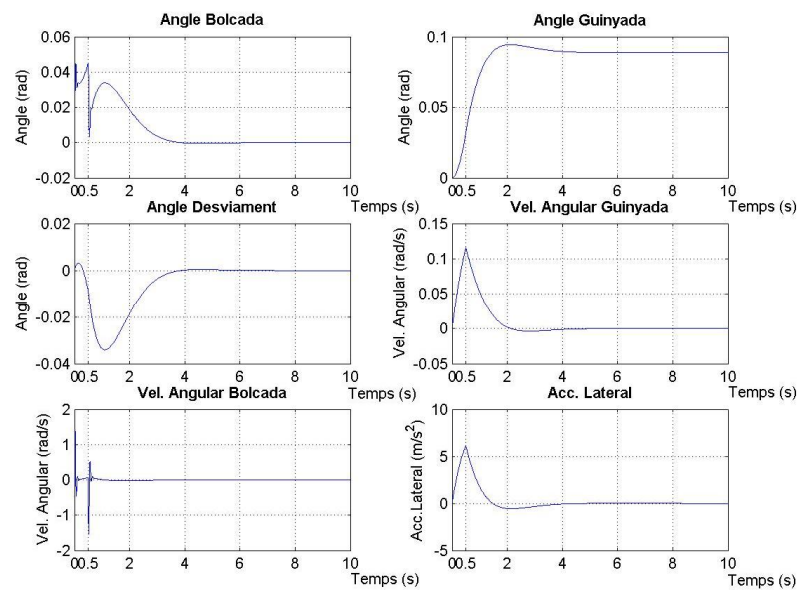


Figura 29.D. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$\delta = 90^\circ$ del cas 1.

- $\delta = 120^\circ$, veure figura 29.E.

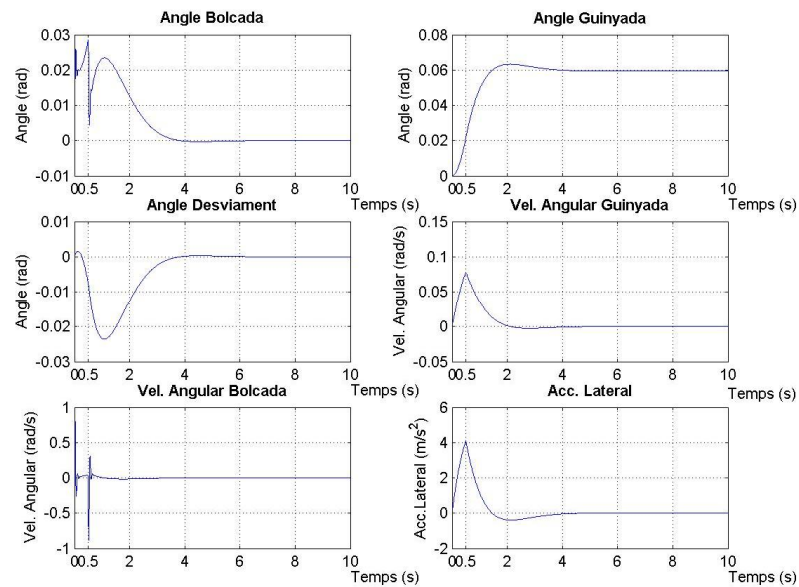


Figura 29.E. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$\delta = 120^\circ$ del cas 1.

- $\delta = 150^\circ$, veure figura 29.F.

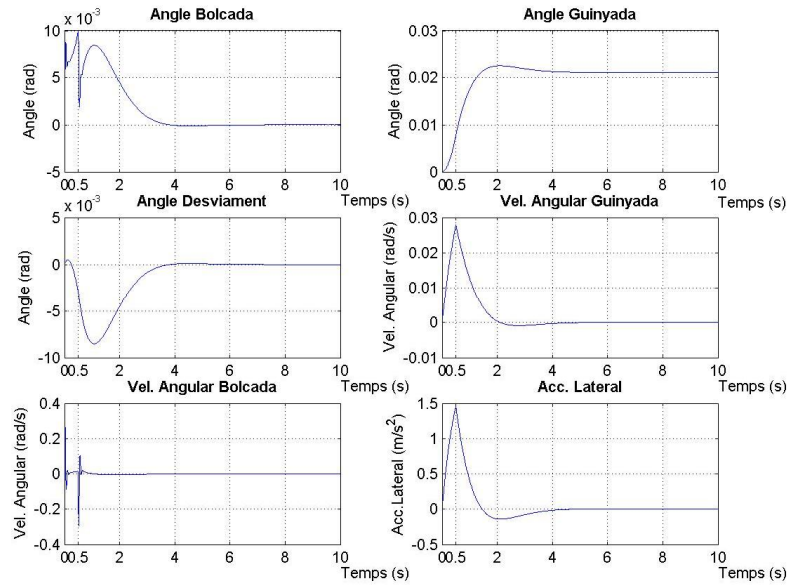


Figura 29F. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 150^\circ$ del cas 1.

- $\delta = 180^\circ$, veure figura 29.G.

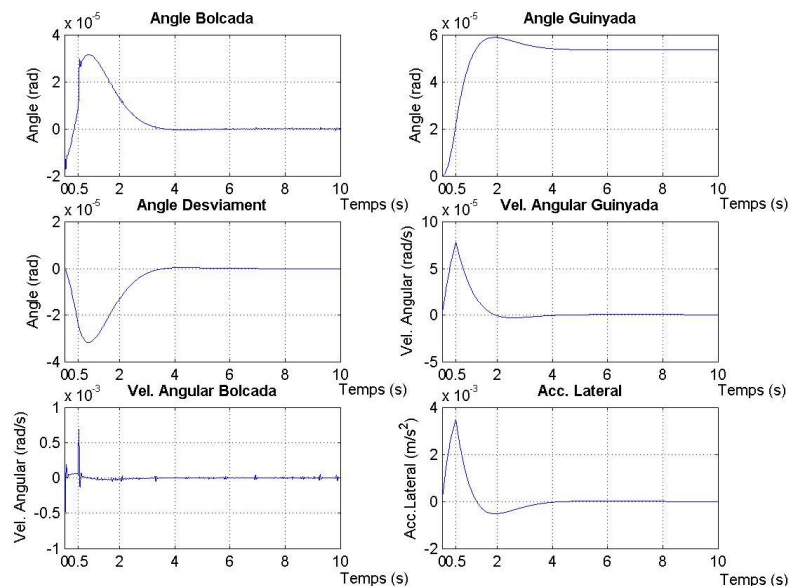


Figura 29.G. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 180^\circ$ del cas 1.

- Cas 2:

- $\delta = 0^\circ$, veure figura 30.A.

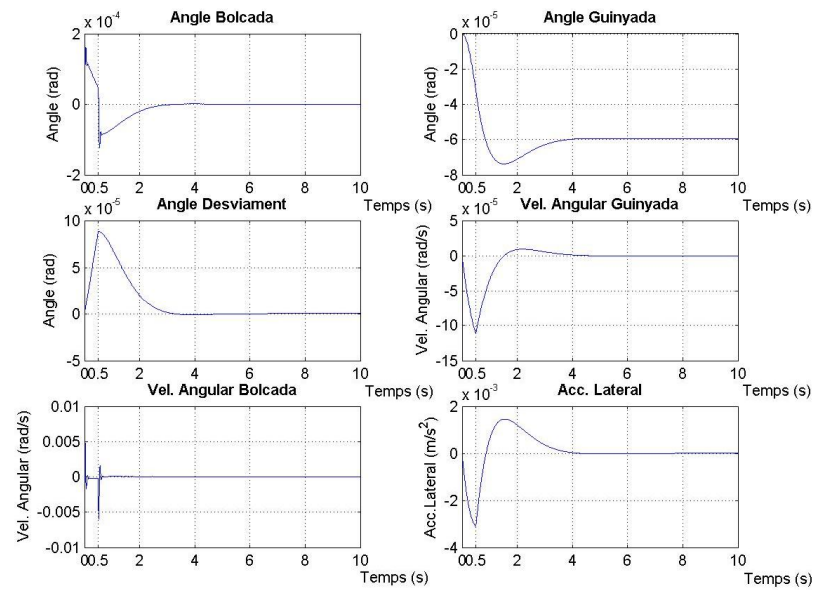


Figura. 30.A. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 0^\circ$ per al cas 2.

- $\delta = 30^\circ$, veure figura 30.B.

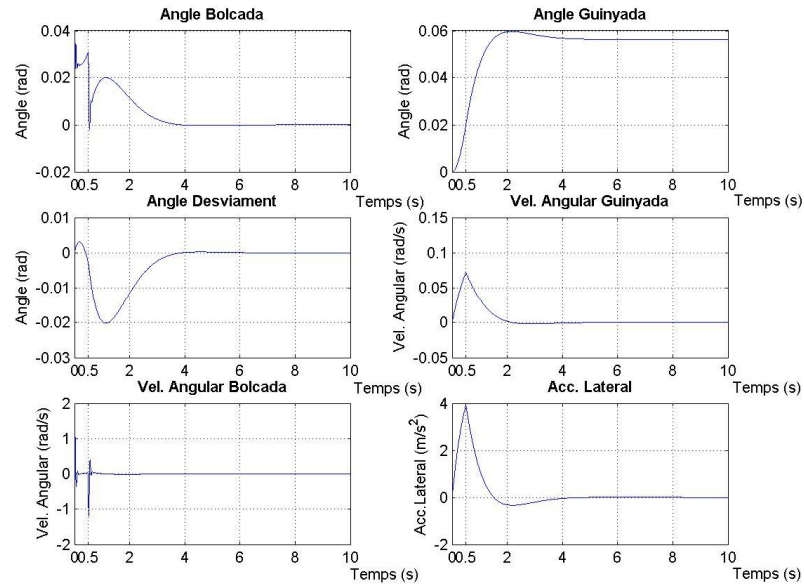


Figura 30.B. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 30^\circ$ del cas 2.

- $\delta = 60^\circ$, veure figura 30.C.

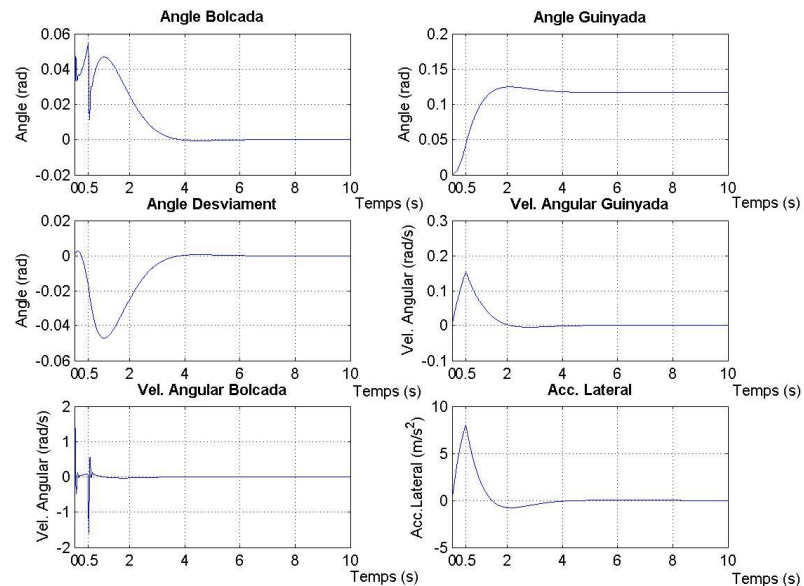


Figura 30.C. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 60^\circ$ del cas 2.

- $\delta = 90^\circ$, veure figura 30.D.

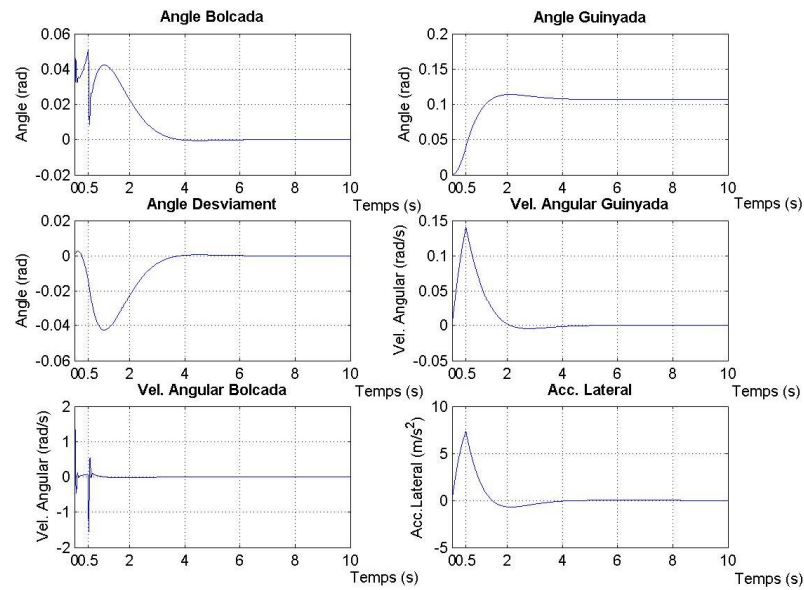


Figura 30.D. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$\delta = 90^\circ$ del cas 2.

- $\delta = 120^\circ$, veure figura 30.E.

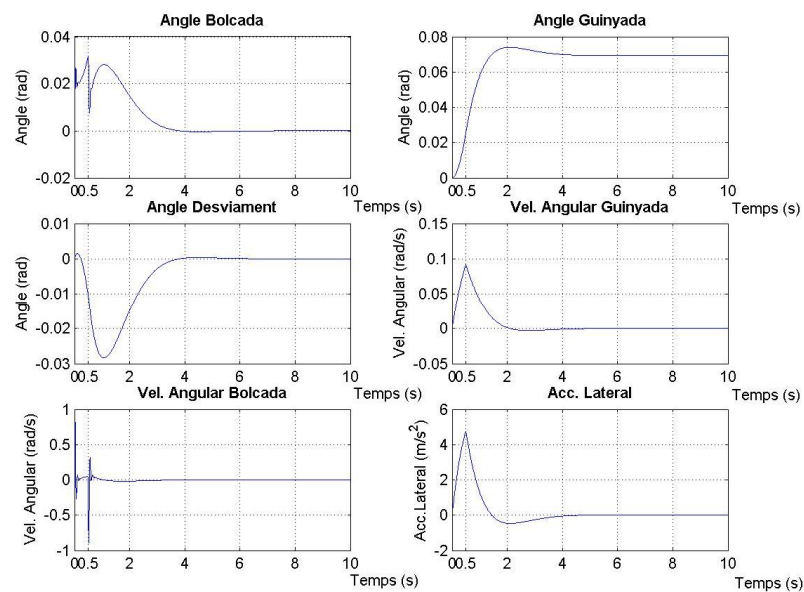


Figura 30.E. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$$\delta = 120^\circ \text{ del cas 2.}$$

- $\delta = 150^\circ$, veure figura 30.F.

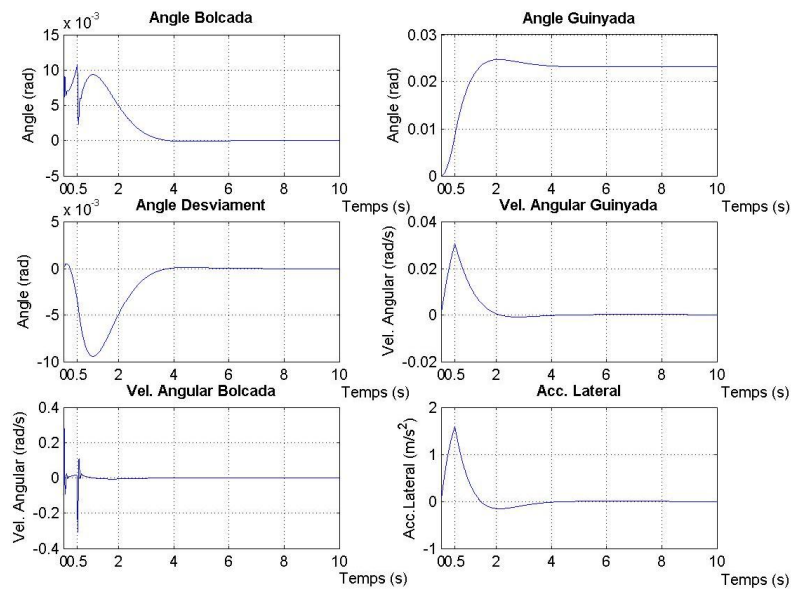


Figura 30.F. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$$\delta = 150^\circ \text{ del cas 2.}$$

- $\delta = 180^\circ$, veure figura 30.G.

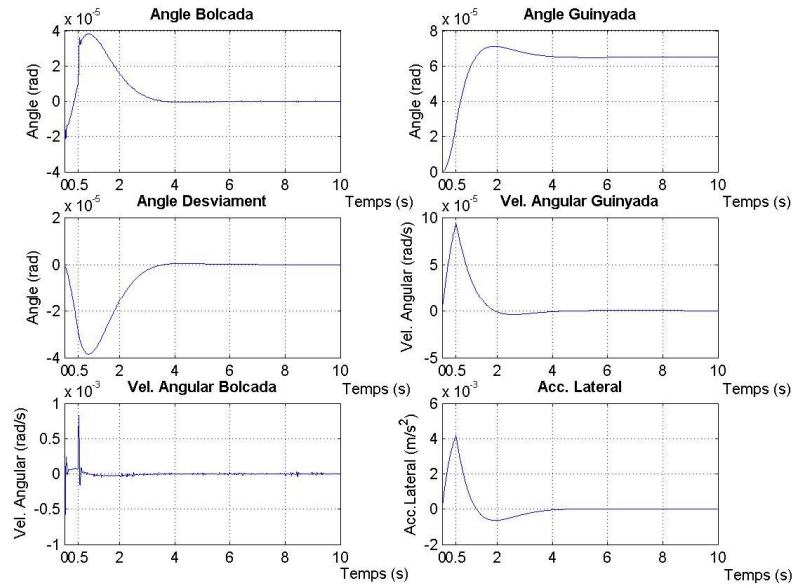


Figura 30.G. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$$\delta = 180^\circ \text{ del cas 2.}$$

- Cas 3:

- $\delta = 0^\circ$, veure figura 31.A.

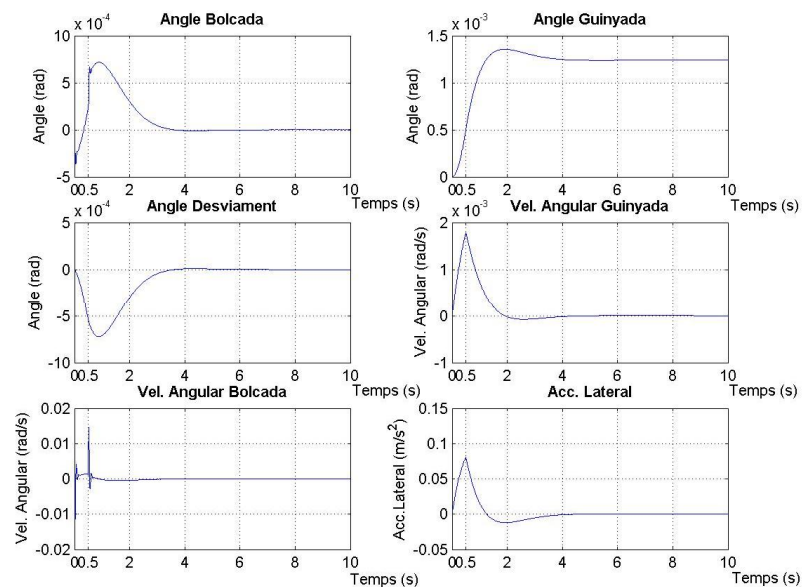


Figura. 31.A. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 0^\circ$ del cas 3.

- $\delta = 30^\circ$, veure figura 31.B.

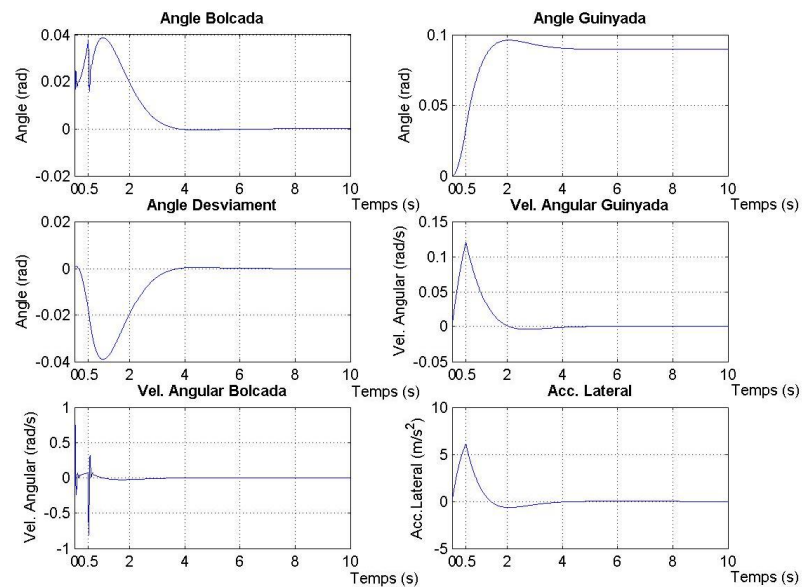


Figura 31.B. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 30^\circ$ del cas 3.

- $\delta = 60^\circ$, veure figura 31.C.

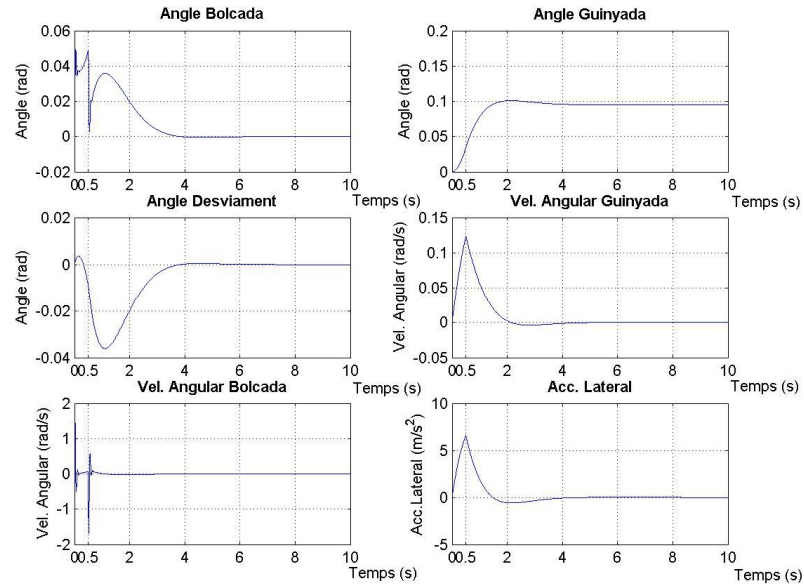


Figura 31.C. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 60^\circ$ del cas 3.

$\delta = 60^\circ$ del cas 3.

- $\delta = 90^\circ$, veure figura 31.D.

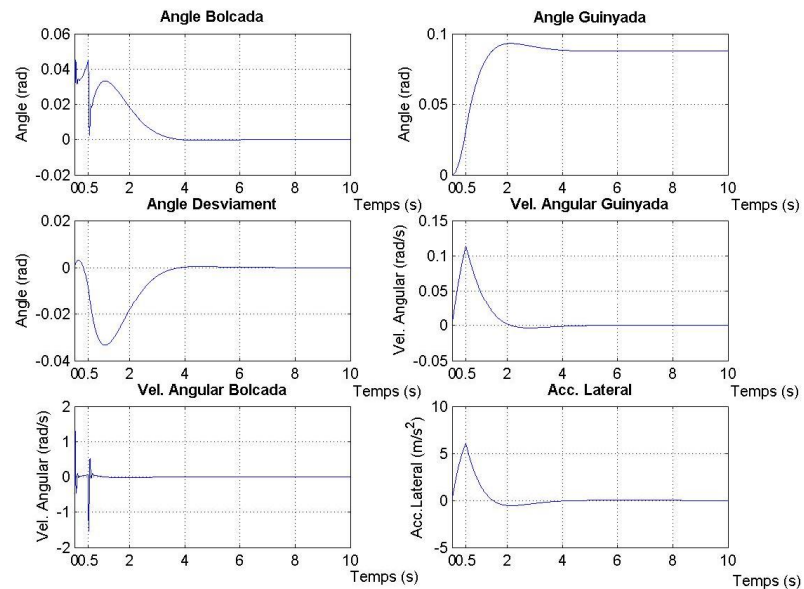


Figura 31.D. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 90^\circ$ del cas 3.

$\delta = 90^\circ$ del cas 3.

- $\delta = 120^\circ$, veure figura 31.E.

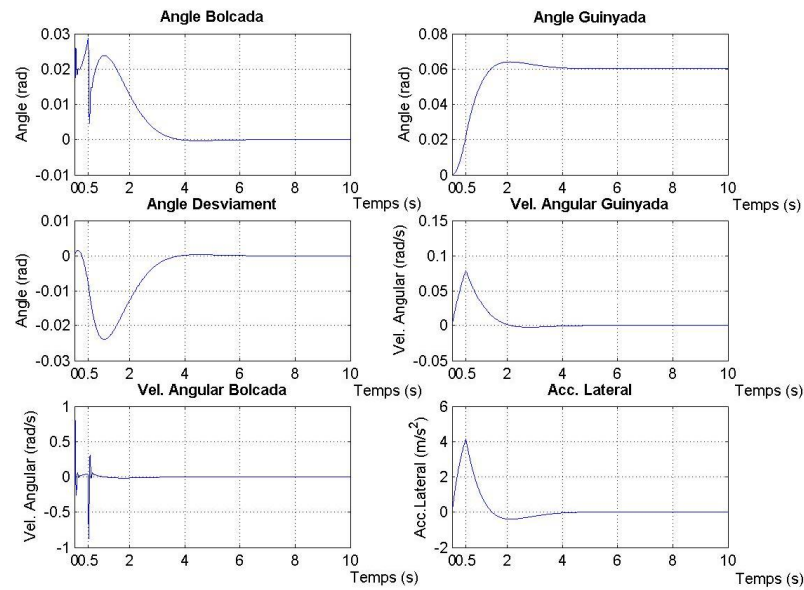


Figura 31.E. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$\delta = 120^\circ$ del cas 3.

- $\delta = 150^\circ$, veure figura 31.F.

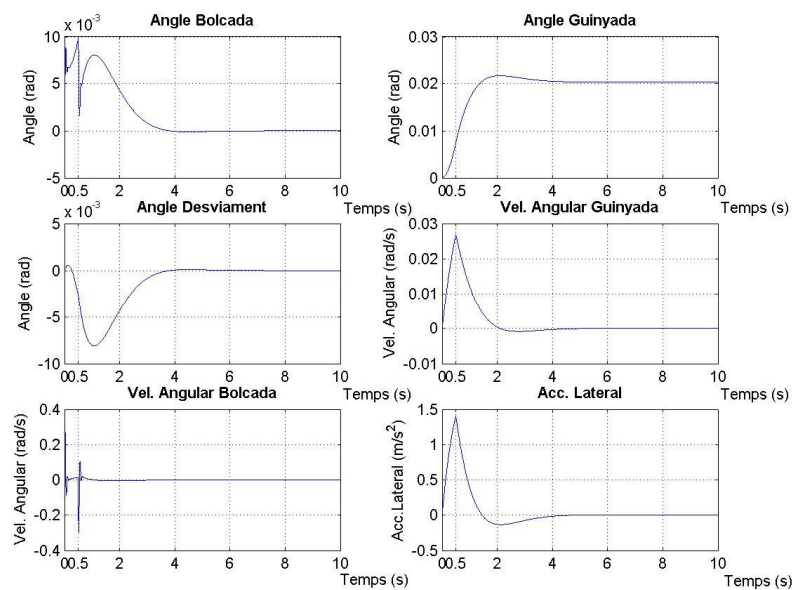


Figura 31.F. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 150^\circ$ del cas 3.

- $\delta = 180^\circ$, veure figura 31.G.

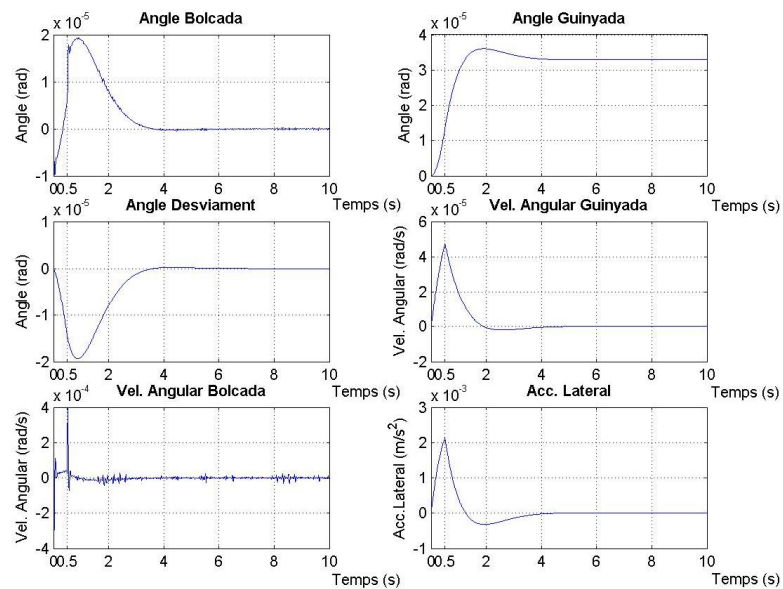


Figura 31.G. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 180^\circ$ del cas 3.

- Cas 4:

- $\delta = 0^\circ$, veure figura 32.A.

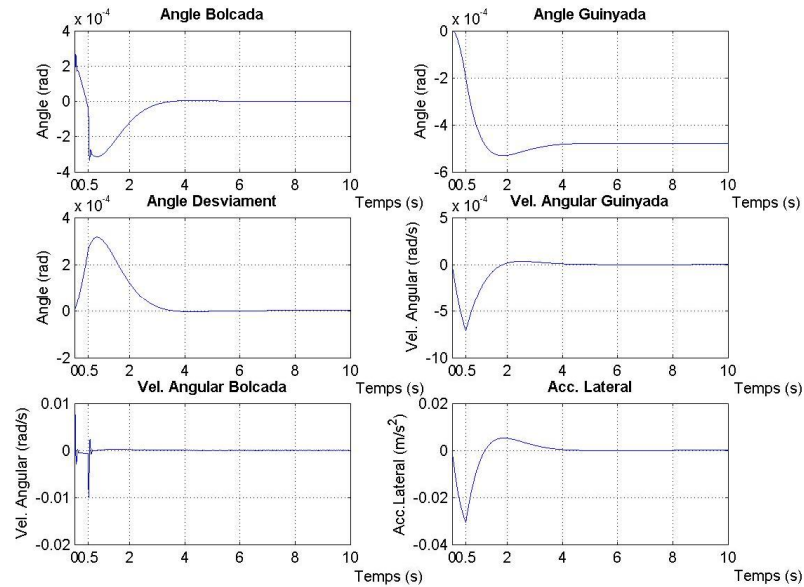


Figura. 32.A. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 0^\circ$ del cas 4.

- $\delta = 30^\circ$, veure figura 32.B.

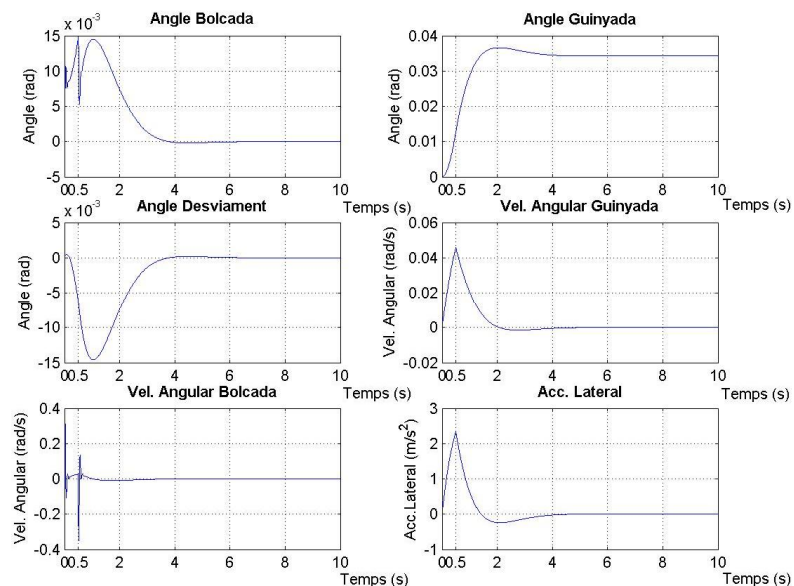


Figura 32.B. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 30^\circ$ del cas 4.

- $\delta = 60^\circ$, veure figura 32.C.

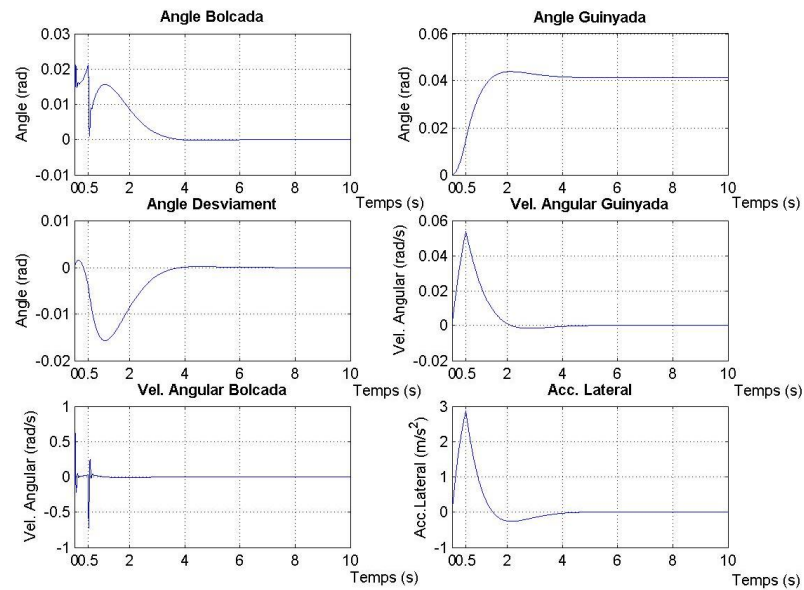


Figura 32.C. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$\delta = 60^\circ$ del cas 4.

- $\delta = 90^\circ$, veure figura 32.D.

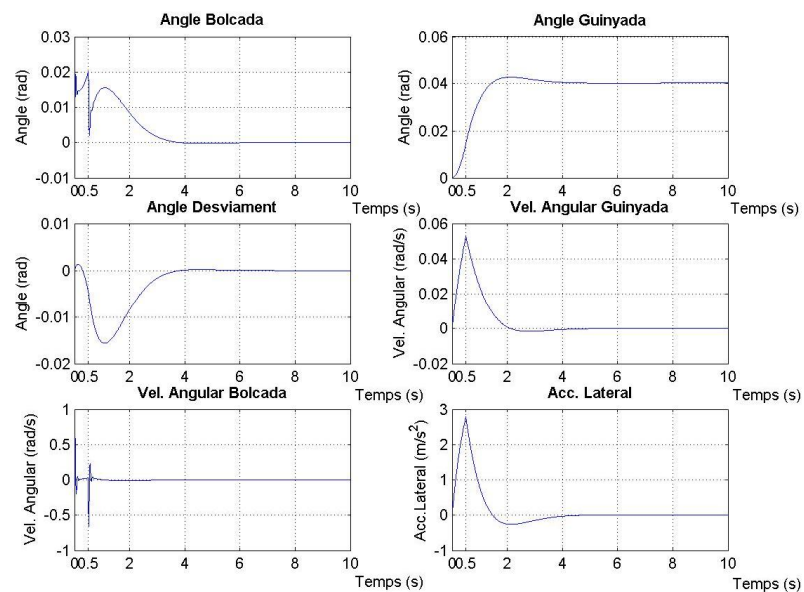


Figura 32.D. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$$\delta = 90^\circ \text{ del cas 4.}$$

- Cas 5:

- $\delta = 0^\circ$, veure figura 33.A.

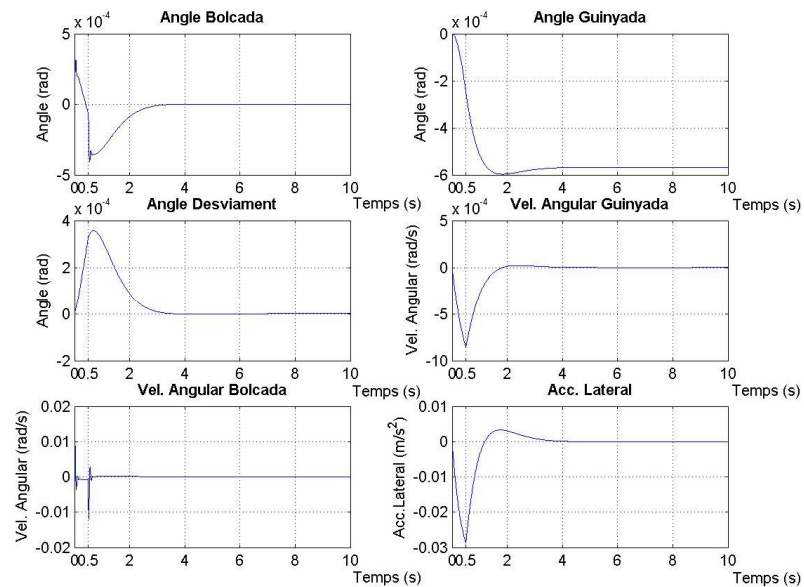


Figura. 33.A. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí

$$\delta = 0^\circ \text{ del cas 5.}$$

- $\delta = 30^\circ$, veure figura 33.B.

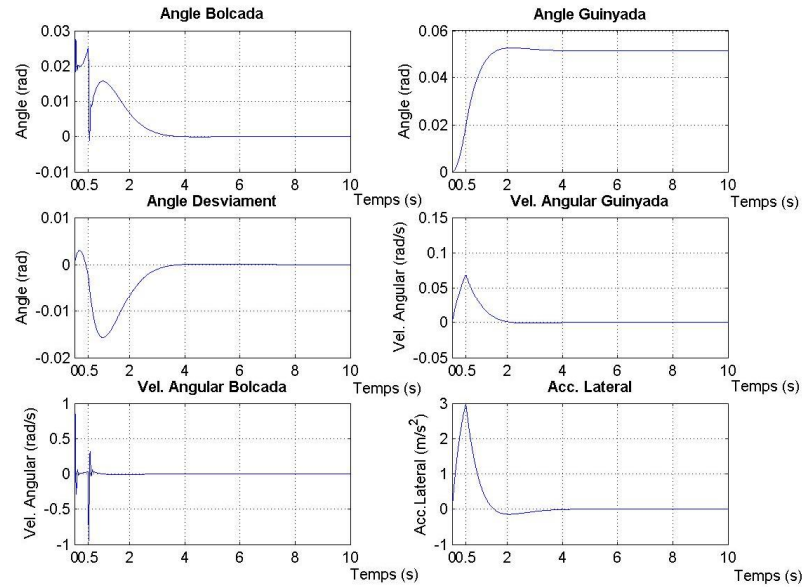


Figura 33.B. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 30^\circ$ del cas 5.

- $\delta = 60^\circ$, veure figura 33.C.

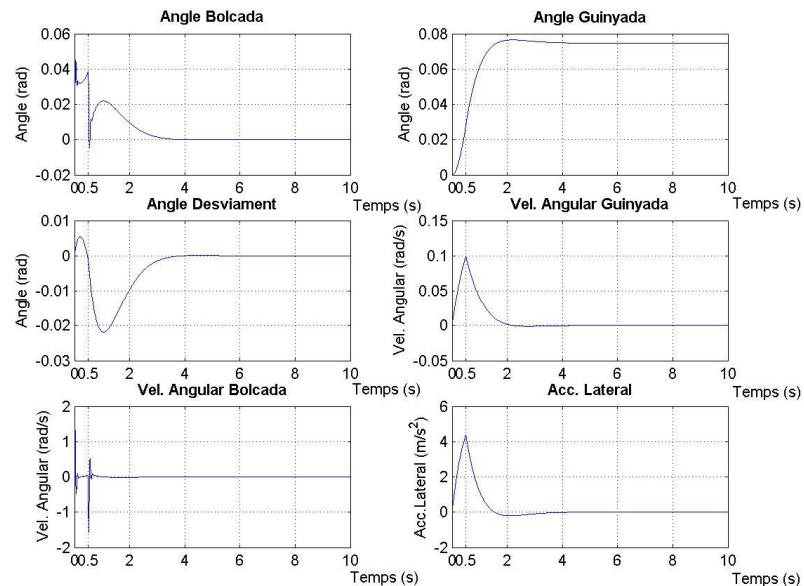


Figura 33.C. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 60^\circ$ del cas 5.

- $\delta = 90^\circ$, veure figura 33.D.

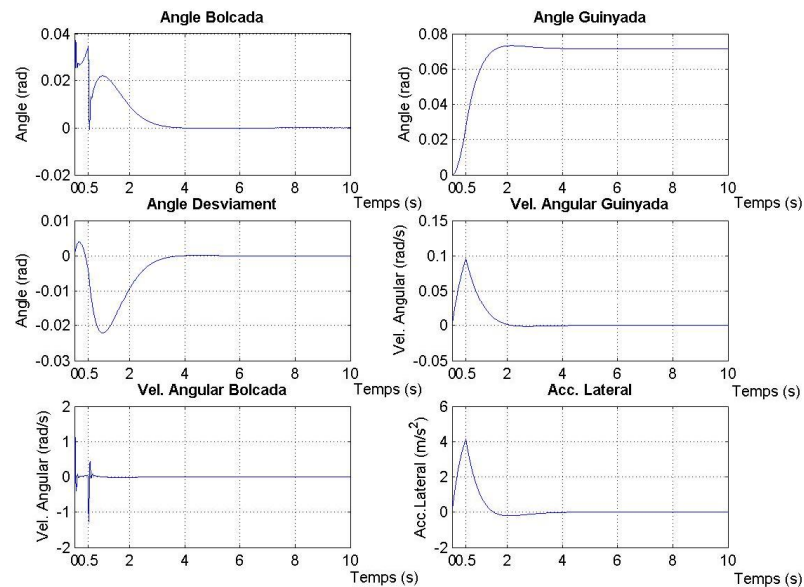


Figura 33.D. Evolució dels coeficients d'integració definits a l'annex F a partir d'integrar numèricament les equacions (5)-(7). Per $t > 0,5$ s el forçament associat al vent és nul. Aquí $\delta = 90^\circ$ del cas 5.

4.5.- Índex de perillositat

Basant-nos en l'estudi realitzat per Liu et al. (1998), es pot definir un índex de perillositat per a les condicions dinàmiques d'un vehicle de gran tonatge en funció de l'acceleració lateral i l'angle de bolcada ($^\circ$), tal i com es mostra a la figura 34.

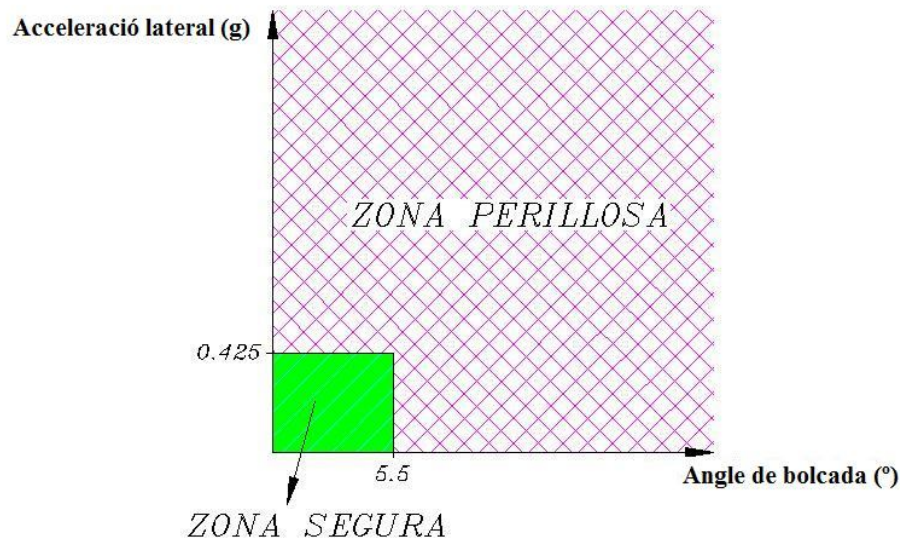


Figura. 34 Índex de perillositat extreta a partir de les consideracions de Liu et al. (1998). L'acceleració lateral s'expressa en unitats de g (l'acceleració de la gravetat).

D'aquesta forma, de l'estudi de Liu et al. (1998) sobre vehicles pesats, es poden definir dues zones en funció de la perillositat estimada de la situació. Per suposat, es poden trobar altres estudis més elaborats referits a la determinació de la perillositat d'una determinada situació en funció de més variables dinàmiques. Aquí, però, ens limitem a aquest senzill criteri de passa – no passa basant-nos en els valors absoluts per l'angle de bolcada i per l'acceleració lateral. Per fer-ho, hem seleccionat els valors màxims d'angle de bolcada i d'acceleració lateral per a cada cas i per a cada angle d'incidència del vent (veure taula 40.A i 40.B) a partir dels resultats obtinguts de la integració numèrica de les equacions dinàmiques.

δ	CAS 1		CAS 2		CAS 3	
	Angle bolcada (°)	Acc. Lateral (g)	Angle bolcada (°)	Acc. Lateral (g)	Angle bolcada (°)	Acc. Lateral (g)
0°	0,085	0,017	0,009	0,0001	0,041	0,008
30°	2,060	0,571	1,982	0,401	2,220	0,622
60°	2,814	0,673	3,122	0,818	2,826	0,671
90°	2,585	0,627	2,916	0,751	2,578	0,619
120°	1,637	0,417	1,819	0,485	1,650	0,422
150°	0,571	0,148	0,612	0,162	0,559	0,143
180°	0,002	0,0004	0,002	0,0004	0,001	0,0002

Taula. 40.A. Valors màxims de l'angle de bolcada i l'acceleració lateral pels casos 1, 2 i 3.

δ	CAS 4		CAS 5	
	Angle bolcada (°)	Acc. Lateral (g)	Angle bolcada (°)	Acc. Lateral (g)
0°	0,015	0,00053	0,018	0,0003
30°	0,846	0,238	1,574	0,304
60°	1,216	0,292	2,582	0,446
90°	1,153	0,283	2,122	0,422

Taula 40.B. Valors màxims de l'angle de bolcada i l'acceleració lateral pels casos 4 i 5.

Aquests resultats els hem representat gràficament a la figura 35 per als cinc casos analitzats, on s'inclou la identificació de la direcció de l'angle del vent en cada cas.

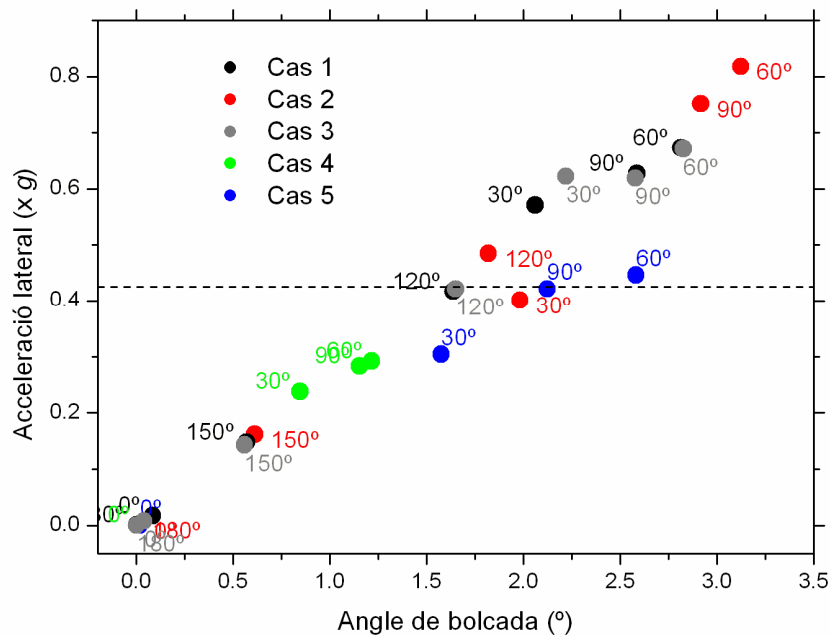


Figura. 35 Acceleració lateral i angle de bolcada per a cadascun dels 5 casos analitzats en el projecte i per als diferents angle d'incidència del vent.

5.- CONCLUSIONS

En aquest projecte hem analitzat els efectes de l'acció del vent sobre l'estabilitat de vehicles pesants de transport de viatgers. L'estudi ha consistit en la realització de les següents etapes:

1.- Etapa de validació del programari de simulació de la dinàmica del fluid.

La utilització de forces, i dels moments associats, degut a l'acció del vent esdevé essencial per a l'assoliment dels objectius proposats en aquest estudi. Per això, cal validar el programari de simulació de dinàmica de fluids (STAR-CCM+) per a la realització d'estudis concrets d'aerodinàmica externa. S'han efectuat 28 simulacions del flux aerodinàmic sobre un cos de referència, anomenat cos d'Ahmed, i els resultats s'han comparat amb les dades experimentals proporcionades per altres autors. La diferència entre els valors del coeficient d'arrossegament mesurat i simulat són, en simulacions amb una mida d'elements prou petita, inferiors al 5% per a una gran varietat de cossos d'Ahmed amb lleugeres modificacions geomètriques en la part posterior. A més, les simulacions també reproduïen el pic del coeficient d'arrossegament que s'observa experimentalment quan la part posterior del vehicle passa d'una inclinació de 25° a una de 35°. Tot l'anterior reafirma la utilització del programari de simulació STAR-CCM+ per a simulacions d'aerodinàmiques externes.

2.- Etapa de simulació de les forces del vent sobre la carrosseria del vehicle.

Una vegada l'etapa anterior ha servit per a validar el programari de simulació, aquest ha estat utilitzat per obtenir els valors de les forces del vent resultants sobre dues carrosseries d'autocars per a diferents angles d'incidència. En general s'han analitzat 5 casos amb un total de 29 simulacions, 22 de les quals amb geometries diferents. En concret, s'ha analitzat una mateixa carrosseria d'autocar amb una velocitat del vehicle de 100,8 km/hora (la màxima legal permesa) amb un vent de 72 km/hora incidint a 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° i 180° respecta a la seva trajectòria. El mateix tipus de carrosseria a 100,8 km/hora s'ha analitzat amb un vent de 36 km/hora incidint a 0°, 30°, 60° i 90° i també a 80 km/hora amb un vent de 72 km/hora incidint a 0°, 30°, 60° i 90°. Una segona carrosseria, que disposa d'un coeficient aerodinàmic menor, s'ha analitzat amb una velocitat del vehicle de 100,8 km/hora amb un vent de 72 km/hora incidint a 0°, 30°, 60°, 90°, 120°, 150° i 180°. Les simulacions per a la

primera carrosseria s'han dut a terme, també, considerant que el terra estigués parat, el que ha permès comparar els resultats amb la simulació amb terra mòbil a la mateixa velocitat que la del vehicle.

3.- Etapa de simulació del comportament dinàmic del vehicle.

L'etapa anterior ha servit per proporcionar els valors de les forces i dels moments associats degut als efectes del vent sobre la carrosseria del vehicle. En aquesta tercera, i última etapa, s'han introduït aquestes forces i moments en les equacions que descriuen el comportament dinàmic del vehicle. D'acord amb d'altres autors, aquestes equacions s'han simplificat dins de l'aproximació anomenada de model de bicicleta. Els valors dels coeficients del model, associats a les dimensions del vehicle, al comportament dels pneumàtics, estat dels amortidors, etc., s'han extret de la literatura que analitza el comportament d'autocars o s'ha extret d'informació tècnica de vehicles en ús. Les equacions dinàmiques formen un conjunt d'equacions diferencials ordinàries (ODE) de primer ordre que determinen l'evolució, entre d'altres, de l'angle de bolcada, del de derrapada i de l'acceleració lateral. Aquestes ODEs s'han integrat numèricament a partir del programari Matlab que ens ha permès conèixer els valors màxims de l'angle de bolcada i de l'acceleració lateral quan el vehicle està sotmès a una ràfega de vent. A partir d'aquests valors, s'ha establert si el vehicle superava un determinat índex de perillositat i, per tant, es recomanava reduir la velocitat.

De forma més concreta, dels resultats aquí obtinguts podem concloure que:

1. Les simulacions amb un terra que, en un sistema de referència mòbil amb el vehicle, es mogui amb la mateixa velocitat que el vehicle però amb sentit oposat, comparades amb les obtingudes mitjançant acceptar el terra estàtic no comporten diferències apreciables (veieu els casos 1 i 3 a la figura 35). D'aquesta forma, s'accepta un resultat igual per a terra mòbils que per a terra parats. En geometries més complexes, incloent, per exemple, els efectes de les rodes, aquesta conclusió no necessàriament s'hauria de mantenir.
2. Les simulacions per als casos en què l'angle d'incidència del vent és 0° o 180° respecte a la trajectòria del vehicle mostren uns valors pràcticament negligibles

- d'acceleració lateral i d'angle de bolcada (veieu la figura 35). Això és especialment encoratjador ja que en aquests casos esperem, per simetria del problema, valors nuls de les forces i moments que provoquen la bolcada, derrapatge i desplaçament lateral. Aquest resultat esdevé, per tant, coherent amb el que s'espera de les simulacions.
3. Els valors d'angle de bolcada i d'acceleració lateral per a una carrosseria amb un coeficient aerodinàmic inferior no són necessàriament inferiors als que s'obtenen per a una carrosseria amb un coeficient aerodinàmic més elevat (veieu els casos 1 i 2 a la figura 35). Això, que en principi pot sorprendre, té a veure amb el comportament del flux al voltant de l'objecte, que depèn molt de l'angle d'incidència del vent. Així, per un angle d'incidència de 30° , la carrosseria amb major coeficient aerodinàmic sí que es comporta millor. Per a angles superiors (60° i 90°), però, succeeix a l'inrevés, esdevenint la carrosseria menys eficient aerodinàmicament uns valors més segurs per a les variables que determinen la perillositat de la situació.
 4. A gran velocitat (100 km/h), el cas més desfavorable per al comportament dinàmic del sistema és la d'un vent que incideixi a 60° desviats respecte a la trajectòria del vehicle (veieu la figura 35). A velocitats inferiors a 80 km/h, el comportament dinàmic per a un vent a 90° és similar a l'observat per a un angle de 60° pel que respecte a l'acceleració lateral (veieu el cas 5 de la figura 35). A mesura que es redueixi la velocitat del vehicle, s'espera que la situació sigui més compromesa, des del punt de vista de l'estabilitat, per angles d'incidència majors. Finalment, per al vehicle en repòs, la situació més desfavorable s'obté per a un angle d'incidència de 90° (vent incident perpendicularment a la carrosseria del vehicle).
 5. Una reducció a la meitat en la intensitat del vent (de 72 km/h a 36 km/h com en el cas 4 a la figura 35), redueix a la meitat (i, en alguns casos, més) els índexs de perillositat (acceleració lateral i angle de bolcada). Això provoca que els resultats siguin gairebé independents de l'angle d'incidència si aquest es troba comprès entre 30° i 90° . En efecte, en aquests rang d'angles el comportament dinàmic del vehicle és molt similar per a velocitat del vent reduïdes. De fet, això és degut a que els valors dels índexs són tan reduïts que les diferències entre diferents situacions per a angles d'incidència diversos siguin poc apreciables.

6. De la figura 35 es desprèn que hi ha una relació gairebé lineal entre acceleració lateral i angle de bolcada. Això també es pot deduir de les gràfiques on es mostra l'evolució de les variables a partir de la integració amb el programari Matlab. En efecte, en aquestes gràfiques s'observa, durant el període en què actua el vent (de 0 a 0,5 s), un comportament semblant per a la variable angle de bolcada i la variable acceleració lateral. D'aquí es podria aproximar l'equació d'evolució per a l'angle de bolcada a una equació diferencial de segon ordre amb una única variable amb solució analítica. Aquesta solució seria sobreestimada o no dependent dels valors dels diversos coeficients que intervenen en l'equació.
7. La zona de perillositat deduïda a partir dels estudis de Liu et al. (1998) només es veu compromesa pel que respecte als valors de l'acceleració lateral. Per a l'angle de bolcada, les simulacions dutes a terme no prediuen que s'assoleixi un valor crític de $5,5^\circ$ que, encara que no comportés directament a una inestabilitat que conduís a la bolcada del vehicle, sí que podria comprometre la seva maniobrabilitat. Tanmateix, un angle de $5,5^\circ$ o superior sí que es podria assolir en situacions, aquí no analitzades, en què el vehicle es desplacés en una corba, on les forces centrífugues sobre la massa suspesa tenen uns efectes importants. Alhora, la situació amb amortidors defectuosos comportaria l'estudi amb valors diferents de determinats coeficients que, també, podrien afavorir un augment en l'angle de bolcada del vehicle. Molt interessant aquí seria investigar els efectes d'utilitzar carrosseries de diferent mida i volum.
8. Ha quedat ben establert el procediment per determinar les condicions de perillositat per a la circulació de vehicles autocars en ràfegues de vent. Tanmateix, la realització d'un sistema semiautomàtic d'avís hauria d'utilitzar una base de dades on, en funció de la velocitat del vent, angle d'incidència, velocitat del vehicle i tipus de carrosseria, s'obtinguessin els valors de l'angle de bolcada i d'acceleració lateral i, d'aquí, suggerís reduccions en la velocitat del vehicle adients per reduir-ne la perillositat fins assolir la regió de conducció acceptable.

➤ **Propostes de treball futur**

Un treball com el que s'ha dut a terme deixa moltes línies d'investigació obertes. Aquí proposem les següents.

1. Comparativa del comportament dinàmic del vehicle utilitzant diferents models. Això és especialment interessant, ja que el model de bicicleta aquí utilitzat és el més senzill possible. Tanmateix, existeixen models més elaborats que tenen en compte molts més graus de llibertat i que reproduïxen amb més fidelitat el comportament real del vehicle.
2. Determinació de la sensibilitat de la solució a canvis en els paràmetres i coeficients del model. Aquest punt, lligaria amb l'anterior, ja que, aquí, s'investigaria els efectes en la solució de variar els coeficients que apareixen en el model dinàmic. Per exemple, canvis en els coeficients dels pneumàtics, molles, amortidors, etc., que són elements que, per desgast en el funcionament, al llarg de la seva vida útil tenen un rang de variació important en el seu comportament. En el present estudi hem pres els valors dels coeficients per a components nous.
3. Estudi de ràfegues amb diferent durada i freqüència. Aquí, i d'acord amb l'estudi de Noguchi (1986), hem analitzat els efectes d'una ràfega de vent de durada 0,5 s. Seria molt interessant que estudis futurs analitzessin el comportament per a durades superiors a 0,5 s i compararessin els resultats amb situacions per a vent estacionari. De fet, amb les gràfiques mostrades de l'evolució de les variables a partir de la integració en Matlab, s'observa que, la major part d'aquestes, queden truncades a 0,5 s i que, probablement, els valors serien superiors si es permetés una durada superior per a la ràfega de vent.
4. Finalment, proposem l'estudi de les condicions dinàmiques del vehicle tenint present els efectes de direccionalitat del vehicle. Això comportaria la simulació dinàmica del vehicle en trams en corbes de diferent radi. De gran interès, aquí, és determinar l'evolució de l'angle girat pel volant de direcció, que repercuteix directament amb la maniobrabilitat del vehicle.

6.- RESUM DEL PRESSUPOST

El pressupost total de l'estudi realitzat de la influència del vent en l'estabilitat de vehicles pesants de transport de viatgers, tenint en compte els costos de recerca i desenvolupament, els costos de l'amortització dels equips utilitzats i els costos de redacció és de tretze mil tres-cents seixanta-quatre euros.....**13.364 €.**

7.- RELACIÓ DE DOCUMENTS

Document N° 1: Memòria i Annexos

- Annex A: Antecedents del cos d'Ahmed.
- Annex B: Mecànica de fluids.
- Annex C: Fonaments d'aerodinàmica.
- Annex D: Aerodinàmica de vehicles.
- Annex E: Procés de la simulació CFD.
- Annex F: Model dinàmic del vehicle.
- Annex G: Procés de mallat amb "ANSYS ICEM 10.0".
- Annex H: Procés de simulació amb "STAR CCM+".
- Annex I: Realització de càlculs amb MATLAB.
- Annex J: Esquemes de disseny.

Document N° 2: Pressupost

8.- BIBLIOGRAFIA

- **Llibres:**

Ahmed S. R., Ramm R., Faltin G., Some salient features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE technical Paper Series 840300, Detroit, 1984.

Anderson, J. D. Fundamentals of Aerodynamics. M_C Graw-Hill. 1991.

Bruce R, Munson., Donald F, Young., Theodore H, Okijshi. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Editorial Limusa Wiley. 2000.

Cheli F., Belforte P., Melzi S., Sabbioni E., Tomasini G., Numerical-experimental approach for evaluating cross-wind aerodynamic effects on heavy vehicles. Vehicle System Dynamics, **44**, 791-804, 2006.

Flores N., Estudi de l'eficiència aerodinàmica de vehicles pesants de transport de viatgers. Universitat de Girona. 2008.

Gerahart P, Gross R, Hochstein. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Addison Wesley Iberoamericana. 1995.

Hedrick J.K., Yi K., The effect of alternative heavy truck suspensions on flexible pavement response. Transportation Center Working Paper, 46. Universitat de California a Berkeley, 1991.

Lienhart, H., Stoots, C., Becker, S. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model (Ahmed Body). DGLR Fach Symp. Der AG STAB, Stuttgart University. 2000.

Liu P.J., Rakheja S., Ahmed A.K.W. Dynamic rollover threshold of articulated freight vehicles. Heavy Vehicle Systems, A Series of the Int. J. of Vehicle Design, Vol. 5, 3/4, 300-322. 1998.

Mataix, C. Mecànica de fluidos y máquinas hidráulicas. Ediciones el Castillo. 1982.

M_C Allen Rose, Browand Fred, Roses James. The Aerodynamics of heavy vehicles: tucks, buses, and trains. Berlin Springer, cop. 2004.

M_C Beath, Simon. Aerodinàmica del automòvil de competició. Barcelona, Ediciones CEAC. 2005.

Noguchi, H. An analysis of vehicle behaviour in a cross wind. Int. J. Of vehicle design, Special issue on vehicle Safety. P 304-317. 1986.

Pujol, T., Vázquez, M., Houzeaux, G., González, J. R., Montoro L., Pelegrí M., Alya: Programa de Mecànica Computacional Avanzada. Caso de estudio: Aerodinàmica Externa. XVII Congreso Nacional de Ingeniería Mecànica, Gijon, 2008.

Robert W. Fox, Alant T. M_C Donald. Introducción a la mecànica de fluidos. M_C Graw-Hill. 1989.

Rosa Parras, J.C. Estudio de sistemas de seguridad vial y prevención de accidentes de trafico provocados por la accion del viento. Tesi doctoral. Enginyeria Tècnica Electrònica Industrial. Escola Tècnica Superior d' Enginyers Industrials de Barcelona. Universitat Politècnica de Catalunya. 1987.

Saiz Vela, Victor. Estudi de simulació aerodinàmica del Roadster FS1. Universitat Politècnica de Catalunya. 2005.

Segel L., Murphy R., Fancher P., Ervin R., Ride and handling analysis of the AM General Transbus. Highway Safety Research Institute, Universitat de Michigan, 1972.

- **Adreces web:**

<http://venus.ceride.gov.ar/cimec>, web relacionada amb la simulació numèrica del cos d'Ahmed.

<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 CFDTM /AI*EnvironmentTM.

<http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CCMplus/>, web relacionada amb el programa de simulació numèrica.

www.cd-adapco.com/minisities/ugm_us/seatle-agenda.pdf, web relacionada amb el programa de simulació numèrica.

http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/techdoc/index.html?/access/helpdesk/help/techdoc/creating_guis/f6-15783.html, web relacionada amb el programa MATLAB.

http://europa.eu/pol/trans/index_es.htm, web relacionada amb les normes del transport a la Unió Europea.

http://www.dgt.es/portal/es/seguridad_vial/estadistica/, web de la direcció general de tràfic relacionada amb les principals xifres de sinistralitat vial a Espanya.

<http://www.gencat.net/transit/est.htm>, web del servei català de trànsit relacionada amb els anuaris estadístics d'accidents a Catalunya.

http://www.gencat.net/transit/pdf/OSVC_07.pdf, web del servei català de trànsit relacionada amb l'observatori de seguretat viària de Catalunya.

http://www.racc.es/pub/ficheros/adjuntos/adjuntos_dossier_autocars_jzq_688ff8b7.pdf, web del RACC relacionada amb la seguretat en els autocars.

9.- GLOSSARI

Aerodinàmica: branca de la mecànica de fluids que s'ocupa del moviment de l'aire i altres fluids gasosos, i de les forces que actuen sobre els cossos que es mouen en aquests fluids.

C_D : coeficient relacionat amb 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 : coeficient 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: força d'arrossegament que provoca la disminució de la velocitat d'un cos en un fluid degut majoritàriament a una disminució de la pressió en la part posterior del mateix respecte la part davantera. Comunament se'l coneix amb el nom de resistència.

Lift: terme que consisteix en la força ascensional que provoca l'aire en moviment sobre un cos. També se'l coneix per sustentació.

Flux laminar: flux que es dona quan les partícules fluides es desplacen en capes paral·leles amb molt poca barreja.

Flux turbulent: flux que es dona quan les partícules fluides es desplacen aleatòriament i a diferents velocitats, donant lloc a desestabilitzacions del flux.

Fluid: són totes aquelles substàncies en estat líquid o gasos que degut a la seva baixa cohesió molecular, no mantenen la seva forma, característica que permet que flueixin i adoptin la forma del recipient que les contingui.

Flux: Correspon a un fluid en moviment.

Estela: és la zona on la trajectòria dels flux no és la que es considera òptimament energètica, entenent per aquesta definició que no es produeix desprendiment de la capa límit ni es formen

vòrtex. Així, l'estela és la zona on es posen de manifest els efectes de la turbulència i els remolins.

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

CFD: Acrònim de dinàmica de fluids computacional. Per extensió, s'anomenen CFDs als programaris de simulació numèrica de la dinàmica de fluids. Aquests es basen, principalment, en les equacions de Navier-Stokes.

ANSYS ICEM: programa utilitzat per generar els diferents mallats dels models a simular.

Elements finits: és un modelat d'elements discrets de volum i superfícies a estudiar.

Malla: entitats físiques utilitzades per resoldre problemes de simulació format per un conjunt de cel·les i nodes, dels quals els primers estan units pels últims.

Nodes: punts d'unió dels elements que formen la malla. La disposició i quantitat d'aquets determina la densitat de la malla.

Vòrtex: moviment representatiu d'un règim turbulent.

STAR-CCM+: programa utilitzat per realitzar la simulació numèrica dels diferents elements mallats.

Rinhoceros: programa de disseny tridimensional especialitzat en el modelat de superfícies complexes. L'hem utilitzat per crear les diferents geometries dels models utilitzats en el present projecte.

Cos d'Ahmed: cos de geometria simple que reté les principals característiques de 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.

10.- AGRAÏMENTS

Vull agrair moltíssim l'esforç, dedicació i paciència al meu tutor, el Dr. Antoni Pujol i Sagaró perquè ha fet possible que aquest projecte es dugués a terme.

També vull donar les gràcies a tots els meus amics per tot el seu suport i ajuda, i molt especialment a en Narcís Flores Rost.

I per sobre de tot als meus pares, en Ramiro i la M^aLluïsa, que sempre m'han donat suport en tot. Sense la seva dedicació i el seu esforç res hagués estat possible.

ANNEX A

ANNEX A: ANTECEDENTS DEL COS D'AHMED

A.1.- Interès del cos d'Ahmed

La indústria de l'automòbil té una gran exigència en disposar de mètodes de simulació fiables capaços d'afrontar amb èxit l'estudi virtual del flux d'aire turbulent al voltant dels vehicles. El model de referència Ahmed és un tipus genèric de cotxe amb una inclinació variable a la part posterior. Aquest cos s'utilitza freqüentment com a valor de referència en casos de prova per aquests tipus de fluxos. Malgrat la relativa simplicitat de la geometria del cos d'Ahmed, el flux d'aire que es produeix al seu voltant conserva algunes de les principals característiques del flux extern al voltant de les carrosseries de turismes.

La definició i les característiques del cos d'Ahmed es van descriure en el treball experimental desenvolupat per Ahmed et al (1984). En ell, es demostra que la major part de la resistència del cos es deu a la pressió d'arrossegament, que és generada a la part posterior del cos. L'associació "Models for Vehicle Aerodynamics" (MOVA) amb els seus socis de consorci (TU Delft, Universitat de Manchester, LSTM, Electricite de France, AVL List i PSA Peugeot Citroen) van estar d'acord en promocionar tant estudis de simulació com d'experimentals amb la forma del vehicle utilitzat per Ahmed, conegut com el cos d'Ahmed, amb les seves dimensions reals i dos angles diferents per a la part posterior del vehicle ($\varphi = 25^\circ$ i $\varphi = 35^\circ$).

A més, conjuntament amb l'associació European Research Community on Flow, Turbulence and Combustion (ERCOFTAC), es van proposar un gran nombre d'estudis de simulació numèrics per validar els models de turbulència en l'estudi de l'aerodinàmica externa del model del cos d'Ahmed.

A través d'associacions com ERCOFTAC i MOVA podem disposar d'una gran base de dades experimentals i de simulació per a diferents configuracions del cos d'Ahmed i, així, poder validar els programes CFD que es desenvolupen i/o s'utilitzen.

A.2.- Estudi experimental de cos d'Ahmed

En aquest apartat expliquem l'estudi experimental que va dur a terme l'associació MOVA juntament amb els seus socis de consorci.

A.2.1.- Introducció

La regió del flux que presenta la major contribució a la força d'arrossegament d'un cotxe, i que comporta greus problemes tant per a les prediccions numèriques com també per als estudis experimentals, és la distribució de l'aire que es forma al darrera del cotxe (estela). El lloc en el qual el flux se separa determina la mida de la zona de separació i, conseqüentment, la força d'arrossegament. Clarament, una simulació més exacta del comportament de l'estela del flux així com del procés de separació esdevé essencial per a la precisió de les prediccions de les forces d'arrossegament. El cos de prova anomenat cos d'Ahmed es mostra a la figura A.1, on les dimensions reals són en mm. La majoria d'estudis experimentals i de simulació han utilitzat dos angles d'inclinació posteriors del cos (25° i 35°). Entremig d'aquests angles es troba l'angle crític de 30° en el qual té lloc el pic en el coeficient d'arrossegament (veure figura A.2).

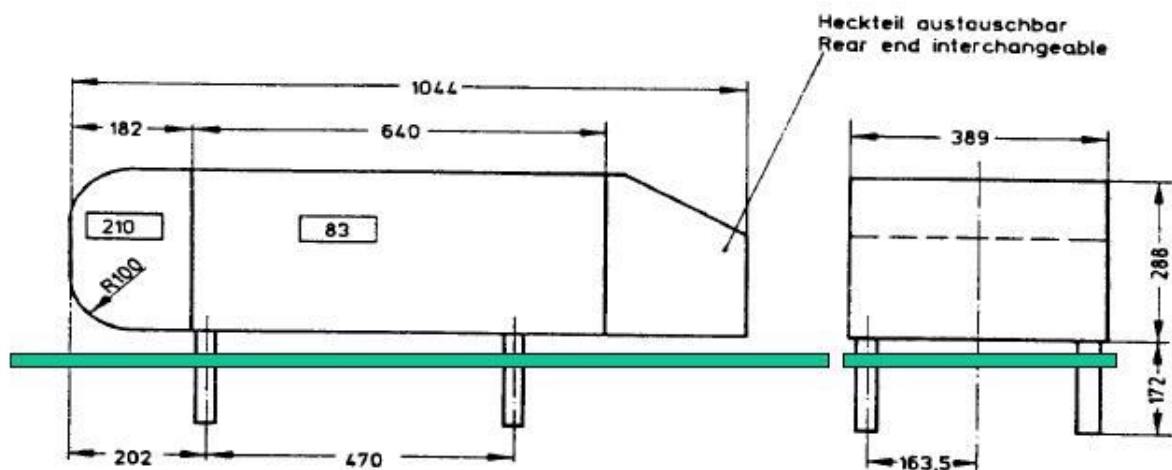


Figura A.1. Esquema del cos d'Ahmed (Ahmed, 1984)

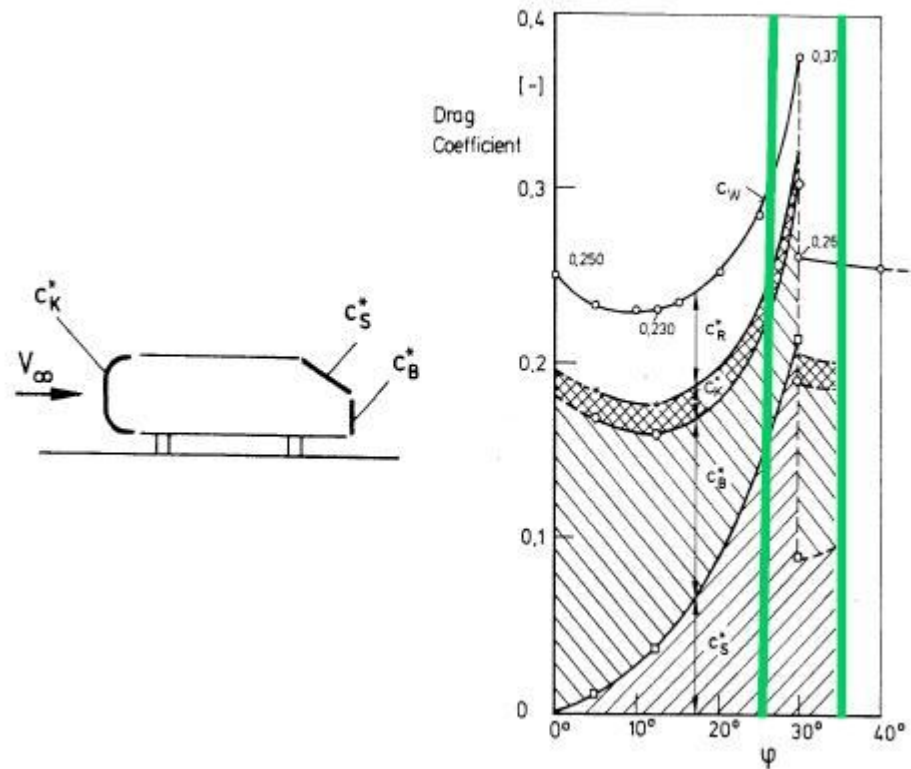


Figura A.2. Coeficients d'arrossegament característics pel cos d'Ahmed per diversos angles d'inclinació de la part posterior del cos (Ahmed, 1984). Els angles de 25° i 35° són els que usualment s'estudien.

Recentment, el cos d'Ahmed va ser muntat en la secció de proves del túnel de vent (Lehrstuhl für Strömungsmechanik, Universität Erlangen-Nürnberg) LSTM (veure figura A.3) i es van fer mesures detallades del perfil de velocitats al voltant d'aquest cos. Els experiments es van dur a terme en el túnel de vent de baixa velocitat LSTM, en un centre amb retorn tancat el qual pot ser configurat amb una secció de proves oberta o tancada. Els estudis presents van ser realitzats en una secció de proves oberta $\frac{3}{4}$ (és a dir, un sòl sense parets i sense sostre) El túnel de vent pot generar una velocitat de flux entre 3 i 55 m/s amb unes intensitats de turbulència mitges inferiors al 0,25%. Totes les mesures relacionades al cos d'Ahmed van ser preses amb una velocitat d'aire de 40 m/s. Per assegurar la constància de la velocitat de l'aire a la secció de proves i la temperatura d'aquest, es va fer servir un sistema de control de la retroalimentació controlat electrònicament.



Figura A.3. Fotografia del cos d'Ahmed muntant en el túnel de vent de baixa velocitat LSTM
(Lienhart et al, 2000).

Les mesures es van realitzar amb un sistema de cable calent de 2 components, el qual va ser capgirat per obtenir una tercer component de la velocitat. Els resultats mostraven que el perfil de velocitat d'entrada a la secció de proves estava ben definit i controlat, la qual cosa garantitzava unes mesures fiables per a la base de dades que permeten validar els models. També es va dur a terme una visualització de flux fent servir raigs d'oli pels dos angles del model (veure *Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model)*). La visualització mostrava patrons de flux tridimensional complexos i confirmava troballes anteriors (Ahmed, 1984) de que un petit canvi de l'angle d'inclinació situat al voltant de 30° provoca un canvi dramàtic en el patró del flux. La comparació entre les figures A.4 i A.5 il·lustra aquests canvis. La formació de vòrtex adherents i el canvi de sentit del flux per un angle d'inclinació de 25° és evident en la fotografia de raigs d'oli a la figura A.4. D'altra banda, en un angle d'inclinació de 35° resulta obvi que hi ha un desprendiment de flux (veure figura A.5).



Figura A.4. Visualització del flux de raig d'oli/sutge de la part posterior del cos d'Ahmed per un angle d'inclinació de 25° (Lienhart et al, 2000).



Figura A.5. Visualització del flux de raig d'oli/sutge de la part posterior del cos d'Ahmed per un angle d'inclinació de 35° (Lienhart et al, 2000).

Un anemòmetre de canó làser de dos components (LDA) es va instal·lar en un sistema creuat controlat per ordinador tridimensional que ja existia (la rotació de les òptiques d'enviament/recepció ofereixen un eix de creuament addicional) (segons Flow and Turbulence Structures in the Wake of a Simplified Car Model (Ahmed Model)). El LDA estava format de components òptics i electrònics basat en fibra òptica de DANTEC. Dues longituds d'ona diferents de làser es van fer servir: 514,5 nm (verd) i 488 nm (blau). Els

sistema era d'orientació amb retordisparació, la única configuració òptica possible per aquestes mesures degut a la proximitat de la reixa de mesura a la superfície del cos.

A.2.2.- Resultats de les mesures amb LDA (segons MOVA)

La figura A.6 mostra les diferents posicions de mesura emprades per (MOVA). En resum, hi ha 7500 posicions de mesura discretes localitzades en 13 plans únics.

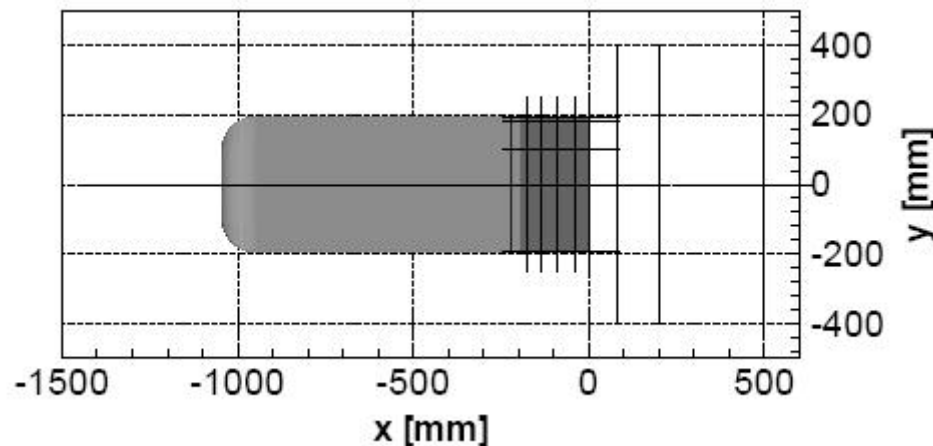


Figura A.6. Plans de mesura emprats per caracteritzar la distribució de la velocitat a prop de la superfície del cos (Lienhart et al, 2000).

Degut a que moments d'ordre estadístic superior eren d'interès (és a dir, tensors de Reynolds, $\overline{u'u'}$, $\overline{u'v'}$, etc), s'havien de prendre mesures dues vegades en cada punt de mesura - primer pels components de velocitat U i V, i llavors pels components U i W. Anàlisis estadístics preliminars indicaven que aproximadament es requeririen realitzar 40.000 mesures a cada localització per tal d'obtenir resultats estadísticament significatius. Això es tradueix en un temps de mesura màxim de 5 minuts per a cada localització. Seguint tot el procediment esquematitzat per a un interval de confiança del 95% la incertesa estadística en el flux exterior (lluny del cos d'Ahmed) pel terme mig de velocitat era inferior al 0,005% del terme mig de velocitat local. Dins de l'estela del cos d'Ahmed, on les intensitats de turbulència són molt altes i les velocitat mitjanes poden arribar a ser 0, una estimació de la incertesa en la mesura de la velocitat mitja és bastant arbitrari. Un ordre de magnitud estimat per l'interval de confiança calculat del 95% era de l'1% pel terme mig i del 1,5% per quantitats de la mitja

quadràtica (RMS). D'aquesta forma, el sistema LDA podria mesurar intensitats de turbulència tant petites com del 0,8%.

De tot l'anterior, la figura A.7 serveix com una bona visió general de les distribucions de velocitat típiques al voltant d'una inclinació de 25° del cos d'Ahmed. Els vectors de velocitat mitjana juntament amb la línia de simetria de la inclinació posterior indiquen que no es produeix cap separació del flux. Els dos vòrtex de rastreig de rotació contrària es mostren en els tres plans transversals dels gràfics de contorn de l'energia cinètica turbulent (TKE). Els pics en la TKE tenen lloc en els centres dels vòrtexs. Aquests vòrtexs són responsables de mantenir el flux adherit a la superfície inclinada per angles inferiors a aproximadament els 30°. Si pel contrari l'angle és superior a 30° el flux no s'adhereix a la superfície inclinada. En el primer cas, les estructures dels vòrtexs es prolonguen més de 500 mm més enllà de la fi del cos d'Ahmed.

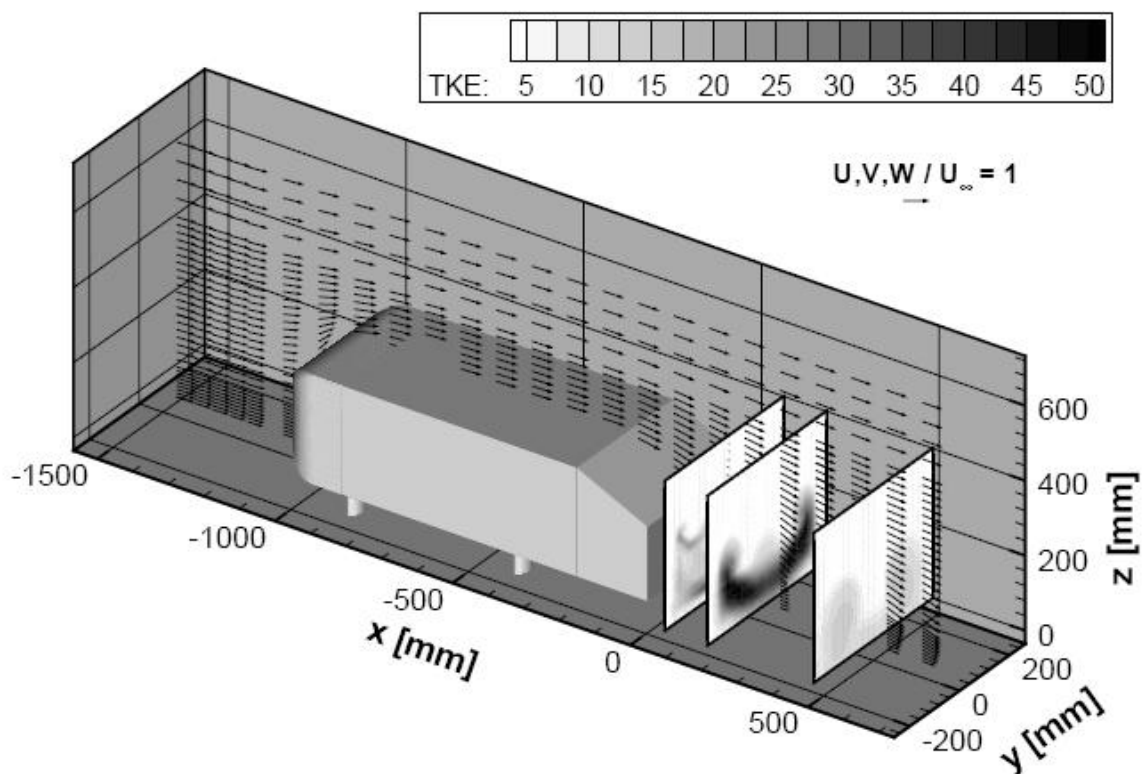


Figura A.7. Vista general de les distribucions de velocitat i de la TKE al voltant de la inclinació de 25° del cos d'Ahmed (Lienhart et al, 2000).

La figura A.8 és una comparació directa de la regió de l'adherència/despreniment i de la recirculació en la part posterior del cos d'Ahmed per a dos angles d'inclinació diferents de la part posterior (25° i 35°). Aquestes mesures es van prendre al llarg del pla de simetria del cos d'Ahmed per (MOVA)). La intenció d'aquesta figura és indicar les diferències més importants en els camps de flux propers a l'estela pels dos angles d'inclinació estudiats.

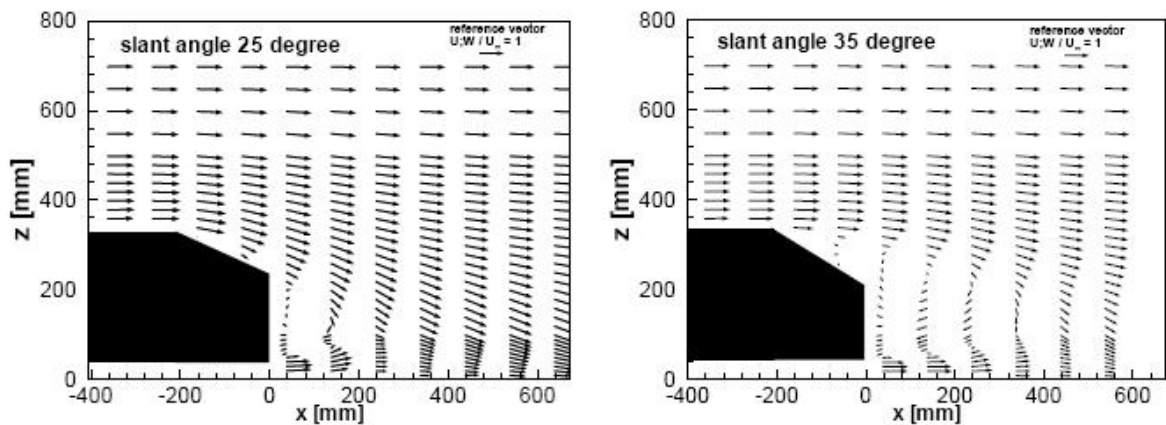


Figura A.8. Comparació de la regió d'estela de recirculació i del flux adherit/després per a dos angles d'inclinació posteriors diferents (Lienhart et al, 2000).

Mesures al voltant de l'estela més detallades es van fer, però van ser descartades d'aquesta figura per evitar enfosquir les estructures de l'estela. La única informació addicional donada per les mesures més detallades fa referència a una regió de recirculació mol petita a la part superior de la superfície inclinada 25°. Més enllà d'aquesta regió, el flux es torna a adherir a la superfície inclinada, llavors desenvolupa una segona regió de recirculació més extensa al llarg de la part més baixa del darrera. No obstant, les observacions pel cas de 35° són bastant diferents. El flux es desprèn al llarg de la superfície inclinada i desenvolupa una única regió de recirculació significativament més extensa dins de l'estela.

A la figura A.9 s'ensenya els vectors de velocitat mitja i els perfils d'energia cinètica turbulenta (TKE) en el pla de simetria del cos d'Ahmed amb una inclinació de 25° de la superfície posterior. Els valors màxims de TKE es troben dins de la petita zona de recirculació de la part posterior del cos. Cal notar que el cos d'Ahmed només distorsiona el flux extern en una distància relativament petita de la seva superfície.

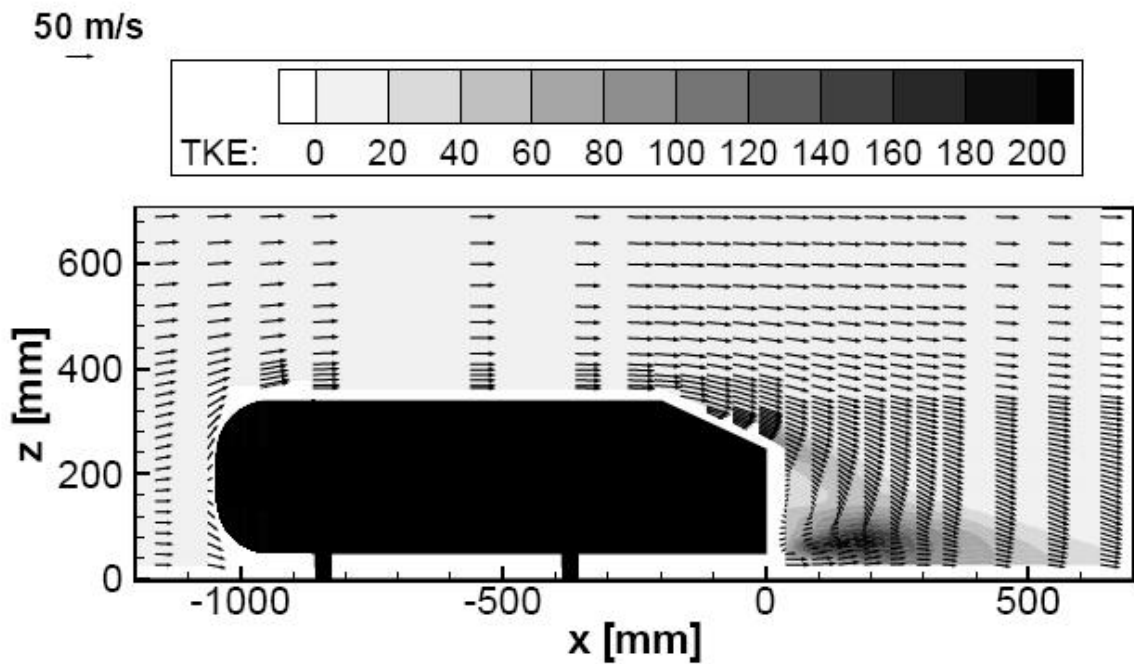


Figura A.9. Contorns de la TKE al llarg del pla simetria del cos d'A Ahmed amb inclinació de 25°
(Lienhart et al, 2000).

Finalment, la figura A.10 mostra el desenvolupament en el flux descendent de vòrtexs de rotació contrària amb una inclinació de la superfície posterior del 25°. Els contorns representen regions de velocitat de flux descendent de magnitud constant. A una distància del flux descendent de 80 mm respecta a la vora del cos d'A Ahmed, hi ha una regió extensa i forta de recirculació de tornada cap a la superfície del cos. Tot i que la recirculació ha desaparegut quan $x = 200$ mm, hi ha encara un gran dèficit en la velocitat que va en sentit del corrent. Quan $x = 500$ mm, la localització dels nuclis dels vòrtexs pot ser encara diferenciada pels dèficits en la velocitat que va en sentit del corrent.

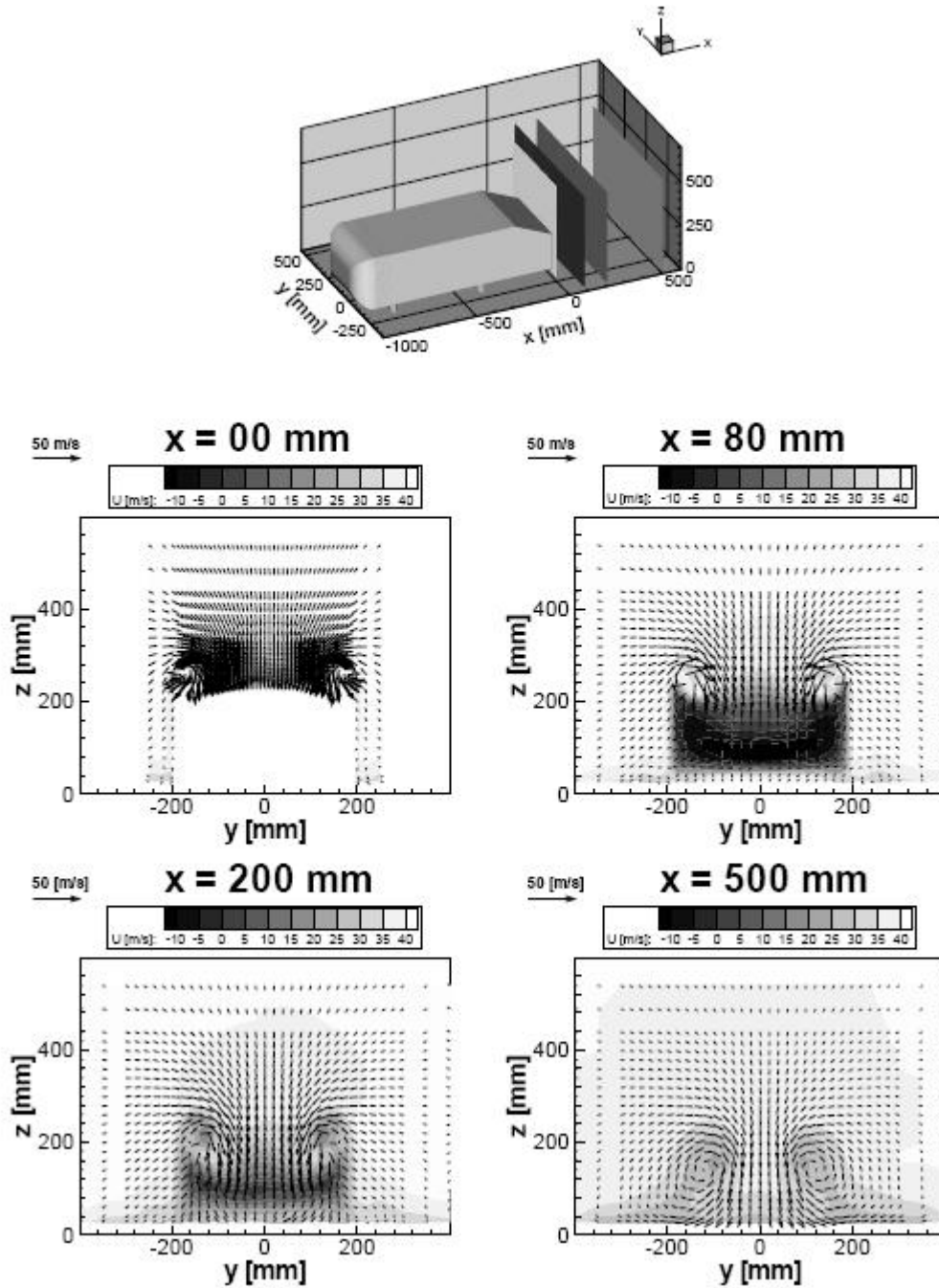


Figura A.10. Desenvolupament del sistema de vòrtex dins de l'estela del cos d'A Ahmed amb 25° d'inclinació de la part posterior (Lienhart et al, 2000).

La figura A.11 és un exemple de perfils dels moments de segon i tercer ordre per la regió d'estela del cos d'A Ahmed. Els contorns de diversos moments mostren una bona simetria.

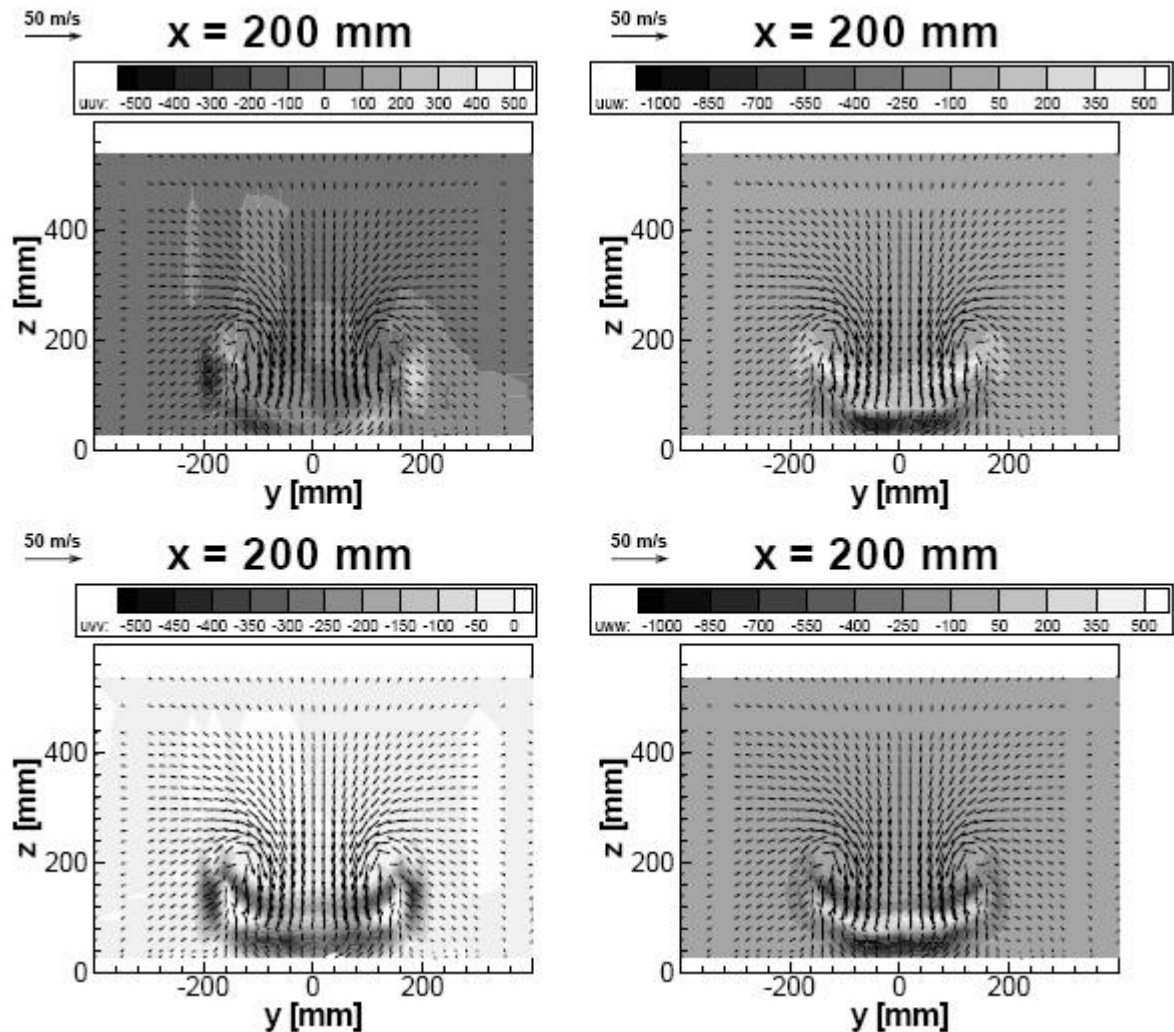


Figura A.11. Perfils dels moments estadístics d'ordre gran dins de l'estela del cos d'A Ahmed amb 25° d'inclinació de la part posterior (Lienhart et al, 2000).

A.2.3.- Conclusions

La visualització del flux, les mesures de la velocitat mitjançant anemòmetres de fil calent, i mesures del LDA dutes a terme per al flux al voltant del cos d'A Ahmed per altres autors són de gran utilitat per validar models de simulació. La majoria d'aquests estudis experimentals previs, però, utilitzen dos angles per a la inclinació de la part posterior del cos: 25° i 35°. Aquest dos angles d'inclinació engloben un pic d'arrossegament quan el flux s'acaba desprenen en la superfície inclinada. D'aquesta forma les mesures experimentals dutes a terme per (MOVA) mostren clarament les diferències en l'adherència de la capa límit i en la recirculació per als dos angles d'inclinació de la superfície posterior considerats anteriorment

(25° i 35°). La informació quantitativa proporcionada per aquestes mesures són de gran valor per a la validació dels models de simulació del comportament aerodinàmic en vehicles terrestres.

A.3.- Bibliografia

Ahmed, S.R., Ramm, G., Some salient Features of the time-averaged ground vehicle wake. SAE-paper 840300. 1984.

Bendat, J.S., Piersol, A.G., Random Data Analysis And Measurement Procedures. John Wiley & Sons, New York. 1986.

Hinterberger, C., García-Villalba, M., Rodi, V. Large eddy simulation of flow around the Ahmed body. (<http://www.ifh.uni-karlsruhe.de/people/villalba/data/ahmed.pdf>, 15 de Febrer de 2008).

Lienhart, H., Stoots, C., Becker, S. Flow and turbulence structure in the wake of a simplified car model (Ahmed Body). (http://cdf.me.umist.ac.uk/ercoftac/database/cases/case82/Case_ref/STAB200_NNFM.pdf, 13 de Març de 2008).

10è workshop d'ERCOFTAC a: <http://tmdb.ws.tn.tudelft.nl/workshop10/case9.4/case9.5.html> (29 de Gener de 2008).

ANNEX B

ANNEX B: MECÀNICA DE FLUIDS

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

B.1.- Definició de fluid

Des del punt de vista de la mecànica de fluids, la matèria pot presentar-se en dos estats: sòlid i fluid. La diferència entre aquests dos estats es presenta en els diferents comportaments que presenten quan s'aplica un esforç tangencial o tallant sobre ells. Un sòlid pot resistir un esforç tallant amb una deformació molt petita, en canvi un fluid presentarà una deformació molt superior a la que pugui presentar el sòlid. A diferència del sòlid, però, qualsevol esforç que s'aplica a un fluid el deformarà contínuament mentre l'esforç s'estigui aplicant.

Això comporta que un fluid sigui aquella substància que, deguda a la seva poca cohesió intermolecular, no disposi de forma pròpia i adopti la forma del recipient que el conté.

Donada la definició de fluid, podem diferenciar dos tipus de fluids: líquid i gas. La diferència essencial es troba en la magnitud de les forces cohesives que s'esdevenen entre les molècules del fluid. Un líquid, al ser compostat per un gran nombre de molècules properes entre si i amb una gran força cohesiva entre elles, tendeix a conservar el seu volum i a formar una superfície lliure en el camp gravitatori, si és que no està tancat a pressió en un recipient. Per altra banda, en un gas, com que les molècules es troben mol separades entre elles, les forces cohesives són menyspreables, i per tant, tendeix a expansionar-se fins a trobar els límits del volum complet del recipient que el conté. Un gas no presenta un volum definit, sempre hi quan no estigui dins un recipient, i formarà una atmosfera que serà bàsicament hidrostàtica.

B.2.- Propietats dels fluids i definició de forces

Tot seguit, explicarem les principals propietats dels fluids (densitat i viscositat), així com la definició del tipus de forces a les que es veuen sotmeses.

Densitat

La densitat és la massa per unitat de volum i es representa amb la lletra ρ . Veure equació B.1.

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{Eq.B.1})$$

On:

$\rho \rightarrow$ densitat (Kg / m^3).

$m \rightarrow$ massa (Kg)

$V \rightarrow$ volum (m^3)

Forces i pressió

Quan en mecànica de fluids estudiem les forces, considerem dos tipus de forces fonamentals: les forces màssiques i les forces superficials.

- Forces màssiques: les forces màssiques són les forces exteriors que actuen sobre el fluid sense contacte directe (per exemple, la gravetat). Veure equació B.2.

$$f = \frac{\rho \cdot g}{V} \quad (\text{Eq.B.2})$$

On:

$f \rightarrow$ força màssica (N / m^3).

$m \rightarrow$ massa del fluid (Kg).

$V \rightarrow$ volum del fluid (m^3).

$g \rightarrow$ densitat de la força màssica (m / s^2).

- Forces superficials: les forces superficials són les forces efectuades sobre el contorn del fluid per la resta del fluid, pel recipient o per qualsevol altra substància, mitjançant el

contacte directe. Si observem la figura B.1 podem apreciar amb més claredat la definició de força superficial, d'on s'esdevenen els esforços normals i tallants (veure equacions B.3 i B.4).

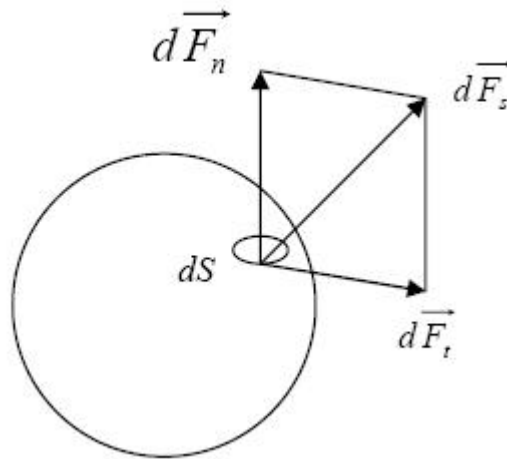


Figura B.1. Forces superficials.

$$\sigma_n = \frac{dF_n}{S}$$

(Eq.B.3)

$$\sigma_t = \frac{dF_t}{S}$$

(Eq.B.4)

On:

$\sigma_n \rightarrow$ esforç normal (N / m^2)

$\sigma_t \rightarrow$ esforç tallant (N / m^2)

$F_n \rightarrow$ força normal (N)

$F_t \rightarrow$ força tallant (N)

$S \rightarrow$ superfície (m^2)

Els fluids en equilibri estan lliures d'esforços tallants, ja que són incapaços de resistir-los.

- Pressió: és l'esforç normal que pateix un cos, força per unitat d'àrea. Veure equació B.5.

$$p = \frac{W}{A}$$

(Eq.B.5)

On:

$p \rightarrow$ pressió (N/m^2)

$W \rightarrow$ força normal (N)

$A \rightarrow$ àrea (m^2)

Viscositat:

La viscositat d'un fluid és una mesura de la seva resistència a una deformació tallant o angular. La figura B.2 és un exemple on es mostra com la velocitat del fluid varia linealment amb la distància entre plaques. El comportament de la velocitat en una línia és el que s'anomena perfil de velocitats.

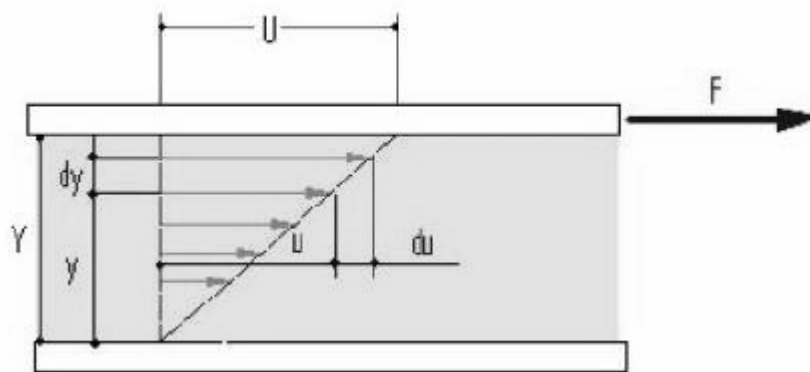


Figura B.2. Fluid comprès entre dues plaques paral·leles (Mataix, 1982).

En experiments s'ha demostrat que una gran quantitat de fluids en les condicions anteriors compleixen l'equació B.6.

$$F \propto \frac{A \cdot U}{Y}$$

(Eq.B.6)

Per semblança de triangles en la figura B.2, $\frac{u}{y}$ es pot substituir per el gradient de velocitats

$\frac{du}{dy}$. Ara s'introdueix una constant de proporcionalitat, la viscositat dinàmica o absoluta μ ,

de tal manera que l'esforç tallant τ entre dues capes fines de fluid qualsevol es pot expressar com l'equació B.7.

$$\tau = \frac{F}{A} = \mu \frac{U}{Y} = \mu \frac{du}{dy}$$

(Eq.B.7)

B.3.- Tipus de fluids

En general, quan ens referim a un fluid ideal considerem que no té viscositat. En canvi, si el fluid és real, aquest té un valor de viscositat diferent de zero, això comporta l'aparició d'esforços tallants entre partícules. Veure la figura B.3.

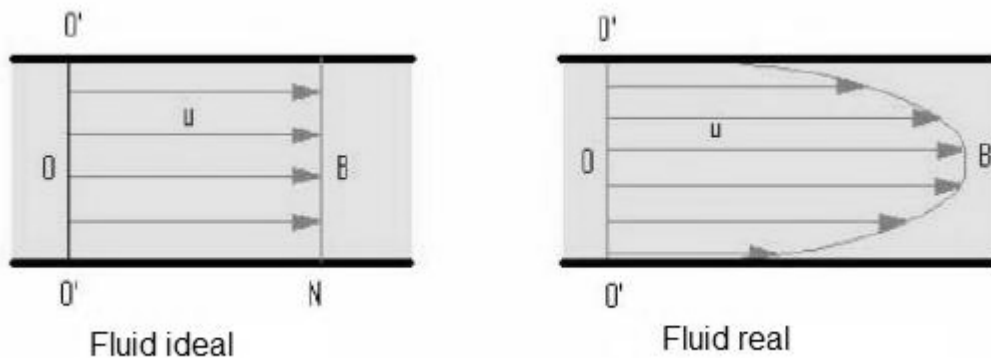


Figura B.3. Perfils de velocitats per a diferents fluids en canonades (Mataix, 1982).

Els fluids també es poden classificar com a compressibles o incompressibles. En el fluid incompressible la densitat (ρ) és constant. Els líquids, en la majoria d'aplicacions pràctiques, es solen considerar incompressibles. D'altra banda, els gasos es tracten generalment com compressibles i la seva densitat varia en funció de la pressió absoluta i de la temperatura

absoluta, regida per l'equació d'estat del gas. Normalment, s'utilitza l'equació del gas ideal (veure Eq.B.8).

$$\boxed{\frac{p}{\rho} = p \cdot v = R \cdot T} \quad (\text{Eq.B.8})$$

On:

$p \rightarrow$ pressió absoluta (Pa)

$\rho \rightarrow$ densitat (Kg / m^3)

$v \rightarrow$ volum específic ($\frac{1}{\rho} = m^3 / Kg$)

$R \rightarrow$ constant del gas ideal ($Nm / Kg^{-1}K$)

$T \rightarrow$ temperatura absoluta (K)

B.4.- Tipus de fluxos

Flux estacionari i flux no estacionari

Un fluid en moviment provoca un flux. Es considera que un flux és estacionari quan les seves propietats són constants al llarg del temps, i no estacionari quan varien al llarg d'aquest.

Flux laminar i flux turbulent

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

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

On:

$Re \rightarrow$ Nombre de Reynolds

$D \rightarrow$ longitud característica del problema (m)

$v \rightarrow$ velocitat característica del problema (m/s)

$\rho \rightarrow$ densitat (Kg/m^3)

$\mu \rightarrow$ viscositat dinàmica ($Pa \cdot s$)

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

El primer tipus anomenat flux laminar. En ell el fluid es mou degut al desplaçament de les làmines d'espessor infinitesimal sobre làmines adjacents.

Per al segon tipus, anomenat flux turbulent, el moviment irregular de les partícules en un petit instant de temps es pot apreciar a la figura B.4 (a) i en canvi a la figura B.4 (b) es mostra la trajectòria seguida per una partícula en un transcurs de temps més gran.

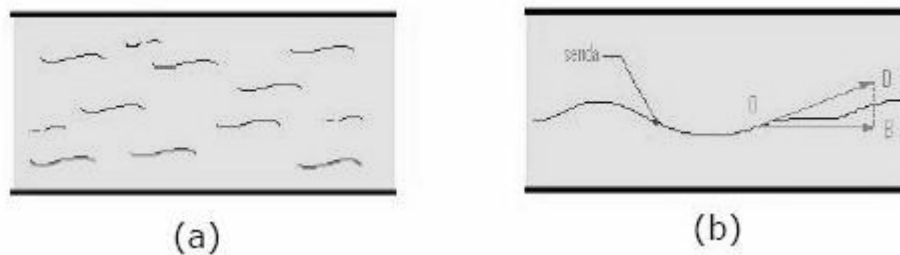


Figura B.4. Moviment de les partícules d'un fluid (a), trajectòria d'una partícula fluida (b) (Mataix, 1982).

B.5.- Equació de continuïtat

La conservació de la massa és un principi fonamental en la mecànica de fluids. Aquest afirma que la massa no pot ser creada ni destruïda, és a dir, que la massa d'un volum de control s'ha de conservar. Veure figura B.5.

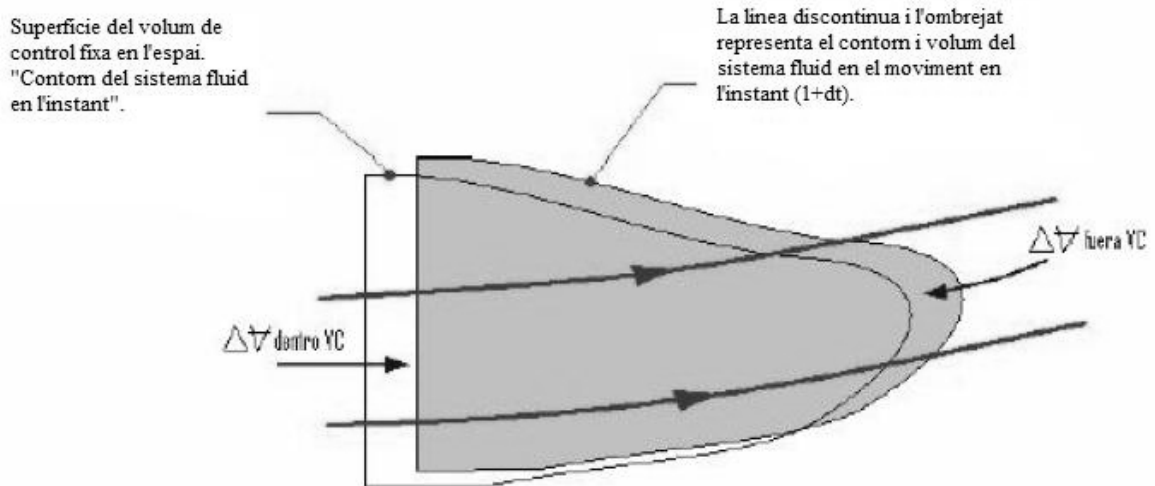


Figura B.5. Sistema fluid, volum de control i diferències (Gerahart P, Gross R, Hochstein, 1995).

Observant la figura anterior, i aplicant el principi segons el qual la massa del sistema s'ha de conservar, si considerem el flux estacionari ($\partial \overline{\rho_{VC}} / dt = 0$), obtenim l'equació B.10, anomenada equació de continuïtat.

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

On:

$\rho \rightarrow$ densitat (Kg / m^3)

$v \rightarrow$ velocitat (m / s)

$A \rightarrow$ secció de pas (m^2)

B.6.- Equació de Bernoulli

L'equació de Bernoulli relaciona la pressió, l'elevació i la velocitat d'un flux permanent en un fluid ideal (no viscos i incompressible) i s'obté a partir de l'equació de conservació de l'energia (Streeter, 1981) (veure equació B.11).

$$\boxed{p + \rho \cdot g \cdot h + \frac{1}{2} \rho \cdot v^2 = \text{constant}} \quad (\text{Eq.B.11})$$

On:

$p \rightarrow$ pressió absoluta (Pa)

$\rho \rightarrow$ densitat (Kg / m³)

$v \rightarrow$ velocitat (m / s)

$h \rightarrow$ altura (m)

$g \rightarrow$ gravetat (m / s²)

B.7. Equació de Navier-Stokes

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

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

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

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

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

B.8.- Capa límit

Per capa límit s'entén una zona molt estreta que té una frontera comú amb el cos sòlid envoltat pel fluid, o que envolta la seva superfície, en la qual la velocitat del fluid passa del

valor zero (respecte al contorn) al valor que aportaria la teoria del fluid ideal. Depenent de les característiques del règim, la capa límit pot ser laminar o turbulenta.

Al comparar les capes límits laminar i turbulenta (veure figura B.6) s'observa 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 petit en la resta de la capa. Llavors l'esforç tallant a la superfície es més gran en la capa límit turbulenta que en la laminar.

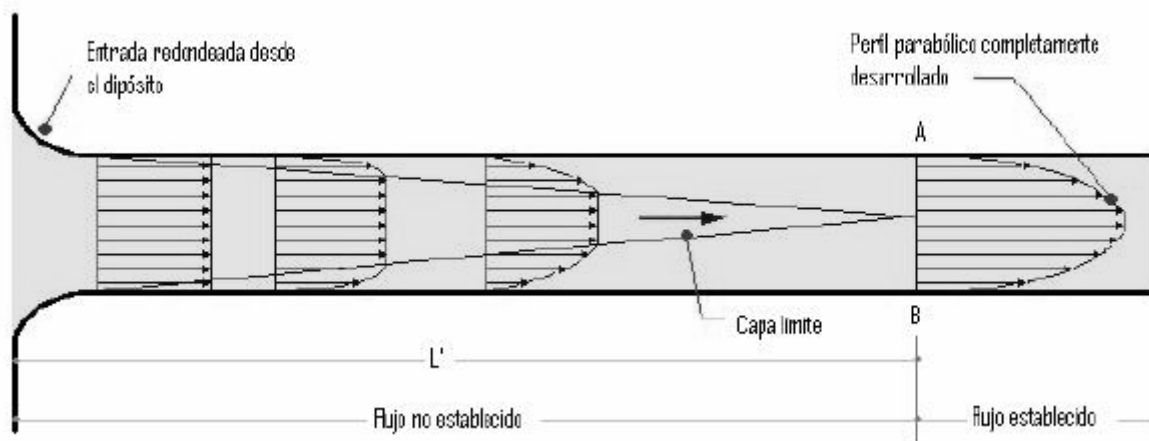


Figura B.6. Evolució de la capa límit en un conducte de secció circular (Munson, 2000).

Cal destacar una diferència important entre el flux al voltant de cossos submergits i fluxos en conductes. En el cas dels conductes les capes límits 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, mentre en el cas de vehicles, avions, etc., la capa límit pot arribar a tenir varis centímetres d'espessor, però serà molt petit comparat amb les dimensions del volum de control. Veure figura B.7.

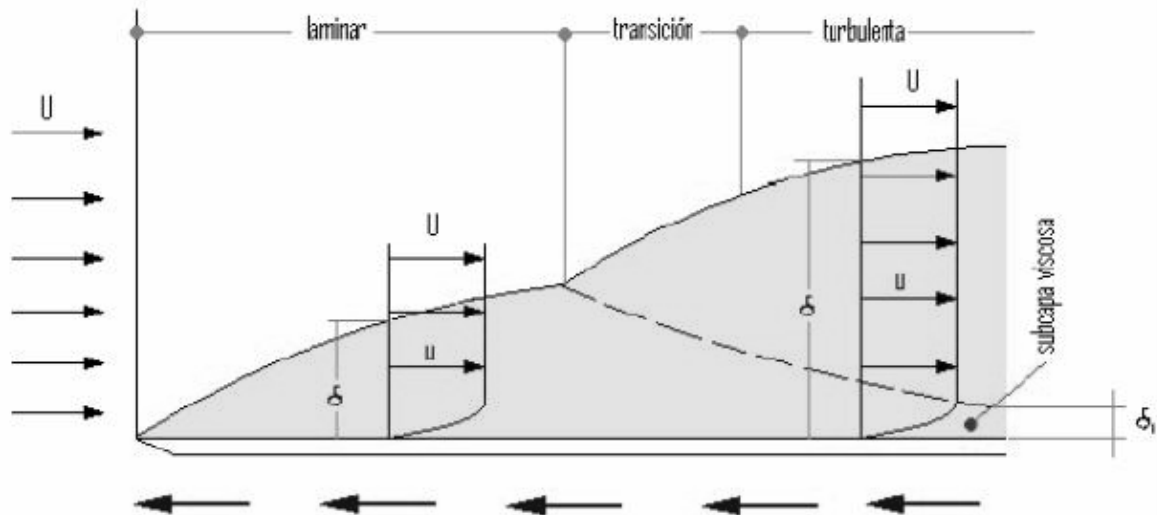


Figura B.7. Capa límit laminar i turbulenta d'una placa llisa (Mataix, 1982).

B.9.- Bibliografia

Bruce R, Munson., Donald F, Young., Theodore H, Okijshi. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Editorial Limusa Wiley. 2000.

Gerahart P, Gross R, Hochstein. Fundamentos de Mecánica de Fluidos. Addison Wesley Iberoamericana. 1995.

Mataix, C. Mecánica de fluidos y máquinas hidráulicas. Ediciones el Castillo. 1982.

Robert W. Fox, Alant T. M_C Donald. Introducción a la mecánica de fluidos. M_C Graw-Hill. 1989.

ANNEX C

ANNEX C: FONAMENTS D'AERODINÀMICA

C.1.- Introducció

Com que en aquest treball es realitza l'estudi aerodinàmic sobre diferents models d'autobús, és necessari conèixer i entendre bé la base de l'aerodinàmica.

La paraula aerodinàmica prové de dues paraules gregues: *aerios*, que significa aire, i *dynamis*, que significa força. Per tant, l'aerodinàmica és l'estudi de les forces exercides per l'aire sobre els objectes que el travessen. En definitiva, l'aerodinàmica és la branca de la mecànica de fluids que estudia les accions que apareixen en els cossos sòlids quan existeix un moviment relatiu entre aquests i el fluid que els envolta (J. D. Anderson, 1991). És objecte de l'aerodinàmica tant l'estudi de vehicles aeris com de terrestres. Per a un disseny eficient d'aquests vehicles convé un estudi aerodinàmic.

En general, es diu que un cos té un bon comportament aerodinàmic quan la seva geometria ofereix una resistència mínima a l'avanç.

C.2. Sustentació

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

Aquesta resultant es 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).

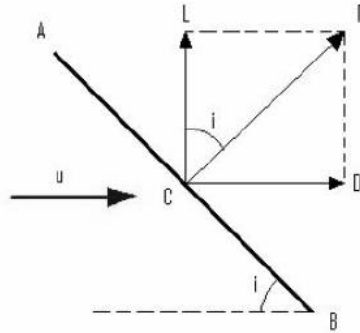


Figura C.1. Forces que es creen sobre un pla per la incidència d'un fluid.

Si la força de sustentació és més gran que la que s'exerceix pel propi pes, el cos tendirà a pujar i si el cos té un element propulsor que provoqui una força més gran a la de la resistència a l'avanç, aquest tendirà a desplaçar-se en el sentit contrari al de la velocitat relativa u .

El valor d'aquestes components depèn de l'angle d'incidència, compost pel pla AB i la velocitat relativa u .

En la part inferior del pla, on xoquen les partícules del fluid, es denomina "intradós", on es creen pressions positives i en la part superior, on es creen pressions negatives s'anomena "extradós" (veure figura C.2). 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 apareix quan existeix asimetria.

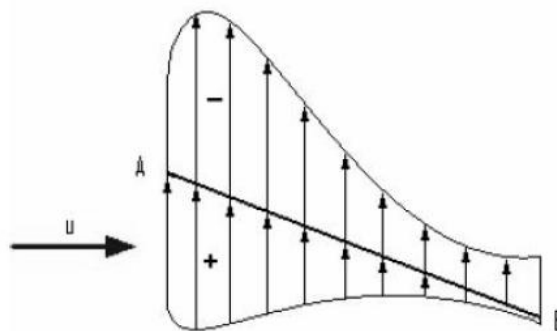


Figura C.2. Distribucions de pressió sobre un pla (J. D. Anderson, 1991).

C.3.- Teorema de Kutta-Joukowski de la sustentació

La fórmula de la força de sustentació d'un cilindre va ser deduïda per Kutta-Joukowski per perfils d'ala d'avió, on la circulació (Γ) en el cas general ve donada per l'equació C.1.

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

On:

$\Gamma \rightarrow$ circulació (m^2 / s)

$v \rightarrow$ velocitat (m / s)

$l \rightarrow$ corda del perfil (m)

$k \rightarrow$ coeficient que idealment només depèn de la geometria del perfil (adimensional)

$\alpha \rightarrow$ angle d'atac ($^\circ$)

En aquesta fórmula l'angle d'atac es mesura a partir de la línia neutra, o sigui la paral·lela a u que passa pel vèrtex de sortida del perfil. En l'equació C.2 es mostra la fórmula de Kutta-Joukowski.

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

On:

$F_L \rightarrow$ força de sustentació (N)

$b \rightarrow$ llum del perfil (m)

$\rho \rightarrow$ densitat (Kg / m^3)

$\Gamma \rightarrow$ circulació (m^2 / s)

Si substituïm el valor de Γ en l'equació de Kutta-Joukowski, obtenim l'equació C.3.

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

On:

$$A_L = l \cdot b \rightarrow \text{àrea projectada del perfil (m}^2\text{)}$$

Si observem la figura C.3 podem veure els paràmetres anteriors.

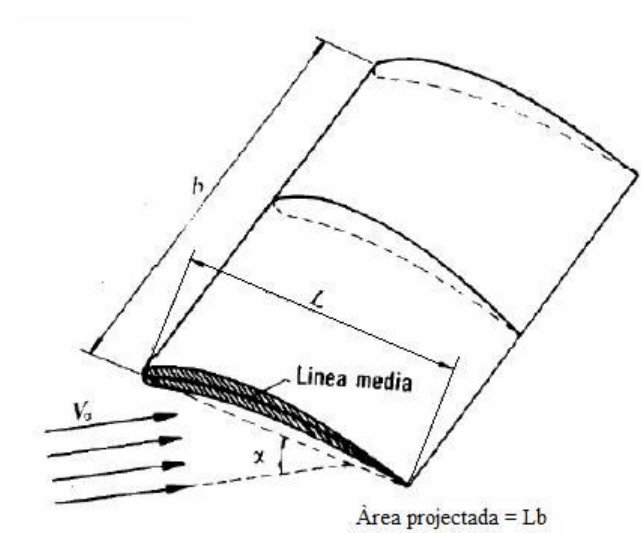


Figura C.3. Perfil d'una ala d'avió amb els seus paràmetres característics (J. D. Anderson, 1991).

Per tant, la força de sustentació es descriu com (veure equació C.4):

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

On:

$C_L \rightarrow$ coeficient de sustentació

Aquest, idealment només depèn del coeficient de forma i de l'angle d'atac, i es descriu matemàticament com (veure equació C.5):

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

C.4.- Coeficient de sustentació

El coeficient de sustentació és la relació entre la força vertical (F_L) i la pressió dinàmica per la superfície resultant de la projecció del vehicle sobre el pla de la direcció moviment (A_L), veure equació C.6.

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v^2 \cdot A_L} \quad (\text{Eq.C.6})$$

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

En funció del tipus de circulació que envolta el perfil, el flux abandonarà el cos per el seu vèrtex de fuga amb més o menys suavitat (veure figura C.4).

La forma que afavoreix la sustentació, és un vèrtex de fuga agut, de manera que l'intradós i l'extradós tinguin la mateixa velocitat al abandonar el perfil.

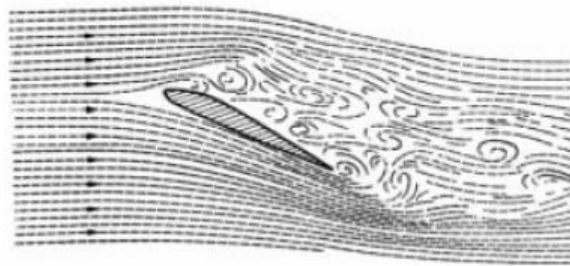


Figura C.4. Flux al voltant d'un perfil d'una ala (Munson, 2000).

C.5.- Perfils sustentadors

Els perfils sustentadors es defineixen per una sèrie de paràmetres que es poden apreciar a la figura C.5. En l'aspecte geomètric definim la corda, que és la línia de curvatura mitjana respecte les distàncies de l'intradós i l'extradós; en l'aspecte aerodinàmic definim els valors

dels coeficients de sustentació (C_L) i de resistència a l'avanç (C_D), que són funció de l'angle d'incidència que forma la velocitat relativa amb la corda.

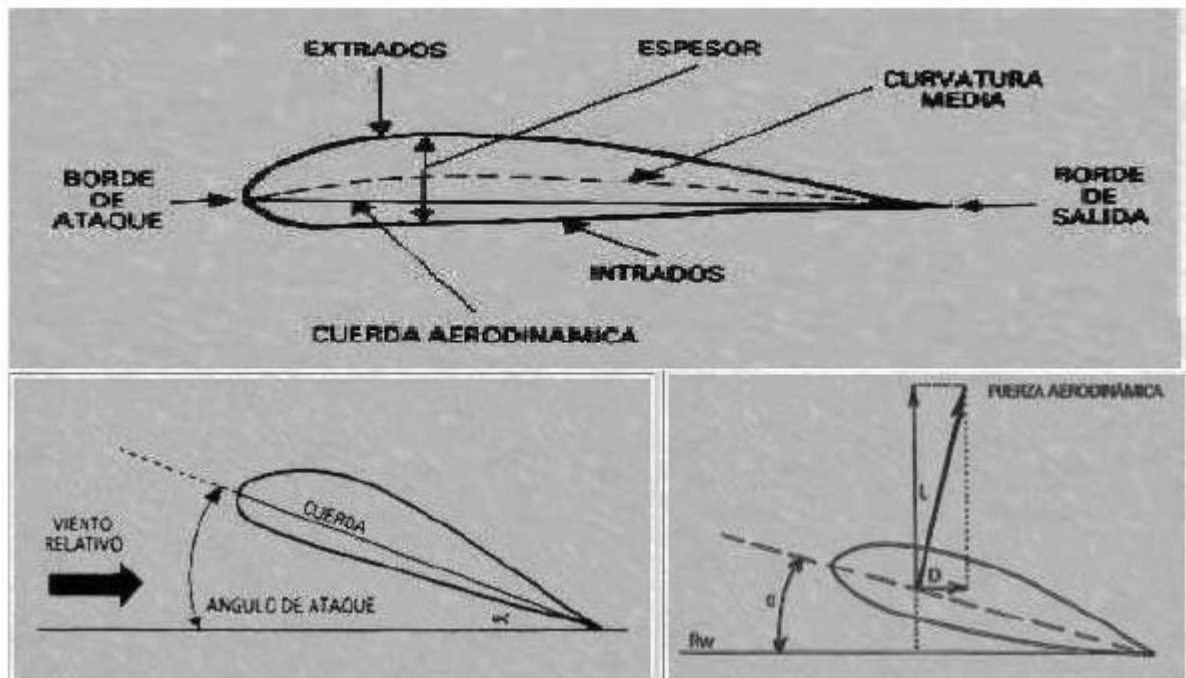


Figura C.5. Diferents parts d'un perfil d'una ala (J. D. Anderson, 1991).

C.6.- Resistència

La resistència és l'oposició que exerceix un fluid al moviment d'un cos en el seu si. En el sistema de referències del cos, això equival a un cos en repòs amb un flux incident no nul. En aquesta situació, en la part anterior del cos es produeix un xoc elàstic produint una sobrepressió, deguda a la contribució de la pressió dinàmica associada 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 una certa distància, abans i després del sòlid, i lateralment, per l'acció de la viscositat, el fluid notarà una pertorbació produïda pel sòlid (veure figura C.6).

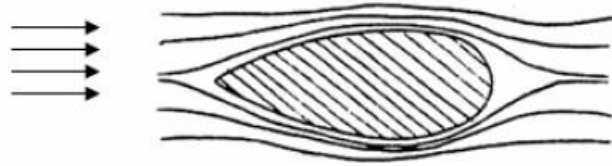


Figura C.6. Flux al voltant d'un sòlid en repòs. (Munson, 2000).

D'altra banda, en un fluid ideal, si tant en l'entrada com en la sortida del volum de control no existeix cap pertorbació, el fluid no consumirà energia al passar el sòlid. Això s'anomena "paradoxa de d'Alembert".

Tanmateix, en fluids reals, les molècules entren en contacte amb el sòlid i queden adherides a aquest. Com que el sòlid està 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 C.7). L'espessor d'aquest gradient de velocitats és apreciable i es denomina capa límit (tal i com s'havia introduït en l'annex B).

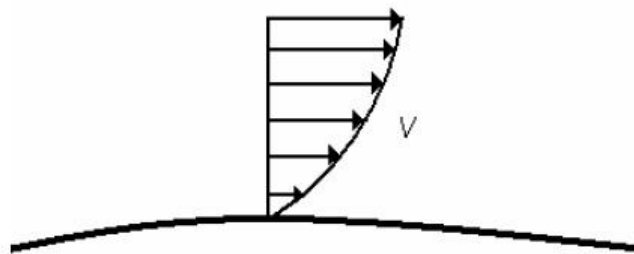


Figura C.7. Gradient de velocitats prop de la superfície (Mataix, 1982).

Si la velocitat és elevada i, especialment, si el cos que ha de ser estudiat té xamfrans aguts, els llocs geomètrics per on la capa límit abandona el sòlid s'esdevenen en una zona posterior, donant origen a la formació de remolins que es desprenen de les superfícies del sòlid de forma alternada (veure figura C.8).

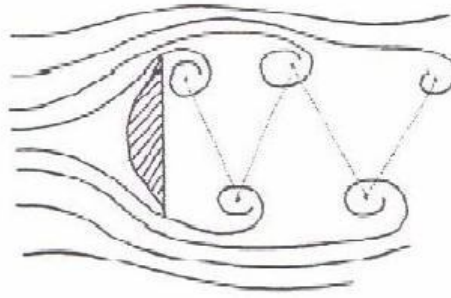


Figura C.8. Formació de remolins que es desprenen de la superfície d'un sòlid de forma alternada
(Mataix, 1982).

Així, la forma del cos juga un paper molt important. Si s'evita la formació de remolins es pot disminuir sensiblement la resistència a l'avanç. D'aquí ve l'interès per les formes aerodinàmiques.

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

Per la importància de la forma, alguns autors anomenen a la resistència a l'avanç com resistència de forma (per bé que, estrictament, s'ha de tenir present la contribució de la resistència de superfície, introduïda a continuació).

La presència de la capa límit i de les forces tangencials dóna origen a una altre resistència, la resistència de la viscositat, que s'oposa al moviment del cos (resistència de superfície). De manera que la suma de les dues (resistència de forma i resistència de superfície) s'anomena resistència total.

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

- Resistència de superfície: es deixa la superfície del vehicle amb una tolerància de rugositat el més petita possible.
- Resistència de forma: aquesta està lligada amb l'anterior, ja que, sovint, millorant-ne una, empitjora l'altra. Per exemple, una major longitud del vehicle provoca un

despreniment de la capa límit més retardat i al mateix temps evita la formació de remolins, però a la vegada la resistència viscosa ha de recórrer una major longitud. De manera que s'ha de buscar el punt òptim entre les dues.

C.7.- Coeficient d'arrossegament

Qualsevol cos que està immers en una corrent d'un fluid real està sotmès a una força d'arrossegament. El quocient entre aquest arrossegament i el producte de la pressió dinàmica i la superfície resultant de la projecció del vehicle sobre el pla perpendicular a la direcció del moviment, dona lloc al coeficient d'arrossegament (veure equació C.7).

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot A_D} \quad (\text{Eq.C.7})$$

On:

$C_D \rightarrow$ Coeficient d'arrossegament

$F_D \rightarrow$ Força d'arrossegament (N)

$A_D \rightarrow$ Superfície d'impacte de l'aire (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

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

C.9.- Resistència a elevats nombres de Reynolds

En un cos llarg i prim la resistència principal és exercida per la viscositat (fricció). Aquesta es pot reduir mantenint una capa límit laminar fins on sigui possible. En canvi si el cos és arrodonit la resistència principal és la de forma (pressió) (veieu, per exemple, la figura C.9).

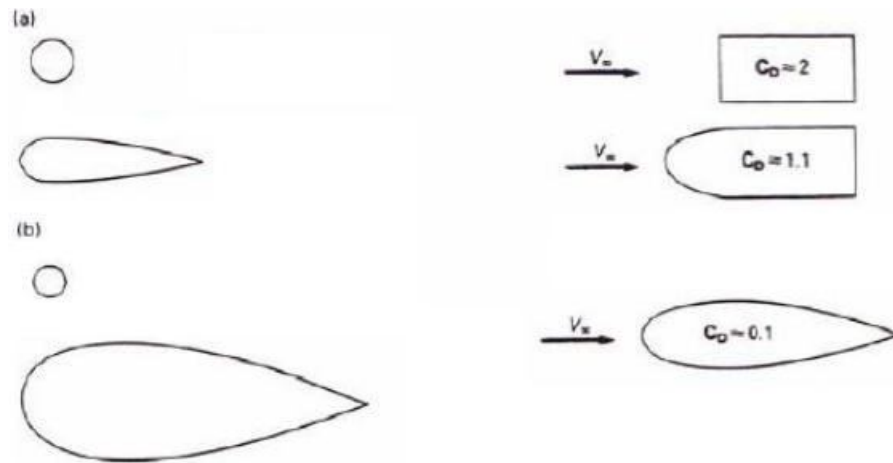


Figura C.9. La figura (a) mostra un cilindre a la part superior i un fusellatge a la part inferior amb la mateixa àrea frontal, però el C_D del cilindre és 5 vegades més gran que el del fusellatge. La figura (b) mostra un cilindre i un cos fusell amb el mateix C_D (J.D. Anderson, 1991).

C.10.- Resistència aerodinàmica a l'avanç

La força aerodinàmica més important sobre un vehicle terrestre és la resistència a l'avanç i els factors dels que en depèn són:

- Característiques del vehicle: Forma, àrea frontal, ...
- Factors del medi fluid: Densitat de l'aire, condicions mediambientals, ...
- Factors operatius: Velocitat del vehicle,...

L'anàlisi de tots els factors és força complex i sobrepassa els objectius del projecte, per aquest motiu en aquest apartat s'analitzaran només els conceptes més importants.

La resistència aerodinàmica es produeix per dues raons. Una d'elles és la pressió que s'origina per l'impacte de les molècules contra una superfície, de forma que experimenten una variació en la seva quantitat de moviment associada al xoc i al corresponent rebot. Això resulta en una força normal a la superfície. L'altre tipus de forces sorgeix del moviment lliscant i de les molècules de l'aire al voltant de les superfícies, rebent el nom de fricció de l'aire. Això origina forces de freg al llarg de les superfícies quan l'aire circula al seu voltant.

D'aquesta forma, el coeficient d'arrossegament o de resistència a l'avanç es compon de dos sumands: Una part associada a la resistència deguda a la fricció (tensions tangencials), mentre que l'altra originada com a conseqüència de les diferències de pressió generades pel desprendiment de la capa límit. D'aquesta forma es pot expressar el coeficient d'arrossegament total segons l'equació C.8.

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

On C_{DV} és la part originada per les forces de pressió associades al desprendiment de la capa límit i C_{Df} és la part del coeficient de resistència a l'avanç deguda a la fricció.

C.11.- Bibliografia

Bruce R, Munson., Donald F, Young., Theodore H, Okijsi. Fundamentos de Mecànica de Fluidos. Editorial Limusa Wiley. 2000

J. D. Anderson. Fundamentals of Aerodynamics. M_C Graw-Hill. 1991.

Mataix, C. Mecànica de fluidos y máquinas hidráulicas. Ediciones el Castillo. 1982.

ANNEX D

ANNEX D: AERODINÀMICA DE VEHICLES

Cal tenir en compte que no existeixen models teòrics precisos per predir la resistència aerodinàmica i és per aquest motiu que l'experimentació ha estat una manera excel·lent per obtenir dades i coneixements sobre la influència de diverses variables geomètriques en el comportament aerodinàmic dels vehicles.

D.1.- Introducció

Com ja hem definit a l'annex anterior, l'aerodinàmica és una branca de l'enginyeria que estudia els fenòmens que es produeixen en tot moviment relatiu entre un cos i un fluid, i que comprèn diferents sectors d'activitat industrial.

Així doncs, l'aerodinàmica aplicada a l'automoció té com a objectiu d'estudi el conjunt d'accions i efectes que realitza l'aire sobre l'automòbil quan aquest està en moviment. Amb freqüència els esforços aerodinàmics són d'una gran importància pel que fa al funcionament i la pròpia estabilitat del vehicle.

Els motius que han portat als fabricants d'automòbils a destinar recursos per a l'estudi de l'aerodinàmica són, entre d'altres, els següents:

- Necessitat de millorar el consum dels vehicles.
- Reducció del nivell del soroll.
- Estudi de la refrigeració del motor.
- Millora de les prestacions i l'estabilitat direccional del vehicle en marxa.

En el present projecte ens centrem en l'estabilitat direccional del vehicle en marxa.

A la figura D.1 es compara la resistència al rodament respecte a un vehicle amb un coeficient d'arrossegament elevat i baix. De la figura, s'observa com la resistència de naturalesa aerodinàmica és gairebé insignificant quan la velocitat del vehicle és baixa, ja que la major resistència que s'oposa al moviment del vehicle és la que prové del rodament. Per tant, el fenomen aerodinàmic es molt important a velocitats més elevades.

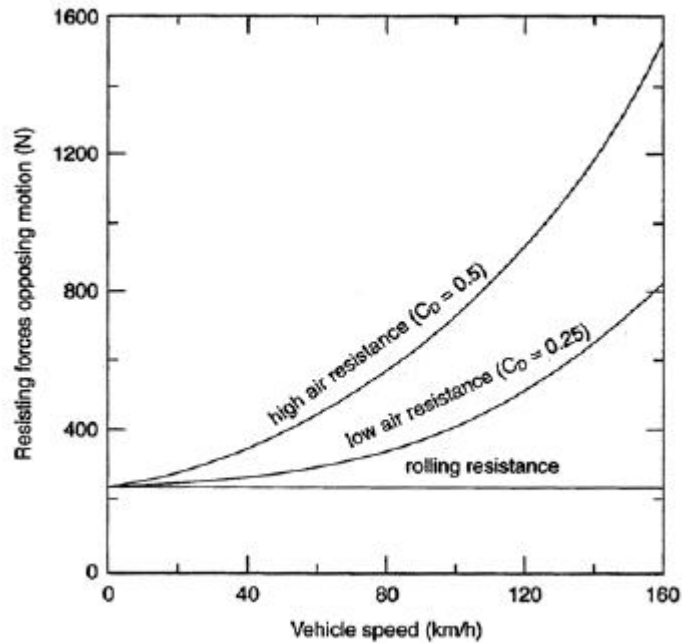


Figura D.1. Comparativa entre la resistència aerodinàmica i la resistència al rodament (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Tanmateix, en el disseny d'un vehicle s'ha de tenir en compte factors com són l'espai disponible per passatgers, equipatge, etc. Tots aquests elements fan que dissenyar un vehicle aerodinàmicament òptim sigui una tasca complicada.

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

El flux originat pel moviment d'un vehicle és molt complex i encara no s'ha comprès en la seva totalitat. La seva descripció s'ha de realitzar a partir de pressions i velocitats mesurades que estableixen el comportament del flux proper a la superfície del vehicle.

Com a regla general es treballa en un sistema de referència solidari amb el vehicle. D'aquesta forma, la velocitat del fluid V_{TOTAL} resulta de la suma vectorial de la velocitat del vehicle $V_{vehicle}$ (en sentit oposat a l'observat des d'un sistema de referència en repòs) i de la velocitat del vent V_w , donant lloc a un angle de guinyada β relatiu a la direcció del moviment del vehicle, tal i com es pot veure a la figura D.2. Quan s'estudia el flux al voltant d'un vehicle, normalment es considera primer un flux simètric (és a dir $\delta = 0$) i després es planteja la

influència del vent lateral. No obstant cal esmentar que el flux asimètric (δ diferent de zero) s'estudia dins el context de l'estabilitat direccional.

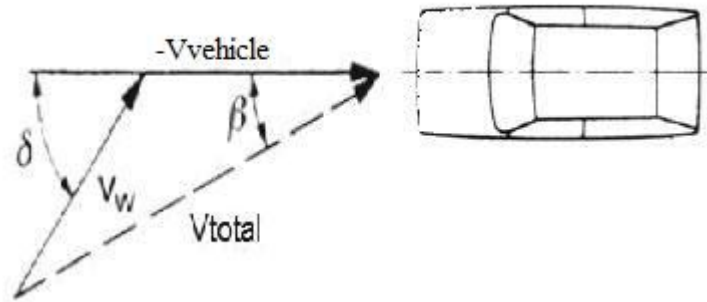


Figura D.2. Incidència d'un flux asimètric en un vehicle (Saiz Vela, Víctor, 2005).

El flux al voltant dels automòbils es caracteritza per nombrosos despreniments de la capa límit. En algunes regions es succeeixen grans i petites separacions que poden tenir caràcter tant bidimensional com tridimensional. En molts casos, la separació és bidimensional amb una línia de separació perpendicular a la direcció local del flux, encara que el comportament del flux sigui tridimensional. Si a partir d'aquestes separacions el flux torna a adherir-se a la superfície, llavors es produiran vòrtex localitzats i tancats dins del flux extern.

Les separacions de tipus local, tenen lloc en els accessoris que no formen part pròpiament de la carrosseria del vehicle, com són retrovisors, antenes, alerons, etc. Les separacions de tipus global, tenen lloc a la part de darrera del vehicle, així com en aquells llocs on el flux és pertorbat per l'existència d'elements mecànics i estructurals d'una certa dimensió, com poden ser les rodes, etc. (veure figura D.3).

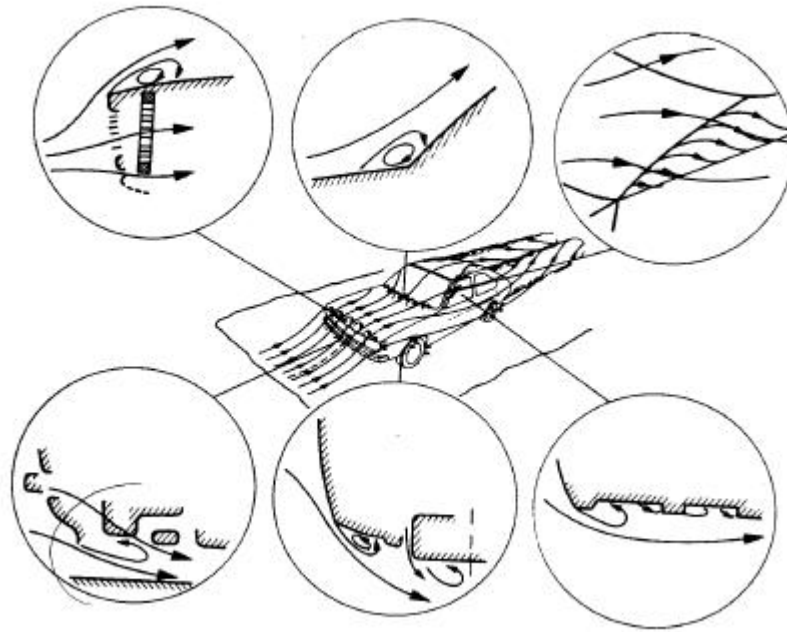


Figura D.3. Detalls del flux al voltant d'un vehicle (Saiz Vela, Víctor, 2005).

També hi ha efectes que es poden denominar de tipus ambiental (vent, túnels, altres vehicles,...) que també influeixen en la distribució del flux. Aquests el que fan és modificar el flux ja existent en el vehicle.

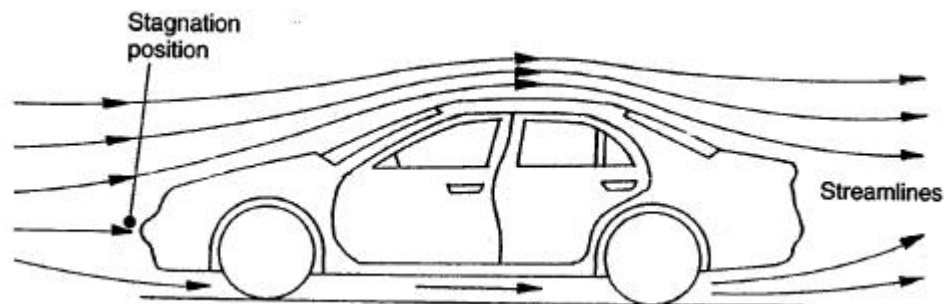


Figura D.4. Línies de corrent al voltant d'un vehicle (Saiz Vela, Víctor, 2005).

A la figura D.4 es pot observar el flux extern al voltant d'un vehicle. Els corrents d'aire que incideixen sobre el vehicle tenen d'equiparar-se tant en la part davantera com en la posterior. El corrent exterior normalment és el responsable de la força de resistència a l'avanç i de la

pressió principal, mentre que el corrent de sota del cos fa elevar el vehicle (força de sustentació).

La resistència per interfície s'origina per elements que surten de la base del vehicle, com poden ser miralls, manetes i altres elements complementaris. Tots aquest elements no només experimenten resistència per si mateixos, si no que pertorben el flux sobre la forma bàsica del cos, indirectament influint en la seva resistència.

D'altra banda, podem identificar els fluxos que actuen sobre un automòbil de la següent manera:

- Flux d'aire extern al vehicle (por sobre, per sota, laterals).
- Flux d'aire que passa a través dels compartiments interiors.

Si observem la figura D.5 podem veure un esquema entre la relació de la força total de resistència (o arrossegament) (drag total) i els components del vehicle que l'originen.

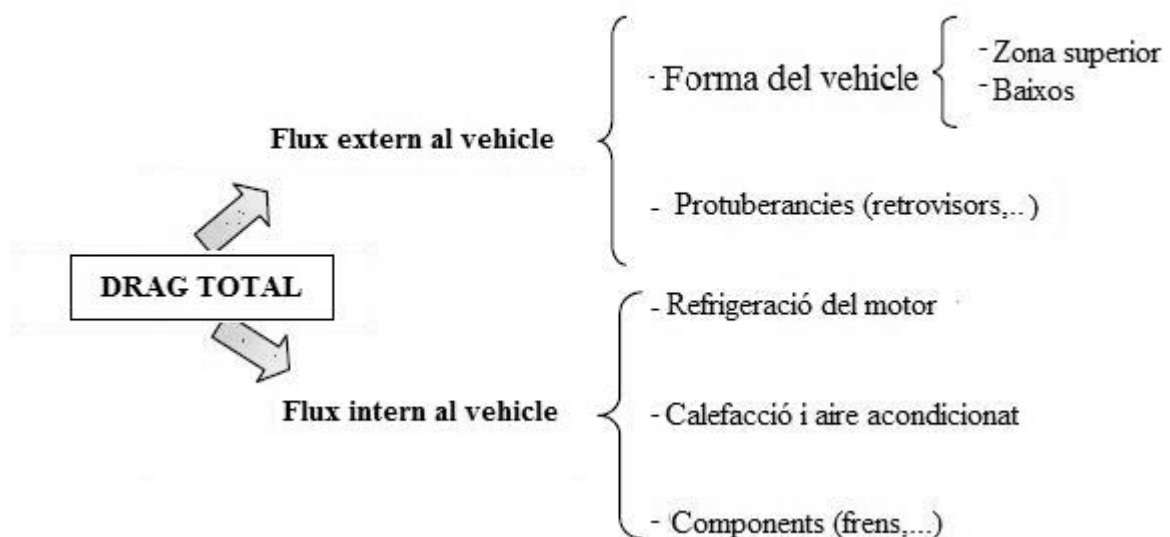


Figura D.5. Relació entre la força de resistència i els components que l'originen.

D.3.- Accions aerodinàmiques sobre vehicles

Per tal de modelitzar les accions aerodinàmiques que actuen sobre un vehicle i poder analitzar-les, les forces i els moments es poden representar esquemàticament per una resultant general de la força i una altre de moment aplicades sobre el centre de gravetat del vehicle (veure figura D.6). Aquestes forces i moments es poden descompondre en la direcció de cadascun dels eixos del 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 .

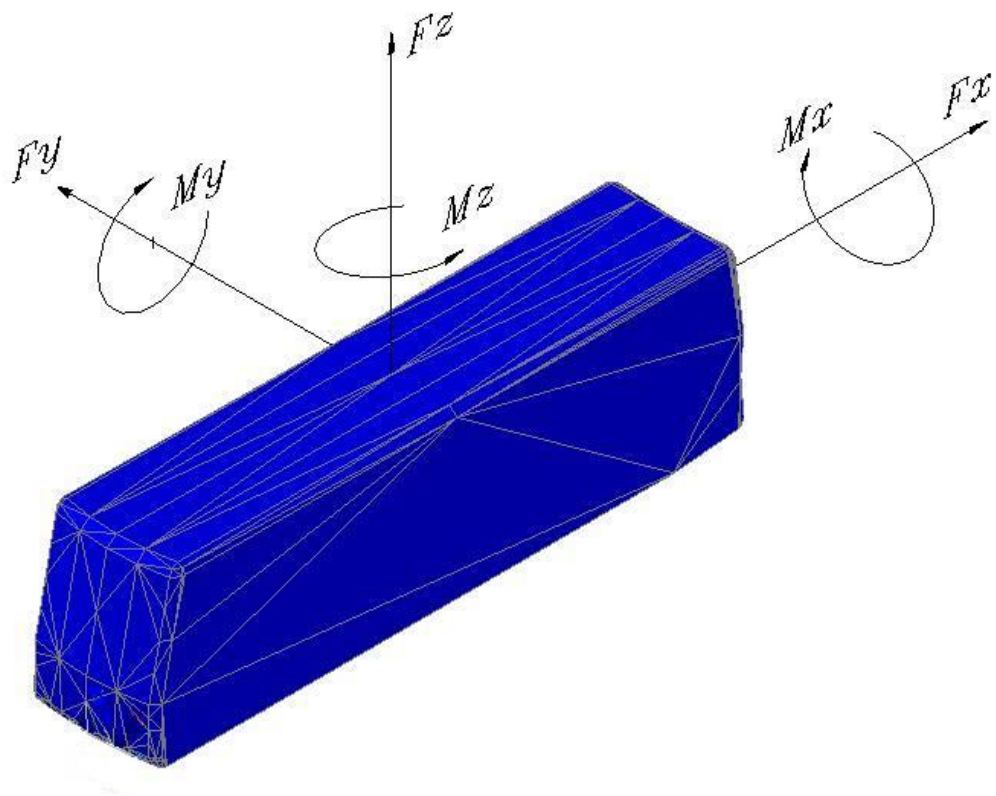


Figura D.6. Descomposició de forces i moments que actuen sobre un vehicle.

Aquestes forces i moments es solen expressar mitjançant equacions simplificades 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 àrea característica, és a dir, l'àrea frontal del vehicle, però a més s'utilitza una dimensió característica del vehicle L , que es pren com la longitud més gran.

- **Resistència aerodinàmica a l'avanç (F_D):**

$$F_D = A_f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \cdot C_D \quad (\text{Eq.D.1})$$

On:

$F_D \rightarrow$ Força de resistència aerodinàmica a l'avanç (N)

$C_D \rightarrow$ Coeficient de resistència a l'avanç

$A_f \rightarrow$ Area característica del vehicle (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

- **Empenta lateral aerodinàmica (F_Y):**

$$F_Y = A_f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \cdot C_L \quad (\text{Eq.D.2})$$

On:

$F_Y \rightarrow$ Força d'empenta lateral aerodinàmica (N)

$C_L \rightarrow$ Coeficient de sustentació aerodinàmic

$A_f \rightarrow$ Area característica del vehicle (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

- **Sustentació aerodinàmica (F_L):**

$$F_L = A_L \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \cdot C_L \quad (\text{Eq.D.3})$$

On:

$F_L \rightarrow$ Força de sustentació aerodinàmica (N)

$C_L \rightarrow$ Coeficient de sustentació aerodinàmic

$A_f \rightarrow$ Area característica del vehicle (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

- **Moment aerodinàmic de bolcada (M_x):**

$$M_x = A_f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \cdot C_{mx} \cdot L \quad (\text{Eq.D.4})$$

On:

$M_x \rightarrow$ Moment aerodinàmic de bolcada ($N \cdot m$)

$C_{mx} \rightarrow$ Coeficient de resistència al balanceig

$A_f \rightarrow$ Area característica del vehicle (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

$L \rightarrow$ Longitud característica (m)

- **Moment aerodinàmic de capcineig (M_y):**

$$M_y = A_f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \cdot C_{my} \cdot L \quad (\text{Eq.D.5})$$

On:

$M_y \rightarrow$ Moment aerodinàmic de capcineig ($N \cdot m$)

$C_{my} \rightarrow$ Coeficient de resistència al capcineig

$A_f \rightarrow$ Area característica del vehicle (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

$L \rightarrow$ Longitud característica (m)

- **Moment aerodinàmic de guinyada (M_z):**

$$M_z = A_f \cdot \frac{\rho}{2} \cdot U^2 \cdot C_{mz} \cdot L \quad (\text{Eq.D.6})$$

On:

$M_z \rightarrow$ Moment aerodinàmic de guinyada ($N \cdot m$)

$C_{mx} \rightarrow$ Coeficient de resistència de guinyada

$A_f \rightarrow$ Àrea característica del vehicle (m^2)

$\rho \rightarrow$ Densitat (Kg / m^3)

$U \rightarrow$ Velocitat (m/s)

$L \rightarrow$ Longitud característica (m)

A_f és l'àrea característica, on es pren la major secció transversal que es denomina àrea frontal (veure figura D.7).

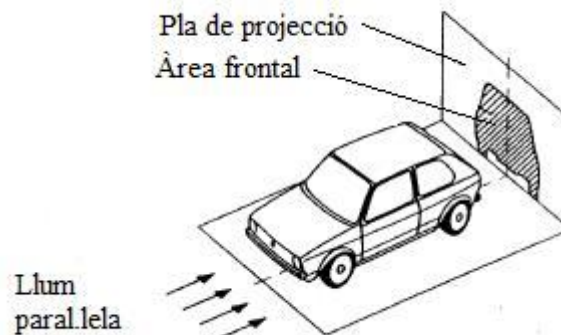


Figura D.7. Àrea característica o àrea frontal d'un vehicle (Saiz Vela, Víctor, 2005).

En general, 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 és simètric ($\beta = 0$), és a dir l'angle d'incidència és nul, les úniques forces que apareixen són F_D i F_L i el moment de M_y .

En el cas que l'angle d'incidència sigui diferent de zero ($\beta \neq 0$), apareixerà un flux asimètric al voltant del vehicle, aleshores les sis components tindran, en general, valors diferents de zero i aquests esforços determinaran la resultant total.

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 serà aerodinàmicament estable. En canvi, el fet contrari provocaria inestabilitat (veure equacions D.7 i D.8) (Mataix, 1982).

- Vehicle aerodinàmicament estable: $\boxed{\frac{\partial C_{mz}}{\partial i} < 0}$ (Eq.D.7)

- Vehicle aerodinàmicament inestable: $\boxed{\frac{\partial C_{mz}}{\partial i} > 0}$ (Eq.D.8)

Així doncs, la geometria del vehicle ha de ser tal que les forces i moments addicionals no afectin substancialment a la seva estabilitat.

Pel que fa als coeficients aerodinàmics, aquests depenen de paràmetres adimensionals del flux com són el nombre de Reynolds i d'angles com el d'incidència β .

En la suposició del cas bidimensional o del flux simètric, tal com es durà a terme a la part inicial de les simulacions, cal dir que l'acció d'un fluid sobre el vehicle produeix una força resultant que es divideix en dues components.

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

Tal i com s'ha comentat anteriorment, la forma aerodinàmica òptima és aquella que permet aconseguir un arrossegament total mínim.

D.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 (C_D), així com el de sustentació (C_L) tendeixen a disminuir a l'augmentar el valor dels radis o dels xamfrans del perfil de la part davantera (veure figura D.8) (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

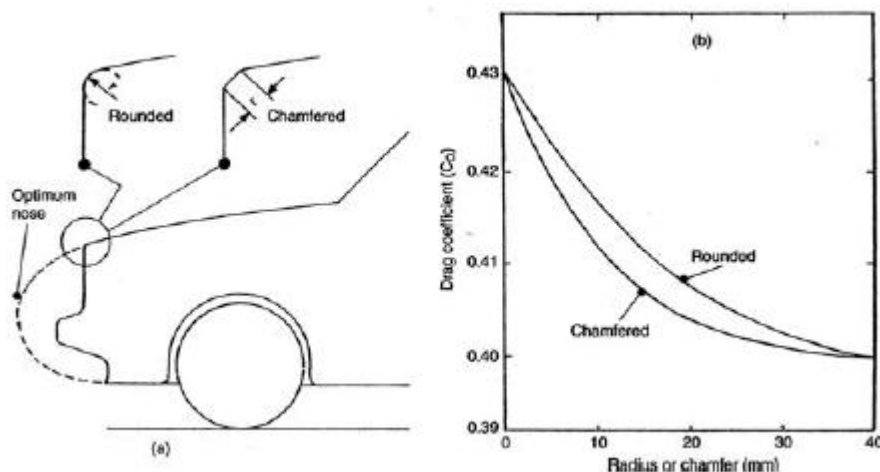


Figura D.8. Influència de la forma davantera sobre el C_D (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Així doncs, per tal d'aconseguir una reducció del coeficient de resistència a l'avanç, a més de dissenyar la part frontal de forma que el flux d'aire passi pel vehicle sense separació, cal tenir en compte la posició del punt d'estancament. Aquest determina quina proporció d'aire passa per sobre i sota del vehicle.

Generalment es pot dir que un punt d'estancament baix és favorable per tenir una baixa resistència a l'avanç.

D.4.1.- Inclinació del capó i el parabrises

La inclinació del capó i el parabrises són dels paràmetres que també influeixen en la resistència a l'avanç del vehicle. A la figura D.9 es pot veure com afecten als coeficients els diferents valors d'aquests angles. Pel que fa a l'angle d'inclinació del capó, aquest té una influència en la mesura en què es dissenya de forma que no permeti que es produeixin separacions. És a dir, s'ha d'aconseguir trobar l'angle adequat pel qual el flux d'aire s'adhereix a la superfície del capó. S'ha de tenir present que aquest també depèn de com sigui la transició entre la zona d'estancament i el capó.

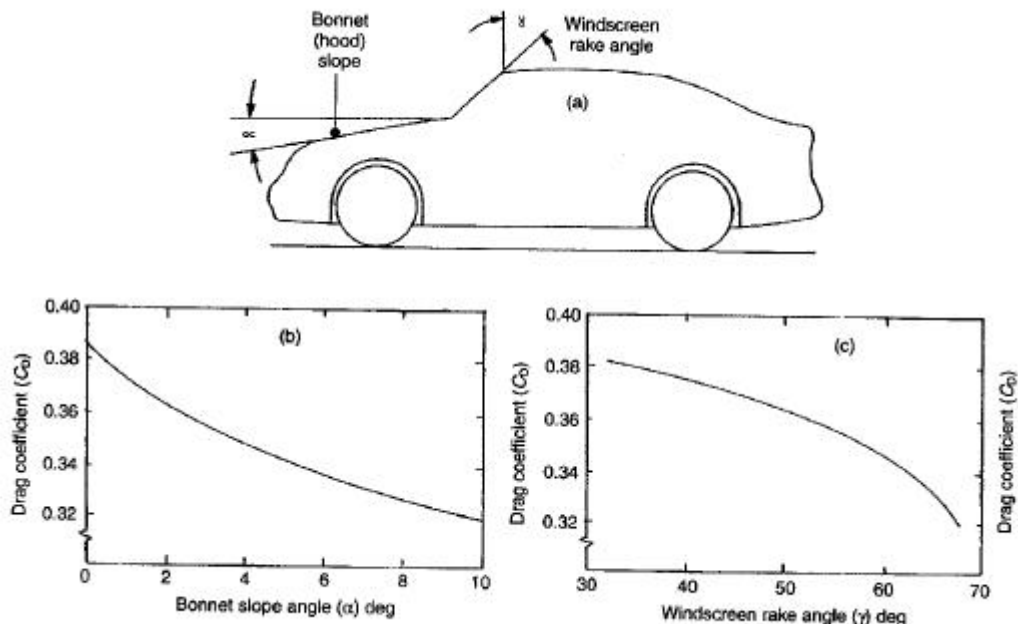


Figura D.9. Efectes sobre el C_D de la inclinació del capó i el parabrises (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Pel que fa a la inclinació del parabrises, aquesta té una influència moderada. La tendència és que el C_D es redueix a l'augmentar l'angle d'inclinació. Aquest angle té un límit pràctic, a més de 60° es produeix la difusió de la llum i s'empitjora la visibilitat i en augmentar l'angle d'inclinació s'escalfa l'interior del vehicle degut als raigs solars.

La inclinació del parabrises també té un efecte favorable sobre la influència de la part de darrera del vehicle. Si s'augmenta la seva inclinació, 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 fet provoca que la pèrdua de quantitat de moviment disminueixi i la pressió a la part de darrera serà 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 .

D.5.- Influència de la geometria de la part posterior

La separació de la capa límit que té lloc a la part del darrere depèn en gran mesura de la seva forma. Segons la forma i la inclinació d'aquesta part es defineixen diferents configuracions. A continuació es comenten les característiques de cadascuna d'elles.

Configuració SQUAREBACK:

És aquella en que la superfície de darrere del vehicle té un angle d'inclinació des de 90° fins a 50° . A la figura D.10 es pot observar amb més claredat el perfil de la part de darrere en aquesta configuració, així com les línies de corrent del flux al voltant del vehicle (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

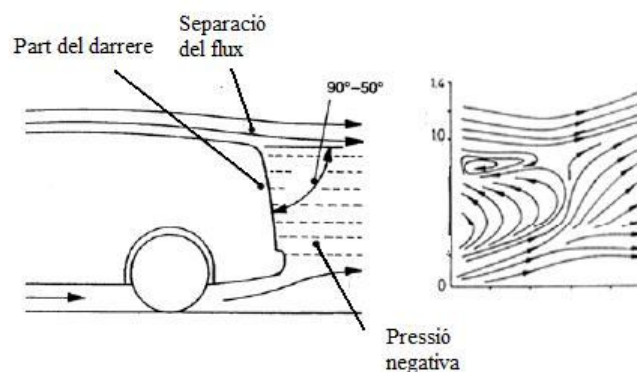


Figura D.10. Configuració SQUAREBACK (comportament entre 90° i 50°) (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Entre aquests angles per a la superfície posterior, el comportament de les línies de corrent presenten canvis molt petits i podem afirmar que no hi ha variació en la resistència a l'avanç tal i com es pot observar a la figura D.11 (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

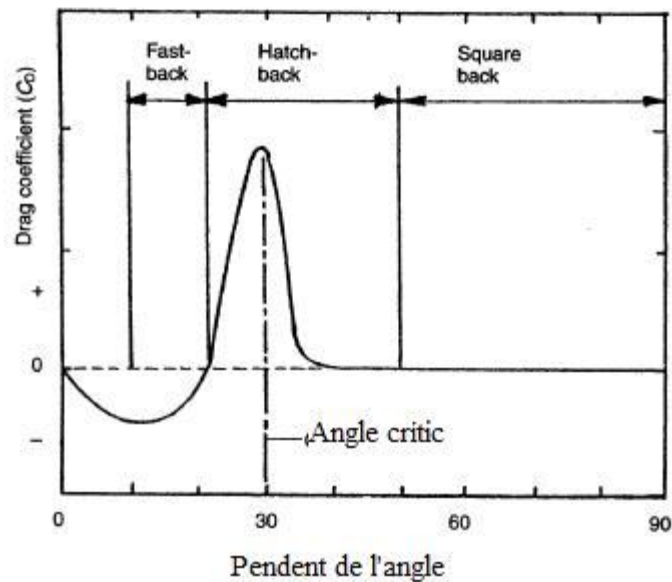


Figura D.11. Efecte de la inclinació de la part posterior del vehicle en C_D (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Configuració FASTBACK:

És aquella en que la superfície de darrera del vehicle té un angle d'inclinació inferior a 25°, veure figura D.12.

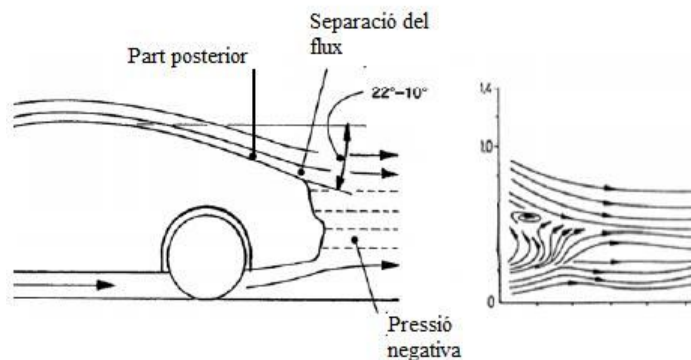


Figura D.12. Configuració FASTBACK (comportament inferior a 25°) (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Les línies de corrent flueixen a través del sostre de la superfície posterior, per tant el flux es desplaça adherit fins a arribar a la part final del vehicle. És per això que la única succió existent prové de la turbulència generada en la superfície vertical de la part del darrera del vehicle. Per tant, a mesura que l'angle d'inclinació disminueix, el C_D disminueix tal i com s'observa a la figura D.11. Tanmateix, a mesura que l'angle d'inclinació s'apropa a zero hi ha un augment del coeficient de resistència que ens duria a tenir una configuració similar a l'Squareback.

Configuració NOTCHBACK:

Aquesta configuració correspon a un vehicle amb un perfil a la part posterior en que la finestra de darrera de l'habitacle és inclinada fins a trobar la superfície horitzontal del maleter. Amb aquesta distribució el flux es manté adherit a la part posterior de la superfície a excepció de la bombolla de separació que es genera en contacte entre la finestra i el maleter. Segons la inclinació i l'alçada del maleter, es millora o s'empitjora la resistència a l'avanç, veure figura D.13 (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

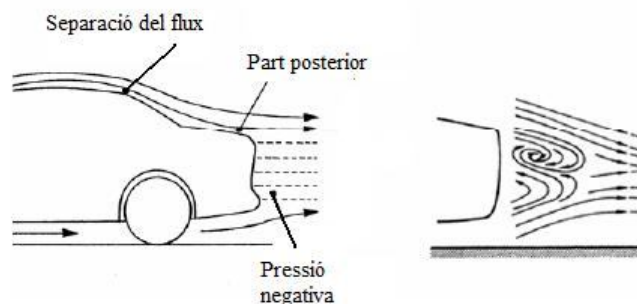


Figura D.13. Configuració NOTCHBACK (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Configuració HATCHBACK

Aquets són els vehicles amb una superfície de la part posterior inclinada des de 50° fins a 25°. Aquesta configuració es caracteritza perquè l'aire flueix a través del sostre del vehicle i segueix fins al començament de la superfície del darrera. Degut al fort pendent d'aquesta, el

flux es desprendreà del perfil del vehicle (veure figura D.14) (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

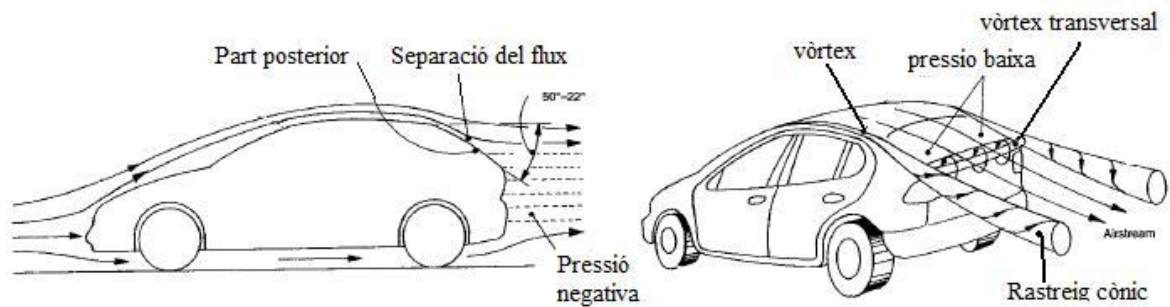


Figura D.14. Configuració HATCHBACK (comportament entre 50° i 25°) (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Si ens fixem en la figura D.11 podem observar que per aquesta configuració existeix un angle d'inclinació crític al voltant dels 30° en el que el coeficient de resistència a l'avanç augmenta de forma considerable i per tant s'ha d'evitar des del punt de vista aerodinàmic. Aquest comportament és semblant a l'observat en el cos d'Ahmed (veure Annex A).

A les figures de les diferents configuracions anteriors es mostren els vòrtexs que es formen. En general, el vòrtex inferior gira de forma antihorària i és el responsable d'arrossegar la brutícia a la part del darrera del vehicle, mentre que el vòrtex superior gira en sentit oposat. Després, les bombolles de separació es tanquen i un parell de vòrtex antihoraris longitudinals formen el deixant en la figura D.14.

D.6.- Influència dels laterals i sostre del vehicle

La forma dels laterals i del sostre del vehicle poden ajudar a millorar el comportament aerodinàmic del vehicle. Experimentalment s'ha comprovat que la curvatura dels laterals i dels sostre, així com la forma del final del vehicle afecten a la resistència a l'avanç (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005). En general, si augmentem fins a un cert límit la curvatura del sostre i dels laterals del vehicle redueix el valor del coeficient de resistència a l'avanç. En la figura D.15 s'observa que a mesura que augmenta la curvatura del sostre es redueix el valor del coeficient (C_D). Ara bé, cal tenir present que una curvatura excessiva del sostre fa que el coeficient torni a augmentar.

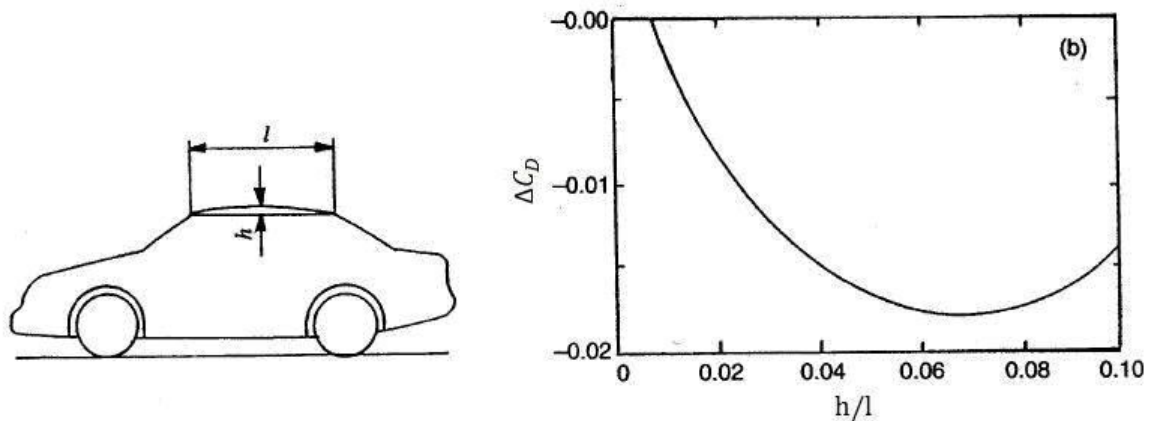


Figura D.15. Efecte de curvatura en el sostre en C_D (Saiz Vela, Víctor, 2005).

El fet d'augmentar la curvatura dels laterals del vehicle implica una reducció del coeficient de resistència a l'avanç. Tal com s'observa a la figura D.16 la reducció és significativa enfront a un vehicle amb els laterals rectes. Ara bé, si augmentem la curvatura en excés la reducció de la resistència aerodinàmica esdevé quasi negligible.

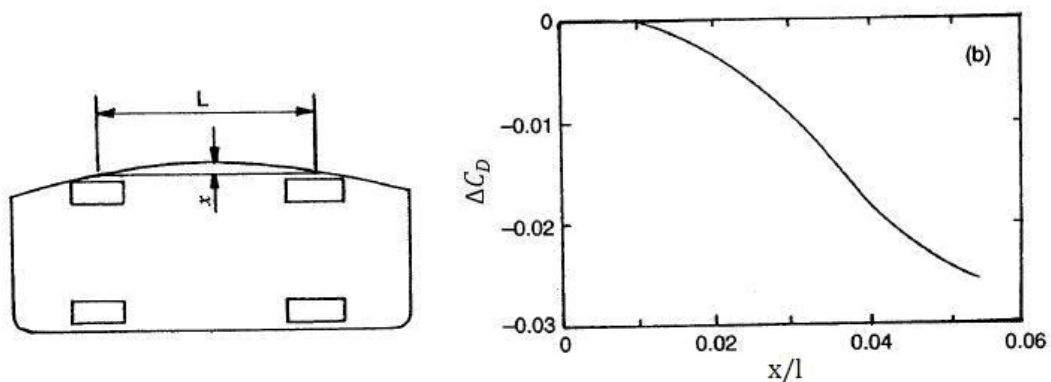


Figura D.16. Efecte de curvatura dels laterals en C_D (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Tal com s'ha vist, la curvatura tant del sostre com dels laterals del vehicle es pot augmentar fins a un cert límit per tal de millorar-ne l'aerodinàmica. Aquesta limitació és deguda a què a l'augmentar la curvatura també s'incrementa l'àrea frontal del vehicle, amb l'efecte contraproductiu que això provoca a la resistència a l'avanç.

Un altre dels aspectes on es pot millorar és la part de darrera dels laterals del vehicle, a través de modificar la seva inclinació (veure figura D.17) (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

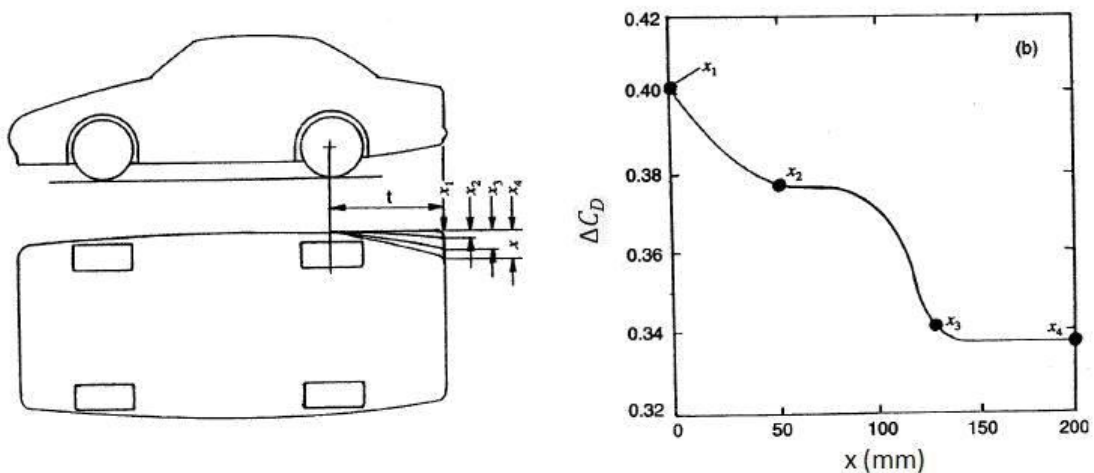


Figura D.17. Efecte de l'estretament lateral de la part posterior del cotxe en el C_D (Saiz Vela, Víctor, 2005).

D.7.- Baixos del vehicle

En la resistència aerodinàmica no només influeixen les formes de la part superior del vehicle sinó que també influeixen de forma significativa els baixos del vehicle, és a dir, els acabats i les formes que tenen les superfícies que el componen. El fet d'allotjar els elements baixos de forma adequada, o afegint panells de manera que la superfície tingui menys obstacles, fa que disminueixi el coeficient de resistència a l'avanç ja que es generen menys turbulències a la part inferior del vehicle.

D.7.1.- Part posterior dels baixos

Una altra manera de millorar la resistència aerodinàmica s'aconsegueix inclinant en sentit ascendent la part posterior dels baixos del vehicle, tal com es mostra a la figura D.18. Això és degut a que es produeix un efecte difusor en la part de darrera del vehicle, és a dir, un efecte Venturi. El que es vol aconseguir amb aquest efecte és que l'aire no surti dels baixos de cop i hi hagi molta diferència de pressions i s'originin turbulències. La inclinació a la part posterior

provoca que poc a poc s'augmenti la pressió i que el flux segueixi adherit al perfil del vehicle, disminuint, així, les pèrdues. No obstant, és important escollir una relació òptima entre els paràmetres que intervenen per tal d'aconseguir uns bons resultats. Els paràmetres a tenir en compte són:

- Relació entre la longitud dels baixos (t)
- Longitud total del cotxe (L)
- Angle d'inclinació (β)

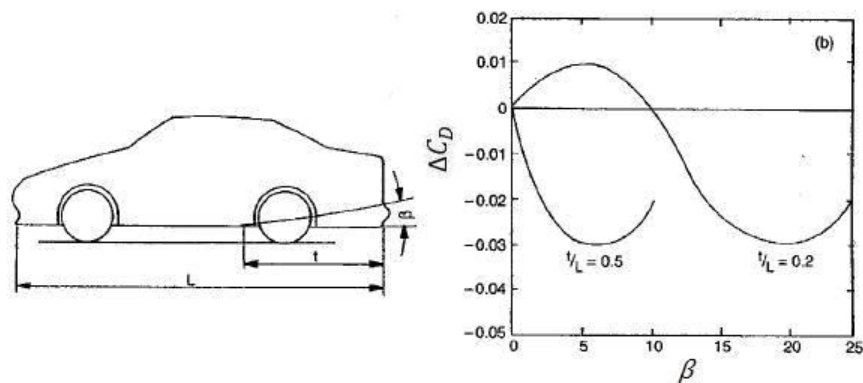


Figura D.18. Efecte de la inclinació dels baixos a la part posterior del vehicle (Saiz Vela, Víctor, 2005).

D.8.- Rodes

Si es té una roda que 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 és arrossegat per la rotació de la roda i s'indueix el moviment en les partícules d'aire que hi ha al seu voltant. Aquest fet provoca una vòrtex (veure figura D.19).

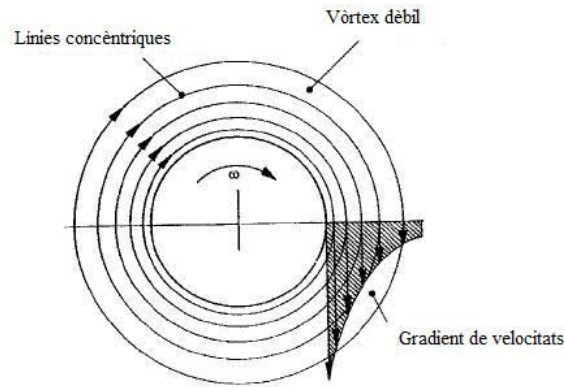


Figura D.19. Vòrtex generat per una roda en rotació (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Si ens fixem en la figura D.20 podem veure millor el que succeeix amb el flux de l'aire que passa al voltant d'una roda quan aquesta es troba girant sobre el terra i es troba al descobert. Tal i com s'observa podem veure com el vòrtex que es genera degut a la pròpia rotació de la roda interactua i distorsiona el moviment del flux incident sobre el vehicle. El flux d'aire que incideix sobre la roda es caracteritza perquè quan es troba en contacte amb la roda la major part flueix a través del contorn superior, mentre que en la part inferior de la roda el flux s'estanca i es genera una zona d'alta pressió. Les línies de corrent tendeixen a seguir el perfil de la roda fins a arribar al punt de separació. És aleshores quan les línies de corrent es separen de la roda i es genera una zona de vòrtex turbulents. El punt d'estancament es desplaça cap a la part de darrera a mesura que augmenta la velocitat de rotació de la roda.

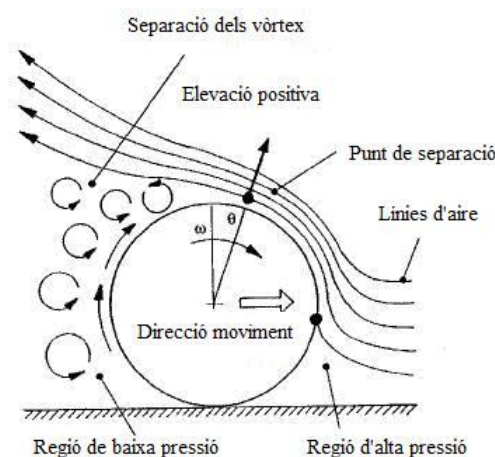


Figura D.20. Flux d'aire a través d'una roda en rotació en contacte amb el terra (Saiz Vela, Víctor, 2005).

La distribució de pressions que es produeix al voltant de la roda es pot observar a la figura D.21, que mostra una pressió positiva situada 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. A la mateixa figura es pot veure com la pressió disminueix fins a un cert punt més enllà de la part més alta de la roda, i aleshores la pressió es manté aproximadament constant a la part de darrera de la roda on es crea el deixant. Així, la roda produeix una força sustentadora ascendent que tendeix a disminuir el contacte entre la banda de rodament del pneumàtic i el terra.

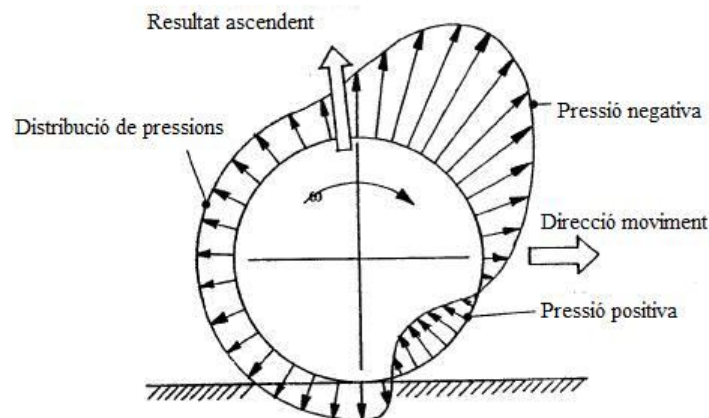


Figura D.21. Distribució de pressions degudes a l'acció de l'aire sobre una roda en moviment (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Un cop s'ha analitzat el flux al voltant d'una roda que gira sobre el terra, cal veure què succeeix amb el flux d'una roda d'automòbil, és a dir, cal considerar 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 incideixen sobre el vehicle, per tant es genera una pèrdua de pressió local en aquesta zona. Les línies de corrent al voltant de l'aire que passa a través d'una roda d'automòbil es poden observar a la figura D.22 (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005). Degut a efectes viscosos, l'aire de la part del darrera de la roda és mogut fins a l'espai existent entre la part superior del pneumàtic i l'arc que forma el parafang. L'aire estancat en la cavitat del parafang circula fins a la part superior de la roda degut a una lleugera intensificació de la pressió i aleshores és expulsat cap a la part frontal del pneumàtic per la separació del

parafang, zona on l'aire es troba a una pressió inferior en direcció descendent. Per tant es produeix una recirculació de l'aire. En la direcció lateral succeeix un fenomen similar que provoca la separació del flux que augmenta la resistència a l'avanç.

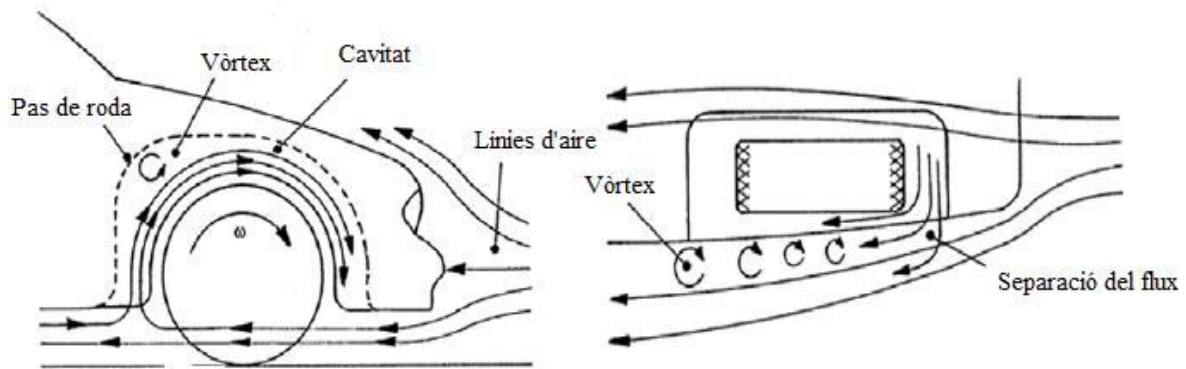


Figura D.22. Línies de corrent al voltant d'una roda de vehicle (Saiz Vela, Víctor, 2005).

Per tal de millorar la resistència a l'avanç deguda al flux que circula al voltant de les rodes és aconsellable la disminució de l'espai existent entre els baixos del vehicle i el terra, així com realitzar un disseny del parafang adequat que protegeixi el pneumàtic. L'objectiu és aconseguir una circulació adequada del flux incident per tal de disminuir l'impuls de l'aire de forma que es redueixen les zones on es creen petites turbulències. Això provocarà una reducció en els coeficients aerodinàmics tal i com es pot observar a la figura D.23, on els coeficients que es presenten són referents únicament a la roda (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

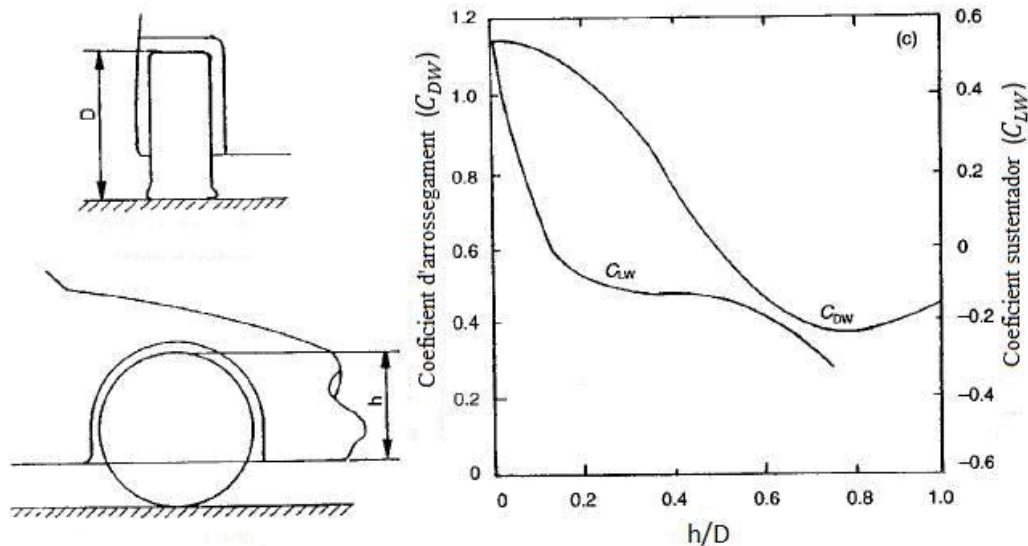


Figura D.23. Efecte del disseny de la distància dels baixos sobre els coeficients de resistència a l'avanç i sustentació de les rodes (Saiz Vela, Víctor, 2005).

D.9.- Sustentació aerodinàmica

Tal i com s'ha comentat en l'Annex C, la 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, anomenada força de sustentació aerodinàmica (lift). Cal tenir en compte que la força de sustentació d'una ala d'un avió és positiva, o sigui, té sentit ascendent, però en els automòbils interessa que sigui negativa, o sigui, en sentit descendent. Per aquest motiu, s'acostuma a tractar la càrrega aerodinàmica (força aerodinàmica en sentit descendent), en termes positius.

El coeficient de sustentació (C_L) indica la capacitat que té un cos per crear una força en direcció perpendicular al perfil de l'objecte. Pel que fa a la sustentació cal destacar que en un automòbil corrent es produeix una força de sustentació positiva, encara que no sigui prou gran com perquè superi al pes d'aquest provocant una elevació del vehicle.

A la figura D.24 es pot observar la distribució teòrica de pressions que es té al voltant d'un vehicle (tal i com especifica el Sr. Víctor Saiz Vela, 2005).

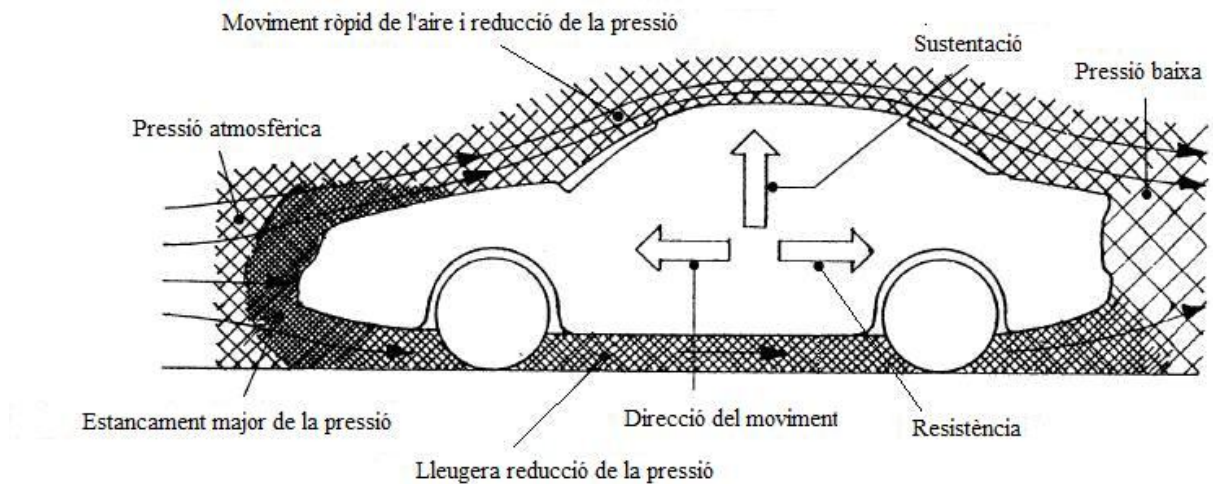


Figura D.24. Distribució teòrica de pressions al voltant d'un vehicle (Saiz Vela, Víctor, 2005).

D.10.- Bibliografia

Bruce R, Munson., Donald F, Young., Theodore H, Okijshi. Fundamentos de Mecànica de Fluidos. Editorial Limusa Wiley. 2000.

J. D. Anderson. Fundamentals of Aerodynamics. M_C Graw-Hill. 1991.

M_C Allen Rose, Browand Fred, Roses James. The Aerodynamics of heavy vehicles: tucks, buses, and trains. Berlin Springer, cop. 2004.

M_C Beath, Simon. Aerodinàmica del automòvil de competició. Barcelona, Ediciones CEAC. 2005.

Saiz Vela, Victor. Estudi de simulació aerodinàmica del Roadster FS1. Universitat Politècnica de Catalunya. 2005.

ANNEX E

ANNEX E: PREPROCÉS DE LA SIMULACIÓ CFD

En aquest apartat s'han realitzat tots el càlculs necessaris per la realització de la simulació dels autobusos en els seus programes corresponents. Això correspon als càlculs de les velocitats d'entrada en els túnels de vent virtuals, les coordenades de cada túnel de vent i els angles d'incidència del flux.

E.1.- Càlcul de l'angle d'incidència del flux i la seva velocitat

Tot seguit es mostren els càlculs realitzats per trobar l'angle d'incidència del flux i la seva velocitat corresponent.

Abans d'entrar en detall amb els valors que hem considerat inicialment per realitzar els càlculs, en la figura E.1 es representen les proporcions del domini computacional en funció de L que és la llargada del bus i té un valor de 12,2m i C que és l'amplada del bus i té un valor de 2,5m.

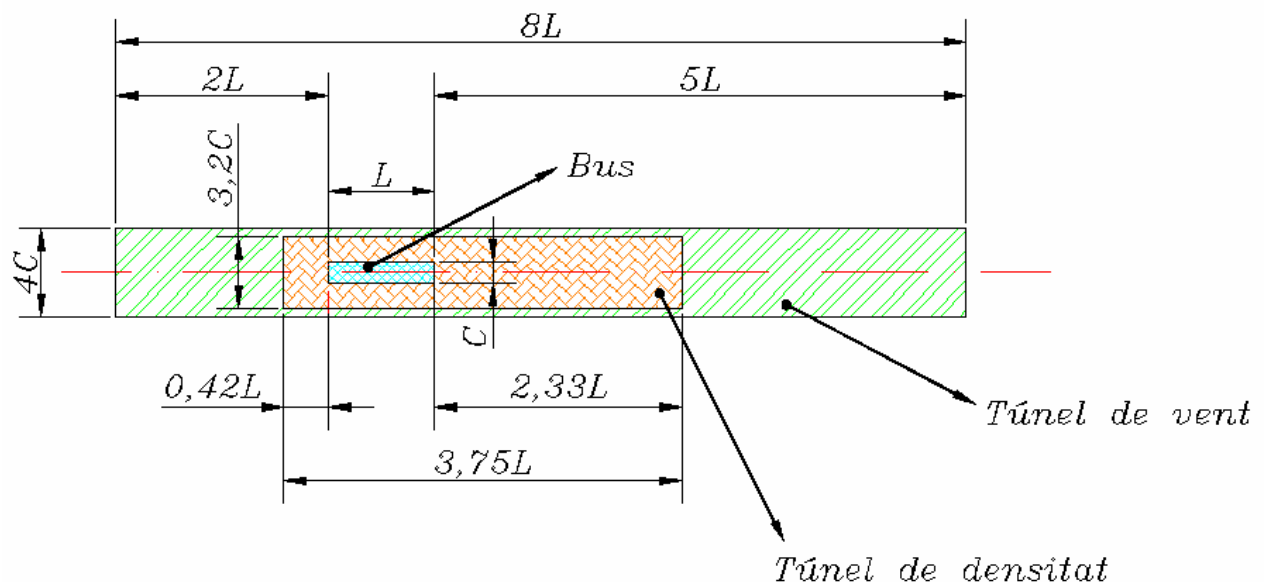


Figura E.1. Proporcions del domini computacional per els diferents models d'autobús.

Si observem la figura E.2 podem veure un esquema de la incidència del flux asimètric sobre el vehicle i dels diferents punts del domini computacional. Cal recordar que sempre treballem en un sistema de referències mòbil amb el vehicle.

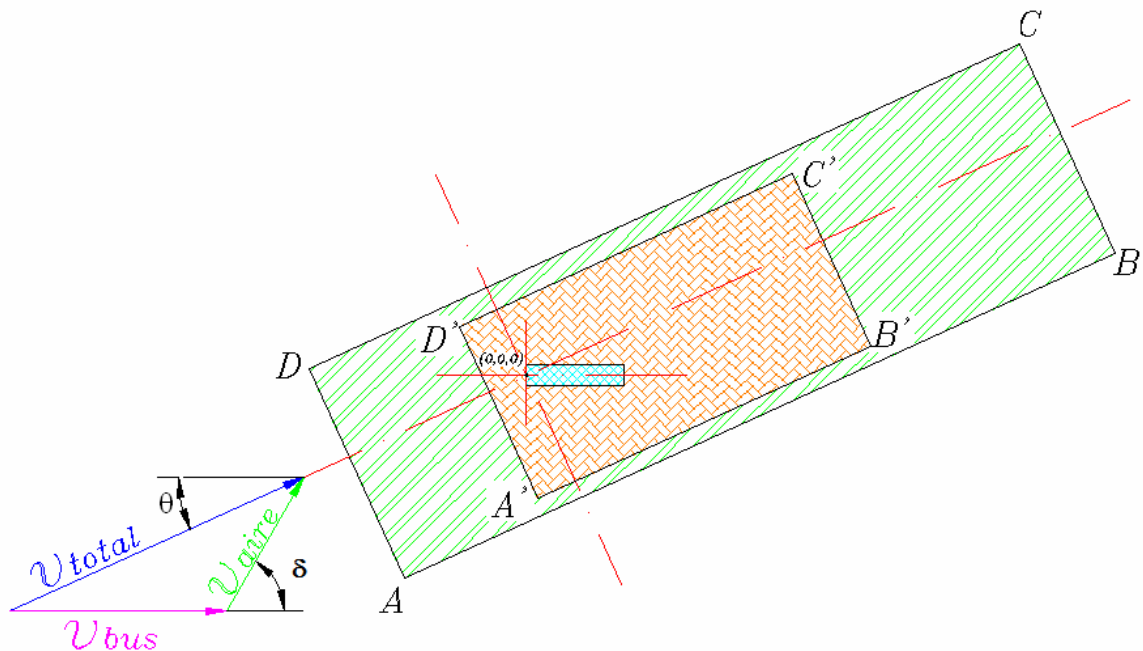


Figura E.2. Incidència del flux asimètric sobre el vehicle i punts del domini computacional.

Els valors de L i C són les mides reals del bus i seran fixes per a cada cas. El que variarà en cada cas, però, seran les velocitats del bus i de l'aire. També hem donat diferents valors a l'angle d'incidència del flux δ . A continuació mostrem els casos que es desenvolupen en el present projecte:

- **Cas 1:**

- Model utilitzat: Bus 1
- Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 180° en intervals de 30°
- $V_{BUS} = 28m/s$
- $V_{AIRE} = 20m/s$

- **Cas 2:**

- Model utilitzat: Bus 2
- Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 180° en intervals de 30°
- $V_{BUS} = 28m/s$
- $V_{AIRE} = 20m/s$

- **Cas 3:**

- Model utilitzat: Bus 1
- Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 180° en intervals de 30°
- $V_{BUS} = 28m/s$
- $V_{AIRE} = 20m/s$

- **Cas 4:**

- Model utilitzat: Bus 1
- Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 90° en intervals de 30°
- $V_{BUS} = 28m/s$
- $V_{AIRE} = 10m/s$

- **Cas 5:**

- Model utilitzat: Bus 1
- Angles d'incidència de la velocitat de l'aire : de 0° a 90° en intervals de 30°
- $V_{BUS} = 22,22m/s$
- $V_{AIRE} = 20m/s$

Cal destacar que, ens els casos 1, 2 i 3, les coordenades del domini computacional i del túnel de densitat seran les mateixes perquè entre ells canvia el model de bus utilitzat i alguna condició de contorn que no afecta a les coordenades.

Per resoldre els paràmetres de la velocitat total utilitzem el teorema del cosinus (veure equació E.1) i per trobar l'angle θ utilitzarem el teorema del sinus (veure equació E.2).

$$V_{TOTAL}^2 = V_{BUS}^2 + V_{AIRE}^2 - 2 \cdot V_{BUS} \cdot V_{AIRE} \cdot \cos(180 - \delta) \quad (\text{Eq.E.1})$$

$$\frac{\sin \theta}{V_{AIRE}} = \frac{\sin(180 - \delta)}{V_{TOTAL}} \quad (\text{Eq.E.2})$$

Tot seguit es mostra l'exemple de càlcul per obtenir els valors esmentats anteriorment a partir de les dades inicials del cas 1. Pels altres casos es repeteix el mateix procés però amb el seus respectius valors.

$$- \delta = 0^\circ$$

$$V_{TOTAL}^2 = 28^2 + 20^2 - 2 \cdot 28 \cdot 20 \cdot \cos(180 - 0) \rightarrow V_{TOTAL} = 48 \text{ m/s}$$

$$\frac{\sin \theta}{20} = \frac{\sin(180 - 0)}{48} \rightarrow \theta = 0^\circ$$

$$- \delta = 30^\circ$$

$$V_{TOTAL}^2 = 28^2 + 20^2 - 2 \cdot 28 \cdot 20 \cdot \cos(180 - 30) \rightarrow V_{TOTAL} = 46.41 \text{ m/s}$$

$$\frac{\sin \theta}{20} = \frac{\sin(180 - 30)}{46.41} \rightarrow \theta = 12.44^\circ$$

$$- \delta = 60^\circ$$

$$V_{TOTAL}^2 = 28^2 + 20^2 - 2 \cdot 28 \cdot 20 \cdot \cos(180 - 60) \rightarrow V_{TOTAL} = 41.76 \text{ m/s}$$

$$\frac{\sin \theta}{20} = \frac{\sin(180 - 60)}{41.76} \rightarrow \theta = 24.50^\circ$$

$$- \delta = 90^\circ$$

$$V_{TOTAL}^2 = 28^2 + 20^2 - 2 \cdot 28 \cdot 20 \cdot \cos(180 - 90) \rightarrow V_{TOTAL} = 34.41 m/s$$

$$\frac{\sin \theta}{20} = \frac{\sin(180 - 90)}{34.41} \rightarrow \theta = 35.54^\circ$$

$$- \delta = 120^\circ$$

$$V_{TOTAL}^2 = 28^2 + 20^2 - 2 \cdot 28 \cdot 20 \cdot \cos(180 - 120) \rightarrow V_{TOTAL} = 24.98 m/s$$

$$\frac{\sin \theta}{20} = \frac{\sin(180 - 120)}{24.98} \rightarrow \theta = 43.90^\circ$$

$$- \delta = 150^\circ$$

$$V_{TOTAL}^2 = 28^2 + 20^2 - 2 \cdot 28 \cdot 20 \cdot \cos(180 - 150) \rightarrow V_{TOTAL} = 14.63 m/s$$

$$\frac{\sin \theta}{20} = \frac{\sin(180 - 150)}{14.63} \rightarrow \theta = 43.12^\circ$$

$$- \delta = 180^\circ$$

$$V_{TOTAL}^2 = 28^2 + 20^2 - 2 \cdot 28 \cdot 20 \cdot \cos(180 - 180) \rightarrow V_{TOTAL} = 8 m/s$$

$$\frac{\sin \theta}{20} = \frac{\sin(180 - 180)}{8} \rightarrow \theta = 0^\circ$$

A la taula E.1 es mostren tots els paràmetres calculats per al cas 1, 2 i 3. A la taula E.2 es mostren els paràmetres calculats per al cas 3. Finalment la taula E.3 és la taula dels resultats per al cas 5.

AIRE	TÚNEL	
δ	V total (m/s)	θ
0°	48	0°
30°	46,41	12,44°
60°	41,76	24,5°
90°	34,41	35,54°
120°	24,98	43,90°
150°	14,63	43,12°
180°	8	0°

Taula E.1. Valors de la velocitat total i de l'angle θ per als casos 1, 2 i 3.

AIRE	TÚNEL	
δ	V total (m/s)	θ
0°	38,00	0
30°	37,00	7,77
60°	34,12	14,7
90°	29,73	19,65

Taula E.2. Taula E.1. Valors de la velocitat total i de l'angle θ per al cas 4.

AIRE	TÚNEL	
δ	V total (m/s)	θ
0°	42,22	0
30°	40,79	7,77
60°	36,58	14,7
90°	29,90	19,65

Taula E.3. Valors de la velocitat total i de l'angle θ per al cas 5.

E.2.- Càlcul de les coordenades del domini computacional (túnel de vent)

En aquest apartat mostrem els càlculs de les coordenades de túnel de vent per a cada cas a partir del seu angle d'entrada θ .

La figura E.3 és un esquema del túnel de vent amb les seves mides corresponents en funció de l'angle d'entrada θ i la figura E.4 és un croquis de l'autobús i de les seves mides

corresponents que també estan en funció de l'angle d'entrada θ . Aquestes relacions són necessàries per poder calcular les coordenades del domini computacional.

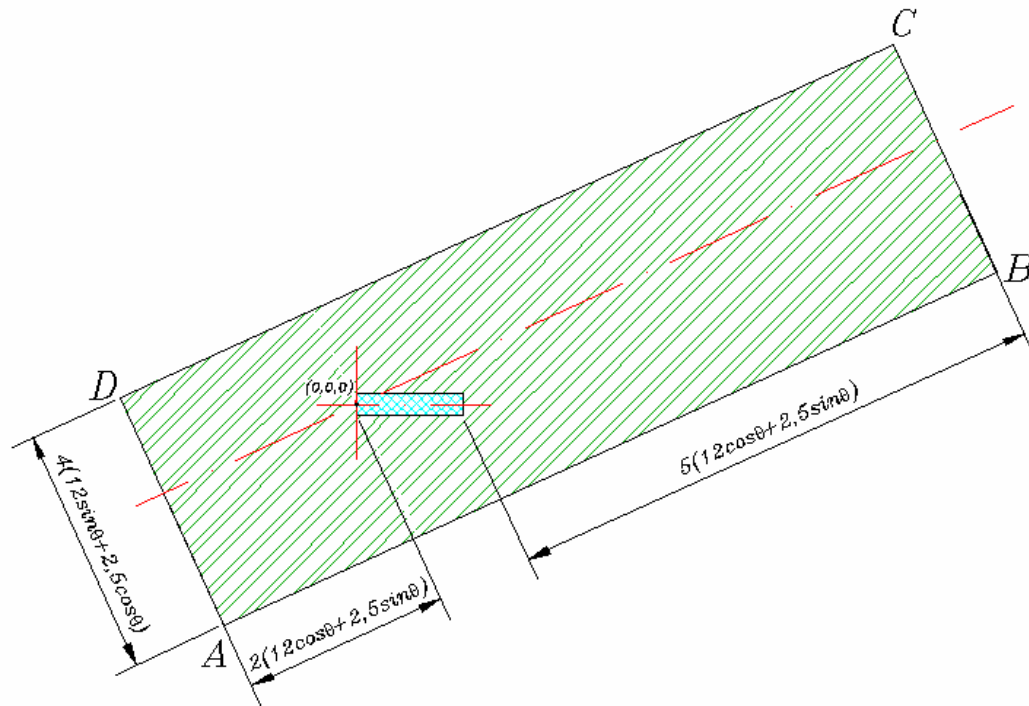


Figura E.4. Mides del túnel de vent en funció de l'angle θ .

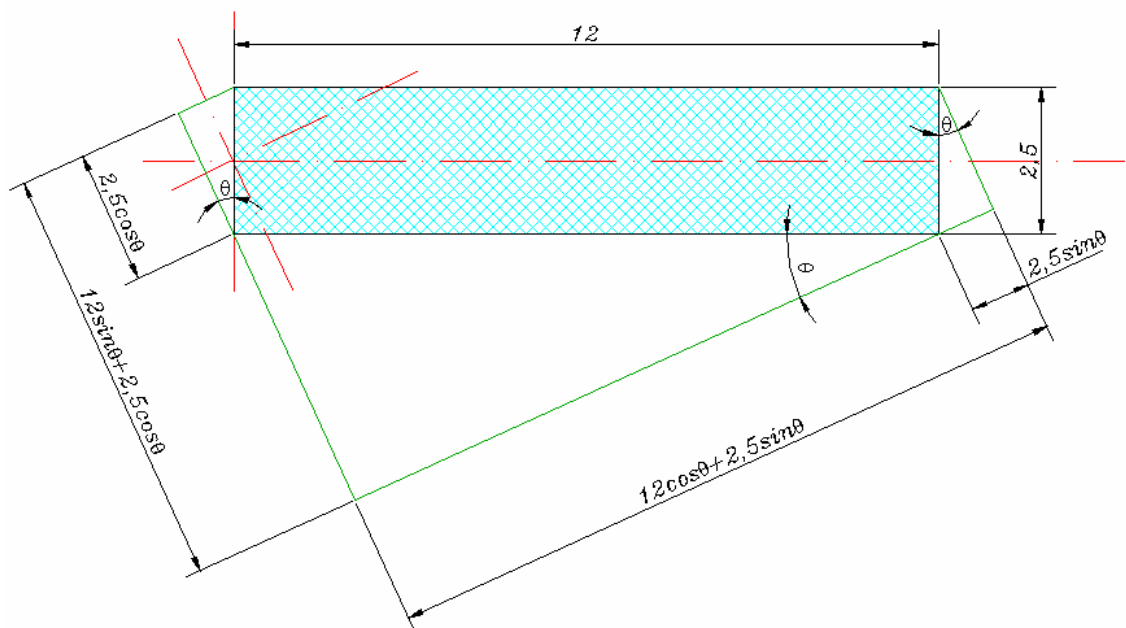


Figura E.5. Mides del bus en funció de l'angle θ .

Si observem la figura E.5 veurem la ubicació de cada punt dins del domini computacional. Hem de dir que el túnel de vent té una alçada total de 12m, per tant la coordenada Z tindrà un valor de 0m per la base del túnel i de 12m per al sostre del túnel.

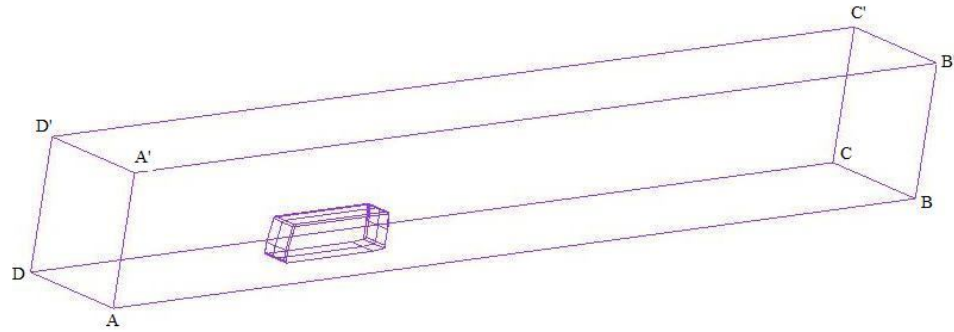


Figura E.5. Ubicació dels punts del domini computacional.

Tot seguit es mostren les equacions per resoldre les coordenades de cada punt:

Punt A:

$$x = -((2,5 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)) - (2 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \sin(\theta)) - 6)$$
$$y = -((2,5 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \sin(\theta)) + (2 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \cos(\theta)))$$

Punt B:

$$x = ((5,5 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)) + (2 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \sin(\theta)) + 6)$$
$$y = ((-2 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \cos(\theta)) + (5,5 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \sin(\theta)))$$

Punt C:

$$x = -((5,5 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)) - (2 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \sin(\theta)) + 6)$$
$$y = ((5,5 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \sin(\theta)) + (2 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \cos(\theta)))$$

Punt D:

$$x = -((2,5 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)) + (2 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \sin(\theta)) - 6)$$

$$y = -((2,5 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \sin(\theta)) - (2 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \cos(\theta)))$$

- **Coordenades del domini computacional:**

- Cas 1: veure taules E.4 i E.5.

Com ja hem dit anteriorment les coordenades per als casos 2 i 3 seran les mateixes que per al Cas 1.

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-24,00	-5,00	0,00	-24,00	-5,00	12,00	-24,00	5,00	0,00	-24,00	5,00	12,00
30°	-21,76	-16,42	0,00	-21,76	-16,42	12,00	-26,09	3,22	0,00	-26,09	3,22	12,00
60°	-15,19	-25,59	0,00	-15,19	-25,59	12,00	-27,21	0,80	0,00	-27,21	0,80	12,00
90°	-6,35	-30,96	0,00	-6,35	-30,96	12,00	-27,29	-1,64	0,00	-27,29	-1,64	12,00
120°	1,34	-32,58	0,00	1,34	-32,58	12,00	-26,74	-3,41	0,00	-26,74	-3,41	12,00
150°	0,61	-32,53	0,00	0,61	-32,53	12,00	-26,81	-3,25	0,00	-26,81	-3,25	12,00
180°	-24,00	-5,00	0,00	-24,00	-5,00	12,00	-24,00	5,00	0,00	-24,00	5,00	12,00

Taula E.4. Coordenades del domini computacional per als casos 1, 2 i 3 (unitats en metres).

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	72,00	-5,00	0,00	72,00	-5,00	12,00	72,00	5,00	0,00	72,00	5,00	12,00
30°	74,00	4,71	0,00	74,00	4,71	12,00	69,66	24,34	0,00	69,66	24,34	12,00
60°	71,85	14,07	0,00	71,85	14,07	12,00	59,82	40,47	0,00	59,82	40,47	12,00
90°	66,68	21,20	0,00	66,68	21,20	12,00	45,73	50,53	0,00	45,73	50,53	12,00
120°	61,17	25,00	0,00	61,17	25,00	12,00	33,10	54,17	0,00	33,10	54,17	12,00
150°	61,73	24,72	0,00	61,73	24,72	12,00	34,32	53,99	0,00	34,32	53,99	12,00
180°	72,00	-5,00	0,00	72,00	-5,00	12,00	72,00	5,00	0,00	72,00	5,00	12,00

Taula E.5. Coordenades del domini computacional per als casos 1,2 i 3 (unitats en metres).

- Cas 4: veure taules E.6 i E.7.

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-24,00	-5,00	0,00	-24,00	-5,00	12,00	-24,00	5,00	0,00	-24,00	5,00	12,00
30°	-23,18	-12,26	0,00	-23,18	-12,26	12,00	-25,40	3,99	0,00	-25,40	3,99	12,00
60°	-20,83	-18,33	0,00	-20,83	-18,33	12,00	-26,37	2,80	0,00	-26,37	2,80	12,00
90°	-18,29	-22,24	0,00	-18,29	-22,24	12,00	-26,88	1,83	0,00	-26,88	1,83	12,00

Taula E.6. Coordenades del domini computacional per al cas 4 (unitats en metres).

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	72,00	-5,00	0,00	72,00	-5,00	12,00	72,00	5,00	0,00	72,00	5,00	12,00
30°	73,74	0,97	0,00	73,74	0,97	12,00	71,53	17,22	0,00	71,53	17,22	12,00
60°	73,90	6,52	0,00	73,90	6,52	12,00	68,35	27,65	0,00	68,35	27,65	12,00
90°	73,19	10,42	0,00	73,19	10,42	12,00	64,59	34,49	0,00	64,59	34,49	12,00

Taula E.7. Coordenades del domini computacional per al cas 4 (unitats en metres).

- Cas 5: veure taules E.8 i E.9.

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-24,00	-5,00	0,00	-24,00	-5,00	12,00	-24,00	5,00	0,00	-24,00	5,00	12,00
30°	-21,26	-17,50	0,00	-21,26	-17,50	12,00	-26,25	2,99	0,00	-26,25	2,99	12,00
60°	-12,42	-27,80	0,00	-12,42	-27,80	12,00	-27,35	-0,02	0,00	-27,35	-0,02	12,00
90°	-0,46	-32,41	0,00	-0,46	-32,41	12,00	-26,91	-3,02	0,00	-26,91	-3,02	12,00

Taula E.8. Coordenades del domini computacional per al cas 5 (unitats en metres).

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	72,00	-5,00	0,00	72,00	-5,00	12,00	72,00	5,00	0,00	72,00	5,00	12,00
30°	73,96	5,72	0,00	73,96	5,72	12,00	68,97	26,20	0,00	68,97	26,20	12,00
60°	70,40	16,72	0,00	70,40	16,72	12,00	55,47	44,50	0,00	55,47	44,50	12,00
90°	62,53	24,27	0,00	62,53	24,27	12,00	36,09	53,66	0,00	36,09	53,66	12,00

Taula E.9. Coordenades del domini computacional per al cas 5 (unitats en metres).

E.3.- Càlcul de les coordenades de la densitat

En aquest apartat es mostra com hem calculat les coordenades de cada túnel de densitat a partir del seu angle d'entrada θ . Cal recordar que el túnel de densitat és una regió propera al vehicle on la mida del mallat és més petita que en la resta del volum d'aire. Això es fa per capturar amb més precisió el comportament simulat a l'estela del vehicle.

La figura E.6 és un esquema del túnel de densitat amb les seves mides corresponents en funció de l'angle d'entrada θ .

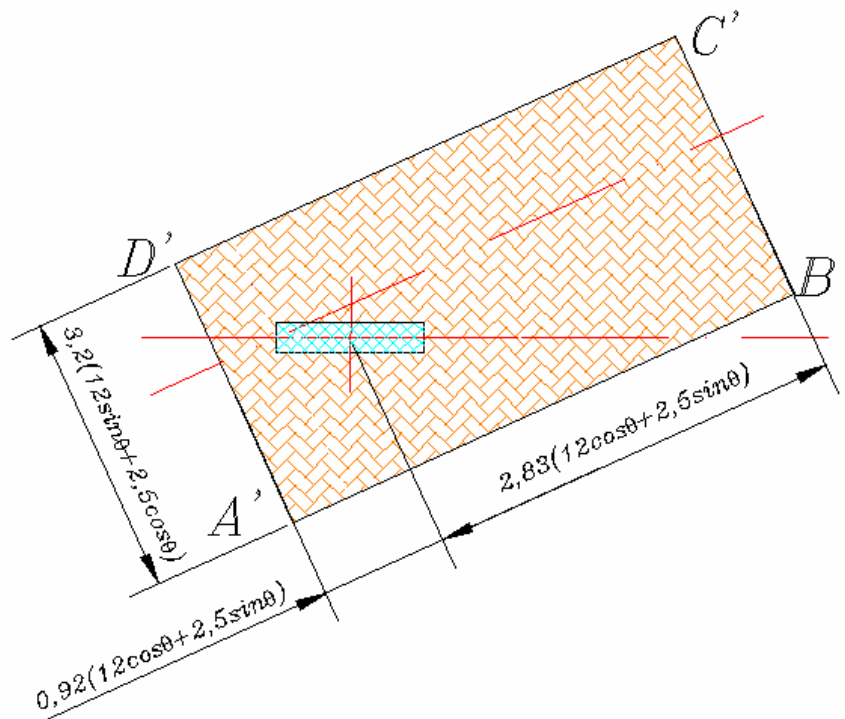


Figura E.6. Mides del túnel de densitat en funció de l'angle θ .

A la figura E.7 podem observar la ubicació dels punts del túnel de densitat. Hem de dir que el túnel de densitat té una alçada total de 7m. Per tant la coordenada Z tindrà un valor de 0 m per a la base del túnel i de 7 m per al sostre del túnel.

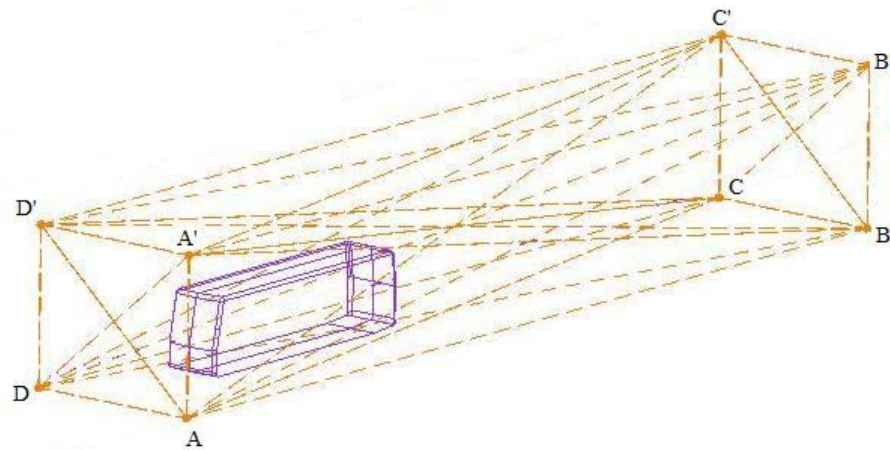


Figura E.7. Ubicació dels punts del túnel de densitat

Tot seguit es mostren les equacions per resoldre les coordenades de cada punt en la base.

Punt A:

$$x = -((0,92 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)) - (1,6 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \sin(\theta)) - 6)$$

$$y = -((0,92 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \sin(\theta)) + (1,6 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \cos(\theta)))$$

Punt B:

$$x = ((2,83 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)) + (1,6 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \sin(\theta)) + 6)$$

$$y = ((-1,6 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \cos(\theta)) + (2,83 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \sin(\theta)))$$

Punt C:

$$x = -((2,83 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)) - (1,6 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \sin(\theta)) + 6)$$

$$y = ((2,83 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \sin(\theta)) + (1,6 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \cos(\theta)))$$

Punt D:

$$x = -((0,92 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \cos(\theta)) + (1,6 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \sin(\theta)) - 6)$$

$$y = -((0,92 \cdot (12 \cos(\theta) + 2,5 \sin(\theta)) \cdot \sin(\theta)) - (1,6 \cdot (12 \sin(\theta) + 2,5 \cos(\theta)) \cdot \cos(\theta)))$$

- Paràmetres de densitat:**

- Cas 1: veure taules E.10 i E.11.

Com ja hem dit anteriorment les coordenades pels casos 2 i 3 seran les mateixes que per al cas 1.

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-5,04	-4,00	0,00	-5,04	-4,00	7,00	-5,04	4,00	0,00	-5,04	4,00	7,00
30°	-3,28	-10,28	0,00	-3,28	-10,28	7,00	-6,74	5,42	0,00	-6,74	5,42	7,00
60°	0,80	-15,12	0,00	0,80	-15,12	7,00	-8,82	6,00	0,00	-8,82	6,00	7,00
90°	5,98	-17,73	0,00	5,98	-17,73	7,00	-10,78	5,73	0,00	-10,78	5,73	7,00
120°	10,35	-18,29	0,00	10,35	-18,29	7,00	-12,11	5,05	0,00	-12,11	5,05	7,00
150°	9,94	-18,29	0,00	9,94	-18,29	7,00	-12,00	5,13	0,00	-12,00	5,13	7,00
180°	-5,04	-4,00	0,00	-5,04	-4,00	7,00	-5,04	4,00	0,00	-5,04	4,00	7,00

Taula E.10. Coordenades de la densitat per als casos 1, 2 i 3 (unitats en metres).

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	39,96	-4,00	0,00	39,96	-4,00	7,00	39,96	4,00	0,00	39,96	4,00	7,00
30°	41,60	-0,38	0,00	41,60	-0,38	7,00	38,14	15,33	0,00	38,14	15,33	7,00
60°	41,60	3,47	0,00	41,60	3,47	7,00	31,98	24,59	0,00	31,98	24,59	7,00
90°	40,21	6,72	0,00	40,21	6,72	7,00	23,45	30,18	0,00	23,45	30,18	7,00
120°	38,40	8,70	0,00	38,40	8,70	7,00	15,94	32,04	0,00	15,94	32,04	7,00
150°	38,59	8,54	0,00	38,59	8,54	7,00	16,66	31,96	0,00	16,66	31,96	7,00
180°	39,96	-4,00	0,00	39,96	-4,00	7,00	39,96	4,00	0,00	39,96	4,00	7,00

Taula E.11. Coordenades de la densitat per als casos 1, 2 i 3 (unitats en metres).

- Cas 4: veure taules E.12 i E.13.

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-5,04	-4,00	0,00	-5,04	-4,00	7,00	-5,04	4,00	0,00	-5,04	4,00	7,00
30°	-4,26	-8,02	0,00	-4,26	-8,02	7,00	-6,03	4,98	0,00	-6,03	4,98	7,00
60°	-2,68	-11,31	0,00	-2,68	-11,31	7,00	-7,11	5,60	0,00	-7,11	5,60	7,00
90°	-1,08	-13,38	0,00	-1,08	-13,38	7,00	-7,96	5,87	0,00	-7,96	5,87	7,00

Taula E.12. Coordenades de la densitat per al cas 4 (unitats en metres).

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	39,96	-4,00	0,00	39,96	-4,00	7,00	39,96	4,00	0,00	39,96	4,00	7,00
30°	41,17	-1,82	0,00	41,17	-1,82	7,00	39,40	11,18	0,00	39,40	11,18	7,00
60°	41,73	0,34	0,00	41,73	0,34	7,00	37,29	17,25	0,00	37,29	17,25	7,00
90°	41,80	1,93	0,00	41,80	1,93	7,00	34,92	21,18	0,00	34,92	21,18	7,00

Taula E.13. Coordenades de la densitat per al cas 4 (unitats en metres).

- Cas 5: veure taules E.14 i E.15.

δ	PUNT A			PUNT A'			PUNT D			PUNT D'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	-5,04	-4,00	0,00	-5,04	-4,00	7,00	-5,04	4,00	0,00	-5,04	4,00	7,00
30°	-2,95	-10,86	0,00	-2,95	-10,86	7,00	-6,95	5,52	0,00	-6,95	5,52	7,00
60°	2,45	-16,23	0,00	2,45	-16,23	7,00	-9,50	5,99	0,00	-9,50	5,99	7,00
90°	9,33	-18,28	0,00	9,33	-18,28	7,00	-11,82	5,24	0,00	-11,82	5,24	7,00

Taula E.14. Coordenades de la densitat per al cas 5 (unitats en metres).

δ	PUNT B			PUNT B'			PUNT C			PUNT C'		
	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z	X	Y	Z
0°	39,96	-4,00	0,00	39,96	-4,00	7,00	39,96	4,00	0,00	39,96	4,00	7,00
30°	41,68	0,02	0,00	41,68	0,02	7,00	37,69	16,40	0,00	37,69	16,40	7,00
60°	41,27	4,64	0,00	41,27	4,64	7,00	29,33	26,86	0,00	29,33	26,86	7,00
90°	38,86	8,29	0,00	38,86	8,29	7,00	17,71	31,81	0,00	17,71	31,81	7,00

Taula E.15. Coordenades de la densitat per al cas 5 (unitats en metres).

ANNEX F

ANNEX F: MODEL DINÀMIC DEL VEHICLE

En aquest annex es calcularà el centre de gravetat de l'autobús, com també les inèrcies i es desenvoluparan les equacions per descriure el comportament dinàmic del vehicle sotmès a l'acció externa del vent.

F.1.- Introducció

Primer de tot, simplifiquem el xassís del vehicle, transformant-lo d'un sistema tridimensional a un sistema bidimensional, tal i com es pot veure a la figura F.1, on també podem veure el sistema de coordenades utilitzat. Aquest model de vehicle és el que s'anomena model de bicicleta i ha estat utilitzat, entre d'altres per Noguchi (1986), Milliken i Milliken (1995), Yang et al. (1999) i Wideberg (2004).

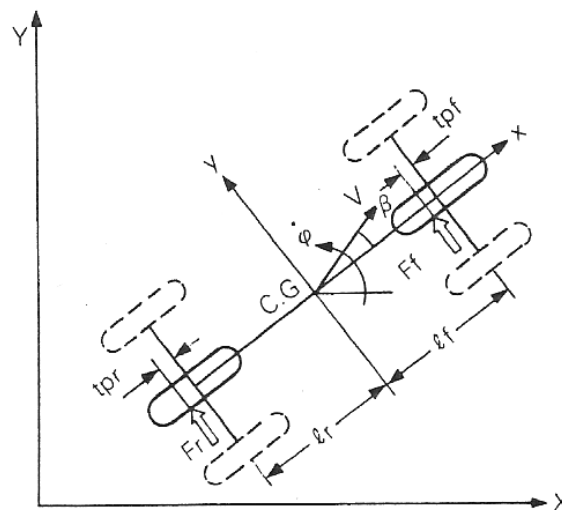


Figura F.1 Simplificació del model i sistema de coordenades solidari amb el moviment del vehicle (x , y minúscules) (Noguchi, 1986)

Si ens fixem en la figura F.2 podem observar l'esquema d'un vehicle amb la força i els moments produïts per l'acció lateral del vent quan aquest incideix perpendicularment a la direcció del vehicle.

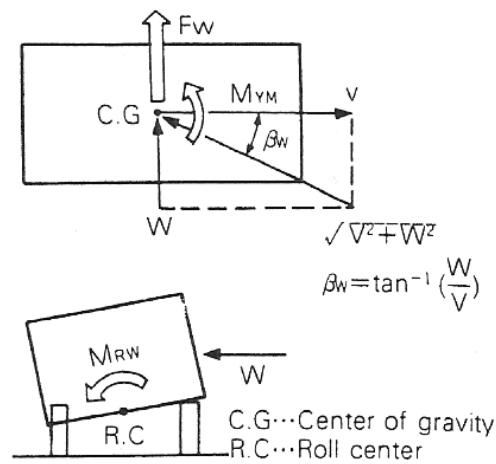


Figura F.2 Força i moments produïts per l'acció lateral del vent amb incidència perpendicular a la direcció del vehicle (Noguchi, 1986)

F.2.- Equacions del comportament dinàmic

En aquest apartat desenvoluparem les equacions per determinar les forces que apareixen sobre l'autobús i que ens interessa calcular en el present projecte.

$$\sum \vec{F} = m \cdot a \quad (\text{Eq.F.1})$$

$$\sum \vec{F}_{BUS} = m_{BUS} \cdot \vec{a}_{BUS} \quad (\text{Eq.F.2})$$

- **Acceleració lateral**

$$\sum F_{BUS_y} = m_{BUS} \cdot a_{BUS_y} \quad (\text{Eq.F.3})$$

On:

$m_{BUS} \rightarrow$ massa del bus (Kg)

$a_{BUS_y} \rightarrow$ acceleració del bus en la component y (m/s^2)

Noguchi (1986), Milliken i Milliken (1995), Yang et al. (1999) i Wideberg (2004) obtenen les següents expressions per a l'acceleració en y en el model de bicicleta en funció de les variables β (angle de desplaçament lateral del vehicle expressat en rad) i ϕ (angle de derrapatge expressat en rad)

$$m_{BUS} \cdot \underbrace{V_{BUS} \cdot \left(\frac{d\beta}{dt} + \frac{d\phi}{dt} \right)}_{a_{BUS_y}} = \sum F_{BUS_y} = F_{VENT_y} + F_f + F_r \quad (\text{Eq.F.4})$$

On:

$V_{BUS} \rightarrow$ velocitat del bus (en direcció x) (m/s)

$F_f \rightarrow$ força de contacte de la roda davantera (N)

$F_r \rightarrow$ força de contacte de la roda posterior (N)

$F_{VENT_y} \rightarrow$ força aerodinàmica en direcció y (N)

Les forces de contacte de les rodes posteriors i anteriors es determinen, també, en funció de l'angle de desplaçament lateral del vehicle β i de la velocitat angular de derrapatge $d\phi/dt$ com (veieu Milliken i Milliken (1995), Yang et al. (1999), Wideberg (2004))

$$F_f + F_r = (C_F + C_R) \cdot \beta + \frac{1}{V_{BUS}} \cdot \underbrace{(a \cdot C_F - b \cdot C_R)}_{M.W \rightarrow \text{Potència Gir}} \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (\text{Eq.F.5})$$

On:

$C_F \rightarrow$ coeficient cornering stiffness del pneumàtic anterior (N/rad)

$C_R \rightarrow$ coeficient cornering stiffness del pneumàtic posterior (N/rad)

$a \rightarrow$ distància entre l'eix anterior i el cdg (m)

$b \rightarrow$ distància entre l'eix posterior i el cdg (m)

$$\boxed{m_{BUS} \cdot V_{BUS} \cdot \left(\frac{d\beta}{dt} + \frac{d\phi}{dt} \right) = F_{VENT_y} - (C_F + C_R) \cdot \beta - \frac{1}{V_{BUS}} \cdot (a \cdot C_F - b \cdot C_R) \cdot \frac{d\phi}{dt}} \quad (\text{Eq.F.6})$$

- **Derrapatge**

Noguchi (1986), Milliken i Milliken (1995), Yang et al. (1999) i Wideberg (2004) avaluen l'acceleració angular de ϕ (angle de derrapatge) a partir de l'expressió

$$I_Z \cdot \frac{d^2\phi}{dt^2} = \sum M_Z = -(a \cdot C_F - b \cdot C_R) \cdot \beta - \frac{1}{V_{BUS}} \cdot (a^2 \cdot C_F - b^2 \cdot C_R) \cdot \frac{d\phi}{dt} + M_{Z_{VENT}} \quad (\text{Eq.F.7})$$

On:

$I_Z \rightarrow$ moment d'inèrcia respecte l'eix z d'origen en el c.d.g. ($Kg \cdot m^2$)

$M_{Z_{vent}} \rightarrow$ moment aerodinàmic de guinyada ($N \cdot m$) (obtingut amb simulació)

- **Bolcada**

Pel que respecte a l'angle de bolcada λ , Noguchi (1986) l'avalua com:

$$I_X \cdot \frac{d^2\lambda}{dt^2} + \frac{1}{2} \cdot (t_{FD}^2 \cdot C_{FD} + t_R \cdot C_{RD}) \cdot \frac{d\lambda}{dt} + (R_F + R_R) \cdot \lambda = M_{x_{VENT}} + L \cdot (F_{VENT_y} + F_f + F_r) \quad (\text{Eq.F.8})$$

On:

$I_X \rightarrow$ moment d'inèrcia respecte l'eix x d'origen en el c.d.g. ($Kg \cdot m^2$)

$C_{FD} \rightarrow$ coeficient de l'amortidor davanter ($\frac{N \cdot m}{s}$)

$C_{RD} \rightarrow$ coeficient de l'amortidor posterior ($\frac{N \cdot m}{s}$)

$M_{x_{VENT}} \rightarrow$ moment aerodinàmic de bolcada ($N \cdot m$)

$R_F \rightarrow$ coeficient de la molla de l'amortidor davanter ($\frac{N \cdot m}{rad}$)

$R_R \rightarrow$ coeficient de la molla de l'amortidor posterior ($\frac{N \cdot m}{rad}$)

$t_f \rightarrow$ distància entre els centres dels pneumàtics en l'eix davanter (m)

$t_r \rightarrow$ distància entre els centres dels pneumàtics en l'eix posterior (m)

D'aquesta forma, disposem de les variables β, ϕ, λ (desplaçament lateral angular, angle de derrapatge i angle de bolcada, respectivament) i de les tres equacions diferencials ordinàries

(6)-(8). Tanmateix, les equacions (7) i (8) són equacions diferencials ordinàries de segon ordre. Per poder integrar-les numèricament en el temps, expressem les equacions anteriors com un conjunt d'equacions diferencials ordinàries de primer ordre. D'aquesta forma, treballem amb les variables,

$$\beta, \phi, \lambda, \dot{\lambda}, \dot{\phi}$$

$$\text{on: } \dot{\lambda} = \frac{d\lambda}{dt} \text{ i } \dot{\phi} = \frac{d\phi}{dt}$$

de tal manera que les equacions anteriors queden com un conjunt de cinc equacions diferencials ordinàries de primer ordre:

$$\boxed{\frac{d\lambda}{dt} = \dot{\lambda}} \quad (\text{Eq.F.9})$$

$$\boxed{\frac{d\phi}{dt} = \dot{\phi}} \quad (\text{Eq.F.10})$$

$$\boxed{\frac{d\beta}{dt} = -C_1 \cdot \beta - C_2 \cdot \dot{\phi} + C_3} \quad (\text{Eq.F.11})$$

$$\boxed{\frac{d\dot{\phi}}{dt} = -C_4 \cdot \beta - C_5 \cdot \dot{\phi} + C_6} \quad (\text{Eq.F.12})$$

$$\boxed{\frac{d\dot{\lambda}}{dt} = C_7 \cdot \dot{\lambda} + C_8 \cdot \lambda - C_9 \cdot \beta - C_{10} \cdot \dot{\phi} + C_{11}} \quad (\text{Eq.F.13})$$

on els coeficients s'obtenen de les expressions següents:

$$C_1 = \frac{C_F + C_R}{m_{BUS} \cdot V_{BUS}} \quad (\text{Eq.F.14})$$

$$C_2 = \frac{1}{V_{BUS}} \cdot \frac{(a \cdot C_F - b \cdot C_R)}{m_{BUS} \cdot V_{BUS}} + 1 \quad (\text{Eq.F.15})$$

$$C_3 = \frac{F_{VENT\ y}}{m_{BUS} \cdot V_{BUS}} \quad (\text{Eq.F.16})$$

$$C_4 = \frac{(a \cdot C_F - b \cdot C_R)}{I_Z} \quad (\text{Eq.F.17})$$

$$C_5 = \frac{1}{V_{BUS}} \cdot \frac{(a^2 \cdot C_F + b^2 \cdot C_R)}{I_Z} \quad (\text{Eq.F.18})$$

$$C_6 = \frac{M_{Z\ VENT}}{I_Z} \quad (\text{Eq.F.19})$$

$$C_7 = -\frac{1}{2 \cdot I_X} \cdot (t_F^2 \cdot C_{FD} + t_R^2 \cdot C_{RD}) \quad (\text{Eq.F.20})$$

$$C_8 = -\frac{(R_F + R_R)}{I_X} \quad (\text{Eq.F.21})$$

$$C_9 = L \cdot \frac{(C_F + C_R)}{I_X} \quad (\text{Eq.F.22})$$

$$C_{10} = \frac{L}{I_X} \cdot \frac{(a \cdot C_F - b \cdot C_R)}{V_{BUS}} \quad (\text{Eq.F.23})$$

$$C_{11} = -\frac{M_{X\ VENT}}{I_X} + L \cdot \frac{F_{VENT\ y}}{I_X} \quad (\text{Eq.F.24})$$

Les equacions (9)-(13) formen el conjunt de cinc equacions diferencials ordinàries de primer ordre per a les cinc variables $\beta, \phi, \lambda, \dot{\lambda}, \dot{\phi}$. La integració numèrica s'ha realitzat mitjançant

programació en Matlab (veieu l'Annex I). En aquelles situacions on la ràfega de vent s'ha extingit, els coeficients C_3 , C_6 i C_{11} són nuls.

F.3.- Dades del vehicle

Tot seguit s'exposen les dades inicials que hem considerat alhora de calcular el centre de gravetat i les inèrcies de l'autocar. Aquestes dades s'obtenen d'un vehicle real, marca IVECO model EURORIDER DCI.11.

- $Tara = 13040Kg$
- $MMA = 18000Kg$
- $MMA_{1erEIX} = 7000Kg$
- $MMA_{2onEIX} = 11500Kg$
- $Amplada = 2,550m$
- $Alçada = 3,675m$
- $Distància entre eixos = 6m$
- $Voladís posterior = 3,635m$
- $Longitud = 12,2m$

Tot seguit procedirem a calcular el centre de gravetat de l'autobús. A la figura F.3 es pot observar un petit esquema de l'autobús amb la dades de referència per calcular la distància x del cdg i a la figura F.4 es pot veure l'esquema de l'autobús amb les dades de referència per calcular la distància z del cdg.

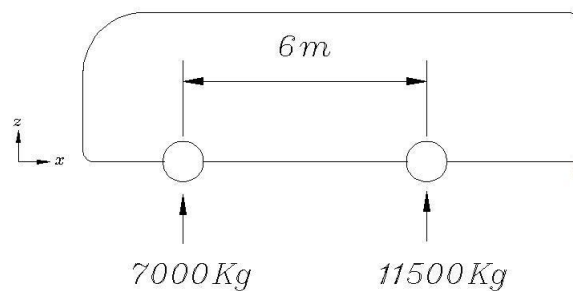


Figura F.3 Esquema del bus amb les dades de referència per calcular la distància x del cdg.

D'aquesta forma, s'obté la posició del centre de gravetat com:

$$\sum M_o = 0; 3,625 \cdot 11500 + 9,425 \cdot 7000 = 18500 \cdot L_{CdG} \Rightarrow L_{CdG} = 5,82m$$

$$L_{CdG} = 12,2 - 5,82 = 6,38m$$

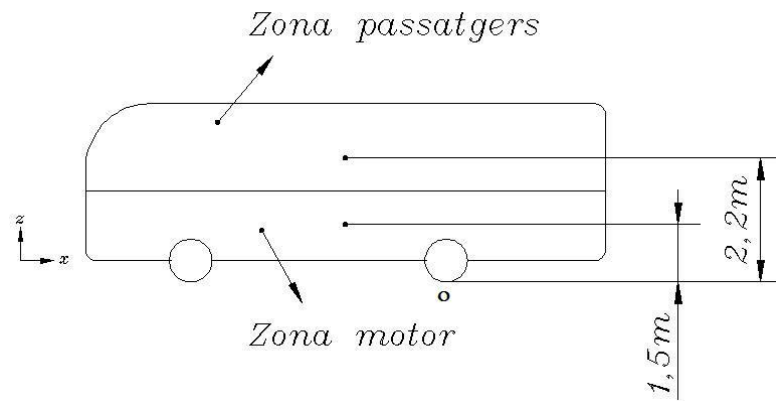


Figura F.4 Esquema del bus amb les dades de referència per calcular la distància z del cdg.

$$Zona \text{ passatgers} = 50 \text{ persones} \cdot 75 \frac{Kg}{\text{persona}} = 3750Kg + 250Kg \text{ (a/c)} = 4000Kg$$

$$Zona \text{ motor} = 13000Kg$$

$$\sum M_o = 0; 1,5 \cdot 13000 + 2,2 \cdot 4000 = Z_{CdG} \cdot 17000 \Rightarrow Z_{CdG} = 1,67m$$

Per tant, el centre de gravetat del bus està situat a: $(x = 6.38, y = 0, z = 1.67)$, tal i com indica Hingwe i Tomizuka (1996) en l'estudi del comportament dinàmic d'autocars.

A continuació calcularem les inèrcies. A la figura F.5 es pot observar un petit esquema amb les dades de referència.

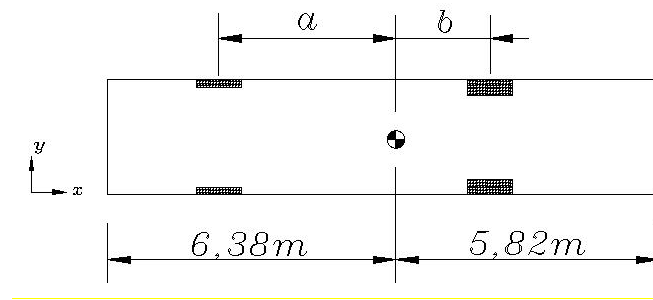


Figura F.5 Esquema per determinar els moments d'inèrcia.

D'aquesta forma, els moments d'inèrcia en z i en x són:

$$I_z = \left[\frac{7}{18,5} \cdot 3,805^2 + \frac{11,5}{18,5} \cdot 2,195^2 \right] \cdot 17 = 144 \cdot 10^3 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

$$I_x = 13 \cdot (1,67 - 1,5)^2 + 4 \cdot (2,2 - 1,67)^2 = 1,5 \cdot 10^3 \text{ Kg} \cdot \text{m}^2$$

Aquests models d'inèrcia són molt semblants als utilitzats en l'estudi de Hingwe i Tomizuka (1996) en l'estudi del comportament dinàmic d'autocars.

Els valors per als altres coeficients que apareixen en els coeficients (14)-(24) són (veure taula F.1).

Paràmetres	CAS 1, 2,3 i 4	CAS 5	Unitats	Font
Longitud bus (L)	12,2	12,2	m	Mesurat
Massa del bus (m)	18.000	18.000	Kg	Fitxa Tècnica
Moment d'inèrcia de derrapatge (I_z)	144.000	144.000	$Kg \cdot m^2$	Càlcul: Annex F
Moment d'inèrcia de bolcada (I_x)	1.500	1.500	$Kg \cdot m^2$	Càlcul: Annex F
Distància entre l'eix anterior i el c.d.g (a)	3,805	3,805	m	Càlcul: Annex F
Distància entre l'eix posterior i el c.d.g (b)	2,195	2,195	m	Càlcul: Annex F
Distància entre els centres dels pneumàtics de l'eix davanter (t_f)	2,2	2,2	m	Mesurat
Distància entre els centres dels pneumàtics de l'eix posterior (t_r)	1,91	1,91	m	Mesurat
Coef. Pneumàtic anterior (C_F)	213.000	213.000	N / rad	Hingwe i Tomizuka 1996
Coef. Pneumàtic posterior (C_R)	425.000	425.000	N / rad	Hingwe i Tomizuka 1996
Coefficients de la molla de l'amortidor ($R_F + R_R$)	7.910.000	7.910.000	$N \cdot m / rad$	Segel et al., 1972
Velocitat del bus (V)	28	22,22	m / s	Estimat
Coef. Amortidor davanter (C_{FD})	20.000	20.000	$N \cdot s / m$	Hedrick i Yi 1991
Coef. Amortidor posterior (C_{RD})	20.000	20.000	$N \cdot s / m$	Hedrick i Yi 1991

Taula F.1 Valors de les variables de les equacions anteriors que no depenen de la magnitud de l'empenta lateral o els moments.

F.3.- Bibliografia

Hingwe, P., Tomizuka, M. Experimental Study of Chatter Free Sliding Mode Control for Lateral Control of Commuter Buses in AHS. Universitat de California a Berkeley, Resarch Report UCB-ITS-PRR-96-31, 1996

Milliken, W. F., Milliken, D. L. Race car vehicle dynamics. SAE International, Warrendale (890 p.) 1995.

Noguchi, H. An analysis of vehicle behaviour in a cross wind. Int. J. Of vehicle design, Special issue on vehicle Safety. P 304-317. 1986.

ANNEX G

ANNEX G: PROCÈS DE MALLAT AMB “ANSYS ICEM 10.0”

L'“Ansys Icem 10.0” és un programa per mallar geometries, ja siguin bidimensionals o tridimensionals. En essència, el procés de mallat consisteix en dividir la geometria d'estudi en elements molt petits de diferents dimensions segons els requeriments de l'usuari. Una vegada obtinguts aquests elements, programes de simulació com per exemple en el nostre cas l'“Star CCM+”, s'encarreguen de calcular-ne els valors de les variables per simular la dinàmica del fluid.

G.1.- Procés de mallat

Durant aquest annex es detalla quin ha estat el procediment seguit per a la configuració del mallat de les geometries d'estudi. No es pretén que aquest apartat sigui un manual d'ús de l'“Ansys Icem 10.0”, sinó explicar les principals comandes utilitzades.

Per explicar el programa s'ha utilitzat la geometria del bus 1 amb un angle d'incidència del flux de 30°, les variables que s'han utilitzat per realitzar el procés de simulació dels diferents autobusos i dels diferents cossos d'Ahmed es detallen a l'apartat de la memòria. S'ha de tenir en compte que el número de geometries creades són moltes. Per tant, el procés de mallat s'explicarà a partir d'una geometria qualsevol, ja que els passos en les diferents geometries són molt semblants.

Així els passos a seguir per generar el mallat són els següents:

Obrim el programa “Ansys Icem 10.0” . Una vegada s'ha obert el programa, hem d'importar el model prèviament creat amb “RhinoCeros”. Per fer-ho, ens situem sobre la pestanya *File/Import Geometry*. Seleccionem l'arxiu que volem importar, prèviament guardat amb un format *IGES*. Una vegada realitzada aquesta acció, ens apareixerà a la pantalla el model seleccionat que es mostra a la figura G.1.

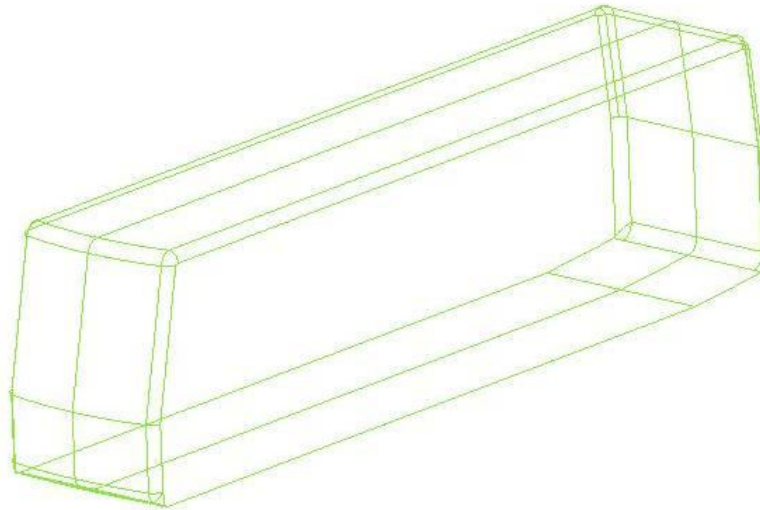
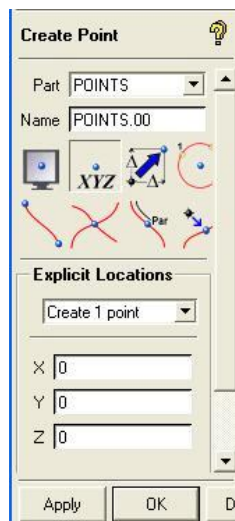


Figura G.1 Model 3D importat.

Una vegada importada la geometria, els pas següent és crear el túnel de vent i el túnel de densitat. El que s'ha de fer primer es crear els punts que conformen els vèrtex dels dos túnels, les dimensions dels quals s'han calculat a l'annex E. Per generar aquest punt ens situem sobre la pestanya *Geometry* del menú superior i escollim  *Create Point*. Tot seguit triem la icona que ens permet crear els punts a partir de les coordenades, tal i com es mostra a la Figura G.2.



G.2 Diàleg de generació de punts

Tot seguit introduïm les coordenades de cada punt i anem repetint l'operació fins que haguem entrat totes les coordenades, una vegada finalitzada aquesta tasca, ja tindrem tots els punts introduïts i ho visualitzarem com a la imatge de la figura G.3.

S'ha de tenir en compte que les coordenades que nosaltres introduïrem les posarem en funció de les coordenades en les que s'ha importat el model, o sigui, respecte el punt d'origen (0,0,0) que està situat al centre inferior de la part frontal.

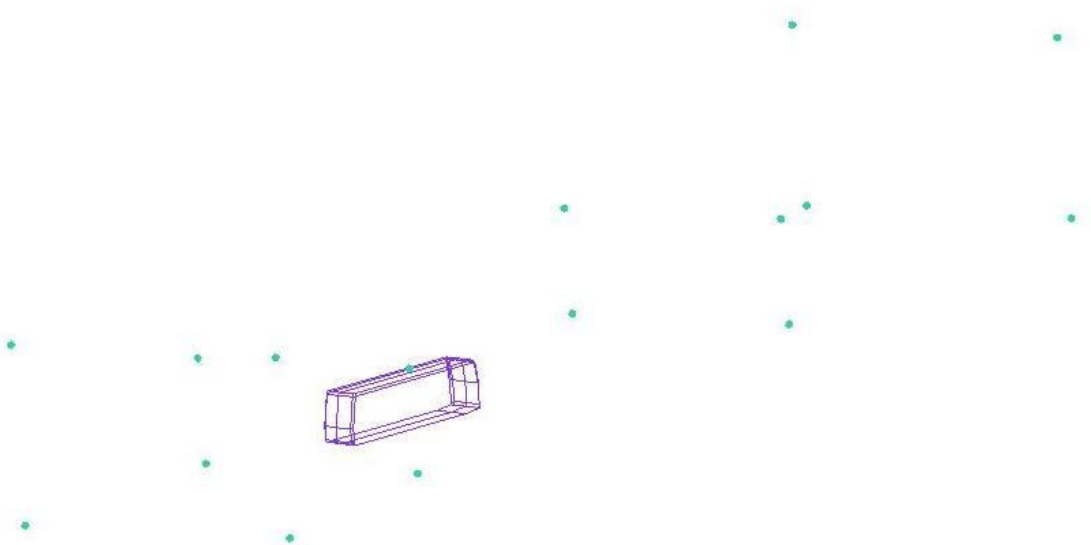


Figura G.3 Punts dels túnels

El pas següent serà generar les arestes que delimiten els túnels de vent. S'ha de tenir en compte que només generarem les arestes del túnel de vent perquè per generar el túnel de densitat només ens farà falta marcar les seves coordenades. Per generar aquestes arestes, ens posem sobre la pestanya *Geometry* i seleccionem  *Create/Modify Curve* . Veurem com s'obre un nou diàleg. Tot seguit seleccionarem la icona que ens permetrà fer la funció d'unir els punts i així podrem crear la geometria del túnel de vent. Aquest pas es mostra a la figura G.4

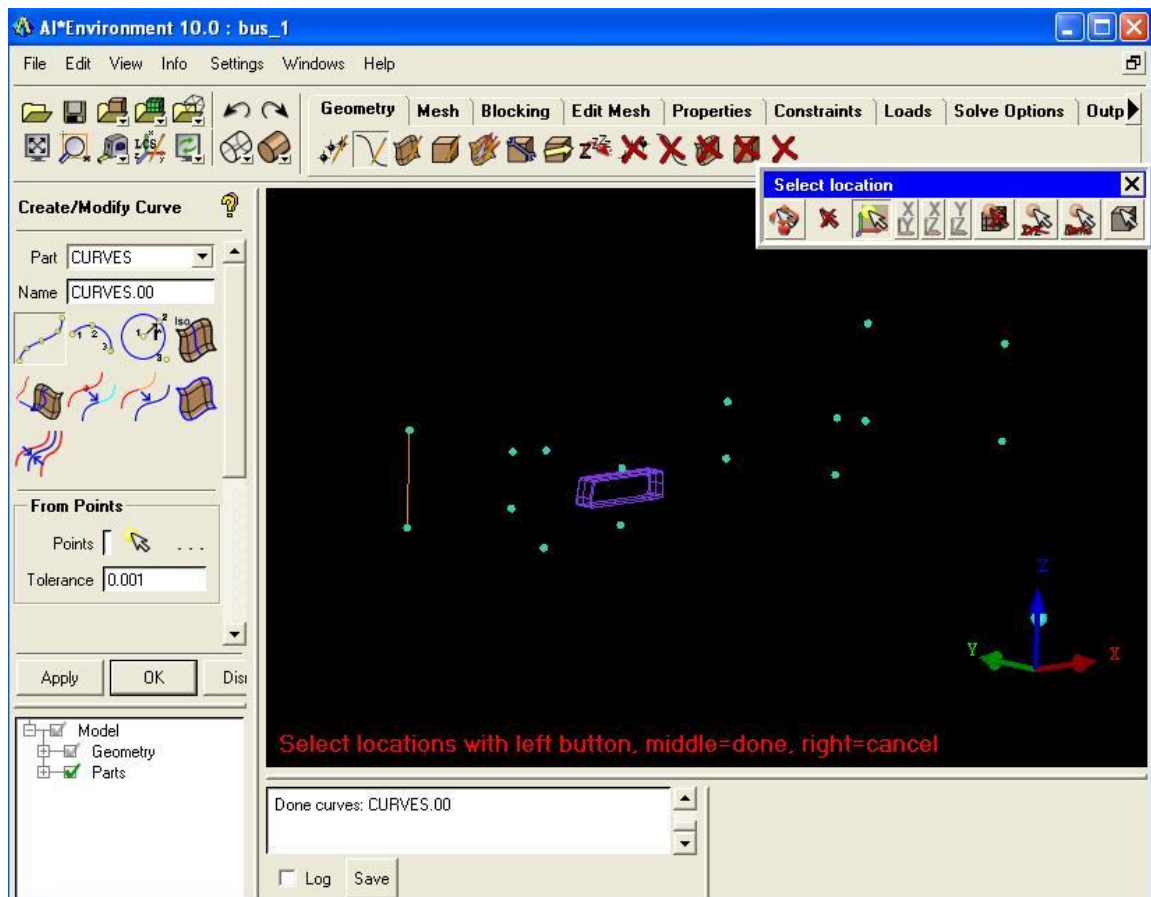


Figura G.4 Diàleg per crear les línies entre els punts

Una vegada ja s'han unit tots els punts del túnel de vent, ens quedarà un túnel com el de la figura G.5.

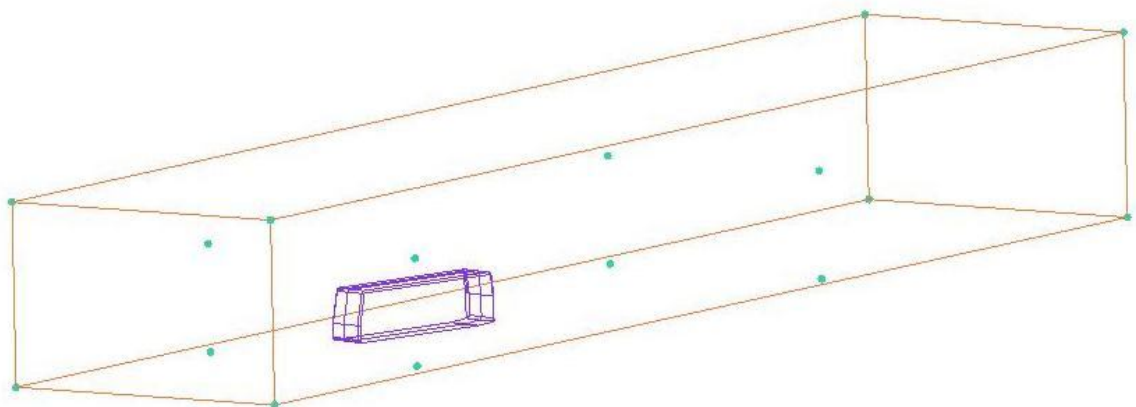


Figura G.5 Túnel de vent

A continuació es generaran les superfícies que composen el túnel de vent. Per generar aquestes superfícies haurem de seleccionar la icona *Create/Modify Surface* del menú de *Geometry*. Tot seguit s'obrirà un nou menú a l'esquerra de la pantalla tal i com es mostra a la figura G.6 i seleccionarem l'opció que ens permet generar les superfícies a partir d'arestes



. Veurem com se'ns obra un nou diàleg on haurem d'introduir el nom de la superfície a generar.

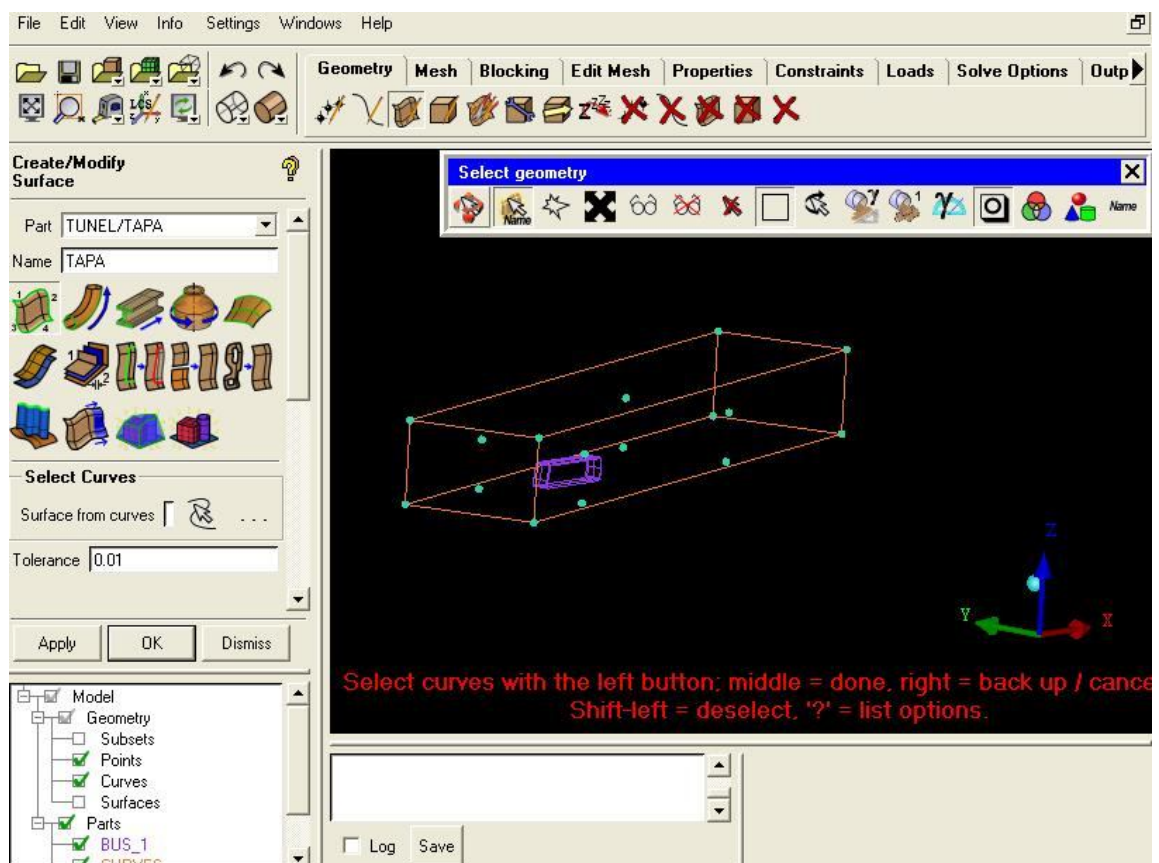


Figura G.6 Menú per crear les superfícies

A mesura que anem anomenant les superfícies, seleccionarem les arestes que la delimiten. D'aquesta forma, queda una geometria com la que es mostra a la figura G.7.

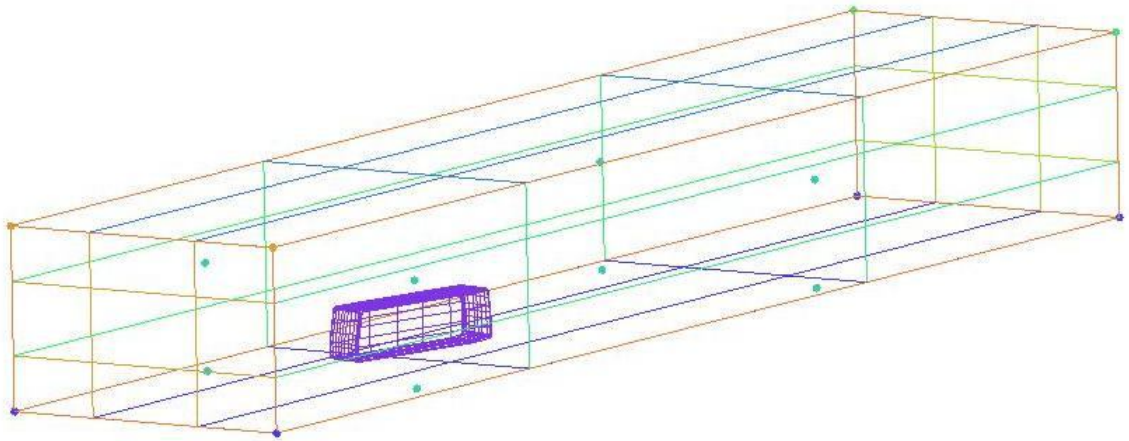


Figura G.7 Superfícies del túnel de vent

El següent pas serà generar els cos interior (en el nostre cas l'aire) del túnel de vent. Per fer-ho, seleccionem la icona *Create Body* del menú de *Geometry*. Tot seguit s'obrirà un nou menú a l'esquerra de la pantalla i seleccionarem l'opció que ens permet generar el cos a l'interior



del túnel a partir de dos vèrtex oposats . Veurem com se'ns obra un nou diàleg on haurem d'introduir el nom del cos, tal i com es mostra a la figura G.8.

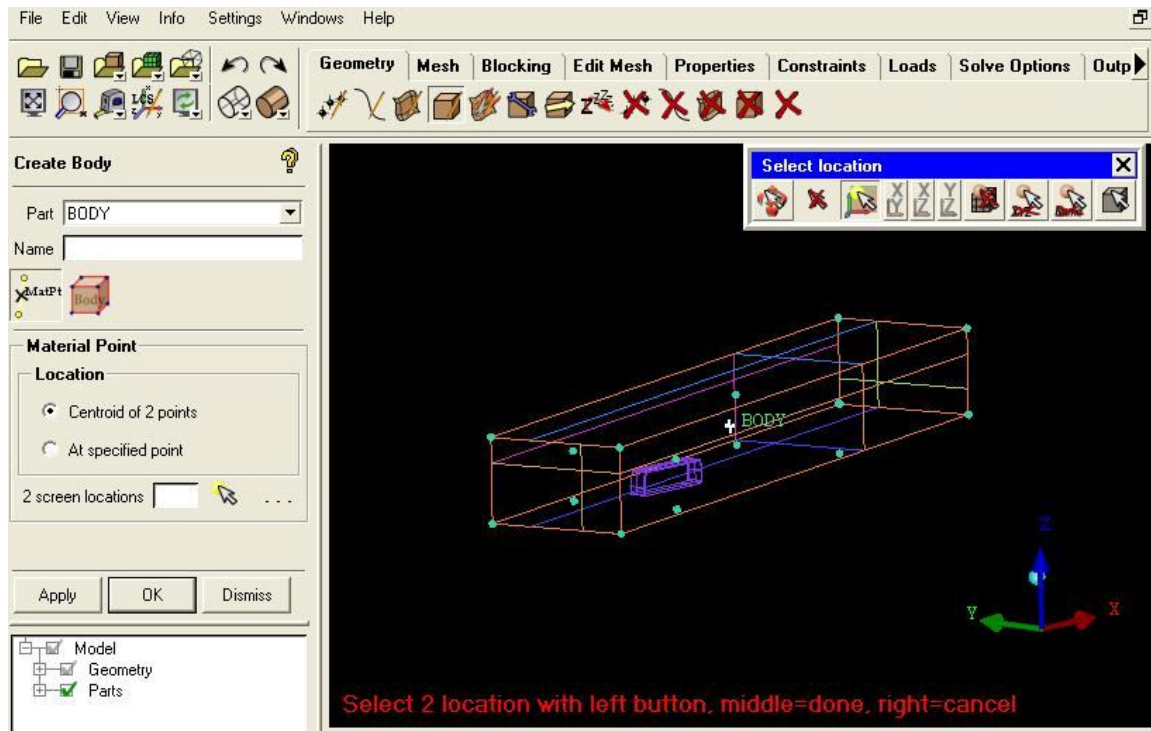


Figura G.8. Cos del túnel

L'últim pas que haurem de fer abans de generar el mallat, serà crear el túnel de densitat. Per generar el túnel de densitat hem de seleccionar la icona *Create Density* del menú de *Mesh*. Tot seguit s'obrirà una nou menú a l'esquerra de la pantalla, on haurem d'introduir la mida del túnel de densitat (en el nostre cas 0.4), tal i com es mostra a la figura G.9.

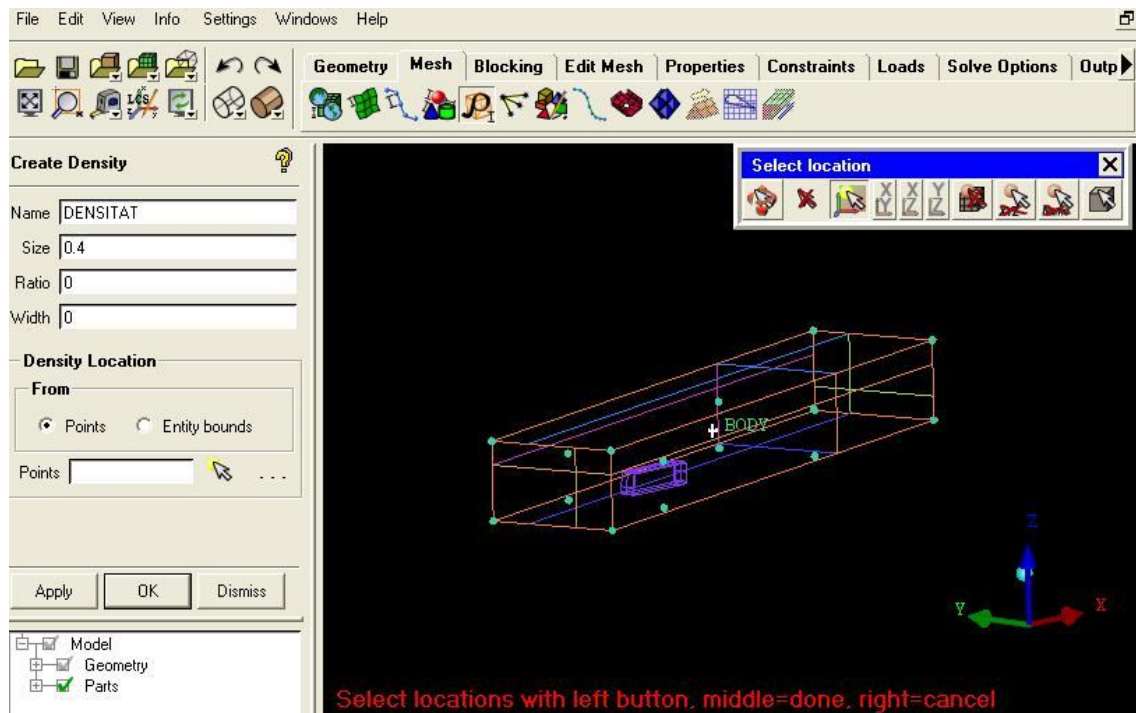


Figura G.9 Paràmetres del túnel de densitat

Després de definir els paràmetres del túnel de densitat, seleccionarem els punts que el delimiten i per crear-lo premerem sobre *Apply*. Si observem la figura G.10 podrem veurem el túnel de densitat creat.

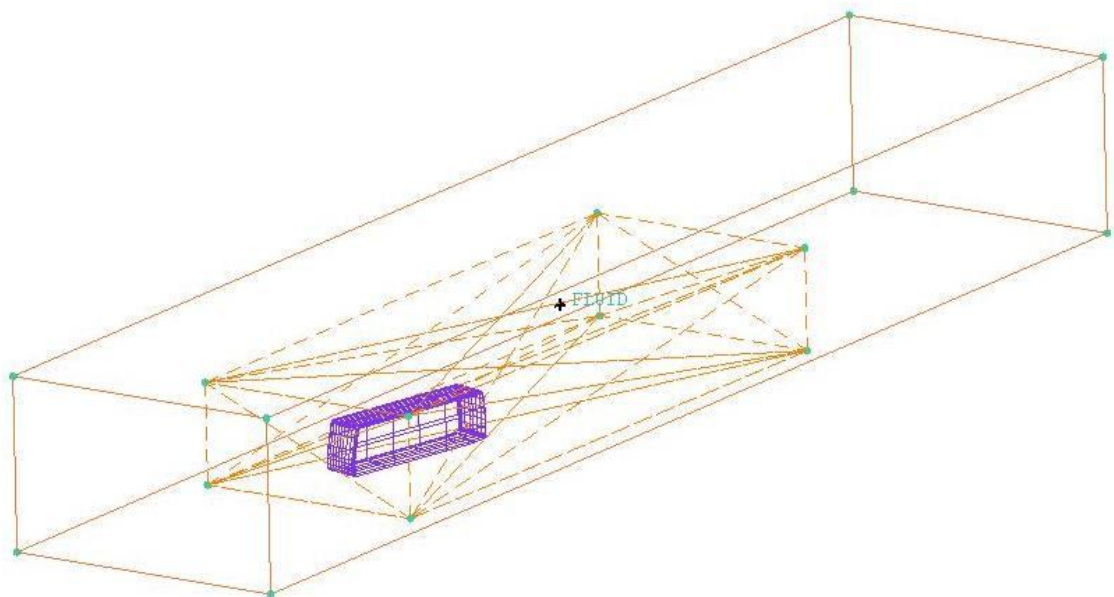


Figura G.10 Túnel de densitat

Ara ja podem passar a crear el mallat. Primer de tot, ens haurem de situar sobre la icona *Global Mesh Size*  del menú de *Mesh*. Tot seguit se'ns obrirà un nou menú a l'esquerra de la pantalla. Primer de tot definirem els paràmetres principals de la malla tal i com es mostra a la figura G.11 i a la figura G.12.

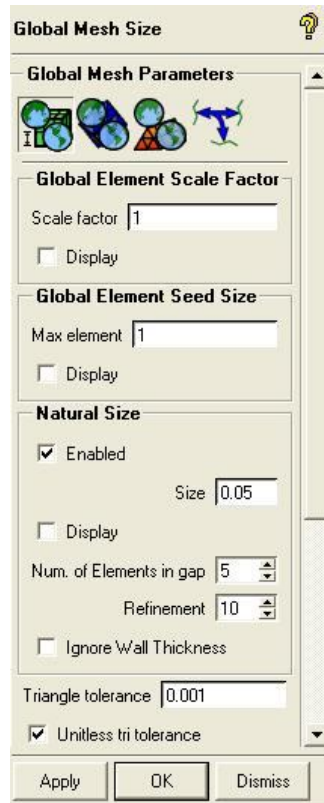


Figura G.11. Primer diàleg dels paràmetres principals de la malla.

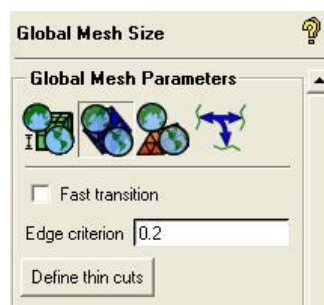


Figura G.12. Segon diàleg dels paràmetres principals de la malla.

Després de configurar els paràmetres principals de la malla, seleccionarem la icona *Global Prism Settings*  del menú anterior, on definirem els paràmetres de la capa límit tal i com es pot veure a la figura G.13. El paràmetre principal que haurem de definir serà l'altura total de la capa límit que en el nostre cas serà de 0.15 m. Aquesta icona ens permetrà capturar bé el que passa just a la superfície del cos (capa límit). A mesura que ens apropem al cos ens interessa tenir elements cada vegada més petits.

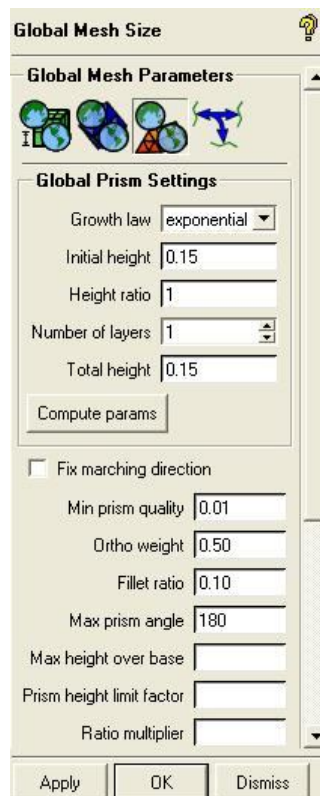


Figura G.13. Paràmetres principals per definir el elements de la capa límit.

Tot seguit escollim *Mesh size for parts*  del menú de *Mesh*. Aquesta icona ens permetrà introduir la mida dels elements a cada superfície o cos. En la figura G.14 es pot observar la taula que ens apareix per determinar la mida dels elements.

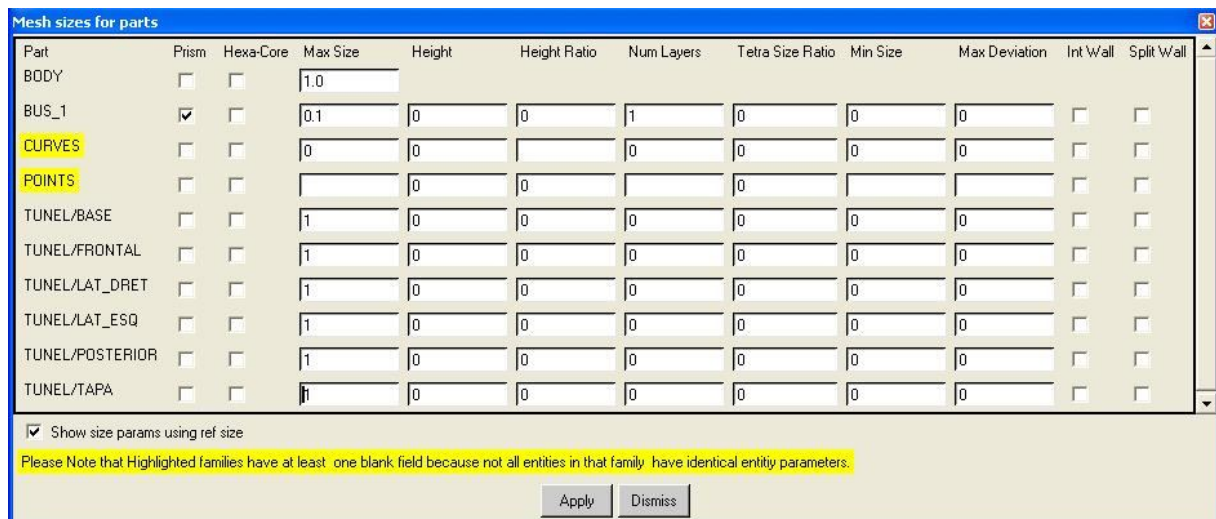


Figura G.14 Diàleg de la mida dels elements

A continuació escollim l'opció *Mesh Volume*  del menú de *Mesh*. Tot seguit se'ns obrirà un nou menú a l'esquerra de la pantalla. Primer haurem d'escollir la icona  que ens permetrà mallar la superfície. Completarem el diàleg amb l'opció *Mesh Type/Tetra*, tal i com es pot veure a la figura G.15. Amb aquesta opció el que estem fent és dir al programa que ens faci una malla amb elements tetraèdrics, en comptes d'hexaèdrics. També escollirem la icona *Smooth mesh* perquè ens suavitzarà la malla.



Figura G.15 Diàleg per definir el tipus d'elements per la malla

Després de realitzar el mallat de la superfície realitzarem el mallat del volum. Per fer-ho

seleccionarem la icona  del mateix menú anterior. Aquesta icona ens permetrà unir les malles dels diferents cossos i superfícies. Completarem el diàleg que es pot veure a la figura G.16, amb *Expansion Factor*/1.2. El que estem fent és dir que el creixement dels elements es realitzi amb un factor de 1.2 a partir de la zona amb més elements.

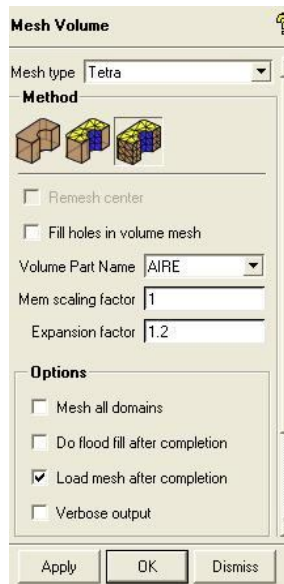


Figura G.16. Diàleg per mallar el volum.

Una vegada realitzat aquest pas, a la figura G.17 podem veure el domini computacional i a la figura G.18 podem veure la superfície del bus mallada.

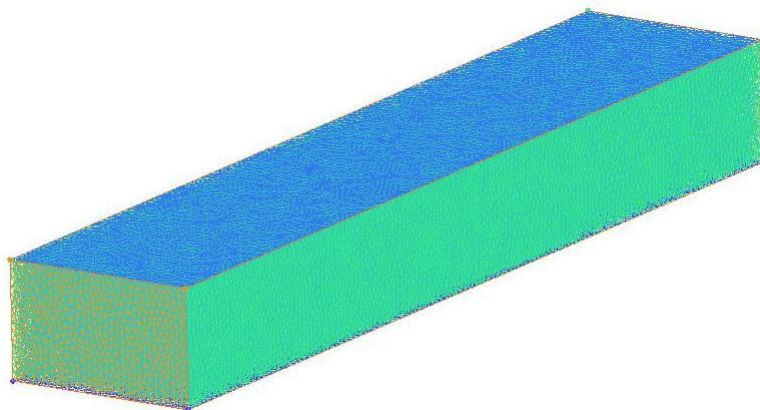


Figura G.17 Domini computacional mallat.

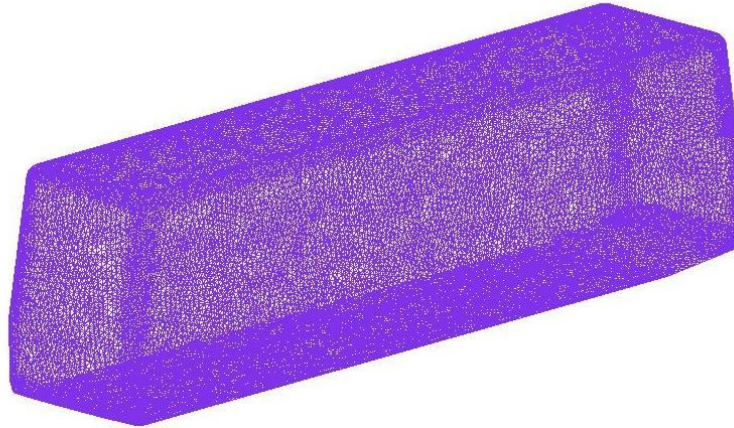


Figura G.18 Superfície del model mallada.

Després de generar la malla amb elements tetraèdrics, el que farem serà crear prismes a la malla. Per fer aquesta funció haurem d'escollir *Mesh with prisms*  del menú de *Mesh* i haurem de posar el valors que es mostren a la figura G.19.

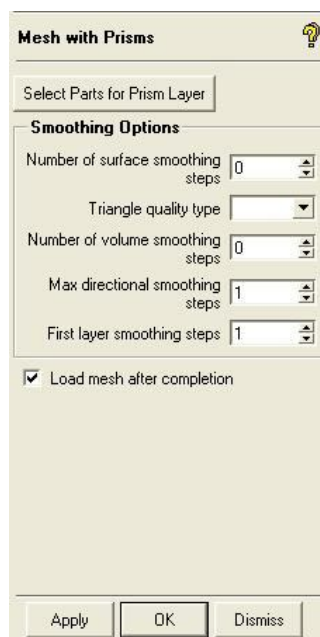


Figura G.19 Diàleg per generar els prismes

Una vegada s'han generat els prismes, el mallat ens quedarà com el de la figura G.20.

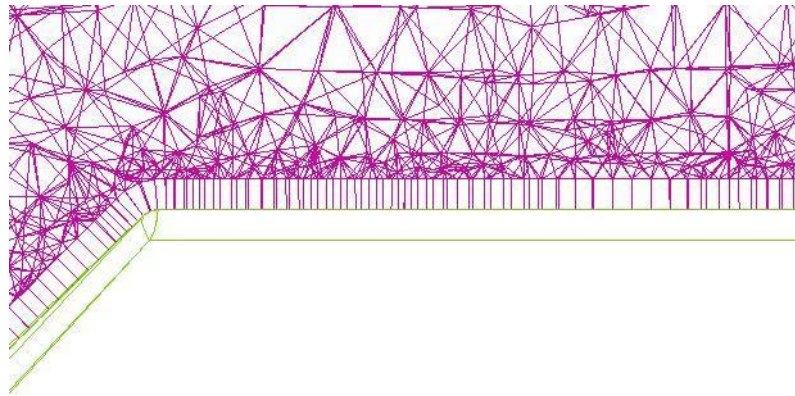


Figura G.20. Elements prismàtics de la malla i capa límit.

A continuació haurem de dividir la capa límit en sis parts, per fer-ho ens col·loquem sobre la icona *Split Mesh*  del menú de *Edit Mesh*. Tot seguit s'obrirà un nou menú a l'esquerra de la pantalla i seleccionem la icona . Aquesta icona ens permetrà definir el número de capes que volem dividir la capa límit tal i com es pot veure a la figura G.21, en el nostre cas farem sis capes i també definirem el *Prism Ratio*/1.3. El que estem fent és dir-li al programa que quan divideixi la capa límit cada capa que faci sigui 1.3 vegades més gran que la anterior.

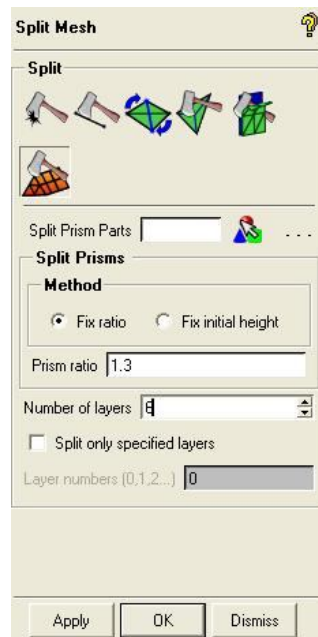


Figura G.21 Diàleg per definir les divisions de la capa límit

A la figura G.22 podem veure com a la capa límit s'han generat les sis divisions.

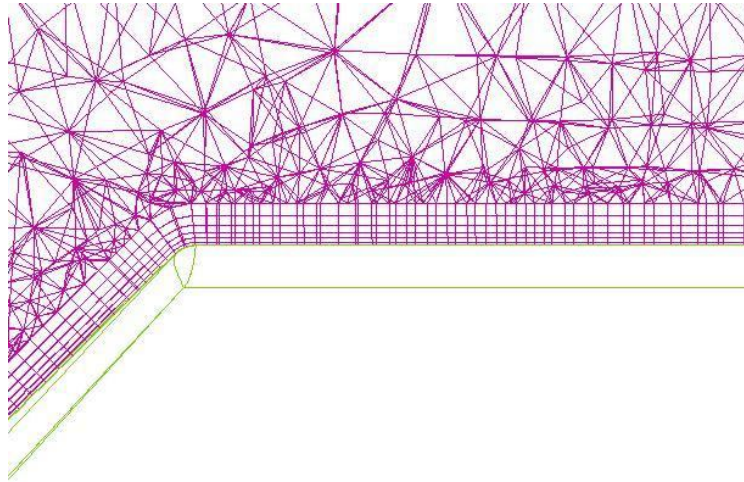


Figura G.22 Divisions de la capa límit

L'últim pas per acabar el Pre-procés serà planxar la malla generada, per fer-ho seleccionem la icona *Smoth Elements Globally*  del menú de *Edit Mesh*. Tot seguit s'obrirà un nou menú a l'esquerra de la pantalla com el de la figura G.23 que ens permetrà definir el nombre d'iteracions que volem realitzar i fins a quin valor màxim de qualitat volem planxar. En el nostre cas farem cinc iteracions i planxarem fins a un valor màxim de 0.2.

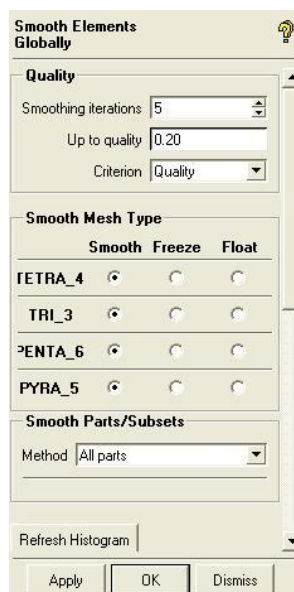


Figura G.23 Diàleg per definir els paràmetres del planxat

Una vegada executats els paràmetres anteriors, podem visualitzar un gràfic com el de la figura G.24 que ens mostra fins a quin valor ha planxat.

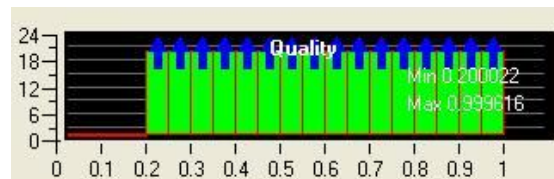


Figura G.24 Gràfica del planxat

L'etapa de Pre-procés ha finalitzat. Si ens fixem en la figura G.25 i G.26 podem observar la distribució dels elements dins el domini computacional.

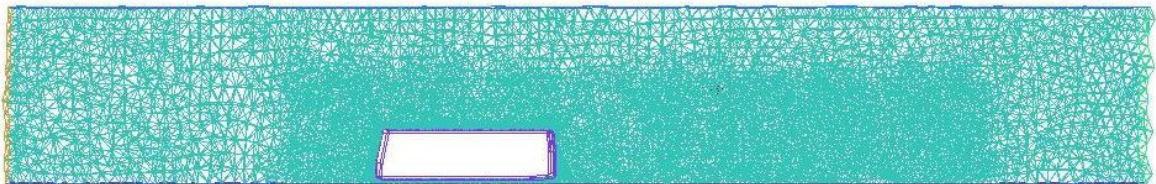


Figura G.25 Visualització de la distribució dels elements dins el domini computacional.

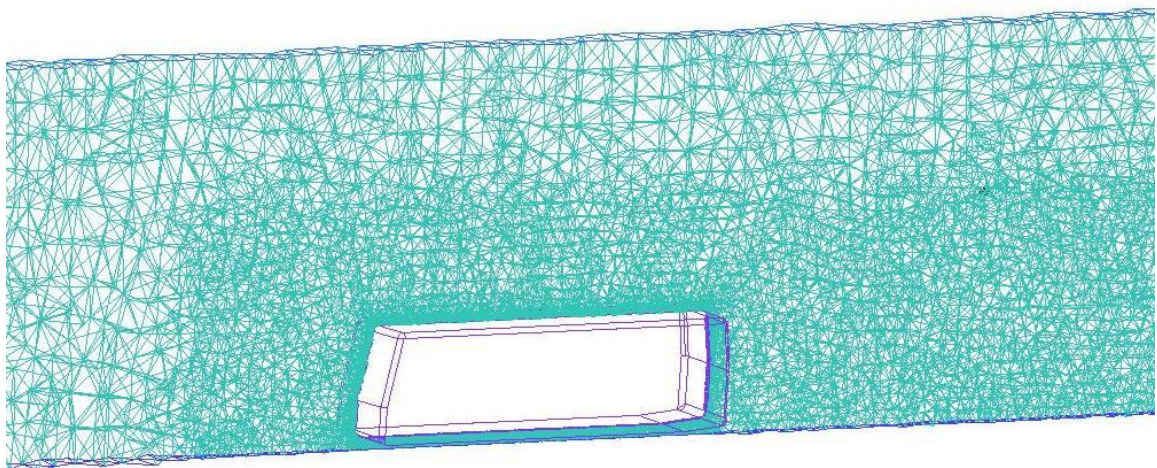


Figura G.26 Tall per poder visualitzar millor la distribució dels elements dins el domini computacional.

El pas següent és preparar el model per tal d'exportar-lo al programa de simulació, en el nostre cas l'"Star CCM+".

Seleccionarem la pestanya *Output* del menú superior. De les icones que ens apareixen escollirem *Select a solver* . Tot seguit se'ns obrirà un diàleg com el de la figura G.27, on haurem de seleccionar el programa on volem exportar la geometria creada. Seleccionarem Star CCM+.

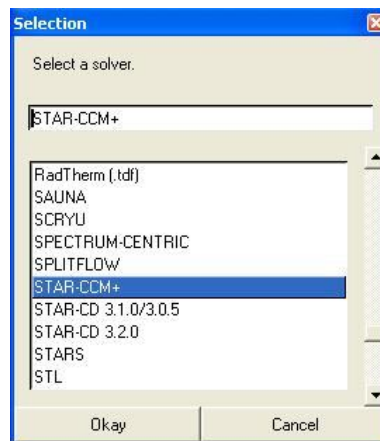


Figura G.27. Selecció del programa a exportar

El següent serà definir el tipus d'interfície que volem per cada superfície. Seleccionarem la icona *Boundary Conditions*  del menú de *Output*. Tot seguit se'ns obra una nova finestra com la de la figura G.28, on haurem de completar-la de la següent manera:

- Cos: Wall
- Túnel/Tapa: Wall
- Túnel/Posterior: Pressure Outlet
- Túnel/Lateral Dret: Wall
- Túnel/Lateral Esquerra: Wall
- Túnel/Frontal: Velocity Inlet
- Túnel/Base: Wall

La resta d'interfícies les deixarem tal i com estan per defecte.

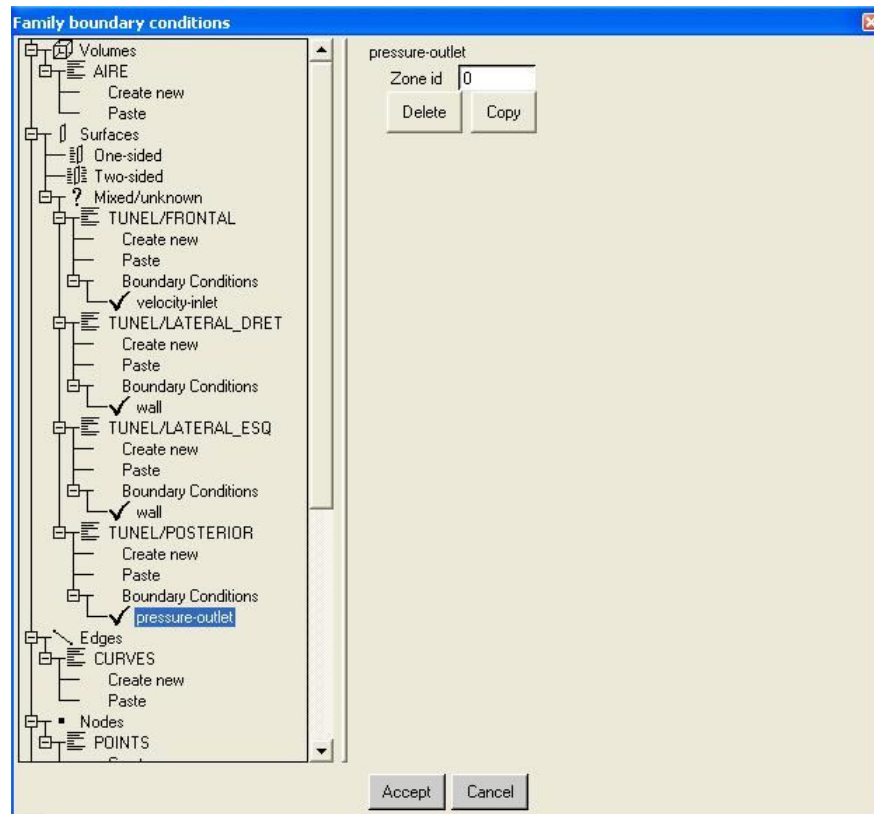


Figura G.28. Definició del tipus d'interfície

Finalitzarem l'exportació seleccionant *Write Input*  del menú de *Output*, que ens permetrà guardar l'arxiu a la carpeta que volem i amb el nom que desitgem. El format amb el que ens quedarà guardat l'arxiu és un format de malla *.msh.

G.2.- Bibliografia

Adreces 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 TM /AI*Environment TM .

ANNEX H

ANNEX H: PROCÉS DE SIMULACIÓ AMB “STAR CCM+”

L’“Star CCM+” és un programa de simulació de fluids a partir de geometries mallades. Permet simular el comportament de diferents fluids sota condicions de pressió, temperatura, velocitat i altres factors, alhora que permet extreure’n dades quantitatives.

H.1.- Procés de simulació

Durant aquest annex es detalla quin ha estat el procediment seguit per a la configuració de la simulació de les geometries. No es vol que aquest apartat sigui un manual d’ús de l’“Star CCM+”, sinó que s’expliquin les principals comandes utilitzades.

Per explicar el programa s’ha utilitzat la geometria del bus 1 amb un angle d’incidència del flux de 0° amb el terra parat. Les variables que s’han utilitzat per realitzar el procés de simulació dels diferents autobusos i dels diferents cossos d’Ahmed es detallen a l’apartat de la memòria.

A continuació s’explica quins són els passos que s’han seguit:

Primer de tot s’executa el programa Star CCM+. Una vegada obert hem de crear una nova simulació. Això ho fem mitjançant la pestanya *File/New Simulation*. A continuació ens apareixerà una finestra com la que es mostra a la Figura H.1, i a continuació premem *OK*.

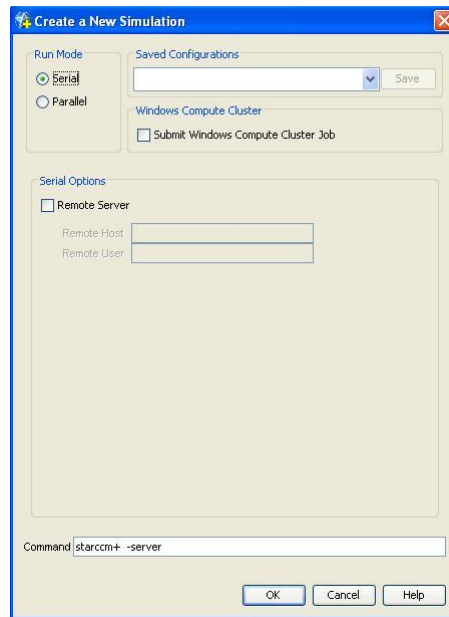


Figura H.1. Finestra per executar una nova simulació.

Tot seguit, s'ha d'importar el model de la geometria mallada. Per fer-ho, anem a *File/Import*, seleccionem el fitxer desitjat i el carreguem. Una vegada carregat ens apareixerà una finestra com la que es mostra a la Figura H.2 i seleccionem les dues primeres opcions.



Figura H.2. Finestra per importar el model mallat.

Una vegada importada la geometria mallada, ja podem començar a definir el model de simulació. Primer despleguem l'arbre de *Continua* i ens col·loquem sobre *models*. A partir d'aquí fem botó dret i seleccionem *New models* tal i com es mostra a la Figura H.3, a continuació ens apareixerà una finestra com la de la figura H.4, que ens permet definir els models desitjats. En el nostre cas són els següents:

- Fluid: Gas
- Flux: Segregate flow
- Moviment: Estacionari
- Equació per resoldre el sistema: Ideal Gas
- Temps: Steady
- Règim del fluid: Turbulent
- Model de turbulència: K-epsilon turbulent

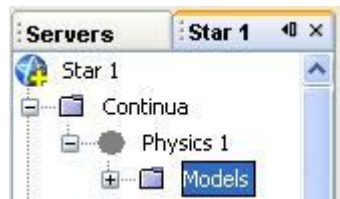


Figura H.3. Definir models.

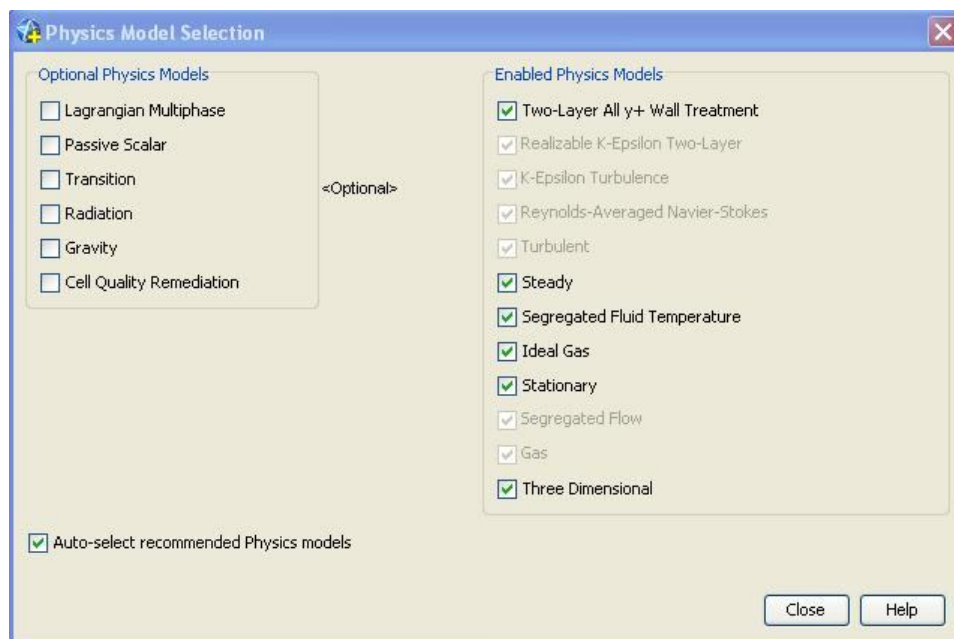


Figura H.4. Finestra amb els models definits.

Una vegada definides totes les propietats del models, tanquem la finestra de la figura anterior i passem a definir la interfície de les condicions de contorn del nostre cos. Per definir les condicions de contorn ens hem de col·locar sobre les icones del menú de l'esquerra.

Concretament ens col·loquem sobre *Regions* i es desplegarà un arbre com el que es mostra a la Figura H.5.

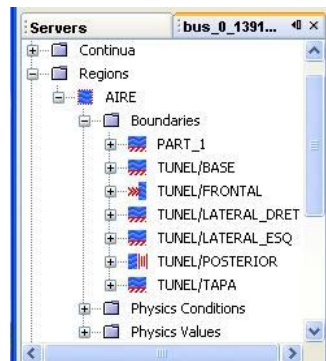


Figura H.5. Parts del cos, on es poden definir el tipus d'interfície.

El següent pas és assignar les condicions de contorn als diferents tipus d'interfície de la geometria importada. Despleguem la part del cos que ens interessa, ens col·loquem sobre *Shear Stress Specification* i li assignem el tipus d'interfície desitjada tal i com es mostra a la Figura H.6. En el nostre cas són les següents:

- Cos:
 - Wall/No-Slip
- Tunel/Base:
 - Wall/No-Slip
- Túnel/Frontal:
 - Velocity inlet
 - Velocity magnitude = 40m/s
- Túnel/Lateral Dret:
 - Symetry
- Túnel/ Lateral Esquerra:
 - Symetry
- Tunel/ Posterior:
 - Pressure outlet
 - Static pressure = 0.0 Pa
- Túnel/Tapa:
 - Symmetry

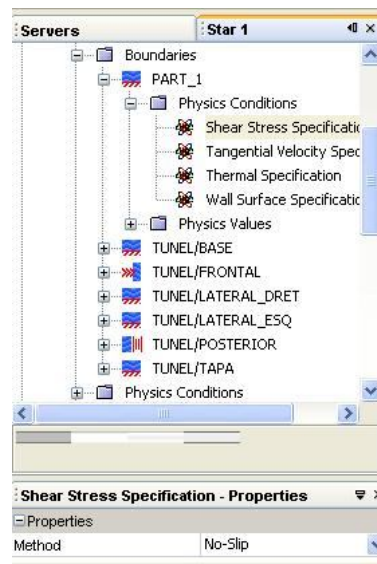


Figura H.6 Paràmetre per assignar el tipus d'interfície

El següent pas és crear un pla que talli la geometria per la meitat. Aquest pas no és necessari per als càlculs de la simulació, però sí que ens servirà posteriorment per analitzar la solució final.

Ens col·loquem sobre *Derived parts* del menú de la part esquerra de la pantalla. Premem el botó dret del ratolí, i ens apareixerà un diàleg tal i com es mostra a la figura H.7 on seleccionem *New part/Plane Section*.

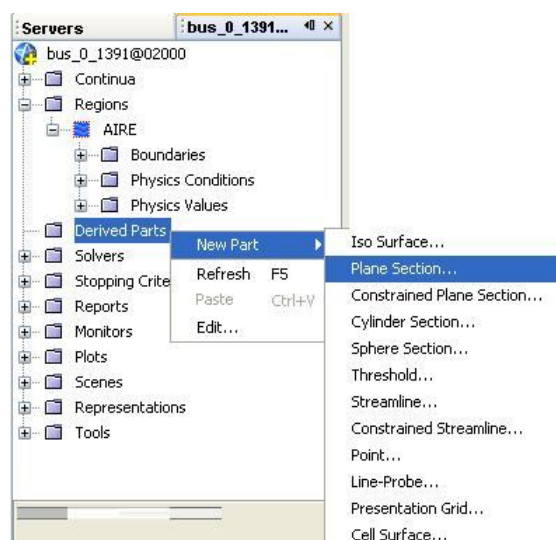


Figura H.7. Creació del pla de la secció.

A continuació se'ns obrirà una nova finestra, on marcarem el pla de tall que ens interessa, en el nostre cas triarem la direcció normal al pla (0,1,0) com el de la Figura H.8. Acte seguit premem sobre *Create* i se'ns crearà un pla de tall.

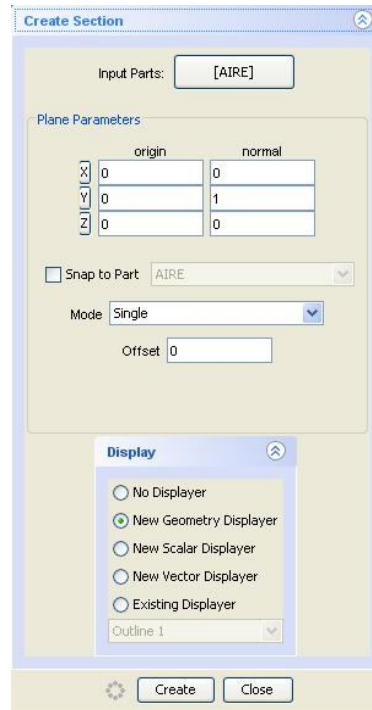


Figura H.8 Pla de tall

A continuació el que farem serà acotar els paràmetres de la solució, és a dir, fixar el nombre màxim d'iteracions que acceptem. Per ajustar aquest nombre d'iteracions, obrirem *Stopping Criteria* del menú de l'esquerra de la pantalla. Tal i com es mostra a la Figura H.9, ens col·loquem sobre *Maximum Steps* i li diem el nombre d'iteracions que volem, en el nostre cas 5000 iteracions.

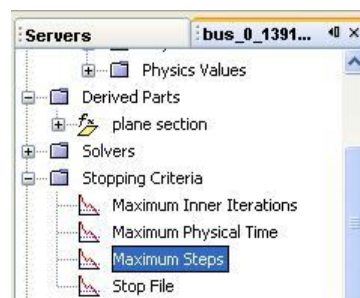


Figura H.9 Propietats per definir el nombre d'iteracions.

Tot seguit hem de definir al programa que ens doni els valors que ens interessa.

En l'arbre de l'esquerra de la pantalla, fem botó dret sobre *Reports*. En el diàleg que ens apareix, com el de la figura H.10, seleccionem *New Report/Force Coefficient* perquè, per exemple, volem que ens calculi el coeficient aerodinàmic (Cd).

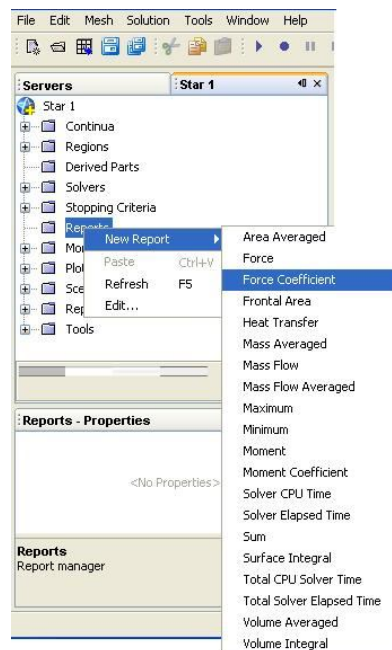


Figura H.10. Valors que pot calcular el programa.

Veurem com aquest nou element seleccionat que ens interessa calcular, ens apareix dins el node *Reports*. En el nostre cas ens apareixerà *Force Coefficient 1*. Si seleccionem *Force Coefficient 1* ens apareixerà una nova pantalla, com la de la figura H.11 i aquí podrem canviar les propietats del cos a estudiar. Completarem la taula de la següent manera:

- Reference Density: 1.2047 Kg/m^3
- Reference Velocity: 48 m/s
- Reference Area: 8.517 m^2
- Force option: Pressure & Shear
- Direction: $[(1.0), (0.0), (0.0)]$
- Reference Pressure: 0.0 Pa
- Parts: Bus

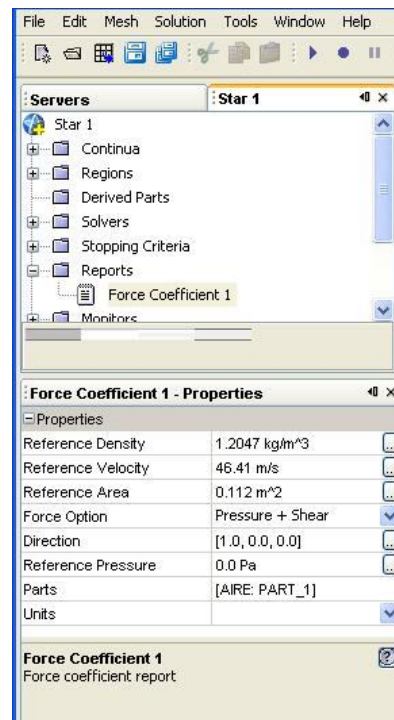


Figura H.11. Propietats del coeficient aerodinàmic (*Force Coefficient 1*)

Per visualitzar els resultats hem de crear un monitor. Per fer-lo, tal i com es mostra a la figura H.12, ens col·loquem sobre *Force Coefficient 1*, premem amb el botó dret del ratolí i seleccionem *Create Monitor and Plot from Report*.

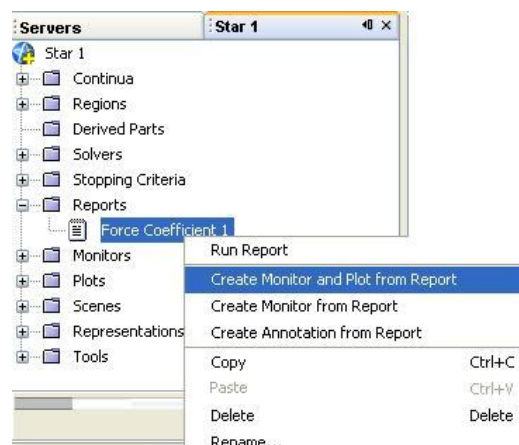


Figura H.12 Crear el monitor.

Veurem com dins el node de *Plots* ens apareixen dos nous nodes tal i com es veu a la figura H.13, un és el de *Force Coefficient* que ens permetrà visualitzar la gràfica del coeficient

aerodinàmic i l'altre són els *Residuals* que els que ens farà serà comptar la diferència que hi ha entre els punts de cada iteració.

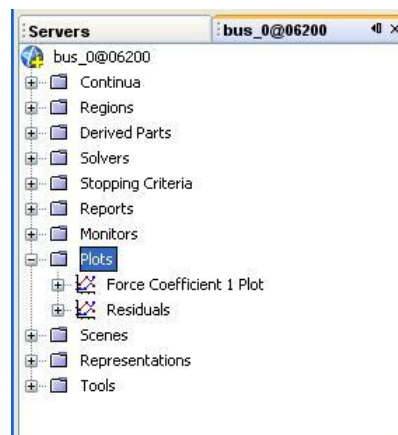


Figura H.13. Residus i Coeficient aerodinàmic.

Un cop realitzats tots els passos esmentats anteriorment ja podrem passar a començar la simulació. Per fer-ho, haurem de prémer sobre la icona *Run*  del menú superior.

Després de prémer la icona *Run*, veurem com a mesura que es van calculant les iteracions, es van generant les gràfiques dels *Residuals*, tal i com es pot veure a la figura H.14 i les del *Force Coefficient 1*, com s'observa a la figura H.15.

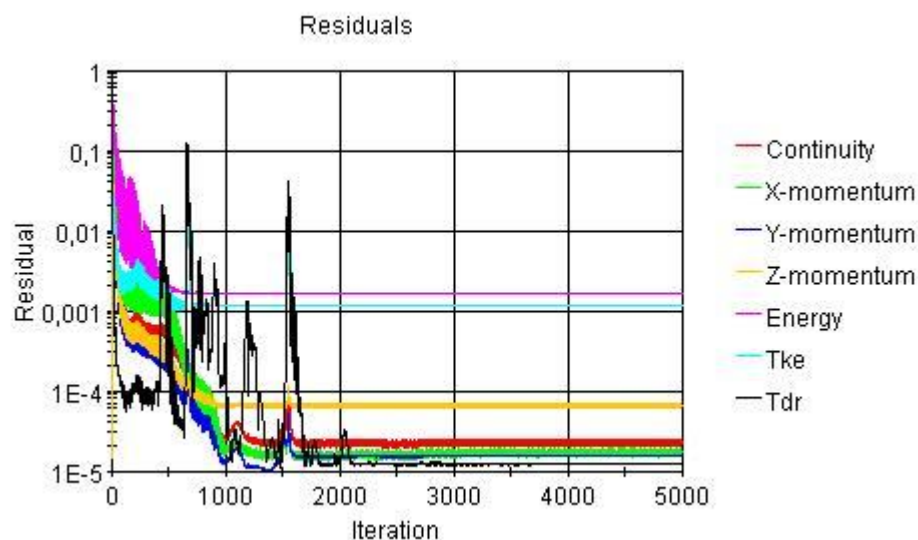


Figura H.14. Gràfica dels Residuals.

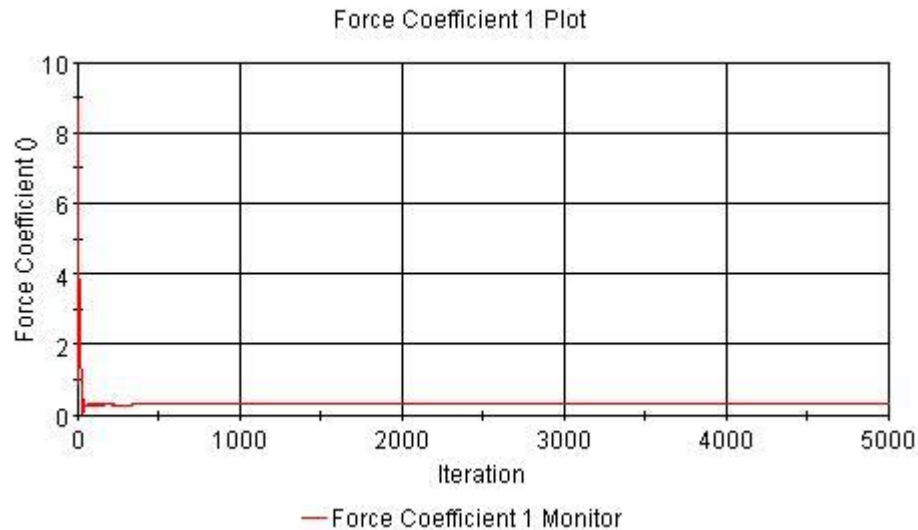


Figura H.15. Gràfica del Force Coefficient 1.

Per veure els valors numèrics de les iteracions, ens hem de col·locar sobre *Force Coefficient 1*, prémer el botó dret del ratolí i seleccionar *Tabulate*, tal i com es mostra a la Figura H.16. Tot seguit se'ns obrirà una taula com la de la Figura H.17, dels valors del *Force Coefficient 1*. Cal destacar que, aquí, calculem directament el valor de la força (en direcció x, y i z) i dels moments (x, y, z) sobre el vehicle. Així, aquí no estem interessats en determinar els valors de coeficients de forces com pot ser, per exemple, el coeficient d'arrossegament.

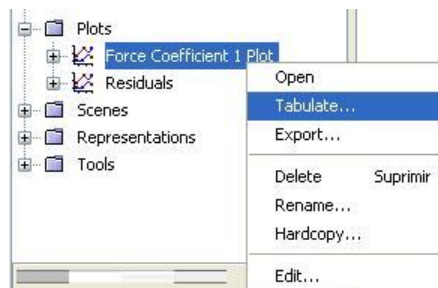
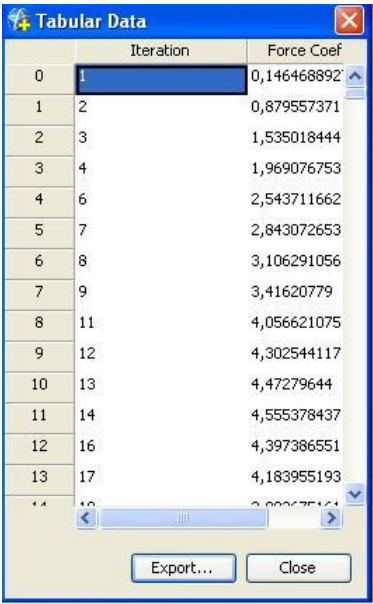


Figura H.16. Finestra per veure els valors iterats.



The screenshot shows a 'Tabular Data' window with a table containing two columns: 'Iteration' and 'Force Coef'. The table lists 14 iterations, with the 'Force Coef' values increasing from approximately 0.146 to 4.183. The window includes 'Export...' and 'Close' buttons at the bottom.

	Iteration	Force Coef
0	1	0,146468892
1	2	0,879557371
2	3	1,535018444
3	4	1,969076753
4	6	2,543711662
5	7	2,843072653
6	8	3,106291056
7	9	3,41620779
8	11	4,056621075
9	12	4,302544117
10	13	4,47279644
11	14	4,555378437
12	16	4,397386551
13	17	4,183955193

Figura H.17. Valors de les iteracions.

Una vegada executada tota la simulació en podem visualitzar l'estat de pressions amb els vectors velocitat, les línies de corrent del flux, etc, a partir de les escenes (veure figura H.18 i H.19).

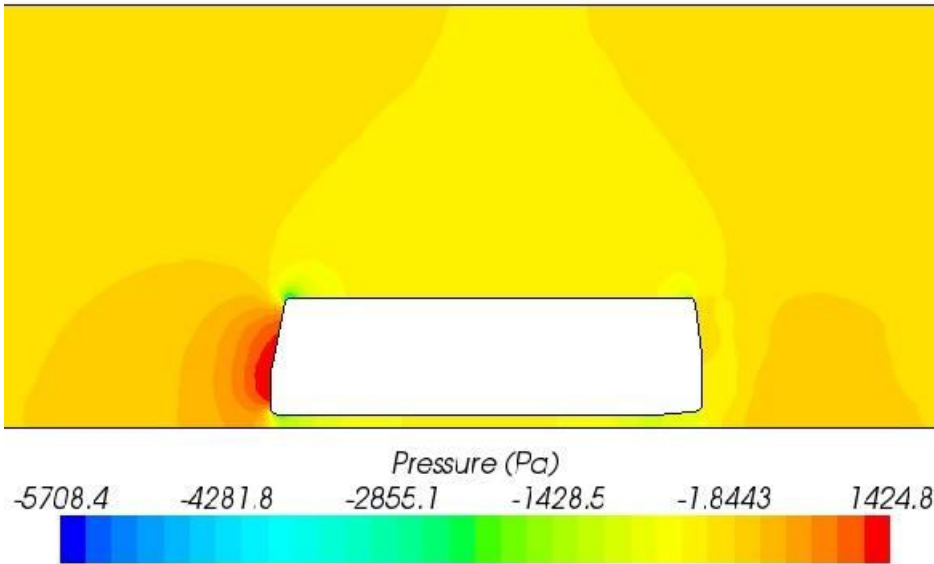


Figura H.18. Estat de pressions en el pla longitudinal al bus.

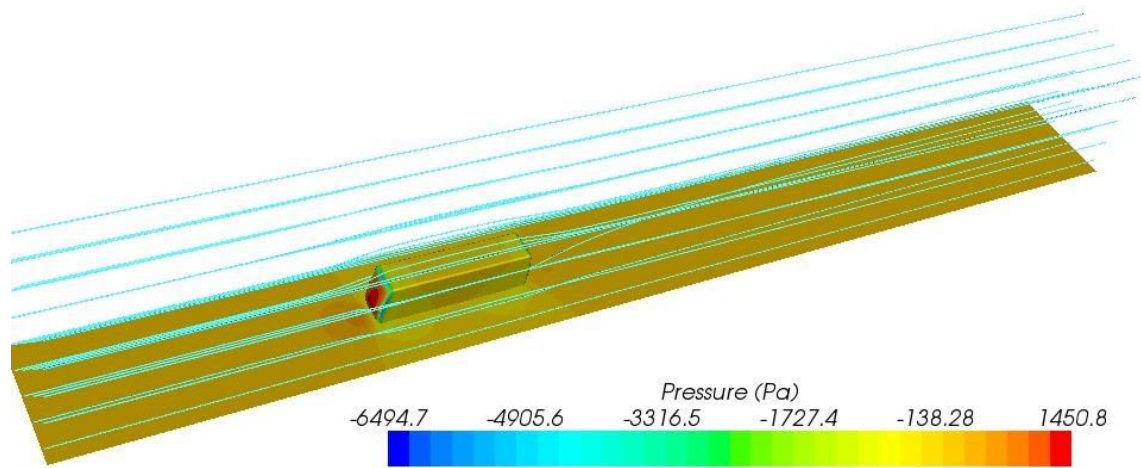


Figura H.19. Comportament del flux en impactar sobre el vehicle.

Finalment i gràcies als valors obtinguts i a la visualització de les magnituds podem extreure'n les conclusions.

H.2.- Bibliografia

Adreces web:

<http://www.cd-adapco.com/products/STAR-CCMplus/>, web relacionada amb el programa de simulació numèrica.

[www.cd-adapco.com/minisities/ugm us/seattle-agenda.pdf](http://www.cd-adapco.com/minisities/ugm%20us/seattle-agenda.pdf), web relacionada amb el programa de simulació numèrica.

ANNEX I

ANNEX I: REALITZACIÓ DE CÀLCULS AMB MATLAB

En aquest annex s'explicarà en detall el treball realitzat amb el programa de càlcul Matlab. Matlab és el nom abreviat de "MATrix LABoratory", un programa dissenyat, entre d'altres coses, per realitzar càlculs numèrics amb vectors i matrius. Com a cas particular, també pot treballar amb números escalars (tant reals com imaginaris), amb cadenes de caràcters i amb altres estructures d'informació més complexes. Una de les capacitats més atractives que presenta, és la de realitzar una àmplia varietat de gràfics en dos i tres dimensions. Matlab també té un llenguatge de programació propi.

Matlab és un gran programa de càlcul tècnic i científic. Quan pot executar les seves funcions en codi natiu és molt ràpid però en altres aplicacions pot resultar bastant més lent que el codi equivalent desenvolupat en C/C++ o Fortran. Encara que sempre és una eina d'alt nivell per desenvolupar aplicacions tècniques, fàcil d'utilitzar i que, com ja s'ha dit, pot augmentar significativament la productivitat dels programadors respecte a altres entorns. Matlab disposa d'un codi bàsic i de varies llibreries especialitzades (toolboxes).

Aquest programa de programació matemàtica a més té l'avantatge de poder treballar amb fitxers anomenats M. Aquests no són res més que documents de text a on s'hi escriu amb el llenguatge de programació indicant les operacions que volem que es realitzin de forma automàtica. Només és necessari escriure el nom del fitxer en la consola principal, i aquest s'executa sense que s'hagi d'anar escrivint tot cada vegada que volem fer un altre prova o experiment.

A continuació s'exposa tot el fitxer M que s'ha creat per a la realització de treball. Tot i que aquest ja té incorporades certes explicacions, s'intentarà afegir més comentaris entremig, alhora que s'hi adjuntaran mostres gràfiques de possibles resultats.

Cal dir que tota la informació que a davant porta el símbol "%" no s'executa, i s'utilitza per donar informació sobre el programa.

```
% Programa busmain.m
%
%
% Primer interval d'integració
%
tspan = [0,10];
%
% Condicions inicials
%
y0 = [0 0 0 0 0]
%
% Crida a la funció d'integració numèrica
%
options = odeset('reltol',1e-4,'AbsTol',[1e-5,1e-5,1e-5,1e-5,1e-5]);
[t,Y] = ode45(@busint,tspan,y0,options);
%
% Representació gràfica
%

cf=213000;
cr=425000;
vbus=28;
a=3.805;
b=2.195;

subplot(4,2,1); plot(t,Y(:,1)),grid;title('Angle Bolcada');xlabel('Temps (s)');ylabel('Angle (rad)'),set(gca,'XTick',[0 0.5 2 4 6 8 10]);

subplot(4,2,2); plot(t,Y(:,2)),grid;title('Angle Guinyada');xlabel('Temps (s)');ylabel('Angle (rad)'),set(gca,'XTick',[0 0.5 2 4 6 8 10]);

subplot(4,2,3); plot(t,Y(:,3)),grid;title('Angle Desviament');xlabel('Temps (s)');ylabel('Angle (rad)'),set(gca,'XTick',[0 0.5 2 4 6 8 10]);

subplot(4,2,4); plot(t,Y(:,4)),grid;title('Vel. Angular Guinyada');xlabel('Temps (s)');ylabel('Vel. Angular (rad/s)'),set(gca,'XTick',[0 0.5 2 4 6 8 10]);

subplot(4,2,5); plot(t,Y(:,5)),grid;title('Vel. Angular Bolcada');xlabel('Temps (s)');ylabel('Vel. Angular (rad/s)'),set(gca,'XTick',[0 0.5 2 4 6 8 10]);

subplot(4,2,6); plot(t,busacclat(t,Y(:,3),Y(:,4))),grid;title('Acc. Lateral');xlabel('Temps (s)');ylabel('Acc.Lateral (m/s^2)'),set(gca,'XTick',[0 0.5 2 4 6 8 10]);
subplot(4,2,7);plot(t,-cf*Y(:,3)-a*cf*Y(:,4)/vbus),grid;title('Força Pneumatic Anterior');xlabel('Temps (s)');ylabel('Força (N)'),set(gca,'XTick',[0 0.5 2 4 6 8 10]);

subplot(4,2,8);plot(t,-cf*Y(:,3)-a*cf*Y(:,4)/vbus),grid;title('Força Pneumatic Posterior');xlabel('Temps (s)');ylabel('Força (N)'),set(gca,'XTick',[0 0.5 2 4 6 8 10]);
```

El que hem fet en el programa anterior ha estat, en primer lloc, definir l'interval d'integració de les equacions dinàmiques del bus (veure Annex F). Una vegada definit aquest interval, hem definit les condicions inicials i, tot seguit, hem cridat la funció d'integració numèrica que

és d'equacions diferencials ordinàries. Finalment procedim a determinar els paràmetres per la representació gràfica.

```
function dy = busint(t,y);

c1=1.26587302;
c2=0.99132582;
c4=-0.85006944;
c5=1.27268848;
c7=-56.587333;
c8=-5273.3333;
c9=5189.06667;
c10=-35.557105;

if t <0.5;
    c3=-0.00037391;
    c6=-0.00504456;
    c11=-1.5804972;
else;
    c3=0;
    c6=0;
    c11=0;
end;

dy = zeros(5,1);
dy(1)=y(5);
dy(2)=y(4);
dy(3)=-c1*y(3)-c2*y(4)+c3;
dy(4)=-c4*y(3)-c5*y(4)-c6;
dy(5)=c7*y(5)+c8*y(1)-c9*y(3)-c10*y(4)+c11;
```

L'altre funció que hem creat és on determinem els valors calculats per cada cas que queden definits en l'annex F. També determinem la condició que si el temps de la ràfega de vent és més petit de 0,5 segons, es prenguin els valors relacionats amb l'acció del vent i que provenen de les simulacions amb CFD, mentre que si el temps és més gran de 0,5 segons, els paràmetres que dependent de l'acció del vent prenguin valor 0.

```
function acclat = busacclat(t,y3,y4);

c1=1.26587302;
c2=0.99132582;
vbus=28.;

if t <0.5;
    c3=-0.00037391;
else;
    c3=0;
end;

acclat=vbus*(c1*y3+c2*y4+c3+y4);
```

Finalment hem determinat la funció per determinar l'acceleració lateral produïda en el vehicle, ja que és un paràmetre molt important en la determinació de l'estabilitat del mateix.

Una vegada creat el programa procedim a treure'n les gràfiques corresponents (veure figura I.1). Hem de dir que el mateix programa ens servirà per a tots els casos canviant els valors que venen determinats a partir dels resultats obtinguts en el procés de simulació numèrica i en funció de les equacions descrites en l'annex F.

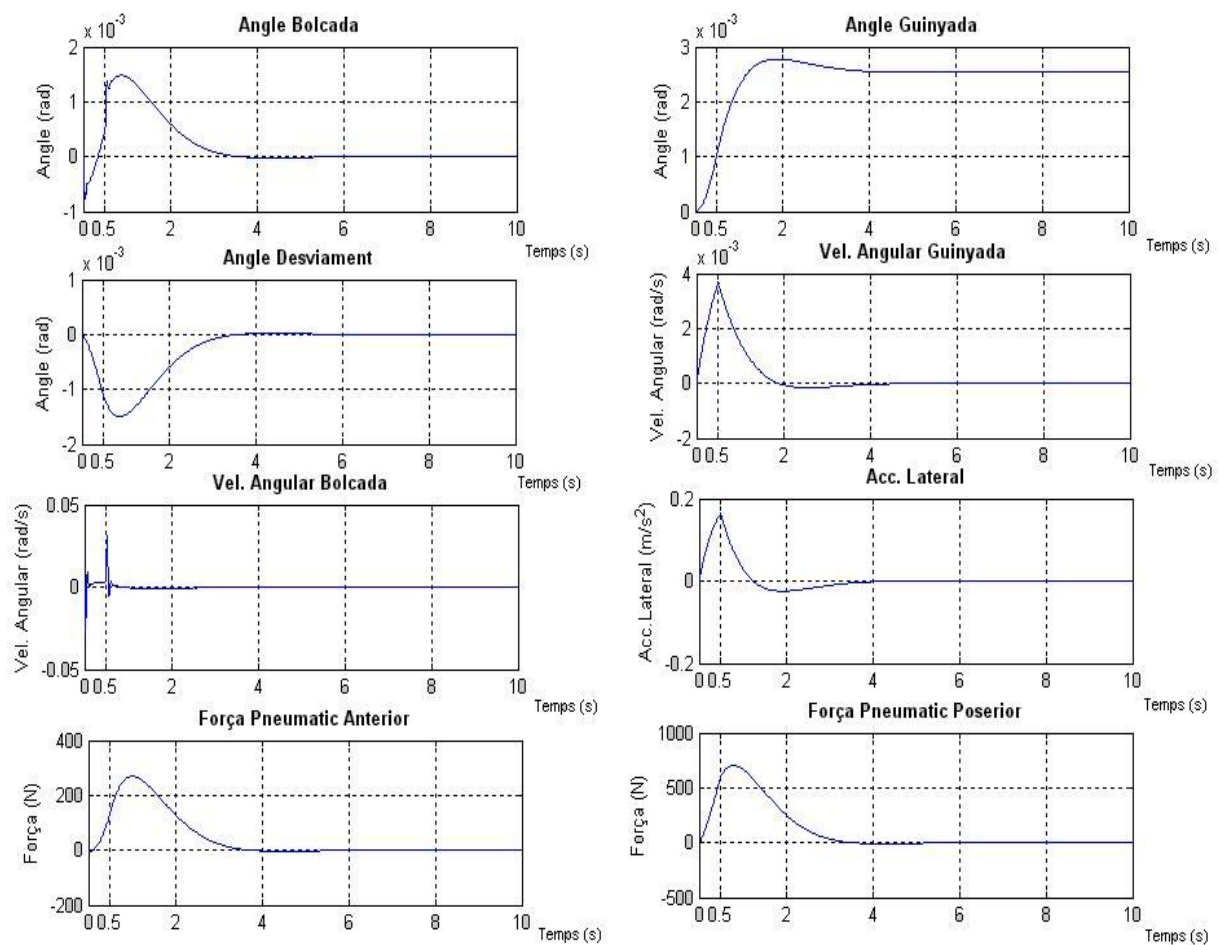


Figura I.1. Exemple de gràfiques de les variables calculades.

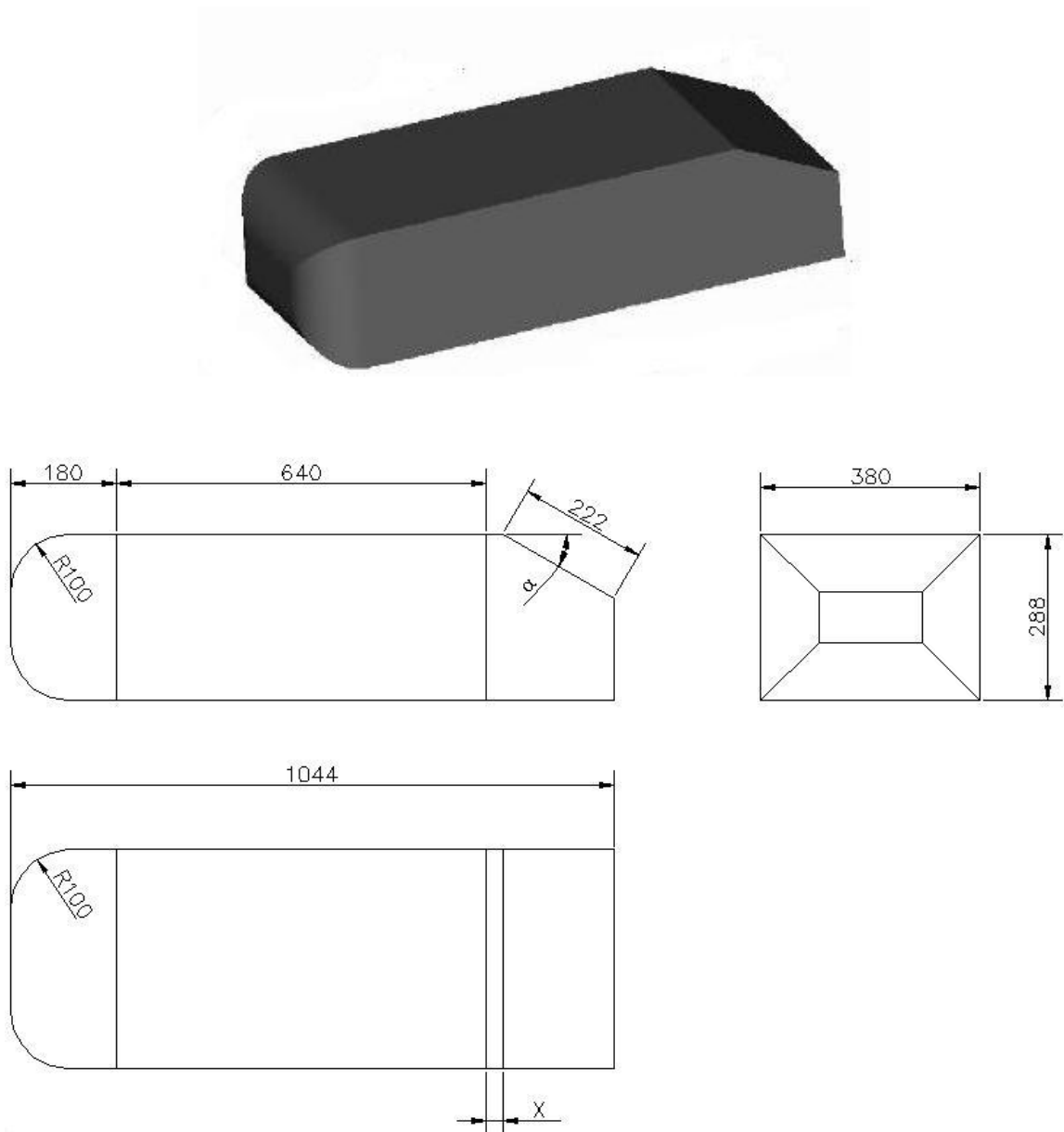
ANNEX J

ANNEX J: ESQUEMES DE DISSENY

En aquest annex representem esquemàticament els models utilitzats en el present projecte que són: el model del cos d'Ahmed i els dos models de carrosseria d'autobús (mides en mm).

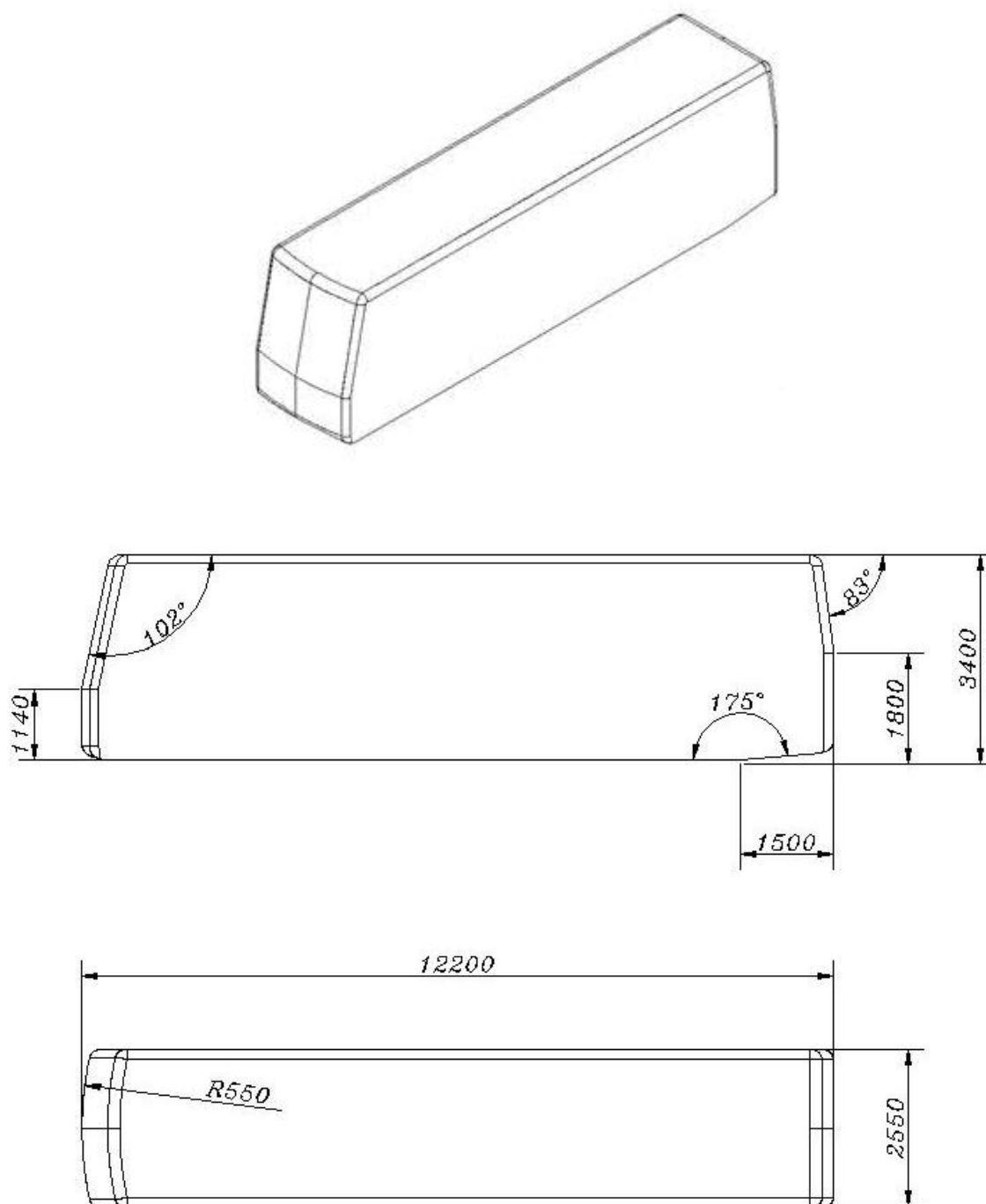
J.1.- Cos d'Ahmed

En el nostre cas hem variat l'angle α de la part posterior agafant com a valors: 0° , 10° , 20° , 25° , 30° , 35° , 40° , 45° i 50° . Cal dir que la distància X varia en funció de l'angle α utilitzat.



J.2.- Carrosseries d'autobús

- BUS 1**



- BUS 2**

