

RESUM

En aquest projecte es desenvolupa el disseny d'una joguina voladora, amb la dificultat afegida que se la vol dotar d'aparença humana. Un cop superades algunes fases de disseny de producte, es realitza un estudi aerodinàmic fent ús de mètodes numèrics. El disseny culmina amb la confecció d'un prototip que permet determinar si s'assoleixen els objectius i especificacions que se n'esperen.

Per començar s'acoten les possibilitats del disseny restringint el producte segons uns perfils determinats d'usuari, preu i funcionalitat. Tot seguit, es fa necessari el repàs d'algunes bases aerodinàmiques, que són el fonament per a un disseny adequat i rigorós. Per aquesta fase s'estableix un criteri i un procediment de prova i error que acaba portant fins el model definitiu.

El criteri esmentat consisteix en la confecció de models previs fent ús del disseny assistit per ordinador (CAD en anglès) i la seva posterior simulació sota unes condicions de contorn preestablertes, que permet verificar-ne o no la validesa. Cada model previ intenta millorar respecte l'anterior observant els resultats i fent ús de criteris teòrics prèviament estudiats.

Un cop dissenyada i optimitzada la joguina voladora, es simula un cop més el seu comportament sota el flux d'aire pertinent. La convergència de resultats determina la validesa dels mateixos, i es pot donar per tancada la fase de disseny.

En aquest punt, es procedeix a l'elaboració d'un prototip. Per la condició de projecte particular aquest es limitat i cal tenir en compte algunes consideracions addicionals alhora de fer les proves de vol. Aquestes permeten obtenir conclusions de forma empírica i extreure'n valuoses experiències del camp de l'aerodinàmica.

Finalment per tancar alguns dels objectius previs del projecte es fa un incís dels mètodes que possibilitarien la seva posterior producció, així com se n'elabora una cotització aproximada. D'aquesta manera culmina l'estudi del disseny d'una joguina voladora amb forma humana i es compleix amb la majoria d'objectius principals del projecte.

INDEX

RESUM	1
INDEX	2
INDEX DE FIGURES.....	5
INDEX DE GRÀFIQUES	8
Prefaci.....	9
Origen del projecte.....	9
Motivació	9
Requeriments previs.....	10
INTRODUCCIÓ	11
Objectius del projecte.....	11
Abast del projecte.....	11
1. ESTUDI DE VIABILITAT	13
1.1. Especificacions tècniques	13
1.1.1. Especificacions de disseny:	13
1.1.2. Especificacions estructurals.	13
1.1.3. Especificacions ambientals.	13
1.1.4. Especificacions socioeconòmiques	14
1.1.5 Especificacions objectiu.....	14
2. NORMATIVA APLICABLE.....	15
3. ESTUDI D'USUARI I FUNCIONS	19
4. ANALISI D'ALTERNATIVES	20
4.1. Models no motoritzats.....	20
4.1.1. Planejadors	20
4.1.2. Helicòpters	22
4.2. Models motoritzats.....	22
4.2.1. Planejadors	22
4.2.2. Helicòpters	24
4.2.3. Drones	25
4.3. Conclusions estudi d'alternatives.....	26
5. MECÀNICA DE FLUIDS.....	27
6. FORCES AERODINAMIQUES	27
6.1. Nomenclatura dels perfils aerodinàmics	28
6.2. Força de sustentació.....	29
6.3. Força de resistència.....	32
6.4. L'estabilitat en el vol	37
6.4.1. Control del caboteig	38
6.4.2. Control de l'alabeig.....	40

6.4.3.	Control de la guinyada	42
7.	MEMORIA TECNICA.....	44
7.1.	Estratègia	44
7.2.	Procediment	45
7.2.1.	Modelització en CAD.....	45
7.2.2.	Simulació i ús de la dinàmica computacional de fluids.....	47
7.2.3.	Creació de la malla.....	49
7.2.4.	Simulació i condicions de contorn	52
7.2.5.	Anàlisi dels resultats.....	54
7.2.6.	Valoració dels resultats.	58
8.	MODELS.....	62
8.1.	Model 1, primera prova.....	62
8.1.1.	Primer pas, modelització d'un humà	62
8.1.2.	Segon pas, model en CAD	63
8.1.3.	Tercer pas, creació de la malla model 1	65
8.1.4.	Quart pas simulació model 1	66
8.1.5.	Cinquè pas, conclusions model 1	70
8.2.	Aproximació al model definitiu.	71
8.2.1.	Després del model 1	71
8.2.2.	Modelització per parts.....	74
8.2.3.	Conclusions models previs.....	76
9.	MODEL FINAL	77
9.1.	Modelització en CAD del model final.	78
9.2.	Primera simulació model final	79
9.3.	Correccions fins el model definitiu.	83
9.3.1.	Cap	83
9.3.2.	Tors.	83
9.3.3.	Braços.....	84
9.3.4.	Cames.....	85
9.4.	Model definitiu	86
9.4.1.	Model definitiu primera simulació.	86
9.4.2.	Valoració del resultat del model definitiu.	88
9.4.3.	Refinament malla model definitiu.	89
9.4.4.	Última simulació model definitiu.....	90
9.4.5.	Contorn de pressions model definitiu.....	92
9.4.6.	Perfil de velocitats model definitiu	94
10.	FASE DE FABRICACIÓ.....	95
10.1.	Alternatives per al prototip	95
10.2.	Procés de fabricació	96
10.3.	Estudi d'estabilitat del prototip	99
10.4.	Elements de l'aeromodel.....	99

10.4.1.	Electrònics.....	99
10.4.2.	Bateria.....	100
10.4.3.	Motor.....	100
10.4.4.	Interruptor.....	101
10.4.5.	Hèlix.....	101
10.5.	Càlcul teòric de la potència.....	101
10.6.	Disseny de la peça per allotjar el motor.....	102
10.7.	Assemblatge dels elements i equilibri de l'aeromodel.....	103
10.8.	Inconvenients del prototip.....	103
10.9.	Càlcul empíric de la velocitat.....	105
11.	PROVES DE VOL.....	107
11.1.	Criteris d'avaluació de les proves.....	107
11.2.	Resultats proves.....	108
11.3.	Valoració dels resultats.....	108
12.	PRODUCCIÓ.....	112
12.1.	Possible producció i cotització.....	112
12.1.1.	Elements del model.....	112
12.1.2.	Recull de peces.....	113
12.1.3.	Desglossament cost del producte.....	113
12.2.	Possibles treballs futurs per al model de producció.....	117
12.2.1.	Vols circulars.....	117
12.2.2.	Element de seguretat.....	118
13.	COSTOS DEL PROJECTE.....	119
14.	IMPACTE AMBIENTAL.....	121
	CONCLUSIONS.....	122
	AGRAIMENTS.....	124
	BIBLIOGRAFIA.....	125
	Adreces web.....	125
	Referències literàries.....	125
	Imatges.....	126
	ANNEX.....	127
A.	Mecànica de fluids.....	127
A.1	Definició de fluid.....	127
A.2	Modelització dels gasos, un medi continu.....	127
A.3	Els fluids en la dinàmica.....	128
A.4	Flux estacionari i no estacionari.....	128
A.5	Flux laminar o turbulent.....	129
A.6	Flux extern i intern.....	130
A.7	Flux compressible o no compressible.....	130
A.8	Principi de conservació de la massa i Bernoulli.....	130
A.9	Capa límit.....	131

B. Plànol model definitiu.....	135
--------------------------------	-----

INDEX DE FIGURES

Fig. 4.1 Dos planejadors de baixa densitat no propulsats	21
Fig. 4.2 Planejador amb hèlix de càrrega amb corda elàstica.....	21
Fig. 4.3 Helicòpters de joguina mecànicament propulsats	22
Fig. 4.4 Planejadors motoritzats i radio controlats	23
Fig. 4.5 Figures voladors de perfils laminars, motoritzats.....	23
Fig. 4.6 Helicòpters motoritzats i radio dirigits	24
Fig. 4.7 Helicòpter amb control de rotació a la cua.....	24
Fig. 4.8 Diferents tipus de drones radiocontrolats, model de terra-aire a la dreta.	25
Fig. 4.9 Drone senzill radio dirigit	25
Fig. 6.1 Principals forces aerodinàmiques que actuen sobre un objecte volador.....	27
Fig. 6.2 Elements perfil aerodinàmic.....	28
Fig. 6.3 Velocitat flux al voltant d'un perfil alar.....	30
Fig. 6.4 Contorn de pressions sobre un perfil alar	30
Fig. 6.5 Gràfica per obtenir coeficients aerodinàmics segons l'angle d'atac d'un perfil alar.....	31
Fig. 6.6 Despreniment capa límit segons flux laminar a l'esquerra o turbulent a la dreta.	33
Fig. 6.7 Aparició de l'estela segons els perfils aerodinàmics.....	34
Fig. 6.8 Fenomen de succió del flux, de l'intradós al extradós	35
Fig. 6.9 Efecte del remolí a la punta d'ala	35
Fig. 6.10 Disminució del remolí a la punta d'ala	36
Fig. 6.11 moviments al voltant dels tres eixos d'un volador.....	37
Fig. 6.12 Centre de pressions segons el perfil alar	38
Fig. 6.10 Moment causat pel centre de pressions i de masses desfasats	39
Fig. 6.11 Centre de masses i de pressions coincidents a l'esquerra, i compensats per la cua a la dreta.....	39
Fig. 6.12 Centre de masses situat sobre el pla de simetria de l'aeromodel	40
Fig. 6.13 Components desglossades de les forces aerodinàmiques	41
Fig. 6.14 Efecte de les ales en forma de V, projecció horitzontal	41
Fig. 6.15 Representació de la caiguda en barrina	42
Fig. 6.16 Representació del moment de guinyada d'un aeromodel.....	43
Fig. 7.1 Esquema del volum de control en els models CAD	46
Fig. 7.2 Pla de simetria en el volum de control	47
Fig. 7.3 Malla estàndard, dimensionament pels models	50
Fig. 7.4 Representació de la capa límit sobre una placa plana	51
Fig. 7.5 Malla estàndard, refinament pels models. First layer height 0,001 m.	51
Fig. 7.6 Incidència del flux al cos d'estudi i angles d'atac.	53
Fig. 7.7 Convergència de les variables durant una simulació.....	54
Fig. 7.8 Contorn de pressions i perfil de velocitats d'un model alar	55

Fig. 7.9	Posicionament del centre de pressions d'un perfil alar	58
Fig. 7.10	Taula de densitats EPS	59
Fig. 7.11	Detall del MicroUfo, components.	60
Fig. 7.12	Càlcul del volum d'un cos amb eines CAD	60
Fig. 8.1	Model humà amb els programa Make Human	62
Fig. 8.2	Posicionament del model humà en actitud d'home volador	63
Fig. 8.3	Modelització de l'home volador amb Siemens NX 10.0 ©	64
Fig. 8.4	Resultat model 1	64
Fig. 8.5	Volum de control model 1, meitat simètrica.	65
Fig. 8.6	Mallat model 1	66
Fig. 8.7	Tall de secció del mallat 1	66
Fig. 8.8	Paràmetres de simulació del model 1	67
Fig. 8.9	Convergència en la simulació del model 1 i resultats CD i CL	67
Fig. 8.10	Resultats de forces aerodinàmiques per al model 1	68
Fig. 8.11	Contorn de pressions model 1	69
Fig. 8.12	Perfil de velocitats model 1 secció simètrica.	70
Fig. 8.13	Perfil de velocitats del model 1, secció mitjana	70
Fig. 8.14	Model 2, amb els canvis aplicats després d'observar el comportament del model 1.	72
Fig. 8.15	Simulació del Model 2, sense resultats significatius	73
Fig. 8.16	Model per parts, tors humà. Optimització fins arribar a la forma de la dreta.	74
Fig. 8.17	Resultats de la simulació del tors humà.	75
Fig. 9.1	Plànol disseny final vista frontal	77
Fig. 9.2	Plànol model final, teoria per obtenir angle d'atac	78
Fig. 9.3	Procés de modelització del model final, partint dels plànols.....	78
Fig. 9.4	Model final	79
Fig. 9.5	Convergència de la simulació del model final	79
Fig. 9.6	Forces resultants de la simulació del model final	80
Fig. 9.7	Volum model final	81
Fig. 9.8	Captures del contorn de pressions del model final	82
Fig. 9.9	Optimització model final, cap.	83
Fig. 9.10	Optimització model final, tors.....	84
Fig. 9.11	Optimització model final, braços	85
Fig. 9.12	Optimització model final, cames.....	86
Fig. 9.13	Obtenció de forces en la simulació del model definitiu	87
Fig. 9.14	Volum model definitiu.	88
Fig. 9.15	Volum del model definitiu després de laminar-lo	88
Fig. 9.16	Dimensionament i inflació de la malla refinada del model definitiu.....	89
Fig. 9.17	Malla refinada del model definitiu	90
Fig. 9.18	Convergència model definitiu, malla refinada	91
Fig. 9.19	Forces obtingudes de la simulació definitiva	91

Fig. 9.20 Contorn de pressions model definitiu, malla final.....	93
Fig. 9.21 Perfil de velocitats del model definitiu, malla final.....	94
Fig. 10.1 Diferents imatges de les fases del llarg procés de confecció del prototip de pasta de paper.....	97
Fig. 10.2 Intents fallits d'obtenir un model lleuger.....	98
Fig. 10.3 Model definitiu de paper, gairebé igual a la reproducció de poliamida.....	98
Fig. 10.4 Centre de gravetat desfasat del centre de pressions.....	99
Fig. 10.5 Bateria de liti carregable.....	100
Fig. 10.6 Motor elèctric <i>brushless</i>	100
Fig. 10.7 Hèlix.....	101
Fig. 10.8 Peça per allotjar el motor, dissenyada per treballar amb l'angle d'atac previst.....	102
Fig. 10.9 Assemblatge de l'electrònica.....	103
Fig. 10.10 Pes total del prototip, gairebé doblant el previst.....	104
Fig. 10.11 Prototip acabat.....	105
Fig. 10.12 Càlcul de la velocitat lineal amb un senzill experiment.....	106
Fig. 11.1 Una de les primeres de proves de vol fallides.....	108
Fig. 11.2 Captures de pantalla del vídeo del vol exitós.....	109
Fig. 11.3 Captura de pantalla del vídeo del vol exitós.....	110
Fig. 11.4 Captures de pantalla del vídeo del vol exitós, vol estabilitzat abans d'arribar a terra.....	111
Fig. 12.1 Explotat de peces dissenyades per a sortir de motlles de producció.....	112
Fig. 12.2 Idea per obtenir vols circulars.....	117
Fig. 12.3 Element de seguretat per evitar l'accés a l'hèlix.....	118

INDEX DE GRÀFIQUES

Graf. 9.1 Millora des del model final fins el definitiu	87
Graf. 9.2 Convergència dels valors de força de sustentació en funció del refinament de la malla	92
Graf. 10.1 Densitat de diferents materials	96
Graf. 10.2 Model definitiu de poliamida	96

PREFACI

Origen del projecte

L'interès per dominar el medi aeri ha estat ben present durant la història de la humanitat. Molt abans que es comencés a dominar l'aviació tal i com es coneix actualment, ja van tenir lloc els primers aeromodels, artefactes més densos que l'aire desitjosos de volar. Des dels més extravagants, com el famós colom volador d'Arquites de Tareto datat del segle III a.C., fins al també conegut "Planophore" d'Alphonse Penaud, el primer enginy autopropulsat, aquesta disciplina ha anat millorant i perfilant-se fins arribar als nostres dies.

Actualment l'activitat aeromodelista està completament desenvolupada i es podria dir que internacionalment està en el seu apogeu. A ningú li passa per alt el creixement accelerat d'algunes tipologies, ja més modernes, com els Drones; i la popularitat i interès que han generat a la societat actual. Tampoc se li ha escapat al món de la joguina. Tant és així que moltes de les empreses del sector han apostat per aquesta línia, amb diferents propostes i resultats. Ja siguin més o menys tècniques o més o menys funcionals, miren de buscar-se un lloc en aquest competitiu mercat.

Motivació

És així com neix l'interès de desenvolupar una joguina voladora. Un disseny innovador i funcional, però a l'hora senzill, garantirà de ben segur l'èxit del producte que es presentarà, i evidentment això requerirà d'un estudi profund i acurat. A banda d'aquestes motivacions, més aviat competitives i per a trobar un lloc en el mercat, el desenvolupament d'un projecte d'aquesta naturalesa s'ha de sustentar en alguna cosa més. I és que com molts dels fidels a aquesta afició convindran, l'aerodinàmica també és passió.

L'interès en aquest camp serà part fonamental durant el desenvolupament. A més a més, l'ús concret de diferents eines o disciplines per a aconseguir els objectius també contribuirà a generar una major afecció per les tasques requerides en cada fase del projecte. Aquestes són, en termes generals, el disseny assistit per ordinador (CAD) per a la modelització de l'aeromodel, l'ús de programes de control numèric per a la simulació teòrica, i finalment tots

els processos necessaris per tal de confeccionar un prototip funcional. Totes elles han de contribuir de manera activa a dur la simple idea del paper a la realitat.

Requeriments previs

Al valorar els requeriments previs d'aquest projecte s'hauran de tenir en compte les seves dues vessants. Per una banda, no deixa de tractar-se d'una joguina. S'haurà de tenir un mínim coneixement de les condicions que envoltarien tot el seu possible posterior desenvolupament. Saber prèviament sobre normatives, condicions de qualitat, limitacions implícites en la fabricació, costos, i moltes altres coses, ajudarà significativament a encarar bé des del principi els problemes que es plantegin.

A part, les implicacions tècniques també són evidents. En termes generals i només començar, caldrà tenir uns mínims fonaments de l'aerodinàmica, que serà present en totes les fases de desenvolupament. Més concretament i com ja s'apuntava anteriorment, també es requerirà de certa destresa i accessibilitat a eines de disseny assistit per ordinador, per tal de facilitar i fer fluid tot el procés de modelització, així com estar familiaritzat amb programes de simulació numèrica. En acabat, tenir la possibilitat d'accedir fàcilment a mètodes de fabricació resultarà molt necessari.

INTRODUCCIÓ

Objectius del projecte

Aquest projecte té com a finalitat principal el disseny i desenvolupament d'un prototip funcional d'una joguina voladora. Haurà de ser capaç de donar resposta a les diferents dificultats que es vagin succeint durant cada fase i el procés en general. Tanmateix també haurà de complir amb alguns requisits previs per tal de donar valor afegit a la joguina, la qual no podrà comptar només amb la funcionalitat de volar si vol ser competitiva en el mercat.

Així doncs aquesta joguina voladora haurà de tenir un disseny humanoide, que s'hi aproximi el màxim possible, sense deixar alhora de complir amb les pertinents necessitats aerodinàmiques. Camuflar l'objecte capaç de volar en una forma humana serà doncs el repte més gran i segurament el que porti més dificultat en un inici.

A banda, també s'haurà de desenvolupar un projecte que en acabat pugui ser susceptible de vendre en el mercat a un PVP aproximat de 50€. A més a més, la joguina haurà de complir amb la normativa i marcatge CEE.

En acabat, si la idea resultés prou atractiva hauria de poder ser utilitzada per una empresa del sector, qui l'adaptaria a les seves necessitats i la faria encaixar i identificar amb la seva pròpia imatge.

Abast del projecte

Aquest projecte es mou entre l'estudi del disseny d'un producte – des de la idea inicial fins a la introducció en el mercat – i entre l'estudi purament tècnic i aerodinàmic del mateix. Ja que són dos camps d'estudi molt amplis i complets, caldrà saber des de l'inici quin serà l'abast del projecte, i per tant decidir també on no podrà arribar.

Així doncs en un inici s'haurà de fer un estudi de viabilitat. Això inclourà les especificacions tècniques, estudi d'usuaris, estudi d'alternatives i pressupost, entre altres. Aquest capítol no inclourà un anàlisi en profunditat de l'estat d'aquesta línia en el mercat, ni previsions de vendes o de possibles beneficis.

A continuació es considerarà necessari fer un repàs general dels conceptes aerodinàmics bàsics. Tenir clars els fonaments de mecànica de fluids i les forces aerodinàmiques. Aquest pas previ servirà per encarar amb més garanties els següents.

Es modelitzarà en CAD la figura i se sotmetrà a simulació amb eines de control numèric, tot tenint en compte condicions de contorn segons les especificacions tècniques. Obtinguts els resultats desitjats es mirarà de fabricar el prototip del model el més fidelment possible. Durant aquesta etapa no es tindran en compte condicions per a la fabricació posterior, o durant fases de producció, tot i que es podrien arribar a considerar o tenir en compte si cap.

En acabat, es parametrizarien les condicions del test per valorar la funcionalitat i s'adaptaria el producte a les necessitats de l'empresa interessada. No s'entraria a definir manuals del producte ni embalatges, però si es pertinent se li podria donar una imatge d'acord amb l'empresa a qui va dirigit el producte.

1. ESTUDI DE VIABILITAT

1.1. Especificacions tècniques

El projecte haurà de complir amb tot un seguit de requisits previs que es poden classificar segons la seva naturalesa

1.1.1. Especificacions de disseny:

- L'objecte volador haurà de tenir aparença humana.
- La mida més llarga dels tres eixos de l'humanoide haurà de romandre entre els 25 i els 35cm.
- El baix pes haurà de contribuir de manera activa a la simplicitat i funcionalitat de l'objecte volador final, preestablint així uns límits d'entre 15 i 25g. Alhora, això comportarà:
 - o Optimització màxima dels elements electrònics.
 - o Ús d'un material de molt baixa densitat per a l'estructura principal, entre 20 i 50kg/m³

1.1.2. Especificacions estructurals.

- L'objecte volador haurà de ser capaç de suportar esforços a compressió d'almenys 0,4N.
- L'estructura principal no haurà de suportar esforços que no estarien causats pel que es considerarà l'ús normal del producte.

1.1.3. Especificacions ambientals.

- L'objecte volador haurà de permetre ser usat tant en espais obert com en espais tancats. Per a aquests últims l'espai mínim necessari serà de sales de 40x40x5[m] i sense obstacles.
- En espais oberts s'haurà d'utilitzar en absència total o parcial de vent, màxim de 2 km per hora i sempre a favor.

1.1.4. Especificacions socioeconòmiques

- Aquest producte anirà dirigit a un target concret d'usuari. El rang d'edat anirà dels 8 als 12 anys, i es jutjarà el valor i jugabilitat del producte tenint present aquest perfil.
- El PVP final d'aquest producte no haurà de sobrepassar els 50€.

1.1.5 Especificacions objectiu.

- L'objecte volador haurà de ser capaç de realitzar vols d'almenys 20 metres de llargada, sense necessitat d'assolir una alçada superior a la de tir.
- L'objecte volador haurà de tenir una autonomia mínima de 15 minuts. Això equivaldrà a que pugui funcionar en el seu estat normal durant el temps esmentat.
- L'objecte volador haurà de ser capaç de descriure trajectòries en l'aire segons el disig de l'usuari.

2. NORMATIVA APLICABLE

El producte que es derivi d'aquest projecte haurà de complir amb els requisits per a ser comercialitzat al públic. Com que es pretén abastar l'àmbit internacional, haurà de dur la marca de Conformitat Europea (CE). Aquest no és més que el procés mitjançant el qual el fabricant informa als usuaris i autoritats competents que el producte compleix amb la legislació obligatòria essencial de la seva matèria.

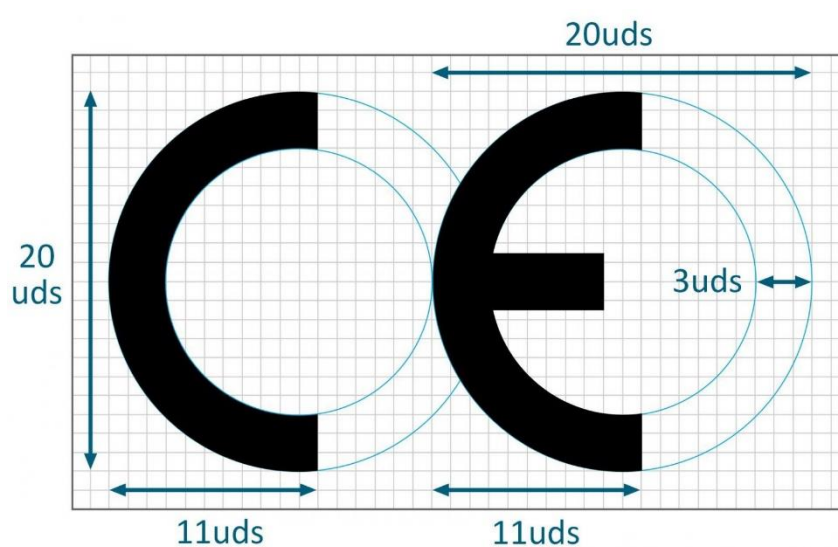


Fig. 2:1 Marcatge europeu CE

En aquest cas, tractant-se d'una joguina, la normativa pertinent és la UNE-EN/71. A l'annex s'adjunta el document complet per a més detall, però tot seguit s'expliquen només les relatives al cas d'estudi.

En tot el document gairebé no es fan referències explícites al cas de joguines voladores. Els pocs punts que en parlen es copien a continuació.

7.9 Cometas de juguete (véase 4.13)

Las cometas de juguete y otros juguetes voladores provistos de cuerda de más de 2m que unen el juguete al niño deben llevar la advertencia siguiente:

“Advertencia. No debe utilizarse cerca de las líneas eléctricas o durante una tormenta”.

4.17 Projectiles (véase el capítulo A.22)

4.17.1 Generalidades

c) Los rotores de helicópteros y las hélices simples destinados a ser lanzados en vuelo libre vertical o casi vertical por un mecanismo de muelle o un dispositivo similar, deben tener un anillo de protección alrededor de su perímetro con el fin de reducir los riesgos i causar lesiones.

El producte que es planteja en aquest projecte a priori no està destinat a dur cordes. Per tant la primera advertència no seria necessària de ser inclosa.

Per altra banda, sí que serà molt probable que el producte final dugui una hèlix, sigui com sigui el seu mecanisme o dispositiu d'accionament – motlle o motor – caldrà tenir en compte la possible necessitat d'afegir l'anell de protecció per evitar l'accessibilitat o reduir els riscos de lesió.

Fent un repàs de la resta de punts que conté la normativa, se n'han triat alguns que podrien arribar a ser vigent per un producte de les característiques que es plantejaran. Són punts més genèrics i que no estarà de més conèixer-los prèviament.

4.9 Elementos salientes

Los tubos y los elementos rígidos salientes que constituyen para el niño un peligro de perforación deben protegerse. Esta protección no debe quitarse cuando se proceda al ensayo [...]

Las puntas de las varillas [...], las extremidades de las varillas deben estar exentas de bordes cortantes peligrosos y puntas punzantes peligrosas en el momento de los ensayos según apartados [...] los extremos no deben tener rebaba y su acabado debe ser liso, redondeado y casi esférico.

5.3 Láminas de plástico

Las láminas de plástico que se desprenden de los juguetes cuando se ensayan [...] y cuya superficie es superior a 100mm x 100mm, no deben tener un espesor medio inferior a 0,038mm [...]

7.2 Juguetes no destinados a niños menores de 36 meses

Las disposiciones indicadas en el apartado 7.2 no se aplican a juguetes que, debido a sus funciones, dimensiones, características, propiedades u otros motivos convincentes, son claramente inadecuados para menores de 36 meses. Los juguetes no destinados a menores de

36 meses pero que podrían resultar peligrosos para ellos deben estar acompañados por una advertencia, por ejemplo del tipo:

“Advertencia. No conviene para niños menores de 36 meses” o “ Advertencia. No conviene para niños menores de tres años”.

Junto con una breve explicación del peligro específico que exige esta restricción. El peligro es la posible causa del daño. Daño significa lesión o cualquier otro daño a la salud, incluido un efecto a largo plazo en la salud.

Cuando exista más de un peligro, al menos se debe indicar el principal de ellos.

Si el peligro (posible causa de daño) puede no considerarse obvio para los consumidores, la indicación de peligro debe completarse con una descripción clara de los daños con el fin de explicar la advertencia en su conjunto [...]

Ejemplos de advertencias aceptables, junto con indicaciones breves del peligro específico y, en segundo ejemplo, una descripción clara del daño, son:

“advertencia. No conviene para niños menores de 36 meses. Piezas pequeñas.”

[...]

La advertencia respecto a la edad debe estar claramente legible en el punto de venta del producto, y debe aparecer sobre el propio juguete o en su embalaje.

La indicación del peligro específico puede figurar en un folleto o en las instrucciones de uso, en lugar de sobre el juguete o el embalaje.

La frase “No conviene para niños menores de 36 meses” o “No conviene para niños menores de tres años” puede sustituirse por un símbolo, tal y como viene especificado en la figura 17.



Figura 17 – Símbolo de advertencia de edad

[...]

El símbolo se debe utilizar sólo para indicar “0 a 3” años y no para otras advertencias de categorías de edad para evitar interpretaciones incorrectas del símbolo.

7.5 Juguetes funcionales

Los juguetes funcionales y su embalaje deben llevar la advertencia siguiente:

“Advertencia. Utilícese bajo la vigilancia directa de un adulto”

Además, estos juguetes deben ir acompañados de unas instrucciones relativas al funcionamiento y a las precauciones que el usuario debe tomar, señalando que, en caso contrario, éste se expone a ciertos peligros – que han de especificarse – inherentes al aparato o al producto, del cual el juguete es una reproducción en tamaño reducido o una imitación. Debe indicarse igualmente que el juguete debe mantenerse fuera del alcance de los niños por debajo de cierta edad que será especificada por el fabricante.

7.6 Bordes cortantes y puntas punzantes funcionales peligrosas

Para los juguetes que incorporan bordes cortantes funcionales peligrosos o puntas punzantes funcionales peligrosas en el envase y en la guía de uso que se suministra junto con el juguete si es apropiado debe llamar la atención sobre los peligros potenciales de dichos bordes o puntas.

Les normatives que s’han repassat plantegen aspectes força genèrics que convindrà tenir presents en el disseny preliminar del model. Si més no, tot i que no s’hi profunditzi, s’haurà de dur a terme un disseny que no impossibiliti, per la seva naturalesa, la resolució dels punts anteriors en treballs futurs.

3. ESTUDI D'USUARI I FUNCIONS

Després de revisar la normativa la primera cosa que queda clara és que el producte haurà d'anar destinat a usuaris de com a mínim més de tres anys.

Si es profunditza més en l'àrea que ocupa aquest producte, es pot veure que tot i ser una joguina el món de l'aeromodelisme és força complexe. Encara més, tot allò aquell aeromodel que sigui mínimament funcional requereix de certa destresa per part de l'usuari per tal de ser usat adequadament.

Sí el producte demana alguns coneixements per a fer-lo funcionar, també serà necessari un interès per part del jugador, a més d'una mica de paciència. S'entén que aquestes qualitats només començarien a observar-se en infants a partir de 8 anys. Alhora, un usuari de més de 12 anys realment interessat en el món de l'aeromodelisme, segurament ja no buscarà tant la distracció d'una joguina voladora, sinó que s'acostaria més a la categoria de *hobby*.

L'home volador estarà pensat per aquest marge d'edat, i tot i entendre que els perfils de nens i nenes seran els que mostrin un interès previ en l'àmbit dels aeromodels, també es tindrà en compte que l'originalitat de la figura atraurà un ventall d'usuaris més ampli encara. El disseny podria jugar un paper important en l'èxit del producte final i la senzillesa en el funcionament també podria ser clau.

4. ANALISI D'ALTERNATIVES

A continuació es detallen les diferents opcions o propostes per al disseny d'una joguina voladora. Per a tal finalitat es farà un repàs de les tipologies d'aeromodels i finalment es contraposaran a les especificacions donades.

En l'àmbit de l'aeromodelisme s'hi pot trobar un extens ventall d'opcions, però en el món de la joguina l'oferta actual és més limitada. Si a més a més es restringeixen els perfils de cost i edat als especificats, la llista es redueix considerablement, doncs s'eliminen modalitats més relacionades amb el món del *hobbie* o "semi professionals".

Així doncs, com a criteri de classificació de les alternatives pertinents es pot distingir entre la motorització o no dels aeromodels.

4.1. Models no motoritzats

4.1.1. Planejadors

Existeix una gran tradició i oferta d'aquest tipus d'aeromodels. Són generalment senzills i de molt baix cost. Enfocats a un perfil d'usuari de baixa edat, el seu ús és relativament assequible per a tothom.

La manca d'elements que l'atorguin potència obliga a un bon disseny per a realitzar vols estables i prolongats. Això generalment significa una bona superfície alar i un pes molt baix, tot i que alguns es serveixen de llançadors amb gomes elàstiques o altres enginys com els que es poden veure a continuació.

Típics planejadors fets amb materials de molt baixa densitat; paper, cartó, o d'altres com l'EPS més conegut com a *porexpan*. També se'n poden observar amb llançadors.



Fig. 4.1 Dos planejadors de baixa densitat no propulsats

Entre el clàssics es troba el planejador amb hèlix frontal de corda. Consta simplement d'un element elàstic capaç de carregar l'hèlix, aconseguint un bon resultat de rotació un cop alliberat. En general són models força versàtils i solen donar molt bons resultats en vers la seva senzillesa.



Fig. 4.2 Planejador amb hèlix de càrrega amb corda elàstica.

4.1.2. Helicòpters

Es tracta d'aeromodels dotats d'un enginy mecànic capaç de propulsar l'objecte cap a l'aire durant uns segons com si fos un helicòpter. Generalment fan ús d'una rosca helicoïdal i un tirador. Hi ha de molts tipus, i tot i que alguns es presenten amb formes humanoides, el seu esment en aquest projecte és merament anecdòtic, doncs les seves prestacions acostumen a ser molt limitades. A continuació se'n poden veure alguns exemples.



Fig. 4.3 Helicòpters de joguina mecànicament propulsats

4.2. Models motoritzats

4.2.1. Planejadors

Els planejadors motoritzats en el món de la joguina són menys habituals, essent més propis de diferents modalitats de l'aeromodelisme. Probablement la major dificultat en controlar vols d'aquest tipus situa la categoria en perfils d'usuaris més avançats en la matèria. No obstant es poden trobar aeromodels poc exigents, econòmics i completament funcionals, sempre fent ús de motors elèctrics i bateries. En general es tractarà de voladors radiocontrolats, de complexitat més o menys variable.

A diferència dels planejadors no motoritzats, aquests gaudeixen d'una potència que els permet la diversificació en el disseny sense causar el perjudici del seu vol. És a dir, ja no són imprescindibles elevades superfícies alars i el pes ja no és un factor tant limitant. És així com apareixen propostes més originals i en la línia de l'objecte d'aquest projecte, com es pot observar tot seguit.

Amb materials poc densos i amb un o dos motors - si han de ser radio dirigits - poden assolir velocitats d'entre sis i deu metres per segon.



Fig. 4.4 Planejadors motoritzats i radio controlats

Els següents models, amb un treball d'estudi aerodinàmic més de fons, aconsegueixen volar amb formes molt menys convencionals. És aquí on es pot observar per primer cop figures que simulen la morfologia humana, herois voladors. No obstant se segueix requerint l'ús de perfils bàsics, en aquest cas laminars, que no doten del màxim realisme els models.



Fig. 4.5 Figures voladors de perfils laminars, motoritzats

4.2.2. Helicòpters

Els helicòpters motoritzats ocupen un gran espai com a línia en les joguines voladores. La simplicitat del seu disseny i facilitat d'ús atorguen a aquesta categoria una atenció especial per part d'empreses del sector i usuaris, doncs gairebé no requereixen profunditzar en la matèria.

Els més bàsics poden constar de qualsevol element equilibrat i de poc pes i d'un doble rotor; hèlixs que giren en sentits oposats per compensar la rotació entre elles. El radio control només necessita augmentar o disminuir la potència del motor per a fer pujar o baixar l'aeromodel.



Fig. 4.6 Helicòpters motoritzats i radio dirigits

Ja més complexos són aquells que afegeixen control de rotació a la cua. Esdevenen més cars i potser se surten més de les especificacions.



Fig. 4.7 Helicòpter amb control de rotació a la cua

4.2.3. Drones

La categoria estrella dels últims anys, s'ha fet un lloc molt important també en l'àmbit de la joguina. Hi ha de molts tipus i preus, però poden arribar a ser realment senzills i versàtils, assequibles i funcionals per a tots els perfils de cost i edat.

Els Drones de quatre motors són dirigibles per radio control, però el cost se sol disparar per molt senzills que siguin. Tot i això l'èxit i popularitat dels mateixos és indiscutible. En aquest àmbit s'han arribat a desenvolupar conceptes realment originals, com els models d'aire i terra.



Fig. 4.8 Diferents tipus de drones radiocontrolats, model de terra-aire a la dreta.

Aquesta categoria troba el sùmmum de la simplicitat en els mono hèlix. Amb una carcassa que funciona com a segon rotor, només ha de constar d'un motor i de l'allotjament principal per emplaçar-hi l'electrònica i la bateria. El control es basa en un comandament que augmenta o disminueix la potència del motor. Gràcies a la seva simplicitat s'aconsegueix un producte realment de baix cost.



Fig. 4.9 Drone senzill radio dirigit

4.3. Conclusions estudi d'alternatives

De cada una de les categories anteriors se n'han destacat el trets més rellevants per tal de contraposar-les a les especificacions tècniques ja donades.

La modalitat d'helicòpters no motoritzats queda eliminada de bon principi per la impossibilitat d'aconseguir a través d'ella vols prolongats com els desitjats. Pel que fa els motoritzats, ha quedat clar que proporcionen vols molt estables. No obstant, el que es buscarà és la il·lusió d'un heroi volador, l'espectacularitat d'un vol com la que pot proporcionar un planejador. Pel mateix motiu, els drones quedarien descartats també. Tot i que els helicòpters de rotors a la cua o els drones de quatre motors podrien aconseguir un efecte com el desitjat, en aquest casos el cost s'escaparia de les expectatives.

El fet d'aconseguir una forma humana el màxim realista possible és també un dels punt prioritari. Això de ben segur limitarà les opcions de dotar el model d'una superfície alar extensa per assolir el vol. Per tant d'entrada s'hauria de procurar anar a buscar el major impuls possible. Això deixaria gairebé del tot fora la categoria de planejadors no motoritzats. No obstant aquesta última possibilitat no haurà de quedar oblidada en possibles treballs futurs, ja que ofereix un alt atractiu pel que fa el baix cost.

D'aquesta manera es conclou que la via a seguir és l'obtenció d'un planejador motoritzat amb forma humanoide, de baix cost i de mitjanes prestacions. És ben clar que aquest objectiu requerirà d'un profund estudi aerodinàmic del cos volador, a més d'un mètode de motorització adequat. Caldrà doncs un repàs previ d'alguns conceptes aerodinàmics.

5. MECÀNICA DE FLUIDS

Ja que l'aeromodelisme pretén dominar un medi que no s'acostuma a percebre com a practicable, resulta interessant fer un repàs de què és el mateix, entendre què és l'aire i el concepte de fluid.

Per això hi ha tot un seguit de conceptes que s'inclouen a l'annex per tal de completar la comprensió dels següents: les forces aerodinàmiques, que són claus per iniciar tot el procés de disseny, i per tant s'inclouen a la memòria tot seguit.

6. FORCES AERODINAMIQUES

Hi ha quatre forces que governen el comportament d'un aeromodel a l'aire.

Aquestes són la força de sustentació L o FL , que haurà de vèncer el pes W , i la força de resistència D o FD , que no haurà de ser major que l'impuls que se li proporcioni al model P .

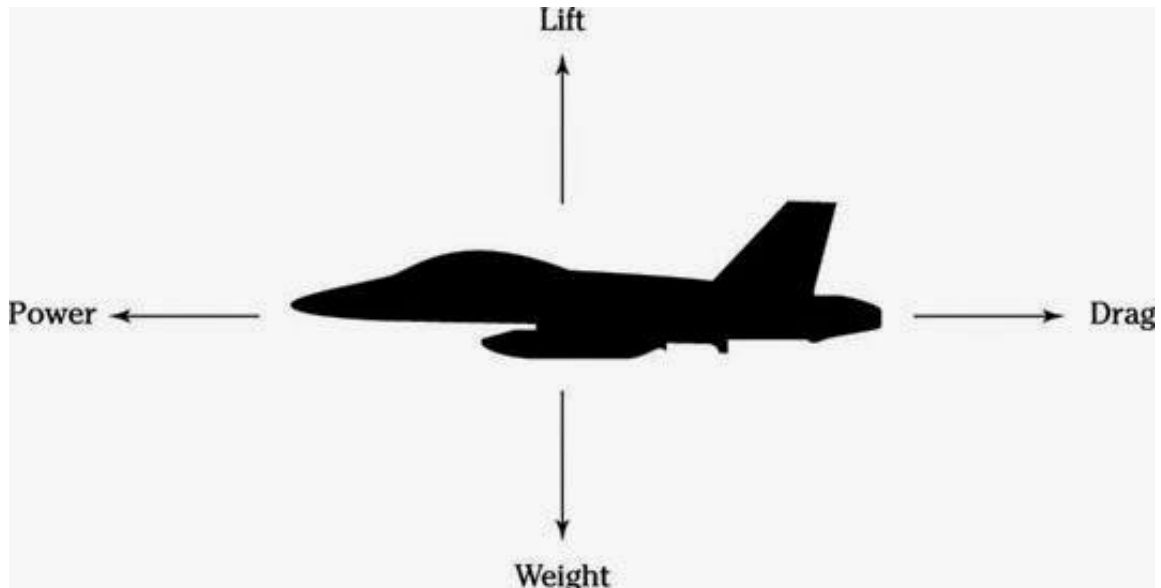


Fig. 6.1 Principals forces aerodinàmiques que actuen sobre un objecte volador

Abans però cal fer un repàs de la nomenclatura dels diferents elements característics d'un perfil aerodinàmic.

6.1. Nomenclatura dels perfils aerodinàmics

En tot perfil aerodinàmic existeix una vora per on entra la corrent de flux i una altra per on surt. La d'entrada s'anomena vora d'atac i la de sortida, vora de sortida. Quan el flux entra per la vora d'atac, es divideix en dues corrents. Una recorre la part inferior del perfil, anomenat intradós, i l'altra la superior, que pren el nom d'extradós. Tanmateix, aquest perfil té un gruix, la línia imaginària que va des de la vora d'atac fins a la de sortida dividint en parts iguals el gruix del perfil, s'anomena línia de curvatura. Per altra banda, la línia recta que uneix les dues vores del perfil s'anomena línia de corda, i serveix per determinar un altre paràmetre important dels perfils aerodinàmics. L'angle d'atac es defineix com l'angle que forma la línia de corda amb la direcció del corrent de flux que entra pel perfil. Com es veurà tot seguit, aquest angle influeix directament en la sustentació i la resistència. A més a més, en tot model aerodinàmic s'idealitza un punt on tenen lloc l'aplicació de les forces de resistència a l'avanç i de sustentació, que s'anomena centre de pressions. En la següent imatge es poden identificar tots els elements esmentats.

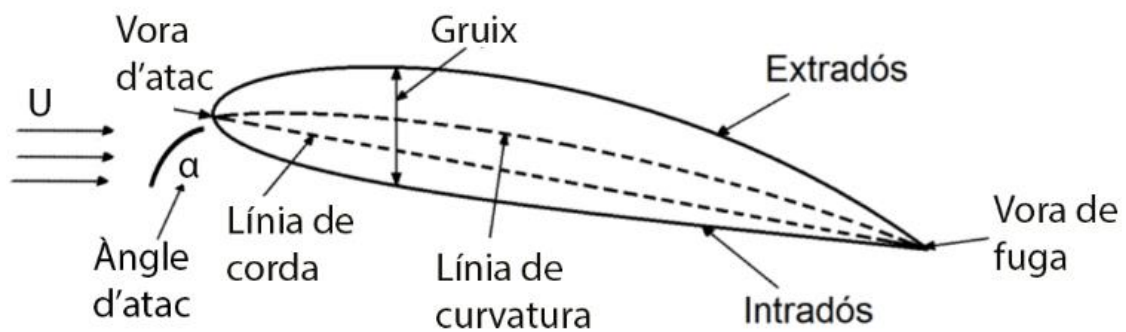


Fig. 6.2 Elements perfil aerodinàmic

També cap dir que en aerodinàmica sovint es treballa amb coeficients adimensionals per tal de poder comparar les prestacions de diferents models sense tenir en compte paràmetres dimensionals. Aquests són el coeficient de sustentació C_L (Lift en anglès) i el coeficient de resistència C_D (Drag en anglès).

6.2. Força de sustentació

La sustentació és una de les quatre forces principals de l'aerodinàmica i exerceix una component vertical sobre els cossos submergits en el flux. S'encarrega de contrarestar la força del pes i es bàsicament la força que permet volar a tot aeromodel.

Hi ha diverses formes de contribuir a l'aparició d'aquesta força perpendicular al corrent del flux i favorable, però al final el que convé es proporcionar-la causant el mínim de resistència possible.

En un perfil alar com el mostrat a la figura 6.2, el flux de corrent entra per la vora d'atac. La major curvatura presentada a l'extradós disminueix la secció de pas i – recordant el principi de conservació de la massa – obliga al flux a accelerar-se. Fent ús de l'equació de Bernoulli i suposant negligibles les variacions d'energia potencial, es conclou també que s'haurà de donar una depressió en aquella regió. En resum, disminueix la secció de pas, augmenta velocitat, i disminueix pressió. Mentrestant, l'intradós gairebé pla no causa cap variació de velocitats ni de pressions. Així es crea un gradient de pressió sobre el perfil alar i per tant una força de component vertical positiva, la sustentació. El punt on s'idealitza que apareix aquesta força s'anomena centre de pressions del perfil, i és molt important tenir-lo sempre present.

Si a més a més s'aplica un angle d'atac, es contribueix de forma activa a l'increment de la sustentació. Simplement, quan el flux de corrent topa amb la projecció vertical de l'intradós, es produeix el que s'anomenen punts d'estancament. La velocitat es redueix considerablement, i de nou amb Bernoulli a la mà, es produeix un augment de la pressió a l'intradós.

La combinació dels dos efectes anteriors augmenta encara més el gradient de pressions al llarg del gruix del perfil alar, de la sobrepressió de l'intradós a la depressió de l'extradós.

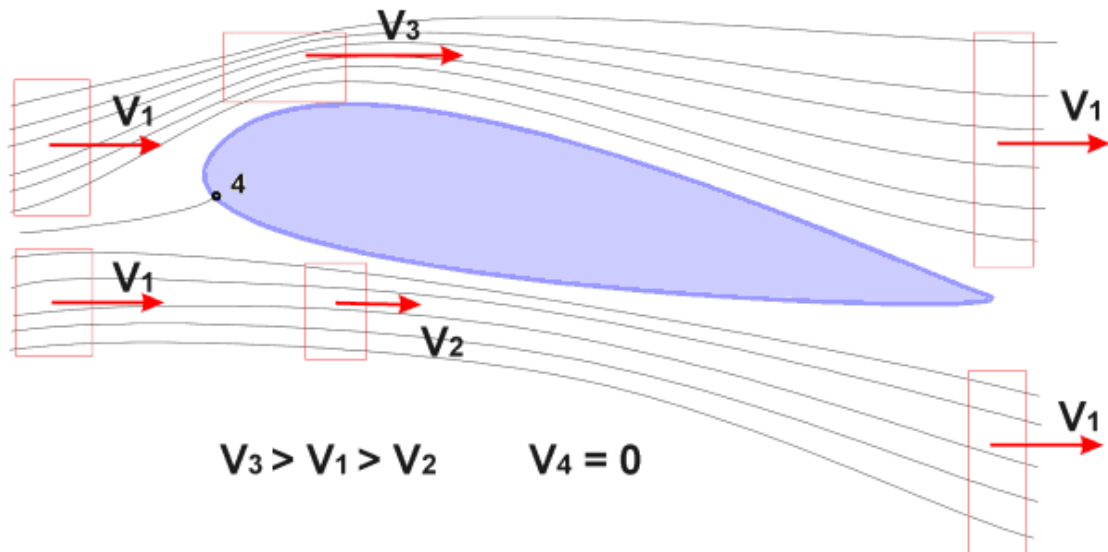


Fig. 6.3 Velocitat flux al voltant d'un perfil alar

En l'anterior imatge s'observa la variació de velocitats en les línies de corrent del flux. També destaca el punt d'estancament màxim al punt quatre, a la vora d'atac. Convé perfilar correctament la vora d'atac, doncs és el punt on es causa més resistència a l'avanç.

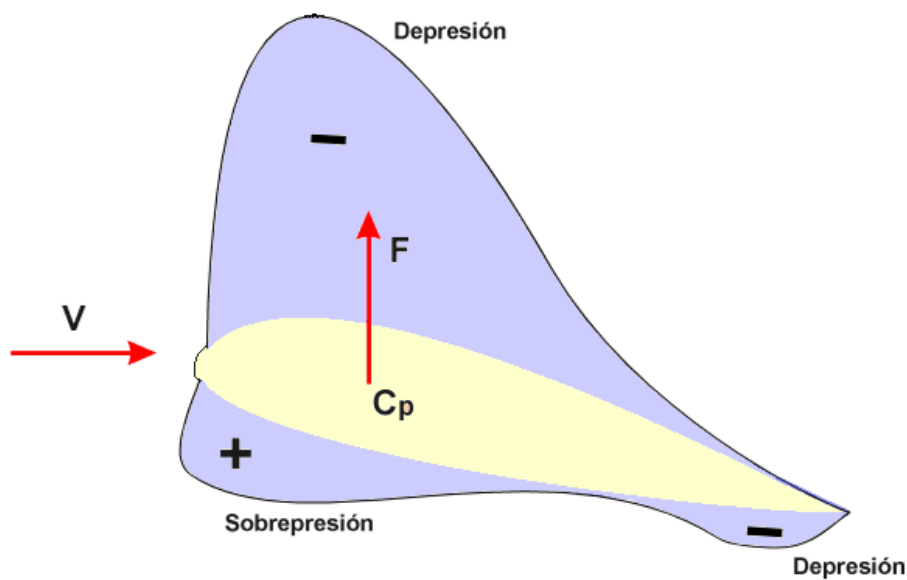


Fig. 6.4 Contorn de pressions sobre un perfil alar

Complementant la imatge de les velocitats, la il·lustració anterior indica com es produeixen les sobrepresions i depressions al voltant del perfil. La petita depressió a la sortida de l'intradós

es deu a una sobtada acceleració del flux en aquesta regió, després de revessar el punt màxim de la curvatura.

No obstant, l'angle d'atac també causarà proporcionalment una gran component de resistència a l'avanç, pel que es descriu un angle d'atac crític en el que un perfil alar deixa de ser eficient. De la mateixa manera, un angle d'atac massa pronunciat també provocaria un canvi de direcció radical del flux, afavorint així el desprendiment de la capa límit al llarg de l'extradós, que com s'especifica a l'annex podria causar l'entrada en pèrdua del model.

El següent gràfic resulta útil per il·lustrar el fenomen de l'eficiència durant l'augment d'un angle d'atac.

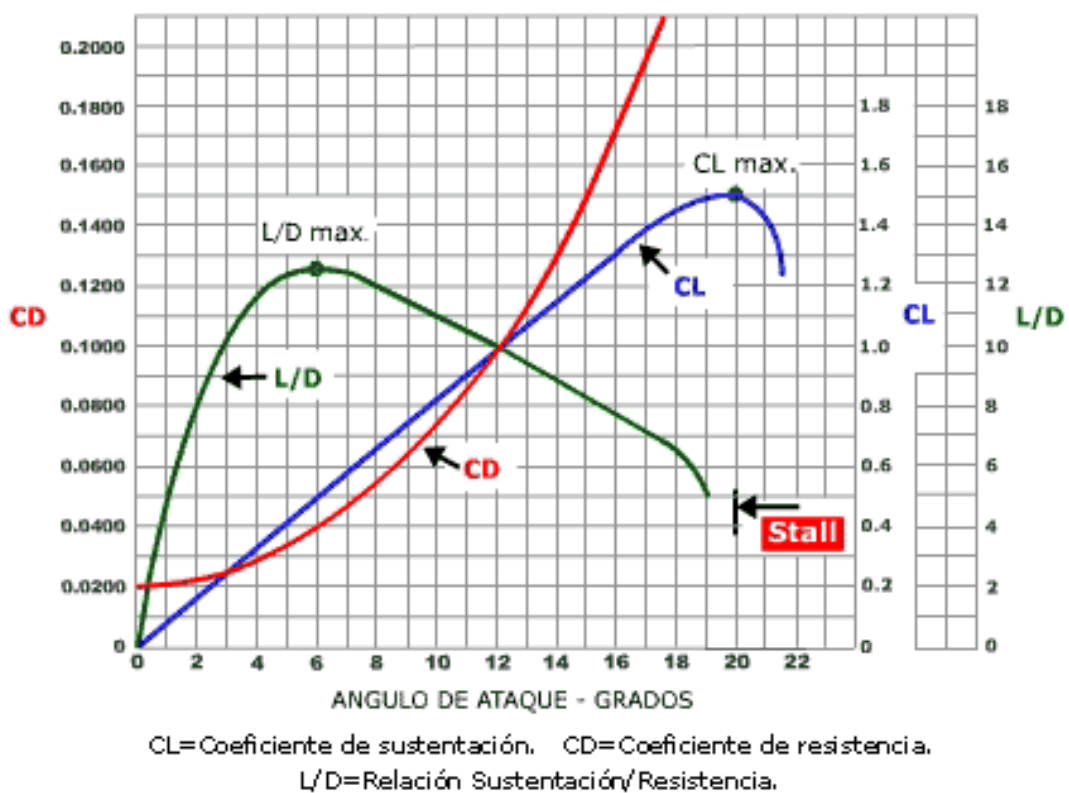


Fig. 6.5 Gràfica per obtenir coeficients aerodinàmics segons l'angle d'atac d'un perfil alar.

Es pot observar que en general l'angle de màxima eficiència es situa entre el cinc i els set graus, tot i que això també depèn en bona mesura del tipus de perfil i d'aeromodel que s'estigui tractant.

Per tant, el càlcul de la força de sustentació depèn de diversos paràmetres, com es pot observar en la següent equació.

$$FL = CL \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2 \cdot S$$

Eq. 6.1 Força de sustentació

Essent FL la força de sustentació, aquesta depèn directament de la densitat del fluid ρ , el quadrat de la velocitat del flux U , la superfície S , i del coeficient adimensional CL . Aquest últim depèn de la forma del perfil sotmès al flux i el seu angle d'atac, i normalment es pot aproximar el seu valor fent ús de gràfics com l'anterior.

La força de sustentació en un aeromodel haurà de ser com a mínim superior al seu pes.

$$FL > m \cdot g$$

Eq. 6.2 Força de sustentació superior al pes del volador

6.3. Força de resistència.

La força de resistència es defineix com aquella que s'oposa al avanç del cos. En aeromodels potents i sobradament propulsats resulta més fàcil contrarestar l'aparició d'aquesta component. En models més modestos i que usin el mínim d'impuls necessari, és un problema al que s'ha de parar molta atenció, doncs podria comportar un decrement tant important de la velocitat que perjudicaria a la força de sustentació – proporcional al seu quadrat – fins el punt d'impossibilitar el vol.

Hi ha diversos tipus de resistència sobre cossos submergits en fluxos, i de la suma de totes elles en resulta la resistència total.

En concret n'hi ha tres. En un aeromodel es poden observar les anomenades resistències per fricció, que tenen lloc en qualsevol cos submergit en un flux que s'oposi al seu moviment, les resistències de pressió, fortament relacionades amb el perfil aerodinàmic del cos, i finalment les resistències induïdes.

Les resistències per fricció depenen de l'àrea total del cos submergida en el flux, mentre que les de pressió es relacionen en general amb les projeccions de les superfícies perpendiculars a l'avanç del flux. Per tant és fàcil suposar que, com que la força de sustentació també depèn de paràmetres superficials, aquestes dues components quedaran relacionades d'alguna manera, com ja s'apuntava al mostrar la figura 6.5. De fet, inclús hi ha expressions matemàtiques per relacionar tots dos coeficients.

$$C_D = \frac{C_L^2}{\pi \cdot A \cdot e}$$

Eq. 6.3 Relació entre el coeficient de resistència a l'avanç i el coeficient de sustentació.

On A és un coeficient que relaciona la longitud total d'una ala entre la seva corda alar i e és un coeficient adimensional entre zero i u que depèn de la superfície en planta de l'ala.

Per tant en general el coeficient de resistència a l'avanç total serà la suma del causat per fricció i el causat per pressió, i la força de resistència a l'avanç es calcularà a partir del coeficient total de resistència a l'avanç.

$$C_D = C_{D_{fricció}} + C_{D_{pressió}}$$

$$C_D = \frac{F_{D_{total}}/A}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2} = \frac{F_{D_{fricció}}/A}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2} + \frac{F_{D_{pressió}}/A}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot U^2}$$

Eq. 6.4 Composició del coeficient de resistència i força de resistència a l'avanç.

La força d'arrossegament o resistència FD depèn de nou directament del paràmetre adimensional CD, que depèn de la forma i superfície del cos. La velocitat al quadrat torna a ser directament proporcional, així com la densitat del fluid d'estudi.

Per exemple, un cos no aerodinàmic submergit en un flux podria comportar-se de les següents maneres.

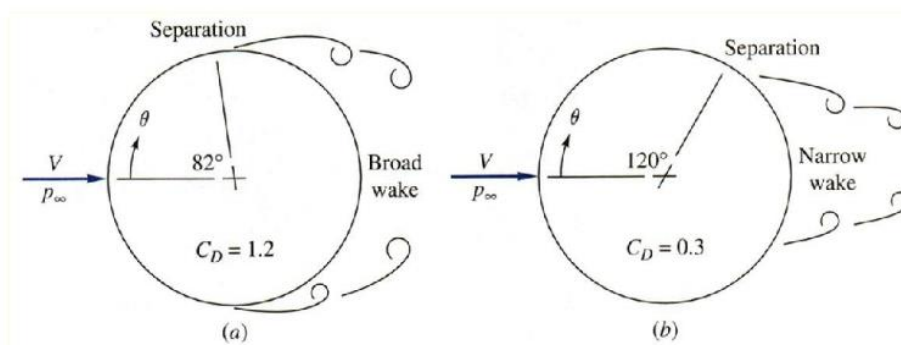


Fig. 6.6 Despreniment capa límit segons flux laminar a l'esquerra o turbulent a la dreta.

En totes dues figures la capa límit es desprèn a causa del perfil no aerodinàmic i provoca l'efecte de l'estela. No obstant, a la figura de l'esquerra es tracta d'un flux laminar, que es desprèn als 82° , i a la dreta el flux turbulent - amb un gradient de velocitats a la capa límit més robust-, posposa el despreniment fins als 120° . Això implica que en el perfil de la dreta hi hagi un elevat coeficient de resistència, de 1'2, i en el de l'esquerra es redueixi fins a 4 vegades menys, de 0'3. Tot això pel que fa a la resistència per pressions, ja que, en canvi, probablement un flux turbulent provoqui resistències per fricció més elevades que en un de laminar.

En qualsevol cas, el coeficient de pressió domina sobre el de fricció, i per tant les diferències resulten significatives segons el perfil aerodinàmic, i per tant s'hi haurà de parar atenció.

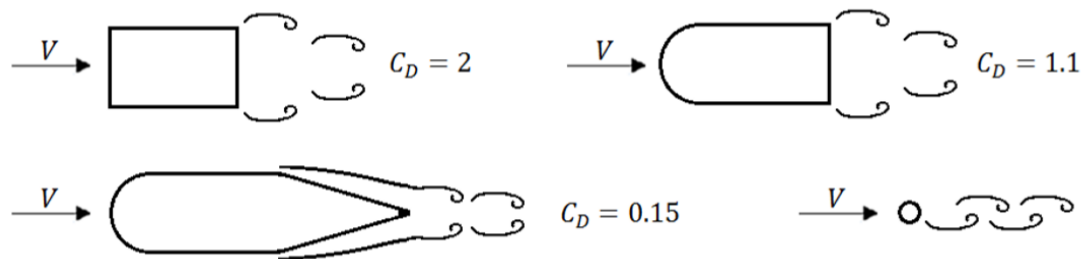


Fig. 6.7 Aparició de l'estela segons els perfils aerodinàmics

Tot i que en les imatges anteriors els perfils aerodinàmics augmenten la superfície de contacte amb el flux i per tant també el coeficient per fricció, la reducció de l'estela disminueix enormement el coeficient total de resistència.

Per últim, les resistències induïdes són aquelles que es formen a causa de l'aparició de remolins o vòrtex als extrems dels perfils aerodinàmics.

Abans s'ha explicat com es reparteixen les línies del corrent del flux entre l'extradós i l'intradós en un perfil alar. Es produeix així un gradient de pressions que afavoreix la sustentació. No obstant, aquest fenomen produeix una succió a l'extrem de l'ala – el flux es mou de la zona de més pressió a la de menys – com es pot observar tot seguit.

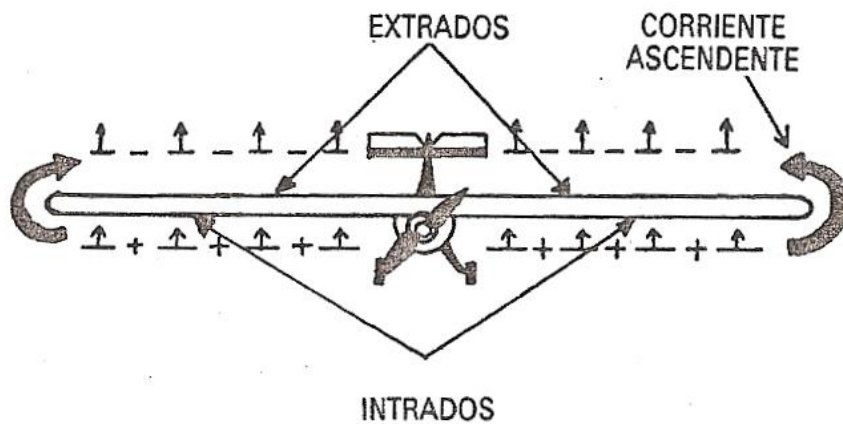


Fig. 6.8 Fenomen de succió del flux, de l'intradós al extradós

Si a aquestes línies de corrents s'hi afegeixen les que recorren normalment la superfície de l'extradós, apareix el que s'anomena remolí a la punta de l'ala. En la següent imatge es pot veure com la suma dels dos factors produeix el remolí.

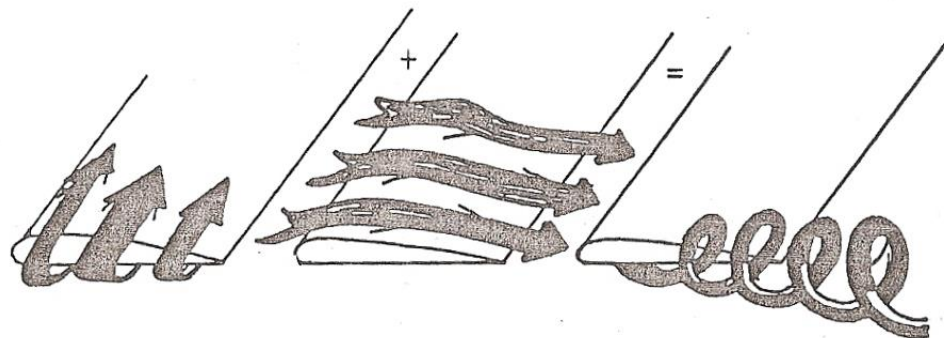


Fig. 6.9 Efecte del remolí a la punta d'ala

El remolí és, bàsicament, una altra estela que apareix en aquesta zona de l'aeromodel. Com ja s'ha dit les esteles causen diferències de pressions no desitjades i per tant augmenten les resistències induïdes. No convé que en els aeromodels es formin grans remolins.

Una manera de disminuir aquest efecte és afegint petits murs a la punta de l'ala, anomenats winglets. En definitiva aquests eviten que les dues corrents col·lisionin directament, i el remolí resultant és de menor magnitud. En la següent imatge s'il·lustra la diferència entre una ala amb winglet i una sense.

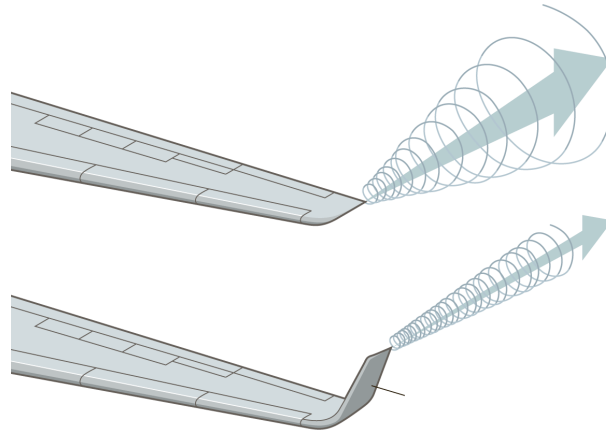


Fig. 6.10 Disminució del remolí a la punta d'ala

Tot i que per velocitats baixes no és un fenomen molt rellevant, es podria arribar a tenir en compte en el cas que l'estabilitat de l'aeromodel falli sense causa aparent i un cop s'hagin revisat els punts anteriors d'aquest apartat d'estabilitat en el vol.

6.4. L'estabilitat en el vol

En aquest punt cal explicar com funcionen tots els conceptes anteriors en casos més pràctics i concrets. En l'aeromodelisme, l'aire és el flux, i sempre és extern. A més el cas d'estudi es tracta d'un aeromodel que pretén obtenir una sustentació positiva amb el mínim de perturbacions possibles. Per tot això s'ha d'estudiar com equilibrar les forces de l'aerodinàmica durant un vol i com controlar tots els altres factors que s'han anat explicant.

Un cos suspès a l'aire no té cap moviment restringit. Pot moure's al llarg dels tres eixos i també girar-ne al voltant, com s'observa a la següent il·lustració.

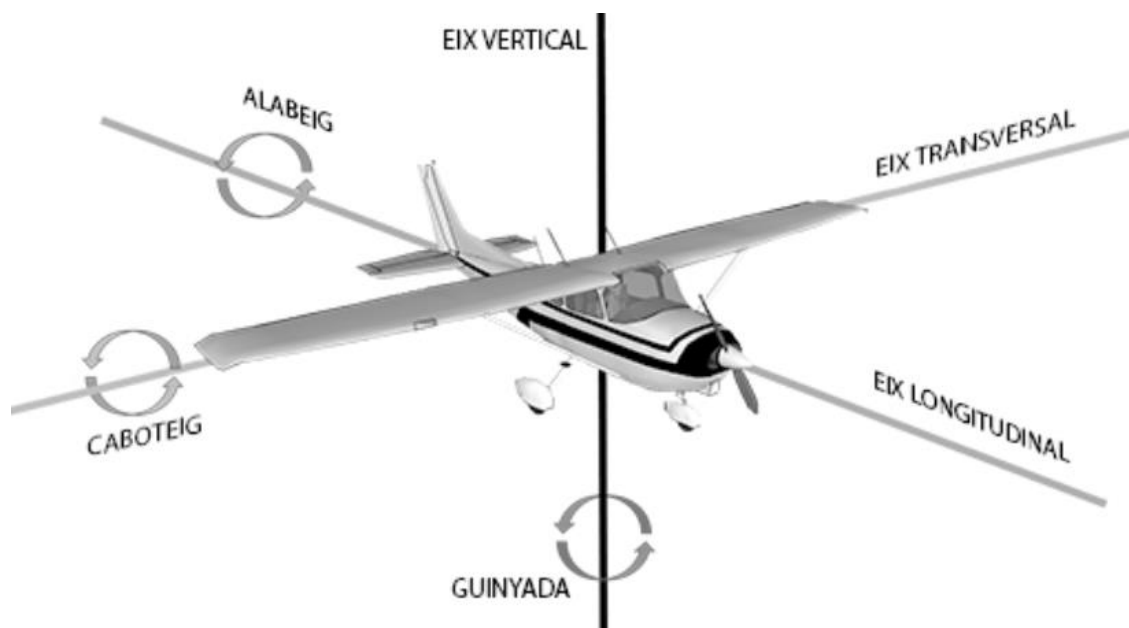


Fig. 6.11 moviments al voltant dels tres eixos d'un volador

En la imatge anterior s'observen aquest tres possibles girs d'un aeromodel a l'aire. Anteriorment ja s'ha parlat del centre de pressions. Aquest és el punt per on han de passar els tres eixos i per tant al voltant del qual es produiran aquests moviments. A continuació es detalla què causa aquests moviments i com controlar-los en un aeromodel.

Abans de continuar, és convenient explicar que es pot aproximar la posició del centre de pressions segons el tipus d'ala que usi l'aeromodel. En totes elles se situarà a entre el 25% i 30% d'una corda alar mitjana que varia segons el tipus com es mostra tot seguit.

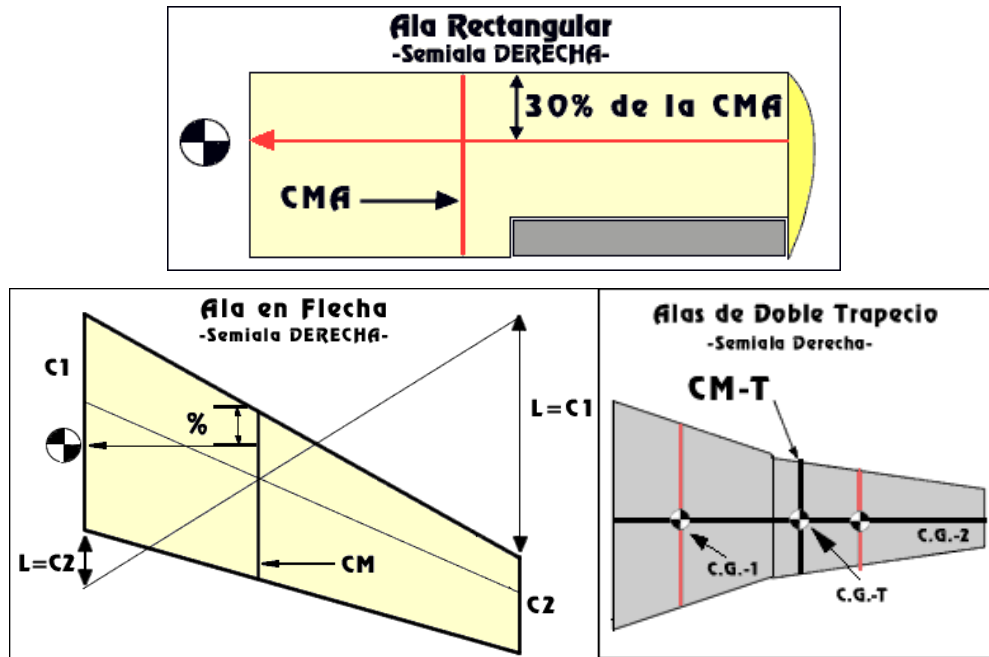


Fig. 6.12 Centre de pressions segons el perfil alar

6.4.1. Control del caboteig

Es comença per un dels moviments que afectarien més a la correcta execució d'un vol. Aquest és el caboteig, i es descriu com el moviment que gira al voltant de l'eix transversal del model, produint així l'orientació cap a baix o cap a dalt del seu morro. És important perquè determina si l'aeromodel realitza un vol cap a baix o cap a dalt, ja que influeix directament l'angle d'atac. D'aquesta manera pot arribar a produir un angle d'atac crític o arribar a anul·lar-lo. En el primer cas s'encabrita i en segon cas es pica.

Per tal d'evitar que l'aeromodel es piqui o s'encabriti, s'hauran de fer coincidir el seu centre de gravetat amb el centre de pressions. El centre de pressions és variable i diferent per cada aeromodel, podent-lo desplaçar cap enrere de l'eix longitudinal si es disminueix la velocitat, o cap endavant quan s'augmenta. No obstant, si pel tipus d'aeromodel no hi ha possibilitat de regular la velocitat durant el vol, o la variació és petita, s'hauran de fer coincidir des de l'inici. En la següent imatge s'observa el fenomen.

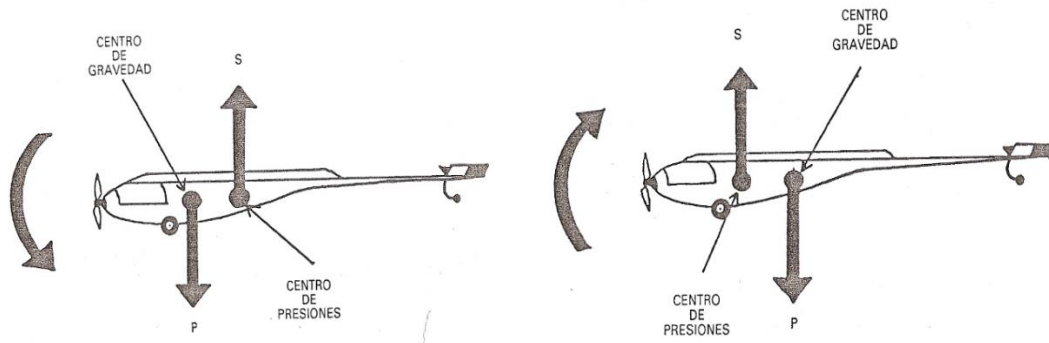


Fig. 6.13 Moment causat pel centre de pressions i de masses desfasats

En les il·lustracions anteriors s'observa el moment que produeix cadascuna de les dues situacions. Si el centre de gravetat està per davant del centre de pressions, imatge de l'esquerra, l'aeromodel tendirà a caure en picat i per tant descendir, amb més o menys contundència segons la separació entre els dos punts.

En el dibuix de la dreta, el centre de pressions queda per davant del centre de gravetat i el morro de l'aeromodel s'orienta cap a dalt. En aquest cas l'angle d'atac augmenta. Mentre no s'arribi a l'angle d'atac crític, el volador guanya alçada, però en cas que aquest s'assoleixi, primer agafarà alçada però després entrarà en pèrdua. Això significa que la capa límit es desprèn, i automàticament perd la sustentació. L'aeromodel cau, i si té temps d'estabilitzar-se, recuperarà la seva posició de vol per tornar a guanyar alçada, encabritar-se i entrar en pèrdua de nou. En un vol de prou alçada, es podria observar aquesta situació continuadament fins a arribar a terra.

L'estabilitat neutra de l'eix transversal s'aconsegueix doncs fent coincidir el centre de gravetat i el de pressions. En alguns aeromodels es fa ús de la cua per compensar aquest moment com es mostra a continuació.

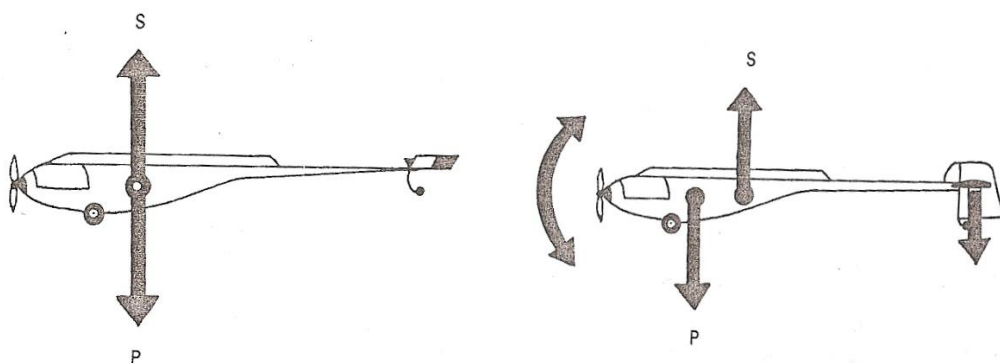


Fig. 6.14 Centre de masses i de pressions coincidents a l'esquerra, i compensats per la cua a la dreta.

En qualsevol cas, queda clar que aquests dos punt són claus en qualsevol aeromodel i s'haurà de parar especial atenció per situar-los correctament.

6.4.2. Control de l'alabeig.

L'alabeig és el moment al voltant de l'eix longitudinal de l'aeromodel que pot afectar la seva estabilitat lateral. Si aquesta és veu pertorbada, l'aeromodel tendirà a perdre sustentació i a més a més desplaçar-se cap el costat que el dugui el moment.

Per començar, el més important per evitar aquest desequilibri és que l'aeromodel reparteixi la seva massa de forma simètrica respecte el seu pla eix vertical – eix longitudinal, és a dir, situar el seu centre de gravetat en aquest pla. Com es veu en la imatge següent.

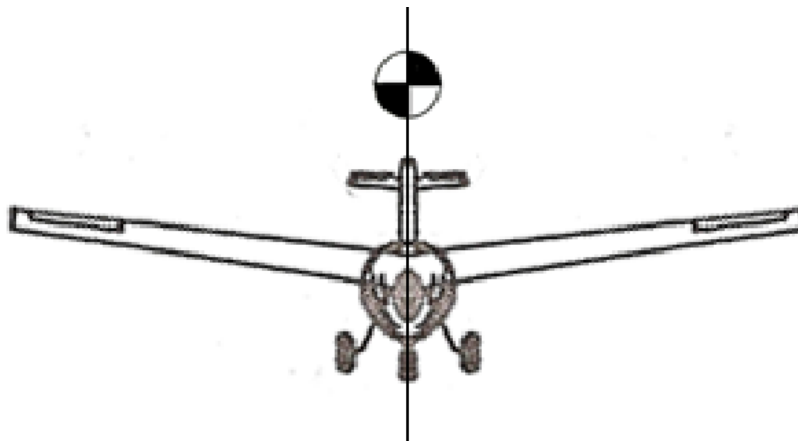
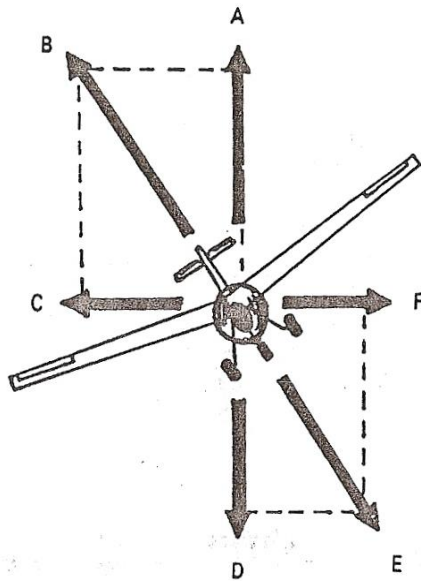


Fig. 6.15 Centre de masses situat sobre el pla de simetria de l'aeromodel

No obstant, malgrat posicionar correctament el centre de gravetat, aquest moviment es pot donar per altres causes. Per exemple, una petita brisa podria arribar a produir alabeig. De fet, en els aeromodels completament controlables, és una de les formes que s'utilitzen per dirigir el volador. Si aquest moviment no es massa exagerat, no perjudica l'estabilitat i simplement el model girarà cap el costat. Això és degut a que, al girar, apareix una força centrífuga que compensa la resta de components com es mostra a la il·lustració següent.



- A= component vertical de la sustentació.
- B= Component resultant de la sustentació, suma vectorial de A i C.
- C= component horitzontal de la sustentació.
- D= Gravetat o pes real.
- E= pes aparent, suma vectorial de D i F.
- F= Força centrífuga.

Fig. 6.16 Components desglossades de les forces aerodinàmiques

Tot i això, és possible que l'aeromodel sigui un planejador simple i no tingui cap mecanisme de control per recuperar la posició neutra. En aquest cas és millor prevenir aquesta situació fent ús de la geometria en forma de "V" de les ales. D'aquesta manera, la projecció horitzontal de cada una d'elles s'encarregaria de compensar el desequilibri, oferint major superfície i per tant major sustentació. En la següent il·lustració es detalla aquest fenomen.

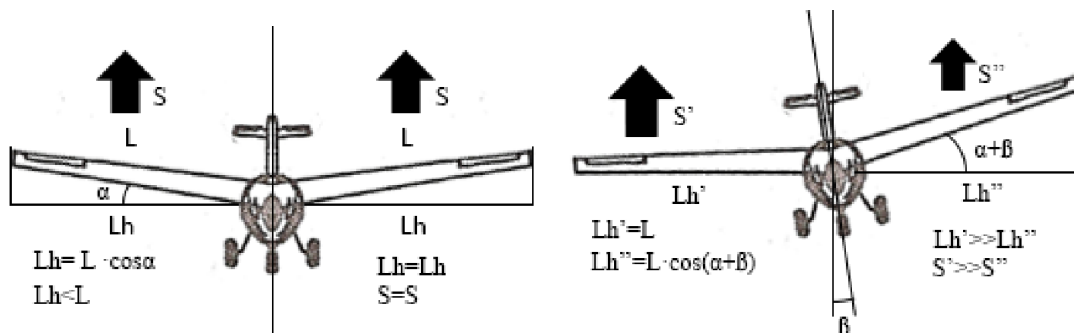


Fig. 6.17 Efecte de les ales en forma de V, projecció horitzontal

En la imatge de la dreta es pot veure que, un cop produït el desequilibri, el costat afectat projecta major superfície horitzontal que l'altre. Com que la sustentació és directament proporcional a la superfície, es produeix una diferència entre les dues ales, i el model torna a la posició neutre tot sol. Per tant és convenient fer ús d'aquesta geometria en els planejadors. No obstant tampoc

és bo abusar-ne, doncs com més angle se li doni a les ales més component horitzontal es perd per a sustentar.

Si l'estabilitat respecte l'eix longitudinal no està ben resolta, pot dur a l'aeromodel a situacions com la barrina. Aquesta té lloc quan una de les ales entra en pèrdua mantinguda, de manera que augmenta la seva resistència a l'avanç i disminueix la velocitat. Per altra banda, l'altra ala manté la sustentació i la velocitat. Així es produeix una caiguda rotacional com es mostra tot seguit.

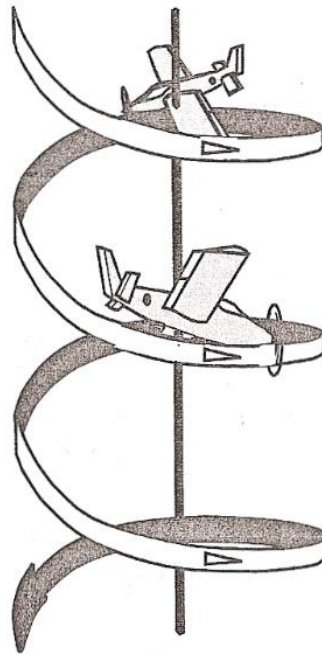


Fig. 6.18 Representació de la caiguda en barrina

Per tant queda clar que l'estabilitat en l'eix longitudinal també serà un dels punts a parar atenció per aconseguir un vol correcte.

6.4.3. Control de la guinyada

La guinyada és el moviment causat pel moment de l'eix vertical de l'aeromodel. De tots tres és el menys nociu per l'estabilitat del vol. Bàsicament produiria el viratge del volador cap a algun costat, seria una altra forma de girar.

Aquest moviment tindria lloc quan una de les dues ales – o costats de l'aeromodel – ofereix més resistència que l'altre. Això provocaria un moment respecte l'eix vertical com s'observa en la següent il·lustració.

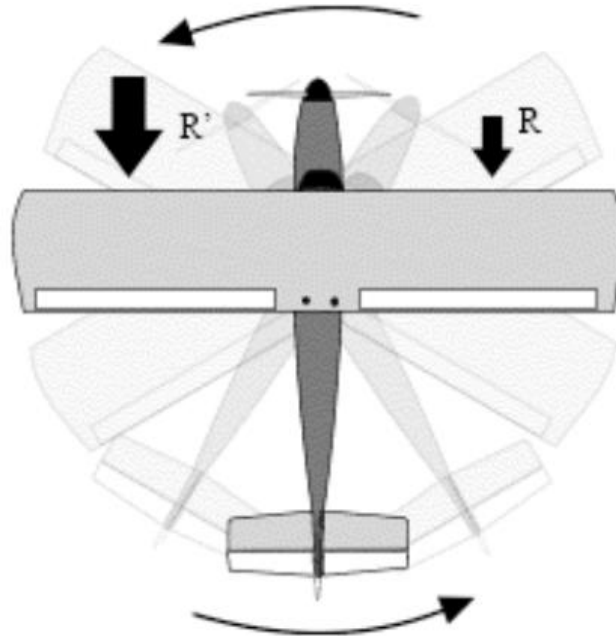


Fig. 6.19 Representació del moment de guinyada d'un aeromodel

Aquest moviment es pot controlar mitjançant flaps – elements de les ales que n'incrementen la resistència a l'avanç -. No obstant la presència dels mateixos sol comportar una alta complexitat de l'aeromodel i consegüentment l'augment de preu i prestacions.

En planejadors modestos la guinyada no serà un moviment que es pugui controlar a voluntat durant el vol, però tampoc suposarà un greu problema si se succeeix. De fet, dotar de major resistència una meitat de l'aeromodel que a l'altra, podria ser una forma d'aconseguir vols circulars no radiocontrolats.

7. MEMORIA TECNICA

7.1. Estratègia

Fins a aquest punt s'han especificat les prestacions de l'aeromodel de joguina que es pretén dissenyar. El seu perfil d'usuari, preu i prestacions està acotat, així com el tipus de vol i resultats que se n'esperen. Després s'ha parlat de conceptes de la mecànica de fluids i d'aerodinàmica. Si es contraposen aquestes dues primeres parts de la memòria, es fàcil adonar-se'n, com de fet ja es podia suposar – per això els avions no tenen forma d'home -, que alguns requeriments esmentats sobre el disseny del volador entrarien en contradicció directe amb un disseny ideal seguint conceptes solament aerodinàmics.

El conflicte doncs és clar. Trobar l'equilibri en aconseguir dotar l'aeromodel de forma humanoide però que segueixi complint amb les funcionalitats d'un planejador motoritzat serà la clau d'aquest projecte. Per assolir la fita s'hauran d'establir prioritats, que podran commutar al llarg del procés de disseny, basat en un sistema “prova i error”, que a partir d'ara es detallarà. Aquestes prioritats en ordre de major importància al iniciar el disseny seran:

- L'aeromodel s'haurà de dotar de forma humanoide amb la màxima fidelitat possible. Es buscarà aconseguir el que altres models presents en el mercat de la joguina no hagin pogut, presentant així un model únic i innovador.
- L'aeromodel haurà de ser capaç de sustentar per ell mateix el seu propi pes i ser estable a l'aire, aconseguint així una prestació de vol mínimament acceptable.
- Per tal d'assolir les dues fites anteriors, les més importants, es mirarà de fer un disseny que minimitzi el pes del model. De la mateixa manera, s'haurà de disposar de certa potència.
- El disseny, sense perjudicar la forma humana, també haurà de disposar d'una superfície per sustentar , que sinó serà compensat pel seu baix pes.
- El disseny, sense perjudicar la forma humana, haurà d'oferir una mínima resistència a l'avanç, que sinó serà compensada per la potència.

Per tant, es començarà per un disseny íntegrament enfocat a la forma d'un humanoide volador, que s'anirà perfilant segons el resultat que se n'obtinguin. Aquet procés es explicat a continuació.

7.2. Procediment

Ja que es tracta de resoldre un problema que a l'inici no se sap cap on pot derivar, l'estratègia per a resoldre'l es basarà en la prova i error de diversos models consecutius que pretendran aprendre de l'anterior, per així anar millorant fins obtenir el model definitiu. Evidentment cada una d'aquestes proves seran fonamentades segons el que s'ha explicat anteriorment a la memòria, a més que es valdran d'eines de l'àmbit de l'enginyeria per tal d'avançar amb rigor i seguretat.

Per tant, s'establirà un procediment per a cada prova o model, que constarà de diverses fases estandarditzades per tal de comparar i valorar els avenços. Aquestes fases seran el disseny del model en CAD (Computer Aided Design), la simulació amb mètodes CFD (Computational Fluid Dynamics) i l'anàlisi de resultats, i finalment la valoració del model i determinació dels següents passos a seguir.

Aquest procediment haurà de dinàmic per tal d'arribar a un resultat acceptable sense massa demora. Un cop s'hi hagi arribat, es durà a terme un procés diferent de l'estandarditzat i una mica més acurat, tal i com s'explicarà més endavant.

7.2.1. Modelització en CAD

Durant tot el projecte es farà ús del software Siemens NX 10.0 ©. Els seus recursos de modelat síncron i la seva versatilitat permetran el desenvolupament fluid de tots els models i dissenys.

Per exemple, eines de modelat lliure com el *Realize Shape* seran molt útils al principi per simular els contorns propis d'una figura humana amb força fidelitat, o la creació de superfícies a partir de nodes i corbes guia permetran també la modelització fidel d'esquemes prèviament planificats.

Un cop finalitzat cada model s'haurà de tenir en compte una particularitat del simulador CFD abans d'exportar l'arxiu. El simulador treballarà amb la zona de corrent del flux, i per tant del que en realitat se servirà és d'un volum de control al voltant de la figura. S'ha d'exportar aquest volum de control fent ús del negatiu del cos creat. Les mides d'aquest volum de control seran part de l'estandardització del procediment, com es veu a continuació.

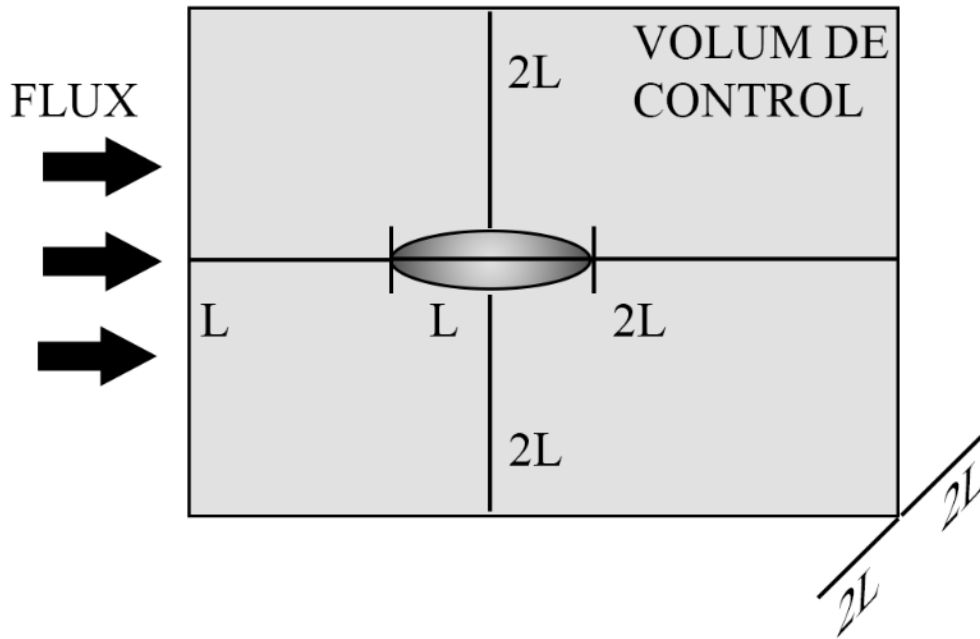


Fig. 7.1 Esquema del volum de control en els models CAD

Essent un cos de longitud L segons la direcció del flux, es recomana establir un volum de control de les mides mostrades a la il·lustració anterior. D'aquesta manera es dona prou espai per considerar que el cos no afecta al flux als extrems de cada una de les cares del volum de control.

A més a més, entenent que qualsevol model que es pretengui simular i sigui susceptible de realitzar un vol haurà de ser simètric respecte el seu pla lateral – per les condicions d'estabilitat repassades en els punts 6.4.2 d'aquesta memòria-, es podrà prescindir d'una de les meitats respecte el pla esmentat, doncs l'estudi es podrà extrapolar al cos sencer. Després hi haurà prou en definir aquella cara del volum de control com a simètrica, i d'aquesta manera es faciliten considerablement els càlculs en la simulació posterior.

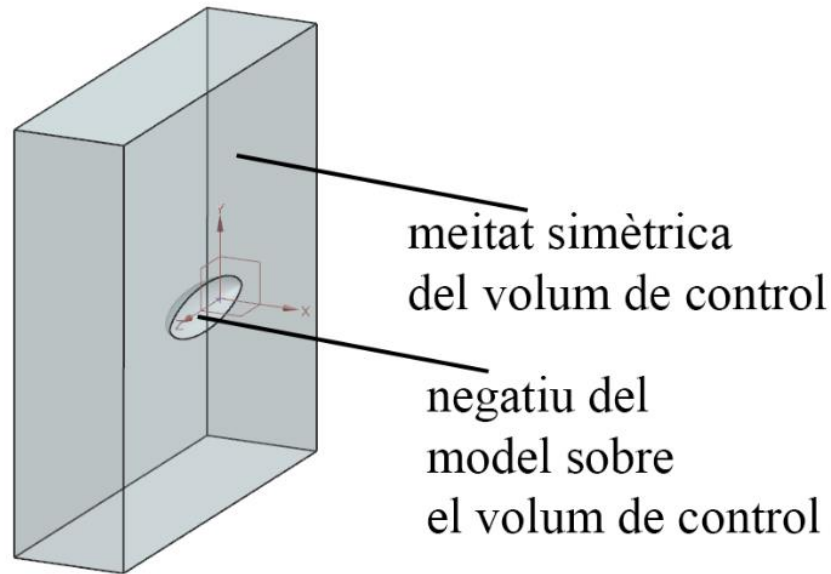


Fig. 7.2 Pla de simetria en el volum de control

En acabat, s'haurà d'exportar l'arxiu en un format de 3D neutre per a que el simulador sigui capaç de processar-lo. En aquest cas es tractarà de l'extensió IGES, un format paramètric de models 3D àmpliament utilitzat en diversos àmbits.

7.2.2. Simulació i ús de la dinàmica computacional de fluids

Un cop es disposa de la geometria del cos es pot procedir a la simulació. No obstant, en aquest punt cal un parèntesi per tal d'entendre de què es tracta aquesta nova fase d'estudi.

La simulació se servirà de la Dinàmica Computacional de Fluids (CDF) fent ús del programa Ansys Fluent©. Aquesta és la branca de la mecànica de fluids que se serveix de mètodes numèrics i algorismes per tal de solucionar i analitzar problemes relacionats amb els fluxos. En un inici va ser un software pensat i dissenyat per complementar i completar estudis en túnels de vent. En aquest túnels se sotmetia cossos a grans corrents de flux tancat per tal d'estudiar-ne les reaccions i el comportament. Bàsicament, aquest programa aconsegueix fer una modelització semblant sense haver de fer ús de tota la infraestructura pertinent, que resulta cara i complexa.

Aquests programes es serveixen de mètodes numèrics que, en gairebé tots ells, es basen en les equacions bàsiques de Navier-Stokes que defineixen el comportament de qualsevol fluid.

Aquestes equacions poden ser simplificades, o no, en el programa, fent més inca peu en propietats com la viscositat, compressibilitat o d'altres segons la complexitat d'estudi que es desitgi per part de l'usuari.

Una part important d'aquest procés de simulació rau en la creació de la malla sobre el volum de control, que el divideix en petits elements connectats per nodes. Una bona malla condicionarà la fiabilitat dels resultats posterior, ja que la solució es calcula per a cada node i després s'extrapola als diferents punts dins l'element. Per aquest motiu, una malla més precisa i detallada donarà lloc a una simulació més fiable. No obstant això entra en detriment amb el temps de càlcul de la simulació, que pot arribar a ser realment llarg i tediós. Per tant s'haurà de mirar de crear malles que trobin l'equilibri entre la seva complexitat i la facilitat de la posterior simulació, concentrant-se en element més detallats de la geometria o més importants, i essent més genèrica en d'altres de menys rellevància.

Un cop obtinguda la malla correcta, es procedeix a la definició de les condicions de contorn de l'estudi i el tipus de simulació. En aquesta fase es resolen les equacions pròpies de la dinàmica de fluids pertinents segons les condicions de l'usuari. La solució comença amb un valor inicial per cada node de la malla, de manera que s'aniran calculant els valors posteriors iniciant així un procés iteratiu. En cada moment també es calcularà la diferència amb el resultat anterior del node. Aquesta diferència s'anomenarà residu, i quan la seva variació per cada iteració esdevé prou petita, es considera que la solució ha convergit i es dona per acabada la iteració.

Finalment, amb la solució convergida, es poden observar diferents resultats a diferents nivells. Per exemple, es poden observar els vectors de velocitat del flux al voltant del cos o el contorn de pressions, desvelant així on tenen lloc les zones de sobrepressió i depressió. El software també donarà valors importants com els coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç, així com directament les dues forces respectives.

L'anàlisi adequat de tota la informació sobre el model que proporcioni el simulador haurà de dur a la creació d'un nou de nou i millorat, fins a culminar el procediment de prova i error, donant amb el model definitiu.

7.2.3. Creació de la malla

La creació de la malla en tots els models previs al definitiu serà estandarditzada i de resolució mitjana, a no ser que el càlcul de la solució requereixi un tractament diferent. Aquest procés de confecció es detalla a continuació.

Com ja s'ha comentat en apartats anteriors, l'elaboració de la geometria s'ha de simplificar el màxim possible, important només la meitat del volum del control respecte el seu pla de simetria. A més a més, sempre cal tenir en compte que una geometria més suau, amb menys vèrtexs i amb menys canvis de curvatura bruscos, facilitarà la creació de la malla i la posterior convergència de resultats. A més a més permetrà treballar amb una malla amb menys elements, que com també s'ha dit suposa un decrement els temps de càlcul posteriors.

Tenint en compte totes aquestes consideracions, es pot procedir al mallat, establint primerament algunes condicions pel volum de control. A cada una de les sis cares del volum de control, així com a totes les cares que conformen el negatiu del cos, se'ls donarà una nomenclatura que indicarà posteriorment el seu paper en la simulació, així com també ajudarà a la seva identificació en tots els passos. Les diferents opcions que s'atorguen a cada cara són:

- Inlet: s'anomenarà així a la cara d'entrada perpendicular a les línies de corrent del flux.
- Outlet: tanmateix, aquesta serà la cara de sortida de les línies de corrent del flux.
- Symmetric: aquesta serà la cara de simetria del volum de control, la que talla el cos en dues meitats iguals.
- Body: s'anomenaran així totes les cares pertanyents al negatiu del cos d'estudi.
- Free: les tres cares restants del volum de control hauran de ser lliures i s'anomenaran així.

Un cop definides totes les cares, es procedirà amb un mallat genèric del volum de control sencer. Com que en aquest cas no es busca una malla refinada, hi haurà prou amb un dimensionament de l'element de 0'4 metres, tal i com es pot veure en la captura extreta directament del programa.

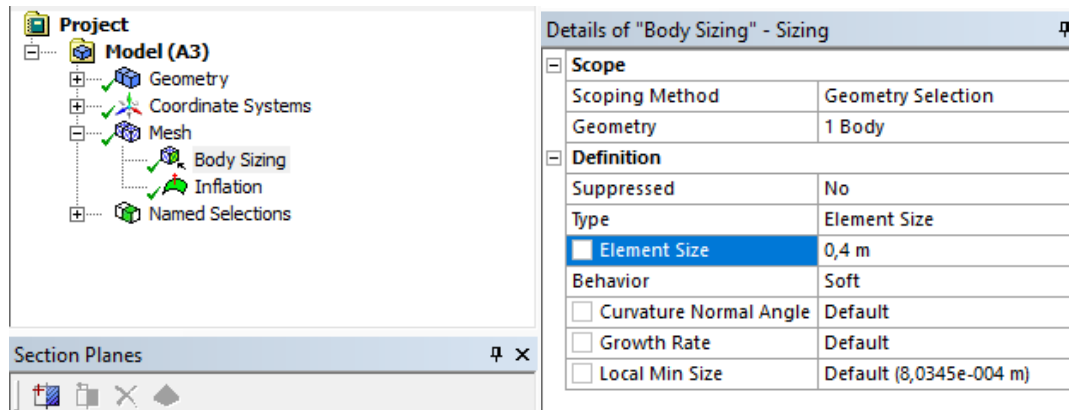


Fig. 7.3 Malla estàndard, dimensionament pels models

A més a més, ocasionalment es pot aplicar un refinament de malla al voltant de les cares del negatiu del cos per tal de precisar una mica més. En aquest cas s'han de triar opcions com el gruix de la primera capa d'elements, el nombre de capes total, i el rati de creixement de cada una d'elles. Primer doncs caldrà assegurar-se que el gruix del primer element és menor que el gruix màxim de la capa límit en el cos, i per tant realitzar un petit càlcul. Per això cal anticipar-se un moment a les condicions de contorn, que s'explicaran millor al següent apartat.

Es té que el nombre de Reynolds per un cos de longitud aproximada de 0,3m i sotmès a un flux d'aire d'una velocitat aproximada de 6m/s.

$$Re = \frac{L \cdot U \cdot \rho}{\mu} \rightarrow Re = \frac{6 \cdot 0,3}{1,5 \cdot 10^{-5}} = 1'2 \cdot 10^5$$

Eq. 7.1 Càlcul del nombre de Reynolds per als models d'estudi.

En aquest punt s'observa que es tractarà d'un flux turbulent, doncs $1'2 \cdot 10^5 > 10^4$

Recuperant de l'annex la figura de la capa límit:

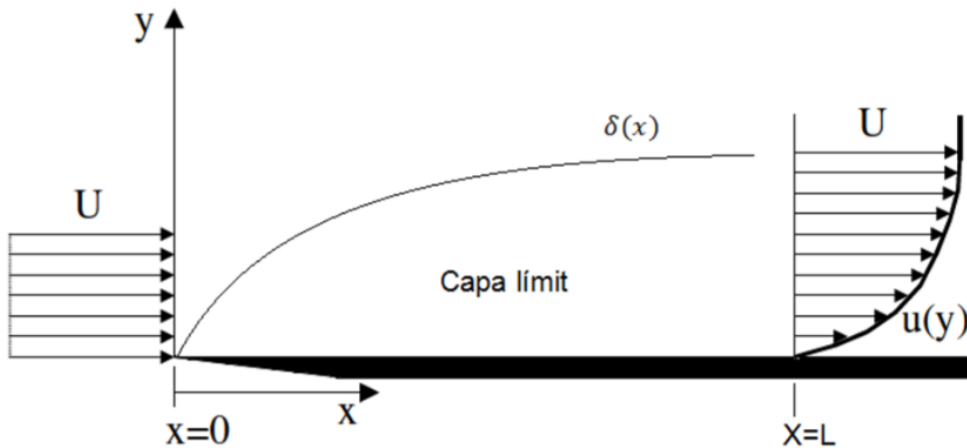


Fig. 7.4 Representació de la capa límit sobre una placa plana

Es té que “d” per $x=L$ es pot obtenir de la següent expressió

$$\frac{d}{L} = 0,16/\sqrt[7]{Re} \rightarrow d=0,009m$$

Eq. 7.2 Càlcul del gruix mínim de la primera capa del refinament de la malla.

Per tant s’haurà de prendre un valor pel gruix de la primera capa d’elements menor de l’obtingut. Per la resta de valors, se’n prenen els més raonables per evitar un mallat massa refinat.

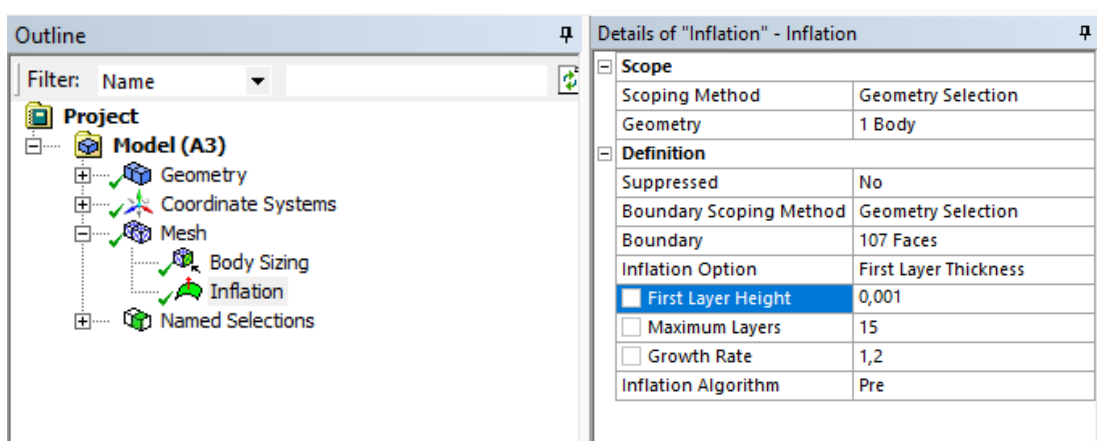


Fig. 7.5 Malla estàndard, refinament pels models. First layer height 0,001m.

Aquest seran doncs els valors que definiran la malla per tots els models previs al definitiu. No obstant, si algun d'ells requerís d'un tractament especial per tal de dur a terme la simulació amb èxit, se li aplicarien els criteris pertinents segons les seves necessitats.

7.2.4. Simulació i condicions de contorn

Un cop obtinguda una bona malla, el software està llest per passar a la següent fase de la simulació. Caldrà abans definir totes les condicions de contorn que engloben el cas d'estudi.

Tal i com abans, a continuació es detallen totes el paràmetres que s'usaran de forma estàndard per dur a terme les simulacions dels models previs.

Es preveu que un cas d'estudi d'aquestes característiques es pot determinar una velocitat aproximada d'entre 6m/s i 8m/s. En tots els models previs es prendrà el cas més crític, per tant la velocitat més baixa.

Sabent que es tracta d'un cos sotmès a un flux d'aire extern, es pot triar el model de simulació més usual en aquest casos. Es tractarà del model viscos k-epsilon (2eqn) en el mode Standard. La resta de paràmetres en general no seran modificats durant les simulacions dels models previs, si no és per necessitat.

A continuació es passa a definir el paper de cadascun dels elements presents a la geometria i a la malla, que prèviament ja se'ls havia donat el seu nom. Apareixeran com a llista a les condicions de contorn:

- Inlet: es defineix com a tipus "velocity-inlet" i se n'editen el paràmetres. És on es defineix la velocitat d'entrada del flux i la seva direcció segons els eixos de la geometria del volum de control. En aquest cas, com ja s'ha esmentat, es triarà una velocitat d'entrada frontal al cos d'estudi de 6m/s. En aquest punt cal remarcar que, si no s'ha donat un angle d'atac al cos durant el procés de creació de la geometria, es pot simular fent venir una component del flux des de la cara inferior del volum de control. Per tant es podrà variar l'angle d'atac segons convingui en una mateixa simulació sense necessitat de variar la geometria i repetir el procés de creació de la malla, com es mostra en el següent esquema:

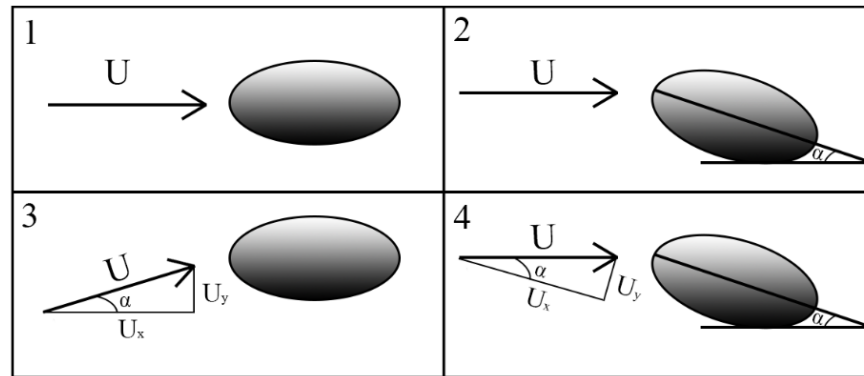


Fig. 7.6 Incidència del flux al cos d'estudi i angles d'atac.

Mentre que en el cas 2 la geometria parteix d'un angle d'atac previ, en el cas 3 s'observa com es fa ús de les components d'entrada del flux per tal d'aconseguir el mateix resultat amb el cas 4 ($4=2$).

- Outlet: la cara del volum de control per on surten les línies de corrent del flux, outlet, es defineix com a tipus pressure – outlet i no se n'ha d'editar cap paràmetre.
- Body: com que el que es simula és el moviment del flux al llarg del volum de control, en realitat el cos d'estudi enmig del mateix equival a un mur estacionari. Per tant la condició Wall, “stationary” és la que s'atorga a totes les parets del negatiu del model d'estudi.
- Symmetric: a la cara de simetria del volum de control se li dona la condició de “symmetry”. D'aquesta manera és com el programa entendre que es tracta del model sencer i no només la meitat importada geomètricament.
- Free: a la resta de cares del volum de control se les pot definir tant com a “Moving wall” com a més cares de simetria. En el primer cas caldrà donar exactament la mateixa velocitat a les tres parets que la que s'hagi introduït a la cara Inlet per tal de no influenciar en la simulació i esdevenir parets “lliures”. El segon cas de simetria també és acceptable, doncs els límits del volum de control estan prou lluny del cos com per considerar negligible l'efecte d'aquest en suposar-lo simètric en diferents plans.

A continuació, un cop revisats els valors de la simulació i especificant que el càlcul es faci des de la cara Inlet, es pot inicialitzar la solució i posar en marxa les iteracions. La simulació es defineix com a estacionaria i se'n considerarà la convergència quan els seus residus assoleixin

un valor menor de l'ordre de 10^{-4} . Segons la naturalesa de cada model seran necessàries més o menys iteracions per assolir la convergència.

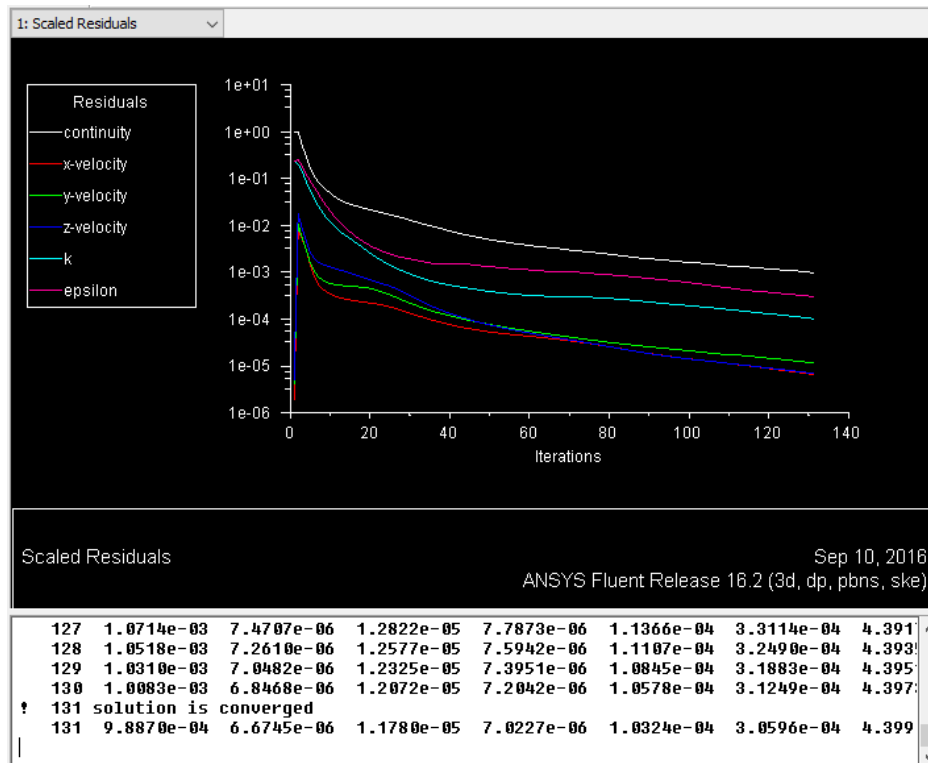


Fig. 7.7 Convergència de les variables durant una simulació

En l'anterior captura s'observa un exemple on el model convergeix amb certa rapidesa a la iteració 131.

Per a l'observació dels resultats que dona cada model previ no serà necessari cap procés més complex que el que s'acaba de descriure, doncs del mateix se'n pot extreure la informació necessària per seguir el procediment fins a donar amb un model definitiu, tal i com es comenta en el següent apartat.

7.2.5. Anàlisi dels resultats

Per tal d'agilitzar el procés d'aproximació al model òptim, per a cada simulació s'observaran els resultats més rellevants. Aquests són, bàsicament, el contorn de pressions i vectors velocitat al voltants del cos, i la força de sustentació i de resistència a l'avanç resultants. Evidentment per a cada model i segons la seva naturalesa se'n poden arribar a observar altres peculiaritats interessants, com l'aparició de zones de turbulències o la posició del seu centre de pressions.

Amb el contorn de pressions es podrà apreciar sobretot les zones que cal modelar amb més cura per tal de reduir al màxim els punts d'estancament del flux. També permetrà conèixer com es formen sobrepressions i depressions al voltant del cos, i per tant on i com es creen les components de sustentació. Se'ns dubte aquesta informació permetrà atacar directament aquestes zones per tal d'incrementar el benefici que produeixen, o pel contrari evitar comportaments del flux no desitjats.

Els vector velocitats, que mostren les zones on el flux s'accelera o s'estanca, complementa la informació anterior. Indicarà les zones on cal reduir o augmentar la curvatura de la superfície, o aquelles on cal fer-hi uns perfils menys agressius i més suaus.

En el següent exemple bàsic on s'ha sotmès un perfil alar (de 600mm de llarg i amb una corda alar de 340mm) a un flux segons totes les condicions descrites fins ara, es pot observar tota aquesta informació

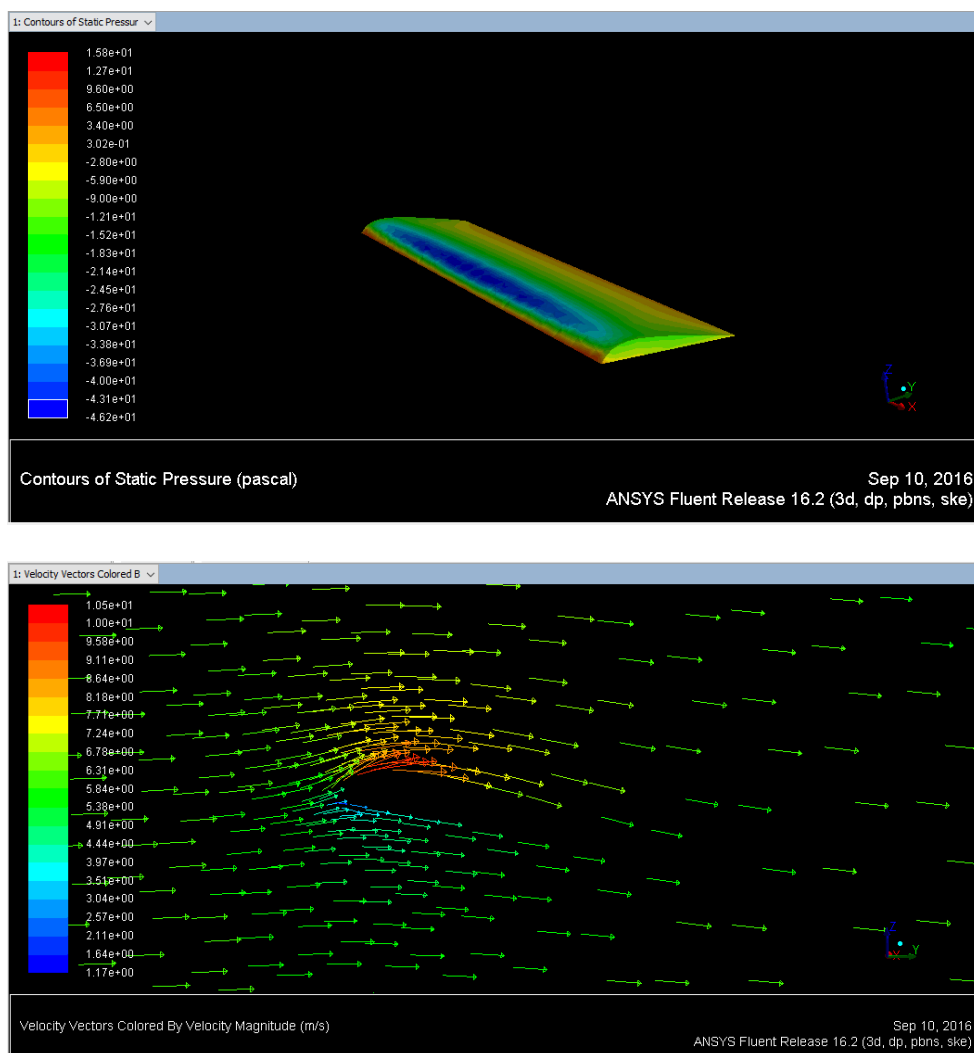


Fig. 7.8 Contorn de pressions i perfil de velocitats d'un model alar

La zona de major curvatura del perfil alar accelera el flux, de manera que es on s'hi produeixen les zones de depressió i per tant es genera un efecte de sustentació positiva. També es pot veure com al llarg de la bora d'atac existeix una petita zona de punt d'estancament del flux, on la pressió es major. En l'altra imatge, on es dibuixen els vectors velocitat en un pla secció, es pot veure millor on s'estanca – línies blaves - i on s'accelera el flux – línies vermelles.

Per altra banda, serà important quedar-se amb els valors obtinguts per la força de sustentació i la de resistència a l'avanç. S'haurà de tenir en compte que els valors de coeficients de sustentació i de resistència, en cas de voler ser consultats, s'haurien de dividir entre el valor de l'àrea projectada sobre el pla horitzontal o el vertical respectivament, en cas que aquesta no s'hagi indicat prèviament en el programa.

En el cas del perfil alar, es pot preveure amb formulació bàsica els resultats que se n'obtidrien. Segons la gràfica de la figura 6.5 es podria prendre un CL d'aproximadament 0'95, ja que l'angle d'atac introduït al programa fa 10°.

$$S = 0,6\text{m} \cdot 0,34\text{m}$$

$$\rho = 1'2\text{g/l}$$

$$U = 6\text{m/s}$$

$$FL = 0'95 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1'2 \cdot 36 \cdot 0,204 = 4'18\text{N}$$

Efectivament el programa dona aquest valor, així com el de la força de resistència a l'avanç. També se'n poden extreure els valors dels coeficients adimensionals, que s'hauran de dividir com s'ha comentat entre les àrees pertinents.

Forces - Direction Vector (0 0 1)		(FORÇA DE SUTENTACIÓ)	
Zone	Forces (n)	Viscous	Total
body	Pressure 4.2578988	-0.0049264776	4.2529723

Net	4.2578988	-0.0049264776	4.2529723
Forces			
Zone	Forces (n)		
body	Pressure (-0.088379293 0.46585725 4.2578988)		

Net	(-0.088379293 0.46585725 4.2578988)		
Forces - Direction Vector (0 1 0)		(FORÇA DE RESISTÈNCIA)	
Zone	Forces (n)	Viscous	Total
body	Pressure 0.46585725	0.0337382	0.49959545

Net	0.46585725	0.0337382	0.49959545

Cl-1	Cd-1
1.9286e-01	2.2657e-02
1.9288e-01	2.2657e-02

Com es pot veure, la força de sustentació obtinguda amb el programa es pràcticament la mateixa que la que s'ha calculat per aquest perfil alar. Així com els coeficients, si es divideixen entre l'àrea, també corresponen als que s'havien preestablert segons la figura 6.5.

$$CL = 0,192 / 0,204 = 0,94$$

A més a més també hi ha la possibilitat de situar el centre de pressions, punt on s'aplicarien les forces obtingudes de la simulació.

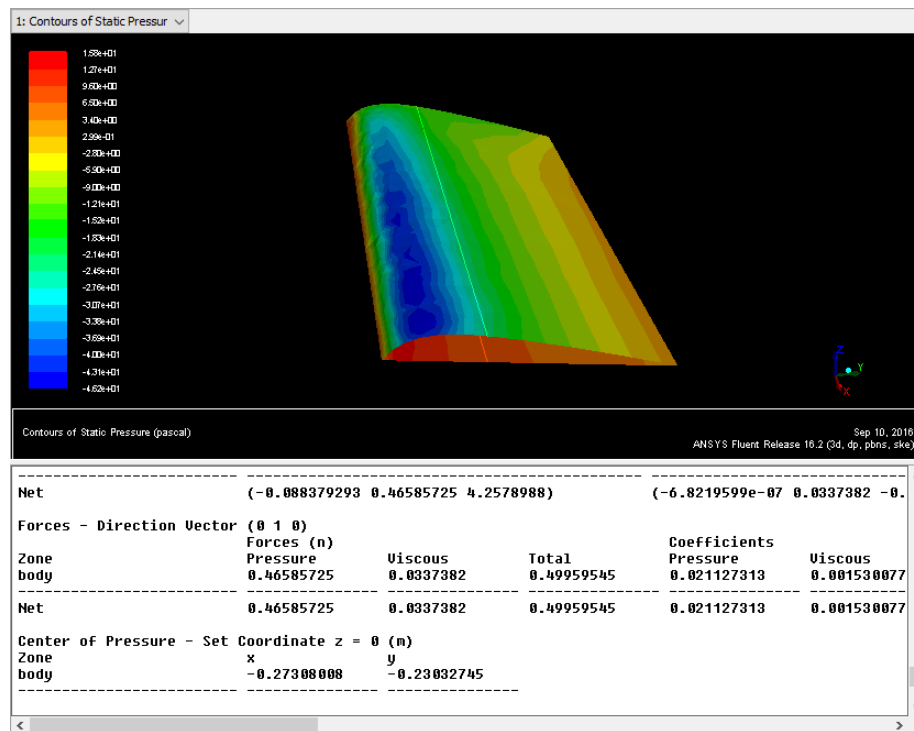


Fig. 7.9 Posicionament del centre de pressions d'un perfil alar

La línia que talla la corda alar marca l'alçada on es troba el centre de pressions. Com es podia preveure en un perfil d'aquest tipus, es troba aproximadament a una tercera part de la corda alar des de la vora d'atac.

Tota a aquesta informació i resultats obtinguts hauran de ser suficients per a seguir endavant amb el procés de disseny de la figura voladora.

7.2.6. Valoració dels resultats.

Un cop observats tots els resultats s'hauran de valorar, i per tant s'haurà d'establir un criteri que determini les accions que calgui emprendre conseqüentment o que determini si s'ha donat amb un model òptim.

Aquests criteris es basaran en quatre punts bàsics, però sempre recordant les prioritats de l'apartat 7.1:

- Reducció al màxim dels punts d'estancament. Cada zona vermella que s'observi en el contorn de pressions serà perjudicial per al model i la seva reducció pot ser determinant alhora d'aconseguir un model funcional.

- Incentivar l'acceleració del flux a les zones de l'extradós i disminuir-la en les zones de l'intradós. Això es pot aconseguir aplicant geometries intel·ligents basades en curvatures i perfils més o menys aerodinàmics.
- Obtenir un valor de força de sustentació major al pes previsible del model d'estudi. Aquest punt requerirà d'un altre anàlisi a part, la determinació del pes del cos. Afortunadament serà fàcil aproximar aquest valor, doncs els programes de CAD i concretament el que s'utilitza en aquest cas, permeten fer càlculs com el volum del model. Si aquest volum és conegut, tan sols cal triar un material adequat per a la fabricació, i a partir de la seva densitat es preveu el pes.

Per a tots els models previs se suposarà que en un futur es farà ús d'algun EPS de baixa densitat. A la següent taula s'observen els valors més estàndard dels materials d'aquest tipus que es troben en el mercat.

Core Type	EPS S-Grade	EPS M-Grade	EPS H-Grade	EPS VH-Grade	PU Normal Blank
Density Kg/m ³	16	19	24	28	36

Fig. 7.10 Taula de densitats EPS

Per aquest treball es prendrà un valor de referència de 35kg/m³ per tal de contemplar el cas més crític.

A més a més, es preveurà un pes addicional dels elements propis d'un volador d'aquestes característiques, com podria ser el d'una bateria de liti, un motor petit, i una hèlix. Per a totes aquests elements es prendrà un valor estàndard de 8 grams, com s'ha pogut determinar experimentalment pesant l'electrònica de productes existents.



Fig. 7.11 Detall del MicroUfo, components.

El MicroUfo conté una electrònica que tan sols pesa 8 grams.

Per tant, només caldrà conèixer el volum de cada cos modelitzat en 3D tal i com es mostra tot seguit:

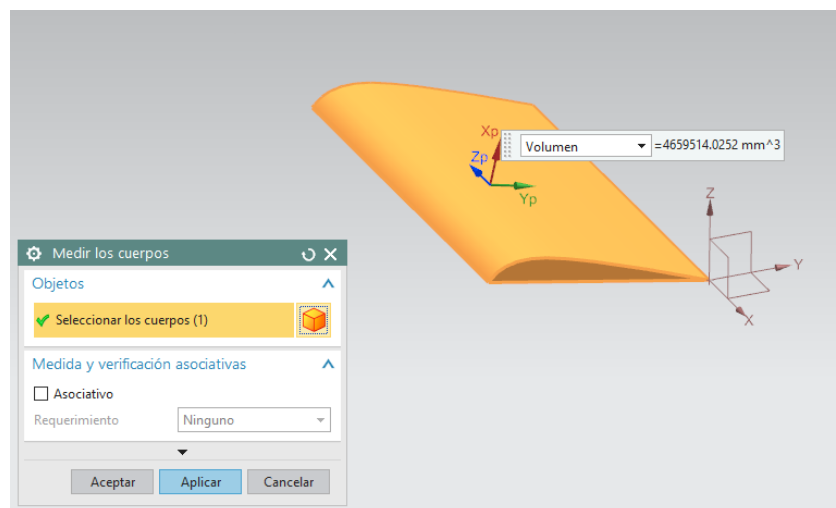


Fig. 7.12 Càlcul del volum d'un cos amb eines CAD

- Per últim, s'entendrà que una forma raonable de donar per bona la força de resistència a l'avanç podria consistir en assegurar-se que sempre és almenys cinc vegades menor que la força de sustentació obtinguda.
Per altra banda, de forma també experimental s'ha determinat que els elements electrònics propis dels voladors com el que es pretén dissenyar, atorguen una potència aproximada de com a mínim 0,11N.

L'experiment ha consistit en mesurar de nou el pes total del MicroUfo, d'uns 12 grams. S'observa que aquest es capaç de guanyar alçada sense cap dificultat, per tant s'agafa com a potencia mínima el seu pes.

Amb tot això sobre la taula es podrà avançar en la recerca del disseny òptim de l'home volador, fins obtenir el model definitiu.

8. MODELS

8.1. Model 1, primera prova.

Com que és el primer model se'n detallaran una mica més els passos de la simulació per tal de contrastar que totes les fases anteriors s'apliquen com s'ha explicat.

Per començar el procés fins l'obtenció del disseny definitiu es començarà simplement per modelar una forma humana i sotmetre-la a les condicions de contorn descrites per observar-ne el comportament.

8.1.1. Primer pas, modelització d'un humà

Primer de tot s'extreu un model volumètric d'un humà amb l'ajuda d'un software dissenyat especialment per això.

El programa Make Human, d'accés gratuït a les xarxes i en format portable, permet modelitzar humans a partir de filtres i característiques particulars. En aquest cas s'usa la fisonomia pròpia d'un baró de mitjana edat i de constitució musculada.

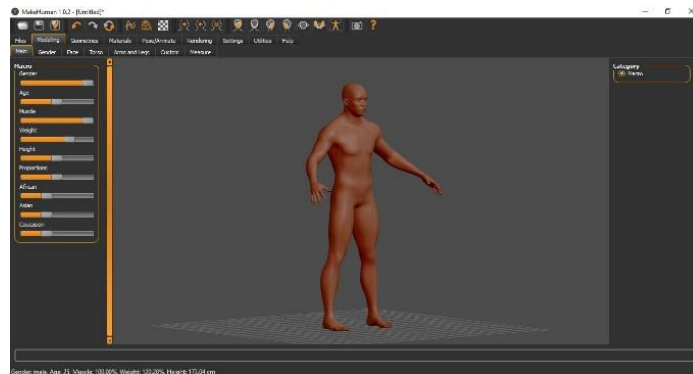


Fig. 8.1 Model humà amb els programa Make Human

Per tal de donar la postura adequada al cos – en actitud d'home volador - cal seguir una sèrie de passes. Consisteix en dotar de barres i articulacions la figura i moure-les segons convingui com es pot observar tot seguit. Per aconseguir-ho, s'exporta la geometria anterior a un altre programa de format portable i gratuït, el Blender. El procés es mostra a les següents imatges.

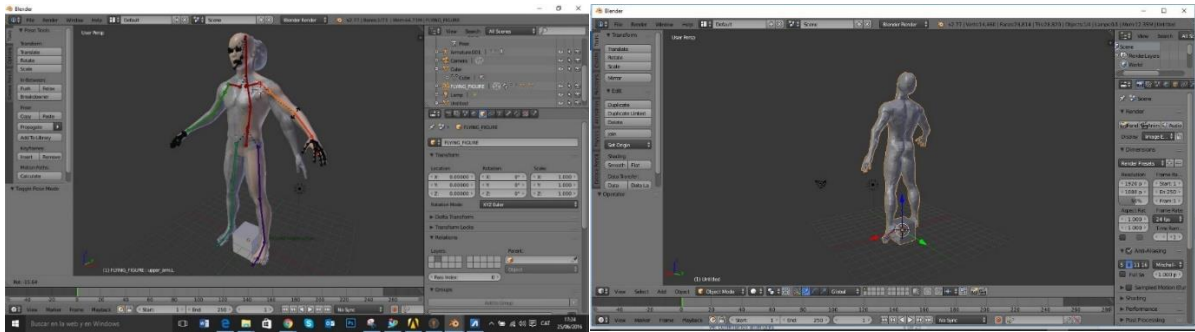


Fig. 8.2 Posicionament del model humà en actitud d'home volador

En aquest primer cas, els braços de l'home aniran estesos cap endarrer formant una V invertida i el cap mira cap amunt – o cap endavant si s'observa l'home en posició horitzontal.

Obtinguda una forma preliminar i de referència d'un cos humà en actitud voladora, es passa a fer ús d'eines CAD més convencionals.

8.1.2. Segon pas, model en CAD

Com ja s'ha dit, durant tot el projecte es fa ús del software Siemens NX 10.0 ©. Els seus recursos de modelat síncron i la seva versatilitat permetran el desenvolupament fluid de tots els models posteriors.

Ja que del programa anterior tan sols se'n poden extreure formats no parametritzats, cal exportar-ne el model humà en format *.stl (sigles que provenen de l'anglès, '*Stereo Lithography*') per a tornar-lo a modelitzar de forma paramètrica i salvar amb el format adequat.

Un cop importat l'arxiu al software CAD pertinent, serveix de plantilla per a la confecció del primer model humà per simular, com s'observa tot seguit.

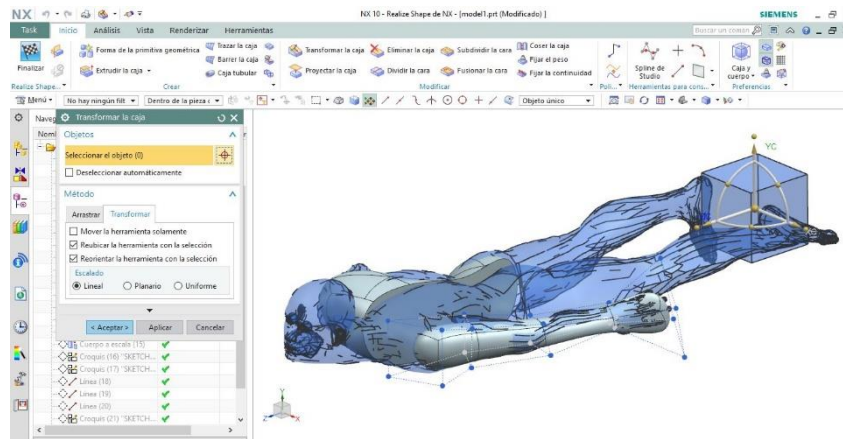


Fig. 8.3 Modelització de l'home volador amb Siemens NX 10.0 ©

Amb uns quants passos i seguint les mides esmentades a les especificacions, s'obté a grans trets un primer model, que s'anomenarà MODEL 1, tal i com es veu en la captura següent, que dona inici al procés.

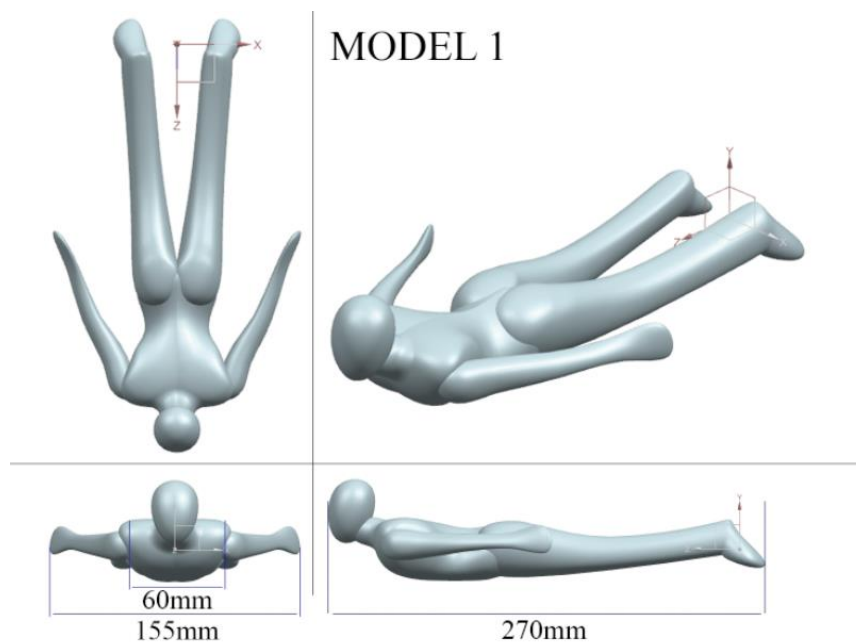


Fig. 8.4 Resultat model 1

Tal i com s'ha descrit anteriorment, del MODEL 1 se n'exporta tan sols la meitat simètrica del seu volum de control, tal i com es mostra a la següent imatge.

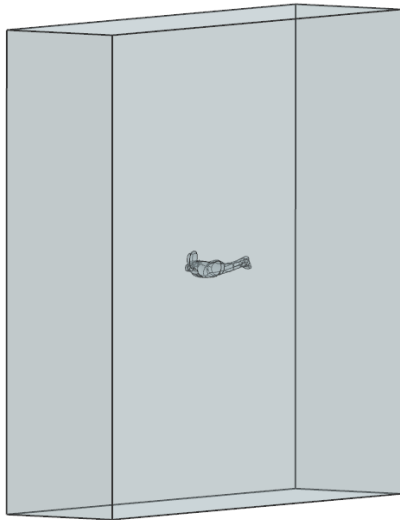
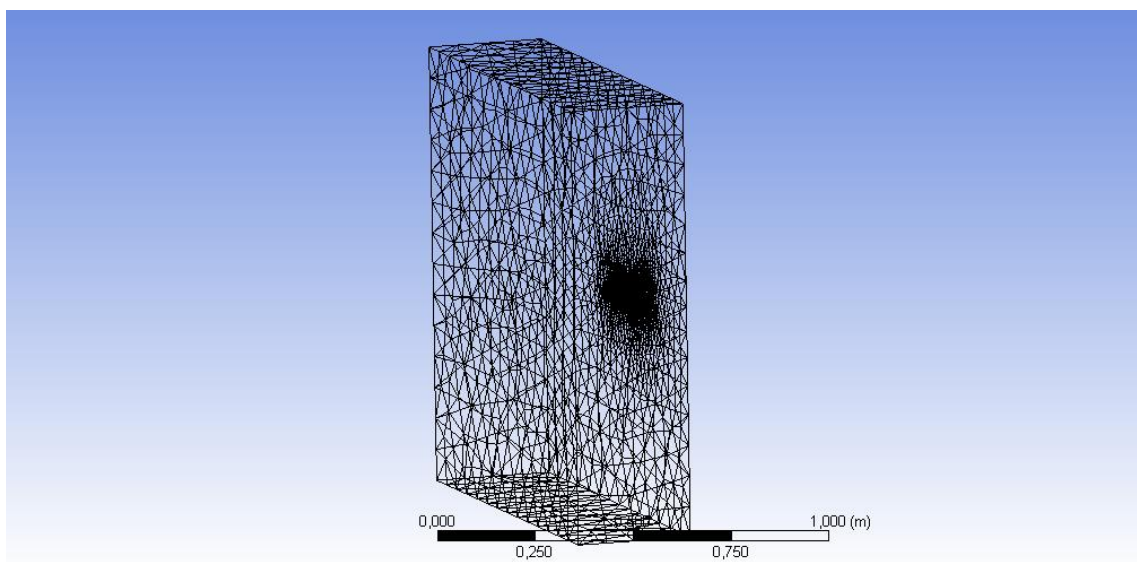


Fig. 8.5 Volum de control model 1, meitat simètrica.

8.1.3. Tercer pas, creació de la malla model 1

La creació de la malla pel MODEL 1 segueix íntegrament tots els passos detallats als apartats anteriors. Tot seguit es mostren dues imatges del mallat. Una correspon al mallat genèric sobre el volum de control, amb elements dimensionats amb 0'4m. L'altre, es correspon a la inflació de la malla al voltant de les cares del negatiu del Model 1, on s'hi apliquen els paràmetres calculats prèviament.



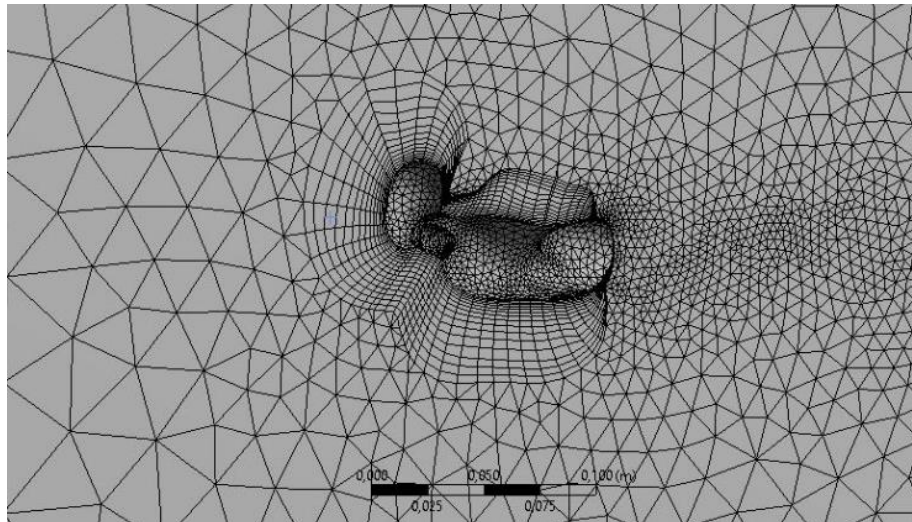


Fig. 8.6 Mallat model 1

Es convenient fer ús de talls de secció per observar altres zones da la malla i assegurar-se que no hi ha línies d'element amb curvatures massa agressives. En cas contrari podria afectar a la convergència durant les iteracions de la simulació.

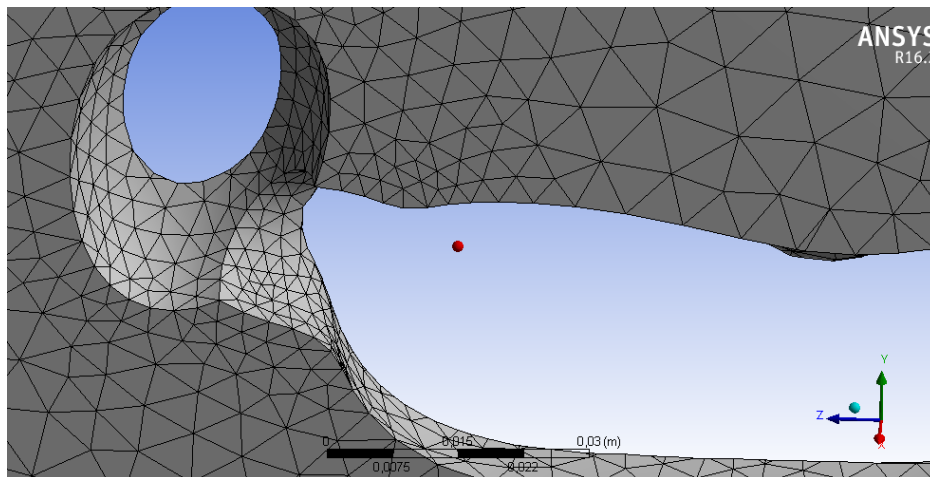


Fig. 8.7 Tall de secció del mallat 1

8.1.4. Quart pas simulació model 1

S'introdueixen al simulador tots els paràmetres detallats anteriorment. En aquest cas encara no es dona cap angle d'atac al model, les línies de corrent del flux que entren per la cara Inlet són normals a la mateixa i duen una velocitat de 6m/s.

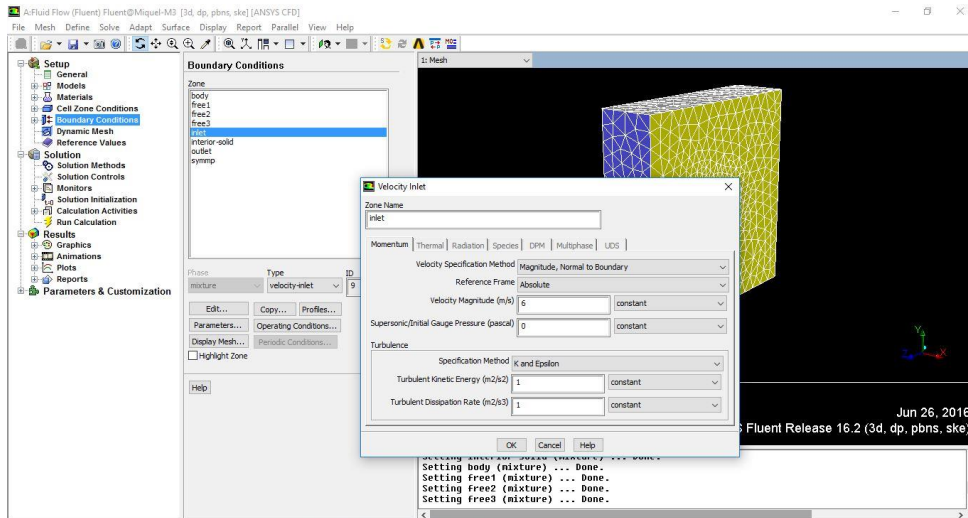


Fig. 8.8 Paràmetres de simulació del model 1

El model convergeix a les 91 iteracions i mostra els resultats de la CL i CD com es mostra tot seguit. Cal recordar que al no haver introduït l'àrea projectada al programa, els valors dels coeficients s'han de dividir entre la mateixa.

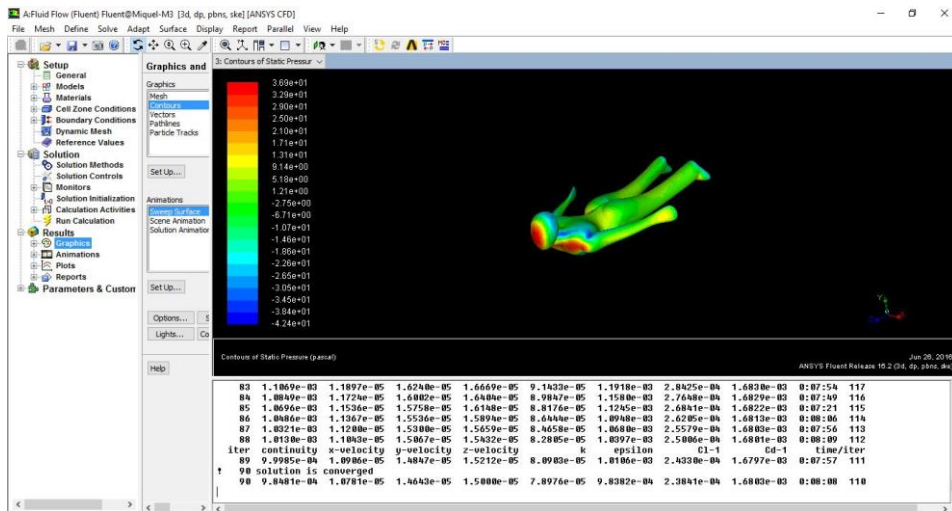


Fig. 8.9 Convergència en la simulació del model 1 i resultats CD i CL

$$\frac{CL}{Sh} = \frac{2'38 \cdot 10^{-4}}{0,00847} / = 0,028$$

Eq. 8.1 Correcció del coeficient de sustentació

Efectivament es tracta d'un valor de CL molt baix, i com es pot observar en el càlcul de forces. El vector (010) indica les forces verticals o la força de sustentació, mentre que el vector (001) les horitzontals o la de resistència a l'avanç.

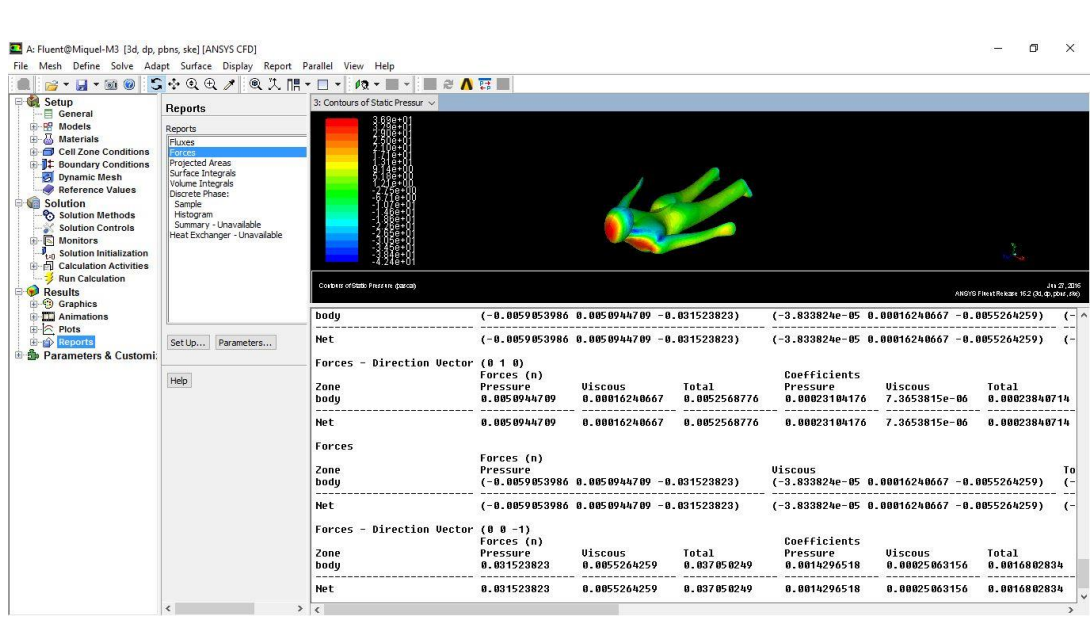


Fig. 8.10 Resultats de forces aerodinàmiques per al model 1

FL=0,00552N ; FD=0,037N

Com a mínim s’observa que una forma humana sense tractar i en aquesta posició no generaria una força de sustentació negativa. No obstant, aquesta forma en concret tan sols aconseguiria sustentar un pes de mig gram. A més a més, s’observa una gran força de resistència a l’avanç respecte la sustentació.

Per tal d’obtenir més informació sobre aquest model, es torna a sotmetre a una simulació, aquest cop dotant-lo d’un angle d’atac de 6° per observar-ne el comportament. En aquest cas la solució convergeix a les 96 iteracions i s’obté un valor de coeficient de sustentació un pel més alt.

$$\frac{CL}{Sh} = \frac{6'03 \cdot 10^{-4}}{0,00847} / = 0,071$$

Eq. 8.1 Correcció del coeficient de sustentació

Tanmateix, la força de sustentació també s’incrementa considerablement després d’afegir aquest angle.

FL=0,013N ; FD=0,039N

Efectivament comptar amb un angle d'atac positiu beneficia substancialment a l'aparició de forces sustentadores. En aquest cas, un angle d'atac de només 6° ha aconseguit gairebé triplicar el coeficient de sustentació obtingut.

No obstant el resultat d'aquesta simulació segueix indicant que el model 1 tan sols podria compensar un pes de menys d'un gram i mig. Cal extreure'n conclusions més concretes i seguir amb el disseny de models.

8.1.4.1. Contorn de pressions i perfil de velocitats model 1

Els valors de coeficients de sustentació i de resistència a l'avanç obtinguts s'allunyen dels ideals. El de sustentació és molt baix i el de resistència massa alt. Veient el contorn de pressions, es pot veure perquè.

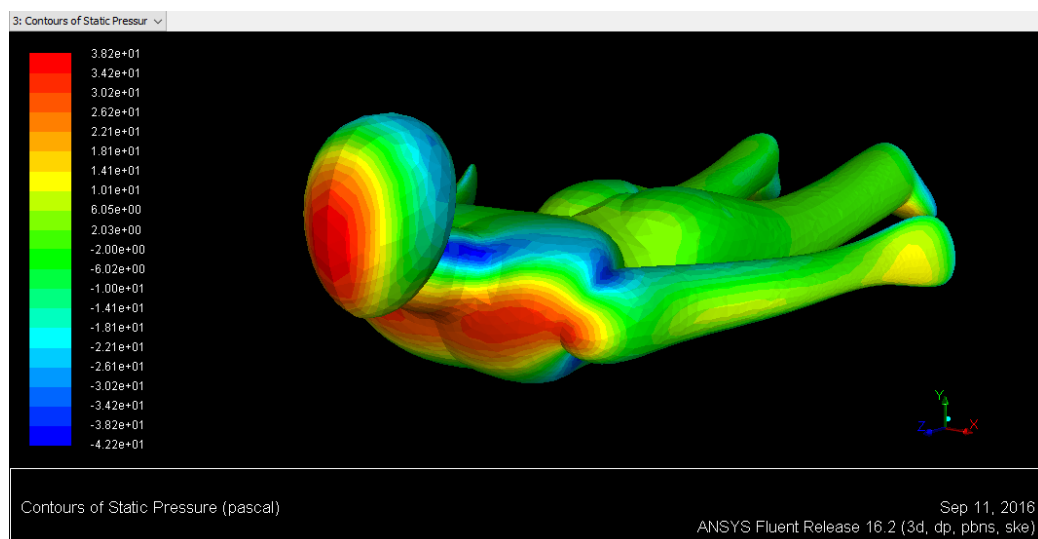


Fig. 8.11 Contorn de pressions model 1

L'àrea projectada frontalment provoca amplis punts d'estancament – zona marcada en vermell – que implica importants punts de sobrepressió. Per altra banda, la curvatura de l'extradós genera acceleracions en el flux i per tant zones de depressió. No obstant, al haver-hi curvatura tant a dalt com a baix, no existeix un important gradient de pressions entre les dues zones. L'acceleració de les línies de corrent del flux es pot observar en les següents imatges.

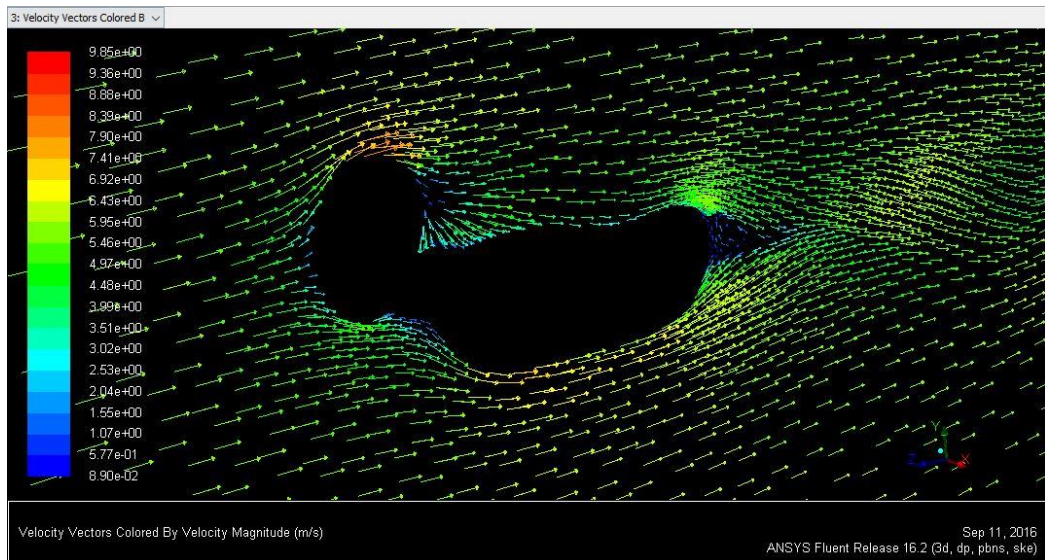


Fig. 8.12 Perfil de velocitats model 1 secció simètrica.

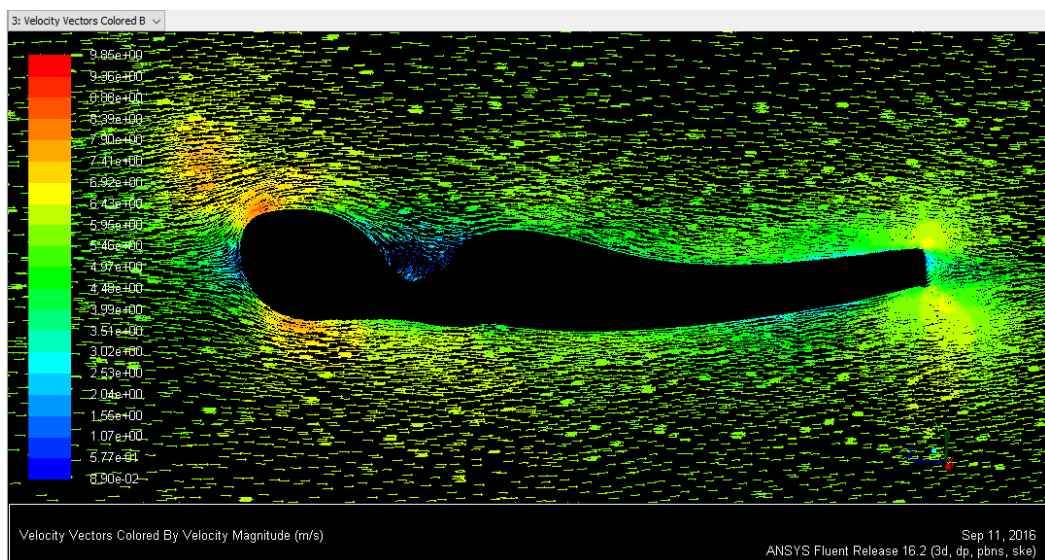


Fig. 8.13 Perfil de velocitats del model 1, secció mitjana

En la segona imatge es pot veure com la curvatura del pit i de les espatlles genera acceleracions en el flux, així com hi ha algunes zones que generen turbulències i disminueixen la velocitat del flux de manera perjudicial per a la sustentació.

8.1.5. Cinquè pas, conclusions model 1

De tota la informació anterior, se n'extreuen les següents conclusions que es mantindran en models posteriors.

- Cal augmentar el coeficient de sustentació fent ús de:
 - o Curvatures a l'extradós i zones planes a l'intradós.
 - o Aplicar sempre angle d'atac.
 - o Augmentar la superfície horitzontal projectada.
- Cal disminuir el coeficient de resistència a l'avanç fent ús de:
 - o Disminució les zones que generin punts d'estancament.
 - o No abusar de l'angle d'atac.

Aquestes conclusions serveixen per iniciar el següent model.

8.2. Aproximació al model definitiu.

Fins ara s'ha explicat el procediment de simulació i com es contrasten els resultats fent ús de tots els aspectes tècnics detallats anteriorment. En el cas del model 1, també se n'ha detallat el procés, ja que era la primera prova. No obstant, després d'aquest n'hi ha de molts altres fins que no s'arriba al model definitiu.

Per tant, en els següents apartats no es detalla tant exhaustivament cada simulació, sinó que se n'expliquen els resultats i les observacions més rellevants que acaben conduint cap a l'obtenció d'un disseny òptim.

8.2.1. Després del model 1

A partir del model 1, se'n dissenya un altre fent cas d'algunes de les conclusions extretes. En aquest segon model, el model 2, es mirarà de generar el màxim de curvatures possibles a la part superior del cos humà. En canvi, la part inferior serà llisa. El primer inconvenient que s'observa és que aquest nou disseny dista més d'una forma humana. Es pot veure a la següent captura.

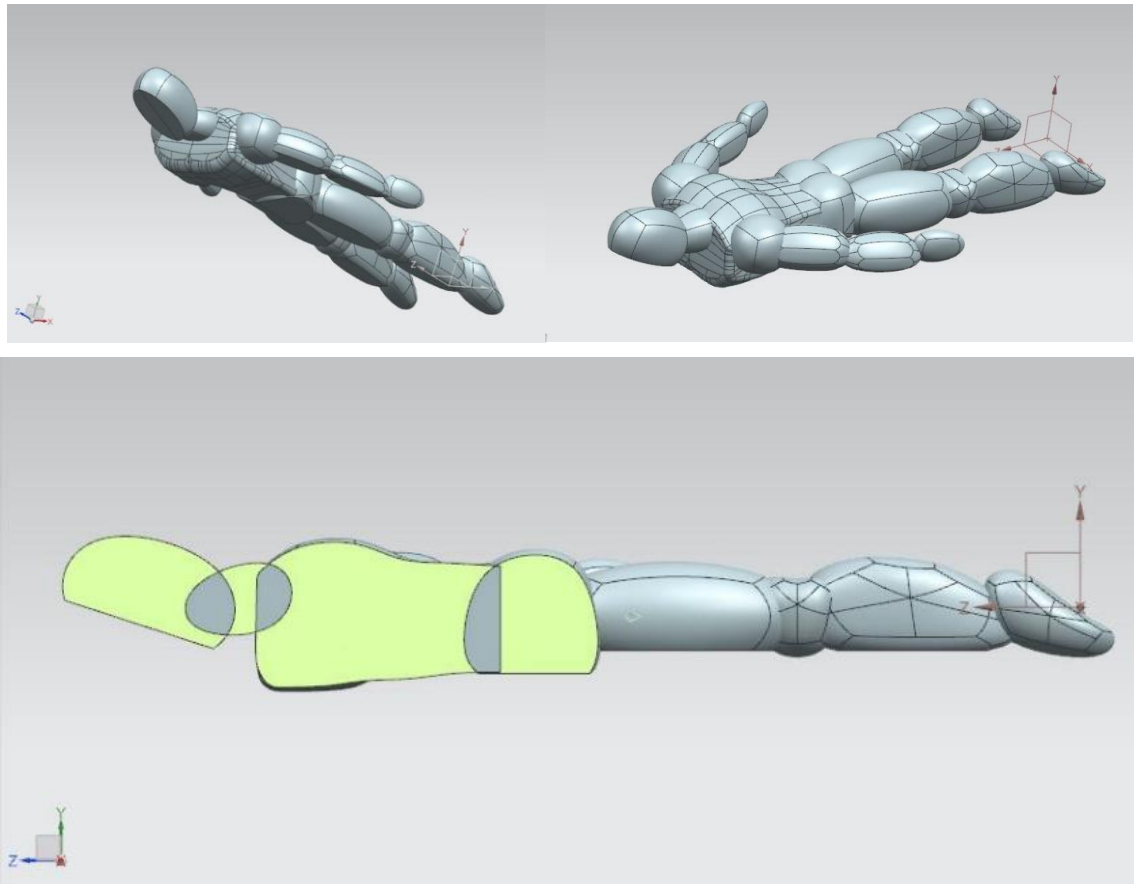


Fig. 8.14 Model 2, amb els canvis aplicats després d'observar el comportament del model 1.

Com també es pot veure a les imatges anteriors es procura que la curvatura de l'esquena s'assimili a la part superior d'un perfil alar. No obstant no s'obté cap resultat ni millora significativa. Els constants canvis de curvatures – cap, esquena, cul, cames i peu – causen un alentiment en el flux i una baixa diferència de pressions. És més, l'aportació de les forces viscoses en la força de sustentació total resulta ser negativa. A les següents imatges es pot observar el camp de velocitats poc òptim i el resultat de forces, que no millora respecte el model 1.

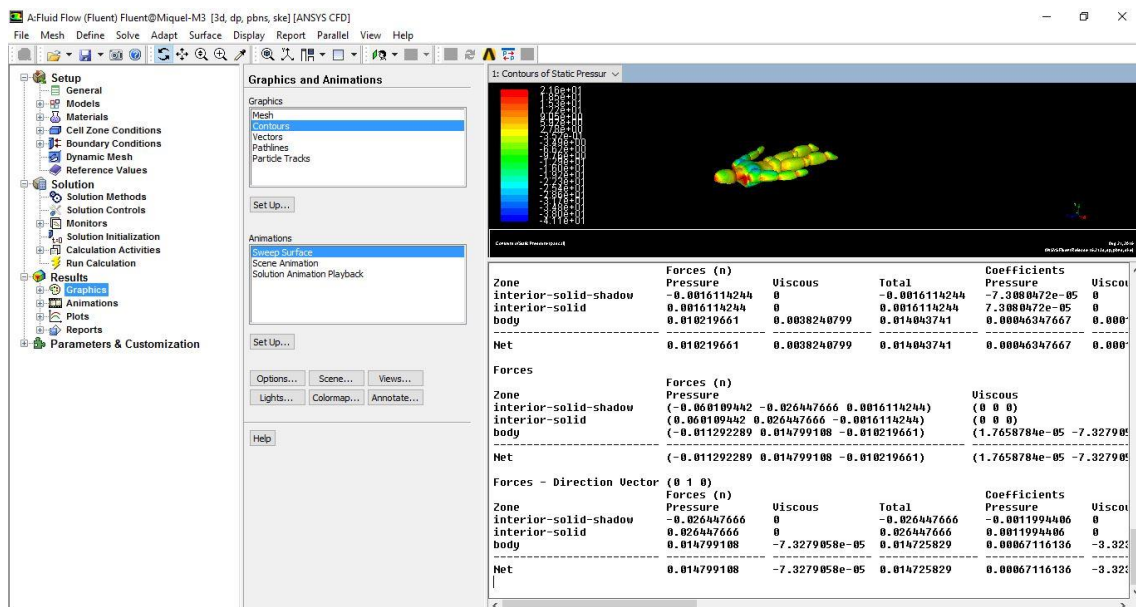
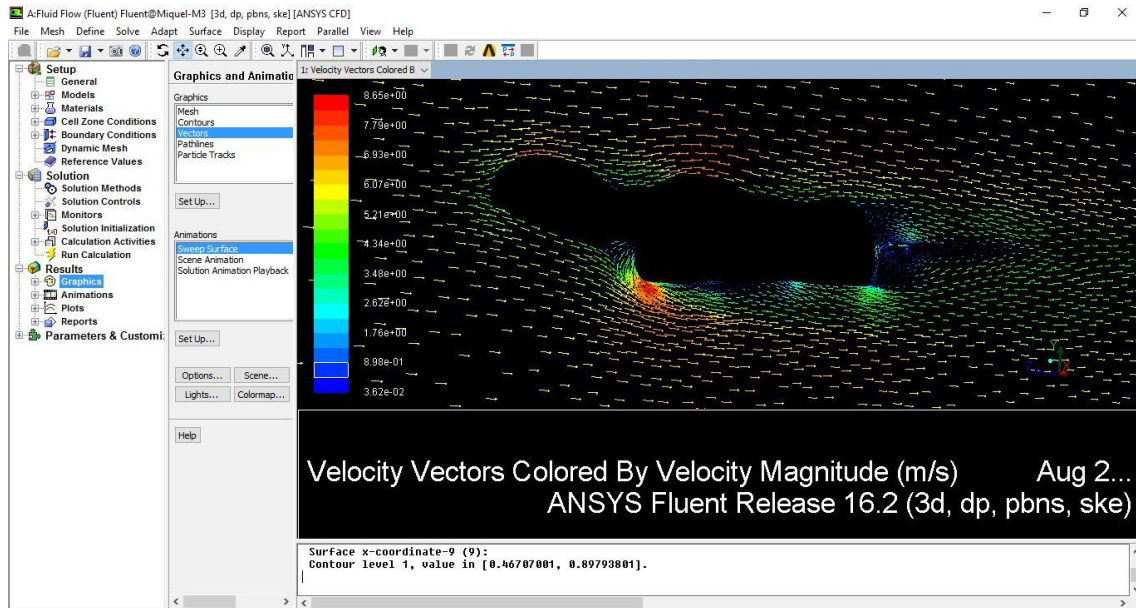


Fig. 8.15 Simulació del Model 2, sense resultats significatius

D'aquest intent fallit se n'extreu la conclusió que, si s'afegeixen curvatures per incrementar la velocitat del flux, aquestes han de ser contínues i sense gaires canvis dràstics per aconseguir l'efecte desitjat.

Se segueix treballant amb models similars a l'anterior, afegint canvis dels que s'espera obtenir millores significatives. Tot i que els resultats de la força de sustentació augmenten, no són canvis prou substancials.

Per tant es decideix atacar el disseny des d'un altre punt de vista.

8.2.2. Modelització per parts

Ja que sembla que un cos humà sencer no genera forces sustentadores gaire importants, es decideix atacar per diferents parts la geometria del mateix i observar-ne els resultats.

Es començarà pel tors de l'humaiode. Prenent com a bon punt de partida les altes resistències a l'avanç obtingudes anteriorment, es té en compte aquest aspecte des de l'inici del disseny. Tanmateix, com es veu tot seguit, la solució proposada aporta un nou avantatge respecte les proves anteriors.

El cos del model té un forat passant, des del pit fins a les cames, de manera que no impedeix el pas de l'aire. Alhora, d'aquesta manera se li esta donant a l'esquena i al pit "el doble" de superfície projectada horitzontalment. Així s'espera solucionar d'un sol cop algunes de les característiques negatives presents fins al moment.

Es comença per una disseny simple, que sotmès a simulació, es perfila fins obtenir una forma més treballada i fidel al tors humà.



Fig. 8.16 Model per parts, tors humà. Optimització fins arribar a la forma de la dreta.

La simulació obtinguda d'aquest últim tors dona resultats bons, tenint en compte que la superfície que se n'extreu es mínima. Es poden observar tot seguit, sota les mateixes condicions que s'han explicat fins ara i amb un angle d'atac de 8° .

Es revela que la simulació d'aquest model és més complicada, doncs no convergeix fins la iteració 465. Els resultats del coeficient de sustentació i de resistència a l'avanç es divideixen en aquest cas pel doble de la superfície projectada horitzontalment, al comptar en aquest cas amb dues cares que treballen com a intradós.

Finalment, s'observa que la força de sustentació obtinguda és considerablement alta. Tot i això la de resistència a l'avanç segueix sent també força elevada i caldrà treballar més les superfícies per millorar aquest aspecte.

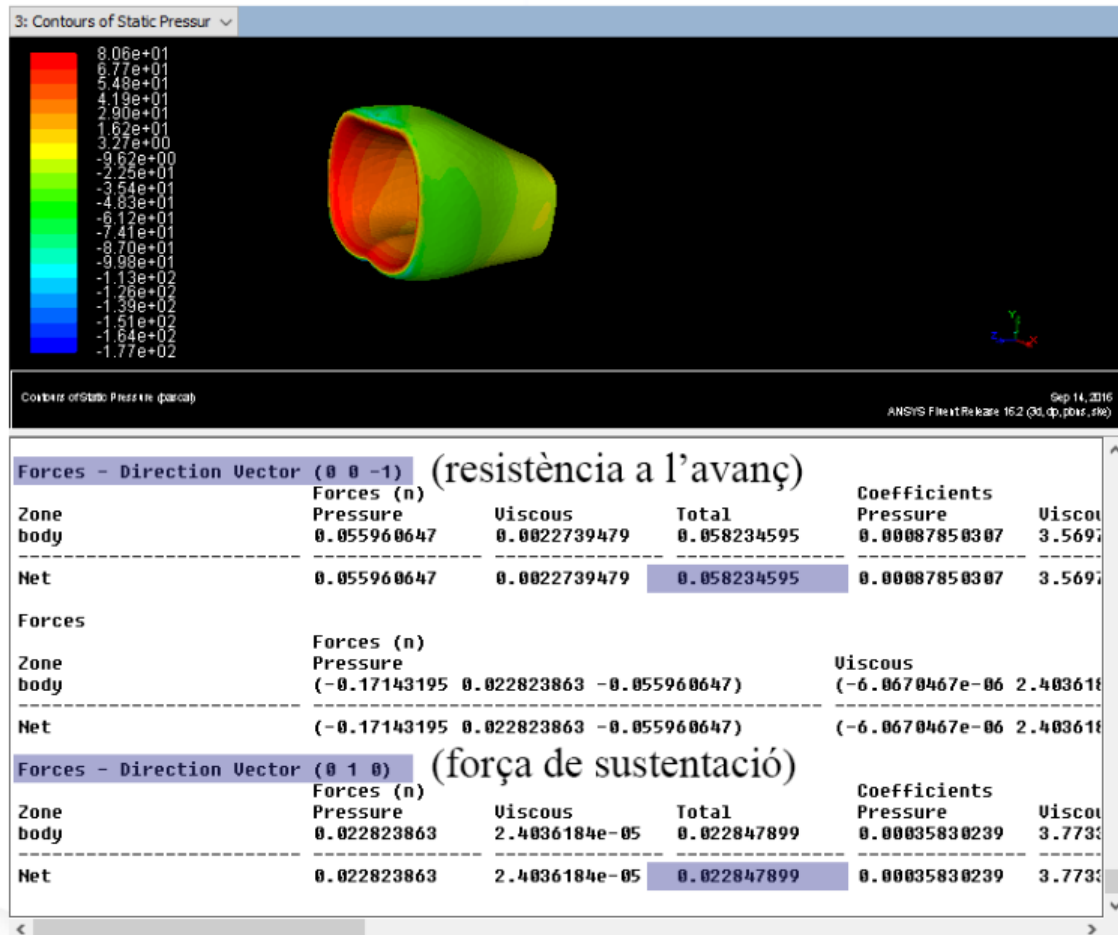


Fig. 8.17 Resultats de la simulació del tors humà.

$D=0,058N$; $L=0,022N$

Recordant que els models anteriors, essent cossos sencers, estaven gairebé en la meitat del valor d'aquesta sustentació, es considera aquesta geometria força vàlida. Tot i que se seguirà treballant en futurs models, es pren com a referència per a fer-ne ús.

Amb aquesta i altres proves, es dona per tancada la fase de simulacions prèvies i es passa a fer un disseny més definitiu i encarat cap el final. Per això es repassen tot seguit les conclusions que han aportat en el seu conjunt tots els tests.

8.2.3. Conclusions models previs

Un cop realitzades totes les proves que es consideren necessàries per extreure conclusions vàlides, aquestes es fan servir per donar inici al model definitiu.

Les característiques que hauran d'estar presents en aquest es complementen entre elles i juntes ajuden a explicar el caràcter del que haurà de ser l'humanoide volador. En definitiva, s'ha observat que la màxima debilitat del mateix, tot i ser una evidència, és efectivament la geometria.

S'haurà de jugar doncs amb la il·lusió i crear una forma humana que amagui prou superfície que permeti sustentar-lo. No obstant això no serà suficient, i per tant serà imprescindible comptar amb tres punts claus per aconseguir el vol:

- Angle d'atac sempre positiu: de totes les simulacions anteriors se n'extreu que només amb un angle d'atac positiu es poden obtenir resultats mínimament acceptables. Fent ús de la teoria exposada a l'apartat 6.4.1 es determina que s'haurà de jugar amb les posicions del centre de gravetat i el centre de pressions per aconseguir encabrir en tot moment l'aeromodel, sempre mirant d'evitar sobrepassar l'angle d'atac crític. Una altra manera d'ajudar a assolir aquest angle durant el vol és jugar amb la geometria, com es veurà tot seguit.
- Maximitzar la velocitat: una velocitat tant alta com sigui possible també serà clau per al vol, ja que com se sap segons l'apartat 6.2 la sustentació és proporcional al quadrat de la mateixa. Això vol dir que passar de 6 metres per segon a 8, suposa un increment d'un 77% de la sustentació. S'haurà de fer ús d'una bona bateria, motor, i hèlix, per tal d'assolir el màxim de velocitat. Reduir tant com sigui possible la resistència a l'avanç de ben segur que també ajudarà.
- Minimitzar pes: tot i els esforços en crear una bona geometria, un aeromodel acaba sustentant gràcies a una bona superfície de sustentació. Al final, si no hi ha superfície de sustentació, no sustenta. Com ja se sabia, preveure en el disseny que el model haurà de ser lleuger també serà clau.

Apart d'aquests tres punts, que ja s'entendran com a bàsics fins al final del disseny, s'extreuen altres experiències dels models previs que permeten el disseny que es mostra en el següent apartat.

9. MODEL FINAL

El model final s'inicia amb un croquis en un plànol de la idea que s'extreu de tot el treball realitzat fins el moment. Tot seguit se'n pot veure una còpia acompanyada de l'explicació.

El model ronda els 340mm de longitud des de els peus fins el cap. Es decideix maximitzar el tamany, sense sortir de les especificacions, amb la intenció d'aprofitar al màxim la superfície que pugui ajudar a sustentat. Tanmateix, els braços estaran força oberts en forma de V invertida. Es preveu afegir alerons transparents entre el cos i els braços que també augmenten la superfície de sustentació.

Tot i que el cap mai acaba de ser un element que ajudi en el vol, si no més aviat el perjudica, es mira que afecti el menys possible situant-lo en una posició més o menys aerodinàmica: mirant cap a baix.

Pel que fa el tors, s'usa un que es basa en els resultats obtinguts en apartats anteriors. El forat passant on s'allotjarà l'hèlix i el motor no varia de secció al llarg de la longitud del model, evitant així efectes de resistència a l'avanç no desitjats i facilitant el pas de l'aire. Es mostra en la imatge següent:

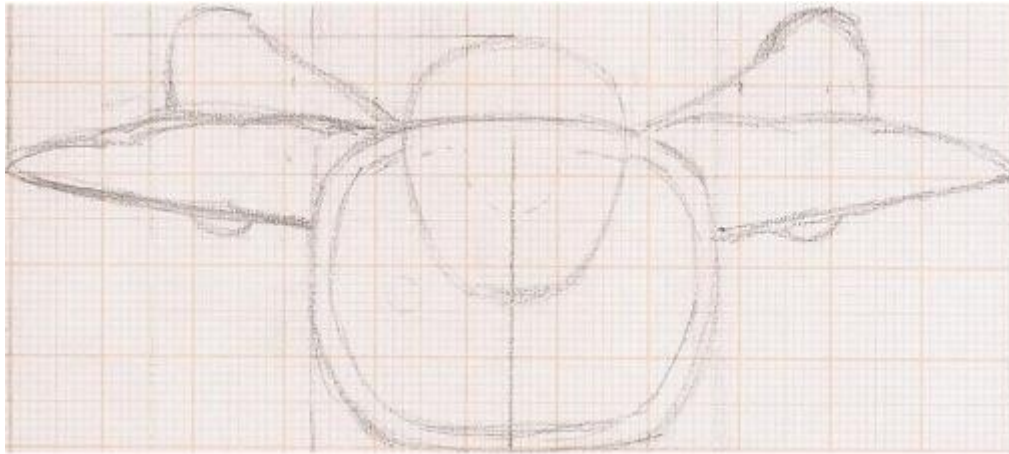


Fig. 9.1 Plànol disseny final vista frontal

Per últim s'afegeix un aspecte important en les cames, aquestes romanen doblegades pels genolls. Aquest fet dota el model d'una curvatura cap a dalt que pretén causar un efecte de resistència en aquest punt. La idea és causar un moment respecte el centre de gravetat que ajudi a mantenir un angle d'atac positiu en tot moment. L'efecte queda esquematitzat en la següent imatge:

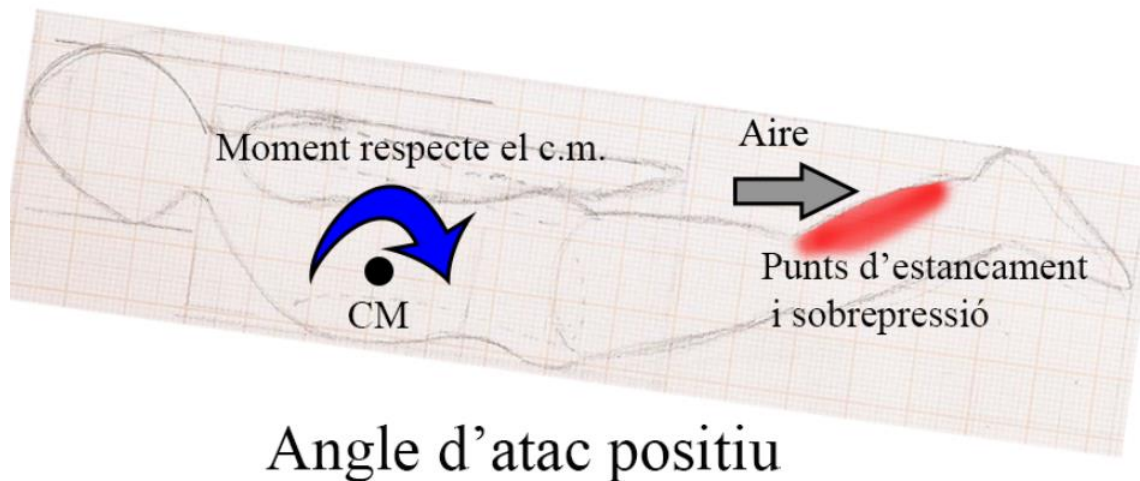


Fig. 9.2 Plànol model final, teoria per obtenir angle d'atac

En general tots els canvis de direcció en la superfície del model són suaus per tal de facilitar les acceleracions del flux.

9.1. Modelització en CAD del model final.

Per tal de modelitzar amb el màxim de fidelitat possible als plànols el model final es fa ús de la importació de les imatges del mateix en el programa de CAD.

D'aquesta manera, fent ús adequat de corbes i superfícies, s'obté el disseny desitjat.

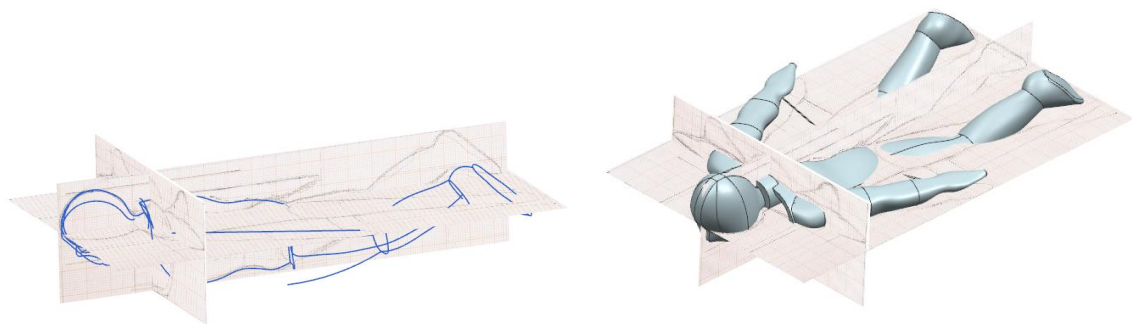


Fig. 9.3 Procés de modelització del model final, partint dels plànols.

L'aspecte final que ofereix aquest nou disseny s'aproxima força a una forma humana voladora, com es pot veure:

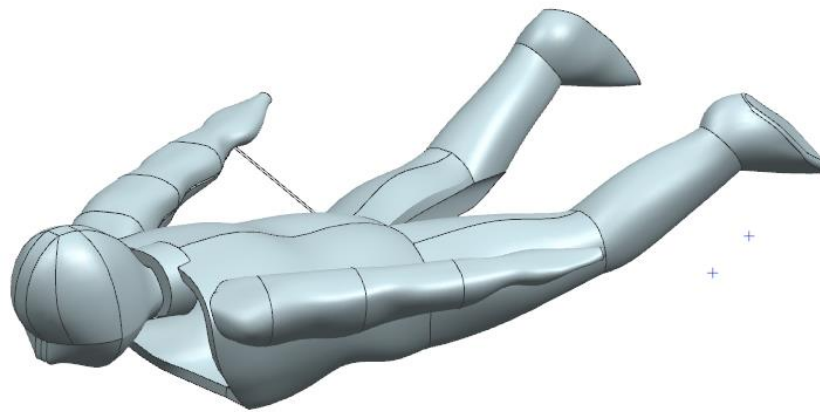


Fig. 9.4 Model final

9.2. Primera simulació model final

Les primeres simulacions d'aquest disseny es fan sota les mateixes condicions que totes les realitzades fins el moment, per tal d'entreure l'eficiència del mateix abans de profunditzar-hi.

Per tant, recordant quines eren les condicions de contorn, es simula el cos amb un angle d'atac de 6° sota un flux que circula a 6 metres per segon frontalment. La malla es força bàsica tret d'alguns refinaments necessaris per a fer possible la simulació.

Després de 226 iteracions, la solució convergeix mostrant els següents resultats.

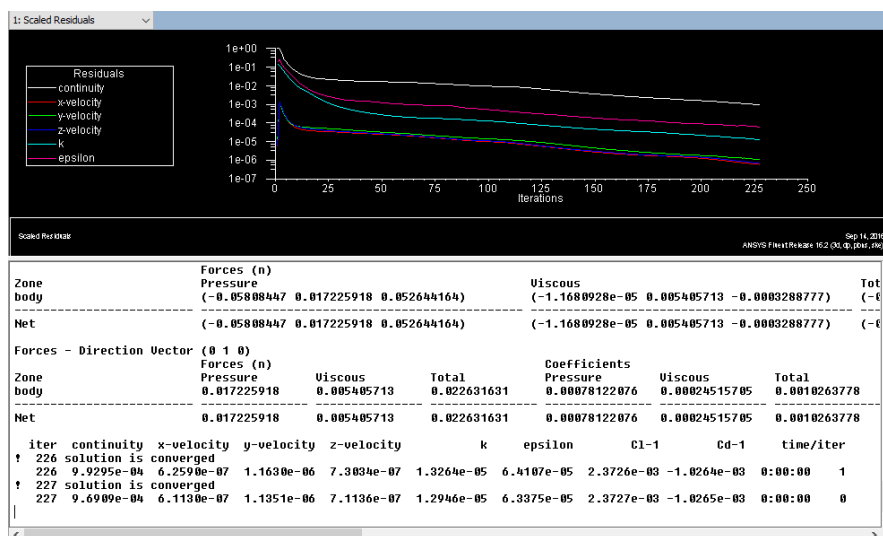


Fig. 9.5 Convergència de la simulació del model final

A partir d'aquest moment ja no s'observen massa els coeficients adimensionals, ja que caldria dividir-los entre una àrea que resulta difícil de determinar en el model actual. S'observen doncs directament les forces obtingudes d'aquest model.

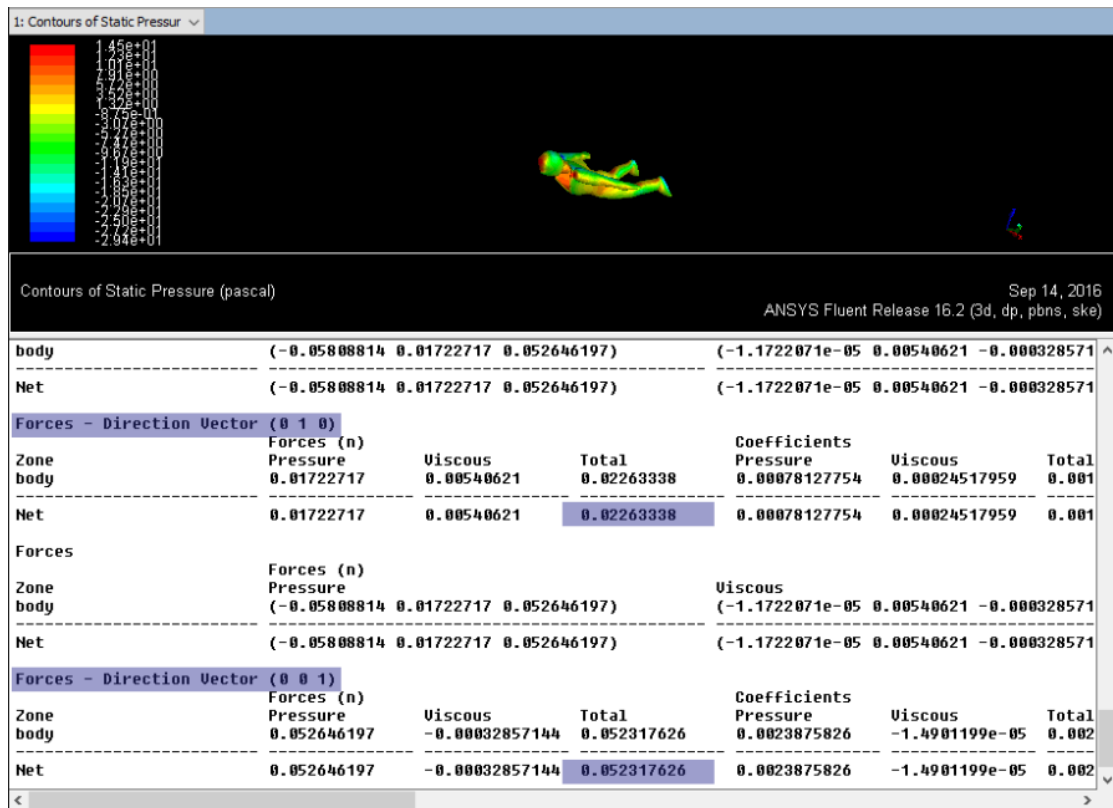


Fig. 9.6 Forces resultants de la simulació del model final

D=0,022N ; L=0,0523N

Per primera vegada la força de sustentació supera doblement la de resistència. No obstant ja es veu que no seria suficient, ja que només els elements electrònics poden arribar a pesar 8 grams. Aquesta força de sustentació permetria aixecar 5 grams. Tanmateix el pes del model també es pot preveure.

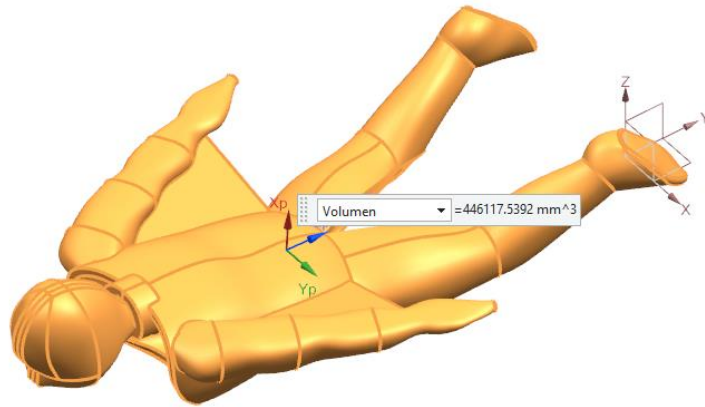
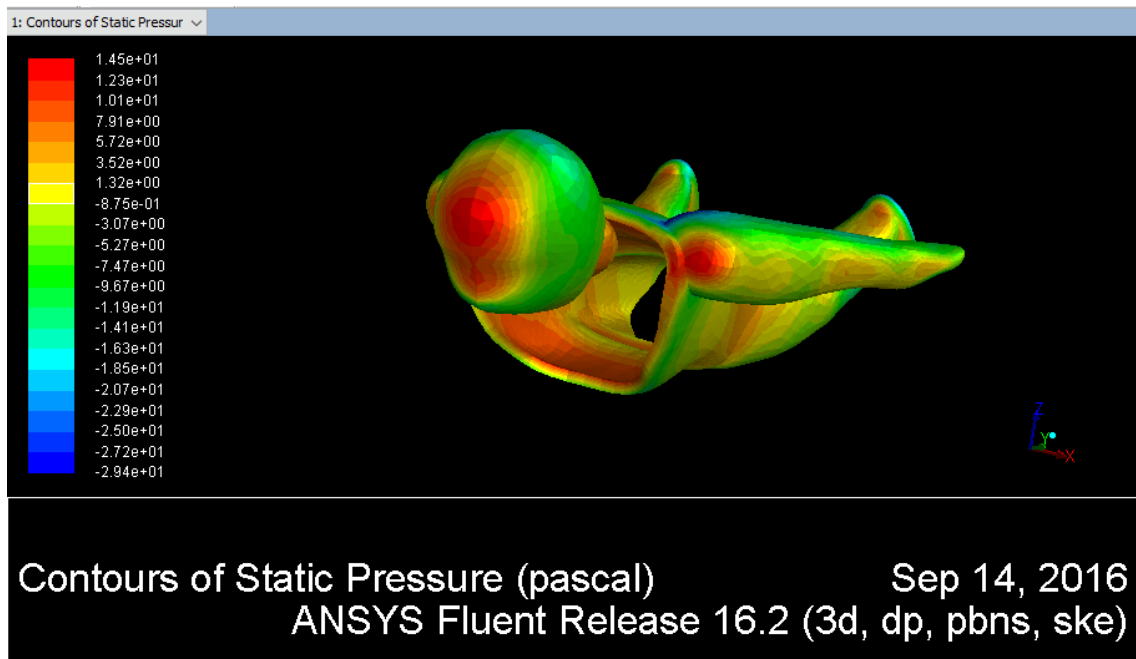


Fig. 9.7 Volum model final

Amb aquest valor de volum i amb la densitat d'un material molt lleuger com l'EPS, com a mínim pesaria uns 13 grams.

Per tant s'observen altres resultats per veure com millorar el model.



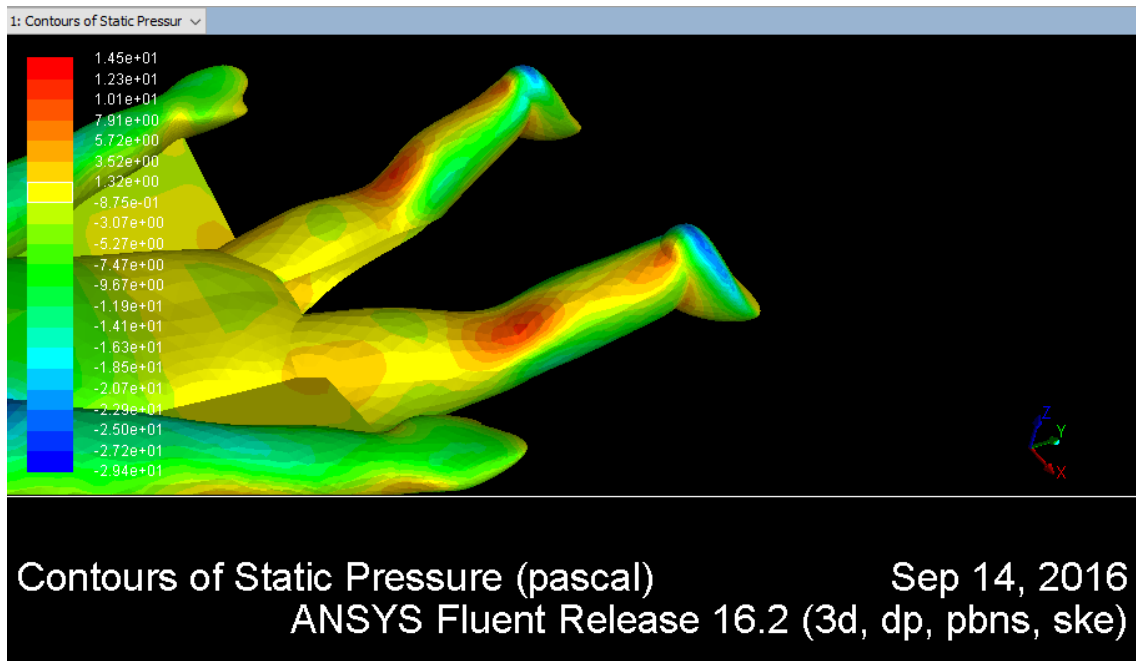
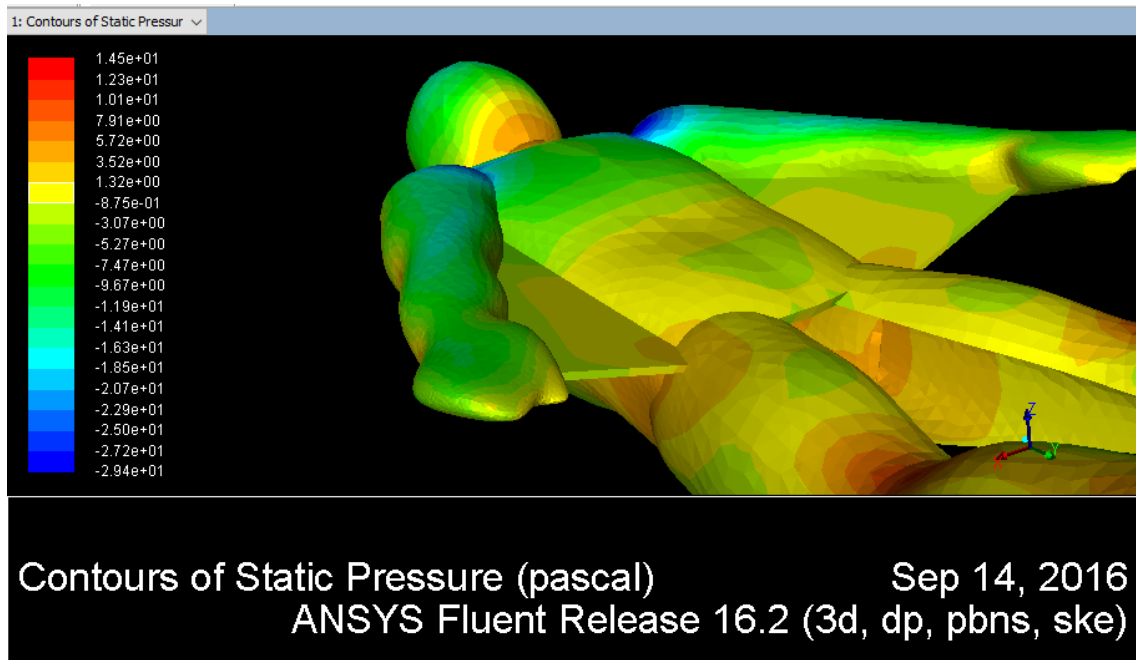


Fig. 9.8 Captures del contorn de pressions del model final

Tant el cap com el els braços causen importants punts d'estancament. Sembla que la posició de l'aleró tampoc es del tot òptima, doncs hi ha algunes sobrepresions en zones que només haurien de ser depressives. En canvi en les cames es genera l'efecte desitjat i comentat a la figura 9.2 de punts d'estancament.

9.3. Correccions fins el model definitiu.

Abans d'arribar al model que es considera definitiu, es fan tres simulacions més. Totes elles serveixen per aplicar les correccions que es veuran tot seguit, comparant el final amb l'últim, el definitiu.

9.3.1. Cap

Es fa un cap una mica més estret i per tant aerodinàmic, una mica més inclinat cap endavant, i amb una forma més simplificada per evitar acceleracions del flux en zones no desitjades.

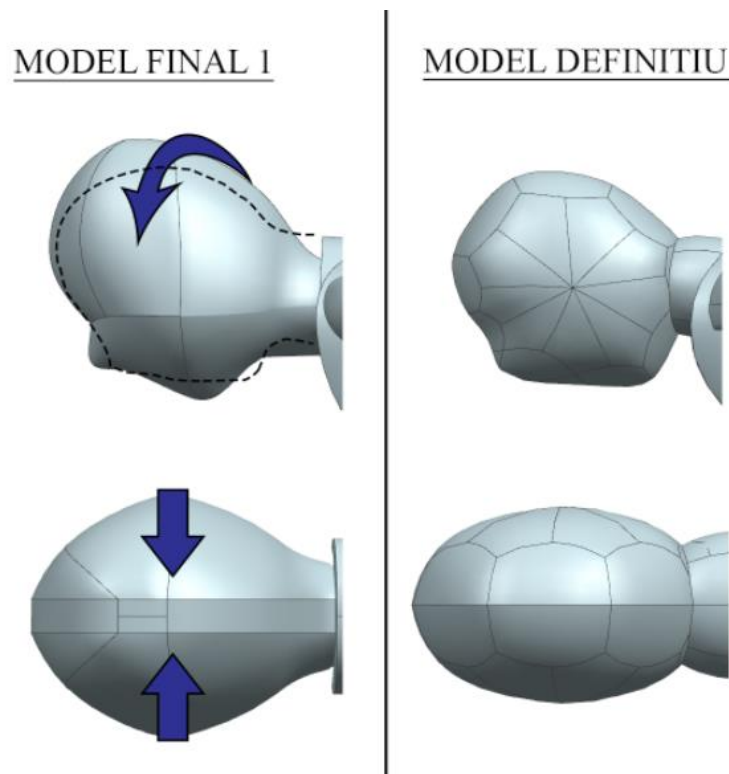


Fig. 9.9 Optimització model final, cap.

9.3.2. Tors.

Es mira de modificar el tors per la zona d'entrada d'aire per evitar punts d'estancament. Per tant es perfila el perfil d'entrada, i s'encara cap a la direcció del flux de manera que l'impacte sigui menor. També es simplifiquen algunes formes del coll per evitar turbulències

innecessàries. Tot i que és molt subtil, la superfície superior del cos – l'esquena – s'ha suavitzat per tal d'aproximar-se més a l'extradós d'un perfil alar.

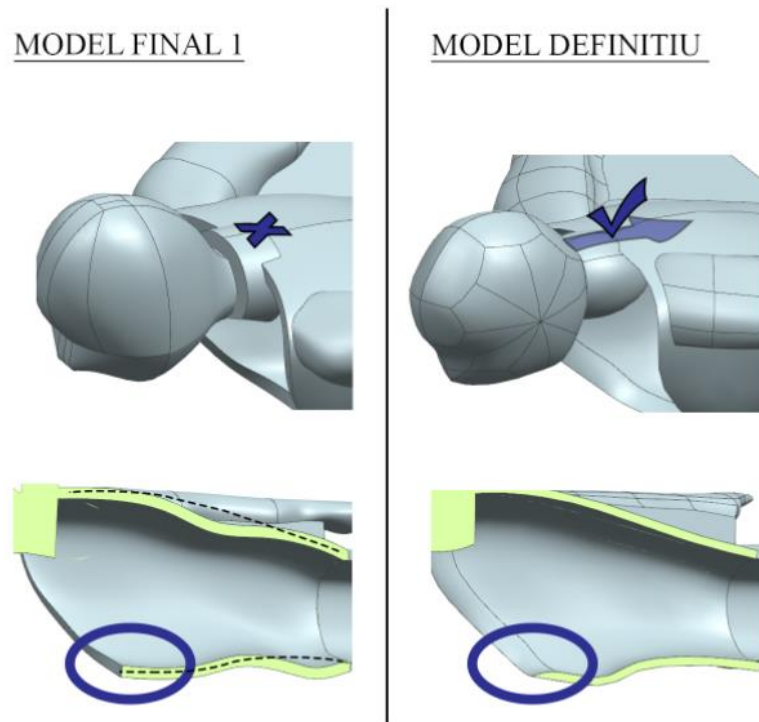


Fig. 9.10 Optimització model final, tors

9.3.3. Braços.

Es talla de forma plana la part inferior dels braços per evitar-hi acceleracions del flux en aquella zona, ja que no convé. També se n'augmenta l'obertura, de manera que permet augmentar la superfície de l'aleró i la sustentació. També es mira d'harmonitzar una mica la curvatura superior, igual que es fa amb el cos seguint la línia de perfils alars aerodinàmics. La mà es tanca en punta per disminuir turbulències, i l'aleró se situa el màxim amunt possible per evitar turbulències i depressions, ja que d'aquesta manera el flux hi circula amb més facilitat per la part superior.

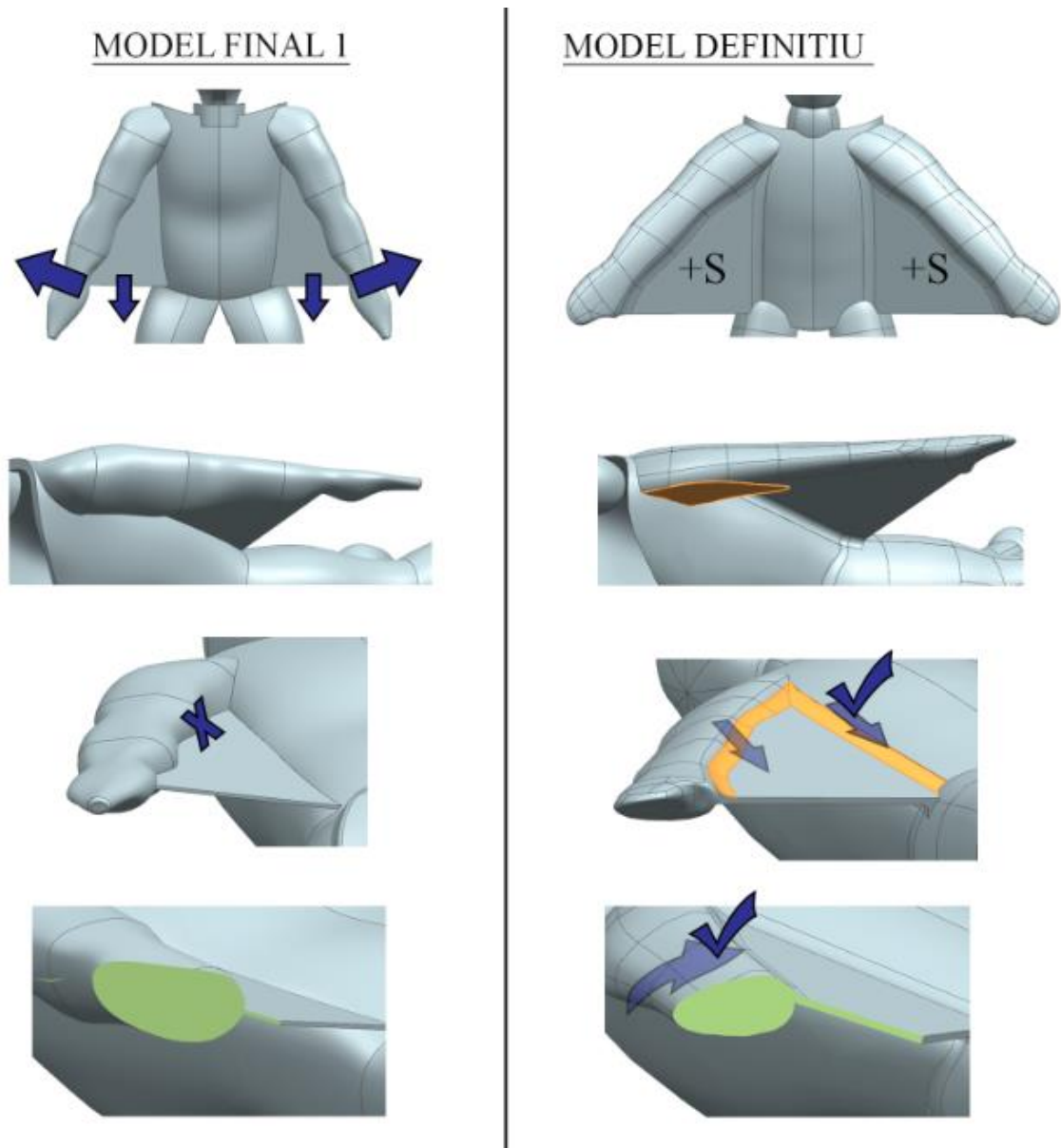


Fig. 9.11 Optimització model final, braços

9.3.4. Cames

No se'n varia massa la forma. Es modifica una mica el perfil dels peus, ja que en el primer disseny havien resultat ser una mica irregulars. També es mira de suavitzar una mica la forma. Pel que fa la posició i l'angle de doblec, es mantenen com estaven.

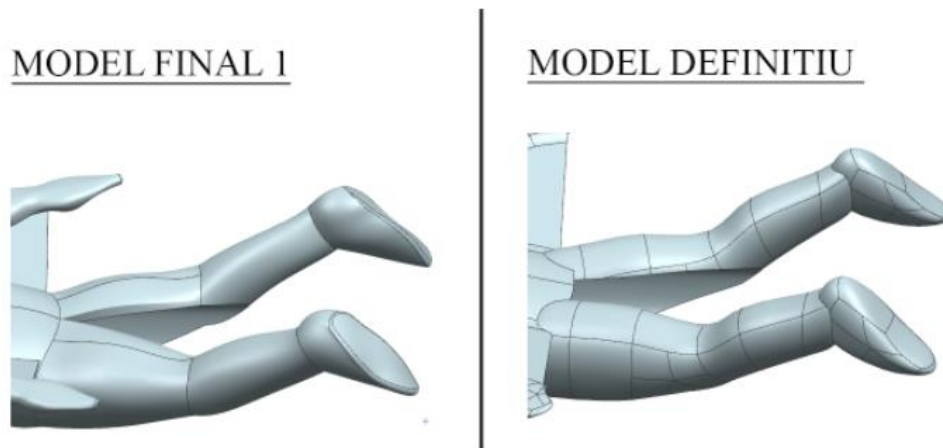


Fig. 9.12 Optimització model final, cames

Totes aquestes millores s'han anat aplicant progressivament al llarg de tres models finals, abans d'arribar al definitiu. Per cada correcció s'obtenia una millora més o menys significativa. Tot seguit es comenten els resultats de la simulació del model definitiu.

9.4. Model definitiu

9.4.1. Model definitiu primera simulació.

Per tal de comparar de forma raonable amb els altres models finals, i contrastar amb fonament els resultats, la primera simulació es realitza sota les mateixes condicions que aquests.

Per tant, la malla és senzilla i està dimensionada seguint els mateixos criteris. L'angle d'atac en la simulació torna a ser de 6° i la velocitat d'entrada del flux és de 6 metres per segon.

A la iteració número 124 el resultat convergeix.

Com sempre els resultats dels coeficients de sustentació i resistència estan calculats suposant àrees projectades unitàries, i per tant s'agafen directament els valors de les forces per comprendre el resultat.

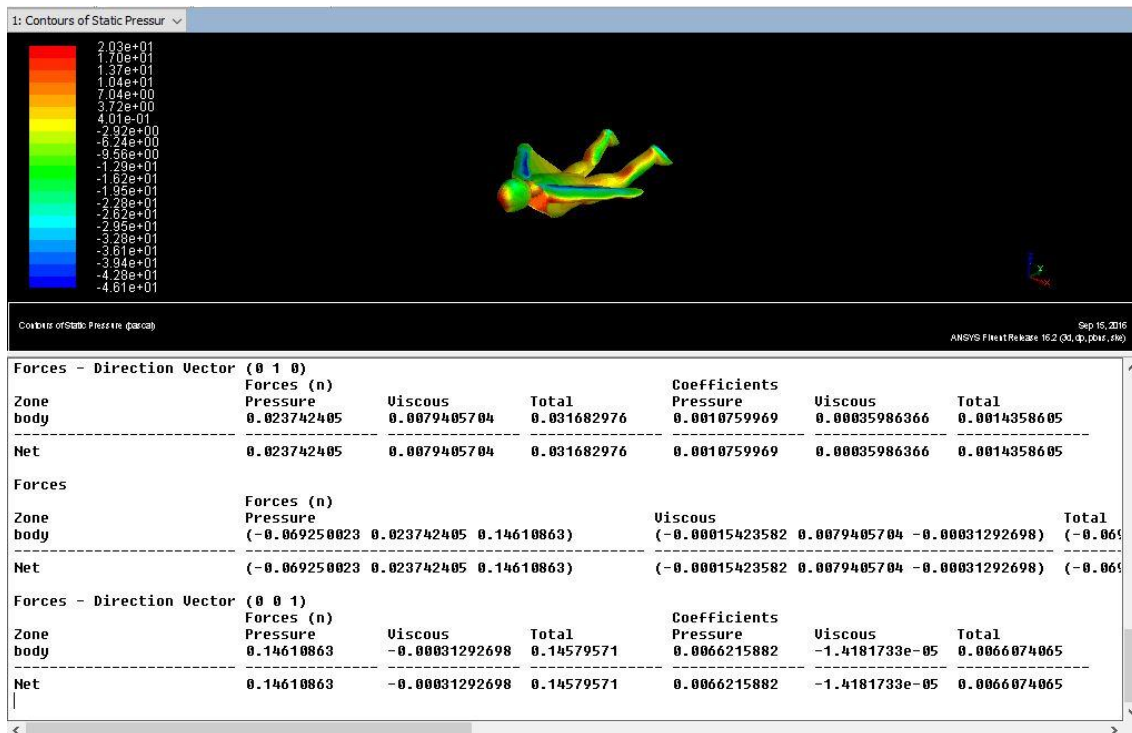
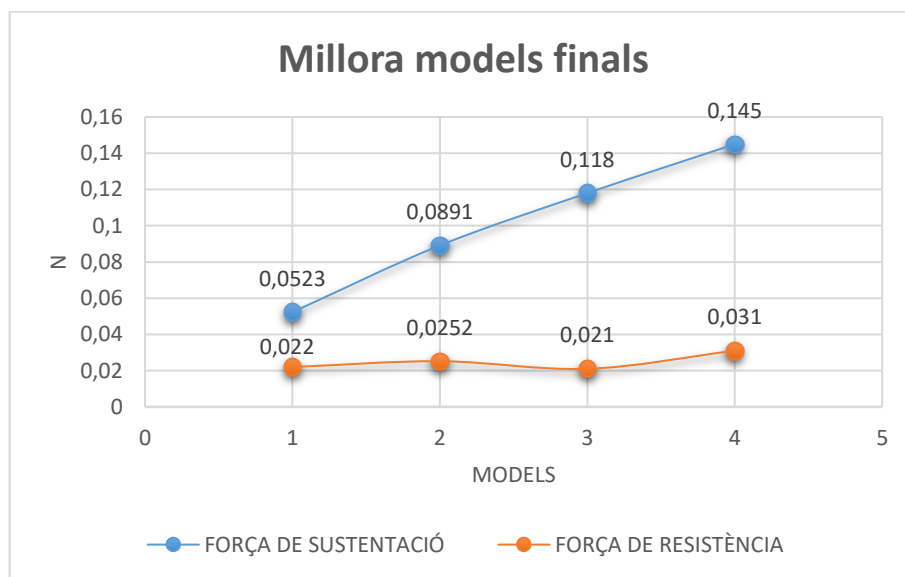


Fig. 9.13 Obtenció de forces en la simulació del model definitiu

L=0,145N ; D=0,031N

En aquest cas s'obté un prometedor resultat que indica que aquest model seria capaç de sustentar fins a gairebé 15 grams de pes, mentre que la força de resistència a l'avanç resulta ser cinc vegades més petita.

En el següent gràfic es pot observar com s'ha obtingut una millora dels resultats al llarg dels tres models finals i del definitiu.



Graf. 9.1 Millora des del model final fins el definitiu.

9.4.2. Valoració del resultat del model definitiu.

Com en els anteriors, es pren el pes teòric del disseny en CAD per tal de determinar si els resultats són vàlids. En aquest cas el volum del model és:

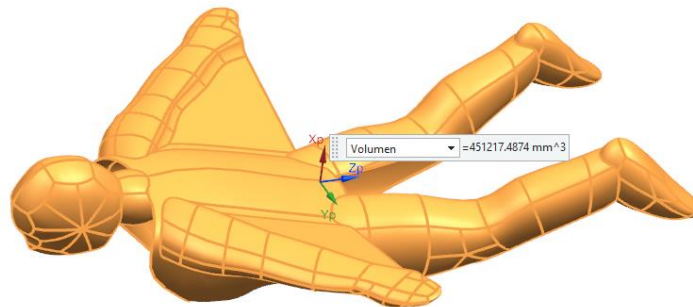


Fig. 9.14 Volum model definitiu.

Prenent el material de baixa densitat com els EPS de 35kg/m^3 es preveu un pes menys de 15,7 grams. Si es suma a l'electrònica que podria arribar a dur l'aeromodel, de 8 grams, s'arriba als 23'7 grams.

Ja que a la simulació s'ha pres el valor crític de velocitat de 6 metres per segon, i s'entén que la força de sustentació pot arribar a augmentar un 70% si la velocitat fos de 8m/s , es dona el resultat com a vàlid, ja que en aquest segon cas la força de sustentació podria arribar als $0,24\text{N}$, i per tant aixecar fins a 24 grams.

A més a més, s'obté el pes del model prenent-lo com un cos massís. En cas de ser laminar amb un gruix d'uns 3 mil·límetres de mitjana, el càlcul quedaria:

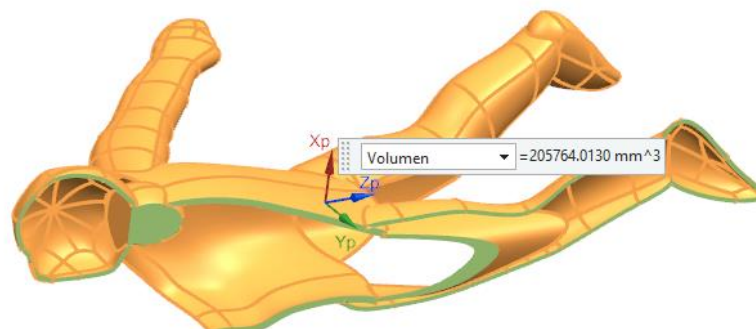


Fig. 9.15 Volum del model definitiu després de laminar-lo

En aquest cas, el pes del model seria d'uns 7 grams, i sumat a l'electrònica, aproximadament 15 grams.

Per tant és dona el model per bó i es tanca la fase d'optimització del disseny.

9.4.3. Refinament malla model definitiu.

L'últim pas en la fase de simulació consisteix en verificar el resultat fent ús de malles més refinades i contrastar el nou resultat amb els anteriors, fins observar-ne una convergència.

Simplement s'ha de dimensionar la malla amb elements més petits, tot i que això pot provocar divergències en la simulació posterior i s'ha de vigilar.

La malla més complexa que s'ha arribat a dissenyar en aquesta fase constava de les següents característiques.

Dimensionat general de la malla, element de 0,2m i refinament al voltant del cos de $5 \cdot 10^{-4}$, amb ratis de creixement de 1.

Details of "Body Sizing" - Sizing		Details of "Inflation" - Inflation	
Scope		Scope	
Scoping Method	Geometry Selection	Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body	Geometry	1 Body
Definition		Definition	
Suppressed	No	Suppressed	No
Type	Element Size	Boundary Scoping Method	Geometry Selection
<input type="checkbox"/> Element Size	0,2 m	Boundary	156 Faces
Behavior	Soft	Inflation Option	First Layer Thickness
<input type="checkbox"/> Curvature Normal Angle	Default	<input type="checkbox"/> First Layer Height	5,e-004 m
<input type="checkbox"/> Growth Rate	Default	<input type="checkbox"/> Maximum Layers	5
<input type="checkbox"/> Local Min Size	Default (4,6533e-004 m)	<input type="checkbox"/> Growth Rate	1

Fig. 9.16 Dimensionament i inflació de la malla refinada del model definitiu

Amb la malla parametritzada d'aquesta manera, es pot observar un detall molt més acurat al voltant de les cares del model.

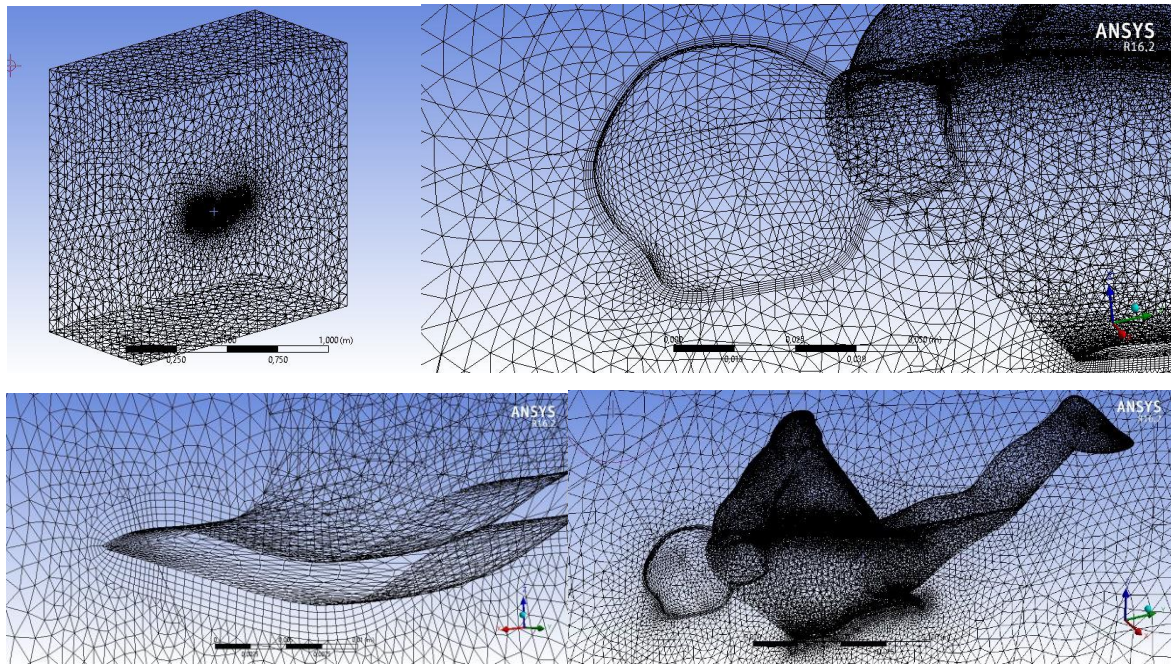


Fig. 9.17 Malla refinada del model definitiu

9.4.4. Última simulació model definitiu.

Amb la malla refinada, es procedeix a fer les últimes simulacions, fins que el resultat convergeixi. En aquest cas, se'n fan dues, a part de la primera malla no refinada.

La última, que conté la malla més detallada fins el moment, convergeix a la iteració 215, amb aquests resultats de forces.

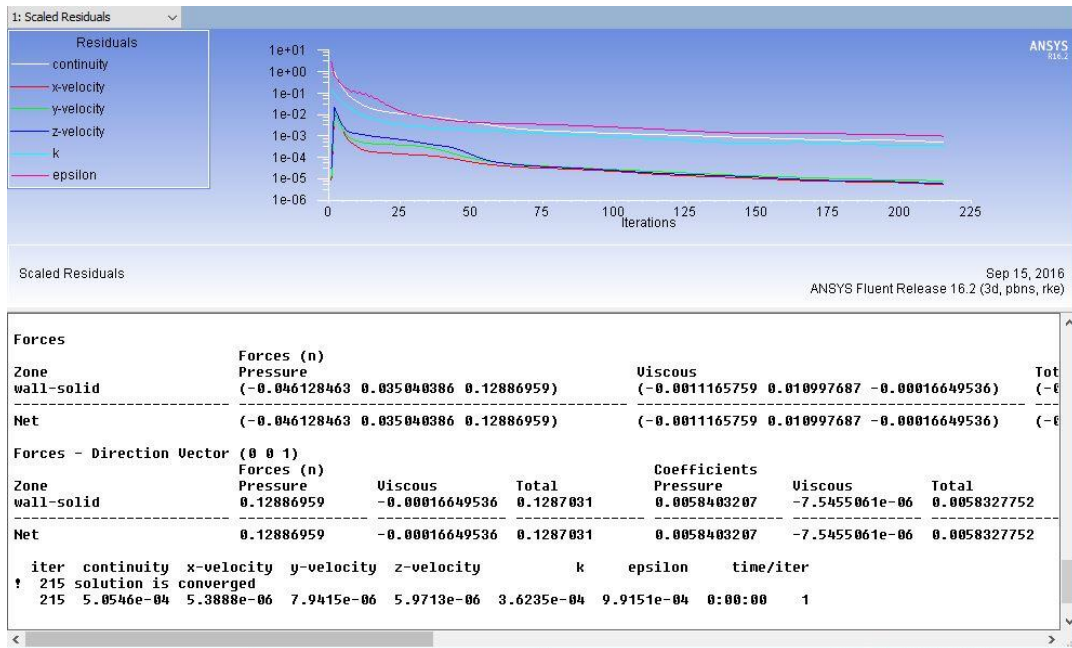


Fig. 9.18 Convergència model definitiu, malla refinada

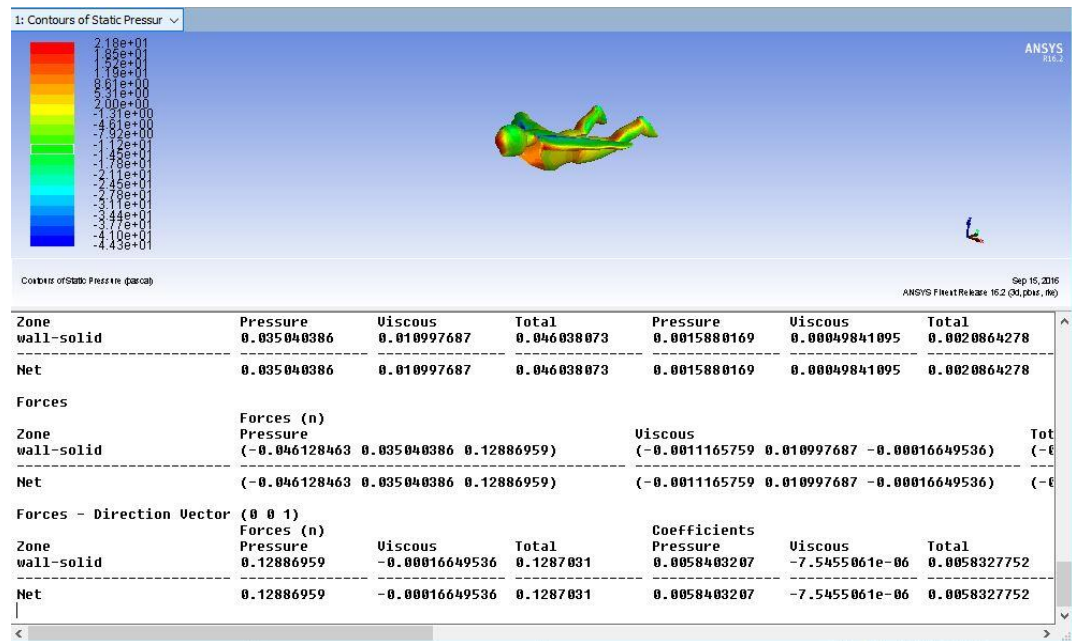
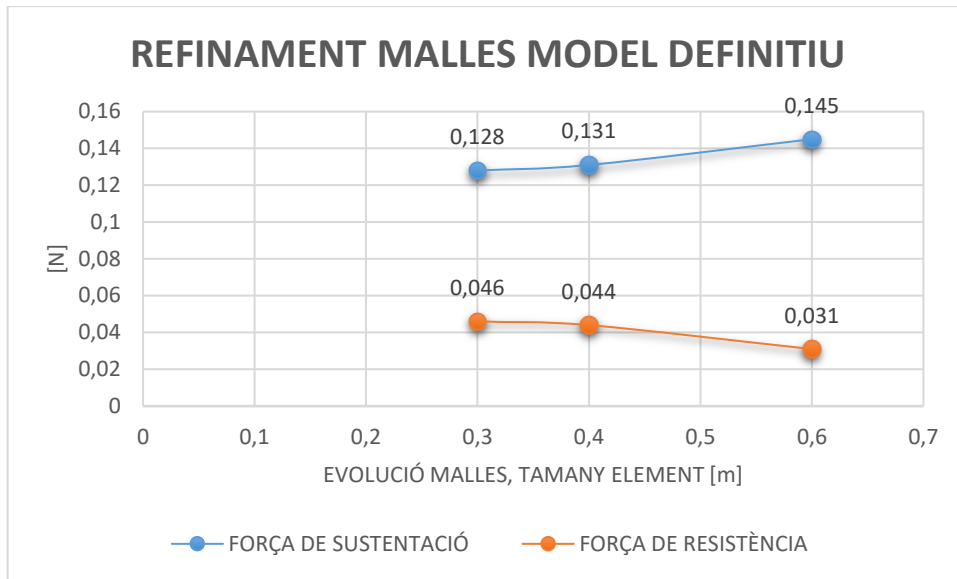


Fig. 9.19 Forces obtingudes de la simulació definitiva

FL=0,128N ; FD=0,046N

Malauradament els resultats han empitjorat respecte la simulació de malla estàndard. No obstant es prenen com a bons, doncs es considera que convergeixen al no diferir massa dels obtinguts amb l'anterior refinament de malla, tal i com es pot observar.



Graf. 9.2 Convergència dels valors de força de sustentació en funció del refinament de la malla

Així doncs es prenen com a bons aquests últims resultats, donant per tancada la fase de simulació. A continuació es poden observar contorns de pressions i perfils de velocitats del model definitiu i la seva última simulació.

9.4.5. Contorn de pressions model definitiu

S'observa que encara hi ha alguns aspectes per millorar, però alguns d'ells entrarien en conflicte amb la pauta de prioritats de l'apartat 7.1, i per tant es deixen com estan, tot i que es podrien tenir en compte en treballs futurs.

Els punts d'estancament tenen bastanta presència, però l'efecte de gradient de pressions entre la part inferior i la superior és força evident.

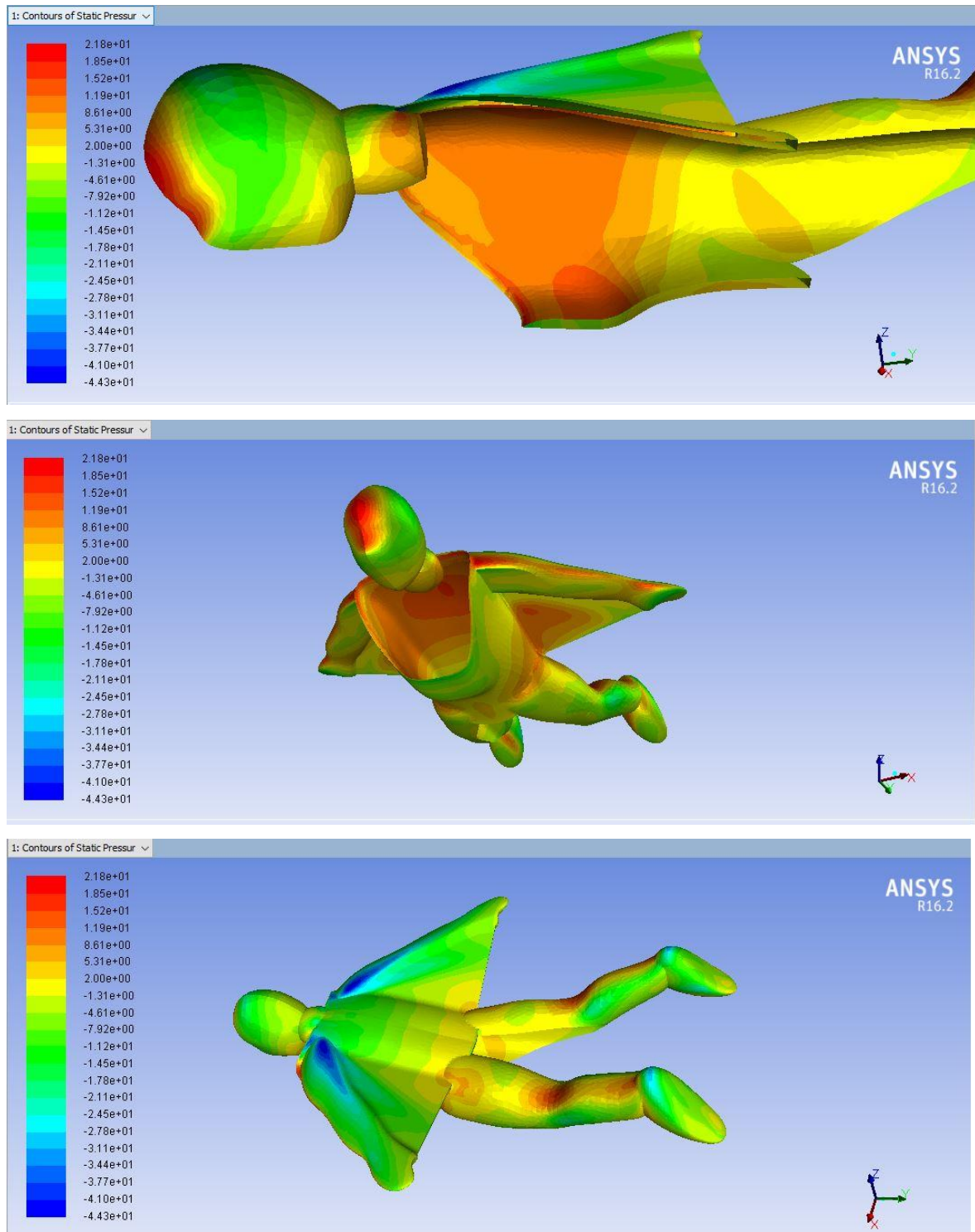


Fig. 9.20 Contorn de pressions model definitiu, malla final.

9.4.6. Perfil de velocitats model definitiu

El perfil de velocitats tampoc és perfecte, ja que s'observen turbulències que podrien causar inestabilitat en el model – just després del coll – a més de possibles desprendiments de la capa límit, a la zona dels peus o sota els alerons.

No obstant a la secció de tall del braç s'observa com el flux s'accelera i es fa més lent de forma adequada al voltant del braç i l'aleró.

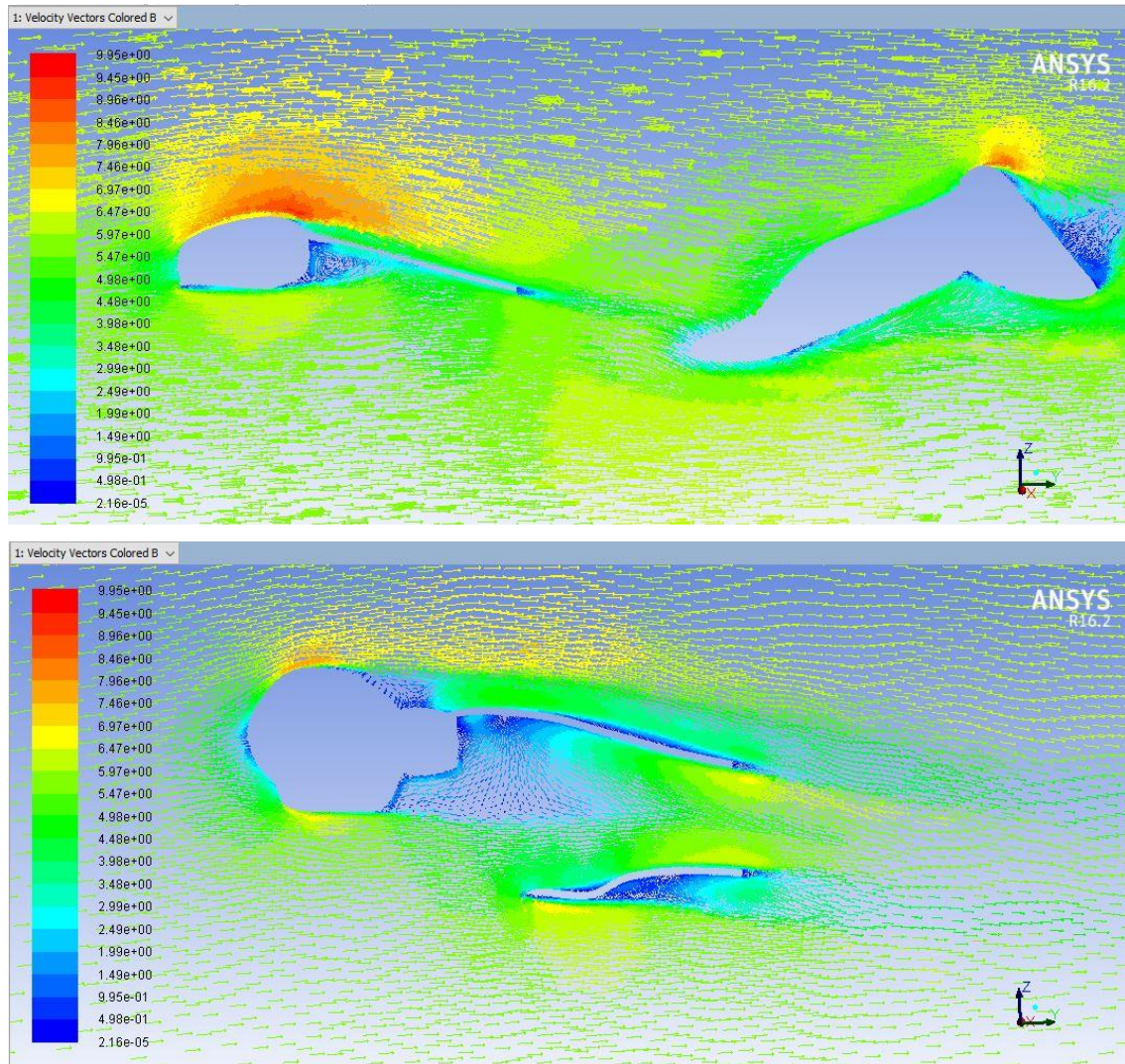


Fig. 9.21 Perfil de velocitats del model definitiu, malla final.

10. FASE DE FABRICACIÓ.

En aquest punt s'inicia un remodelat sobre el disseny definitiu en CAD per tal de fer-lo viable per a confeccionar un prototip de EPS. Ja que la possibilitat de crear un motlle i injectar el material es considera inviable a nivell particular, s'opta per contemplar el control numèric o l'anomenat tall en CNC per a desenvolupar el model.

Tenint en compte que el control numèric no permet fer cavitats de doble curvatura per dins els model massís, es modifica el disseny CAD per obtenir peces susceptibles d'aquest mètode.

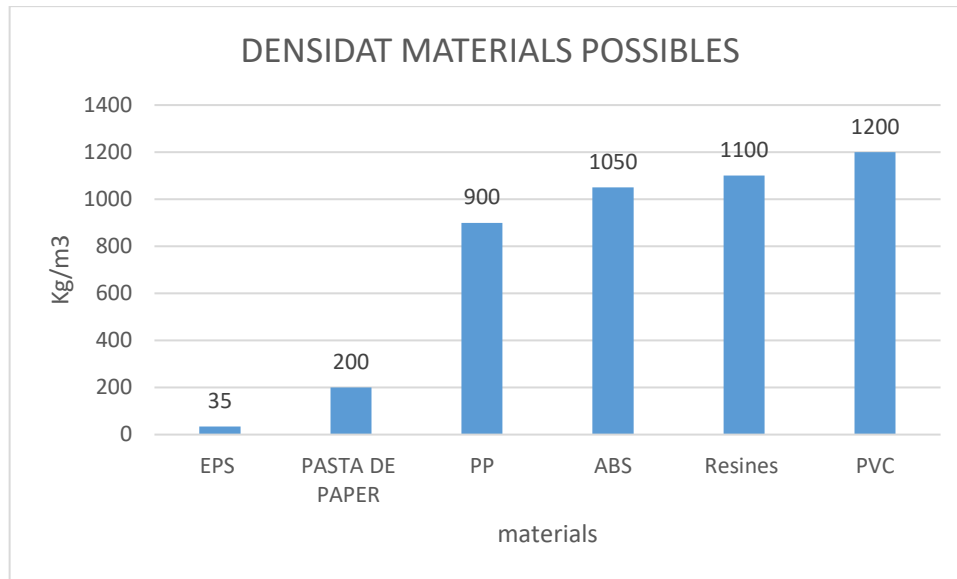
No obstant en aquesta fase no es troba aquest proveïdor disposat a dur a terme un projecte d'aquestes característiques, ja sigui per la seva dificultat o perquè no interessa per la seva condició de projecte particular.

S'haurà de ser creatiu si es vol dur a terme la fase de prototipatge i les posteriors proves de vol.

10.1. Alternatives per al prototip.

Després d'analitzar la problemàtica en profunditat, només s'arriba a una possible via per tal de confeccionar un prototip: fer ús d'un sistema rudimentari però conegut en el món de les manualitats.

Aquest consisteix en fer ús d'una mescla a parts iguals de cola blanca i aigua, que barrejada amb paper absorbent, dóna lloc a una pasta moldejable i versàtil, força dura i resistent quan s'endureix. Aquest material resultant es testeja per tal de calcular-ne la densitat aproximada, i s'obté un valor de 200kg/m³. Tot i que és sis vegades més elevat que el EPS que es volia utilitzar, segueix estant molt per sota de la densitat de qualsevol plàstic amb el que s'hagués pogut confeccionar, que ronden tots els entre els 900 i 1200 kg per metre cúbic.



Graf. 10.1 Densitat de diferents materials

10.2. Procés de fabricació

Per simular exactament la mateixa forma del disseny fent ús d'aquest material es necessita una rèplica del mateix en plàstic. Se n'imprimeix una amb tecnologia 3D contactant amb una empresa exterior i s'obté un model de poliamida.



Graf. 10.2 Model definitiu de poliamida

Damunt d'aquest model es van disposant làmines de la pasta de paper fins a cobrir-lo sencer. Un cop endurit, s'extrauen fent-ne un tall i separant-les amb suavitat. Després s'han d'enganxar

amb la màxima exactitud entre elles. És un procés complicat, llarg i tediós – d'unes 10 hores entre tot – i a més el model no resulta del tot exacte.



Fig. 10.1 Diferents imatges de les fases del llarg procés de confecció del prototip de pasta de paper.

A més a més, el primer model que s'obté amb aquesta metodologia pesa més de 40grams. Es repeteix i es millora el procés quatre vegades fins a aconseguir-ne un de només 19 grams.



Fig. 10.2 Intents fallits d'obtenir un model lleuger.

Per als alerons dels braços, es fa ús d'una làmina de blister, un policarbonat transparent i lleuger.

El resultat és el següent:



Fig. 10.3 Model definitiu de paper, gairebé igual a la reproducció de poliamida.

10.3. Estudi d'estabilitat del prototip

Abans de prosseguir, s'ha de determinar on es troben el centre de gravetat i el centre de pressions. El centre de masses es determina empíricament, mentre que el de pressions es permès de saber gràcies al simulador de control numèric, que n'indica la posició.

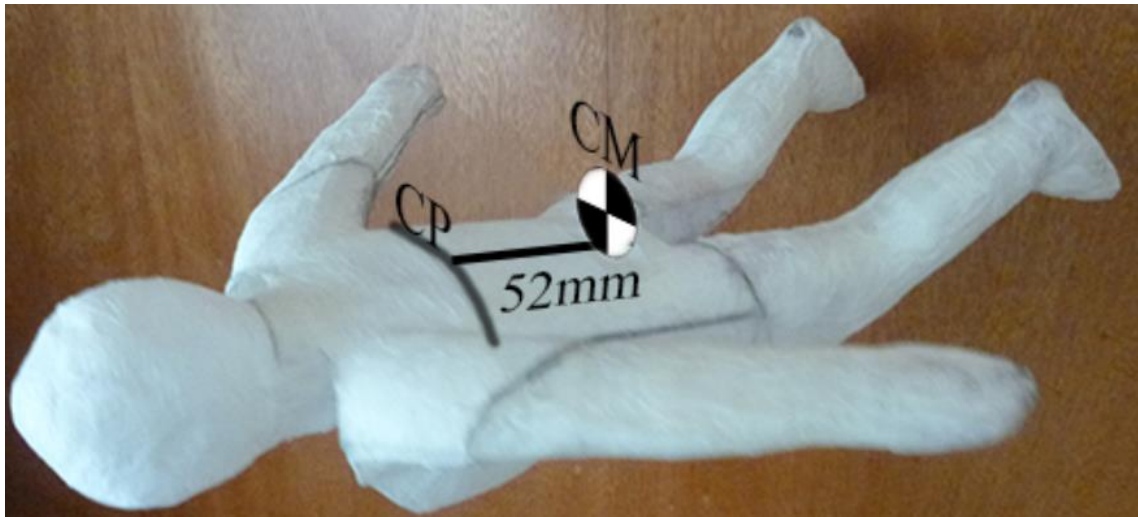


Fig. 10.4 Centre de gravetat desfasat del centre de pressions

Per a un vol correcte, com se sap dels apartats 6.4.1, cal que aquests dos punts coincideixin. Per circumstàncies difícilment controlables abans d'arribar a aquest punt, el centre de gravetat resulta trobar-se força allunyat del de pressions.

Tot i que per mantenir l'angle d'atac no deixa de ser interessant mantenir el CP per davant del CM, aquest desfasament s'ha de compensar.

Afortunadament, els elements electrònics encara s'han d'afegir, tots al davant. Es preveu que el joc que pot donar el posicionament d'alguns d'ells permetrà solucionar el problema.

10.4. Elements de l'aeromodel

10.4.1. Electrònics

Els elements electrònics són els mínims necessaris per tal de dotar l'aeromodel de la potència necessària i aconseguir la màxima velocitat possible.

10.4.2. Bateria

En aquest cas, es determina que és necessari l'ús d'una bateria de liti. La seva posició més o menys allunyada de l'extrem frontal de l'home volador ajudarà a compensar els desfasaments comentats a l'apartat anterior. A més es tractarà d'una bateria recarregable, de 7'4V.



Fig. 10.5 Bateria de liti carregable

10.4.3. Motor

El tipus de motor que es fa servir per aquest aeromodel es troba amb freqüència en aquest àmbit. Es tracta d'un d'elèctric d'imants permanents, però en aquest cas s'optimitza al màxim el seu tamany i pes per encaixar millor en la funció que se li vol atorgar. Segons el fabricant, alimentat amb 7'4V s'obtenen velocitats de fins a 70.000rpm.



Fig. 10.6 Motor elèctric *brushless*

10.4.4. Interruptor

Es fa servir un interruptor simple de dues posicions per tancar i obrir el circuit de la bateria i el motor.

10.4.5. Hèlix

Es fa servir una hèlix estandarditzada obtinguda en un establiment especialitzat. En aquest punt es fa una breu explicació del funcionament d'una hèlix per tal de fer-ne un càlcul estimat.

Les hèlix d'aeromodelisme consten de dues pales amb un angle d'incidència. Aquest sol ser entre 10° i 14° . Aquest angle d'incidència, igual que amb els perfils alar i prenent el gràfic de la figura 6.5, determina el coeficient de sustentació de l'hèlix. És a dir, aproximadament es pot considerar unitari. El model que es fa servir per al càlcul s'anomena d'ala infinita, i fa servir l'àrea projectada de l'hèlix en rotació pel càlcul. A més a més, com que la velocitat de les pales no es la mateixa al llarg del seu radi, se n'ha de prendre una de mitjana, que normalment és la tercera part del quadrat de la velocitat a la punta de la pala.

Sabent això i coneixent el radi de l'hèlix que es fa servir, es pot fer un càlcul aproximat de la potència que atorga a l'aeromodel, tenint en compte la velocitat angular aproximada del motor anterior.



Fig. 10.7 Hèlix

10.5. Càlcul teòric de la potència.

Només per obtenir un ordre de magnitud de la potència que atorguen les hèlix en un aeromodel com aquest, es fa un càlcul molt aproximat.

Amb la informació anterior i prenent el cas crític de velocitat de 25000 rpm, menys de la meitat que la que s'assegura per les prestacions del motor, s'obté la següent força d'impuls.

$$F_{\text{impuls}} = C_L \cdot \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot U_m$$

$$W = 25000 \text{ rpm} = 2500 \cdot 2 \cdot 3,14 / 60 = 2618 \text{ rad/s}$$

$$V_m = (V_{\text{pala}})^2 / 3 = (2618 \cdot 0,02)^2 / 3 = 913,8 \text{ m/s}$$

$$F_{\text{impuls}} = 1 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1,02 \cdot (0,02 \cdot 2 \cdot 3,14) \cdot 913,8 = 0,58 \text{ N}$$

El valor que s'ha calculat està clarament per sobre del que s'obté de l'última simulació de l'aeromodel, on $D=0,046 \text{ N}$.

10.6. Disseny de la peça per allotjar el motor.

Com a últim pas de confecció del prototip, s'ha de dissenyar una peça que pugui allotjar el motor i situar-ne l'eix amb l'angle correcte.

Després de diverses proves errònies, s'acaba triant el disseny més simple i optimitzat, com es mostra a continuació. Sense cap mena d'encolatge, s'acabarà enganxant al prototip amb cola instantània.

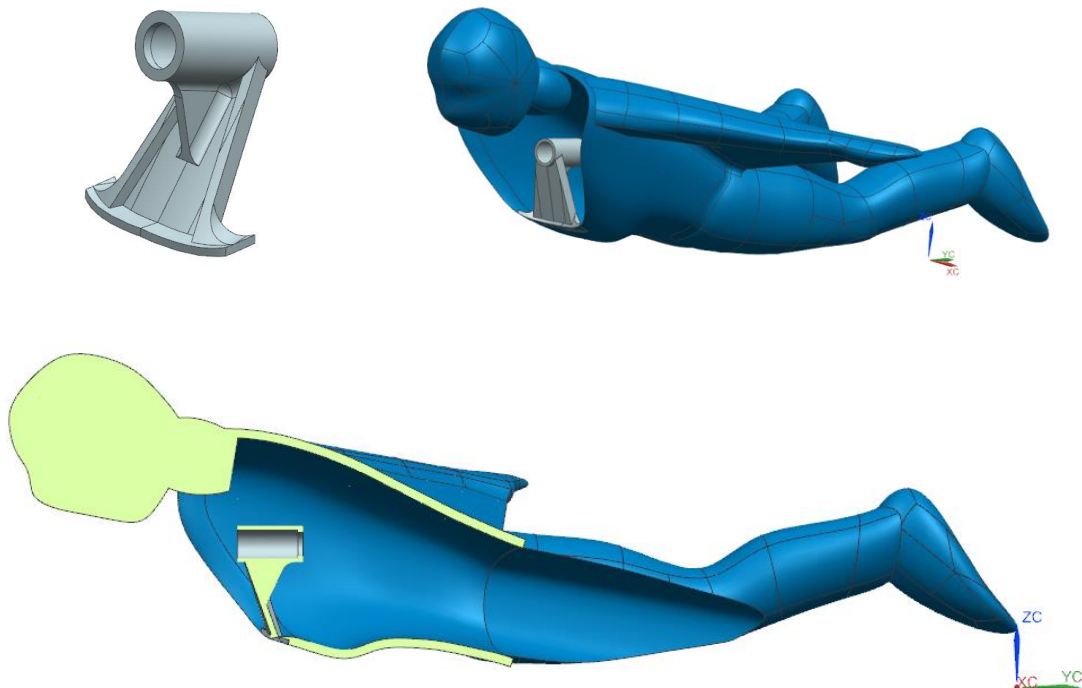


Fig. 10.8 Peça per allotjar el motor, dissenyada per treballar amb l'angle d'atac previst

10.7. Assemblatge dels elements i equilibri de l'aeromodel.

Durant l'assemblatge de tots elements esmentats en els darrers punts tindrà lloc alhora la recerca de l'equilibri de l'aeromodel.

Posicionar adequadament el centre de gravetat respecte el centre de pressions en aquestes disciplines sempre resulta complicat, encara més tractant-se d'un model tan poc usual i d'un prototip completament fet a mà. No obstant es parteix d'un equilibri més o menys estable, i fent ús com sempre de la prova i error s'haurà d'aconseguir trobar el punt just on situar els elements que compensin el pes.

Així doncs, efectivament situant la bateria de liti al cap i amb l'ajuda dels altres elements, es fa possible desplaçar el centre de masses fins al punt teòric on el simulador ha determinat que es troba el centre de pressions.

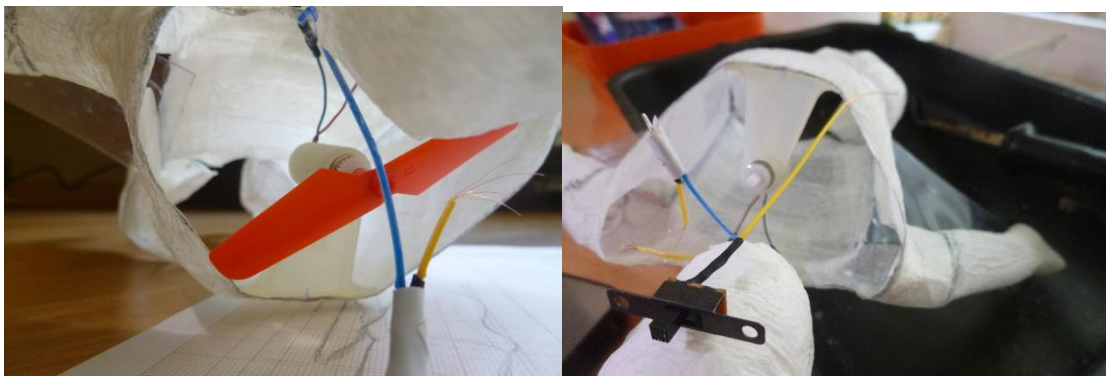


Fig. 10.9 Assemblatge de l'electrònica.

En les imatges anteriors es mostra com es deixen dos borns lliures en el cablejat del circuit, que es podran connectar i desconnectar fàcilment a la bateria, ja fixada al cap del model, per a poder-la carregar quan convingui.

10.8. Inconvenients del prototip

Amb el prototips acabat i sobre la taula, cal posar de manifest alguns dels inconvenients que d'entrada ja dificultaran l'obtenció de resultats positius en les proves de vol.

El primer és evident i es tracta del pes. Mentre que un model de EPS permetria obtenir un cos de només uns 7 grams, aquest d'entrada ja pesa quasi 20 grams. A més a més, en anticipació a

problemes per resistències paràsites degudes a la confecció manual, s'està fent ús d'elements electrònics de més potència que els que s'havien previst en un inici. En aquest cas, l'electrònica pesa en total uns 17 grams. Entre altres factors i malgrat tots els esforços, això situa el prototip menys pesat que s'aconsegueix confeccionar prop dels 40 grams.



Fig. 10.10 Pes total del prototip, gairebé doblant el previst.

Aquest pes és gairebé el doble del que s'aconseguiria sustentar en el cas òptim d'assolir una velocitat de vol de 8m/s. Recordant apartats anteriors aquesta velocitat permetria sustentar aproximadament 23 grams.

En un segon pla, com ja s'avançava, un altre problema pot ser les resistències paràsites derivades de la confecció manual i, potser, rudimentària del prototip. Les unions amb cola, els talls de paper irregulars, i altres, poden fer que l'aire s'escoli per zones inadequades de l'aeromodel i el perjudiqui. Si fos el cas, aquestes resistències podrien donar lloc a problemes d'estabilitat.

Pel control de la guinyada no es pot fer gaire més que treballar amb el màxim d'exactitud i paciència possibles la confecció de l'aeromodel, i no obstant es preveuen girs no desitjats del mateix. Pel que fa l'alabeig, tot i que no estava previst en el disseny inicial, es dota a l'estructura alar dels alerons d'un petit angle en forma de V, per incentivar-ne l'estabilitat. Es pot observar lleugerament a la següent fotografia.

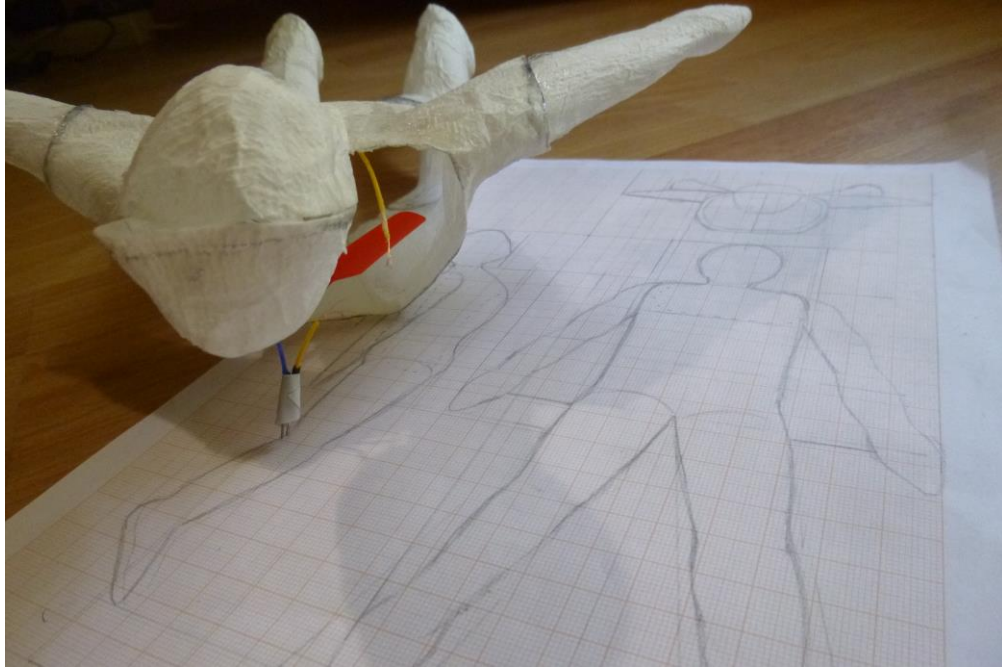


Fig. 10.11 Prototip acabat.

Tot i els problemes que prèviament ja es considera que poden tenir lloc, es tira endavant amb les proves de vol. No obstant, ja que no s'ha aconseguit respectar la barrera del pes, tampoc s'esperarà obtenir un vol com l'especificat. En qualsevol cas, el que si s'espera es poder observar un vol que, tot i descendent, sigui prou estable i compleixi amb uns mínims per tal de determinar, finalment, si el disseny elaborat és bo o no.

10.9. Càlcul empíric de la velocitat.

Com a última prova abans de començar a testejar el vol, es mira de determinar de forma experimental quina velocitat es capaç d'assolir el model confeccionat.

La prova és molt bàsica. Amb l'aeromodel lligat d'un cordill en el seu punt d'equilibri i amb un petit contrapès al braç esquerra, s'engega el motor i es deixa que l'aeromodel doni voltes segons el radi del fil al que està lligat.

Com que aquest fil fa aproximadament 1,3 metres i s'observa que fa una volta per segon, es pot afirmar que assoleix velocitats de fins a 8m/s.



Fig. 10.12 Càlcul de la velocitat lineal amb un senzill experiment.

11. PROVES DE VOL

El funcionament és senzill. En el prototip, el model tan sols consta d'un interruptor per tal d'obrir i tancar el circuit a voluntat.

No obstant s'ha d'admetre que es requereix de certa destresa per llençar un model d'aquest tipus. S'ha de vigilar de no dotar-lo des de l'inici del vol de posicions inadequades i inestables. En cas contrari el model simplement caurà en picat o entrarà en pèrdua. Per tant, cada modificació requereix de certs tirs i proves per determinar-ne les carències. Els criteris per modificar l'aeromodel segons cada resultats també són senzills.

En cas que es determini que el model entra en pèrdua, voldrà dir que el centre de masses es troba massa per darrere del centre de pressions. En aquest cas es desplaçarà la bateria més a l'extrem del cap del model fins a compensar el desfasament.

En cas que el model entri en picat constantment, significarà que el centre de gravetat es troba massa per davant del centre de pressions. En aquest cas com resulta evident s'haurà de fer retrocedir la posició de la bateria.

En cas d'alabejos excessius que facin caure el model de costat, normalment seguit d'una entrada en pèrdua, requerirà compensar pesos amb els braços. En aquest cas malauradament tan sols es pot compensar afegint pes en un dels dos extrems. No obstant, si aquest pes es situa a la mà, l'efecte palanca permet que aquest sigui mínim i compensar més fàcilment l'equilibri.

Amb tota aquesta informació present, tenen lloc nombroses proves de vol. Al principi en tots el casos es fa la prova sense una alçada inicial important, tan sols la que proporcioni el llançador, aproximadament 2 metres.

11.1. Criteris d'avaluació de les proves.

En referència als inconvenients esmentats a l'apartat 10.8 els criteris d'avaluació del vol del prototip hauran de ser menys restrictius que els que s'esperaven a les especificacions.

Així doncs, l'home volador haurà d'avançar almenys 10 metres durant els quals només n'hauria de descendir 2 metres, com a molt. Això vol dir que llençat des de l'alçada d'una persona haurà d'aterrar 10 metres endavant aproximadament. A més, s'haurà d'observar un vol estable i equilibrat que demostrï que el disseny és adequat per a realitzar vols.

11.2. Resultats proves

Es fan fins a 16 proves, realitzades des de la posició que s'observa a la fotografia, en aquest cas un desequilibri excessiu cap a l'esquerra fa caure l'aeromodel només dos metres després de ser llençat.



Fig. 11.1 Una de les primeres de proves de vol fallides.

Totes aquestes proves comporten també nombroses reparacions de l'aeromodel, fins que finalment es decideix fer-ne des d'una alçada prèvia d'uns 7 metres. Finalment i després dels ajustaments pertinents s'obté un vol que es considera suficient per a valorar els resultats del disseny.

11.3. Valoració dels resultats

A la prova número 19 s'obté un vol que, tot i descendent, permet observar un comportament correcte de l'aeromodel testejat.

Com ja s'ha dit, es llença des d'una alçada de 7 metres, sense cap impuls inicial importants a part del que ja ofereix la hèlix. L'home volador recorre fins a 8 metres i descendeix tan sols un metre, tot això mantenint-se en posició estable.

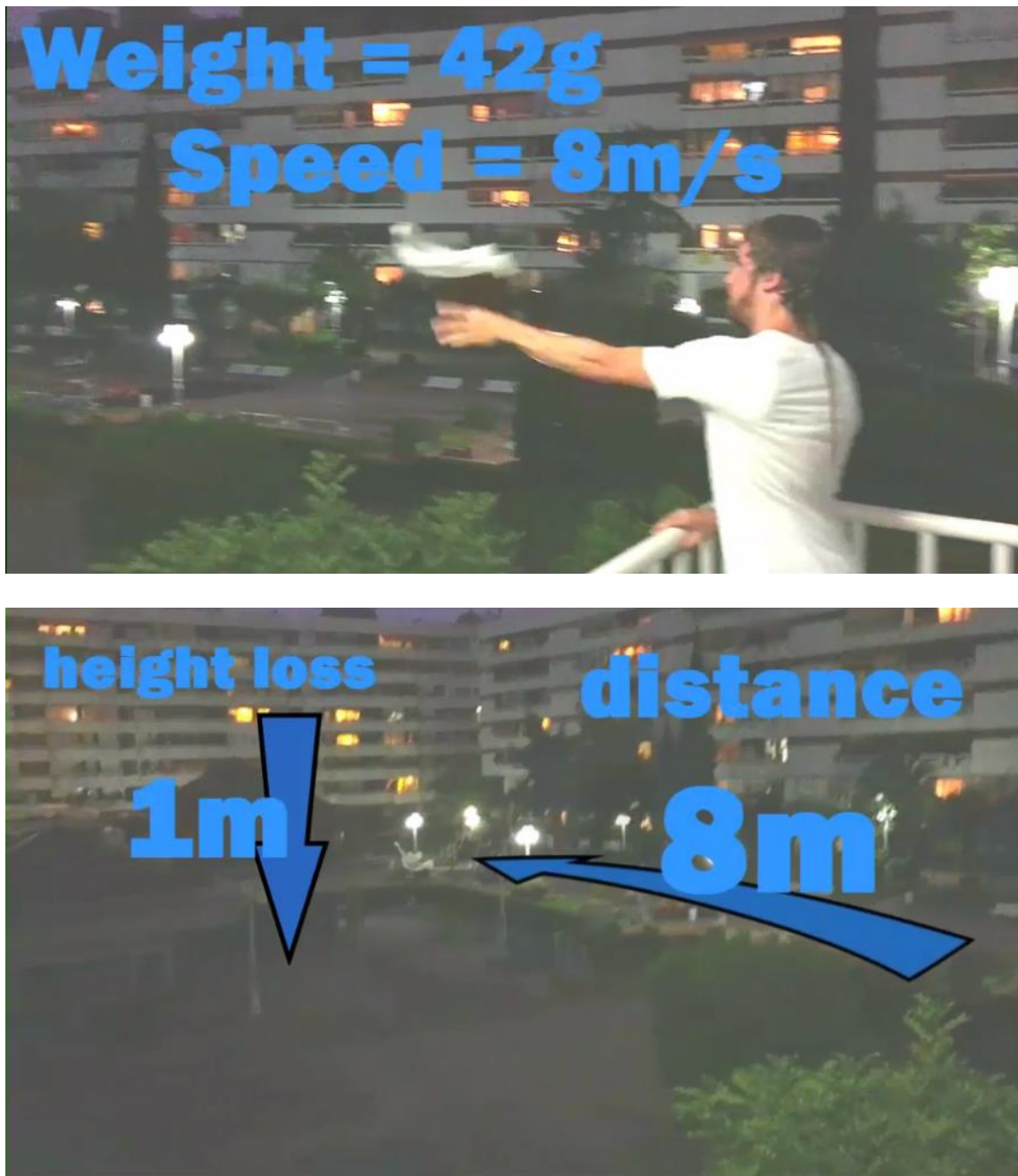


Fig. 11.2 Captures de pantalla del vídeo del vol exitós.

Tot seguit, degut a una petita pertorbació durant el vol, ja sigui per una brisa o per condicions inherents del prototip imperfecte, el model es desestabilitza i cau durant 4 metres en actitud de picat.



Fig. 11.3 Captura de pantalla del vídeo del vol exitós.

No obstant l'aeromodel sorprèn al establitzar-se de nou poc abans de tocar el terra. Tot i que ja està lluny i costa de mostrar, el vol segueix estable durant 7 metres o més, durant els quals en descendeix poc més d'un.





Fig. 11.4 Captures de pantalla del vídeo del vol exitós, vol estabilitzat abans d'arribar a terra.

En total, són uns 28 metres de vol, durant els quals descendeix gairebé 7 metres. Si es deixa de banda el moment de desestabilització, durant el qual el pes excessiu causa una caiguda més pronunciada, es pot considerar que es tracta d'un vol estable.

Com que és un prototip d'elevat pes, no es contraposa a les especificacions de forma exigent. Pel que feia les especificacions tècniques, es demanava que l'aeromodel realitzés almenys 20 metres de vol sense necessitat de guanyar alçada en el tir. En aquest cas i tenint en compte que el pes dobla el previst, es considera que un model degudament confeccionat i amb el material adequat compliria amb aquests mínims.

Posteriorment es valoraran de forma més profunda tots els aspectes que engloba i demana un projecte d'aquest tipus, ja que a continuació encara es presenten algunes possibles solucions que millorarien el disseny tal i com s'ha presentat fins aquest punt.

12. PRODUCCIÓ

12.1. Possible producció i cotització

El model ha complert amb uns mínims que permeten determinar la validesa del disseny. No obstant, ha resultat impossible construir-ne un a nivell particular que compleixi amb les exigències de pes i que gaudeixi d'una geometria perfectament simètrica i exacte. Per tant resulta alhora impossible demostrar totes les especificacions esmentades al principi d'aquesta memòria.

Tot i això, a continuació es proposa un model de joguina que seria susceptible de producció en mans dels fabricants adequats. Aquest model compliria amb els límits de pes marcats pel disseny. Tanmateix se'n fa una estimació del cost tenint en compte tots els seus elements.

12.1.1. Elements del model

Tot seguit es pot veure un explotat de les peces que formarien la joguina de l'home volador. Totes elles s'han pensat per a que es puguin extreure d'un hipotètic motllo.

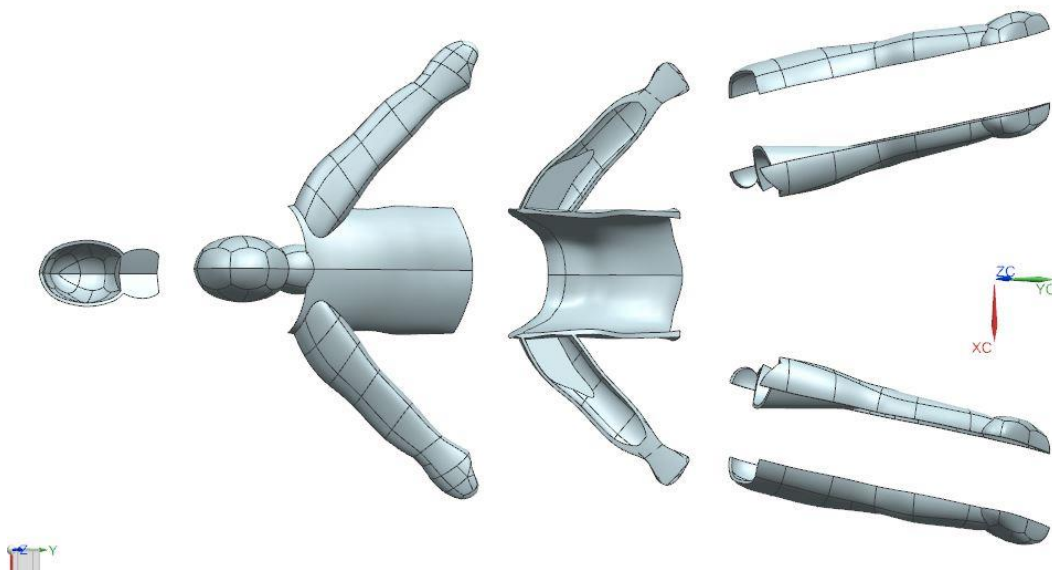


Fig. 12.1 Explotat de peces dissenyades per a sortir de motlles de producció.

12.1.2. Recull de peces

A partir de les mateixes es pot assignar un cost per a cada element o procés durant l'assemblatge i empaquetat. S'han fet servir com a referència valors coneguts d'altres productes del sector de la joguina.

12.1.3. Desglossament cost del producte

PRODUCT COST	Cost (uds)
packaging	1,15
decoració	0,101
plàstic	0,2161
electrònica	0,72
altres	0,3
ENSAMBLATGE	
muntatge	0,3
TOTAL	2,7871

TASES	Cost (uds)
tassa de defectes	2,898584
cost operacional	3,014527
marge fabricant	3,31598
transport FOB	TOTAL 0,36
TOTAL	3,676

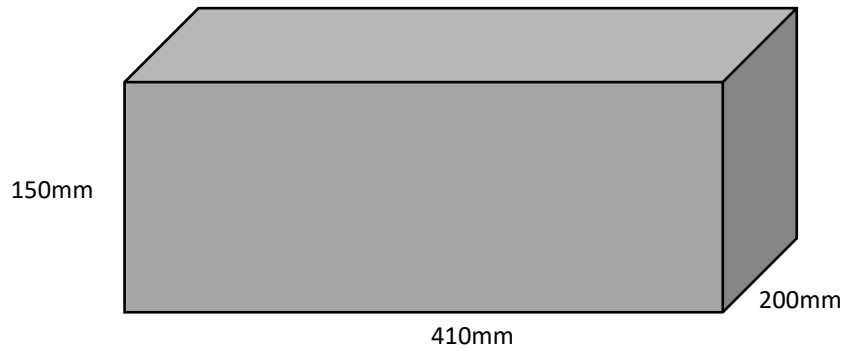
INVERSIO	cost (uds)
inversió motlles	15.000
inversió IC	2.000

Taula 12.1. Costos per elements, aplicació de tasses, i inversió de motlles.

12.1.3.1. Packaging

Suposa el cost de l'embalatge del producte, tant la seva caixa del punt de venda com la que s'utilitza per distribució. S'assumeixen unes mides de 400x110x200 mm per al càlcul, i es fa servir una taula de costos conegut de diferents fabricants per aproximar-ne el valor.

Component	Descripció	Material	Unitats	Pes	Preu unitari	Preu total
open box	caixa oberta del punt de venda	cartó	1	-	0,85	0,85
insert carton	material de la caixa	cartó	1	-	0,1	0,1
export carton	caixa de distribució	cartó	1	-	0,2	0,2
TOTAL						1,15



Rótulos de fila	Valores Promedio PRICE/M2	de Desvest de PRICE/M2
BLISTER BOX	2,852302151	0,602687358
CHUNT TAT 10067	2,943706416	0,786895365
SINO RATE 10046	2,865230702	0,493735486
TSUN TAT 10353	2,447899438	#DIV/0!
CDU	0,314697038	0,076384877
TSUN TAT 10353	0,314697038	0,076384877
CLOSED BOX	1,529139592	0,664220218
CHUNT TAT 10067	1,716357929	0,596639682
PANLEY	1,578843497	#DIV/0!
SINO RATE 10046	1,704780861	0,27998337
TSUN TAT 10353	0,19206146	#DIV/0!
OPEN BOX	2,002550056	0,728941373
CHUNT TAT 10067	2,449949148	0,419062194
HENG SHENG	1,086575535	#DIV/0!
SINO RATE 10046	1,76331498	0,576589495
TSUN TAT 10353	1,804974209	1,248734161
WINDOW BOX	2,960377907	1,241180257
CHUNT TAT 10067	4,354985126	1,760016211
DOLL DAK 10357	2,558469128	1,955716784
SINO RATE 10046	2,371600737	0,472061085
TSUN TAT 10353	3,395491611	0,251227081
WELL POWER	2,798381659	#DIV/0!
Total general	2,30161173	1,181388721

x	y	z
410	200	150
surface	price	
0,347	0,8675	

12.1.3.2. Decoració

Es considera que el producte serà decorat amb diferents com làmines de blister o diferents pintures de esprai.

Component	Descripció	Material	Unitats	Pes	Preu unitari	Preu total
blister	làmines de blister		1	-	0,08	0,08
paint	pintures		3	-	0,007	0,021
TOTAL						0,101

12.1.3.3. Plàstic

Es computen els costos del propi material de EPS o de polipropilè en el cas de la peça del motor. També s'han de tenir en compte els costos d'injecció, calculats segons diferents aproximacions de la màquina, la seva capacitat i temps d'acció.

Component	Descripció	Material	Unitats	Pes	Preu unitari	Preu total
RIGHT OUT LEG		EPS	1	1	1,5	0,0015
RIGHT IN LEG		EPS	1	1	1,5	0,0015
LEFT OUT LEG		EPS	1	1	1,5	0,0015
LEFT IN LEG		EPS	1	1	1,5	0,0015
BODY UP		EPS	1	1	1,5	0,0015
BODY DOWN		EPS	1	1	1,5	0,0015
HEAD		EPS	1	1	1,5	0,0015
MOTOR PIECE		PP	1	2,8	2	0,0056
TOTAL						0,0161

Motllos	Descripció	material	cavitats	unitats	cicle	tipus	cost	cost total
Motllo1	RIGHT OUT LEG RIGHT IN LEG LEFT OUT LEG LEFT IN LEG HEAD	EPS	1	1	100	100T	6	0,06
Motllo2	BODY UP BODY DOWN	EPS	1	1	100	100T	6	0,06
Motllo3	MOTOR PIECE	PP	1	1	100	100T	8	0,08
TOTAL								0,2
TOTAL								0,22

12.1.3.4. Electrònica

En aquest cas s'afegeix el cost d'un petit microprocessador senzill que podria implementar algun programa que governés el motor.

Component	Descripció	Material	Unitats	Pes	Preu unitari	Preu total
MOTOR		-	1	-	0,3	0,3
BATTERY		-	1	-	0,3	0,3
SWITCH		-	1	-	0,1	0,1
IC		-	1	-	0,02	0,02
TOTAL						0,72

12.1.3.5. Altres

Finalment es comptabilitzen altres possibles elements, com la hèlix adquirida al mercat obert o la cola que s'usi per a l'assemblatge.

Component	Descripció	Material	Unitats	Pes	Preu unitari	Preu total
HELIX	open market helix	plastic	1	-	0,2	0,2
glue	assembly glue	glue	1	-	0,1	0,1
TOTAL						0,3

PREU DE MERCAT

Per experiència pròpia en el sector, es coneix que els costos de mercat acaben incrementant unes 6 vegades el seu valor quan arriben a punt de venda. Així doncs amb les dades anteriors s'obté.

PREU DE MERCAT	Cost * 6
PVP (UDS)	22,05588058
PVP (€)	17,64 €

Així doncs es determina un preu de mercat molt inferior al màxim que es demanava a les especificacions, de 50€.

12.2. Possibles treballs futurs per al model de producció

Teòricament el model presentat en el punt anterior seria vàlid per complir amb la majoria d'especificacions. Tot i això no es volen deixar de banda algunes recomanacions de la normativa de joguines, comentades a l'apartat 2 de normativa, ni algunes altres exigències que s'esmentaven a la descripció del projecte.

12.2.1. Vols circulars

A l'inici de la memòria es comentava que el disseny permetria descriure trajectòries a l'aire segons el desig de l'usuari. Tot i que això no seria possible durant el vol, si que es pot jugar amb la geometria de l'home volador, de manera que l'usuari pugui triar si vol efectuar vols rectes o més circulars.

Es tractaria de jugar amb la capacitat de viratge de la joguina en el aire, afegint algun mètode que alteri la simetria dels seus elements pel que fa la resistència de l'avanç. Així s'aconseguiria un petit efecte de guinyada.

Una manera simple de dur a terme aquest propòsit, sense alterar molt el disseny inicial, podria consistir en articular les cames de la joguina voladora per la zona dels genolls.

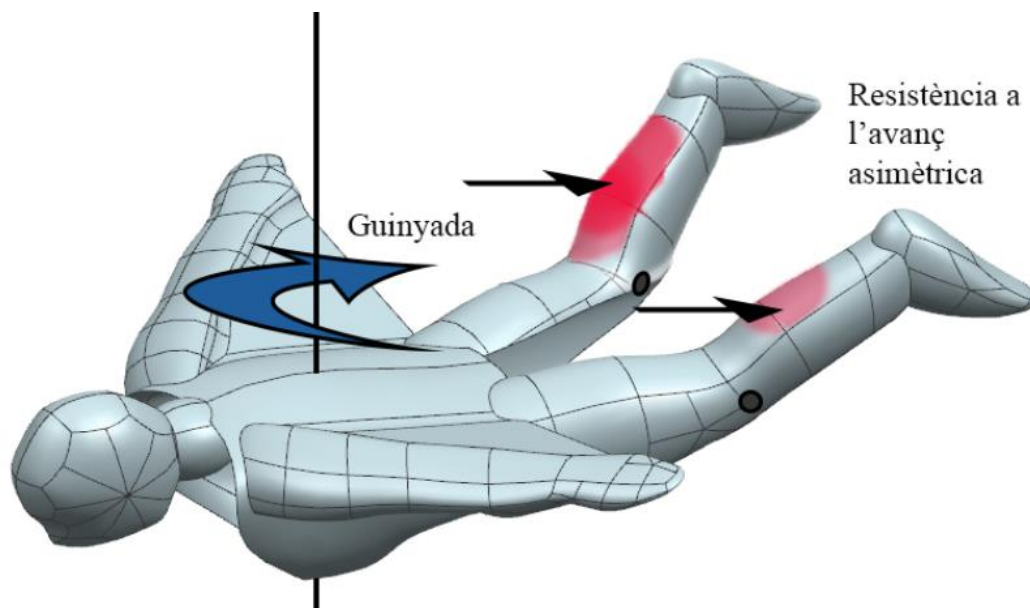


Fig. 12.2 Idea per obtenir vols circulars

No obstant aquestes articulacions haurien de ser força rígides per tal d'evitar-ne el moviment indesitjat durant el vol, que podria causar greus inestabilitats i alteracions.

12.2.2. Element de seguretat

Amb el disseny presentat fins el moment l'accessibilitat a la hèlix és directa. A més a més, val a dir que tal i com s'ha plantejat no seria un model radiocontrolat. Per tant s'entén que aquest serà sostingut per l'usuari per posar-lo en marxa, i per tant hi haurà un moment de coincidència durant el qual el llançador el tindrà a la mà i l'hèlix rotarà amb tota la seva potència.

Aquest producte doncs comportarà certs perills per a l'usuari, i tot seguit es fan un parell de propostes, que estudiades amb profunditat podrien pal·liar els efectes negatius inherents al disseny i funcionalitat de l'home volador.

12.2.2.1. Fixació de l'hèlix

En cas que l'usuari interfereixi amb la rotació de l'hèlix, aquesta haurà de saltar de l'eix del motor abans de causar danys importants com talls. Aquest efecte es pot induir simplement amb la fixació adequada d'aquest element al motor. Un encaix poc rígid i un eix del motor més curt hi ajudarien.

12.2.2.2. Xarxa de seguretat.

Afegir algun element extra de poc pes i que impossibiliti l'accés a l'hèlix també podria ser una opció a considerar si el producte es duagués al mercat. A la següent imatge es mostra un exemple.

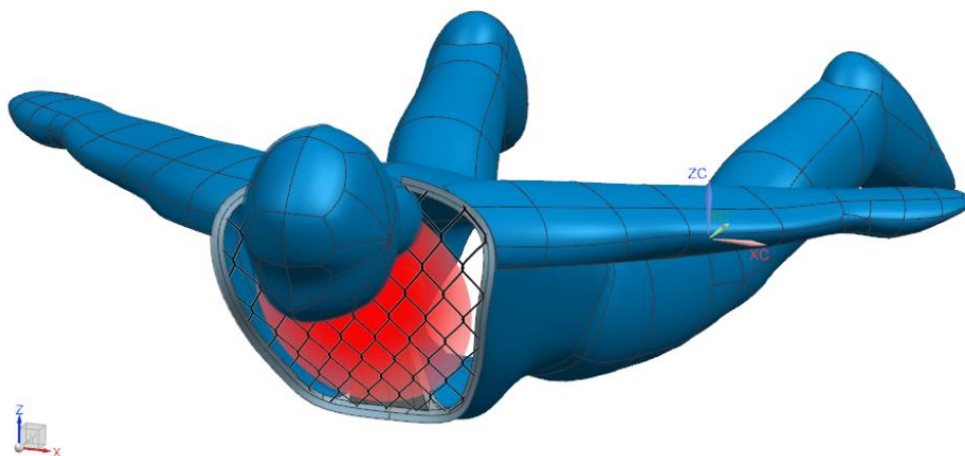


Fig. 12.3 Element de seguretat per evitar l'accés a l'hèlix

13. COSTOS DEL PROJECTE

Tot seguit es fa una valoració dels costos que ha suposat la realització d'aquest projecte. Es tenen en compte les diferents fases del mateix, passant per la documentació i recerca prèvia, per tot el procés de disseny, i finalment per la part més pràctica de confecció de prototip i proves de vol. També hi haurà per tant depeses de material.

La partida més elevada es correspon a totes les hores dedicades a la fase teòrica de recerca i el posterior recull d'informació, tot i que també comptabilitza força les hores dedicades a la part pràctica del projecte.

Es consideren altres despeses, com el consum elèctric de l'ordinador personal – considerant un preu de la llum de 0,15€/kWh – i l'amortització dels softwares usats durant el projecte, segons la seva vida útil i preu d'adquisició.

Finalment sumant els impostos i l'amortització dels equips, s'obté un cost total del projecte de 22.739'94€. La taula detallada es mostra a la pàgina següent.

ENGINYERIA	treball teòric	Descripció	Preu hora	Temps	Total
		documentació prèvia	15€/h	80h	1.200,00 €
Modelats en 3D	25€/h	150h	3.750,00 €		
Simulacions	25€/h	90h	2.250,00 €		
Anàlisis de resultats	35€/h	40h	1.400,00 €		
Documentació posterior	20€/h	120h	2.400,00 €		
Total		480h	11.000,00 €		
ENGINYERIA	treball pràctic	Recerca prèvia	15€/h	60h	900,00 €
		Confecció del prototip	35€/h	100h	3.500,00 €
Proves de vol	40€/h	15h	600,00 €		
Total		175h	5.000,00 €		
MATERIAL	Descripció	Preu unitat	Unitats	Total	
	prototip de poliamida	110€/u	1u	110,00 €	
	motors	10€/u	3u	30,00 €	
	bateries	15€/u	3u	45,00 €	
	hèlix	5€/u	10u	50,00 €	
	material electrònic	30 €	-	30,00 €	
	altres	200 €	-	200,00 €	
Total				465,00 €	
CONSUM	Descripció	Potència	Ús	Total	
	Ordinador personal	0,75kW	800h	90,00 €	
	Total				90,00 €
SOFTWARE	Descripció	Preu adquisició	Vida útil	Hores d'ús	Amortitzat
	NX siemens©	20.000 €	4000h	200h	1.000,00 €
	Ansys Fluent©	30.000 €	4000h	150h	1.125,00 €
Total					2.125,00 €
COSTOS TOTALS	Descripció	Total			
	Cost total	18.680,00 €			
	IVA 21%	3.922,80 €			
Després d'impostos				22.602,80 €	
AMORTITZ ACIONS	Descripció	Preu adquisició	Vida útil	Ús	Amortitzat
	Ordinador personal	600 €	3500h	800h	137,14 €
	Total				
COST TOTAL DEL PROJECTE					22.739,94 €

14. IMPACTE AMBIENTAL

La naturalesa d'aquest projecte ha estat el disseny d'una joguina voladora, amb totes les fases que això comporta, però no es pot confondre amb projectar la producció i distribució de la mateixa. L'ús dels diferents mitjans, com els equips electrònics o materials per a la confecció dels prototips tampoc no es considerarien pròpiament dins un estudi d'impacte ambiental del projecte, ja que simplement es valoren com un cost.

No obstant, el nou disseny d'una joguina si que pot comportar, per si sol, un impacte social. Les joguines sempre han jugat un paper important en la vida i creixement dels infants de qualsevol societat. De fet, el joc és una activitat inherent a l'ésser humà. Però en el cas dels infants representa alguna cosa més, ja que té molt a veure amb la seva manera de connectar i aprendre del món que l'envolta. Així doncs, més enllà de la finalitat evident d'una joguina - proporcionar diversió - té la capacitat de desenvolupar les diferents aptituds d'una persona en ple creixement i incentivar les seves motivacions en diferents àrees. Cal tenir en compte doncs que les joguines determinen la forma dels infants de relacionar-se amb l'oci, i la seva percepció de la societat. Tanmateix, la preocupació dels pares en proporcionar als seus fills joguines adequades sempre ha estat ben present, buscant-se sempre la major conciliació entre entreteniment, educació i aportació de capacitats positives per als infants.

Per altra banda, tot i que el projecte no preveu explícitament la producció de la joguina, si que en detalla alguns aspectes bàsics i en considera els costos. Per tant es pot fer un incís en l'impacte ambiental que suposen aquests tipus de productes. Donada l'alta complexitat del sector, no es profunditzarà en aquest aspecte. És ben conegut que el món de la joguina produeix principalment en altres països, on s'hi solen donar condicions laborals i de primeres matèries beneficioses per obtenir els costos més competitius. Evidentment, aquests tipus de polítiques poden generar intensos debats. El que és clar és que, com a mínim, influencien i tenen un paper important en la societat i la seva tendència, el seu avanç, cap a la globalització.

Des de l'impacte visual d'una planta de producció, passant per la generació de llocs de treball – de més o menys qualitat- , de la creació de residus – millor o pitjor gestionada -, fins als costos derivats del hipotètic transport i distribució del producte – amb impactes logístics, de contaminació ambiental, i un llarg etcètera – queda clar que la perspectiva de la producció d'aquesta joguina i l'estudi seriós del seu impacte podria ocupar perfectament la temàtica sencera d'un altre projecte, i segurament molt més.

CONCLUSIONS

El sector de la joguina és un mercat dinàmic i competitiu. Sempre en constant evolució, demana a les empreses que s'hi vulguin guanyar un lloc treballar de la ma de la innovació i l'enginy. Mirar de conciliar en tots els productes dissenys atractius i originals, que alhora estiguin acotats per un sostre de complexitat i cost, serà la clau de l'èxit d'una joguina nova, sobretot si el concepte ja està d'alguna manera explotat. Per altra banda, l'àmbit de l'aeromodelisme està en hores altes. La seva popularitat l'ha fet extensiu a perfils d'usuaris més ampli, i les opcions que els proporciona cada cop són més variades també. Tanmateix, les eines i coneixement per desenvolupar noves idees queda a l'abast de tot aquell que s'hi interessi. És en aquest encreuament entre la demanda del món de la joguina i l'oferta de l'aeromodelisme on finalment ha trobat espai aquest projecte.

Sens dubte eines com la Dinàmica Computacional de Fluids faciliten enormement el camí des de la idea de crear una joguina voladora amb forma humana fins a aconseguir-ne un disseny òptim. La possibilitat de treballar amb un procediment basat en la prova i error, simulació rere simulació, permet fonamentar cada passa que es dona i contrastar amb rigor les conclusions que se n'obtenen. En aquest sentit, es pot considerar que s'assoleixen amb èxit els objectius de visualitzar i entendre el flux al voltant de la figura voladora. Cada millora que s'hi afegeix o cada canvi de paràmetre en la simulació asseguren una mica més el coneixement sobre el que es fonamenta el projecte. Segurament s'hauria pogut perfilar fins el detall més mínim aquesta fase, obtenint cada vegada resultats més òptims, però sense fer-ho ja suposa més del 50% del temps de dedicació a aquest estudi.

Més difícils són les valoracions dels resultats, ja que aquestes es basen en dades que no es poden saber del cert abans de la confecció d'un prototip. Per exemple, el càlcul de la potència de l'element propulsor de l'aeromodel és un factor complicat de conèixer a priori. El motor, la bateria, o el tipus d'hèlix, proporcionen una velocitat i uns pesos al volador que, finalment, pot resultar més o menys òptim segons això.

En qualsevol cas es pot concloure que se supera la fase de disseny de l'home volador amb força solidesa, i a temps d'atacar-ne una de nova. La confecció d'un prototip afegeix el repte més gran a aquest projecte al no disposar dels mitjans adequats. És en aquest punt on es comprèn que el coneixement és la combinació entre l'intel·lecte i l'experiència, i que els tests de vols sempre han estat una manera de millorar la teoria. Acaba resultant impossible desenvolupar un prototip que compleix amb el pes que se n'esperava, i de fet l'acaba gairebé doblant. No obstant

s'espera que aportí una mica de llum al dubte sobre si el disseny és adequat. Encara que no sigui capaç de realitzar vols ascendents o rectes, un vol descendent ha de ser igualment equilibrat i estable. D'aquesta manera, després de nombroses proves fallides i de fer les modificacions pertinents, s'obté un vol enregistrat que es dona com a vàlid. Tot i que no es pot dir que s'assoleixin íntegrament les expectatives, val a dir que es compleix amb uns mínims prou dignes.

Després de tota aquesta feina, queda la sensació que és en aquest punt quan realment començaria el projecte. Tot el coneixement en la matèria i la destresa que s'ha adquirit permetrien iniciar un desenvolupament segurament molt més òptim que el que es presenta en aquesta memòria. Al final, fer volar figures que no haurien de fer-ho tan sols es tracta de crear una il·lusió. En general, altes potències i velocitats combinades amb angles d'atac positius és el que permet, juntament amb dissenys intel·ligents, aconseguir aquesta fita. Si no es disposa d'aquesta potència, més aerodinàmic haurà de ser el perfil, a part òbviament de la disminució al màxim del pes.

A part d'optimitzar encara més el disseny aerodinàmic, pel que fa l'àmbit de les joguines també queda clar que quedaria molta feina per fer. Enfocar bé el producte per a posicionar-lo en el mercat, o inclús fer ús del disseny però modificar la funció. Com s'ha vist que no hi ha problemes entre el preu especificat i l'obtingut, es podrien afegir elements que l'atorgarien de millores molt significatives, com el radio control.

En definitiva, d'aquest projecte se n'extreu una base molt sòlida, però a partir de la qual es podria treballar encara més per obtenir un producte realment versàtil i competitiu, i que es fes un lloc en mon de les joguines voladores.

AGRAIMENTS

En primer lloc vull agrair el suport i l'acompanyament de la meva família, especialment del meu pare, ja que sense el seu esforç i treball no hauria arribat fins aquí.

Per altra banda, donar les gràcies també a la professora Carme Valero. Sense la seva ajuda no hauria estat en absolut possible culminar amb èxit el treball. Els seus consells en moltes de les fases del projecte, sobretot per proporcionar-me els fonaments teòrics necessaris i guiar-me en l'ús adequat del software de simulació, han estat determinants.

Finalment agrair a tota l'altra gent que d'alguna manera han estat presents als darrers mesos, o que inclús de vegades han aguantat la càmera.

BIBLIOGRAFIA.

Adreces web

[1] Tipologies de l'aerodelisme, anàlisi d'alternatives.

<http://www.e-aerodelismo.com.ar/pmodelo.htm>

<http://es.wikipedia.org/wiki/Aerodelismo>

[2] Història de l'aerodelisme.

http://www.natureduca.com/tecno_aero_histanteced3.php

<http://furia-aeroema.blogspot.com/2007/12/un-poco-de-historia-del-aerodelismo.html>

[3] Principis teòrics

- - Aerodelisme teoria:

<http://www.quadruino.com/guia-2/primera-prueba-brushless/empuje>

<https://es.wikipedia.org/wiki/Aerodin%C3%A1mica>

http://aero.us.es/sesteban/pdf/PFC/Ala_Voladora/PFC_Jorge/TFG_Jorge.pdf

- Perfils naca:

<http://airfoiltools.com/airfoil/naca4digit?MNaca4DigitForm%5Bcamber%5D=9&MNaca4DigitForm%5Bposition%5D=40&MNaca4DigitForm%5Bthick%5D=12&MNaca4DigitForm%5BnumPoints%5D=81&MNaca4DigitForm%5BcosSpace%5D=0&MNaca4DigitForm%5BcosSpace%5D=1&MNaca4DigitForm%5BcloseTe%5D=0&yt0=Plot>

Referències literàries

[1] MECANICA, International thomsnon publishing parainfo, J.C. Gomez del Campo Bravo.

[2] Vuelo con ultraligeros, parainfo sa., Michael A. Markowski.

[3] Manual Ansys Fluent ©.

[4] Apunts Mecànica de fluids, ETSEIB, UPC.

Imatges

[1] Centres de pressions:

<http://www.e-aerodelismo.com.ar/Taller/CalculoCG.htm>

[2] Imatges capítol 6

Vuelo con ultraligeros, parainfo sa., Michael A. Markowski.

ANNEX

Tot el que s'explicarà a continuació pretén ser un complement teòric bàsic per comprendre millor els fonaments sobre els que es basen els conceptes de la memòria.

A. MECÀNICA DE FLUIDS

A.1 Definició de fluid

La diferència principal entre un sòlid i un fluid es troba en que el primer és capaç de resistir esforços tallants – forces tangents a la seva superfície – patint només deformacions estàtiques, mentre que el segon deformarà constantment en tots els casos.

Evidentment no tots els fluids són iguals. La diferència rau en la separació entre les molècules que el conformen, classificant-se així en líquids o en gasos. Els líquids es constitueixen amb una gran cohesió i forces internes, que causen la formació de superfícies lliures sota l'acció d'un camp gravitatori. En canvi, contràriament els gasos es presenten com elements sense un volum definit per ells mateixos ni la formació de superfícies lliures.

Dit d'una altra manera, el que resulta una obvietat és que els gasos no són capaços de suportar esforços – aguantar en ell cossos pesants – en condicions estàtiques. L'aire, un element gasós, inclou les característiques esmentades. Caldrà entrar en més detalls per tal de comprendre'l millor.

A.2 Modelització dels gasos, un medi continu

La definició anterior topa amb un problema quan els gasos miren de ser estudiats matemàticament. Per exemple, si es volgués mesurar una variable d'un gas, com per exemple la temperatura, s'hauria de triar un punt concret del mateix per observar-la. Si aquest punt fos aleatori, hi cap la possibilitat de caure en l'espai entre les molècules. Per tant, cal valer-se d'una aproximació per modelar matemàticament els fluids.

De cada variable a estudiar en un punt, se'n calcularà la mitjana d'entre el conjunt de punts que l'envolten, continguts en un volum concret. Si es fa tendir aquest volum al mínim necessari, el valor obtingut serà el més pròxim possible.

D'aquesta manera moltes de les variables pròpies del fluid poden considerar-se com a variables contínues. Per tant es poden realitzar els càlculs de propietats tan importants com la densitat d'un fluid.

Una altra propietat molt important d'un fluid – i de fet crucial en el camp de l'aeromodelisme com es veurà més endavant – és la pressió. Es defineix com la variació de força normal sobre una superfície quan aquesta tendeix a zero.

La pressió d'un gas contra una superfície sempre causarà una reacció de pressió compressiva per la segona llei de Newton. Per tant, tot i que la pressió absoluta d'un gas sempre és positiva, sovint resulta més còmode treballar amb una de relativa. D'aquesta manera es poden obtenir valors positius o negatius en funció de la pressió de referència, que sol ser l'atmosfèrica. D'aquí se'n deriva la següent equació.

$$P_{rel} = P_{abs} - P_{atm}$$

Val a dir que en aquest projecte i en general en el camp de l'aerodinàmica la pressió sempre va referida a la relativa.

Encara cal destacar una propietat més important dels fluids, la viscositat. Es defineix com la resistència que ofereix el fluid a ser deformat sota un esforç tallant. Aquesta característica provoca un gradient de velocitats quan un fluid dinàmic entra en contacte amb una superfície. El gruix d'aquest gradient es coneix com a capa límit, i també és essencial en l'àmbit de l'aerodinàmica.

A.3 Els fluids en la dinàmica.

Un fluid en moviment s'anomena flux. Aquest flux té diverses classificacions segons algunes de les seves variables, com les que ja s'han comentat.

A.4 Flux estacionari i no estacionari.

Quan les variables característiques del flux són constants en el temps, es parla de flux estacionari. D'aquesta manera es poden definir les línies de corrent, doncs totes les variables

del fluid que arribin a un punt en concret se seguiran movent per la mateixa línia al llarg del temps.

Així doncs la línia de corrent es defineix com la línia imaginària que en un instant donat és tangent al vector velocitat en tot punt, i que el seu patró es constant en el temps. Les línies de corrent seran importants per explicar fenòmens propis dels fluxos i l'aerodinàmica.

En un flux no estacionari, les línies de corrent poden variar a cada instant, pel que una partícula en pot en pot seguir una de diferent a cada instant.

A.5 Flux laminar o turbulent

Es defineix com a flux laminar aquell en que el seu moviment es produeix per capes o lamines separades, lliscant suaument entre elles de forma ordenada i estable. Les forces viscoses s'encarreguen de resistir el moviment relatiu entre aquestes capes evitant la tendència a la inestabilitat.

Un flux turbulent es desordenat i caòtic, difícil d'estudiar, doncs es caracteritza per dibuixar trajectòries erràtiques y remolins.

El que defineix un flux com a laminar – ordenat – o turbulent– caòtic – és la relació entre les forces viscoses y les de inèrcia, donant-se el desordre quan les primeres són massa petites per contrarestar les segones. A aquesta relació se l'anomena Número de Reynolds (Re), i és un paràmetre adimensional que determina el comportament laminar o turbulent del flux.

$Re = \text{Forces inercials} / \text{forces viscoses}$

Una altra manera de representar aquest valor és amb la següent expressió, que relaciona la densitat del fluid (ρ) amb la seva velocitat (U) i viscositat (μ), sempre prenent una longitud característica L del problema d'estudi:

$Re = \rho * UL / \mu$

Per sota d'un valor de Re crític, les forces viscoses seran prou importants per considerar el flux com a laminar.

A.6 Flux extern i intern

Tot i que podria semblar una obvietat, aquesta definició diferencia entre un flux comprès entre parets, intern, i un que no estigui limitat i actua sobre un cos en concret.

La importància d'aquesta distinció rau en que els fluxos interns pateixen de grans pèrdues d'energia a causa de les forces viscoses i la capa límit, present en gran part del fluid. En canvi, en els fluxos externs només es considera la capa límit dins una distància concreta del cos que envolta, i es diu que a l'infinit la velocitat no es veu afectada per la presència de dit cos.

A.7 Flux compressible o no compressible

Es tracta d'una aproximació, ja que tots els fluids en certa forma són compressibles com ja s'ha comentat anteriorment. Es defineix aquesta característica per tal de determinar si les condicions de contorn d'un estudi determinat afecten al flux de forma significativa en aquest sentit. Per a saber-ho es defineix una variable adimensional anomenat nombre de Mach, que relaciona la velocitat del flux amb la velocitat sònica.

Sempre que aquest valor estigui per sota d'un líndar, es considerarà el flux no compressible, és a dir, que la seva densitat es considerarà constant en tot el problema d'estudi.

En tots els estudis que es treballi amb velocitats baixes es podrà considerar que el flux es no compressible.

A.8 Principi de conservació de la massa i Bernoulli

En aquest punt, ja conegudes algunes de les propietats intrínseques dels fluids, resulta interessant explicar les equacions que governen els principis més bàsics de l'aerodinàmica.

El principi de conservació de la massa estableix que dins un volum de control determinant, la quantitat de massa que entra és igual que la que surt en cada instant.

$$\sum_i (A_i U_i)_{ent} = \sum_i (A_i U_i)_{sal}$$

$$\sum_i (Q_i)_{ent} = \sum_i (Q_i)_{sal}$$

Essent A l'àrea d'entrada o de sortida i U la velocitat perpendicular a dita àrea, s'estableix Q com el producte d'ambdues variables. D'aquesta manera, si la secció de pas del flux disminueix, la velocitat haurà d'augmentar per mantenir constant el producte.

D'això se'n deriva una altra equació bàsica, Bernoulli. Si se suposen nul·les pèrdues d'energia del fluid per fricció, transferència de calor o altres, s'observa que aquesta roman constant entre diferents punts d'una mateixa línia de corrent. Aquesta fórmula té present la pressió del fluid, la seva cinètica, i les variacions d'energia potencial per una cota d'alçada. Si aquesta última se suposa nul·la, es determina que l'augment de la pressió en un punt del fluid comportarà el decrement de velocitat en el mateix, i viceversa.

$$\left(\frac{P_1}{\rho g} + \frac{\alpha_1 U_1^2}{2g} + z_1 \right) = \left(\frac{P_2}{\rho g} + \frac{\alpha_2 U_2^2}{2g} + z_2 \right) = cte$$

P= pressió; U=velocitat; z=cota d'alçada; ρ =densitat; g=acceleració gravitatòria; α =factor de correcció (=2 flux laminar, =1 flux turbulent)

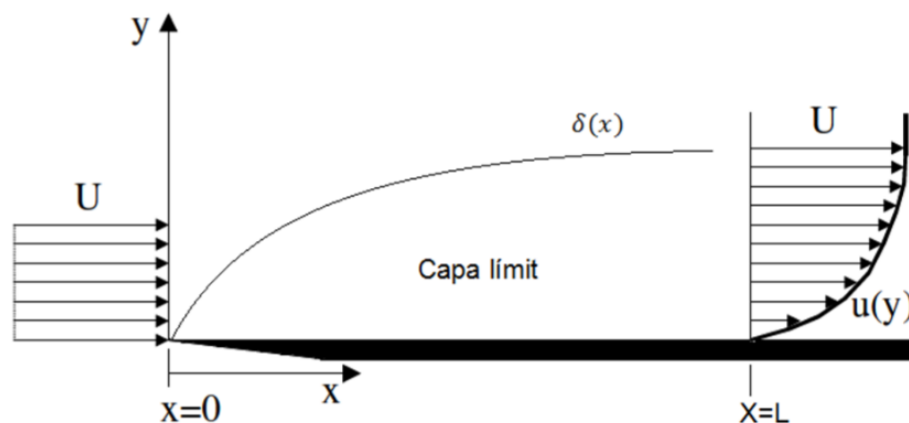
De les dues equacions comentades se n'extreu una conclusió molt important. Jugant amb el principi de conservació de la massa i el de l'energia de Bernoulli, es poden crear sobrepressions i depressions al disminuir o augmentar la velocitat en determinades zones fent ús de la de la secció.

A.9 Capa límit

Com ja s'ha comentat, les propietats viscoses d'un flux causen el fenomen de la capa límit al entrar en contacte amb un sòlid. La velocitat de corrent del flux varia des de zero – en el punt de contacte amb el sòlid per la condició de no lliscament – fins a arribar al seu màxim en la zona de corrent no pertorbada. Mentre que en els fluxos interns la capa límit pot estendre's al

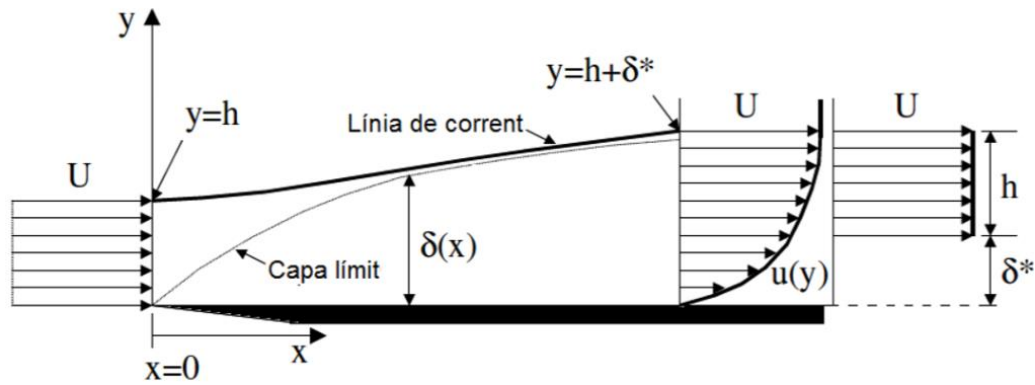
llarg de tot el flux, en els externs és només present al voltant del sòlid que envolta, i afectaria en bona mesura el seu comportament.

Així doncs quan un flux contacta amb la superfície d'un sòlid es dona un gradient de velocitats, comprès dins de la capa límit. Aquest gradient de velocitats va des de zero en el punt de contacte fins al seu valor constant a una distància concreta de la superfície. Aquesta distància és menor al punt d'entrada de la corrent uniforme de velocitats, i es va incrementant al llarg de la longitud de la superfície a causa de l'acumulació d'esforços tallants. En la següent imatge es pot observar el fenomen descrit.



En la imatge, entra un corrent de velocitats U , que adquireix un gradient de velocitats en contacte amb la placa, de superfície L . La velocitat al llarg de la placa va de zero fins a U constant, passant per $u(y)$, dins el gruix de la capa límit $d(x)$, essent al principi del recorregut molt petit $d(0)$ i augmentant al llarg d'aquest a causa de l'acumulació d'esforços tallants fins a $d(L)$.

Tanmateix, les línies de corrent hauran de desplaçar-se una alçada concreta a causa del decrement de velocitat, que seguint el principi de conservació de la massa, obliga a un augment de la secció de pas. L'efecte es pot veure il·lustrat a la següent imatge.

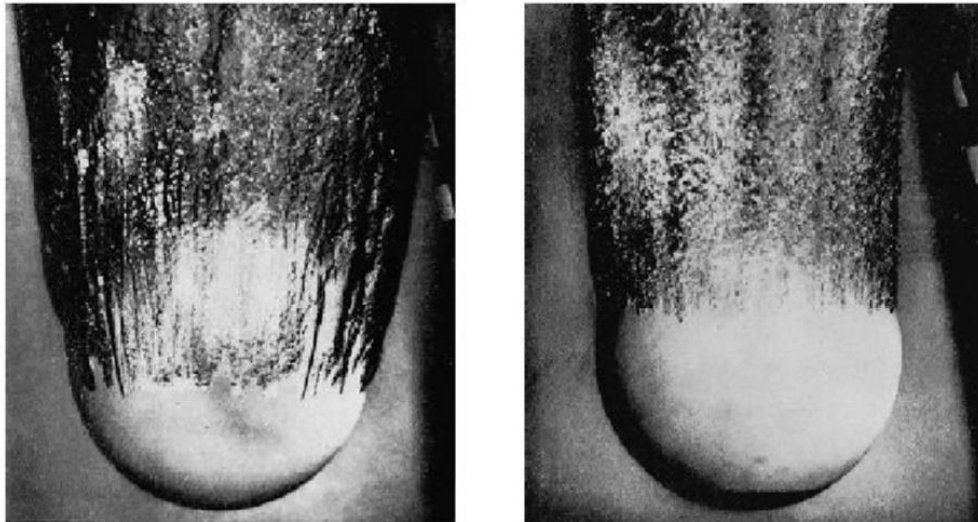


La línia de corrent superior, que entra en contacte amb la placa a una alçada $y=h$, per velocitat en contacte amb la capa límit i es veu obligada a augmentar la seva secció de pas fins a una alçada $y=h+\delta^*$. La línia de corrent que surti de la placa, ho farà doncs amb una alçada δ^* superior a la d'entrada.

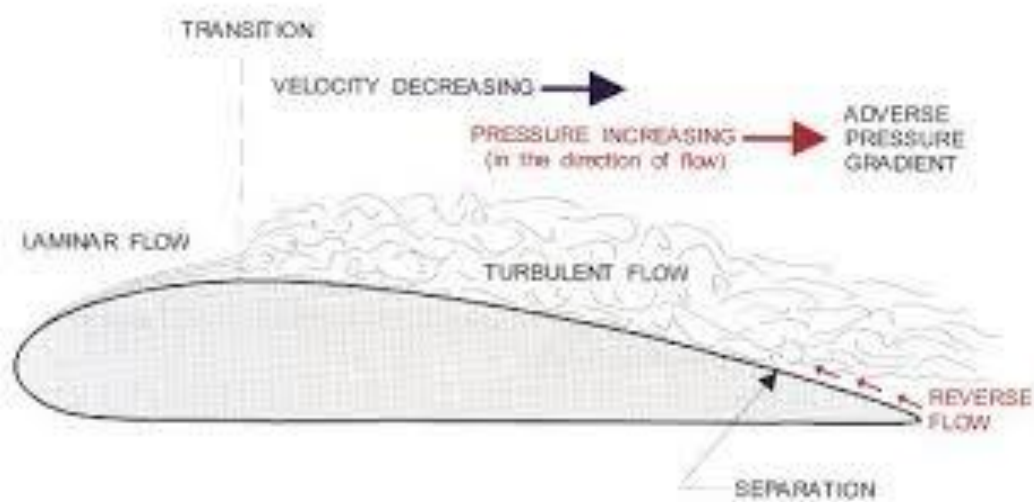
Aquest altre fenomen determina que, donat un decrement massa sobtat de la velocitat del flux per les condicions de curvatura de la superfície, la capa límit és podria arribar a desprendre de la mateixa. Aquesta situació es consideraria crítica en fluxos externs sobre perfils aerodinàmics, doncs causaria l'immediat pèrdua de sustentació en l'aeromodel.

Per tant, s'haurà de vigilar amb canvis bruscos de geomètrica dels perfils, que comporten importants sobrepressions i forces de resistència perjudicials per al model.

La corrent del flux en la regió de separació de la capa límit amb la superfície és coneix com a estela. En aquesta zona es produeixen pèrdues d'energia per al flux al perdre energia cinètica i pressió. Es pot observar que l'estela és més prolongada en capes límits laminars que en turbulents, produint-se una major resistència a l'avanç en els primers. Una forma d'aconseguir una capa límit turbulenta i per tant reduir resistències causades per l'estela és fent us de superfícies rugoses, com es pot observar en la següent imatge.



La capa límit turbulenta té un perfil de velocitats més robust que la laminar, de manera que el despreniment es posposa al llarg de la superfície de la vola, com s'observa a la imatge anterior. La capa límit turbulenta de la dreta se separa més tard que la laminar de la dreta.



El despreniment de la capa límit causa depressions importants a la seva zona, pertorbant el gradient de pressions i alterant les forces aerodinàmiques.

B. PLÀNOL MODEL DEFINITIU

