

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

VOL DE PAPER

AERODINÀMICA DELS AVIONS DE PAPER



VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

Per tu, Papa.

ÍNDIX

1. INTRODUCCIÓ	5
2. AERODINÀMICA	6
2.1 Definició del concepte	6
2.2 Principis bàsics de l'aerodinàmica	6
2.2.1 Teorema de Bernoulli	6
2.2.2 Efecte Venturi	10
2.2.3 3a llei del moviment de Newton	11
2.3 Perfil aerodinàmic	12
2.4 Principi de vol	13
2.4.1 Forces a les quals l'avió està exposat durant el vol	14
2.4.1.1 Tracció	15
2.4.1.2 Sustentació	15
2.4.1.2.1 Factors que influeixen a la sustentació	15
2.4.1.3 Pes	17
2.4.1.4 Resistència	17
2.5 Centre de gravetat	20
2.5.1 Localització del centre de gravetat	20
2.6 Centre aerodinàmic i de pressions	21
2.7 Explicació física de la sustentació	22
3. ELS AVIONS DE PAPER	26
3.1 Què és un avió de paper?	26
3.2 Parts d'un avió de paper	27
3.3 Forces que actuen sobre un avió de paper	28
3.4 Importància de la construcció	28
3.5 Importància del llançament	29
3.6 Símbols	30
3.7 Tipus d'avions de paper	31
3.7.1 Dards	31
3.7.1.1 Phoenix	32
3.7.1.2 APDW (All Purpose Delta Wing)	35
3.7.1.3 Interlock	38
3.7.1.4 Stealth	42
3.7.1.5 Stinger	45
3.7.1.6 Wind Devil	48
3.7.2 Planejadors	50
3.7.2.1 The Plane	51
3.7.2.2 The Plane Short	54
3.7.2.3 Glart	57
3.7.2.4 Trang	60
3.7.2.5 Headstand Lander	64
3.7.3.6 Starfighter	67
3.7.3.7 AWACS (Airplane with Auxiliary Control Surfaces)....	70
3.7.3.8 Starship Shuttle.....	73
3.7.4.9 Twin Jet	76
3.7.4.10 Skid Kid	78

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

4. ESTUDI D'EFICIÈNCIA AERODINÀMICA DE CADA TIPUS D'AVIÓ DE PAPER	81
4.1 Preparació de l'experiment	81
4.2 Realització de l'experiment	85
4.2.1 Objectiu	85
4.2.2 Material	85
4.2.3 Hipòtesis	85
4.2.4 Resultats	85
4.2.5 Càlculs	86
4.2.6 Conclusions	88
5. DISSENY DEL MEU AVIÓ DE PAPER	92
6. CONCLUSIONS	97
7. OPINIÓ PERSONAL	99
8. GLOSSARI	100
9. AGRAÏMENTS	101
10. BIBLIOGRAFIA	102
11. ANNEX	104
11.1 Entrevista a Xavier Prats	104
11.2 Entrevista a Pere Piqué	108
11.3 Experiència pràctica: Vol amb planejador	109

1. INTRODUCCIÓ

El per què papa? La meua frase preferida. Des de ben petita que sempre m'he demanat el per què de les coses que em rodejaven. El per què de només prement un botó, a plena nit, la meua habitació s'il·luminava quan tota la casa estava a les enfosques. El per què del vent, de la pluja i de la neu. El per què de la sortida i la posta del sol i el per què de la vida en si. Són algunes de les preguntes que li feia tot sovint al meu pare.

Però, el que realment sempre m'ha fascinat és el vol. Recordo que quan veiem una àliga, el meu pare i jo ens quedàvem fascinats contemplant-la i ens preguntàvem: per què alguns éssers poden volar mentre que d'altres hem de conformar-nos en caminar? I, encara més estrany, per què jo, que peso 50 quilos, no puc volar i un enorme avió, que pesa tones i tones, sí?

Com veieu moltes preguntes a l'aire i molt poques respostes, per això, vaig decidir fer el meu treball de recerca sobre l'aerodinàmica dels avions de paper. I us preguntareu, per què dels avions de paper? Quina ximpleria! Doncs no, he escollit l'aerodinàmica d'aquests objectes perquè són les úniques coses que un humà pot fer manualment amb un material d'allò més quotidià com és el paper, trigant no més de quatre minuts i que vola. Sincerament, és una passada.

Vaig decidir fer aquest treball amb l'objectiu principal de conèixer i saber-ne més del món dels avions de paper.

El treball de recerca es dividirà en dos grans blocs. El primer serà el que jo anomeno el bloc teòric, on intentaré fer una síntesi de tot els aspectes més importants que cal tenir en compte quan parlem d'aerodinàmica. Aquest bloc és imprescindible en el meu treball, ja que, és necessari aprendre els conceptes abans de fer la pràctica. El segon, serà el bloc pràctic el qual estarà dividit en tres parts, una on construiré un gran nombre d'avions de paper per poder-los qualificar segons les seves característiques de vol; l'altra, estarà enfocat a l'estudi aerodinàmic de tots els avions creats i, finalment, aconseguir dissenyar un avió de paper.

Espero que quan acabi el treball hagi aconseguit aprendre i entendre tots els conceptes bàsics sobre l'aerodinàmica, estudiar l'eficiència aerodinàmica de tots els avions creats, descobrir quin dels avions creats és més eficient i aconseguir crear un avió de paper propi. Aquest últim objectiu serà difícil d'aconseguir però espero poder-lo assolir un cop tingui tots els conceptes i hagi fet els càlculs necessaris per poder veure quines formes de plec són millors.

2. AERODINÀMICA

2.1 DEFINICIÓ DEL CONCEPTE

Al llarg d'aquest treball de recerca parlaré en gran quantitat del concepte aerodinàmica, per aquest motiu, el primer que he de fer és definir-lo.

Quan parlem d'aerodinàmica fem referència a la branca de la física que estudia els fenòmens que es produeixen en tot moviment relatiu entre un cos i un fluid. Dit en unes altres paraules, l'aerodinàmica és la ciència que estudia el dels fluids gasosos i les forces o reaccions a les que estan sotmesos els cossos que es troben immersos en aquests. Un exemple de l'àmbit d'aerodinàmica és l'estudi del moviment d'un avió a través de l'aire.

L'aerodinàmica es pot dividir en dos branques, la que estudia els moviments subsònics (si el cos es desplaça a una velocitat inferior a la del so) i la que estudia els moviments supersònics (si el cos es desplaça a una velocitat superior a la del so). Al llarg d'aquest treball, quan parli d'aerodinàmica sempre faré referència a la primera branca, ja que, de moment, els avions que jo estudiaré, els de paper, no tenen una velocitat superior a la del so.

2.2 PRINCIPIS BÀSICS DE L'AERODINÀMICA

Hi ha varies lleis o principis bàsics de l'aerodinàmica que expliquen per què alguns objectes poden volar sent més pesats que l'aire. Són aplicables a qualsevol objecte que s'està movent a través de l'aire o de qualsevol altre fluid gasós.

Aquests principis bàsics que explicaré a continuació són primordials, és a dir, són suficients per un nivell de coneixement d'aerodinàmica elemental.

2.2.1 TEOREMA DE BERNOULLI

A principis del 1848 quan els trens van començar a superar els 80 quilòmetres per hora, es va observar un estrany i inexplicable fenomen. Sempre que un tren en moviment passava pel costat d'un en repòs, els vagons dels dos tendien a aproximar-se. Aquest fet s'anomenà "balanceig de les vies". En alguns casos els vagons s'acostaven tan pronunciadament que els passatgers s'espantaven o, fins i tot, es trencaven alguns vidres de les finestres. Els enginyers ferroviaris van estar estudiant el problema i van arribar, després d'intercanviar moltes opinions, a la conclusió que el balanceig de les vies era un exemple del teorema de Bernoulli. Però, realment, qui és Bernoulli? I què explica aquest teorema que porta el seu nom?



La majoria de gent segurament mai ha sentit parlar de Daniel Bernoulli (1700-1782) potser perquè no va ser un home com Einstein o Newton que van revolucionar tot el

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

món científic. No obstant això, les seves grans contribucions li van proporcionar una molt bona reputació. Daniel Bernoulli va ser un físicomatemàtic suís del segle XVIII, membre d'una de les famílies de matemàtics més distingida de la història, incloent-hi el seu avi, Nicolaus Bernoulli, el seu pare, Jean Bernoulli el qual va exposar el problema de la braquistòcrona (resolt per Newton) i tres germans. El seu treball més important fou un teorema sobre la dinàmica de fluids, publicat el 1738, anomenat Teorema de Bernoulli.

El Teorema de Bernoulli, que deduiré a continuació, no és una relació fonamental però sí una conseqüència lògica de les lleis de moviment de Newton. Per poder-la deduir més fàcilment, centrem-nos en el principi de continuïtat que no és res més que una variant de la llei de conservació de l'energia estudiada a primer de batxillerat. La llei de conservació de l'energia ens diu que l'energia inicial serà igual a l'energia final, per tant la variació d'energia al sistema serà zero ($\Delta E=0$). Un exemple de la llei de conservació de l'energia són les figures 2.1a i 2.1b. I és que, el sumatori d'energia cinètica i potencial de la figura 2.1a serà igual al de la 2.1b.

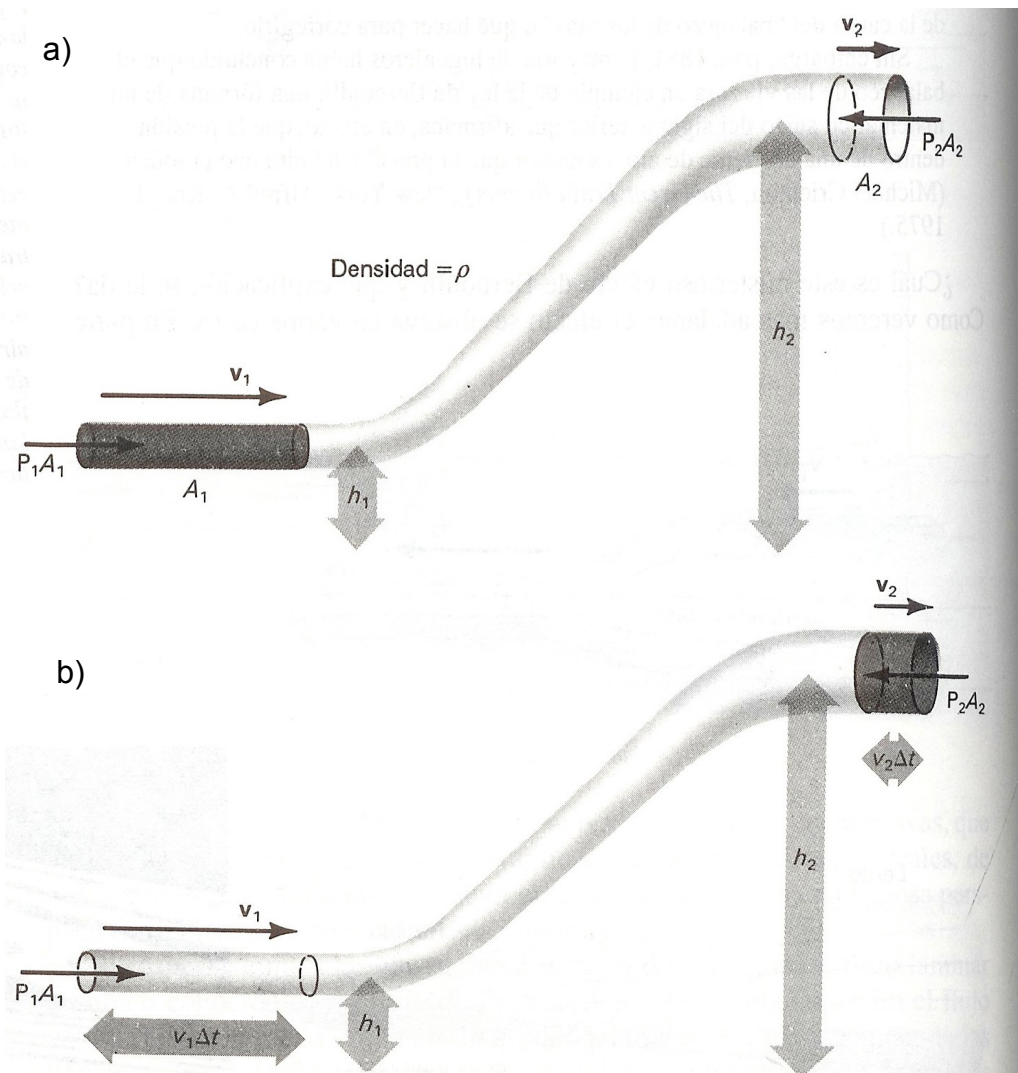


Figura 2.1

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

I, de la mateixa manera que l'energia es conserva, per al principi de continuïtat, és el cabal del fluid el que no varia. I és que, segons aquest principi, tot el que entra surt. Per tant, si un fluid que circula per una determinada àrea es veu obstaculitzat per la reducció d'aquesta àrea té dues opcions: o bé es comprimeix i continua passant a la mateixa velocitat, cosa impossible ja que els fluids dels qual parlem sempre seran incompressibles a causa de la velocitat subsònica a la qual es desplacen. Per tant, l'única solució que li queda es augmentar la seva velocitat.

Aquest principi també el podríem explicar amb un fet de la vida quotidiana. Imaginem-nos que ens trobem al mig d'una manifestació i tot el carrer està ocupat per gent. La marxa avança carrer avall. Però arriba a un punt en que el carrer es torna més estret. Perquè no es produeixi un tap, la única solució és que o la gent es comprimeixi o que comenci a córrer.

Doncs bé, com que l'aire és un fluid incompressible a velocitats subsòniques doncs optarà per la segona possibilitat. D'aquesta manera Bernoulli va veure que si l'àrea disminuïa, la velocitat augmentava. Així es compleix que:

$$A_1 v_1 = A_2 v_2$$

Ara apliquem la llei de conservació d'energia a la massa ΔM . El treball efectuat sobre aquesta massa és igual a:

$$\Delta W = P_2 A_2 v_2 \Delta t - P_1 A_1 v_1 \Delta t$$

On hem utilitzat la definició de treball com a $\Delta W = F_2 \Delta s_2 - F_1 \Delta s_1$ (variació de treball igual a força per increment de superfície recorreguda final menys inicial) on $F = P \cdot A$ (força igual a pressió per àrea) i $\Delta s = v \cdot \Delta t$ (increment de superfície igual a velocitat per increment de temps).

Aquest treball, ha de ser igual a l'energia del sistema. Per això, també hem de tenir en compte la variació d'energia.

$$\Delta E = \Delta E. \text{potencial} + \Delta E. \text{cinètica}$$

Com que l'energia del sistema, de la mateixa manera que el treball, es conserva tenim que:

$$\begin{aligned} \Delta W &= \Delta E = 0 \\ W &= E = \text{constant} \end{aligned}$$

I si les iguaem obtenim que:

$$P_2 A_2 v_2 \Delta t - P_1 A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t \rho g (h_2 - h_1) + 1/2 A_1 v_1 \Delta t \rho (v_2^2 - v_1^2)$$

Eliminem factor comú de Δt i tenim:

$$P_1 + \rho g h_1 + 1/2 \rho v_1^2 = P_2 + \rho g h_2 + 1/2 \rho v_2^2$$

o sigui que:

$$P + \rho g h + 1/2 \rho v^2 = \text{constant}$$

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

Per tant, el que descobrí Daniel Bernoulli i anomenà “El Teorema de Bernoulli” afirma que un increment en la velocitat d'un fluid, tant si es troba en estat líquid com en estat gasós, provoca una disminució de la seva pressió. Aquest fet provoca que l'energia total d'un sistema de fluids es mantingui constant al llarg de tota la trajectòria. D'aquí surt aquesta fórmula:

PRESSIÓ + VELOCITAT = ENERGIA TOTAL CONSTANT

Aquest Teorema es pot comprovar de mil maneres, tant amb aparells senzills com amb experiments d'allò més fàcils. Un aparell senzill que demostra aquest fet és el de la figura 2.2. El tub principal de flux es tanca primer per la seva dreta, i s'emplena el sistema fins una altura màxima. El líquid arribarà a la mateixa altura en tots els tubs de vidre. A continuació es retirarà el tap i a mida que el líquid flueix pel tub horitzontal, els nivells del líquid dels tubs de vidre agafaran l'altura indicada. La important caiguda de pressió del tub 4 és el resultat de la reducció de la pressió a la regió més petita del tub del flux on, a causa de la seva mida, hi ha més velocitat.

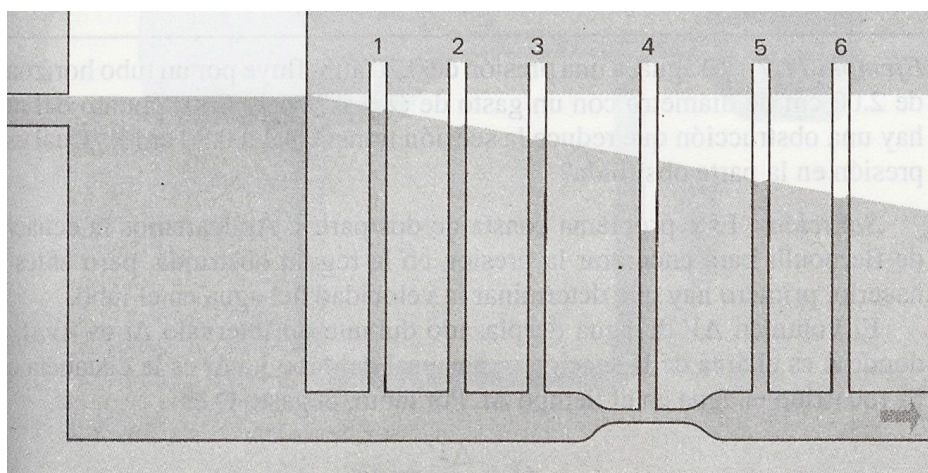


Figura 2.2

Un altre exemple és un experiment molt simple i quotidià. Consta d'agafar un full de paper i col·locar-lo horitzontalment davant de la boca amb la part que toca a aquesta una mica doblegada. Un cop ben col·locat, bufem amb la màxima força possible. El resultat serà el full de paper pujant cap a amunt a causa de la diferència de pressions provocada (veure figura 2.3).

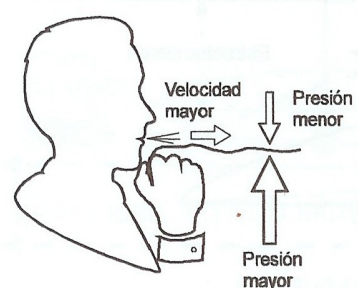


Figura 2.3

2.2.2 TUB VENTURI



Uns anys més tard, un científic italià, Giovanni Battista Venturi (1746-1822), comprovà experimentalment el Teorema de Bernoulli i el principi de continuïtat alhora, en un mateix experiment. Dit en unes altres paraules, Giovanni Battista Venturi va poder veure experimentalment que qualsevol fluid incompressible, com podria ser l'aire, al passar per una part més estreta augmenta la seva velocitat i que quan es produeix aquest augment de la velocitat hi ha una disminució de la pressió. Aquest experiment s'anomena Tub Venturi.

El seu treball té una gran importància en el camp de dinàmica de fluids ja que va aconseguir demostrar un dogma de la física amb un senzill aparell. A més a més, més tard va ser modificat i va esdevenir un important dispositiu de qualsevol farga catalana, la trompa d'aigua, un compressor de gas que utilitza la força de l'aigua.

Primerament, anem a veure com es va fer aquest experiment. El Tub Venturi està format per un cilindre tancat de diferents seccions. Als laterals disposa d'una secció molt més gran que al centre. Per fer-nos una idea de les proporcions més usuals, les seccions laterals són entres dues i tres vegades més grans que la central. A més a més, el cilindre consta de dos tubs externs connectats un a un dels laterals, és a dir, connectat a la zona de secció major, i l'altre al centre, amb una secció inferior. Aquests tubs contenen la mateixa quantitat de fluid i la majoria també disposen d'un manòmetre, mesurador de pressió. També, cal recalcar que en alguns Tubs Venturi, aquests tubs externs, són independents entre ells i en alguns altres estan connectats.

En segon lloc, anem a veure com funciona. Un fluid incompressible, en l'experiment de Venturi va ser aire, recorre el cilindre a una velocitat constant inicial que anomenarem v_1 . El fluid que es troba dins el tub connectat a aquesta zona té una altura determinada h_1 . Quan arriba a la zona més estreta del tub, el fluid no té més remei que augmentar la seva velocitat (principi de continuïtat explicat a l'apartat anterior). D'aquesta manera, el fluid passa d'una velocitat v_1 a una v_2 . A causa de l'augment de velocitat, a la part del cilindre amb secció més petita, és a dir, al centre, la pressió disminueix (observable amb la diferència de pressions dels dos manòmetres situats a cada tub extern) i provoca la succió del líquid del tub extern connectat al centre del cilindre. Aquesta succió fa que l'altura inicial del líquid (h_1) passi a una altura inferior (h_2). Aquest fet té llos als tubs externs independents (Veure figura 2.4), però si parlem de tubs connectats ho veurem molt més clar, i és que el líquid, a causa de la diferència de pressions tendeix a anar cap a on hi ha menys pressió, és a dir, cap a la desembocadura de la zona més estreta del cilindre. (Veure figura 2.5).

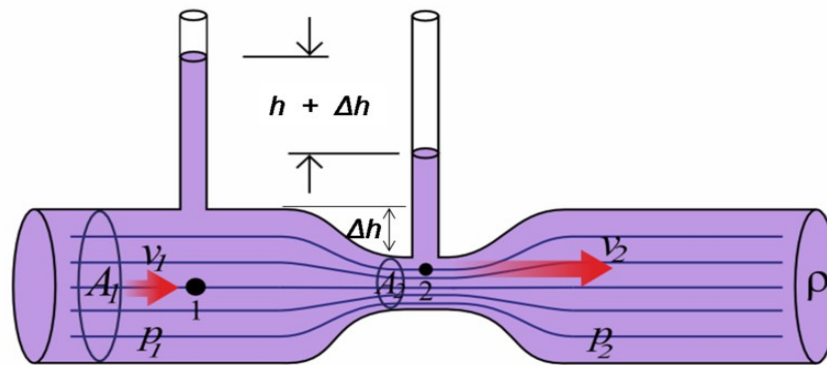


Figura 2.4 - Tub Venturi amb dos tubs externs independents.

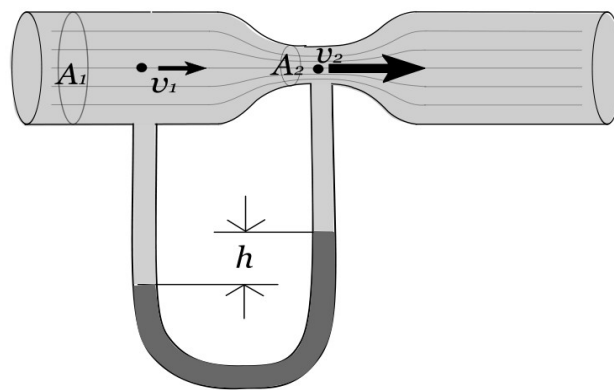


Figura 2.5 – Tub Venturi amb dos tubs externs connectats.

Aquesta variació d'altura provocada als tubs externs (Δh) és la prova clau per verificar el teorema de Bernoulli. Gràcies a aquesta diferència es va poder veure que quan el fluid augmentava la seva velocitat, hi havia una disminució de la pressió.

2.2.3 3^a LLEI DE NEWTON

Isaac Newton és considerat el millor científic de tots els temps per una gran part de la població mundial. I és que, Newton (1643-1727) va fer importantíssims descobriments com la llei de la gravetat o les tres lleis que porten el seu nom.

Totes les tres lleis de Newton estan molt relacionades amb l'aerodinàmica. Com hem vist anteriorment, Bernoulli les va utilitzar com a fonaments bàsics per descobrir el seu dogma. Tot i així, aquí em centraré en la tercera ja que és la que té més pes de les tres.

Per recordar-la una mica, la tercera llei de Newton és la llei d'acció-reacció. I diu que sempre que un cos exerceix una força sobre un altre, aquest segon cos exerceix una força igual i de sentit contrari sobre el primer. I ens preguntarem, què hi té a veure amb l'aerodinàmica? Doncs bé, la tercera llei de Newton és

fonamental per al principi de vol (explicat al punt 2.4). Com veurem més endavant, en el vol d'un avió hi ha dos parells de forces principals contraries. A la sustentació (la força que permet volar a l'avió) se li aplica una força igual i de sentit contrari, el pes. En el cas de la tracció (la força que permet avançar l'avió) també se li aplica una força igual i de sentit contrari, la resistència.

2.3 PERFIL AERODINÀMIC

Anomenem perfil aerodinàmic a tots aquells cossos que siguin capaços d'aprofitar al màxim les forces resultants de les variacions de velocitat i pressió d'un corrent d'aire. Un exemple de perfil aerodinàmic és l'ala de l'avió. A simple vista pot semblar que és erroni afirmar això, però si ens fixem en el perfil d'aquesta ho veiem d'allò més clar. És un disseny molt avançat, però continua sent un perfil aerodinàmic.

Un perfil aerodinàmic consta de quatre regions: la vora d'atac, part davantera del perfil on incideix el corrent; la vora de sortida, part posterior del perfil per on surt el corrent; l'extradós, zona superior del perfil entre la vora d'atac i la de sortida; i l'intradós, zona inferior del perfil entre la vora d'atac i la de sortida (veure figura 2.6).

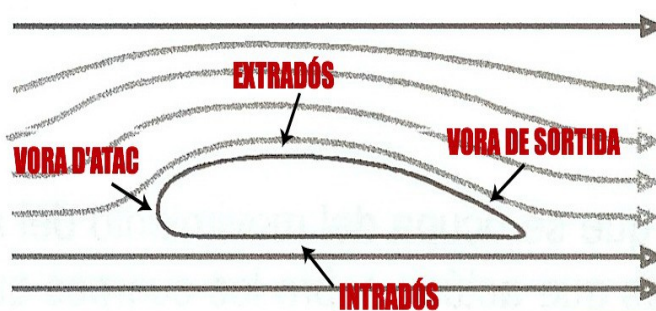


Figura 2.6

El perfil aerodinàmic més emprat actualment en els avions, és el que té forma de torpede. Cal dir que dintre aquesta forma hi ha molt tipus de perfils diferents, que si un amb més inclinació per la part de davant, que si menys etc. Però, jo, sempre faré referència al bàsic (figura 2.6). Això, és degut al seu major rendiment respecte als altres perfils actuals, tot i que, com sabem, la ciència i la tecnologia avancen de tal manera que qui ens diu que demà no en descobreixen un de més aerodinàmic?

Per comprovar que aquesta forma de torpede és un bon perfil aerodinàmic, realitzarem un exemple gràfic (figura 2.7). Agafem dues partícules que es mouen a una velocitat de 90Km/h i a una pressió de 1Kg/cm² abans de trobar-se amb la pertorbació que provoca el perfil aerodinàmic. Per la forma que té, el perfil provoca que la partícula que es veu obligada a passar per l'extradós d'aquest, ha de fer un recorregut major però amb el mateix temps que la partícula que passa per l'intradós, la qual no pateix cap modificació.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

Es pot observar, per tant, que la partícula (1) augmenta la seva velocitat a 90,3 Km/h (efecte Venturi) i la pressió disminueix a 0,7 Kg/cm² (efecte Bernoulli). La partícula (2) al no veure's modificada pel perfil manté la seva velocitat i pressió inicial. Aquestes variacions, provoquen finalment una diferència de pressió entre la cara superior i la inferior, obtenint com a resultat una força de sustentació que provoca el vol del perfil.

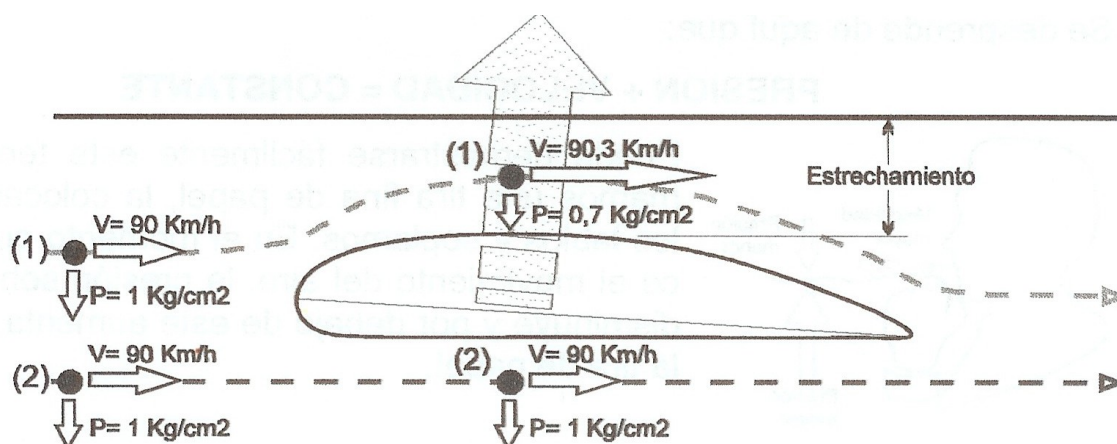


Figura 2.7

Com hem esmentat anteriorment, aquesta forma de torpede li dóna al perfil aerodinàmic un major rendiment. Anem, però, a comprovar-ho. El compararem amb tres perfils d'allò més coneguts: el circular, el rectangular i el que té forma de rombe.

Com podem veure a la figura 2.8, l'aire no pateix cap mena de deformació del flux que produeixi una diferència de pressions. Sí deformacions, però cap d'útil. Això és degut a la seva simetria. Amb el que es juga és amb l'augment de velocitat i, per tant, amb la disminució de pressió. En canvi, si les partícules han de recórrer el mateix tros amb el mateix temps, no aconseguen una velocitat major. Per tant, els perfils simètrics no són bons perfils aerodinàmics.

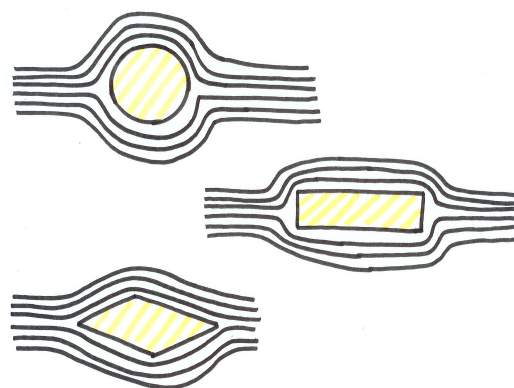


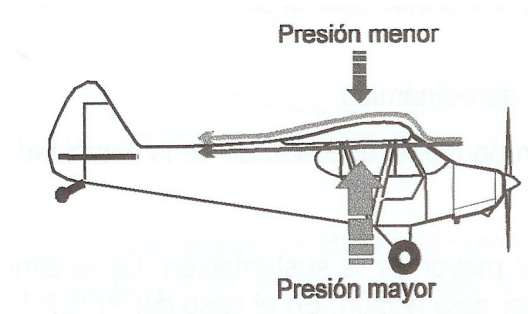
Figura 2.8

2.4 PRINCIPI DE VOL

Un avió té la capacitat de volar gràcies a la diferència de pressions que s'originen quan una corrent d'aire incideix sobre un perfil aerodinàmic com és l'ala. A l'extradós es produeix un augment de la velocitat del flux respecte l'intradós. Això és a causa de la trajectòria que s'ha de recórrer. L'aire que passa per sobre l'ala ha de trigar a recórrer aquesta amb el mateix temps que el que passa per sota, la diferència és que, com hem vist en l'anterior apartat, el perfil aerodinàmic està caracteritzat per no ser simètric; per aquest motiu, ha d'augmentar la seva

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

velocitat. Conseqüentment, a la part superior hi ha una pressió menor que a la inferior, produint la sustentació de l'ala, és a dir, el vol de tot l'avió.



2.4.1 FORCES A LES QUALS L'AVIÓ ESTÀ EXPOSAT DURANT EL VOL

Durant el vol d'un avió actuen una sèrie de forces, unes de favorables i unes altres de desfavorables. Per aquesta raó, és importantíssim que el pilot aconseguixi controlar-les per mantenir un vol segur i eficient.

L'aerodinàmica és un camp de la ciència molt extens i complicat, per això, al nostre nivell només necessitarem conèixer aquestes forces que afecten al vol i els seus efectes.

De totes les forces que actuen sobre un avió al llarg de tot el vol, les bàsiques i primordials perquè afecten a totes les maniobres són quatre: la tracció, la sustentació, el pes i la resistència. Aquestes quatre forces actuen de dos en dos; la tracció és contrària a la resistència, i la sustentació, al pes.

Un avió, com qualsevol altre objecte d'aquest planeta, es manté estàtic al terra a causa de l'acció de dues forces: la primera, el pes (causada per la força de gravetat), que el manté al terra; i la segona, la força de fregament, que no és res més que una força de resistència al moviment, la qual manté l'avió parat. Per tant, perquè pugui volar, un avió ha de superar aquestes dues forces. La manera de fer-ho és generant les forces contràries, la sustentació i la tracció, respectivament.



2.4.1.1 TRACCIÓ

La tracció és la força que impulsa un avió cap endavant, és la que permet el moviment durant el vol. S'obté accelerant una massa d'aire a una velocitat major que la de l'avió. La reacció, de mateixa intensitat però de sentit contrari, mou l'avió cap endavant. Aquesta acceleració s'obté gràcies a l'ús de motors en la majoria de casos. Però, de tota manera, hi ha avions que no. És el cas dels avions de paper, com que no disposen de motor, doncs la força de tracció és igual als newtons que la persona fa al llançar l'avió. Per aquest motiu, els avions de paper tenen una durada de vol determinada, en canvi, els avions amb motor no, ja que disposen de força de tracció durant tot el vol.

Un altra exemple d'aeronau sense motor és un planejador el qual avança gràcies a les corrents d'aire de l'atmosfera. Però, l'inconvenient més gran d'aquest tipus és que no poden enlairar-se per si sols. Sempre necessiten algun avió amb motor que els estiri i els faci enlairar.

Aquesta força és produïda en la mateixa direcció a la que apunta l'eix del sistema propulsor (el motor en la majoria de casos), que sol ser més o menys paral·lela a l'eix longitudinal de l'avió.

L'objectiu de la força de tracció és superar les diferents forces de resistència que l'avió genera al passar a través de l'aire. I això ho aconsegueix generant una gran velocitat, la qual provoca un augment del flux d'aire a les ales, fet que va d'allò més bé per millorar la força de sustentació.

2.4.1.2 SUSTENTACIÓ

La paraula sustentació ve del verb sustentar. I és que, segons el Diccionari de l'Institut d'Estudis Catalans (DIEC2), sustentar significa fer que alguna cosa no decaigui, que conservi el seu vigor. Per tant, què deu voler dir sustentació en el camp de l'aerodinàmica? Doncs molt senzill. La sustentació és la força que permet que un avió, o qualsevol altre objecte, es mantingui a l'aire.

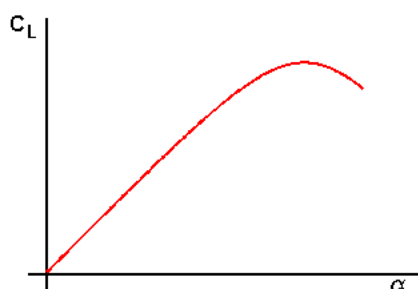
La sustentació es produïx gràcies a la forma del perfil aerodinàmic que té l'avió, l'ala. Com he explicat anteriorment (veure 2.3 – Perfil aerodinàmic), la forma de l'ala provoca l'efecte Bernoulli, menys pressió a la part superior, i més a la inferior. Aquesta força bàsica, sempre té una direcció perpendicular al vent que incideix al perfil aerodinàmic i un sentit ascendent, s'exerceix de baix cap a dalt. Se sol representar amb la lletra L de l'anglès "Lift" que vol dir sustentació.

2.4.1.2.1 FACTORS QUE INFLUEIXEN EN LA SUSTENTACIÓ

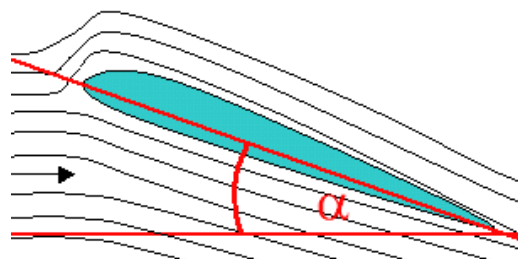
L'angle d'atac és el factor més important que influeix a la força de sustentació. Aquest, és l'angle que es forma entre l'ala i el flux d'aire. Us preguntareu el per què de la seva importància, doncs bé, depenent dels graus de l'angle tenim més o menys sustentació. Com major sigui l'angle, més sustentació, fins a cert punt, hi ha. Diem fins a cert punt ja que l'angle, a partir d'uns certs graus, normalment 14,

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

provoca una disminució de sustentació ja que l'aire es desprèn de l'ala i provoca turbulències i, per tant, l'avió entra pèrdua (cau). Ho podem veure d'allò més clar al següent gràfic.



Exemple de gràfic coeficient de sustentació-angle d'atac.



Il·lustració de l'angle d'atac d'un perfil d'ala. La fletxa negra indica la direcció del vent, l'angle α es l'angle d'atac.

Un angle d'atac molt gran, com podria ser un major de 14 graus, provoca que es desprengui la corrent d'aire de la part superior de l'ala provocant que la sustentació caigui dràsticament. Si aquesta cau, ja no supera la força que provoca el pes en sentit contrari i, per tant, l'avió entra en pèrdua. Normalment, aquest fet és provocat per una velocitat de l'avió massa baixa per l'angle d'atac que hi ha.

La velocitat del vent n'és una altra. I és que, la sustentació és proporcional al quadrat de la velocitat. Això es demostra amb una senzilla reflexió: com més velocitat, més inclinat l'angle d'atac pot ser i, com a conseqüència, més sustentació hi ha. En canvi, si hi ha poca velocitat, l'angle ha de ser menor perquè l'aire no es desprengui de l'ala i, per tant, hi ha menys sustentació.

Aquesta alta velocitat, en els grans avions, s'aconsegueix amb motors amb molta potència. En canvi, si parlem dels avions de paper, com que no tenen motor, hi ha una sustentació menor, però és que no en necessitem més ja que el pes d'un avió que transporta mercaderies no es pot comparar amb el d'un de paper.

La forma del perfil de l'ala també influeix. Com més curvatura del perfil tinguem, fins a un cert límit, més diferència de pressions entra l'extradós i l'intradós hi haurà i, com a conseqüència, major sustentació.

La curvatura d'una ala típica moderna és de només 1% o 2%. La raó per la qual no es fa més corbada és pel fet que, un increment d'aquesta curvatura, requeriria una superfície inferior còncava, la qual presenta moltes dificultats de construcció.

La superfície alar n'és una més. Aquest factor fa referència a la grandària de les ales. I és que, com major sigui aquesta, major serà la superfície sobre la que exerceix la força de sustentació. Cal tenir en compte però, que com més gran siguin les ales, més gran és la resistència de l'avió. Per aquest motiu, potser no es la millor solució l'augment de la superfície alar per obtenir més sustentació.

I per últim, la densitat de l'aire. Fa referència a la quantitat de partícules d'aire per unitat de volum i és que, aquesta varia depenent de la temperatura de l'aire. L'aire calent és menys dens que l'aire fred, per tant, els avions volen millor a l'hivern ja

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

que més densitat significa més partícules d'aire per els mateixos metres cúbics.

La fórmula per calcular la sustentació i que agrupa totes les variables d'aquesta és:

L: Sustentació
p: Densitat de l'aire
V²: Velocitat al quadrat
S: Superfície alar
Cf: Coeficient aerodinàmic
Cos α: Cosinus de l'angle d'atac

$$L = \frac{\rho \cdot V^2 \cdot S \cdot C_f \cdot \cos \alpha}{2}$$

2.4.1.3 PES

Entenem per pes, la força que provoca el planeta Terra a qualsevol massa en la direcció de la vertical, a causa de la gravetat. Per calcular el pes de qualsevol cos només hem de multiplicar la massa d'aquest per la gravetat del planeta en el qual ens trobem (A la Terra, 9'81 m/s²).

El pes, en el camp de l'aerodinàmica, és un factor clau perquè un avió pugui volar. I és que, podríem resumir el vol, com a aquell fenomen que aconsegueix superar l'efecte de la gravetat. I és així, quan volem, l'únic que estem fent és una força major oposada al pes, la sustentació. Per tant, és lògic, afirmar que com més pes tingui un cos, més sustentació hi ha d'haver per aconseguir que voli.

La fórmula per calcular el pes és:

P: pes
m: massa
g: gravetat

$$P = m \cdot g$$

2.4.1.4 RESISTÈNCIA

La resistència és la força que impedeix o retarda el moviment d'un avió. La resistència actua de forma paral·lela a la direcció del vent, però oposada a la tracció.

Des d'un punt de vista aerodinàmic, quan un cos es desplaça a través de l'aire hi ha dos tipus de resistència: la resistència paràsita i la resistència induïda.

La resistència paràsita és la força produïda per el conjunt de resistències que no tenen res a veure amb la sustentació com per exemple la resistència al moviment de l'avió a través de l'aire, la resistència que es provoca quan els insectes queden enganxats, el gel que es forma a les ales desvia l'aire que hi impacta i la fricció superficial que es produeix amb l'aire. També, la superfície total de l'ala i la seva forma afecten directament a la resistència paràsita. Una ala més llarga presenta una major superfície al vent i, per tant, s'hi aplica major resistència paràsita que una ala curta. Per aconseguir reduir aquesta resistència, els enginyers aeronàutics dissenyen el millor perfil. Com millor sigui el perfil i millor trenqui el

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

flux d'aire, menys resistència paràsita hi haurà. (Veure figura 2.9)

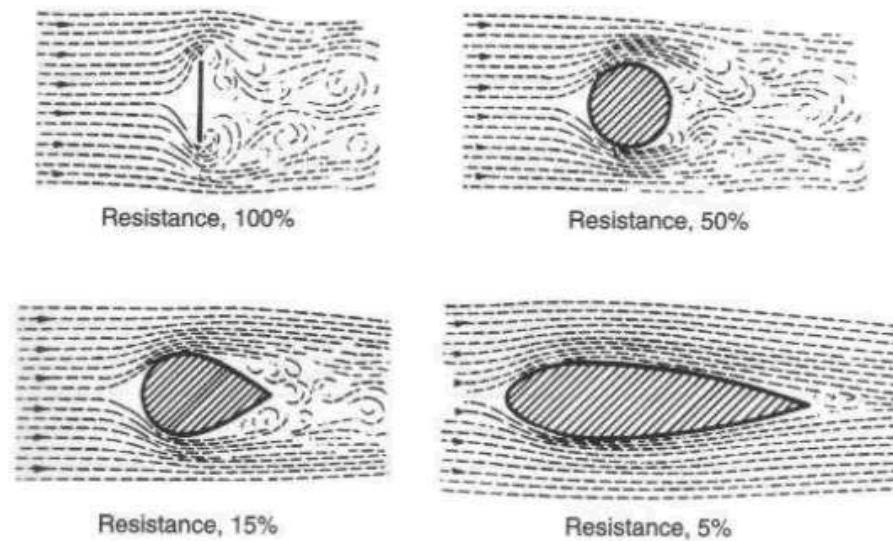


Figura 2.9

Lògicament, la resistència paràsita també depèn de la velocitat. És directament proporcional a aquesta, com més gran sigui aquesta, més gran serà la resistència paràsita.

La fórmula de la resistència paràsita és la següent:

D: Resistència paràsita
p: Densitat de l'aire
 V^2 : Velocitat al quadrat
S: Superfície alar
 C_D : Coeficient de resistència paràsita

$$D = qSC_D = \frac{1}{2}\rho V^2 SC_D$$

La resistència induïda, a diferència de la paràsita, és exclusiva dels avions. I diem que és exclusiva ja que, com acabem de veure, la paràsita depèn de la forma de l'avió i això també es troba en qualsevol automòbil que vol desplaçar-se. Un exemple seria el cotxe el qual quan ha d'avançar ha de superar una resistència provocada per l'aire quan impacta sobre el capó. En canvi, la induïda depèn exclusivament de la sustentació.

Aquest tipus es pot explicar a través de fórmules d'alt nivell físic, però a aquest nivell és millor explicar-la intuïtivament.

Tenim un avió. Com s'ha vist al punt 2.2.1 quan explicava el Teorema de Bernoulli, gràcies a la forma del perfil aerodinàmic, les partícules d'aire que recorren la part superior han d'augmentar la seva velocitat mentre les que passen per la part inferior mantenen la seva velocitat. A causa d'aquesta diferència de velocitats, es produeix una diferència de pressions. Tenim una major pressió a la part inferior ja que la velocitat i la pressió són inversament proporcionals. Aquesta diferència

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

només genera avantatges a la part ample de l'ala (tota l'ala excepte les puntes) ja que el flux d'aire superior i inferior estan d'allò més separats. El problema el trobem a les puntes de les ales. Aquí s'ajunten el flux d'aire amb menor pressió que esta recorrent la part superior de l'aire, el que passa per la part inferior i el flux d'aire que no ha desviat el seu moviment a causa de l'ala, que segueix el seu rol normal. I ens preguntarem què passa? Doncs bé, l'aire per naturalesa tendeix a anar sempre cap a on hi ha menys pressió i a les puntes de l'ala és on en té la oportunitat. El flux que passa per la part inferior puja cap a la superior. Aquest aire que puja més el moviment de l'avió que avança fa com un moviment helicoïdal Puja de la mateixa manera que tira cap endarrere Aquí es produeix un vòrtex, una turbulència (figura 2.10). L'única manera d'evitar resistència induïda als avions seria si aquests disposessin d'unes ales infinites. Però, de totes maneres, s'han inventat uns dispositius que la redueixen, els winglets. Són unes petites aletes que es col·loquen perpendicularment a les puntes de les ales. D'aquesta manera, el flux que circula per l'intradós li és més difícil arribar a l'extradós. A la figura 2.11 ho veiem. A la banda esquerra l'ala no disposa de winglets i hi veiem el vòrtex que es forma. En canvi, a la dreta no passa. Hi ha winglets.

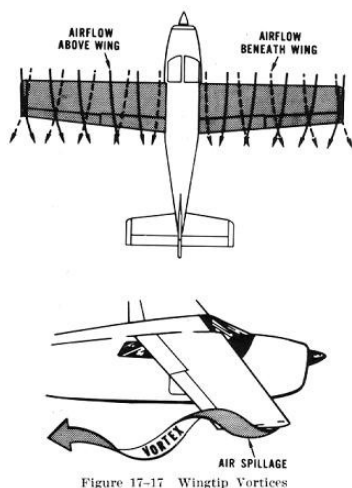


Figura 2.10

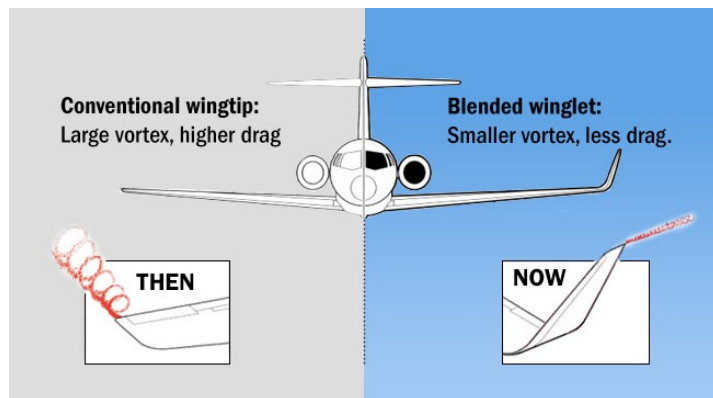


Figura 2.11

L'anomenem resistència induïda perquè està induïda a la sustentació. Com més sustentació hi ha, més diferència de pressions hi ha, per tant, el moviment ascendent de l'aire esdevé més bruscat i amb major força cosa que provoca una major turbulència, una major resistència.

La fórmula de la resistència induïda és la següent:

- D_i : Resistència induïda
- ρ : Densitat de l'aire
- V^2 : Velocitat al quadrat
- b^2 : envergadura al quadrat
- L^2 : Sustentació
- e : Factor d'eficiència que depèn de la forma en planta de l'ala.

$$D_i = \frac{2L^2}{\rho \pi b^2 V^2 e}$$

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

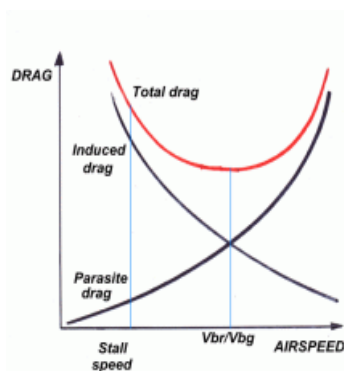


Figura 2.12

La resistència total que ha de suportar qualsevol avió és la suma de les dues resistències explicades, la paràsita i la induïda. A la gràfica, (figura 2.12) la resistència total és la línia vermella. Com es pot veure a la figura, quan la resistència induïda (Induced drag) és màxima, la resistència paràsita és mínima (Parasite drag). I és que perquè la paràsita sigui mínima, la superfície de contacte amb l'aire ha de ser mínima, per tant, la llargada de les ales ha de ser el més curta possible. Com que són els més curtes possibles, la resistència induïda és major, hi ha molt poc espai on no es produeixin vòrtexs. I viceversa.

2.5 CENTRE DE GRAVETAT

Segons el Diccionari de l'Institut d'Estudis Catalans (DIEC2) entenem com a centre de gravetat el punt d'un cos pel qual passa la resultant dels pesos de les molècules que el constitueixen. Dit en unes altres paraules, el punt imaginari en el qual es considera que tota la massa d'un cos s'hi troba concentrada i, per tant, s'exerceix tota la força de gravetat, és a dir, el pes.

El centre de gravetat és, alhora, el punt d'equilibri d'un cos de manera que si poguéssim penjar-lo des d'aquest punt, es mantindria en perfecte equilibri.

2.5.1 LOCALITZACIÓ DEL CENTRE DE GRAVETAT

Com és natural, el centre de gravetat, no és necessàriament un punt fix sinó que la seva posició, més cap a un costat o més cap a l'altre, més cap endavant o més cap enrere, està en funció de la distribució del pes l'aeronau. Els límits d'aquesta posició venen determinats pel mateix fabricant de l'avió.

Per localitzar-lo, és necessari tenir els paràmetres de l'aeronau al buit, és a dir, sense cap mena de càrrega o pes brut. I per aquest motiu, influeix molt el tipus d'ala que l'aeronau posseeix i el seu propòsit. Tot seguit, estudiarem la localització d'aquest punt depenent de les tres formes d'ala (no forma de seccions, formes físiques de l'ala) més freqüents: la rectangular, la trapezoïdal i la de forma de fletxa.

Abans però, cal que tinguem uns quants conceptes clars:

- Quan parlem d'eix longitudinal ens referim a la línia recta imaginària que s'estén des del morro fins la cua.
- Quan parlem de corda ens fem referència a la distància, segons l'eix longitudinal de l'avió, entre la vora d'atac i la vora de sortida.
- Quan l'ala té forma de rectangle, la corda és la mateixa des de l'arrel

Normalment es considera que el centre de gravetat de qualsevol avió, més o menys, es troba a un quart de distància cap a la part posterior de la vora d'atac de l'ala. Es desplaça cap a endavant o cap enrere depenent de la quantitat d'ocupants i/o de mercaderies que porta l'aeronau. Com més pesi la part posterior, el centre de gravetat més cap enrere es desplaçarà i al revés.

2.5 CENTRE AERODINÀMIC I CENTRE DE PRESSIONS

Anomenem centre aerodinàmic al punt del perfil alar (secció de l'ala) on es pot considerar que s'aplica la força aerodinàmica. Com ja sabem, com qualsevol matèria, una ala es pot dividir en moltíssimes parts seccionades, potser, infinites. Aquestes parts són els perfils alars els quals es poden assemblar molt entre ells tot i que, sempre presenten alguna diferència. I és que, cada perfil que compon una ala, per molt igual que sigui té el centre aerodinàmic en un punt diferent del del seu costat. El centre aerodinàmic d'un perfil alar que es troba just al costat del tronc de l'avió i el d'un perfil que es troba just a la punta de l'ala seran bastant diferents a causa de l'amplada de la corda de cada un.

Doncs bé, per poder considerar un punt on s'apliqués la força de sustentació total, es va inventar el centre de pressions. Aquest, és el punt mitjà on es troben tots els centres aerodinàmics d'una ala. El centre de pressions és molt important per l'estabilitat d'un avió. Vindria a ser quasi el mateix, però no. Un depèn del perfil i l'altre de tota l'ala.

El dos centres, tan l'aerodinàmic com el de pressions s'expressen en percentatge de la corda aerodinàmica, és a dir, amb un tan per cent que indica a quina distància es troba de la corda de l'ala (l'amplada de l'ala).

Aquests dos centres, de la mateixa manera que la resistència induïda, són exclusius de tots els aparells que volen.

A les següents figures podem veure els dos centres. Quan veiem les diferències a través de dibuixos costa molt ja que l'ala sencera i el perfil alar es dibuixen igual. Però anem a veure-ho considerant que la figura 2.12 representa un perfil alar i el centre aerodinàmic només és el punt on s'aplica la força de sustentació d'aquella zona de l'ala i, en canvi, a la 2.13 el centre de pressions és el punt mitjà de tots tots els centres aerodinàmics dels perfils com el de la figura 2.12.

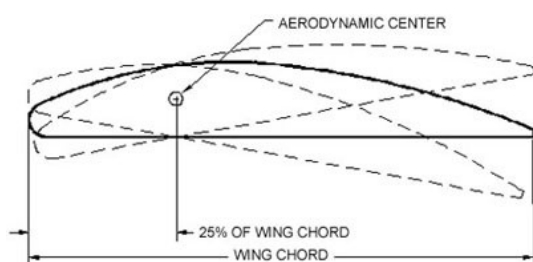


Figura 2.12

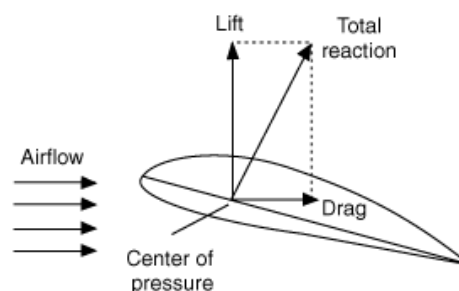


Figura 2.13

2.6 UNA DESCRIPCIÓ FÍSICA DE LA SUSTENTACIÓ

Com hem vist anteriorment, tot l'estudi aerodinàmic actual està basat en el Teorema de Bernoulli. És el principi acceptat per les entitats que es dediquen a aquesta ciència, un exemple és "El Real Aeroclub de España" que s'encarrega de donar els títols als pilots; per les editorials que fan els llibres sobre aerodinàmica, un exemple és "Gráficas Cristal" l'editorial que fa els manuals que cal estudiar per treure's aquest títol; i per la majoria de científics. I dic la majoria perquè hi ha una petita part, en augment cada dia que passa, que hi està completament en contra. Segons ells, la resposta que s'obté a la pregunta "Per què volen els avions?" és normalment inexacta o, el que és pitjor, del tot errònia. I ens preguntarem: doncs si és així, per què està acceptada per la majoria?

Doncs bé, segons David Anderson, físic del Fermi National Accelerator Laboratory (EEUU), i Scott Eberhardt, professor d'aeronautes i astronautes a la Universitat de Washington (EEUU), autors de l'article "*How airplanes fly; A physical description of lift*" (Com volen els avions: una descripció física de la sustentació), el principi de Bernoulli està acceptat com a base fonamental de l'aerodinàmica ja que és l'explicació popular, és a dir, és l'explicació fàcil d'entendre per la majoria. La seva simplicitat s'utilitza per descriure l'origen de la sustentació. El principi de Bernoulli, com hem vist anteriorment, suposa que el flux d'aire que circula per la part superior de l'ala s'ha de trobar al mateix temps que el que circula per la part inferior. D'aquesta manera, l'aire superior ha d'augmentar la seva velocitat i, per tant, redueix la pressió. Aquesta diferència de pressió fa que hi hagi sustentació. Però, per què l'aire superior és més ràpid? I per què han d'arribar al mateix temps? Aquí, segons ells, és quan l'explicació popular es comença a ensorrar. Per aquest motiu, aquests dos físics americans han fet un article explicant la seva teoria anomenada "Descripció física de la sustentació" la qual es basa en les tres lleis fonamentals de la física, les tres lleis de Newton. Al llarg de tot aquest apartat del treball, el que explicaré són les inconcordàncies del Teorema de Bernoulli i la nova i revolucionària teoria sobre la sustentació.

En primer lloc, per explicar perquè l'aire superior és més ràpid, els defensors de Bernoulli recorren a l'argument geomètric, dient que la distància que recorre l'aire està directament relacionada amb la velocitat amb què ho fa. I que quan l'aire es divideix en dos a la vora d'atac ha d'arribar al mateix temps a la vora de sortida. Això és el que es denomina principi del trànsit en temps equivalent.

Si acceptéssim que aquesta teoria és correcta, comparant les velocitats de l'aire, la superior amb la inferior, que es poden calcular d'allò més fàcilment perquè tenim la distància, l'amplada de l'ala, i el temps que triguen, podríem determinar la força de la pressió i així la de la sustentació. Si fem un simple càlcul, veurem que per poder generar la suficient sustentació perquè un típic avió petit pugui volar, la longitud de la cara superior hauria de ser un 50% més gran que la inferior, a la figura 2.14 veiem com seria un perfil alar que complís aquesta condició. En canvi, en els avions estàndards, la cara superior és només un 1.5 – 2.5% més gran.

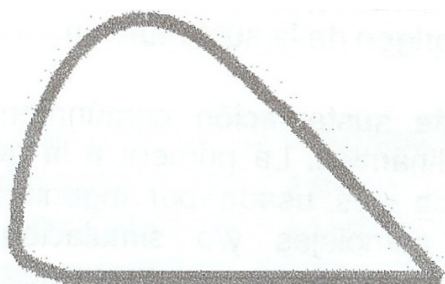


Figura 2.14

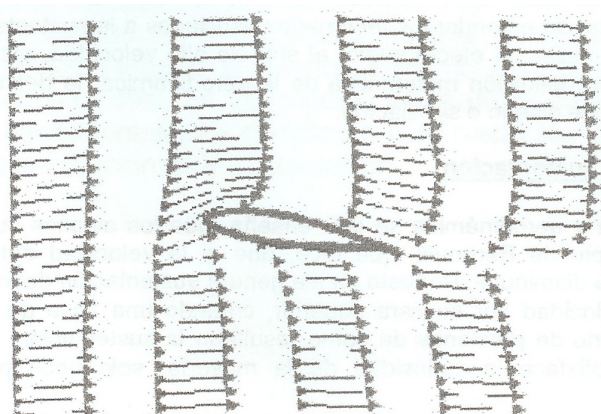


Figura 2.15

En segon lloc, els defensors de Bernoulli no tenen cap argument per explicar per què el flux d'aire ha de complir el principi del trànsit en temps equivalent. Simplement asseguren que és un dogma i que no es pot refusar.

Si observem la figura 2.15, la qual ens mostra el flux d'aire sobre un perfil alar en un túnel de vent simulat, veiem com l'aire s'introdueix de forma periòdica per poder observar millor el seu moviment. L'aire que circula per la part superior arriba a la vora de sortida molt més aviat que no pas el que circula per la inferior. De fet, es diu que el que circula per la part inferior va molt més lent que el vent relatiu. Aquí, ja se'ns desmunta tota la teoria popular.

A més a més, segons l'explicació popular, el vol invertit és impossible. Però, llavors, com s'explica el vol dels avions acrobàtics? Bé doncs, després de totes aquestes suposades inconcordàncies, perquè us recordo que aquesta teoria no està acceptada actualment, anem a conèixer com funciona el principi que defensen David Anderson i Scott Eberhardt.

La primera pregunta que respondrem serà com una ala genera sustentació. Com hem dit anteriorment, aquesta revolucionària teoria es basa en les tres lleis de Newton. Per refrescar la memòria, la primera llei ens diu que un cos tendeix a no canviar el seu estat de moviment, és a dir, si es troba en repòs intentarà mantenir-se en repòs, i de la mateixa manera, si es troba en moviment tendirà a continuar movent-se de la mateixa manera. La segona diu que si la força resultant de les forces que actuen sobre un cos no és zero, aquest cos adquireix una acceleració directament proporcional a la força, i que depèn de la massa del cos. I per últim, la tercera llei de Newton diu que en qualsevol força que s'apliqui sobre un cos (acció) existeix una força del mateix mòdul però de sentit contrari (reacció).

Si aquestes lleis fonamentals les apliquem en termes aerodinàmics veiem que si hi ha una deformació en el flux de la massa d'aire o si una massa que està originalment en repòs es posa en moviment hi ha alguna força que hi actua (primera i segona llei de Newton). I de la mateixa manera, per generar sustentació, l'ala ha de generar alguna força que la pugui provocar, per tant, la sustentació és entesa com la reacció de la força que genera l'ala (tercera llei de Newton). Comparem les dues figures:

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

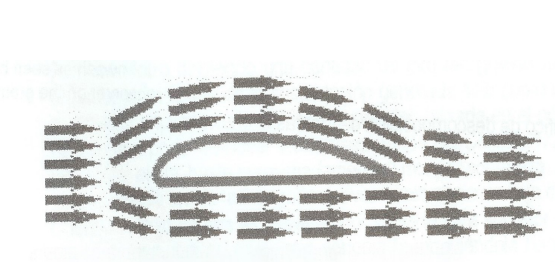


Figura 2.16

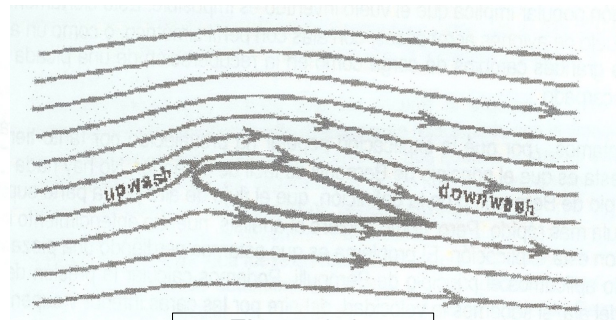


Figura 2.17

A la figura 2.16, el flux d'aire arriba en forma recta a l'ala i es divideix en dos, un per dalt i l'altra per baix, i surten per la vora de sortida amb la mateixa forma que han arribat. Això és impossible que generi sustentació. En canvi, a la figura 2.17 podem apreciar com l'aire que passa per la part superior és desviat cap avall. Aquesta desviació és l'acció i, conseqüentment, la sustentació és la reacció.

Com suggereixen les lleis de Newton, el perfil alar ha de canviar alguna cosa a la massa de l'aire per aconseguir generar sustentació. Ha de desviar una gran quantitat d'aire cap avall. I és que la sustentació d'una ala és proporcional a la quantitat d'aire desviat cap avall per la velocitat que porta aquest, és a dir, que com més massa d'aire i a major velocitat l'ala pugui desviar, més sustentació tindrà. I la pregunta més usual que es fa és "com pot desviar cap avall aquestes grans quantitats d'aire una ala?". Doncs bé, per poder respondre aquesta qüestió ens hem de centrar en l'anomenat efecte Coanda. Aquest ens explica que quan qualsevol fluid en moviment, sigui aigua o aire, es troba amb una superfície corba, tendeix a seguir-la. Per demostrar aquest efecte hi ha un experiment d'allò més senzill i quotidià. Es tracta de posar un got en posició horitzontal sota un raig d'aigua vertical. Quan l'aigua impacti sobre la forma corba del got, no continuarà caient en forma vertical, sinó que tendirà a seguir aquesta forma com es veu a la figura 2.18.

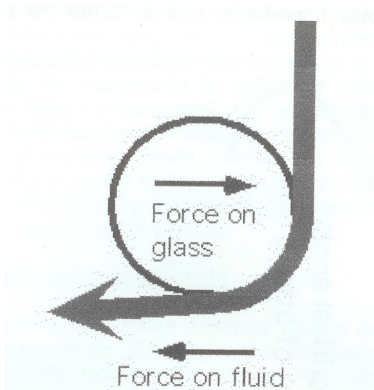


Figura 2.18

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

L'efecte Coanda només afecta a substàncies amb viscositat com és l'aire i l'aigua. La viscositat és la resistència que té qualsevol fluid a desplaçar-se. Aquesta resistència a l'aire és molt petita però la suficient perquè les molècules tendeixin a adherir-se a la superfície. La velocitat relativa entre la superfície i les molècules més properes a aquesta és exactament zero, per aquest motiu, per exemple, la pols que queda sobre el capó del cotxe no marxa si el cotxe es posa en marxa ja que la velocitat és nul·la a les molècules més properes. Just sobre la superfície, les molècules tenen una petita velocitat de manera que com més ens allunyem de la superfície, més velocitat del fluid fins arribar a la velocitat del vent relatiu (això passa a 2cm de la superfície).

I per últim, la sustentació també va molt lligada amb l'angle d'atac. Com hem dit anteriorment, perquè hi pugui haver sustentació l'ala ha de desplaçar una gran quantitat d'aire. I per fer-ho necessita un bon angle d'atac ja que, aquest, és l'encarregat de desviar una gran quantitat de massa d'aire cap avall.

3. AVIONS DE PAPER

3.1 QUÈ ÉS UN AVIÓ DE PAPER?

Un avió de paper és un maqueta d'un avió feta només de paper. També, moltes vegades està definit com una joguina feta íntegrament d'aquest material. És la forma més comuna d'aerogami, branca de l'origami (art japonès de doblegar el paper).

La seva popularitat és deguda principalment a la seva simplicitat, és un dels origamis més fàcils de fer, tan per a novells com per a experts. L'avió de paper més bàsic només necessita sis passos per a completar-se "correctament". Podem veure'l a la figura 3.1

Es creu que l'origen del l'ús del paper per fabricar joguines es remunta a la Xina fa uns 2000 anys. En aquella època s'utilitzava el paper per crear els estels, una forma molt popular d'entreteniment. Però, de fet, ningú pot assegurar exactament on van sorgir per primera vegada. El que està clar és que els dissenys han anat evolucionant i millorant amb el pas dels anys.

El 1909 és la data més antiga coneguda de la creació d'un avió de paper en l'època moderna. No obstant, la versió més coneguda apareix dues dècades més tard, el 1930, gràcies al senyor Jack Northrop. Northrop utilitzava els avions de paper per fer proves aerodinàmiques amb l'objectiu de trobar noves idees per crear els avions de debò.

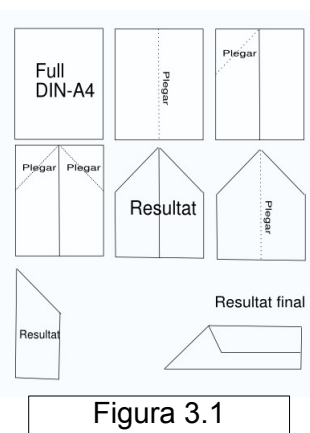
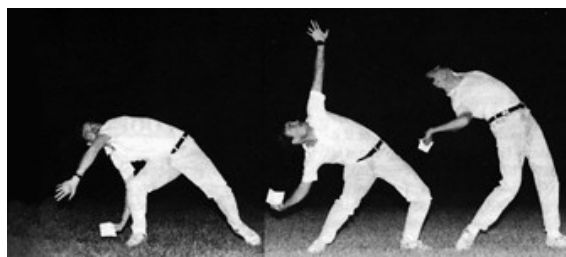


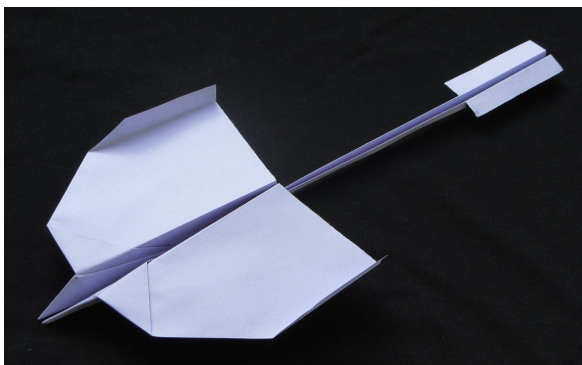
Figura 3.1

Molta gent afirma que el millor avió de paper creat a la història és el que s'anomena DC-03. Aquest, posseeix una àmplia àrea de sustentació a les ales i, potser, una característica única, la cua. Desafortunadament no hi ha cap federació o associació internacional que certifiqui aquestes dades. El que sí que està certificat és el record Guinness del vol més llarg de la història. Actualment, Ken Blackburn és el que el manté. El mantingué durant 13 anys, des del 1983 al 1996, i el revalidà el 8 d'octubre del 1998 aconseguint que el seu avió de paper volés durant 27.6 segons. La diferència més gran va ser que l'avió que utilitzà Blackburn no tenia cua com el que es considera el millor (DC-03). Aquest, era considerat de la categoria d'ultrallegers.



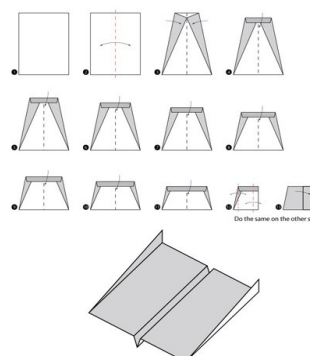
Ken Blackburn realitzant el llançament que li donà el record Guinness el 1983.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



Avió DC-03, considerat el millor de la història.

Paper Airplane by Ken Blackburn



Avió de paper dissenyat per Blackburn que aconseguí un vol de 27.6s.

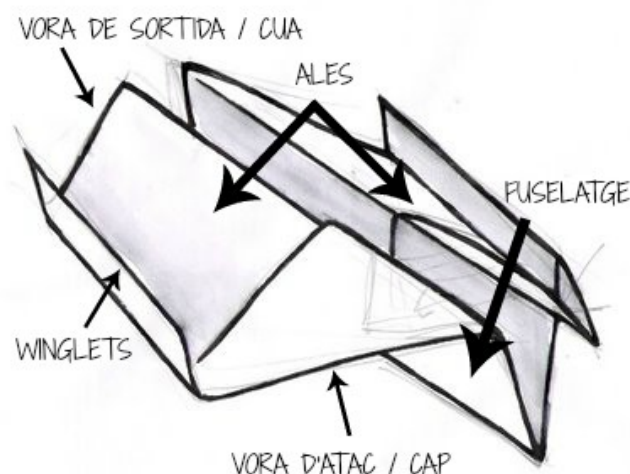
3.2 PARTS D'UN AVIÓ DE PAPER

Al punt anterior he dit que un avió de paper és una maqueta d'un avió real. Per tant, les parts que formen aquesta joguina seran iguals o, si més no, quasi iguals a les dels reals.

Com qualsevol avió que podem agafar per desplaçar-nos de país en país, un avió de paper tradicional, és a dir, el típic, consta d'aquestes parts:

- Vora d'atac o cap: és la línia que connecta els punts més avançats d'un perfil alar. Dit d'una altra manera, és la vora frontal de l'ala.
- Fuselatge: és el cos de l'avió.
- Ales: són els elements que generen la sustentació d'un avió de paper per poder permetre el vol.
- Winglets (opcional): són uns dispositius que es situen a les puntes de les ales per reduir els vòrtexs, les turbulències provocades per la sustentació. Reduint els vòrtexs el que es fa és reduir la resistència induïda.
- Vora de sortida o cul: és la línia que connecta els punts més endarrerits d'un perfil alar. Dit d'una altra manera, és la vora contrària a la d'atac.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



Està clar que depenent de la complexitat de l'avió poden aparèixer més parts o menys. Els alerons, per exemple, que són uns elements que es col·loquen a la vora de sortida de les ales els quals s'encarreguen de corregir els moviments del vol, apareixen en els avions més complexes. De totes maneres, les esmentades anteriorment són les més comunes.

3.3 FORCES QUE ACTUEN SOBRE UN AVIÓ DE PAPER

Com que un avió de paper és una maqueta d'un de real, les forces que actuen quan aquest vola seran les mateixes que es generen amb un típic Airbus, per exemple (explicades al punt 2.4.1). Cal tenir en compte però que les quantitats no seran ni de bon tros iguals, començant ja pel pes. Els meus avions de paper pesen 5 grams, en canvi, un Airbus A380, 150 tones. Si el pes és tan petit, la sustentació necessària per volar també serà molt menor. A més a més, el motor d'un avió real genera una tracció d'una força enorme, molt diferent de la que es pot aconseguir amb un llançament humà. I per tant, la resistència, la qual depèn de la tracció, també serà molt menor.

3.4 IMPROTÀNCIA DE LA CONSTRUCCIÓ

Abans de començar a construir els avions de paper, s'han de tenir clares unes quantes tècniques per fer-los el més precisos possible. Els paràmetres imprescindibles són:

- Precisió al plegar: Intenta que els plecs siguin d'allò més precisos i marcats, d'aquesta manera es pot manipular millor l'avió i en cas d'error és més fàcil de veure on t'has equivocat. Per aconseguir-ho pots utilitzar les ungles o un regle. A més a més, segueix pas a pas les instruccions llegint i mirant els dibuixos. Aquest paràmetre és el més important ja que un petit error al principi de la construcció es pot veure magnificat al final.
- La simetria: Un cop hagi acabat de construir l'avió, el primer que has de fer és sostenir-lo a l'altura dels ulls i mirar-lo cara a cara. Tot el que

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

vegis a un cantó s'ha de veure igual a l'altre. Si no és així, està mal construït

- Un bon angle en forma de "Y": Les ales i el fuselatge han de formar un angle en forma de "Y" per la part del darrera. Si no és així, quan l'avió voli es donarà la volta i volarà cap per avall. Si aquest angle és completament pla (180°) l'avió donarà una volta de campana.
- Posició dels alerons: Els alerons són uns elements opcionals que es localitzen a la part de darrera de les ales i del fuselatge. Gràcies a aquests, es pot corregir els moviments del vol. Si va cap amunt, es frena de cop i cau de punta, col·loca els alerons cap avall. Si va cap avall estavellant-se amb el nas, col·loca els alerons cap amunt. I si ho fa cap als costats, ajusta els alerons cap a la dreta si va cap a l'esquerra i viceversa. Per aconseguir un vol invertit o un vol amb piruetes col·loca un aleró cap amunt i un cap avall.

3.5 IMPORTÀNCIA DEL LLANÇAMENT

Encara que l'avió sigui perfecte, si el llançament no és el correcte, no volarà. Per aquest motiu, és imprescindible saber aquestes tècniques clau:

- Per llançar l'avió, agafa'l per la part del davant i llança'l com si estiguessis tirant un dard.
- També, és recomanable llançar l'avió una força relativament gran. D'aquesta manera, s'aconsegueix un vol més llarg i millor.
- Quan el vol és exterior, és a dir a l'aire lliure, una bona tècnica és llançar-lo cap amunt ja que així aconseguix una major alçada i té més marge de temps per fer el descens.

3.6 SÍMBOLS

Aquests són els símbols que et trobaràs als dibuixos de l'apartat 4.7. És necessari un bon coneixement d'aquests si es volen construir uns bons avions.



Mira aquest punt, estigues atent/a amb aquesta forma 

3.7 TIPUS D'AVIONS DE PAPER

Existeixen dos tipus d'avions de paper depenent de la seva estructura i les característiques de vol: els dards i els planejadors. I el què he fet en aquest apartat és posar els passos per poder construir tots aquells que estudiarem a l'estudi d'eficiència aerodinàmica (punt 5). Cal tenir en compte que perquè sigui un estudi efectiu tots els avions han de pesar el mateix. Això ho he aconseguit creant-los tots a partir d'un full DIN-4 que pesa 5 grams. Un cop dit tot això, anem a veure'ls.

3.7.1 DARDS

Anomenem dards a aquells avions de paper que tenen les següents característiques:

- Si parlem d'estructura, els dards tenen uns plecs d'allò més afilats. Disposen d'una ala delta començada amb una afilada punxa i acabada amb una cua poc o molt inclinada. Les seves ales són relativament curtes i estretes. La seva estructura ens recorda a la dels avions caçadors (caça).
- Si parlem de vol, els dards són uns avions molt ràpids. Aconsegueixen llargues distàncies amb poc temps de vol. El seu objectiu no és volar el màxim de temps possible sinó que el què volen és fer la mateixa distància amb el menor temps possible. D'aquí ve el seu nom, tenen un vol com dard, ràpid i precís.

Els dards que he escollit crear són: El Phoenix, l'ADPW, l'Interlock, l'Stealth, l'Stinger i el Wind Devil. Tots són extrets del llibre *The Gliding Flight* de John M. Collins, guanyador del premi internacional a millor dissenyador d'avions de paper. Els seus noms són en Anglès ja que he preferit mantenir els noms reals respectant així la feina de l'autor. També, cal dir que les breus descripcions de les característiques de cada avió són les que es poden trobar al llibre de John M. Collins. L'única diferència és que, aquestes sí, les he traduït de l'anglès al català.

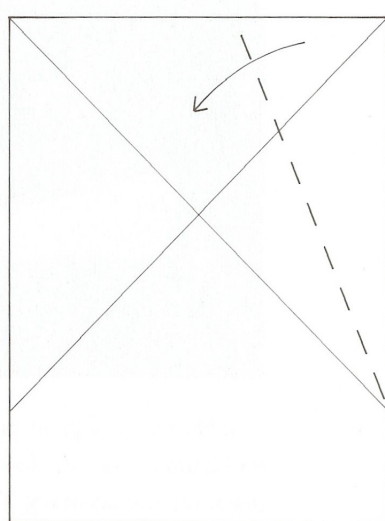
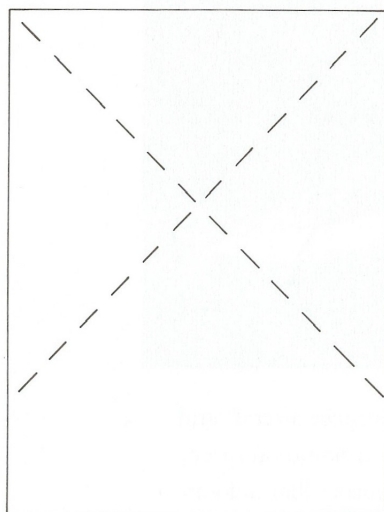
VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

3.7.1.1 EI PHOENIX

El Phoenix és un bon avió de paper amb una gran capacitat per volar encara que el llançament sigui ràpid o lent. Aconsegueix una bona velocitat, una llarga distància i té una molt bona precisió. El Fènix és un avió polivalent, pot volar tant a l'exterior com a l'interior d'un habitatge i, a més a més, és molt fàcil de construir. Anem-ho a veure:

PAS 1

Doblega i desplega les diagonals, llavors gira el paper.



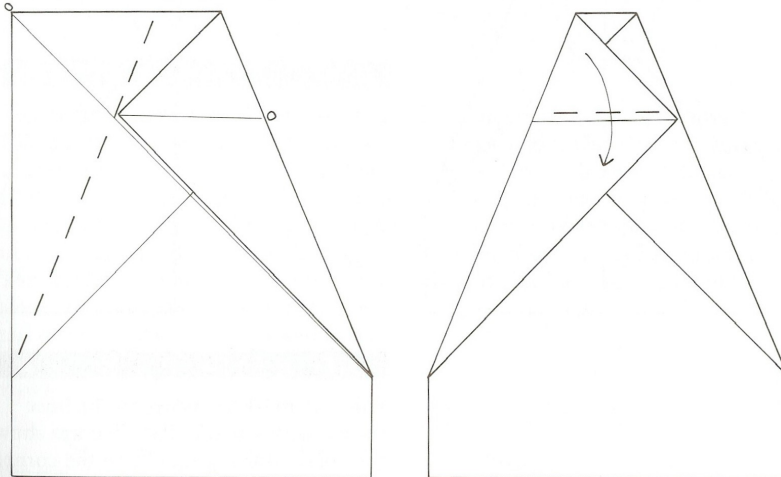
PAS 2

Doblega la cantonada marcada fins el plec de la diagonal de manera que la vora del paper quedi alineada amb la diagonal.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

PAS 3

Fes el mateix que el pas 2 amb la banda esquerra. Fixat amb el vèrtex, ha de quedar a sobre la posició indicada.

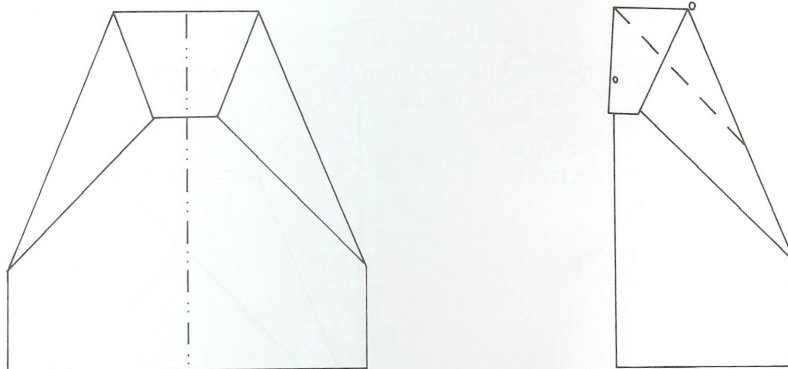


PAS 4

Doblega la part superior per el plec ja existent.

PAS 5

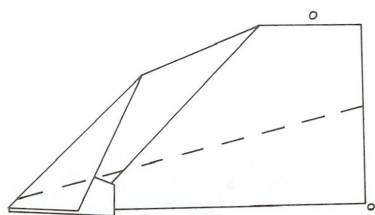
Doblega l'avió pel mig deixant a la vista tots els plecs.



PAS 6

Doblega el costat per la línia dibuixada. Fixat que el vèrtex del costat ha d'encaixar amb el punt assenyalat.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

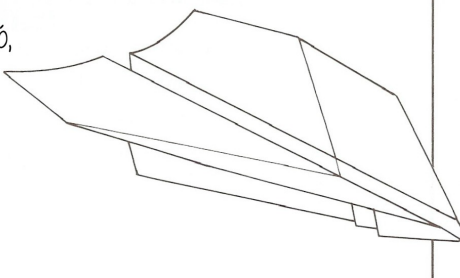


PAS 7

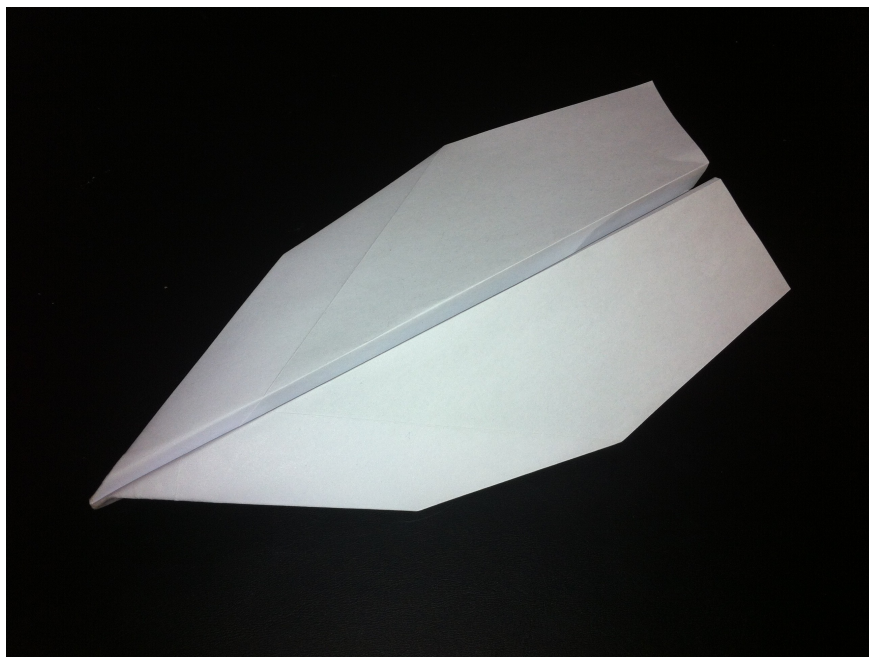
Fes un plec que comenci per el nas de l'avió i acabi per la meitat de l'altre costat. Repeteix el pas 6 i 7 per l'altra banda. I ja està, això és el Fènix.

Si vols aconseguir un vol més ràpid o vols poder volar millor a l'exterior, afegeix uns elevadors a la part posterior.

El Fènix té molt bona precisió, i aconseguix volar llargues distàncies. És un bon dard.



El que he fet jo m'ha quedat així:



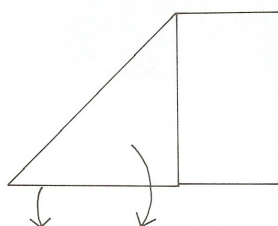
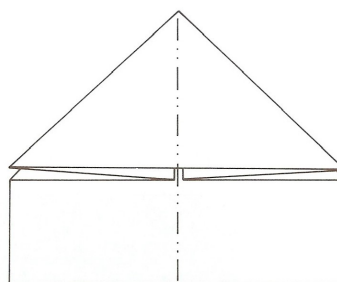
3.7.1.2 APDW (All PURPOSE DELTA WING)

L'APDW és un dard molt veloç. Disposa d'una estructura que li facilitat l'aterratge ja que, normalment, rebota quan aterra sobre una superfície llisa. A més a més, està capacitat tant per volar a l'interior com a l'exterior. De totes maneres, amb un vol d'interior aconseguix millors distàncies.

Anem a veure com es construeix:

PAS 1

Comença amb la base "waterbomb" (bomba d'aigua). Doblega el paper per les dues diagonals del quadrat que el forma. Desdoblega-les i enfonsa els dos triangles laterals que formen. D'aquesta manera obtens la forma de la figura. Tot seguit, doblega'l per la meitat.

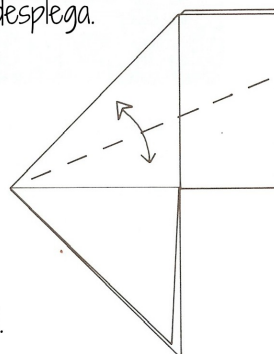


PAS 2

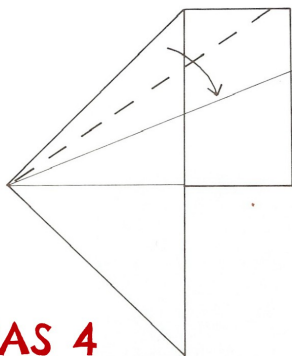
Estira les ales exteriors cap avall.

PAS 3

Doblega per la diagonal que va del morro de l'avió fins el cul i desplega.

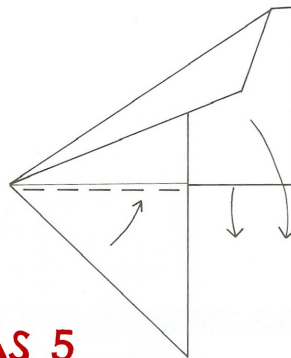


VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



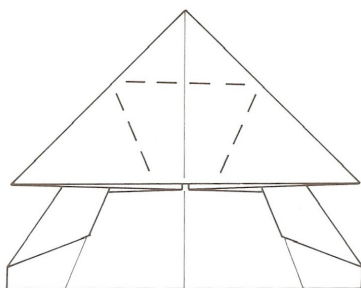
PAS 4

Doblega la part superior de la diagonal feta al pas 3 en dues d'iguals.



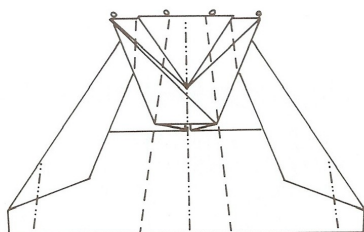
PAS 5

Estira les ales triangulars cap avall i obra el plec fet al pas 1.



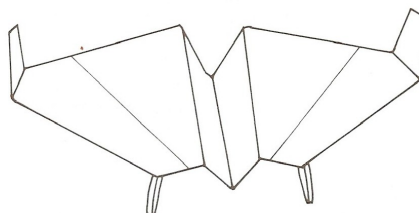
PAS 6

Doblega les cantonades exteriors.



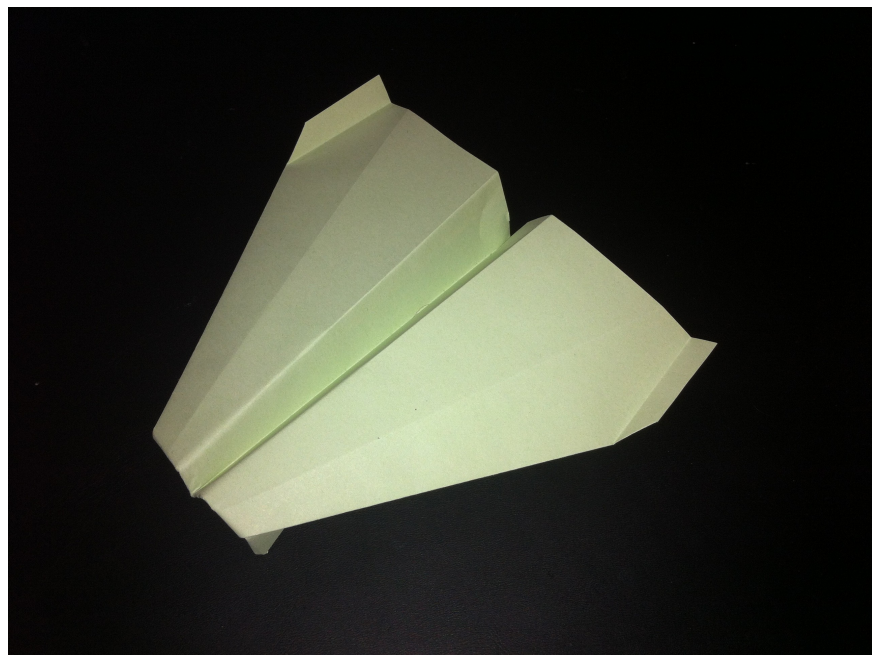
PAS 7

Doblega per les línies que es veuen al dibuix. Tingues en compte els símbols (algunes línies formen valls i algunes muntanyes).



VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

El que he fet jo m'ha quedat així:



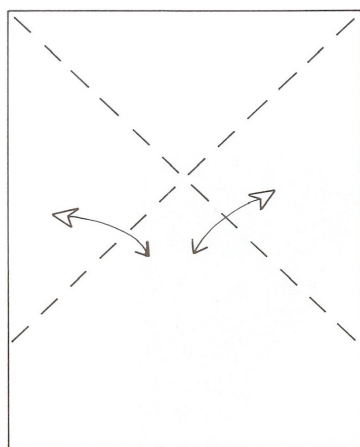
VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

3.7.1.3 INTERLOCK

L'Interlock s'anomena el dard coet i és que, aquest avió de paper, és el que aconseguix una major velocitat respecte els altres. Per aconseguir aquesta gran velocitat, té un disseny molt elaborat i amb molts passos. Però, tot i així, és fàcil de construir.

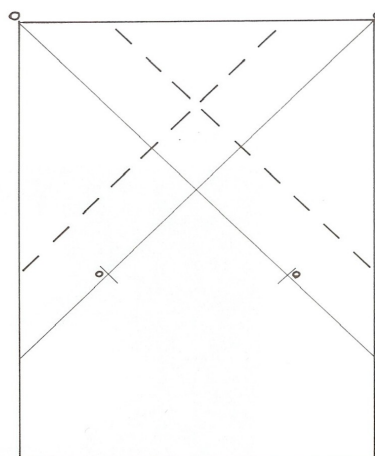
L'Interlock és un avió que pot volar en qualsevol situació, tan amb fort vent com amb calma absoluta, tot i que sí que és necessari, en cas de vol interior, un espai gran i ample ja que aconseguix assolir llargues distàncies.

Anem a veure com es construeix:



PAS 1

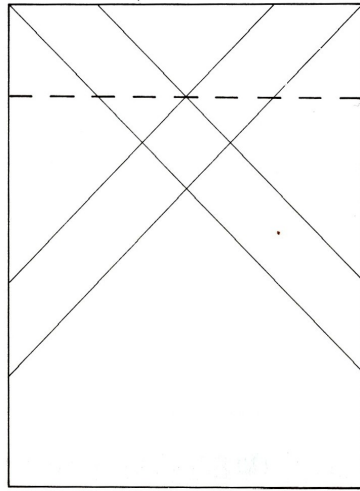
Fes les dues diagonals i desplega-les.



PAS 2

Col·loca els vèrtexs just a sobre del punt que marca la meitat de la línia que va del punt d'intersecció de les diagonals al punt de tall amb el costat del paper. Un cop fets els plecs, desplega'ls. Gira el paper.

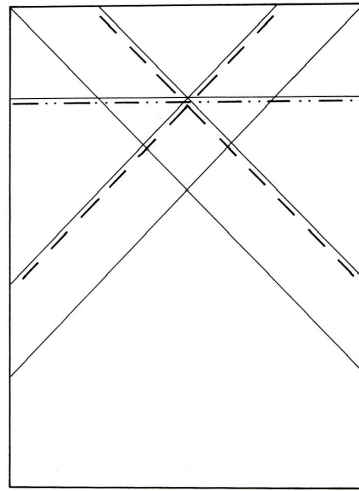
VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



PAS 3

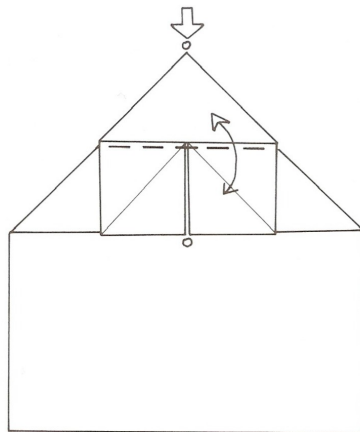


Doblega per la línia paral·lela a la part superior del paper i que passa pel punt d'intersecció de les dues noves diagonals. Gira el paper.



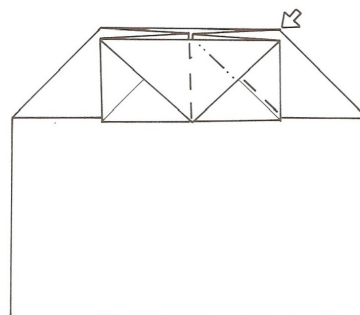
PAS 4

Fes una base waterboomb utilitzant les dues diagonals superiors.



PAS 5

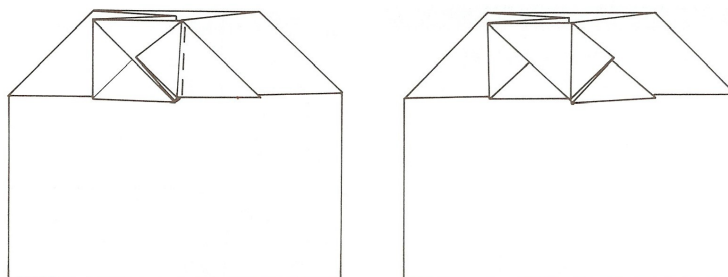
Enfonsa el triangle.



PAS 6

Enfonsa el plec que s'observa a la figura.

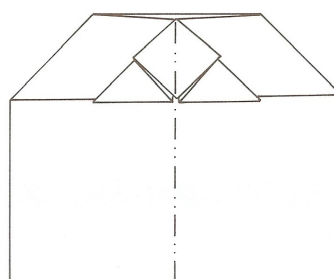
PAS 7 Torna a situar el plec cap a la dreta.



Repeteix els passos 6 i 7 per la banda esquerra. **PAS 8**

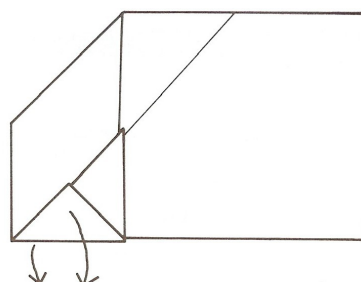
PAS 9

Fes un plec que divideixi l'avió per la meitat.



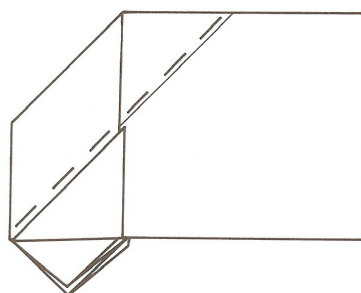
PAS 10

Tira cap avall els dos petits triangles, un de cada banda.



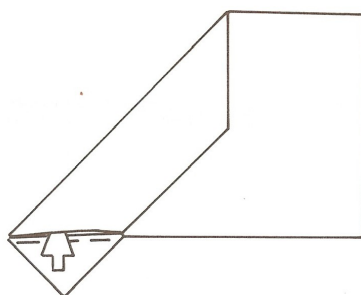
PAS 11

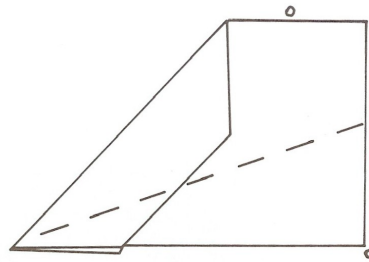
Doblega la part davantera de l'avió, tal i com ho veiem a la figura, per aconseguir una vora d'atac més resistent. Repeteix per l'altra banda.



PAS 12

Posa el triangle dins la butxaqueta que genera la vora d'atac.

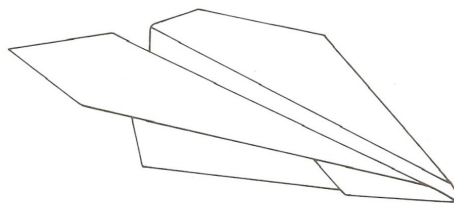




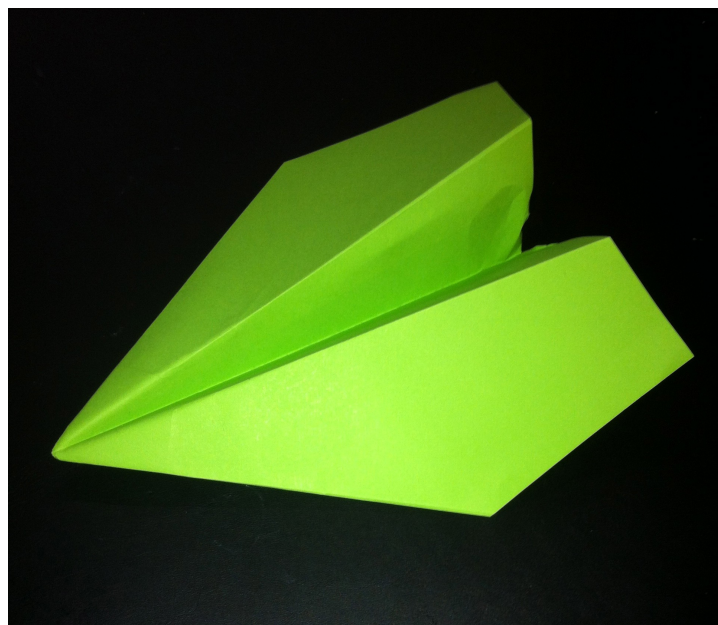
PAS 13

Situa el punt marcat a la part superior de l'avió just sobre la cantonada dreta inferior. Repeteix per l'altra banda.

L'avió ja està acabat.



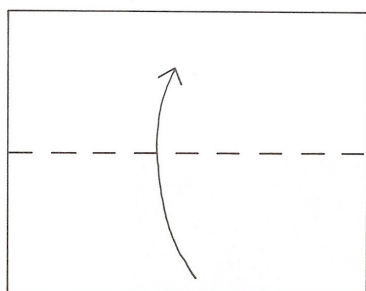
El que he fet jo m' ha quedat així:



VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

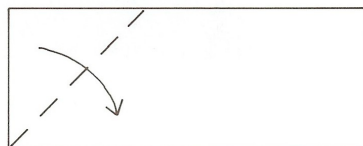
3.7.1.4 STEALTH

L'Stealth és un model que aconsegueix assolir grans distàncies a l'interior i un dard amb un vol divertit a l'exterior. A més a més, com tots els dards té un vol ràpid, és a dir, aconsegueix anar a velocitats elevades (sempre tenint en compte les velocitats que pot assolir un avió de paper). Els seus plecs d'allò més afilats són els que li donen aquestes propietats. Finalment, és molt simple de construir i fàcil de llançar. Anem-ho a veure:



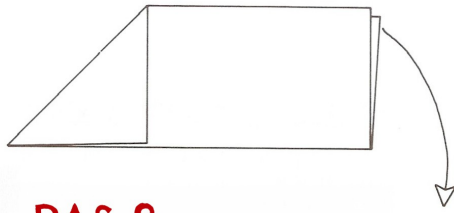
PAS 1

Doblega per la meitat.



PAS 2

Doblega les cantonades cap a l'interior.

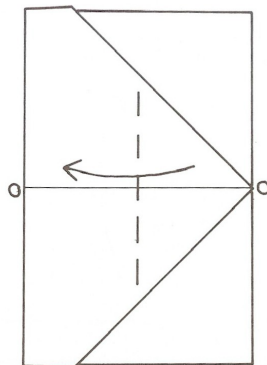
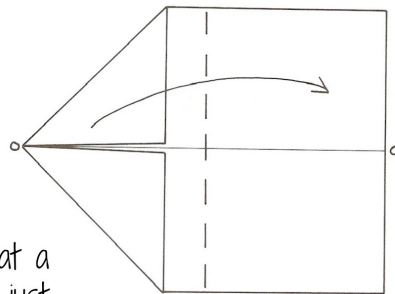


PAS 3

Desplega pel centre.

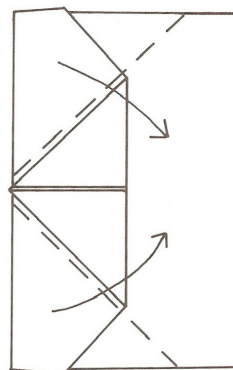
PAS 4

Doblega l'avió per la meitat
aconseguint que el punt situat a
la punta d'aquest es col·loqui just
a sobre el punt que divideix el
cul per la meitat.



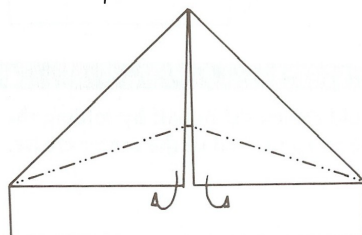
PAS 5

Doblega de manera que el
punt torni a la vora d'atac
de l'avió.



PAS 7

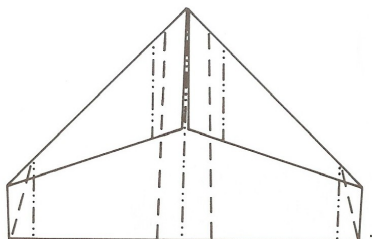
Doblega les ales cap
a sota l'estructura
feta al pas 5.



PAS 6

Doblega les cantonades
cap al centre.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

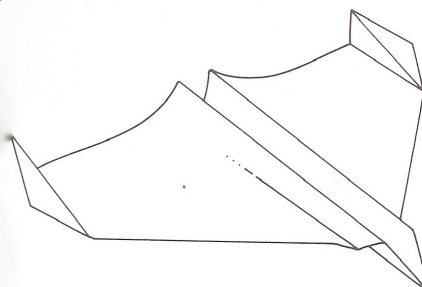


PAS 8

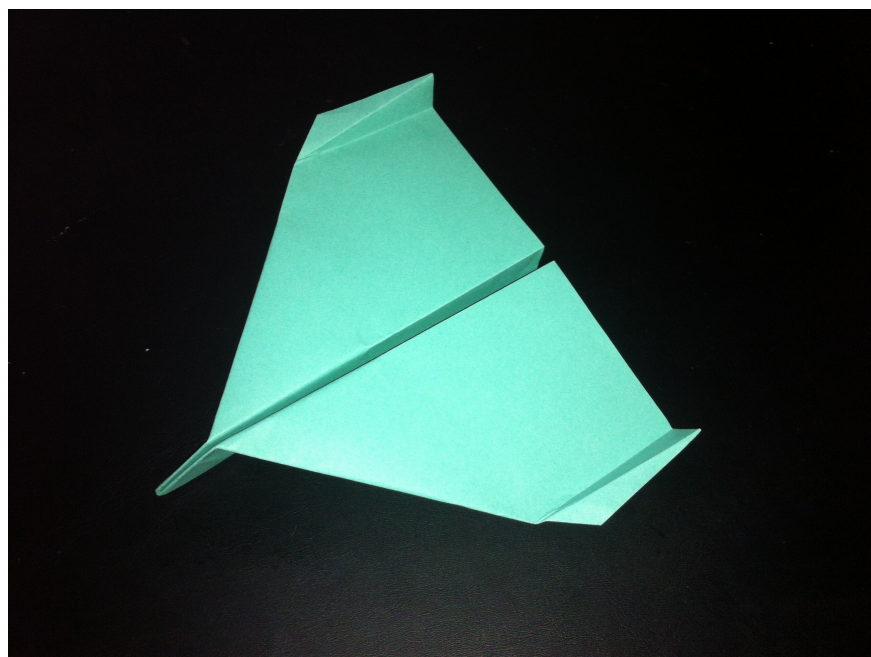
Doblega per les línies indicades al dibuix (tingues en compte els símbols).

PAS 9

Assegurat que les cruvelles de les ales són iguals a les del dibuix, és el més important de l'estructura d'aquest avió.



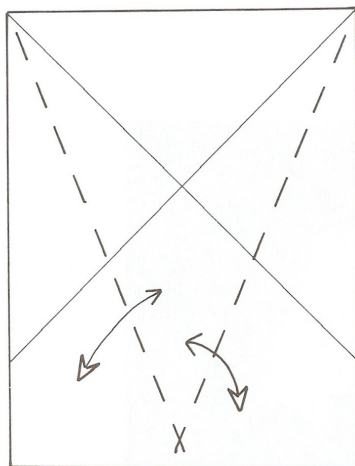
El que he fet jo m'ha quedat així:



3.7.1.5 STINGER

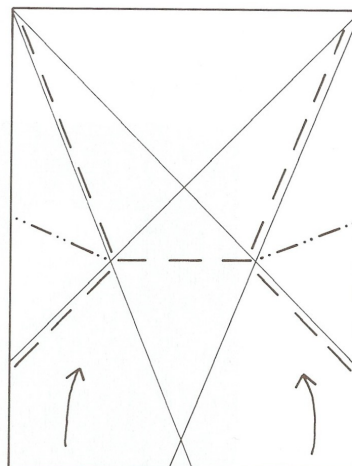
Aquest avió de paper s'anomena així pel míssil Stinger ja que al seu creador, John M. Collins, el seu disseny li ho fa recordar.

És un dard perfecte quan vola a alta velocitat. A més a més, és polivalent (vola igual de bé a l'interior com a l'exterior) i té una característica única, l'estructura de la seva base. Anem a veure com es construeix:



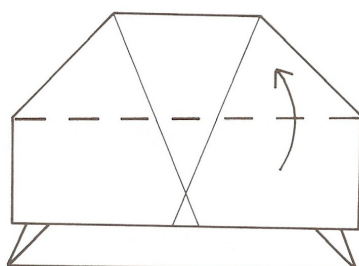
PAS 1

Fes les dues diagonals.
Llavors, doblega les cantonades inferiors fins les diagonals.



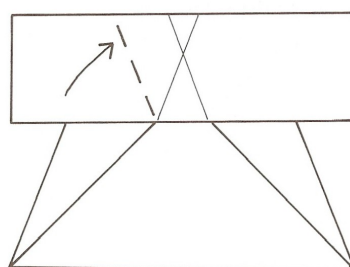
PAS 2

Crea la base waterbomb com la que es veu al pas 3.



PAS 3

Doblega la meitat de la cara superior cap amunt.

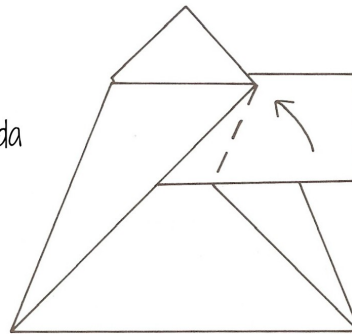


PAS 4

Doblega per la línia indicada tan lluny com puguis.

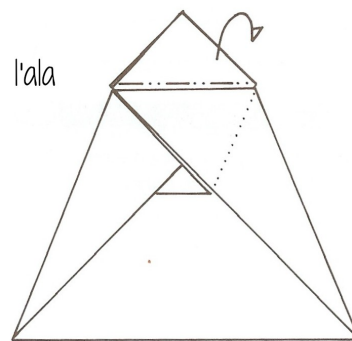
PAS 5

Repeteix per la banda dreta.



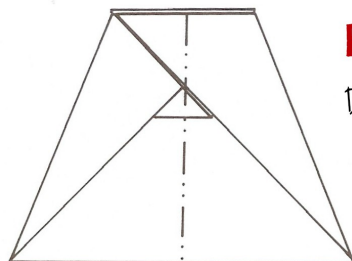
PAS 6

Doblega cap enrere l'ala superior.



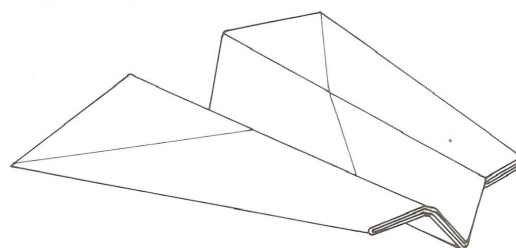
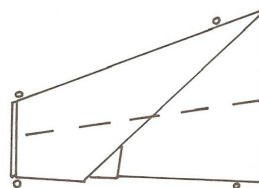
PAS 7

Doblega per la meitat.



PAS 8

Fes les ales doblegant des de la meitat de la vora d'atac fins la meitat de la vora de sortida.



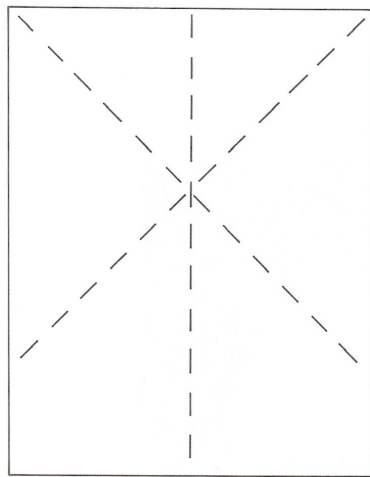
VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

El que he fet jo m' ha quedat així:



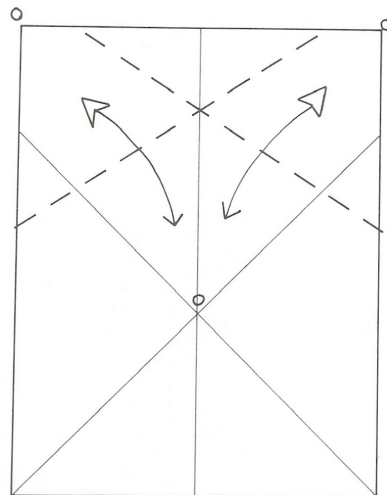
3.7.1.6 WIND DEVIL

El disseny de les ales d'aquest avió de paper és únic. Aconsegueix mantenir l'avió sempre en perpendicular al flux d'aire que hi impacta. D'aquesta manera, té avantatge per aconseguir assolir majors alçades. A més a més, és fàcil de construir. Anem-ho a veure:



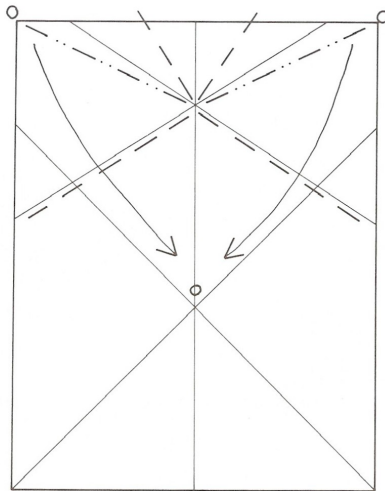
PAS 1

Comença fent les dues diagonals i doblega per la meitat. Desplega-ho tot i gira el paper.



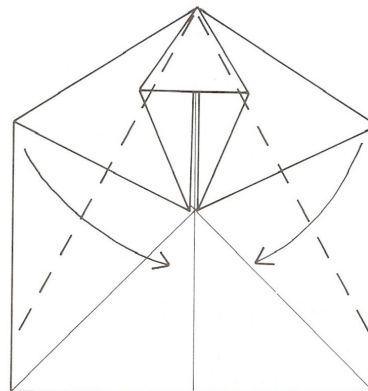
PAS 2

Doblega les dues cantonades superiors fins el punt d'intersecció de les dues diagonals.



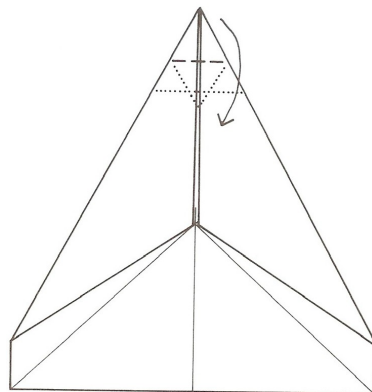
PAS 3

Desplega els plecs fets al pas 2 i fes una base waterbomb per les línies senyalades al dibuix.



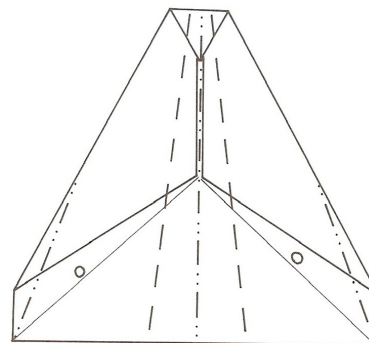
PAS 4

Doblega les dues cantonades superiors fins la línia central.



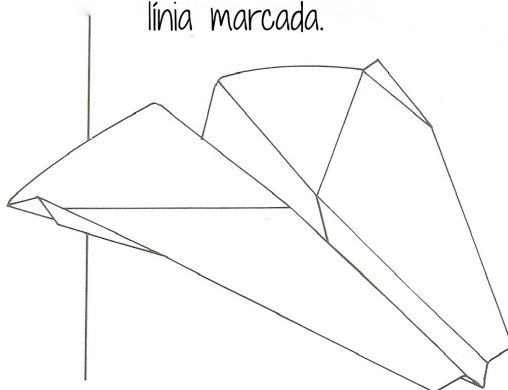
PAS 5

Doblega la punta per la línia marcada.



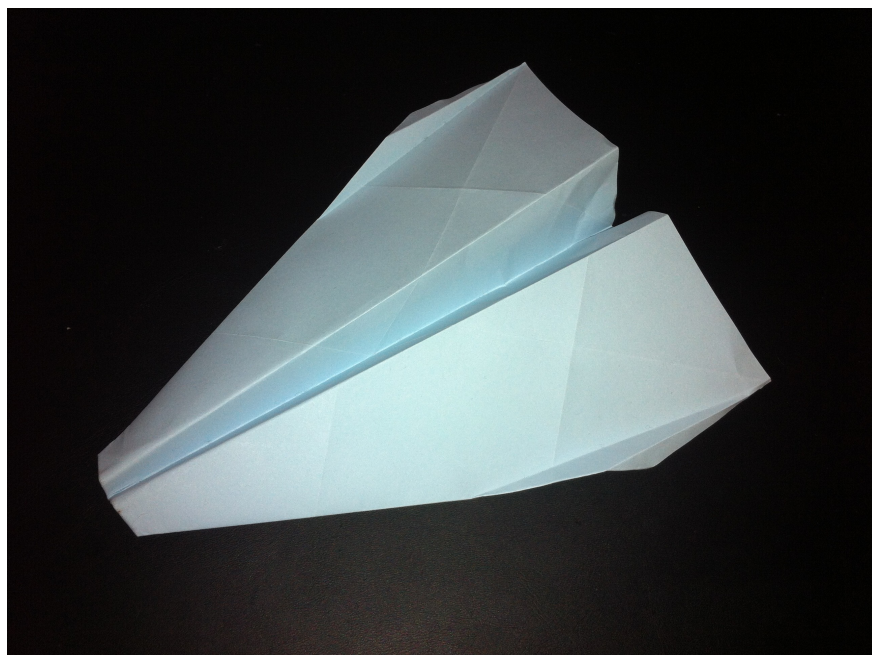
PAS 6

Doblega per les línies marcades al dibuix per poder fer les ales i el fuselatge de l'avió. Tingues en compte els símbols.



VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

El que he fet jo m' ha quedat així:



3.7.2 PLANEJADORS

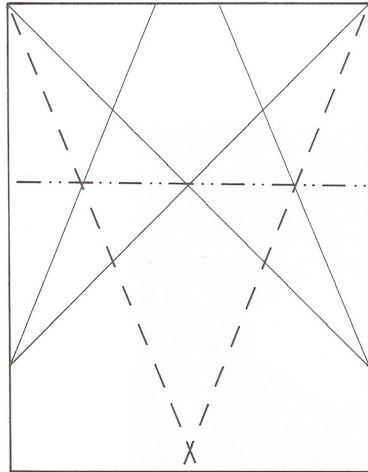
Anomenem planejadors a aquells avions de paper que tenen les següents característiques:

- Si parlem d'estructura, els planejadors, a diferència dels dards, no tenen uns plecs tan afilats, són més suaus. També disposen d'una ala delta que comença amb una punta completament perpendicular al flux d'aire que hi impacta, una punta recta i acabada amb, també, una cua completament recta. Les seves ales són llargues i amples. La seva estructura ens recorda a la dels avions reals també anomenats planejadors.
- Si parlem de vol, els planejadors són uns avions molt menys ràpids que els dards però aconsegueixen vols de major durada. A més a més, com els dards, assoleixen llargues distàncies. El seu objectiu no és volar ràpid sinó un vol el més llarg possible. Per aquest motiu, tenen unes ales grans i amples, volen generar molta sustentació, i la punxa no és afilada perquè no té la necessitat de tallar l'aire, no vol aconseguir grans velocitats.

Els planejadors que he escollit crear són: el The Plane, el The Plane Short, el Glart, el Trang, el Headstand Lander, l'Starfighter, l'AWACS, l'Starship Shuttle, el Twin Jet i l'Skid Kid (tots són extrets del llibre *The Gliding Flight* de John M. Collins, guanyador del premi internacional a millor dissenyador d'avions de paper. El mètode de treball ve a ser el mateix que els dards (petites descripcions traduïdes al català extretes del llibre del senyor Collins).

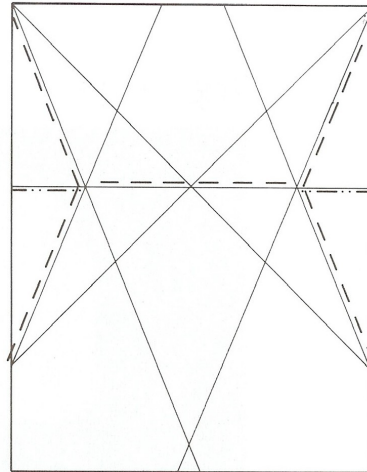
3.7.2.1 THE PLANE

Per John M. Collins, aquest avió de paper és un dels seus preferits. Assegura que si aconsegueixes crear-lo d'allò més perfecte i simètric i saps tirar-lo correctament, al·lucinaràs amb el seu vol. A més a més, no és gens complicat de construir. Anem-ho a veure.



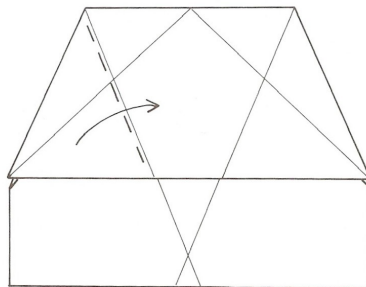
PAS 1

Doblega com els passos 1,2 i 3 del Fènix. Fes plecs similars per les cantonades inferiors. Llavors, fes un plec que passi pel punt d'intersecció de les diagonals



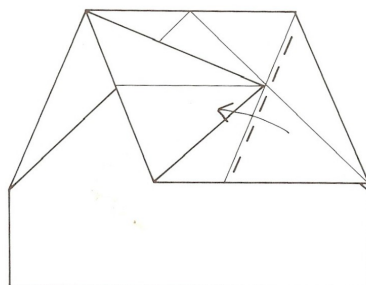
PAS 2

Crea una base waterbomb.



PAS 3

Doblega per la línia indicada al dibuix.

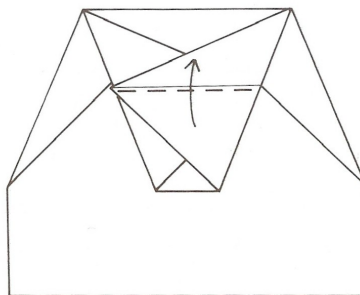


PAS 4

Repeteix per la banda dreta.

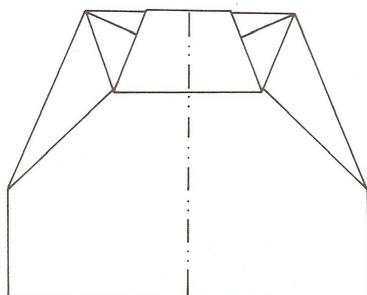
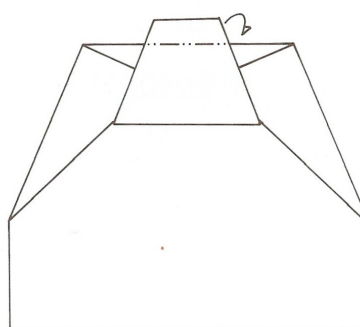
PAS 5

Doblega pel plec ja existent.



PAS 6

Doblega la part que sobresurt cap enrere.

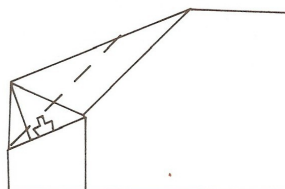


PAS 7

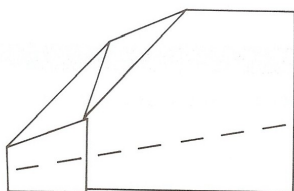
Doblega l'avió per la meitat.

PAS 8

Doblega per les línies marcades al dibuix. Tot seguit, posa el vèrtex dins la butxaqueta formada.

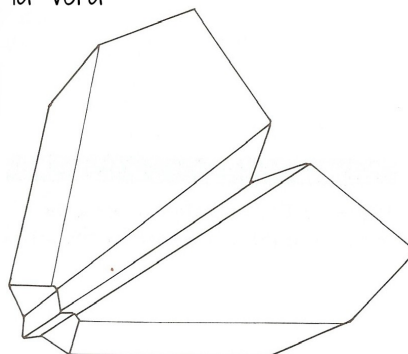


VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

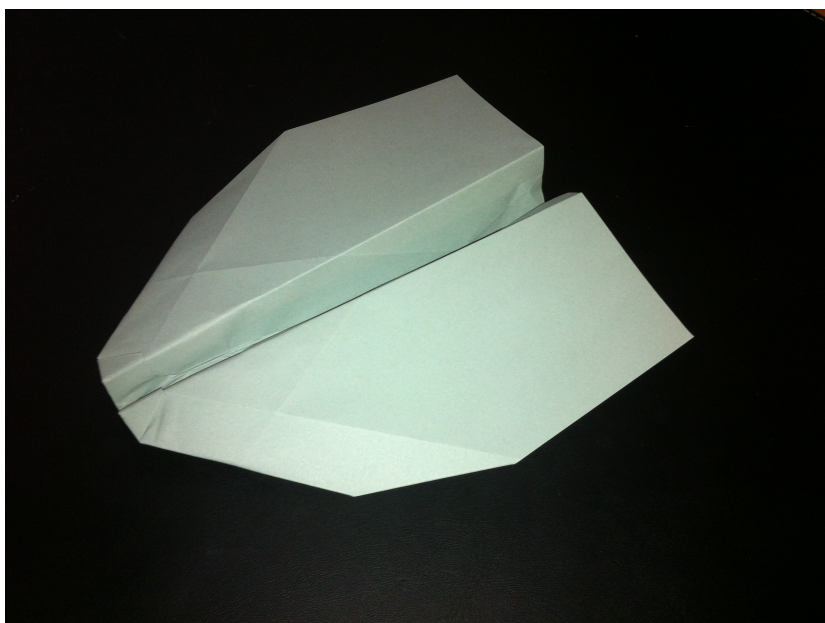


PAS 9

Fes els plecs de les ales de manera que es comenci el plec per la meitat del quadrilàter que forma la vora d'atac.



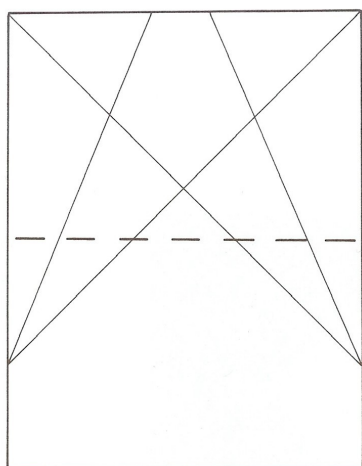
El que he fet jo m'ha quedat així:



3.7.2.2 THE PLANE SHORT

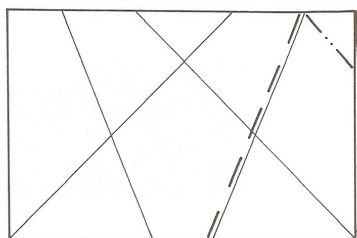
El The Plane Short és un avió de paper creat gràcies a la combinació del Phoenix i del The Plane. És més fàcil de crear que aquest segon. A més a més, és un avió polivalent que pot volar per qualsevol lloc.

Anem a veure com es construeix:



PAS 1

Doblega com el Fènix al pas 3 i desplega. Després, doblega per la meitat.

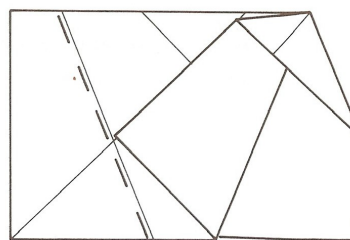


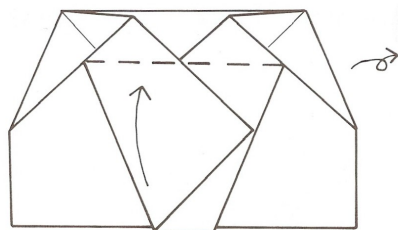
PAS 2

Doblega pels plecs ja existents que veiem a la figura. Tingues en compte els símbols.

PAS 3

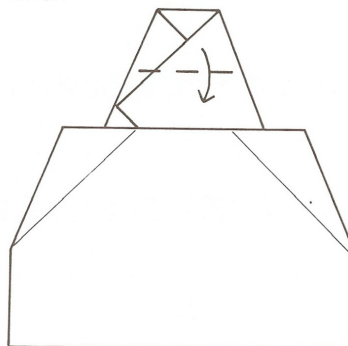
Repeteix per la banda esquerra.





PAS 4

Plega la secció cap amunt tan lluny com puguis. Gira l'avió.

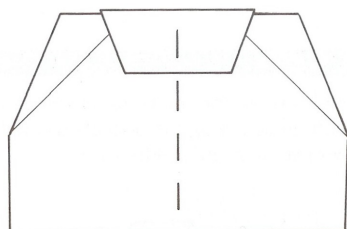
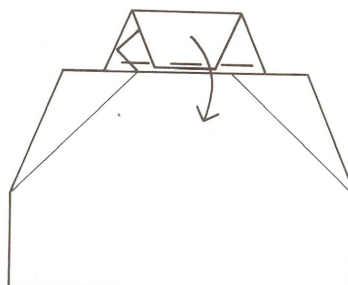


PAS 5

Doblega per la línia senyalada de manera que la part superior no acabi de tocar el cos de l'avió.

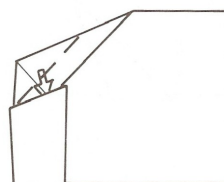
PAS 6

Doblega la part superior cap endins.



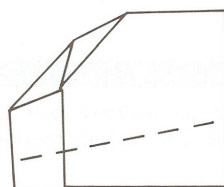
PAS 7

Plega per la meitat.



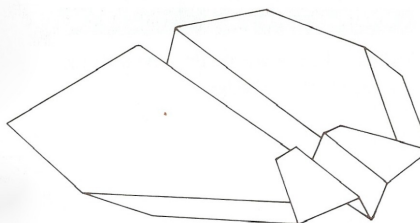
PAS 8

Doblega per la línia marcada. Tot seguit, posa el vèrtex dins la butxaqueta formada.



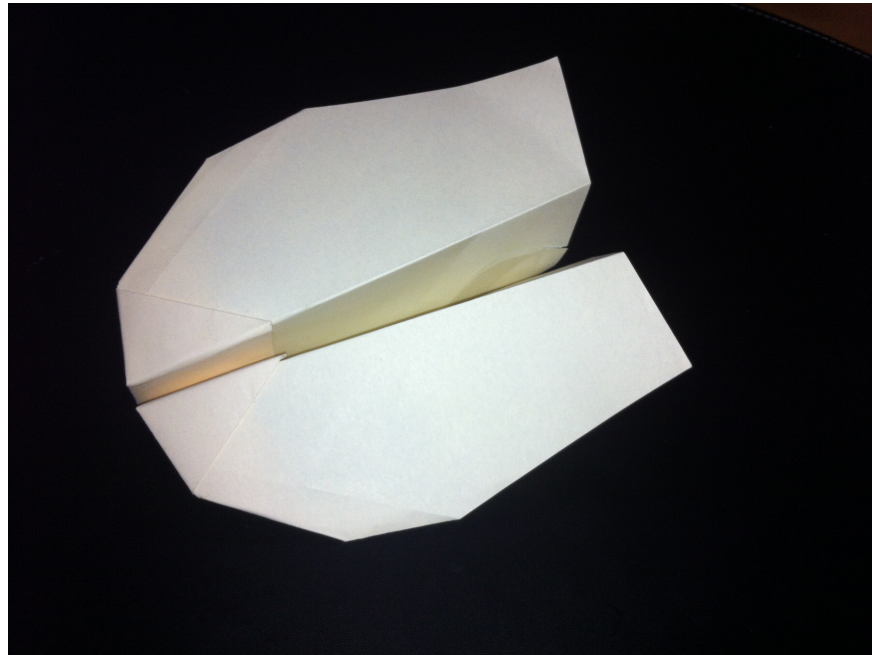
PAS 9

Fes els plecs de les ales de manera que hi hagi una gran part del fuselatge destinat a ser subjectat per llançar l'avió.



VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

El que he fet jo m'ha quedat així:

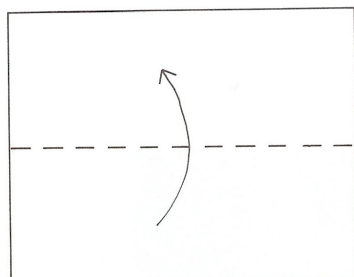


VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

3.7.2.3 GLART

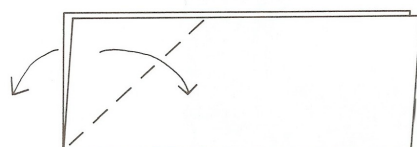
Per la seva estructura, es podria afirmar que és un dard però si mirem el seu vol veiem clarament que és un planejador. És fàcil de construir i, a més a més, té un molt bon vol tant a l'interior com a l'exterior.

Anem a veure com el podem construir:



PAS 1

Doblega el paper per la meitat.

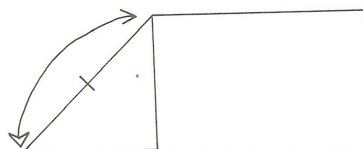


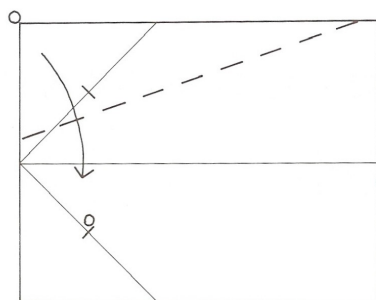
PAS 2

Doblega les dues cantonades cap a l'interior.

PAS 3

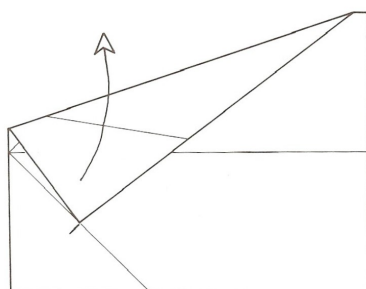
Marca el centre del fuselatge. Tot seguit, desplega tot l'avió.





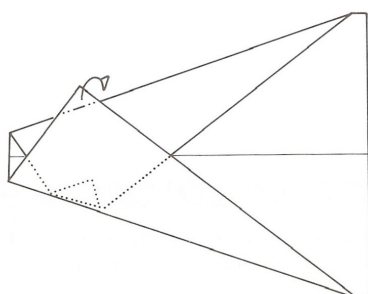
PAS 4

Doblega una cantonada fins que el vèrtex quedi just sobre el punt que marca la meitat del fuselatge de la banda oposada.



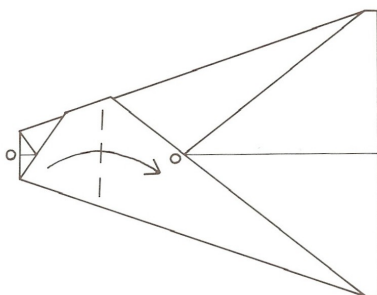
PAS 5

Desplega i repeteix per l'altra banda. Després, plega les dues bandes com es pot veure a la figura del pas 6.



PAS 6

Doblega les puntes tal i com es veu a la figura.

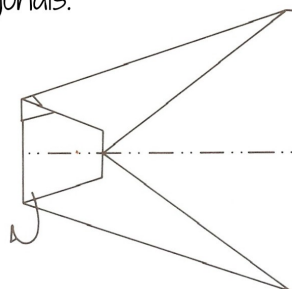


PAS 7

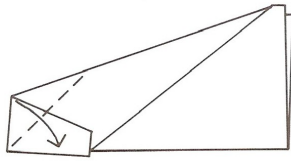
Doblega de manera que el punt de la vora d'atac quedi just sobre el punt d'intersecció de les dues diagonals.

PAS 8

Doblega l'avió per la meitat.

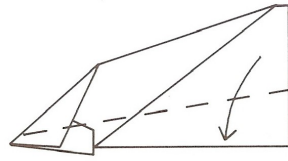


VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



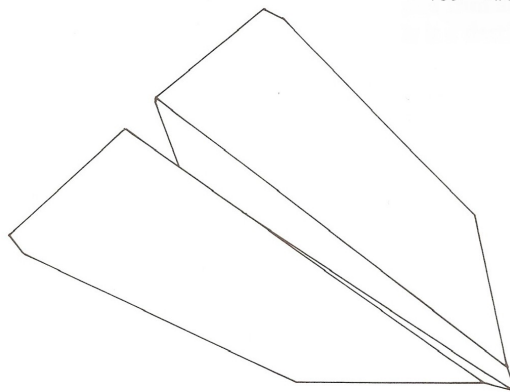
PAS 9

Doblega el vèrtex frontal cap a sobre el fuselatge.

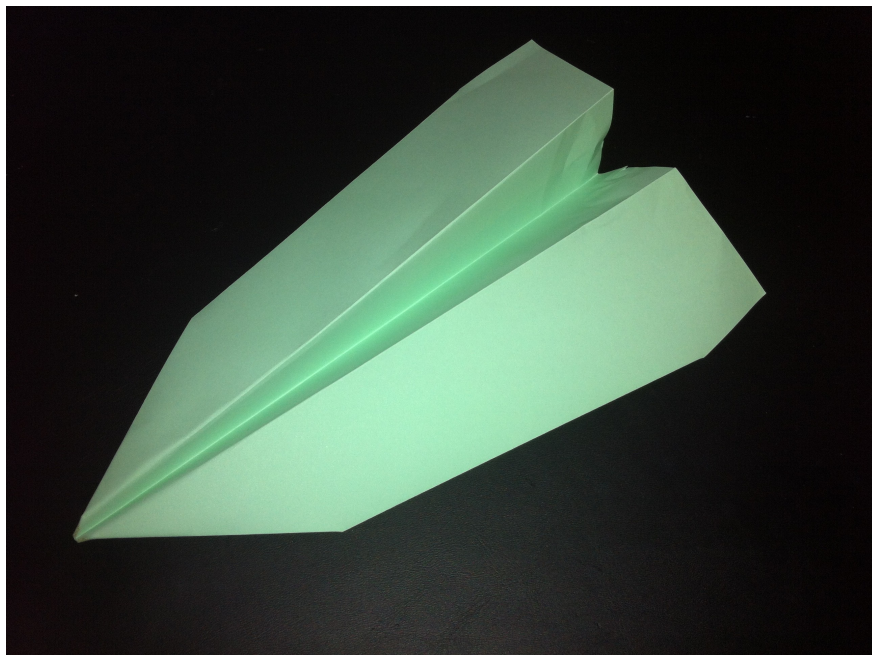


PAS 10

Fes els plecs corresponents per crear les ales de l'avió Glart.

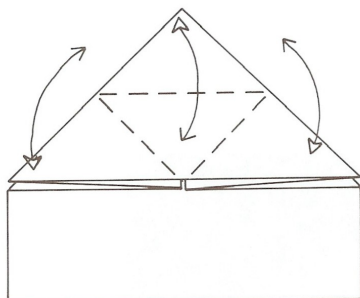


El que he fet jo m'ha quedat així:



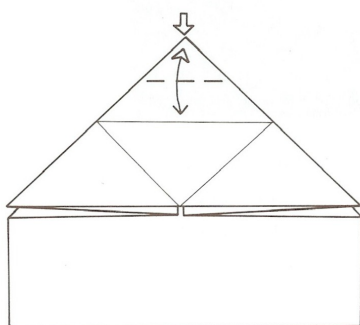
3.7.2.4 TRANG

El Trang és un avió polivalent i un molt bon planejador que aconseguirà llargues distàncies quan és tirat amb força. El seu únic inconvenient és la paciència necessària per construir-lo. Si n'esteu carregats, anem a començar:



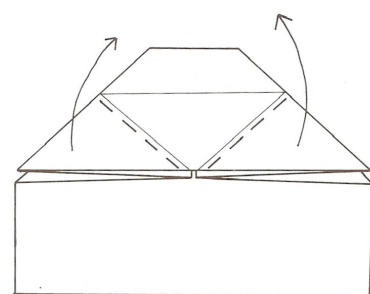
PAS 1

Comença creant una base waterbomb. Tot seguit, plega tal i com es veu al dibuix i desplega.



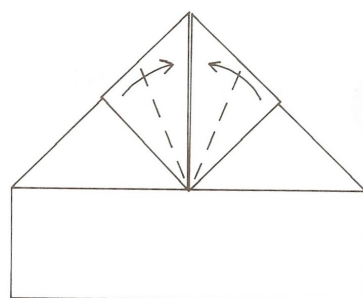
PAS 2

Plega i desplega el triangle superior per la meitat. Llavors enfonsa la punxa del triangle.



PAS 3

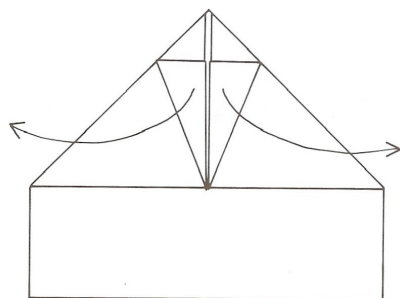
Doblega cap amunt els dos triangles inferiors.



PAS 4

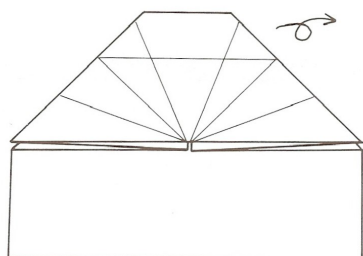
Doblega per la meitat les dues ales que queden.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



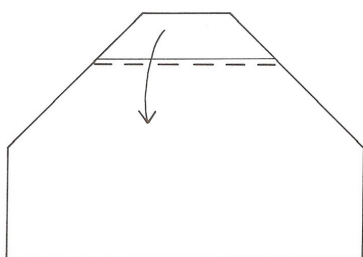
PAS 5

Desplega les ales.



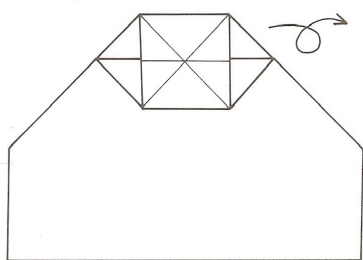
PAS 6

Gira l'avió.



PAS 7

Tira cap avall la part superior.

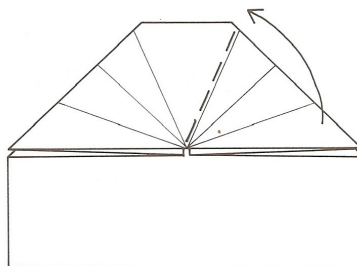


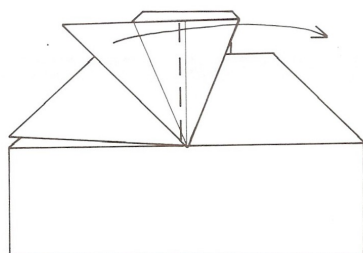
PAS 8

Gira el paper.

PAS 9

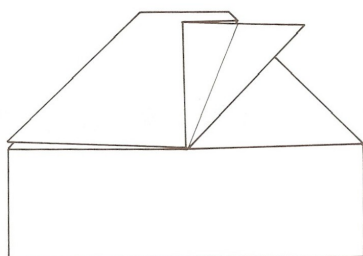
Doblega pels plecs ja existents.





PAS 10

Doblega pel plec existent.

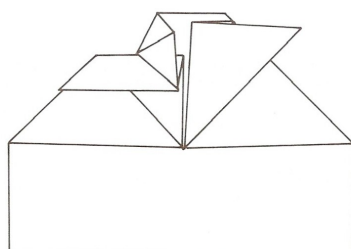
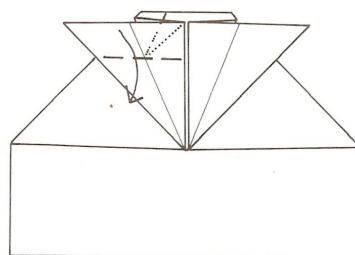


PAS 11

Repeteix els passos 9 i 10 per la banda esquerra.

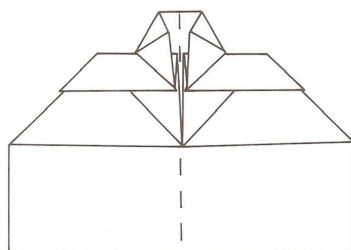
PAS 12

Tira cap avall la zona marcada al dibuix de manera que els triangles petits quedin a la vista.



PAS 13

Repeteix el pas 12 per la banda esquerra.

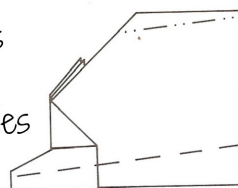


PAS 14

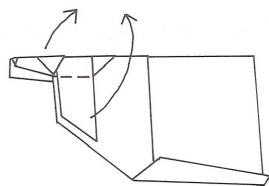
Doblega l'avió per la meitat.

PAS 15

Fes els plecs de les ales com les del dibuix. Tingues en compte els símbols (unes línies són les ales, les altres, els winglets).

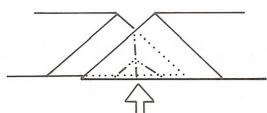


VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



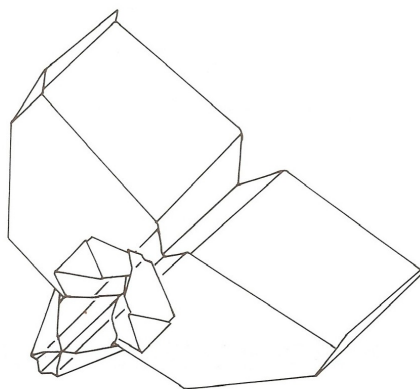
PAS 16

Tira cap amunt les aletes paral·leles i posa-les una dins l'altra. Per veure amb més detall aquest pas, mira la figura inferior de l'esquerra.

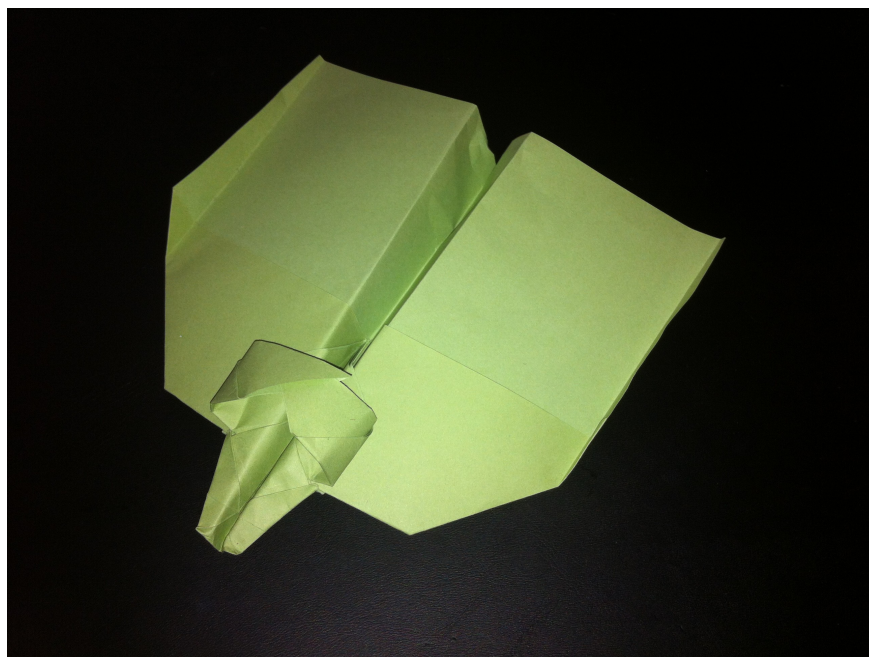


PAS 17

Un cop fixades les dues aletes, ja tenim l'avió creat.

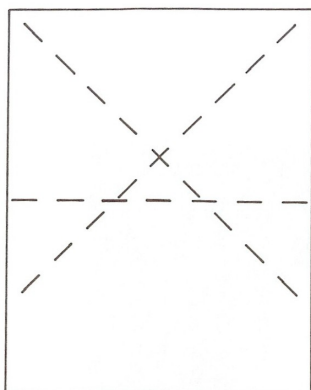


El que he fet jo m'ha quedat així:



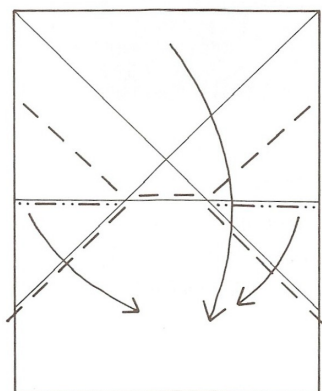
3.7.2.5 HEADSTAND LANDER

Aquest avió de paper és un molt bon planejador amb una característica única. Gràcies a la seva estructura, sempre que aterra ho fa amb el cap dret, d'aquí el seu nom, "Headstand" vol dir parada de cap. Mai cau a terra girat o amb la vora d'atac clavada al terra, aquest aterra amb delicadesa. A més a més, és un avió polivalent i fàcil de construir. Anem a veure-ho:



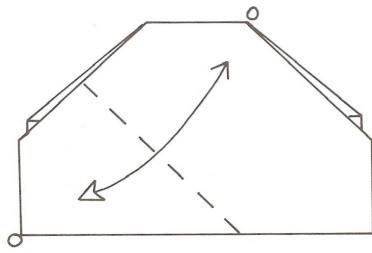
PAS 1

Plega formant les dues diagonals i desplega-les. Doblega per la meitat i desfés el plec.



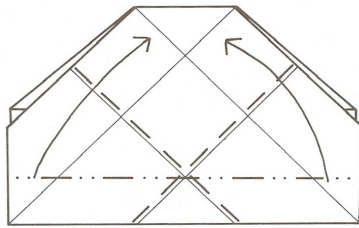
PAS 2

Amb la part inferior crea una base waterbomb.



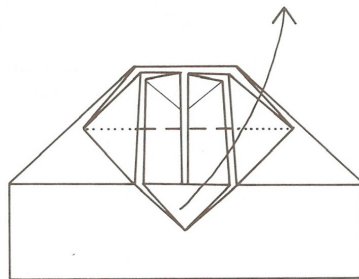
PAS 3

Doblega de manera que la cantonada esquerra inferior es trobi amb la dreta superior. Repeteix per la banda dreta.



PAS 4

Fes un plec per la línia que passa pel punt d'intersecció de les dues diagonals formades al pas 3. Tot seguit, forma una base waterbomb.

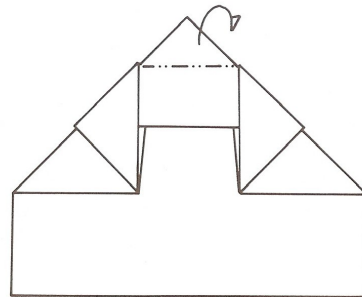


PAS 5

Doblega la base waterbomb per la meitat.

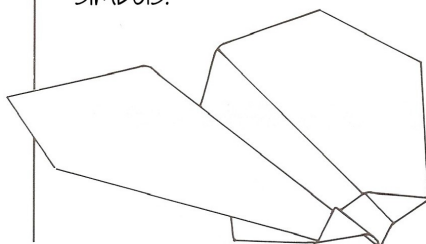
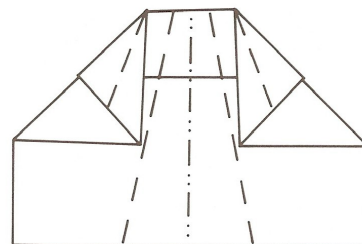
PAS 6

Doblega la part superior (el triangle que sobresurt) cap enrere.



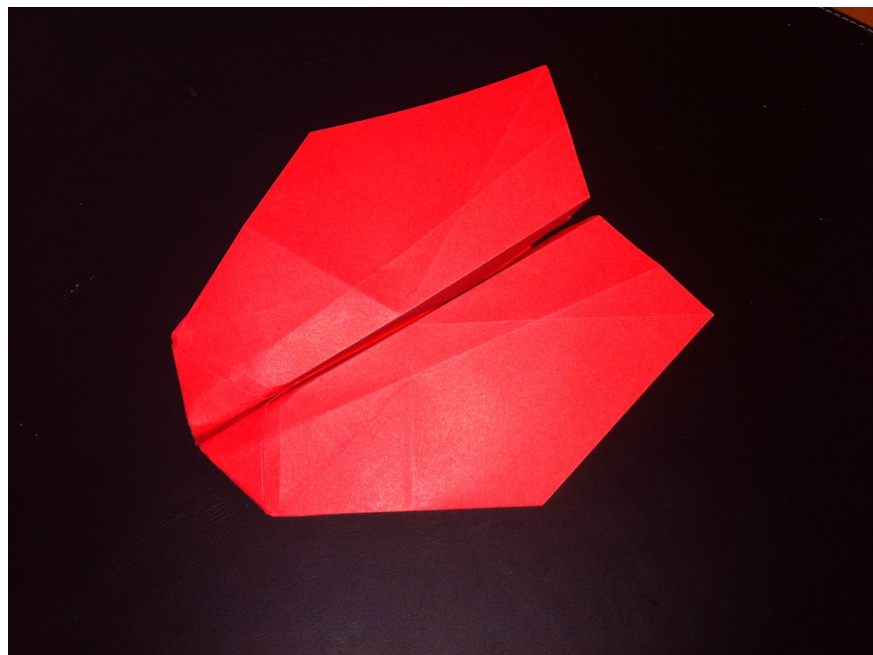
PAS 7

Fes els plecs necessaris per crear les ales i el fuselatge. Aquests són els marcats al dibuix del costat. Tingues en compte els símbols.



VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

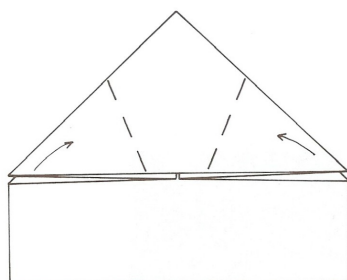
El que he fet jo m'ha quedat així:



3.7.2.6 STARFIGHTER

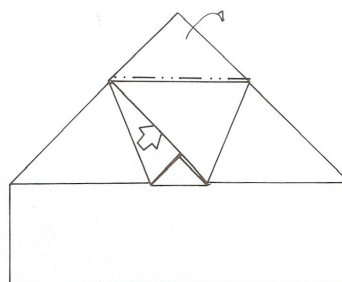
Aquest avió de paper, si el llances amb poca força, el morro li pesa massa i aconsegueix resultats pèssims però, si el llances amb molta força, n'aconsegueix de molt bons. I és que el 1988 va guanyar el primer premi en la modalitat de distància a la Segona Competició Internacional d'Avions de Paper celebrada a Saragossa.

També, és un avió polivalent en tots els sentits. Pot volar en qualsevol condició, tan a l'exterior com a l'interior. A més a més, pot volar tan del dret com del revés. Fa piruetes. El seu únic inconvenient és la construcció. És bastant difícil. Anem-ho a veure però:



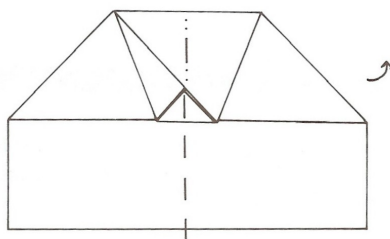
PAS 1

Comença amb la base waterbomb. Tot seguit, doblega les dues cantonades cap a l'interior tal i com es veu al dibuix.



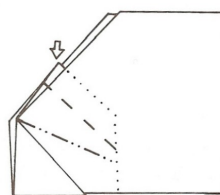
PAS 2

Posa una aleta dins l'altra i doblega cap enrere la part superior.



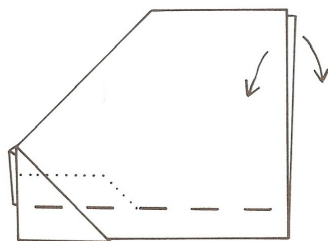
PAS 3

Doblega l'avió per la meitat.



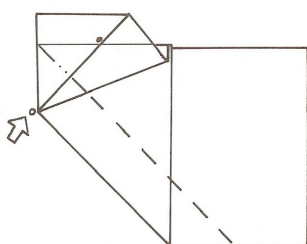
PAS 4

Enfonsa el plec que es troba entremig de les dues ales.



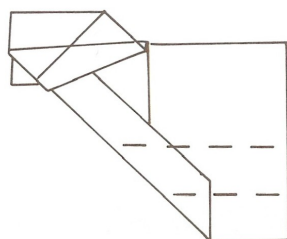
PAS 5

Per fer els plecs de les ales doblega per les línies marcades.



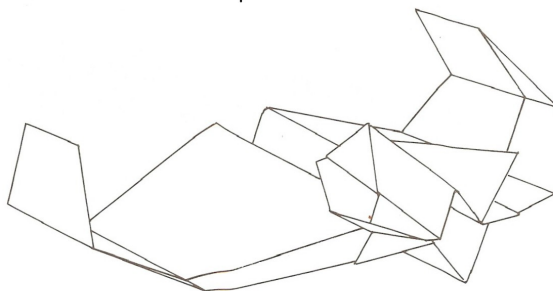
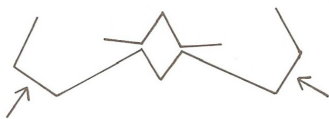
PAS 6

Enfonsa pel punt senyalat i doblega per la diagonal de manera que els dos punts marcats al dibuix quedin un sobre l'altre.



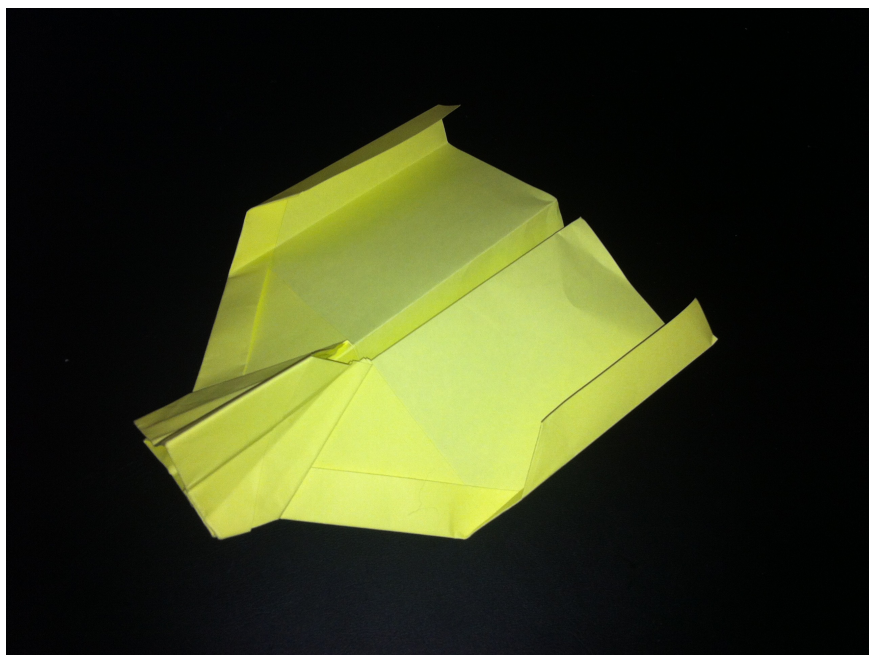
PAS 7

Doblega per les línies marcades per poder crear les ales i el fuselatge. Un cop acabat l'avió comprova que la vista frontal és tal i com es mostra al dibuix de l'esquerra.



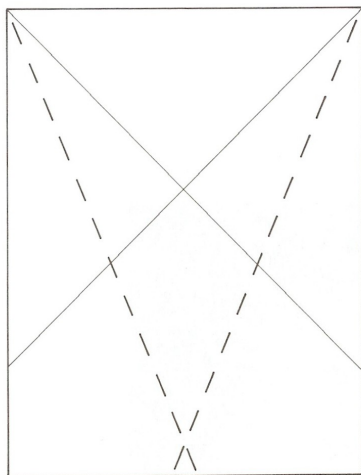
VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

El que he fet jo m' ha quedat així:



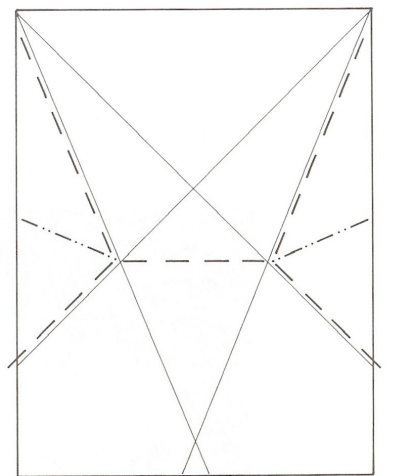
3.7.2.7 AWACS

L'AWACS comença a construir-se amb la mateixa base que l'avió Stinger però llavors es complica d'allò més. És el més difícil de crear. De totes maneres és un molt bon avió polivalent. Assoleix bones distàncies. Anem a veure com es construeix:



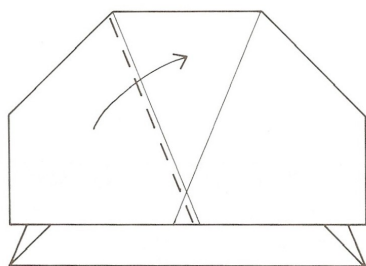
PAS 1

Fes els plecs de les diagonals i doblega les cantonades inferiors fins la posició d'aquestes.



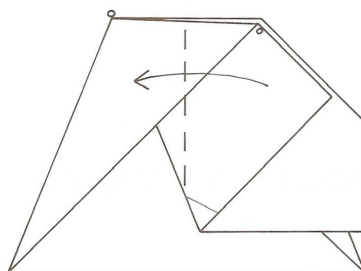
PAS 2

Fes una base waterbomb.



PAS 3

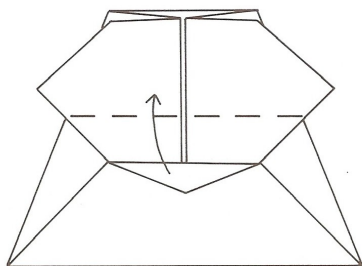
Doblega per la línia senyalada.



PAS 4

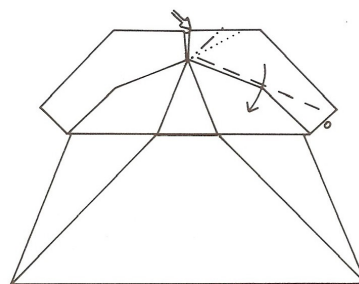
Doblega per la meitat de manera que els dos punts marcats quedin un sobre l'altre.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



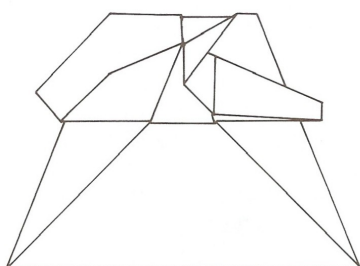
PAS 5

Doblega el triangle cap amunt tant com puguis.



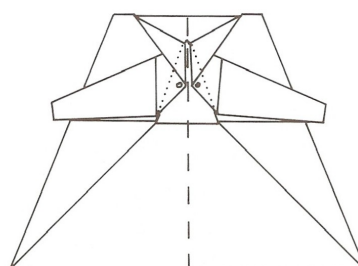
PAS 6

Enfonsa pel punt indicat i doblega el triangle cap avall.



PAS 7

Repeteix per la banda esquerra.

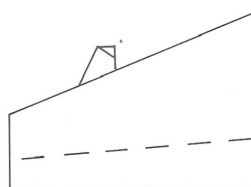


PAS 8

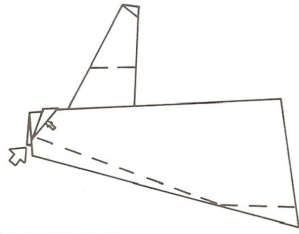
Col·loca els plecs indicats sota el triangle. Tot seguit, doblega per la meitat.

PAS 9

Plega per les línies indicades per poder crear les ales i el fuselatge.



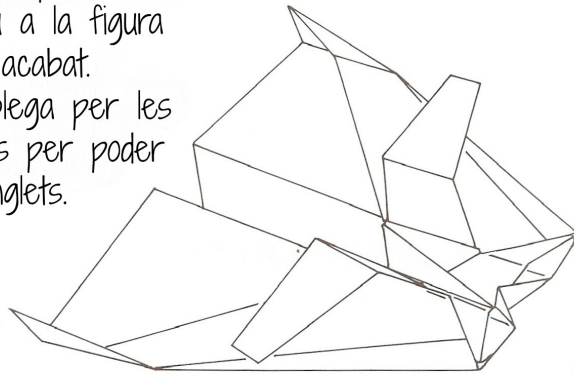
VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



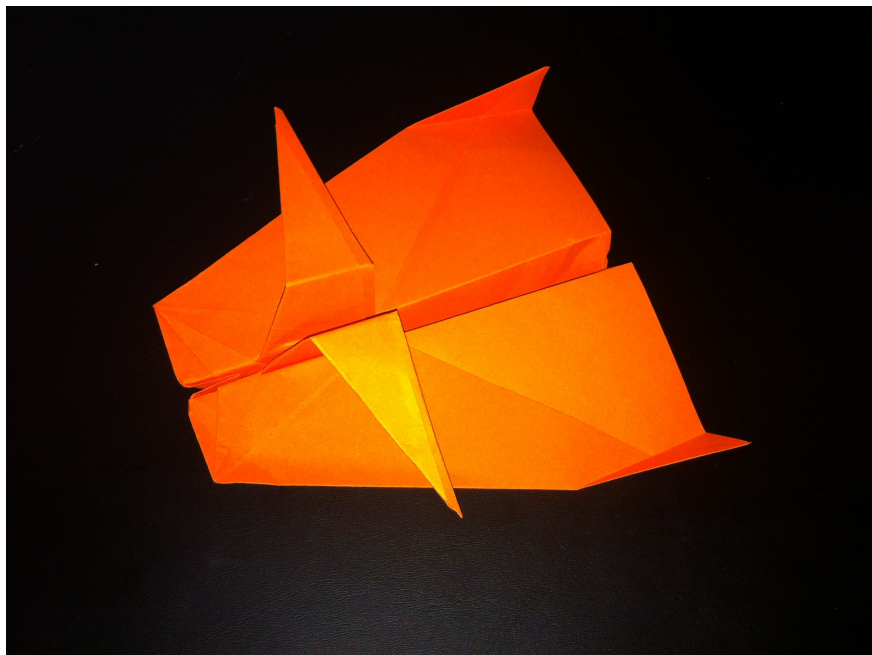
PAS 10

Enfonsa el punt indicat a la figura superior per poder crear la punta tal i com es veu a la figura de l'AWACS acabat.

Finalment, doblega per les línies indicades per poder crear els winglets.

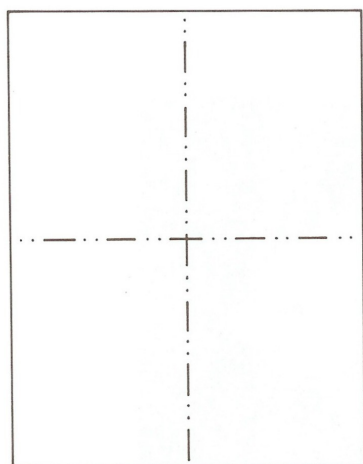


El que he fet jo ha quedat així:



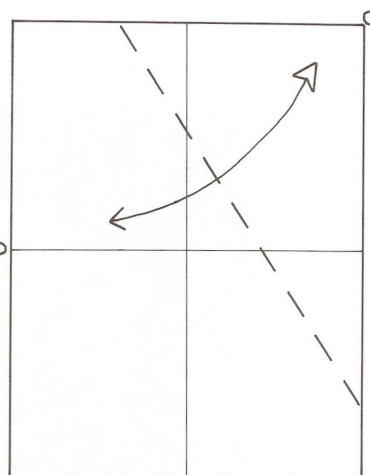
3.7.2.8 STARSHIP SHUTTLE

Aquest avió és un bon planejador quan vola a l'interior i aconsegueix bons vols exteriors si aquests són amb poc vent. És fàcil de construir però estigues atent/a. Anem a veure-ho doncs:



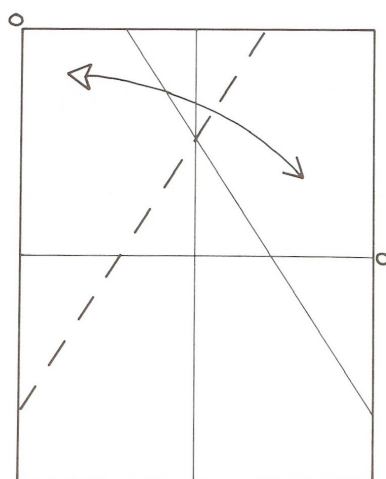
PAS 1

Doblega el paper per les dues meitats.



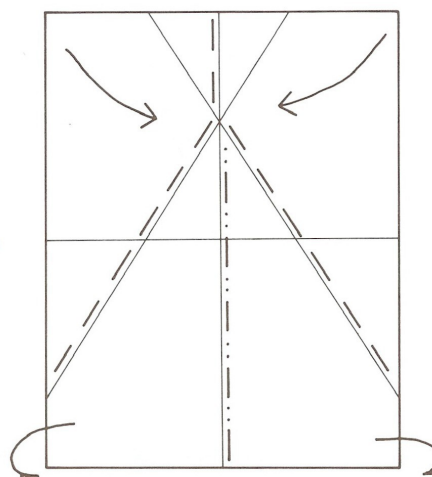
PAS 2

Doblega la cantonada dreta superior fins el punt mig de la banda esquerra. Desplega-ho.



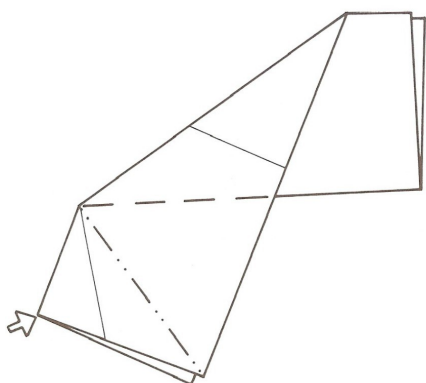
PAS 3

Repteix per la banda esquerra.



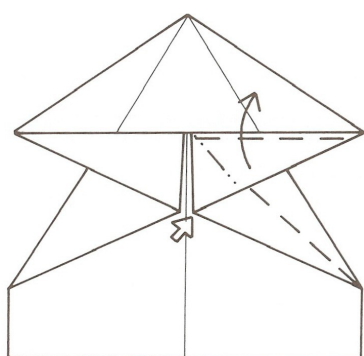
PAS 4

Doblega per les línies marcades al dibuix. Tingues en compte els símbols, alguns són plecs que formen valls, d'altres, muntanyes.



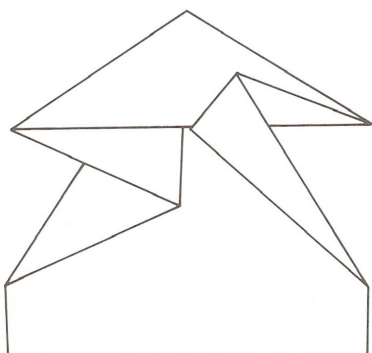
PAS 5

Enfonsa la punta marcada. És més fàcil si abans marques els plecs assenyalats al dibuix.



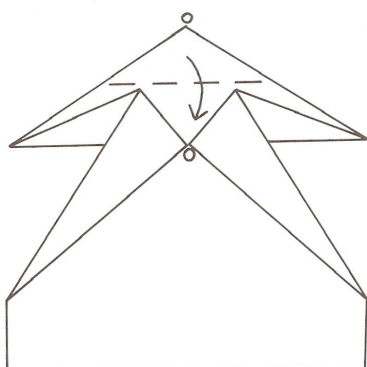
PAS 6

Doblega cap amunt per la línia indicada mentre enfones el punt marcat per la fletxa.



PAS 7

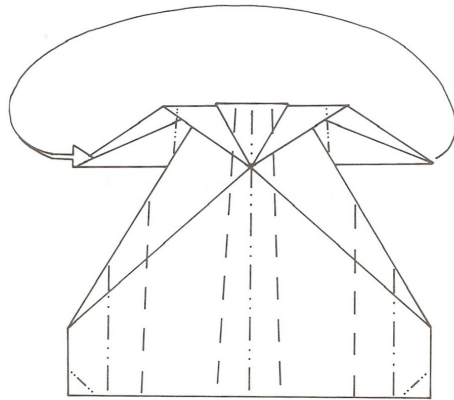
Repeteix per l'altra banda.



PAS 8

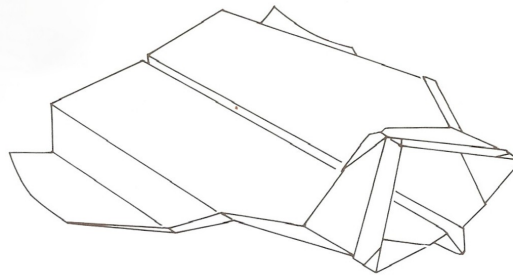
Doblega el vèrtex superior marcat cap avall. Concretament, fins l'altre punt marcat.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

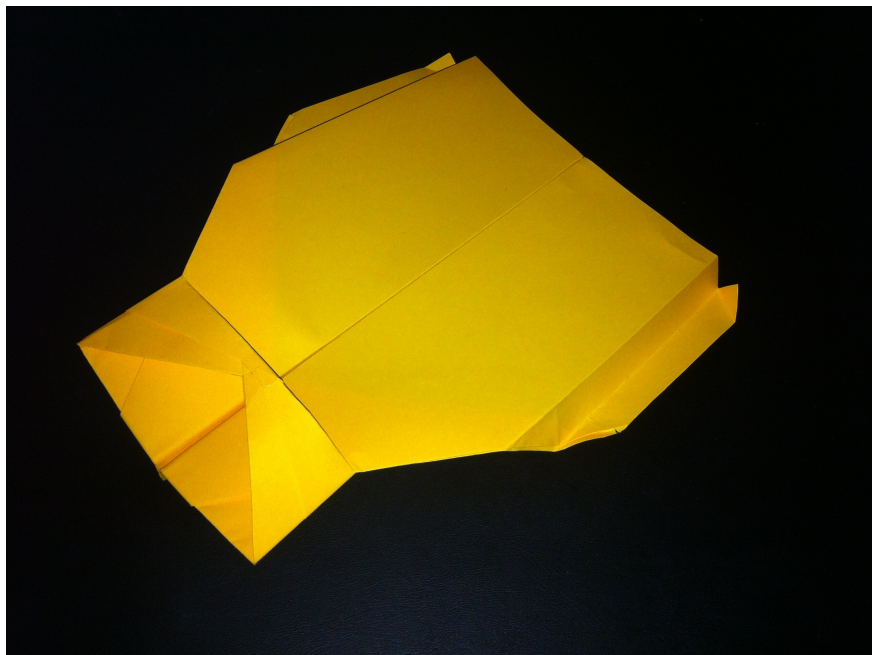


PAS 9

Doblega per les línies marcades. Tingues en compte els símbols. Un cop fetes les ales i el fuselatge, col·loca una de les aletes superiors dins l'altra.

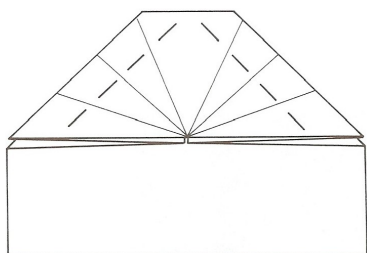


El que he fet jo m'ha quedat així:



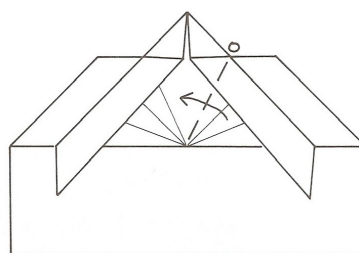
3.7.2.9 TWIN JET

El Twin Jet és un planejador molt bo. Té un vol molt bo que aconsegueix assolir llargues distàncies. A més a més, és polivalent. Pot volar tan a dins com a fora. L'únic inconvenient són els passos que s'han de seguir per construir-lo. És llarg i complex de fer. Anem-ho a veure:



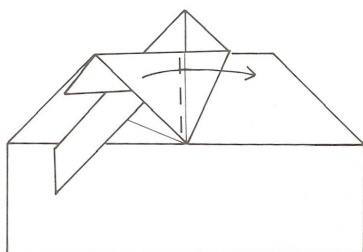
PAS 1

Doblega com el Trang fins el pas 8. Doblega per les línies discontinuïes.



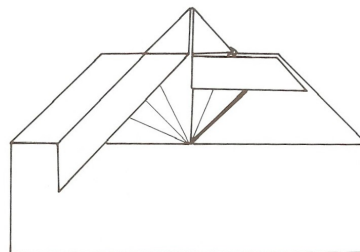
PAS 2

Doblega la part dreta per la línia marcada.



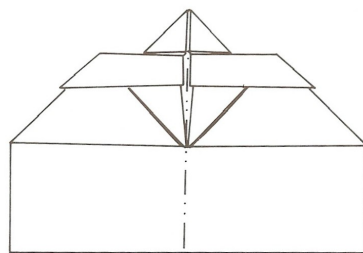
PAS 3

Doblega per la línia senyalada.



PAS 4

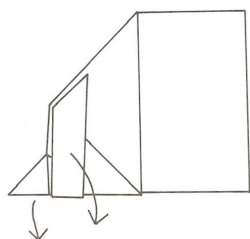
Repeteix els passos 2 i 3 per la banda esquerra.



PAS 5

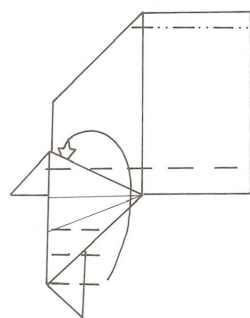
Doblega l'avió per la meitat.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



PAS 6

Tira les aletes cap avall.



PAS 7

Fes els plegs indicats per poder construir les ales i el fuselatge. Per últim, col·loca la pestanyeta indicada dins la butxaqueta que forma el fuselatge.

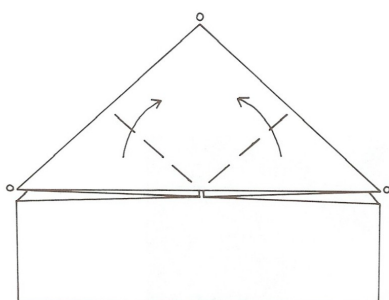


El que he fet jo m'ha quedat així:



3.7.2.10 SKID KID

Aquest avió és molt bo per vols interiors. A més a més, té una estructura amb una zona específica per l'aterratge. Aquesta li permet mantenir-se dret quan arriba al terra en qualsevol situació. El seu vol és molt divertit i no és gens difícil de construir. Anem-ho a veure:

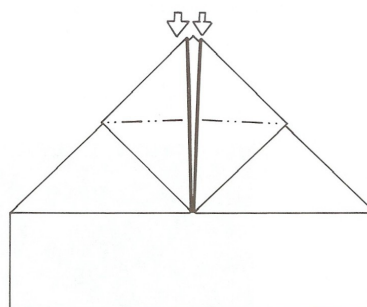


PAS 1

Fes una base waterbomb i doblega les dues cantonades inferiors cap al vèrtex superior tal i com es veu al dibuix.

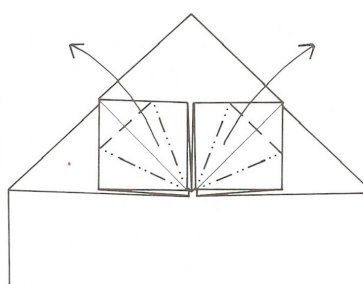
PAS 3

Obra cap amunt els dos quadrats formats al pas 2.

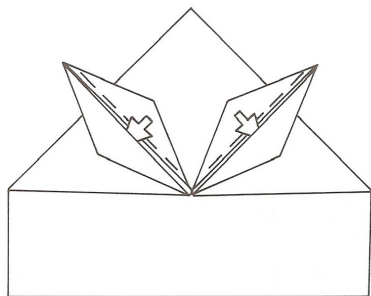


PAS 2

Enfonsa els dos triangles de manera que quedi doblegats per la línia indicada.

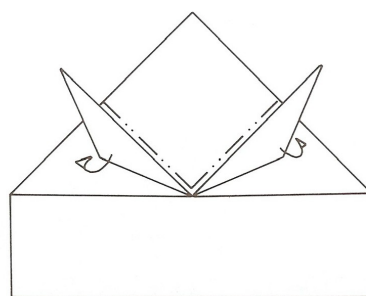


VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



PAS 4

Posa una part de l'estructura formada fins l'altra.

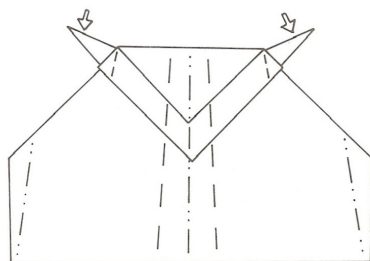
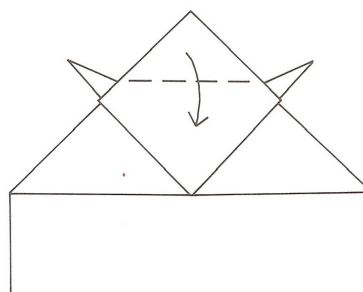


PAS 5

Doblega aquestes estructures cap a l'interior.

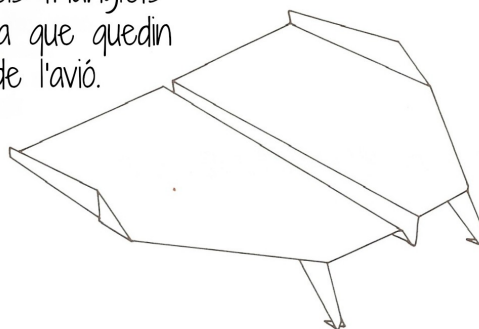
PAS 6

Tira la punta cap avall tan lluny com puguis.



PAS 7

Doblega per les línies marcades al dibuix. Tingues en compte els símbols. Un cop fetes les ales i el fuselatge, enfonsa els trianglelets superiors de manera que quedin com el dibuix final de l'avió.



VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

El que he fet jo m'ha quedat així:



4. ESTUDI D'EFICIÈNCIA AERODINÀMICA DE CADA TIPUS D'AVIÓ DE PAPER

Estudi d'eficiència aerodinàmica, per molts la pregunta pot ser, i realment què és l'eficiència aerodinàmica? Doncs bé, l'eficiència aerodinàmica és un valor que relaciona la distància horitzontal que pot assolir un avió depenent de l'altura a la que es troba. S'anomena eficiència aerodinàmica ja que com més gran sigui aquest valor més aerodinàmic serà l'aeronau, és a dir, aconseguirà planejar horitzontalment el màxim nombre de metres possibles per la mínima altura. Per un planejador, que seria l'avió més aerodinàmic que existeix, aquest valor és 30. Això vol dir que per cada metre d'alçada, en planeja 30 en horitzontal. Un altre exemple és un avió de passatgers el qual té un quocient d'eficiència aerodinàmica de 10. Per cada metre d'alçada, en planeja 10 en horitzontal.

Aquest és l'apartat més important del meu treball de recerca. És la part més pràctica. Puc dir que és la part més divertida i entretinguda però, alhora, és la més difícil. La seva dificultat no es troba als càlculs ja que aquests es redueixen a una senzilla divisió entre la distància assolida i l'altura de sortida. No, la seva dificultat l'he trobada alhora de pensar com fer un bon experiment. Durant setmanes i setmanes he estat rumiant com fer-lo: “en què consistiria el meu experiment per poder veure l'eficiència de cada avió de paper fet a l'apartat anterior?”, “Quins objectes necessitaria?”, “Com ho faria per llançar-los?”, “Si havia de fer la mateixa força en cada llançament, com ho aconseguiria?”. Aquestes foren algunes de les preguntes que em passaren pel cap. Afortunadament, vaig aconseguir resoldre tots els dubtes que tenia i l'experiment va ser un èxit.

Ara, us explicaré pas a pas com vaig anar deduint les respostes de les preguntes formulades i com el vaig acabar fent. Finalment, hi hauran les dades obtingues a l'experiment amb els respectius càlculs per poder trobar quin avió de paper és més eficient aerodinàmicament, objectiu principal del meu treball que em portarà a intentar dissenyar-ne un jo. (punt 6)

4.1 PREPARACIÓ DE L'EXPERIMENT

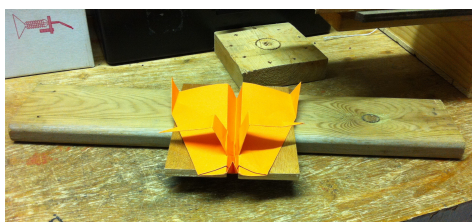
La primera pregunta que em vaig formular va ser: “en què consistiria el meu experiment per poder veure l'eficiència de cada avió de paper fet a l'apartat anterior?”, doncs bé, també va ser la primera a tenir resposta. Era bastant lògica la pregunta, sincerament. I la resposta també. L'experiment consistiria en llançar avió per avió des de la mateixa altura, concretament una de 1'42m (altura que hi ha des de l'ampit de la finestra de la meua habitació fins al terra del jardí). La següent era, “quins objectes necessitaria?”. Doncs bé, necessitaria una cinta mètrica per poder mesurar la distància recorreguda per l'avió, un cronòmetre per calcular el temps i una càmera per gravar els vols. La tercera i la quarta van ser “Com ho faria per llançar-los?” i “Si havia de fer la mateixa força en cada llançament, com ho aconseguiria?”. Aquestes van ser les més difícils de respondre. Vaig estar dies i dies pensant-hi, preguntant a amics, familiars, entesos, buscant informació al Google... I al final em van donar una idea. El Xavier Prats, professor d'enginyeria aeronàutica a la UPC, em va dir que per

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

aconseguir fer la mateixa força a cada llançament ell posaria els avions a l'ampit de la finestra i els tiraria donant-los-hi una petita empenteta amb la mà. No seria del tot exacte però era la millor manera que tenia aleshores. De totes maneres, vaig continuar pensant-hi. Se'm acudien experiments utilitzant ventiladors i/o assecadors de cabells ja que aquests sempre farien la mateixa força. El problema era les turbulències que generaven a l'avió i la majoria d'ells quedaven plegats o volaven molt malament. I vaig decidir que utilitzaria el mètode del Xavier Prats. Vaig fer una petita prova per comprovar si seria útil. Ho era, els avions volaven bastant bé però els problemes eren que no era exacte la força aplicada i que, a més a més, com que havia de deixar l'avió sobre l'ampit sense aguantar-lo aquest mai quedava recte. O bé reposava cap a la dreta, l'ala d'aquesta banda tocava al terra, o cap a l'esquerra i això afectava al vol. Depenent de la banda tenia un vol cap a una o cap a l'altra i jo volia i necessitava un vol el màxim de recte possible. Per tant, necessitava crear una estructura que els mantingués rectes, amb les dues ales suspeses sense tocar el terra i que la única part que hi toqués fos el fuselatge. De seguida em va venir l'estructura a la ment. Havia de crear una espècie de trampolí pels meus avions i vaig anar corrents al petit taller de casa a crear-lo. Necessitava dues fustes. Una de més pesada i l'altra més lleugera. També tota la resta d'objectes imprescindibles per fer qualsevol treball de bricolatge: la serra, el martell i els claus. Vaig serrar les fustes per poder fer una base amb la fusta més pesada i sobre aquesta n'hi vaig col·locar dues de lleugeres paral·leles entre elles i separades per un espai d'un centímetre. Ja tenia feta l'estructura.



Procés de fabricació.



Trampolí semiacabat.

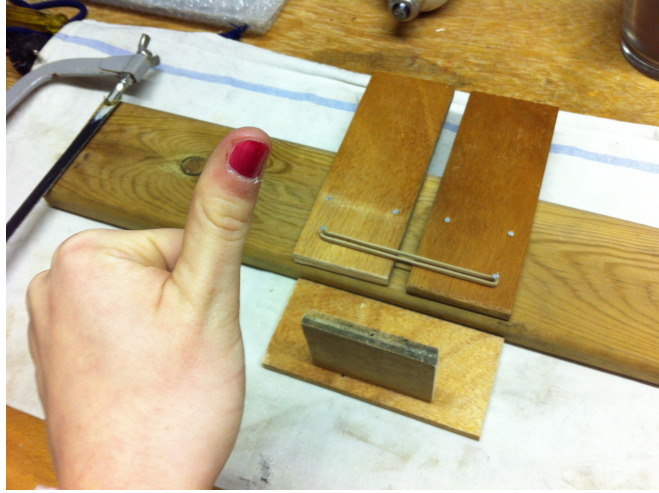
Però encara no estava preparada per fer l'experiment. Necessitava aplicar una força igual a cada llançament sinó no servien de res els meus càlculs. I la solució al meu problema la va tenir el meu amic i company de classe Oriol Marcé Canal. La seva idea va ser col·locar una goma elàstica al trampolí de manera que aquesta apliqués la força necessària per fer el llançament. Si sempre estirava la goma fins al mateix punt, sempre faria la mateixa força, una força constant. Era la solució perfecta. I així ho vaig fer, vaig col·locar una peça al darrera del trampolí que era el punt fins el qual havia d'estirar la goma. Ja ho tenia tot a punt. Per tant,

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

ja podia avisar a uns quants amics que vinguessin a ajudar-me a fer la pràctica. Aquests foren l'Èlia Vallejos Formatgé, encarregada de gravar els vols, l'Eudald Alibés Puigdemunt, encarregat de cronometrar-los, i l'Oriol Marcé Canal, encarregat de mesurar la distància recorreguda.



Procés de fabricació.



Trampolí acabat.

Aquí us deixo unes quantes imatges de l'experiment:



Pista d'aterratge. Al fons, zona de l'enlairament.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



Trampolí d'avions.



Avions de paper.

4.2 REALITZACIÓ DE L'EXPERIMENT

4.2.1 OBJECTIU

L'objectiu d'aquest experiment és trobar quin dels avions fets anteriorment té una millor eficiència aerodinàmica. I comprovar si aquests valors s'aproximen al de l'avió més aerodinàmic, el planejador. El valor d'aquest és 30.

4.2.2 MATERIAL

- Trampolí d'avions
- Cinta mètrica
- Cronòmetre
- Càmera de vídeo
- Avions de paper
- Goma elàstica

4.2.3 HIPÒTESIS

Les hipòtesis que vaig formular abans de fer l'experiment foren:

- Que els dards estarien menys temps volant que els planejadors.
- Que els dards farien un vol amb una velocitat major que la dels planejadors.
- Que, en general, els planejadors serien més eficients aerodinàmicament ja que les seves ales són més amples i grans i poden generar més sustentació. El que no em vaig atrevir a preveure era quin dels meus avions seria el més eficient. Però, de totes maneres, el meu preferit era el Twin Jet. Pensava que tenia possibilitats a ser el millor ja que la seva estructura em recordava molt al típic avió real de passatgers.

4.2.4 RESULTATS

L'experiment el vaig realitzar al meu jardí, és a dir, a l'aire lliure. De totes maneres, les condicions no van influir ja que era un dia sense gens de vent. També, per poder obtenir resultats més precisos de cada avió, vaig fer dos llançaments per model així puc obtenir-ne una mitjana. Aquesta és molt útil ja que pot ser que a vegades hi hagi errors com tirar l'avió malament, que la goma no impacti del tot bé o que l'avió agafi alguna corrent d'aire que li provoqui un vol més dolent.

Doncs bé, els resultats van ser els següents:

- Phoenix: $t_1=1'10s$, $d_1=1'65m$; $t_2=1'13s$, $d_2=1'84m$.
Observacions: tendència de vol cap a la banda esquerra.
- ADPW: $t_1=1'20s$, $d_1=3'68m$; $t_2=0'80s$, $d_2=2'59m$.
Observacions: bon vol.
- Interlock: $t_1=1'00s$, $d_1=2'77m$; $t_2=0'70s$, $d_2=2'98m$.
Observacions: bon vol.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

- Stealth: $t_1=0'50s$, $d_1=1'75m$; $t_2=0'50s$, $d_2=2'39m$.
Observacions: mal vol.
- Stinger: $t_1=0'60s$, $d_1=2'67m$; $t_2=0'60s$, $d_2=2'88m$.
Observacions: vol amb piruetes.
- Wind Devil: $t_1=0'60s$, $d_1=1'39m$; $t_2=0'40s$, $d_2=1'18m$.
Observacions: vol molt dolent.
- The Plane: $t_1=1'20s$, $d_1=2'17m$; $t_2=1'30s$, $d_2=2'53m$.
Observacions: vol curt.
- The Plane Short: $t_1=1'60s$, $d_1=3'41m$; $t_2=1'80s$, $d_2=4'33m$.
Observacions: bon vol.
- Glart: $t_1=1'85s$, $d_1=3'99m$; $t_2=1'41s$, $d_2=3'54m$.
Observacions: bon planejador.
- Trang: $t_1=0'81s$, $d_1=3'96m$; $t_2=0'81s$, $d_2=2'86m$.
Observacions: tendència de vol cap a la banda esquerra.
- Headstand Lander: $t_1=1'92s$, $d_1=3'71m$; $t_2=2'95s$, $d_2=5'52m$.
Observacions: molt bon vol. Aterratge suau mantenint el cap amunt.
- Starfighter: $t_1=0'20s$, $d_1=0'20m$; $t_2=0'30s$, $d_2=0'15m$.
Observacions: vol pèssim. El morro pesa massa.
- AWACS: $t_1=0'59s$, $d_1=3'27m$; $t_2=0'61s$, $d_2=3'19m$.
Observacions: bon vol.
- Starship Shuttle: $t_1=0'90s$, $d_1=2'62m$; $t_2=0'96s$, $d_2=1'64m$.
Observacions: bon vol.
- Twin Jet: $t_1=1'58s$, $d_1=3'21m$; $t_2=1'92s$, $d_2=3'68m$.
Observacions: molt bon vol. Vol oscil·latori.
- Skid Kid: $t_1=2'19s$, $d_1=4'04m$; $t_2=1'28s$, $d_2=3'77m$.
Observacions: bon vol.

(Tots els vols dels avions es poden veure al CD adjuntat al treball)

4.2.5 CÀLCULS

Els càlculs necessaris per obtenir el valor d'eficiència aerodinàmica és una simple divisió. S'ha de dividir la distància assolida per l'altura, la mitjana de la distància assolida.

$$\boxed{\text{EFICIÈNCIA AERODINÀMICA} = \text{DISTÀNCIA ASSOLIDADA} / \text{ALTURA}}$$

A part del valor d'eficiència aerodinàmica també calculo la mitjana del temps de vol per poder veure si realment els planejadors tenen un vol més llarg. I a partir d'aquesta, puc calcular la velocitat de vol (mitjana de la distància assolida / mitjana del temps de vol) la qual també em serveix per comprovar si els dards tenen un vol més ràpid.

Anem a veure els càlculs doncs: (recordem que l'altura des d'on s'efectua el llançament és de 1'42m i que no he tinc en compte la força de fregament)

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

- Phoenix:

Mitjana del temps de vol = $(1'10s+1'13s)/2 = 1'115s$
Mitjana de les distàncies = $(1'65m+1'84m)/2 = 1'745m$
Velocitat de vol = $(1'745m/1'115s) = 1'565m/s$
Eficiència aerodinàmica = $1'745m/1'42m = \mathbf{1'229}$

- APDW:

Mitjana del temps de vol = $(1'20s+0'80s)/2 = 1'000s$
Mitjana de les distàncies = $(3'68m+2'59m)/2 = 3'135m$
Velocitat de vol = $(3'135m/1'000s) = 3'135m/s$
Eficiència aerodinàmica = $3'135m/1'42m = \mathbf{2'208}$

- Interlock:

Mitjana del temps de vol = $(1'00s+0'70s)/2 = 0'850s$
Mitjana de les distàncies = $(2'77m+2'98m)/2 = 2'875m$
Velocitat de vol = $(2'875m/0'850s) = 3'382m/s$
Eficiència aerodinàmica = $2'875m/1'42m = \mathbf{2'025}$

- Stealth:

Mitjana del temps de vol = $(0'50s+0'50s)/2 = 0'500s$
Mitjana de les distàncies = $(1'75m+2'39m)/2 = 2'070m$
Velocitat de vol = $(2'070m/0'500s) = 4'140m/s$
Eficiència aerodinàmica = $2'070m/1'42m = \mathbf{1'458}$

- Stinger:

Mitjana del temps de vol = $(0'60s+0'60s)/2 = 0'600s$
Mitjana de les distàncies = $(2'67m+2'88m)/2 = 2'775m$
Velocitat de vol = $(2'775m/0'600s) = 4'625m/s$
Eficiència aerodinàmica = $2'775m/1'42m = \mathbf{1'954}$

- Wind Devil:

Mitjana del temps de vol = $(0'60s+0'40s)/2 = 0'500s$
Mitjana de les distàncies = $(1'39m+1'18m)/2 = 1'285m$
Velocitat de vol = $(1'285m/0'500s) = 2'570m/s$
Eficiència aerodinàmica = $1'285m/1'42m = \mathbf{0'905}$

- The Plane:

Mitjana del temps de vol = $(1'20s+1'30s)/2 = 1'250s$
Mitjana de les distàncies = $(2'17m+2'53m)/2 = 2'350m$
Velocitat de vol = $(2'350m/1'250s) = 1'880m/s$
Eficiència aerodinàmica = $2'350m/1'42m = \mathbf{1'655}$

- The Plane Short:

Mitjana del temps de vol = $(1'60s+1'80s)/2 = 1'700s$
Mitjana de les distàncies = $(3'41m+4'33m)/2 = 3'870m$
Velocitat de vol = $(3'870m/1'700s) = 2'276m/s$
Eficiència aerodinàmica = $3'870m/1'42m = \mathbf{2'725}$

- Glart:

Mitjana del temps de vol = $(1'85s+1'41s)/2 = 1'630s$
Mitjana de les distàncies = $(3'99m+3'54m)/2 = 3'765m$
Velocitat de vol = $(3'765m/1'630s) = 2'310m/s$
Eficiència aerodinàmica = $3'765m/1'42m = \mathbf{2'651}$

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

- Trang:

Mitjana del temps de vol = $(0'81s+0'81s)/2 = 0'810s$

Mitjana de les distàncies = $(3'96m+2'86m)/2 = 3'410m$

Velocitat de vol = $(3'410m/0'810s) = 4'210m/s$

Eficiència aerodinàmica = $3'410m/1'42m = \mathbf{2'401}$

- Headstand Lander:

Mitjana del temps de vol = $(1'92s+2'95s)/2 = 2'435s$

Mitjana de les distàncies = $(3'71m+5'52m)/2 = 4'615m$

Velocitat de vol = $(4'615m/2'435s) = 1'895m/s$

Eficiència aerodinàmica = $4'615m/1'42m = \mathbf{3'250}$

- Starfighter:

Mitjana del temps de vol = $(0'20s+0'30s)/2 = 0'250s$

Mitjana de les distàncies = $(0'20m+0'15m)/2 = 0'175m$

Velocitat de vol = $(0'175m/0'250s) = 0'700m/s$

Eficiència aerodinàmica = $0'175m/1'42m = \mathbf{0'123}$

- AWACS:

Mitjana del temps de vol = $(0'59s+0'61s)/2 = 0'600s$

Mitjana de les distàncies = $(3'27m+3'19m)/2 = 3'230m$

Velocitat de vol = $(3'230m/0'600s) = 5'383m/s$

Eficiència aerodinàmica = $3'230m/1'42m = \mathbf{2'275}$

- Starship Shuttle:

Mitjana del temps de vol = $(0'90s+0'96s)/2 = 0'930s$

Mitjana de les distàncies = $(2'62m+1'64m)/2 = 2'130m$

Velocitat de vol = $(2'130m/0'930s) = 2'290m/s$

Eficiència aerodinàmica = $2'130m/1'42m = \mathbf{1'500}$

- Twin Jet:

Mitjana del temps de vol = $(1'58s+1'92s)/2 = 1'750s$

Mitjana de les distàncies = $(3'21m+3'68m)/2 = 3'445m$

Velocitat de vol = $(3'445m/1'750s) = 1'969m/s$

Eficiència aerodinàmica = $3'445m/1'42m = \mathbf{2'426}$

- Skid Kid:

Mitjana del temps de vol = $(2'19s+1'28s)/2 = 1'735s$

Mitjana de les distàncies = $(4'04m+3'77m)/2 = 3'095m$

Velocitat de vol = $(3'095m/1'735s) = 1'784m/s$

Eficiència aerodinàmica = $3'095m/1'42m = \mathbf{2'180}$

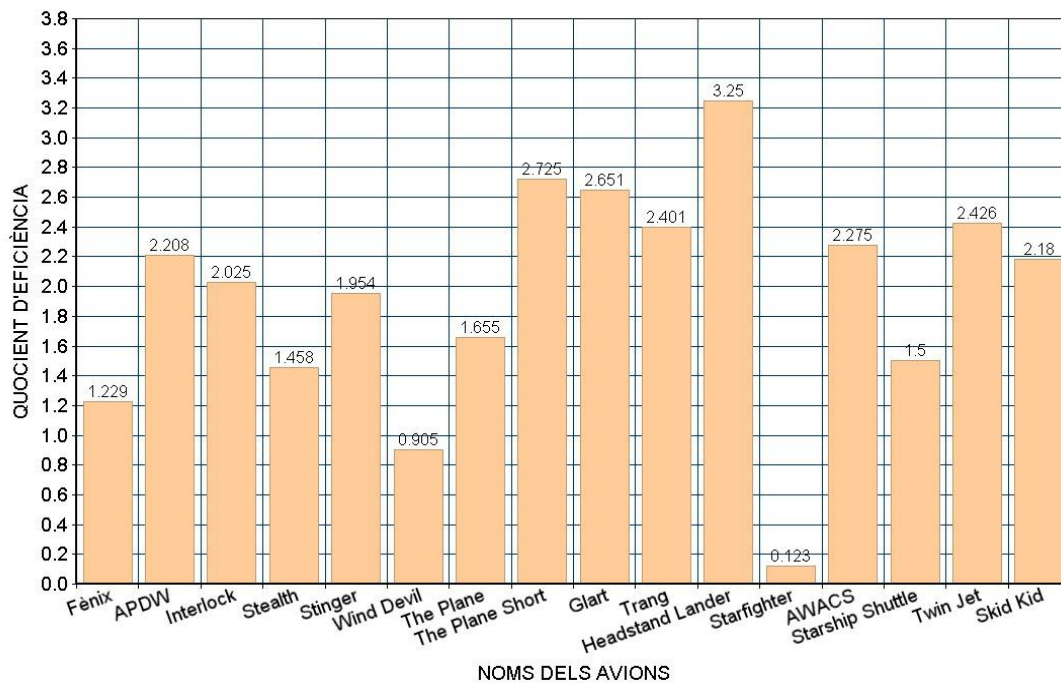
4.2.6 CONCLUSIONS

Un cop estudiats els resultats i haver fet els càlculs he pogut veure quin dels avions construïts és el més eficient aerodinàmicament. Aquest és el Headstand Lander. Ha guanyat amb un valor d'eficiència del 3'250. És un planejador amb les característiques pròpies d'aquest tipus d'avions. Té unes ales grans i amples, puntes planes i plecs gens afilats. Les seves grans ales li permeten generar molta sustentació i això és la base fonamental per poder ser eficient en termes aerodinàmics. Però cal dir que, encara que hagi set el millor, el valor és molt petit en comparació amb els avions reals de passatgers el qual és de 10 i ja no parlem dels planejadors que és de 30. Aquest fet és a causa de la petita força que genera una goma elàstica i el punt de l'avió on s'aplica. S'aplicava al cul de l'avió ja que

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

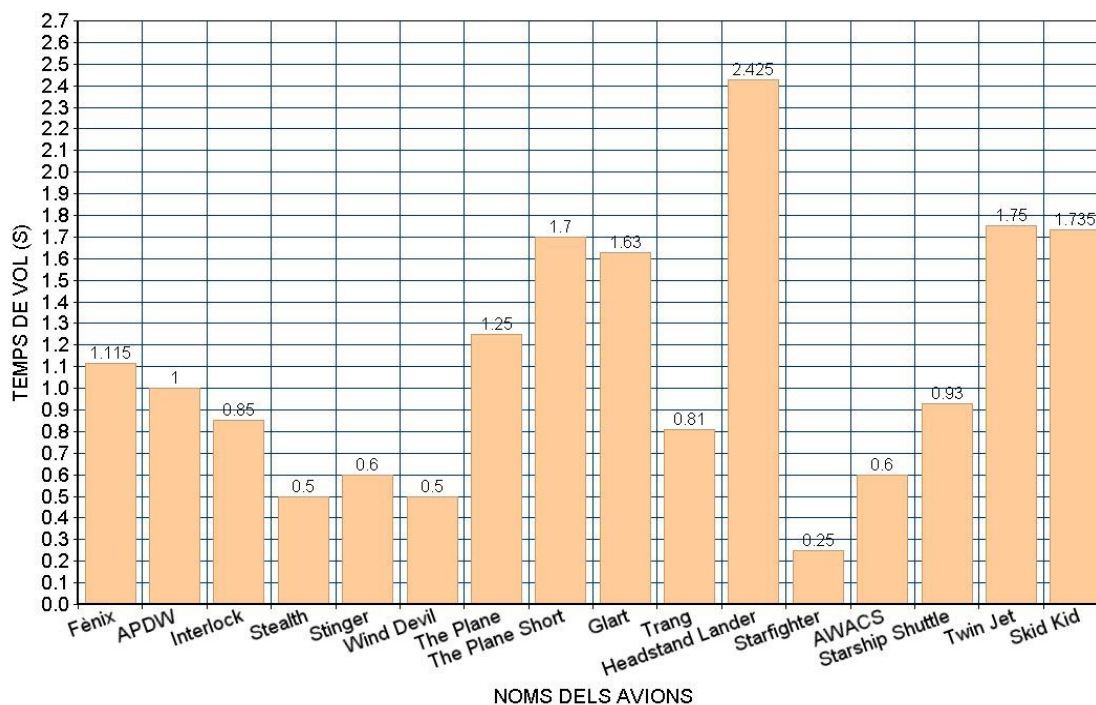
era impossible fer que l'agafés per la part davantera que seria la manera normal i òptima per efectuar el llançament. Però ho vaig haver de fer així per culpa de la força constant. Necessitava la mateixa força de sortida a cada avió i si els llançava jo no faria la mateixa. Potser amb molta concentració podria aconseguir valors semblants però no seria exactament la mateixa. Però, de totes maneres ha set un bon experiment per poder trobar els valors d'eficiència aerodinàmica. Ha set útil i eficient. (per veure la classificació de tots els avions veure gràfic EFICIÈNCIA AERODINÀMICA)

EFICIÈNCIA AERODINÀMICA



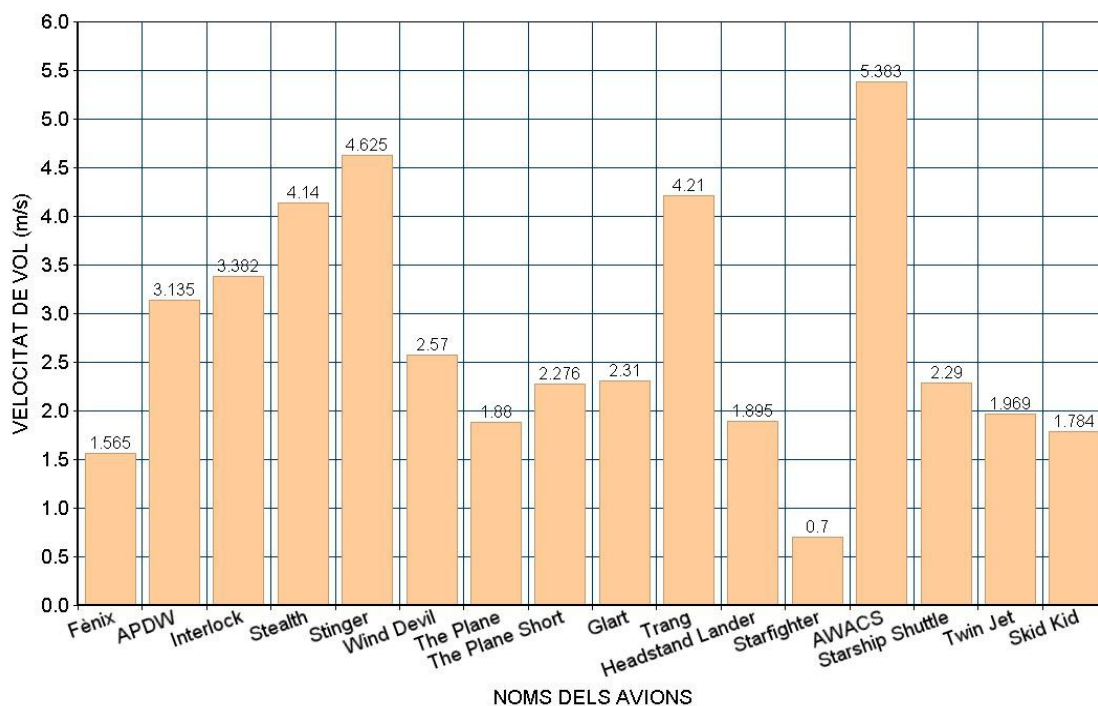
VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

A més a més, també he pogut comprovar altres paràmetres com són les diferències de temps de vol entre els dards i els planejadors i les velocitats d'aquests. Anem-ho a veure a cada gràfic. Comencem amb el temps:



Com podem veure al gràfic, la meua hipòtesis ha set certa. Els planejadors tenen un vol de major durada. Des de l'avió The Plane fins al Skid Kid, tots els temps de vol són majors que els dels dards amb alguna excepció com és l'avió Starfighter i l'AWACS. Això es pot explicar de dues maneres diferents: o bé l'avió està mal fet o bé està mal classificat (pot ser que si mirem la seva estructura sembli un planejador però que el vol sigui propi d'un dard). De moment, em fan pensar que és un problema d'estructura. De fet, sé del cert que l'avió Starfighter el té ja que ja ho he pogut comprovar quan he vist el seu vol. El seu morro és massa pesat i això provoca que entri en pèrdua (caigui) molt ràpid. Però l'AWACS de moment no sé què li passa. Espero que amb la velocitat pugui arribar a una conclusió. De totes maneres, en general els planejadors tenen un vol d'entre un i dos segons en canvi els dards estan més entre zero i mig i un segon. I dins el grup dels planejadors cal destacar el Headstand Lander amb un temps mitjà de vol de 2'425s. Recordem que aquest avió és el més eficient aerodinàmicament.

Anem a veure les velocitats:



Com podem veure al gràfic, la meua hipòtesis també ha set certa. En general, els dards tenen una velocitat major. Això es deu al fet que la seva estructura és més afilada i talla millor l'aire. De totes maneres destaquen dos avions planejadors amb unes velocitats molt més grans que la resta, el Trang i l'AWACS. El Trang pot ser que hagi agafat una corrent d'aire o que l'hagi llançat millor i que això hagi provocat aquesta velocitat tan rara per ser un planejador, tot el contrari de l'AWACS. El seu baix temps de vol i la seva alta velocitat em fa pensar que no té cap problema d'estructura. Simplement té un problema de classificació. És un dard. El problema és que físicament sembla un planejador: ales amples i llargues i puntes planes. Però el seu vol ens mostra que no, que és un dard.

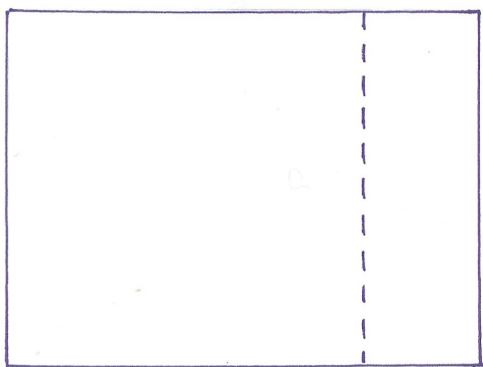
D'altra banda, al grup dels dards destaca el Phoenix amb una velocitat molt baixa pròpia d'un planejador. A diferència de l'AWACS no és un problema de classificació ni d'estructura ja que els resultats anteriors obtinguts són propis dels dards. Segurament és un problema del llançament. Com que el seu vol va tenir una tendència cap a l'esquerra el feia recular. Estava bastant temps volant per ser un dard però la distància mesurada a la que va arribar va ser curta per culpa d'aquesta tendència cap a l'esquerra.

En conclusió, el Headstand Lander és l'avió creat més eficient i amb major temps de vol i l'AWACS no és un planejador sinó un dard. També, he comprovat que els dards tenen una major velocitat de vol i, en canvi, els planejadors un major temps de vol i major eficiència aerodinàmica. Aquestes propietats es deuen a les seves diferents estructures.

5. DISSENY DEL MEU AVIÓ DE PAPER

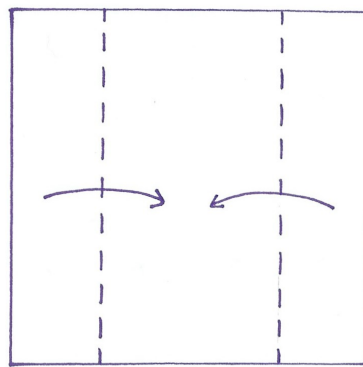
Un cop realitzat l'estudi d'eficiència aerodinàmica, he volgut aplicar tots els meus coneixements adquirits durant la recerca d'informació i preparació d'aquest treball. Per fer-ho he decidit crear un avió de paper.

L'objectiu d'aquest apartat és aconseguir dissenyar un avió de paper el més eficient aerodinàmicament possible. Per aquesta raó, he decidit que el meu avió de paper ha de tenir tots aquells complements que afavoreixen aquesta eficiència. És a dir, ha de disposar de winglets a cada ala i aquestes han de formar un bon angle entre elles, no pot ser un de 180° . També, cal que disposi d'un espaiat fuselatge per tal de poder ser ben subjectat a l'hora de ser llançat. I, per últim i aportació pròpia per tal de millorar aquest aspecte, crear unes ales amb una vora d'atac molt més ampla i resistent que aconseguixi crear una major sustentació. Aquesta és la característica especial i única del meu avió. I és que al llarg d'anar veient diferents avions de paper m'he adonat que les seves vores d'atac són d'allò més fines. O bé són un simple paper col·locat en el sentit del flux d'aire que hi impacta, o bé dos de junts. Però en tots els casos no s'hi dóna importància a les vores d'atac. Són simples i poc resistents. Això provoca que la sustentació sigui menor ja que l'avió no disposa d'un bon angle d'atac. En canvi, el meu disseny es centrarà bàsicament en crear una molt bona vora d'atac que crec que és el més important. Anem a veure'l:



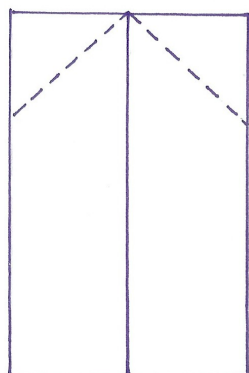
PAS 1

Retalla per la part indicada de manera que el paper quedi en forma de quadrat.



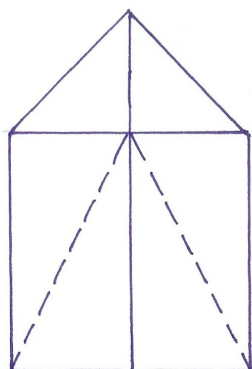
PAS 2

Doblega el quadrat en quatre parts iguals i plega cap endins les dues laterals.



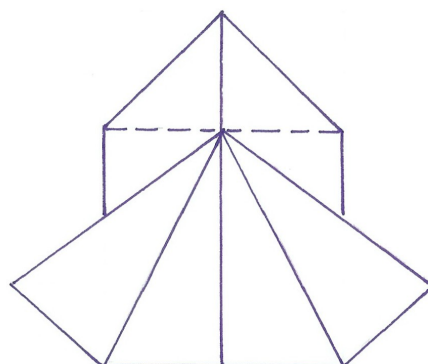
PAS 3

Doblega les dues cantonades superiors cap a la línia que divideix el paper en dues parts iguals.



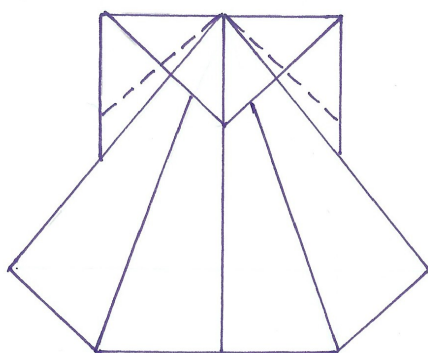
PAS 4

Doblega per les línies senyalades al dibuix i així crearàs dues ales.



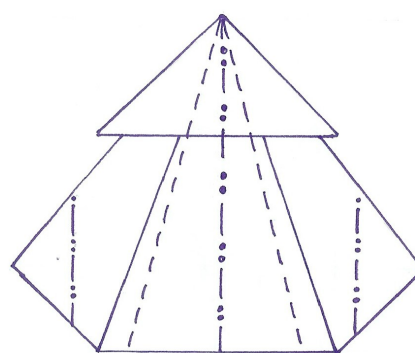
PAS 5

Doblega el triangle superior cap avall de manera que quedi plegat pes les línies discontinües que es veuen al dibuix.



PAS 6

Doblega les dues cantonades superiors cap a la línia que divideix l'avió en dues parts iguals.



PAS 7

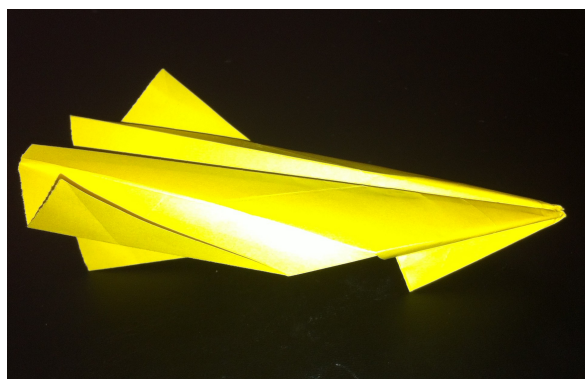
Doblega per les línies senyalades al dibuix per poder crear les ales, el fuselatge i els winglets. L'avió ja està acabat.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

I així és com ha quedat:



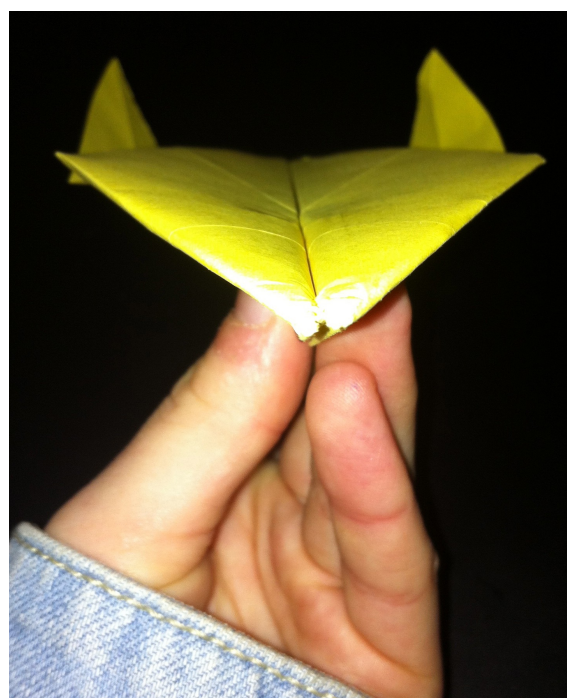
Vista de planta



Vista de perfil



Vista d'alçat



Vista d'alçat (frontal)

Un cop acabat només em falten dues coses per fer. Una és posar-li un nom i l'altra és comprovar si la seva eficiència aerodinàmica és bona o no. Primerament, li posaré el nom i tot seguit realitzaré l'experiment (el mateix que la resta d'avions de paper) i els càlculs pertinents.

El nom escollit és RCH provinent del meu cognom, Reche. És un nom senzill i fàcil de recordar. I, pel meu gust, bonic i tot.

Un cop escollit, anem a realitzar l'experiment del RCH. Com he dit abans, l'experiment consisteix exactament en el mateix que la resta. Un trampolí, una

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

goma elàstica que sempre genera la mateixa força, una altura de 1'42m, un cronòmetre i una càmera a punt i una cinta mètrica. Les condicions atmosfèriques són les mateixes o quasi bé les mateixes ja que vaig realitzar l'experiment el mateix dia amb només unes poques hores de diferència, les hores justes per poder fer els càlculs pertinents de cada avió, poder comparar l'eficiència, dissenyar el meu avió i construir-lo. En total, unes cinc hores.

La única cosa que varia és el pes de l'avió ja que per construir-lo he retallat un tros del full DIN-4. En comptes de 5 grams en pesa 3. De totes maneres això no influeix al planeig. Encara que es variï el pes d'un mateix disseny d'avió, aquest planejarà el mateix. L'única diferència pot ser la velocitat en que ho faci. Per aquest motiu, per realitzar l'experiment i aconseguir el mateix pes (cosa innecessària però feta per més seguretat) vaig enganxar al fuselatge dos clips (cada un pesava 1 gram). Ja en pesava 5. Doncs bé, els resultats obtinguts són:

- RCH: $t_1=1'27s$, $d_1=2'72m$; $t_2=1'46s$, $d_2=3'77m$.
Observacions: Bon vol.

Els càlculs respectius són:

Mitjana del temps de vol = $(1'27s+1'46s)/2 = 1'365s$

Mitjana de les distàncies = $(2'99m+3'87m)/2 = 3'430m$

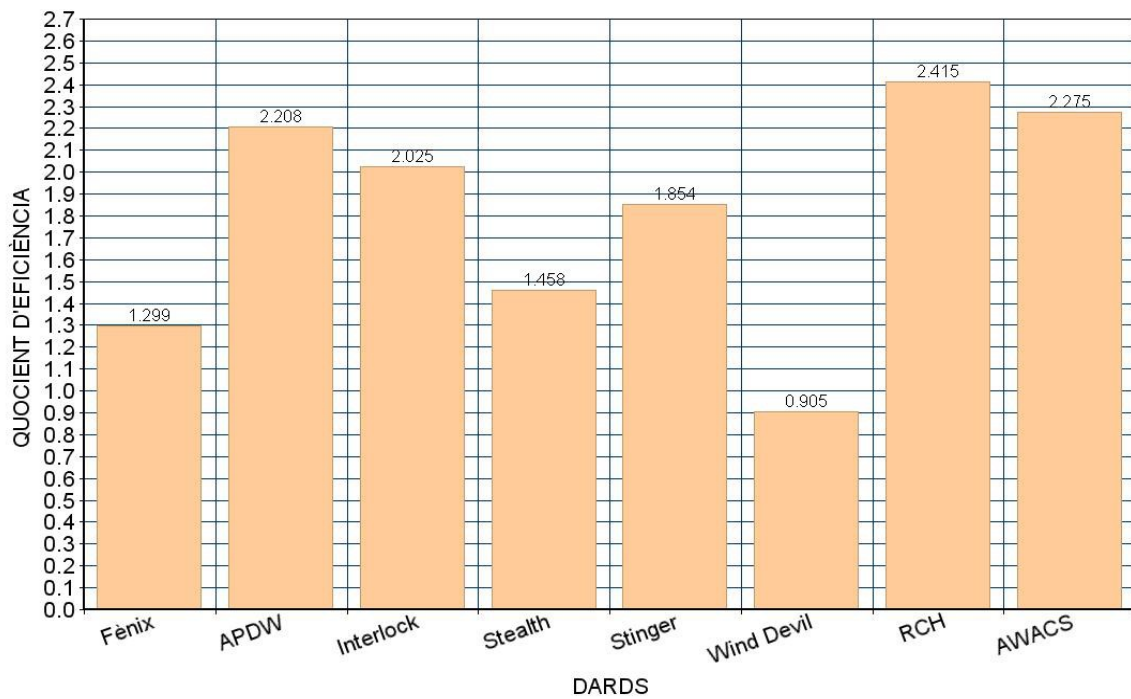
Velocitat de vol = $(3'430m/1'365s) = 2'513m/s$

Eficiència aerodinàmica = $3'430m/1'42m = \mathbf{2'415}$

Les conclusions a les quals he arribat són que he aconseguit el meu objectiu. He creat un avió dard d'allò més eficient, si més no en comparació amb la resta d'avions creats anteriorment. Un quocient de 2'415 quan la mitjana dels dels dards és de 1'708 està d'allò més bé. La comparació de quocients d'eficiència aerodinàmica amb la resta de dards es pot veure a la gràfica de la següent pàgina:

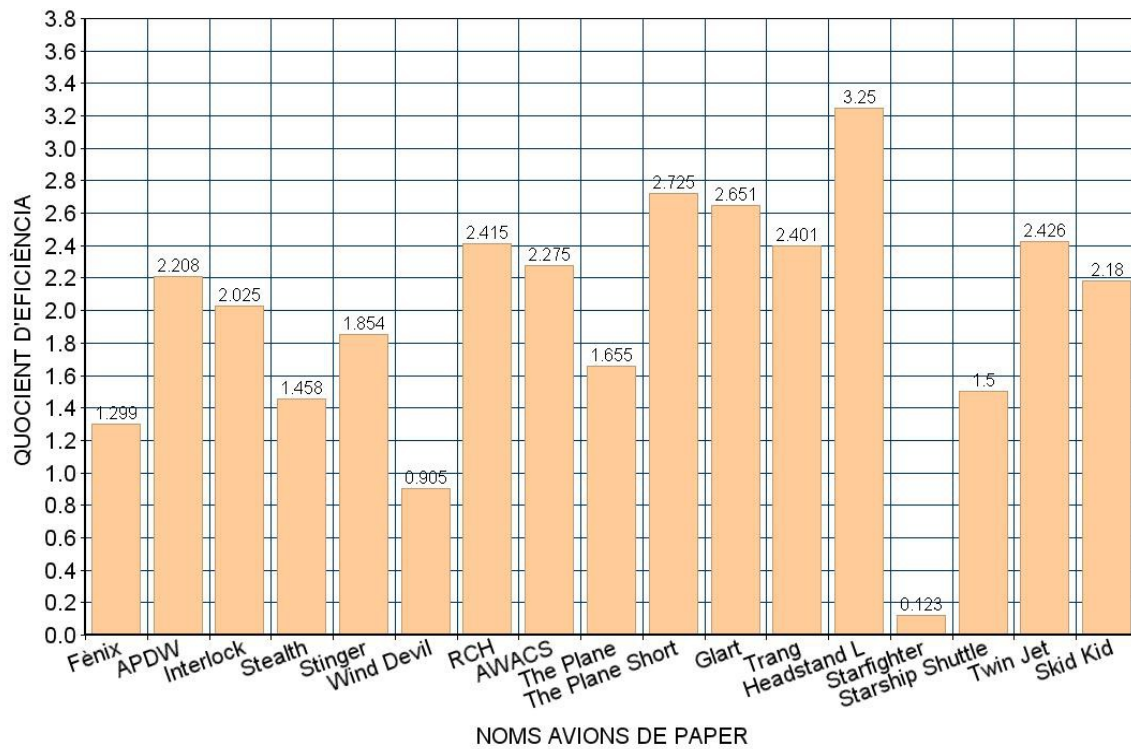
VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

EFICIÈNCIA AERODINÀMICA



I per comparar-lo amb la resta d'avions creats, vegeu la següent gràfica:

EFICIÈNCIA AERODINÀMICA



6. CONCLUSIONS

Les conclusions a les quals he arribat com a conseqüència de la meua llarga i profunda investigació són moltes. De totes maneres, les puc dividir en dos blocs: les conclusions extretes de la part teòrica, les quals he pogut obtenir gràcies a la recerca, i les extretes de la part pràctica, les quals he deduït experimentalment. Començaré exposant les primeres.

A partir d'ara, quan senti a parlar d'aerodinàmica sabré perfectament que és la ciència que estudia el moviment de l'aire i les forces o reaccions a les que estan sotmesos els cossos que es troben immersos en aquests. L'aerodinàmica, a més a més, es pot dividir en dues branques: la que estudia els moviments subsònics, a aquesta velocitat l'aire no es comprimeix i el teorema de Bernoulli es pot aplicar, i la que estudia els moviments supersònics, l'aire es comprimeix i aquest teorema no es pot aplicar. De la segona en sé molt poca cosa ja que jo m'he centrat en la que estudia els subsònics. El motiu és el meu objectiu, aconseguir estudiar l'aerodinàmica dels avions de paper els quals volen a una velocitat molt inferior a la del so.

L'estudi aerodinàmic actual es basa en el teorema esmentat anteriorment, el Teorema de Bernoulli. Aquest afirma que un increment en la velocitat d'un fluid, tan si es troba en estat líquid com en estat gasós, provoca una disminució de la seva pressió. Giovanni Venturi el comprovà experimentalment gràcies al seu invent, el Tub Venturi. I l'aplicació d'aquest teorema en el món de l'aerodinàmica és en l'intent de poder explicar el per què del vol. Per fer-ho, s'enfoca bàsicament en la forma del perfil alar, forma de torpede, assegurant que, gràcies a aquesta, l'aire que passa per l'extradós, part superior de l'ala, augmenta la seva velocitat per poder arribar al mateix temps que la que passa per l'intradós, part inferior de l'ala, la qual no ha experimentat cap canvi ja que la forma del perfil no li ha obligat a fer-ho. Aquesta diferència de velocitats provoca una diferència de pressions les quals provoquen una força de sustentació, una força contrària al pes, que permet volar.

Un cop l'aeronau està volant, hi ha quatre forces a les que està exposat. Són dos parells de forces contràries explicades basant-se en la tercera llei de Newton (acció-reacció). En primer lloc tenim la tracció, la força que impulsa un avió cap endavant, és la que permet el moviment durant el vol. Normalment, és generada per un motor o, en el cas dels avions de paper, per el llançador. La seva contrària és la resistència, força que s'oposa a qualsevol moviment. La provoca el flux d'aire que impacta a l'avió. Hi ha dos tipus de resistència, la paràsita (conjunt de resistències comunes a tots els elements que volen canviar la seva posició i que no tenen res a veure amb aerodinàmica) i la induïda (resistència provocada pels vòrtexs que es formen a les puntes de les ales d'un avió). L'altre parell està format pel pes i la sustentació. La primera és la força generada per la gravetat i la segona és la força provocada pel Teorema de Bernoulli. El punt d'aplicació de cada força també és diferent. El pes total s'aplica al centre de gravetat i, en canvi, la força total de sustentació al centre de pressions i, en el cas de considerar només un perfil alar, al centre aerodinàmic. Cal tenir en compte que si es vol volar la tracció ha de ser major a la resistència i la sustentació, al pes.

Tornant al Teorema de Bernoulli, com qualsevol altre teorema científic, hi ha una teoria que el refusa. Aquesta teoria s'anomena "Una descripció física de la sustentació" i és obra dels senyors David Anderson i Scott Eberhardt. Asseguren que aquest teorema és acceptat per la seva senzillesa però que en realitat no és cert. Uns dels molts arguments que exposen per invalidar el Teorema de Bernoulli és que el principi del trànsit en temps equivalent, principi que provoca que la partícula que circula per l'extradós hagi d'augmentar la seva velocitat, és fals. Asseguren que al túnel de vent s'ha demostrat que la partícula que passa per la part superior de l'ala arriba molt més abans que la que passa per la inferior.

La seva teoria es basa en explicar la sustentació a partir de les tres lleis de Newton i l'efecte Coanda. Diuen que, bàsicament, perquè un avió voli, les ales d'aquests han de desplaçar una gran quantitat d'aire cap avall provocant així la reacció contrària, la sustentació.

Fent referència a la teoria de la construcció dels avions de paper he arribat a la conclusió que per poder fabricar un bon avió s'ha de tenir molta precisió al plegar, que ha de ser perfectament simètric, que el fuselatge i les ales han de formar un angle en forma de "Y" i que els alerons ens permeten corregir el vol. També, que per aconseguir un bon vol s'ha de saber fer un bon llançament subjectant l'avió per la part davantera del fuselatge.

D'altra banda, les conclusions extretes de la part pràctica són les següents: els dards tenen una estructura formada per plecs molt afilats i acabats amb punxa. El seu vol és curt, de poc temps, però són els que aconsegueixen assolir velocitats més altes. En termes d'eficiència aerodinàmica són pitjors que els planejadors ja que aconsegueixen assolir menys metres de planeig per els mateixos metres d'altura. La seva mitjana de quocient d'eficiència aerodinàmica és de 1'708.

En canvi, els planejadors tenen una estructura formada per plecs rectes i plans. Disposen d'unes ales amples i llargues. El seu vol és més llarg, de major temps, però aconsegueixen assolir velocitats baixes respecte els dards. En termes d'eficiència aerodinàmica són molt millors que els dards ja que aconsegueixen assolir major nombre de metres per els mateixos metres d'altura. La seva mitjana de quocient d'eficiència aerodinàmica és de 2'119. La seva major eficiència es deu a les seves ales les quals, a causa de la seva major superfície, provoquen més sustentació.

Fent l'experiment he vist que l'avió de paper més eficient aerodinàmicament que he creat és el que s'anomena Headstand Lander. També, és el que té un vol de major durada.

A més a més, comparant els resultats m'he adonat que l'AWACS estava mal classificat. Per la seva estructura sembla un planejador ja que té unes ales amples i les puntes són planes però, en realitat, té el vol d'un dard. Per tant, és un dard.

I per últim, fent referència a l'avió que he creat jo, puc afirmar sense por a equivocar-me que he creat el dard més eficient aerodinàmicament dels que havia construït. He assolit el meu objectiu.

7. OPINIÓ PERSONAL

Amb la completa satisfacció d'haver acabat per fi el meu treball de recerca, miro enrere per recordar tot el que he passat. Hores recorrent les biblioteques de la comarca en busca d'alguna informació. Vaig començar per la de Sant Joan de les Abadesses, el meu poble. No hi havia res de res sobre aerodinàmica. Fins i tot, quan li vaig demanar a la bibliotecària algun llibre que parlés d'aquest tema, la seva cara va ser de completa sorpresa. Semblava que mai havia sentit aquella paraula. La següent va ser la de Ripoll, res. La d'Olot, un sol llibre. Tenia 420 pàgines i només 4 parlaven del que m'interessava. Em vaig posar nerviosa, podria ser que no trobés informació? De totes maneres, vaig continuar amb la meua recerca. De mica en mica, els llibres van anar apareixent. El llibre d'un conegut que havia estudiat aeronàutica, el que em podia deixar un amic que estava treballant d'això... Fins a aconseguir recopilar una bona quantitat de llibres. L'únic inconvenient era que una gran part eren amb anglès però els necessitava, eren la base del meu treball. Per això, em vaig posar a traduir-los.

Internet també ha estat una eina molt útil per a mi. És molt fàcil de trobar informació i, a més, només l'extreia de fonts fiables com la pàgina web de la Nasa o manuals de vol universitaris.

També, cal dir que gran part de la informació que hi ha a aquest treball ha estat el resultat de nombroses entrevistes. Tan a familiars molt propers que m'han ajudat dia rere dia, com enginyers especialitzats en el tema. Crec que aquesta part ha estat la més enriquidora per poder redactar amb les meves paraules tota la part teòrica.

A part de la dificultat a causa de la poca informació disponible que hi ha en aquest tema, també he tingut altres problemes. El més destacat ha sigut la gran recerca que he fet, més mental que no pas física, per aconseguir realitzar un bon experiment a fi de poder estudiar l'eficiència aerodinàmica dels avions que vaig crear. Com ja he explicat a l'apartat 4.1 – Preparació de l'experiment, vaig estar rumiant com poder-lo fer.

De totes maneres, al final he aconseguit tots els meus objectius. He après tots els conceptes bàsics referents a l'aerodinàmica, he estudiat l'eficiència aerodinàmica dels avions que he creat, he descobert quin avió és el més eficient i amb tots els conceptes i les conclusions dels experiments, he pogut dissenyar un dard amb el millor quocient d'eficiència aerodinàmica que tinc. Per tots aquests motius, estic d'allò més orgullosa de la feina feta. I tot i que en alguns moments m'he sentit sola i perduda, m'ha encantat i he gaudit moltíssim fent aquest treball. A més a més, el tema m'ha fascinat. M'esperava un treball de camp divertit però la teoria no em feia gens de gràcia i ara puc afirmar que estava errada. Fins i tot la teoria és interessant. Espero que a tots aquells que l'heu llegit us hagi agradat i l'hagueu trobat tan interessant com jo.

8. GLOSSARI

Aerodinàmica: Branca de la física que estudia els fenòmens que es produeixen en tot moviment relatiu entre un cos i un fluid gasós.

Alerons: Elements d'un avió de paper que es localitzen a la part de darrera de les ales i del fuselatge. Gràcies a aquests, es pot corregir els moviments del vol.

Corba Braquistòcrona: Corba que ha de recórrer un cos sobre el qual obra una sola força per a anar d'un punt donat a un altre en un temps més curt que si recorria qualsevol altre camí.

Dinàmica de Fluid: Que no pot resistir pressions de cisallament i que, per tant, s'adapta al recipient que el conté.

Dogma: Punt de doctrina establert, proclamat autoritàriament, com a cert, incontestable, fonamental. Cosa que hom creu o afirma indiscutiblement.

Forma de torpede: Forma cilíndrica i allarga.

Fuselatge: Cos de l'avió de paper.

Manòmetre: Aparell per a mesurar la pressió d'un fluid.

Pes: Propietat dels cossos per la qual tendeixen a moure's cap al centre de la Terra i exerceixen una pressió sobre els objectes que els suporten.

Pressió: Acció d'una força que prem o empeny el cos a què s'aplica.

Quocient: resultat d'una divisió.

Subsònic: Que es mou en el si d'un medi material a una velocitat inferior a les ones sonores del mateix medi.

Supersònic: Que es mou en el si d'un medi material a una velocitat superior a les ones sonores del mateix medi.

Trompa d'aigua a la farga catalana: Llarg tub vertical de fusta dins el qual es fa caure un doll d'aigua que impel·leix cap a la farga l'aire que, per la caiguda de l'aigua dins el tub, és absorbit per uns forats que hi ha a la part superior d'aquest.

Turbulència: Conjunt de moviments irregulars de l'aire que se superposen al seu moviment mitjà.

Vèrtex: Punt d'una corba en el qual la curvatura és màxima o mínima.

Winglets: Dispositius que es situen a les puntes de les ales per reduir els vòrtexs, les turbulències provocades per la sustentació.

9. AGRAÏMENTS

Aquest treball de recerca no hauria estat possible sense:

Pere Piquer, per proporcionar-me tota la informació necessària i portar-me a volar amb planejador.

Xavier Prats, per explicar-me i resoldre'm tots els dubtes que he anat tenint.

Ewald Till, per proporcionar-me informació, preocupar-se i donar-me idees.

Oriol Marcé, per donar-me la idea de la goma elàstica i ajudar-me a realitzar la pràctica.

Èlia Vallejos, per ajudar-me a realitzar la pràctica.

Eduald Alibés, per ajudar-me a realitzar la pràctica.

Dolors Vilanova, per ser la millor mare.

Ariadna Reche, per ajudar-me a fer els avions.

Núria Asensio, per guiar-me.

Jaume Tardiu, per preocupar-se.

Lluís Muñoz, per buscar la solució als meus problemes.

I, especialment, Carlos Reche, per ensenyar-me a pensar.

A tots vosaltres, gràcies.

10. BIBLIOGRAFIA

LLIBRES / E-BOOKS:

AMAB, Roy. (2012) *A FIRST COURSE ON AERODYNAMICS*. Bookboom.com. ISBN 978-87-7681-926-2

AMANTE, Javier. (1987) *LA BASE DE LA FÍSICA*. Madrid: Penthalon Ediciones S.A, Colección El Buho Viajero. ISBN 84-86411-15-7

BLATT, Frank J. (1991) *FUNDAMENTOS DE FÍSICA*. México: Ed. Hugo Acevedo Espinosa, 3a edició. ISBN968-880-193-3

BRAVO DOMINGUEZ, Carlos; NOVILLO-FERTRELL VAZQUEZ, Encarnita. (1998) *VOLAR A VELA*. Madrid: Edita Real Aeroclub de España. Imprime Gráficas Cristal.

BROOKS, M. (2011) *GRANDES CUESTIONES DE LA FÍSICA*. Barcelona: Ed. Ariel, ISBN: 978-84-344-1337-5

COLLINS. JOHN M. (2005) *THE GLIDING FLIGHT*. Berkeley, California: Ten Speed Press. ISBN:13978-1-58008-726-4

CUTLER, J. (1992) *ESTRUCTURAS DEL AVIÓN*. Madrid: Ed. Paraninfo, S.A. ISBN:9788428313261.

JHONSON, R.S. (2012) *FLUID MECHANICS AND THE THEORY OF FLIGHT*. Bookboon.com. ISBN 978-87-7681-975-0

ISIDORO CARMONA, A. (1995) *AERODINÁMICA Y ACTUACIONES DEL AVIÓN*. Madrid: Ed. Paraninfo, S.A. ISBN 84-283-2227-9

LONGLAND, Steve. (2002) *THE BRITISH GLIDING ASSOCIATION MANUAL*. A&C BLACK, London. ISBN 0713659475

MARCO, Adolfo Di. (1988) *MECÁNICA DE LOS FLUIDOS*. Buenos Aires: Ed. Hispanoamericana S.A.

MESEGUER RUIZ, J.; SANZ ANDRES, A. (2011) *AERODINÁMICA BÁSICA*. Madrid: Ibergarceta Publicaciones, S.L , 2ª Edición. ISBN:978-84-9281-271-4

SAYMA, Abdalnaser. (2012) *COMPUTANTIONAL FLUID DYNAMICS*. Bookboon.com. ISBN 978-87-7681-430-4

SHEMMERI, T.AI (2012) *ENGINEERING FLUID MECHANICS*. Bookboon.com. ISBN 978-87-403-0114-4

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

DICCIONARIS I ENCICLOPÈDIES:

Enciclopèdia Catalana Bàsica (1996), Barcelona: Enciclopèdia Catalana, S.A, edició El Periódico de Catalunya.

Diccionari de la llengua catalana (2007) Barcelona: Enciclopèdia Catalana, Institut d'Estudis Catalans, 2a Ed.

ARTICLES D'UNA REVISTA:

SEDACCA, Boris "Aerospace materials face testing times", *European Design Engineer*, octubre de 2013, 58 pàgines.

PRAT, Pere "Maestro en aerodinàmica", *Dominical*, setembre de 2013, 64 pàgines.

PÀGINES WEB:

CODINA, Jordi: *El meu bloc* <<http://alasanid.blogspot.com.es/2009/01/efecte-venturi.html>> [consulta: 27.6.2013]

DIEC2: <<http://dlc.iec.cat>> [consulta: 12.9.2013]

ECURED: <<http://www.ecured.cu/index.php/Planeador>> [consulta: 25.8.2013]

GENERADOR DE GRÁFICOS: <<http://www.generadordegraficos.com>> [consulta: 20.10.2013]

MUÑOZ, M.A: <<http://www.manualvuelo.com/Introducc.html>> [consulta: 5.7.2013]

NASA:<<http://www.grc.nasa.gov/WWW/k-12/airplane/ac.html>> [consulta: 3.7.2013]

WIKIPEDIA: <http://ca.wikipedia.org/wiki/Principi_de_Bernoulli> [consulta: 1.8.2013]

WIKIPEDIA: <http://ca.wikipedia.org/wiki/Avió_de_paper> [consulta: 13.8.2013]

ZITNIK, Juan: *Manual de vuelo del PIPER PA-11 [en línia]*
http://juanzitnik1.tripod.com/sitebuildercontent/sitebuilderfiles/4_aerodinamica.pdf

VIDEOS ONLINE:

Awesome paper airplane trick: <http://www.youtube.com/watch?v=0ca9rxQkEiA>

Spinning Jantar: https://www.youtube.com/watch?v=P12g_fqo2Bo

The aerodynamics of flight: <http://www.youtube.com/watch?v=5ltjFEei3AI>

Vuelo de un avion las 4 fuerzas que actuan: http://www.youtube.com/watch?v=_h-a7BxLlal

11. ANNEX

11.1 ENTREVISTA A XAVIER PRATS

Amb l'objectiu de poder obtenir més informació ja que a les biblioteques no n'hi ha massa, un dia de setembre del 2013 vaig quedar a Olot amb el professor d'enginyeria aeronàutica a la UPC i pilot d'avioneta, el Xavier Prats. Aquesta entrevista va ser possible gràcies al meu professor de filosofia, Jaume Tardiu, amic del Xavier Prats.

Hola Xavier, primer de tot, et vull donar les gràcies per concedir-me l'entrevista.

- Hola. Si de res, el plaer és meu.

Bé doncs, anem a començar. Al llarg de la meva recerca d'informació m'he trobat anomenat milers de vegades el Teorema de Bernoulli. I és que segons el què tinc entès, aquest Teorema és el principi bàsic de tota l'aerodinàmica i diu que com més velocitat menys pressió. És això cert?

- Sí, completament. Bernoulli va afirmar que com més velocitat aconseguia un fluid, l'aire per exemple, la seva pressió disminuïa. D'aquesta manera quan sobre un perfil alar, l'aire que passa per la part de dalt va més ràpid que el que passa per la part de baix, aquí es produeix una diferència de pressions, per tant, com que sobre l'ala tenim menys pressió que no pas a sota, aquesta vola. Així de simple.

I perquè augmenta la velocitat l'aire que passa per la part superior?

- Bé, això s'anomena principi de continuïtat. Aquest principi diu que "Tot el que entra ha de sortir". T'ho explicaré amb un exemple si et sembla. Imaginem-nos una gran manifestació al mig de Passeig de Gràcia. La gent va avançant a una velocitat i ocupen tot l'espai del passeig, de punta a punta. I de cop es desvia aquesta manifestació cap a un carrer molt més estret. Què passarà? O bé la gent començarà a córrer i per tant tots podran passar o bé la gent es comprimirà i passaran a la mateixa velocitat. Si en comptes de gent, tenim aire, com és el nostre cas, l'única solució que té aquest és augmentar la seva velocitat. I per què dic això? Doncs molt simple, l'aire és incompressible.

L'aire, incompressible? L'aire és un gas i els gasos, si no recordo malament, són compressibles no?

- Sí, el gasos sí. Però l'aire a una baixa velocitat com és el cas de la velocitat que porta quan impacta sobre el perfil d'una avió és incompressible. Quan dic baixa velocitat hem refereixo a velocitats subsòniques eh? De fet, es podria comprovar, ja que si està acceptat algú ho ha fet, però millor que t'ho aprenguis com un dogma.

D'acord, i fent referència al principi de continuïtat, com ho podríem entendre: que dos partícules que se separen a causa d'un obstacle al seu camí, han de fer un recorregut diferent però han d'arribar al mateix temps? O...

- Més o menys sí. Ho podríem entendre d'aquesta manera o sinó entendre-ho com que un flux d'aire passa per un espai, que seria el cel, i al trobar-se l'ala de

l'avió, te menys espai per recórrer. Com hem dit abans, només es podrà comprimir, cosa que no farà perquè és incompressible; o bé augmentar la seva velocitat, que és el que farà. Això, recalco que és explicant-ho intuïtivament, ja que verídicament només es pot fer mitjançant fórmules físiques molt complexes.

I una altra nom que em va sortir repetidament com a principi bàsic de l'aerodinàmica va ser l'efecte Venturi. Què me'n podries explicar d'aquest?

- Bé, l'efecte Venturi és bàsicament l'aplicació pràctica del Teorema de Bernoulli en un tub. Bàsicament, és el que t'he explicat abans amb l'exemple.

O sigui, que podríem dir que Bernoulli va descobrir la fórmula i Venturi ho va comprovar experimentalment.

- Exacte.

I La tercera llei de Newton te una particular relació amb l'aerodinàmica?

- La tercera llei de Newton, acció-reacció. Bé no la veig particularment important ja que les altres lleis de Newtons també ho són, al igual que la gravetat i moltes altres forces.

El perfil quina importància te? És igual l'aerodinàmica per a tota classe de coses?

- El que conta és la velocitat relativa entre l'objecte i el vent. És igual quin dels dos o si els dos es mouen. Qualsevol objecte si hi fas passar aire o el tires experimenta una força aerodinàmica gràcies a aquest contacte amb l'aire. És a dir, volem aconseguir, que hi actuïn dues forces una perpendicular a la direcció (sustentació) i l'altre que és paral·lela a la direcció on es mou (resistència dinàmica). La gràcia d'un bon enginyer aerodinàmic està en trobar un perfil que sigui el més aerodinàmic possible segons la utilitat que li volem donar. Aconseguint la màxima sustentació i la mínima resistència. Per tant, millor un perfil simètric que una pilota, però encara millor un perfil no simètric.

Encara millor?

- Sí. Un perfil simètric no aconsegueix sustentació. És lògic, el recorregut és el mateix i per tant, no hi ha diferència de pressions, en canvi, un no simètric sí que n'hi han.

I no sé si ho has vist, però el coeficient que ens mostra una millor o pitjor aerodinàmica és aquell quocient entre la sustentació i la resistència.

Coeficient aerodinàmic pot ser?

- No, aquest és una altra cosa. Aquest que et dic l'anomenem finesa o eficiència aerodinàmica. I aquest és el que tu vols maximitzar perquè el perfil sigui el més aerodinàmic possible, és a dir, produeixi el màxim de sustentació pel mínim de resistència. El que tu em deies és el coeficient que depèn del perfil, de com està construït aquest. Quan val aquest coeficient és molt difícil de trobar, no sé ben bé si amb els teus avions de paper tenies pensat trobar-lo però realment és molt molt complicat. Necessitaries un tub de vent i uns aparells molt precisos. Normalment aquest coeficient és una funció lineal que depèn de l'angle d'atac, com més angle d'atac més augmenta fins a un límit, que és quan cau dràsticament, diem que entra en pèrdua quan passa això, és a dir, cau. Bàsicament això és provocat per les turbulències i no caiem si se'ns para un motor, que sense això podem seguir planejant fins poder aconseguir aterrar, no. Entrem en pèrdua, caiem dràsticament, quan se'ns trenca una ala o tenim un angle d'atac massa gran on l'aire no s'hi enganxa.

D'acord, canvi radical. Quina diferència hi ha entre resistència induïda i paràsita?

- Val, sabem que la resistència és una meitat de la densitat per la superfície per la velocitat al quadrat per C_D que és el coeficient de resistència. I el coeficient de resistència és, i això t'ho has de creure perquè si vols saber el perquè hi han llibres plens de fórmules que t'ho expliquen.

(Riures)

Per tant, el coeficient de resistència és el coeficient de resistència paràsita més coeficient de resistència induïda. I si vas a una velocitat supersònica llavors ja hi ha mil factors però a baixa velocitat hi ha això. Això què és? Doncs bé, la resistència paràsita és la mateixa resistència que tens anant amb cotxe o amb bici. És la resistència per fregament. La resistència que fa l'aire perquè frena contra tu. En canvi, la resistència induïda... això ja només passa amb els avions. Això és una mica més complicat. T'ho explico sobre un dibuix, sí?

Perfecte.

- I tot intuïtivament, perquè es pot explicar amb fórmules però a aquest nivell millor que no, que crec que no és el què et fa falta. Va doncs, tu tens el teu avió. Hem quedat que tens més pressió a sota l'ala que a sobre i per això estàs volant. Però anem a fixar-nos amb les puntes de les ales. L'aire de sota té més pressió, el de sobre menys i al costat l'aire que segueix el seu rol normal. Llavors, què passa? L'aire de sota, com que té més pressió, quan s'acaba l'ala aquest vol anar cap a dalt, cap allà on hi ha menys pressió. Al mig de l'ala no passarà res perquè estan molt separats però a la punta de l'ala sí. I aquesta aire que puja més el moviment de l'avió que avança fa com un moviment helicoïdal Va cap a dalt al mateix temps que va cap endarrere Això és un vòrtex, una turbulència.

I sempre apareixen?

- Sempre, a no ser que les ales siguin infinites.

I què passa quan tens turbulència?

- Quan tens turbulència és molt dolenta. Turbulència amb aviació és molt dolenta ja que si tens turbulència tens resistència. I aquesta resistència induïda és la turbulència que es provoca a les puntes de les ales. És diu induïda ja que és induïda en la sustentació. Com més sustentació, més diferència de pressions entre la part superior i inferior de l'ala i, per tant, més resistència induïda a les puntes de les ales. La fórmula que ens dóna això és, resistència induïda igual a sustentació al quadrat dividit per pi per l'allargament per e. L'allargament és igual a l'envergadura dividit per la corda. L'envergadura és la llargada de l'ala i la corda és l'amplada de l'ala. "E" és un factor d'eficiència, però això oblida-te'n, no és important.

Fixa't com més llarg sigui un perfil, menys resistència induïda hi haurà. Per aquest motiu els planejadors tenen les ales tan estretes i tan llargues. Perquè com que l'allargament és molt gran, i està dividint, doncs la resistència induïda serà molt petita. Podríem dir que des d'un punt de vista de sustentació ens és igual si l'ala es curta o llarga, en canvi des d'un punt de vista de resistència ens influeix moltíssim.

I podríem afirmar que els planejadors són els avions més aerodinàmics?

- Clar, tot té uns límits no? Pots dir i per què tots no tenen les ales super llargues? Clar, fes un Airbus de 380 passatgers amb una ala de 200 metres, com ho aguanten? Des de un punt de vista estructural necessaries una biga allà que seria

contraproductiu. La biga faria que l'avió pesés molt més i això afectaria directament a la sustentació. En canvi, un planejador que només porta un passatger o com a molt dos, l'ala està feta de fibra que pesa poquíssim i d'aquesta manera pot ser molt llarga. Però en certa manera, tots els avions tenen unes ales similars. Totes són estretes i llargues. Tots van a buscar això però dintre uns límits estructurals.

D'acord, doncs hem dit que les dues ales serveixen per aconseguir sustentació, però les dues ales de darrera quina funció tenen?

Tenen la funció d'estabilitat i de controlar la velocitat.

I diferència entre el centre de pressions i el centre aerodinàmic?

- Bé, la diferència és molt mínima. El centre aerodinàmic és el centre del perfil, és a dir, si veus l'ala només per la seva secció, a través del perfil aerodinàmic, aquest centre és el punt on pots considerar que s'aplica la força aerodinàmica. De la mateixa manera que el centre de gravetat és el lloc on s'aplica el pes. I ara anem a veure el centre de pressions. Sabem que una ala està formada per molts perfils. Aquests perfils tots són diferents i és que una ala no és uniforme com hem dit abans. Va de més gruixuda a més estreta i de més ample a més prima. Per tant, el centre de pressions és la mitjana de tots els centres aerodinàmics d'una ala. És el punt on pots considerar que s'aplica la sustentació total. És quasi el mateix, però un depèn del perfil i l'altre de l'ala. I això és molt important per l'estabilitat. T'hi deus haver trobat amb els teus avions de paper on el pes ha d'estar al davant.

Sempre ha d'estar al davant?

- Sí, sempre ha d'estar al davant. El pes afecta a l'estabilitat longitudinal. És a dir afecta a l'estabilitat respecte l'eix que es dibuixa des de la punta d'una ala fins a l'altra punta. Segons les lleis de Newton saps que un cos està en perfecte equilibri si la suma de les seves forces és 0 i si la suma de moments és 0. I aquí és el que és important, que la suma de moment sigui 0.

I la força aerodinàmica, què és?

És la força que experimenta el cos per culpa de viatjar dins l'aire, per culpa de Bernoulli. És el que dèiem abans, és la diferència d'una patata i un avió. Amb l'avió, aquesta força serà un vector molt vertical generat per una màxima sustentació i una mínima resistència.

D'acord, anem a parlar dels planejadors. Com s'ho fan per generar tracció si no tenen motor?

Amb les masses d'aire. Si en troba una de calenta puja i si en troba una de freda baixa. Però cal tenir en compte que un planejador sempre baixa respecte la massa d'aire.

I ja per acabar, com et vaig explicar a l'e-mail, el meu objectiu és poder fer un experiment per poder aplicar tots els conceptes apresos al llarg del treball. He pensat en calcular la força aerodinàmica dels avions de paper que he creat.

Uf... Tenia por que em preguntessis això. La força aerodinàmica? I ja has pensat com fer-ho?

No, sincerament no. No sé ni per on començar.

És que és molt difícil. Et podria donar fórmules i fórmules però crec que no tens ni els instruments ni el nivell adequat per poder-ho fer. Jo el que et diria seria que calcullessis l'eficiència aerodinàmica.

L'eficiència?

Sí, vindria a ser més o menys el mateix. La diferència és que amb aquest quocient que calculessis veuries quants metres avança un avió en horitzontal per cada metre d'altura en vertical. Un planejador, per exemple, té una eficiència de 30.

I com es calcula? Dividint la distància assolida entre l'altura?

Exacte. Només és això.

Doncs sí. Crec que seria una molt bona alternativa. Moltes gràcies Xevi.

Si de res. I si necessites alguna altra cosa ja saps, m'envies un e-mail o tornem a quedar.

Molt bé. Bona tarda.

Bona tarda.

11.2 ENTREVISTA A PERE PIQUER

Un dia de principis d'octubre del 2013 vaig quedar amb el Pere Piquer per poder parlar sobre els planejadors a fi d'obtenir més informació i aclarir conceptes. El Pere Piquer és enginyer i bon amic de la família. La seva màxima afició són els planejadors. S'ha tret els títols necessaris per poder-los pilotar i actualment disposa del seu propi planejador. A més a més, ha participat en diverses competicions assolint molt bons resultats a les classificacions com la competició que fa cada any, el campionat nacional d'Espanya de vol a vela.

Bona tarda Pere.

Bona tarda.

Durant aquests últims mesos he estat fent recerca per les biblioteques i he entrevistat a un professor d'enginyeria aeronàutica a la UPC per poder obtenir informació sobre l'aerodinàmica. I he arribat a una conclusió, tot es basa en Bernoulli, Venturi i les tres lleis de Newton.

Conclusió errada doncs. Les lleis de Newton sí, però Bernoulli i Venturi? Jo quan vaig començar a estudiar aquests temes també em van inculcar aquest teorema i no dic pas que no sigui cert però això no explica el per què del vol. No explica per què les ales generen sustentació.

Ara m'has deixat parada.

Sí. Bernoulli és el teorema popular que es diu. Un teorema fàcil perquè tothom ho pugui entendre. I també he de dir que jo me'l creia com tothom fins que vaig llegir aquest article.

(Me l'ensenya) I què diu més o menys?

Com pots veure al títol, és una explicació física de la sustentació. No sé si és un o dos científics americans que asseguruen que la sustentació no es genera gràcies a la diferència de pressions a les dues cares de l'ala. Es genera a causa de l'efecte Coanda.

Efecte Coanda?

Sí. Tot tendeix a quedar-se o seguir la superfície en que es troba. Això és el que li passa a l'aire quan està a l'ala. Segueix la seva superfície i quan ja no queda ala baixa cap avall amb molta força. Aquesta força és la que provoca la sustentació. Tercera llei de Newton, acció-reacció. Força cap avall, força cap amunt. L'avió experimenta una força de mòdul igual però de sentit contrari. D'aquesta manera

vola.

Ostres! Sembla d'allò més interessant. Però se'm fa estrany que als llibres de les universitats, que representa que són els que en saben més, només surti com a certa i correcte la llei de Bernoulli.

Ja. Això és una teoria i jo me la crec però tampoc ens dóna un 100% de seguretat. Ara, personalment, penso que té més sentit que la vigent. De totes maneres, llegeix-te aquest article. És molt interessant i està molt més ben explicat.

Sí. Ho faré. Anem a parlar dels planejadors ara. Sincerament resulta fascinant que sense cap mena de motor un avió, encara que pesi molt i molt poc, pugui arribar a volar.

Sí. I estic d'acord. És una passada.

Em podries explicar una mica resumit el vol d'un planejador?

Sí. Un planejador per enlairar-se s'ha d'agafar a algun altre aeronau amb motor capaç de fer l'enlairament per ell sol. És molt senzill, simplement es col·loca una corda al seu morro la qual està enganxada a una avioneta. L'avioneta s'enlaire i el planejador darrere. Un cop has assolit l'altura desitjada et deixes de la corda, l'avioneta se'n va i tu et quedes sol. Ara has de volar gràcies a les masses d'aire. Sembla difícil però és bastant fàcil un cop li trobes el "truco". Com ja deus saber, si la massa d'aire és calenta pugues, si és freda baixes. Explicat de manera molt senzilla. Llavors hi ha molts altres fenòmens. I finalment, aterres com pots.

(Riures)

Però de totes maneres això t'ho explicaré molt millor el dia que vinguis a Alp a volar.

Perfecte!

És cert que en un mateix avió, entenent que un mateix avió és un avió amb el mateix disseny i tot exactament igual, el planeig no varia encara que en canviem el pes?

Exactament. És cert. No varia el planeig, és a dir, assoleix la mateixa distància i per tant l'eficiència aerodinàmica és la mateixa però el que varia és la velocitat del vol. Si té més pes ho farà a una major velocitat. En canvi, si canviem l'ala aquí ja varia. Estàs canviant el disseny i, per tant, ja no és el mateix avió.

(Amb el Pere vam estar parlant la resta de l'entrevista sobre possibles idees pel meu experiment i sobre el que podia arribar a calcular i trobar).

Moltes gràcies Pere.

De res.

11.3 EXPERIÈNCIA PRÀCTICA: VOL AMB PLANEJADOR

El dia sis de desembre de 2013 vaig anar a Alp. El meu objectiu era volar amb planejador i poder experimentar en primera persona tot allò que havia llegit i m'havien explicat sobre aquests avions fascinants.

A les onze del matí el Pere Piquer m'esperava amb la seva família a l'aeròdrom de la Cerdanya per poder-ho fer realitat. És un aeròdrom bastant gran amb una bona quantitat de planejadors i avionetes per tot arreu. Primer de tot, vam anar a buscar un tàndem (un planejador doble, per dues persones) del club ja que el del Pere és per una sola persona. Un cop el vam trobar, el vam portar fins la pista d'enlairament estirant-lo amb un Suzuki vermell. En un primer moment em va

sobtar però és el més normal. Aquest cotxe està allà, bàsicament, per això. Com que els planejadors no tenen cap mena de motor s'han d'arrossegar ja sigui amb una avioneta o amb qualsevol altre cosa. Com que pesen molt poc, fer-ho amb un cotxe és possible. Deixant a banda aquest aspecte, anem a parlar dels preparatius previs a l'enlairament. Un cop vam arribar a la pista d'aterratge, el Pere em va explicar perquè servien tots els instruments que portava el planejador. Que si l'anemòmetre, encarregat de mesurar la velocitat de vol respecte a l'aire, l'altímetre, encarregat de calcular l'altura assolida, el variòmetre, encarregat de mesurar la velocitat en la qual s'ascendeix o, si és negativa, es descendeix. També hi havia una brúixola que ens permetia orientar-nos i una llana enganxada al sostre que és el que em fascinà més. Estava enganxada amb una simple cinta adhesiva. La seva funció era mostrar si l'avió volava correctament. Ens mostrava la posició de l'avió respecte el flux d'aire que hi impactava. Perquè volés bé, aquesta llaneta havia d'estar completament recte. Això volia dir que l'avió volava completament frontal a aquest flux. Si això no era així, s'havia de corregir amb els pedals els quals feien moure el timó de direcció que es troba a la cua del planejador. La llana i els pedals són contraris, és a dir, si la llana està cap a l'esquerra s'haurà de prémer el pedal dret per aconseguir que es centri. I al revés. La palanca de comandament era un altre element important. Aquesta servia per manipular la posició dels alerons i així controlar el vol. I per últim, el fre. No em refereixo a un fre convencional que es pot trobar a qualsevol cotxe sinó a una palanca encarregada de fer sortir uns elements de les ales que estan perpendiculars a aquestes i són les encarregades de no permetre sustentació en una petita part de l'ala i així provoquen que el planejador baixi.

Un cop l'explicació va ser feta, em vaig col·locar un paracaigudes. És obligatori en qualsevol vol amb planejador. Em vaig col·locar al seient de darrere ja que a davant, a causa de la posició del centre de gravetat, hi ha d'anar una persona que pesi més de 60Kg i no era el cas. Un cop assentada em van explicar tot el protocol en cas d'emergència. Resumint, si l'avió fallava havia d'estirar dues palanques que farien sortir volant la part superior de la cabina, la transparent, i hauria de saltar i obrir el paracaigudes. Ja estava a punt. Tenia el mòbil a les mans a punt per gravar l'experiència i unes ganes enormes de començar a volar.

L'avioneta ens va començar a estirar. La ràdio no parava de sonar. Semblava la típica escena de pel·lícula. Per fi el Pere em va dir: "Ja estem volant". Ho estàvem fent. Cada cop estàvem més i més amunt. No feia gens d'impressió. Em sentia molt i molt segura. Era un dia molt calmat. Podia veure totes les muntanyes nevades, les pistes de La Masella plenes d'esquiadors, els petits poblets de la Cerdanya i al fons, Puigcerdà. Era preciós.

L'avioneta ens va deixar, ja havíem aconseguit l'altura desitjada. Allò sí que era impressionant. No se sentia cap soroll. Cap motor. Em sentia molt molt lliure. Ens vam posar dins una massa d'aire per poder ascendir i quan vam sortir-ne vam caure de cop. Era un dia massa tranquil. No hi havia vent i això provocava que el planejador no pogués volar. Per aquest motiu, vam volar durant uns 30 minuts i vam tornar a l'aeròdrom. Abans d'aterrar però, el Pere em va deixar conduir una estona. Conduïa amb molta por però de fet no n'havia de tenir. Era com un cotxe de pràctiques. Cadascú disposava dels mateixos pedals i la mateixa palanca de

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)

comandament. Així si jo feia alguna cosa malament ell ho podia corregir. Finalment, vam tocar el fre i van sortir aquells dos elements a les ales, explicats anteriorment, per poder frenar i baixar. L'aterratge va ser molt bo. Sincerament, m'esperava un cop molt més fort al impactar amb el terra.

La valoració final seria un 10. Personalment, vaig tenir la sensació d'experimentar com em sentiria si hagués pogut volar dins algun dels meus avions de paper. Està clar que no són ni la meitat d'eficients, aerodinàmicament parlant, del que ho són els planejadors però la sensació en si, ha de ser més o menys la mateixa. I he de dir que és genial.

Aquí us deixo unes quantes imatges del vol i tota la preparació. D'aquesta manera es pot seguir tot l'explicat anteriorment a través de les fotos. El vol en si està gravat al CD adjunt al treball.



Aeròdrom de la Cerdanya



Planejador tàndem



Transport del planejador fins la pista



Explicació dels instruments del planejador

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



Instruments del planejador.



Amb el paracaigudes. Explicació de les normes de seguretat.



Pujant al planejador.



Assentada al seient de darrere.



L'avioneta que ens estirava.



L'enlairament.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



Vol vist des de baix, des de la pista.



Vol vist des de dalt, des del planejador.



Vol.



Aterratge.

VOL DE PAPER (Aerodinàmica dels avions de paper)



Fi del vol amb planejador.