

## Recursos de física

### ESQ QUI AGUANTA ELS AVIONS ALLÀ DALT: BERNOUILLI O NEWTON?

ALBERT BRAMON<sup>1</sup>

*En aquest treball presentaré una sèrie d'experiments senzills que podem fer nosaltres mateixos per tal de posar en evidència quin és l'origen de la força que aguanta els avions a l'aire. Alguns d'ells els faig a classe quan explico a 3r les lleis de Newton*

#### Introducció

En aquest treball presentaré una sèrie d'experiments senzills que podem fer nosaltres mateixos per tal de posar en evidència quin és l'origen de la força que aguanta els avions a l'aire. Alguns d'ells els faig a classe quan explico a 3r les lleis de Newton.

Per fer-nos-en una idea, penseu en un Airbús, una bèstia on hi caben 800 passatgers i pesa unes 500 tones, qui carai l'aguanta allà dalt viatjant a la seva velocitat de 900 km/h?

En els llibres clàssics de física, Sears, Tipler... i, en part, a la Wikipèdia s'explica a partir del teorema de Bernoulli. De mica en mica, però, apareixen textos amb una explicació a partir de la simple idea de les lleis de Newton. Qui té raó?

Val a dir que tot el que té a veure amb la dinàmica de fluids es concentra en les anomenades equacions d'Euler... tan remaleïdament complicades de resoldre que només podem abordar-les en situacions particulars o en assajos amb maquetes.

La idea és entrar en una part de la física que ha anat quedant arraconada, la física dels líquids i gasos, i que, en canvi, permet una millor comprensió de molts aparells i comportaments que trobem en el dia a dia, i, a la vegada, veure la llei de Newton en acció en moviments que no només van en línia recta.

Tots els experiments es poden fer a l'aula amb l'ajuda d'un full de paper i poca cosa més, una forma fàcil d'acostar l'experiència a la teoria.



Fig. 1

Finalment, m'agradaria recalcar que no pretenc fer experiments per divertir els alumnes, sinó ensenyar física amb experiments que la fan molt més divertida.

#### a. Amb el teorema d'en Bernoulli no en fem prou!

1. Experiment clàssic de bufar per sobre d'un full de paper doblegat: l'aguantem per un dels costats estrets, deixem que l'altre costat caigui i bufem per sobre seu. Aquest és un experiment que s'esmenta moltes vegades i sembla posar en evidència el principi de Bernoulli en el vol dels avions. La major velocitat de l'aire en la part superior del paper provoca una pressió més baixa que la que tenim a la part inferior i, en conseqüència, que s'aixequi.

<sup>1</sup> Professor de física i química a l'IES la Garrotxa. Adreça electrònica: abramon@xtec.cat



Fig. 2

2. Bufar el paper situat perpendicular al terra. En canvi, si ara posem el paper vertical al terra i bufem paral·lelament en un dels costats, el full no s'aixeca, malgrat que estem davant de les mateixes condicions que en l'experiment anterior. Alguna cosa falla en l'explicació basada només en l'efecte Bernouilli!

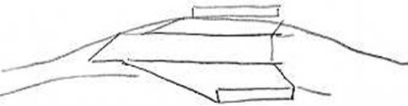
3. Que el teorema de Bernouilli tampoc explica altres casos ho podem veure amb una mànega de vent (windsock). L'aire per força ha de passar més ràpid per dins de la mànega si volem que no es perdi aire en algun lloc (l'equació de continuïtat). Com s'explica que, d'acord amb el principi de Bernouilli, la mànega no col·lapsi sota la pressió exterior, que és més gran?



Fig. 3

4. Podem trobar un tercer argument per dubtar de l'explicació basada en Bernouilli. Provem de fer una estimació numèrica de la força de sustentació sobre un avió de paper a causa d'aquest efecte (el pes d'un full és d'uns 5g). Suposem que l'avió vola a 1 m/s i que la velocitat de l'aire és un 10% més gran a la part superior.

*Càlcul aproximat de la força que donaria la idea de Bernouilli aplicada a un avió de paper*



$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 - \frac{1}{2} \rho v_1^2$$

$$F = \Delta P \cdot S = (P_d - P_u) \cdot S = \left( \frac{1}{2} \rho v_u^2 - \frac{1}{2} \rho v_d^2 \right) \cdot S =$$

$$= \frac{1}{2} \rho S (v_u^2 - v_d^2) = \text{si } v_u \text{ és } 10\% > v_d =$$

$$= \frac{1}{2} \rho S (1,1^2 v^2 - v^2) = \frac{1}{2} \rho S 0,21 v^2$$

$\rho_A = \frac{1 \text{ kg}}{\text{m}^3}$  ;  $S = 100 \text{ cm}^2 = 0,01 \text{ m}^2 = 10^{-2} \text{ m}^2$  ;  $v = 1 \text{ m/s}$

$$= \frac{1}{2} \cdot 1 \cdot 10^{-2} \cdot 0,21 \cdot 1 = 10^{-3} \text{ N} = 10^{-4} \text{ kg} = \text{0,1 g}$$

Fig. 4

### b. Una altra explicació, la desviació de l'aire cap al terra i la llei de Newton més elemental

5. Ens posem com en l'experiment 1 però, aquest cop, bufarem per sota del paper. Aplicant el principi de Bernouilli, una velocitat més gran a la part inferior hauria de comportar una pressió més petita i, en conseqüència, hauria de fer que el full es desplaçés cap a la vertical. I això no passa.

En canvi, el paper puja cap amunt. L'explicació més simple és que el full de paper desvia el flux d'aire cap a terra i, segons la tercera llei de Newton, l'aire empeny el full de paper cap amunt.



Fig. 5



6. Agunto el full vertical fent un petit doblec en l'extrem inferior amb l'ajuda d'un retolador (cal que sigui ben marcat) i bufo pel meu costat paral·lel al full i perpendicular al terra. El full se separa de mi. Seguint el mateix raonament d'abans, la desviació de l'aire cap a mi empeny el full lluny de mi.

7. Podem veure com aquesta explicació ens permet entendre l'efecte dels alerons de cua en els avions de paper: si estan cap amunt desvien l'aire cap a amunt i la cua de l'avió és empesa cap a terra, cosa que provoca que el morro s'aixequi. Per contra, si dobleguem els alerons cap a terra provoquem l'efecte contrari i l'avió va cap a avall.

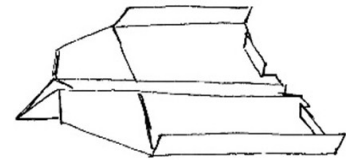


Fig. 6

Fig. 7

### c. No només desviem cap a terra l'aire de sota l'ala, sinó també el que passa per sobre seu. Efecte Coanda

8. Repeteixo l'experiment del full vertical amb el doblec de l'extrem lliure, però, aquest cop, bufo perpendicularment al terra a l'altre costat, l'exterior. El full s'aixeca del mateix costat que bufem, senyal que s'ha desviat cap a l'altre costat

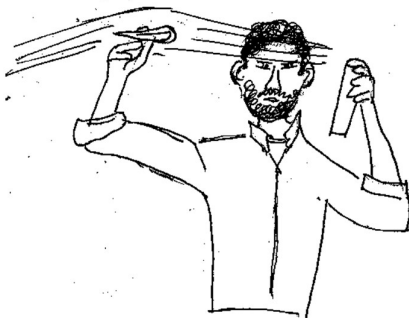


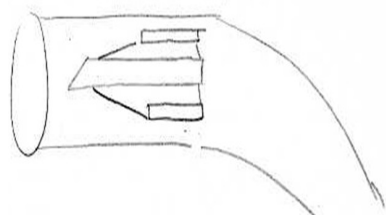
Fig. 8

Fig. 9

9. Amb un espray de desodorant en pols ruixo un full de paper des d'una altura lleugerament inferior a l'avió. Podem veure que el flux de pols es corba cap a terra. Per desviar el flux d'aire cal que el paper faci una força sobre ell en la direcció del desviament, de manera que, seguint la tercera llei de Newton, si l'ala fa força sobre l'aire, l'aire farà força sobre l'ala en sentit oposat.

10. Càlcul de la força de sustentació causada per Newton

*Càlcul aproximat de la força que rebria un avió de paper a partir de la llei de Newton*



$$f = \frac{\Delta p}{\Delta t} = \frac{m \Delta v}{\Delta t} = \frac{\rho \cdot S_e \cdot v \Delta t \cdot \Delta v}{\Delta t} = \rho S_e v \Delta v$$

$$\rho_a = 1 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}; S_e = 100 \text{cm}^2 = 10^{-2} \text{m}^2; v = 1 \text{m/s}; \Delta v = 1 \text{m/s}$$

$$f = 1 \cdot 10^{-2} \cdot 1 \cdot 1 = 10^{-2} \text{N} = 10^{-3} \text{kg} = (1g)$$

Fig. 10

11. Aquest desviament del flux d'aire a la part convexa d'un cos situat en el seu camí s'anomena *efecte Coanda* i el podem veure també posant una cullera sota un raig d'aigua, el qual es desvia.

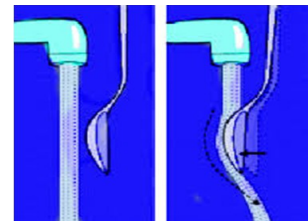


Fig. 11

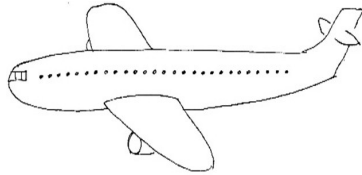


Fig. 12

12. L'efecte Coanda, el de la part convexa, desvia més aire que la part cònca de l'ala. D'aquí ve que en els avions prefereixin posar els motors en la part inferior de l'ala i mantenir neta la superior.

### d. L'efecte Bernouilli existeix. però és insuficient per explicar la sustentació



Fig. 13

13. Si bufem entre dos fulls de paper penjats i paral·lels, s'ajunten. Aquí sembla que Bernouilli funciona.

14. Si bufem un altre cop entre els dos fulls de paper penjats però, aquest cop, fem que convergeixin lleugerament veiem que no s'ajunten, senyal que quan les parets que envolten el flux d'aire fan alguna mena de força perpendicular a la direcció del moviment provoquen una força més gran que l'efecte Bernouilli.

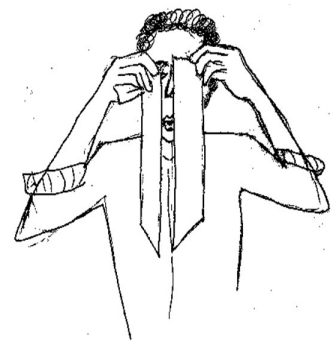


Fig. 14

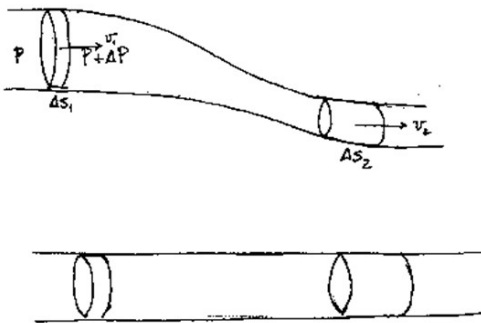


Fig. 15

15. Què falla en el teorema de Bernouilli? Si recordeu la demostració del teorema, sempre comença amb un dibuix d'un tub de fluid com el de la figura de dalt. Fixeu-vos que ningú ens explica per què es desvia i s'estreny el tub. Estrictament només podríem fer-ho amb un tub la secció del qual no variés i que tingués les parets rectes.

### e. Remolins provocats per la curvatura de l'aire

Si recordem que si fem girar un cos en sentit horari nosaltres girarem en sentit antihorari (conservació del moment angular), si l'aire es corba en direcció al terra ha d'haver-hi aire que també es corbi cap al cel!

16. Repetiu l'experiment de tirar pols de desodorant lleugerament de biaix a sota d'un full de paper pla i comproveu com a sobre del full apareixen remolins.



Fig. 16