

# La força de l'aire

**David Jou**

Àrea de Física de la Matèria Condensada, Universitat Autònoma de Barcelona

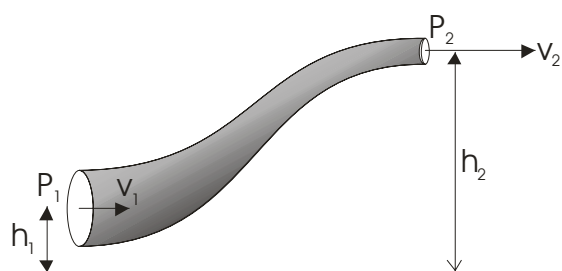
*Algunes aplicacions dels principis de l'aerodinàmica ens permeten entendre el vol del avions o dels estels, la resistència que troben les naus espacials en entrar a l'atmosfera, o els cotxes, i fins i tot certs problemes vasculars o respiratoris.*

## L'equació de Bernouilli

Els Bernouilli eren una família de matemàtics que vivien a Basilea, Suïssa. Entre molts mèrits propis, van ser professors del gran matemàtic L. Euler. Alguns dels germans Bernouilli es van ocupar de la descripció de fenòmens hidrodinàmics. Un d'ells va publicar el 1738 una equació que ara anomenem principi de Bernouilli, prou coneguda:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + \rho g h_1 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + \rho g h_2 + p_2$$

fent referència a un corrent d'un fluid de densitat  $\rho$  que es mou entre dos punts 1 i 2, a unes altures  $h_1$  i  $h_2$ , on té velocitat  $v_1$  i  $v_2$  i pressió  $p_1$  i  $p_2$ , respectivament (fig. 1):



**Figura 1.** Situació a la que s'aplica el principi de Bernouilli.

Aquesta equació és una conseqüència del principi de conservació de l'energia, ja que el primer terme expressa l'energia cinètica, el segon l'energia potencial gravitatòria i el tercer l'energia interna, referides totes a un metre cúbic de fluid.

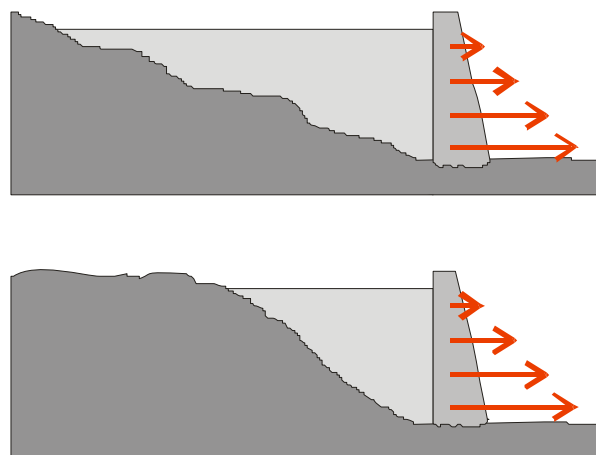
Aquesta equació general té un gran interès pràctic. Hi ha dos casos particulars especialment importants.

## Quan el fluid està quiet

En aquest cas ( $v_1 = v_2 = 0$ ) de l'equació de Bernouilli en resulta l'anomenada equació fonamental de la hidrostàtica:

$$\rho g h_1 + p_1 = \rho g h_2 + p_2.$$

Aquesta expressió permet determinar la pressió atmosfèrica a partir de l'experiment de Torricelli, o calcular la força que l'aigua fa contra el mur d'un embassament. Contra el que pensen moltes persones, aquesta força contra el mur no depèn de la quantitat d'aigua que emmagatzema, sinó només de la seva alçada (fig. 2).



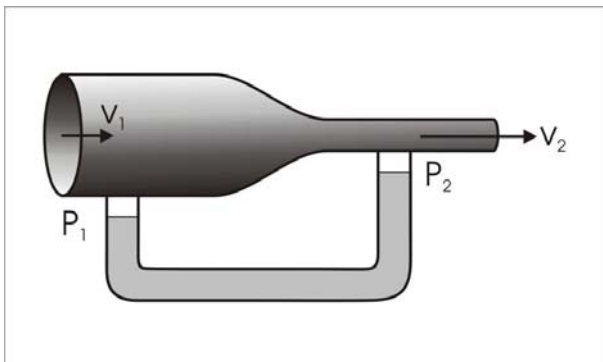
**Figura 2.** Les forces que fa l'aigua contra el mur no depenen del volum d'aigua, sinó de la seva alçada. (Les forces es representen en vermell en totes les figures d'aquest article).

### L'efecte Venturi

Si el flux del fluid és pràcticament horitzontal ( $h_1 = h_2$ ) en resulta l'equació de Venturi:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 = \frac{1}{2} \rho v_2^2 + p_2 .$$

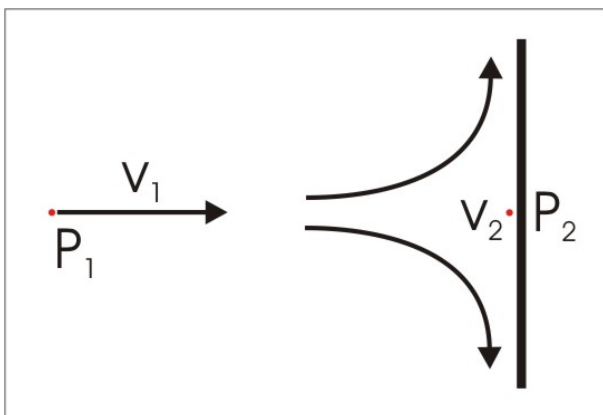
Com més gran és la velocitat, més petita és la pressió (fig. 3). Aquesta reducció de pressió es refereix a superfícies paral·leles a la velocitat de l'aire.



**Figura 3.** L'augment de velocitat provoca una disminució de la pressió en superfícies paral·leles a la velocitat.

En canvi, si tenim una superfície perpendicular al moviment de l'aire, com més gran sigui la velocitat de l'aire i que faci que aquest es freni, més gran serà la pressió,  $P_2$ , sobre la superfície, com saben tots els motoristes (fig. 4), o que notem quan estem sotmesos a un vent molt fort, com quan traiem el cap per la finestra d'un tren en marxa:

$$\frac{1}{2} \rho v_1^2 + p_1 = 0 + p_2 .$$

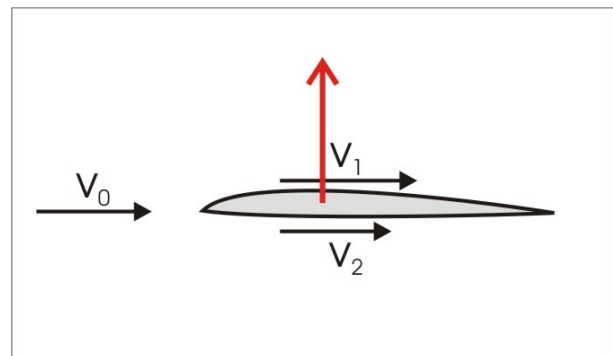


**Figura 4.** Arribada de l'aire contra una superfície perpendicular.

### La sustentació dels avions

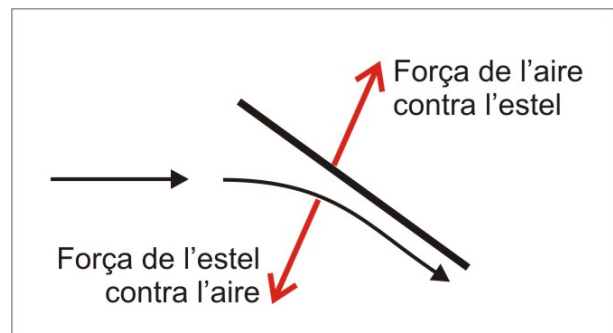
Malgrat que ho pensi molta gent, la força que manté a l'aire un avió no és la força del motor. És clar que els motors fan falta, però per mantenir la velocitat. És mitjançant les ales que l'avió rep una força dirigida cap amunt que compensa el seu pes i li permet de volar. A què és deguda aquesta força sobre les ales?

L'ala de l'avió té una geometria que no és qual-sevol. Per dalt és més convexa que per baix (fig. 5) i això provoca que la velocitat de l'aire a la part superior de l'ala sigui més gran que per la part inferior. Però pel que acabem de veure, com més gran és la velocitat, més petita és la pressió, quan la superfície és aproximadament paral·lela al flux de l'aire. I com que hi ha menys pressió a dalt que a baix, hi ha una força neta cap amunt, que és la diferència entre les pressions, multiplicada per la superfície de l'ala.



**Figura 5.** La diferent velocitat de l'aire a les dues cares de l'ala provoca una diferència de pressió que té per resultant una força ascensional.

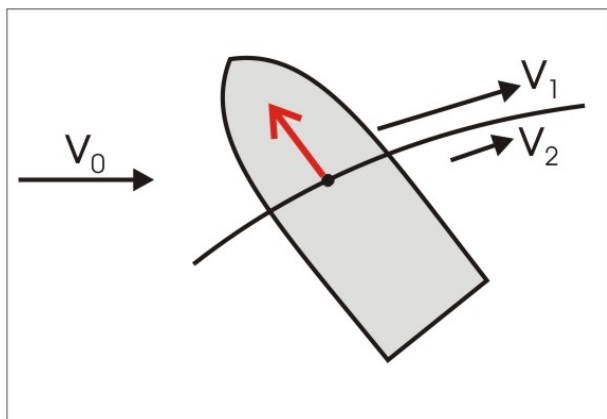
Un altre factor que hi intervé és que la desviació del flux d'aire cap avall té com a força de reacció una força que l'aire fa contra l'ala dirigida cap amunt. En un estel en vol passa el mateix (fig. 6).



**Figura 6.** Com que l'estel, inclinat, desvia l'aire cap avall, l'aire l'empeny cap amunt.

### Navegació a vela

Aquesta força la trobem també en les barques de vela quan naveguem en cenyida, és a dir, en direcció no gaire diferent d'aquella d'on procedeix el vent (fig. 7). Com que la velocitat de l'aire sobre la vela és més gran per la seva part de davant que per la del darrera, la vela rep més pressió per darrera que per davant, i en resulta una força que la fa avançar.

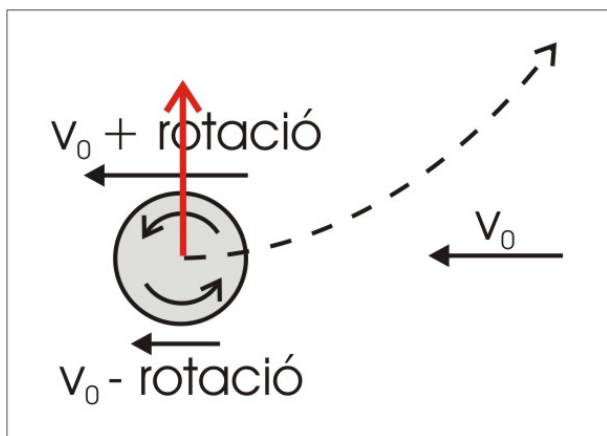


**Figura 7.** La diferent velocitat del vent davant i darrera de la vela origina una resultant que li permet avançar contra el vent.

### Pilotes amb efecte

Quan un futbolista vol donar una trajectòria corbada a la pilota la xuta fent-la girar sobre ella mateixa. Es diu que li dóna efecte.

La causa és que la pilota arrossega l'aire (fig. 8) i fa que aquest vagi més ràpid per un costat de la pilota que per l'altre. I com més gran és la velocitat de l'aire menor és la pressió que fa.

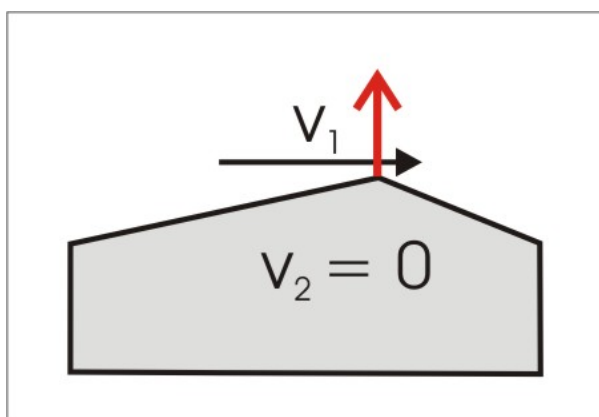


**Figura 8.** "Efecte" sobre les pilotes que giren.

El resultat és una força que actua lateralment contra la pilota, i la desvia contínuament. Aquest resultat s'anomena efecte Magnus, el nom d'un físic de Berlín que va estudiar el fenomen cap al 1850.

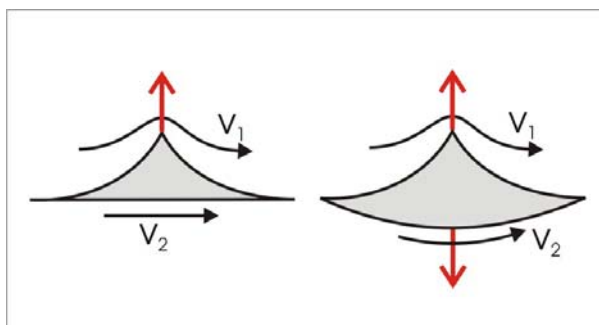
### Les teulades i el vent

Aquest és un altre exemple del mateix fenomen. Quan bufa el vent a gran velocitat sobre una teulada (fig. 9), l'aire del seu interior es manté immòbil. Per això, la pressió sobre la teulada és menor per la part exterior que per la interior. La força resultant, cap amunt, si és prou gran, pot arribar a arrencar la teulada.



**Figura 9.** Força del vent sobre teulades.

Al Japó, país que pateix freqüentment tifons, han desenvolupat una arquitectura tradicional amb estructures peculiars (fig. 10).



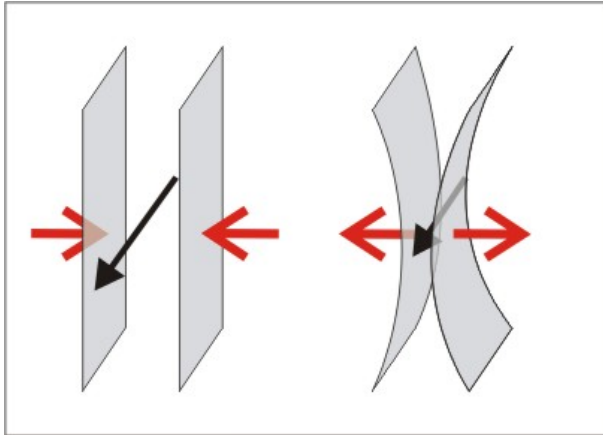
**Figura 10.** Estructura d'edificacions tradicionals japoneses. *Esquerra:* Amb la part inferior plana apareixerien forces destructives. *Dreta:* Amb la curvatura adequada, les forces es compensen.

Quan arriba el vent, tant passa per sobre de la teulada com per sota. Les tradicionals formes superior i inferior estan triades per aconseguir que la velocitat del vent sigui semblant a les dues bandes de la coberta, cosa que fa que les respectives

pressions també siguin similars, i evita així que s'hi produeixin danys.

### Aleteig en artèries o venes ocluses

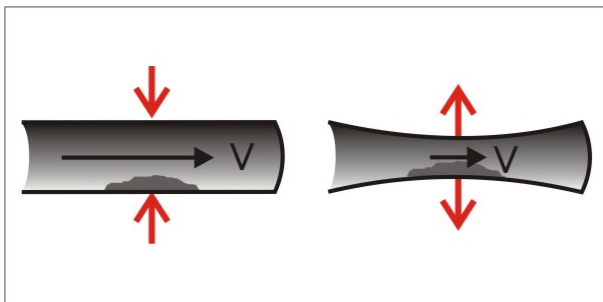
Quan bufem entre dues làmines o fulls de paper (fig. 11), aquestes s'acosten i es posen a vibrar.



**Figura 11.** Bufar entre dos fulls produeix una vibració.

A l'augmentar la velocitat de l'aire, disminueix la seva pressió, fent que els fulls s'acostin. Però quan s'acosten no deixen passar l'aire, aquest perd velocitat i torna a augmentar la pressió, separant-los de nou. Aquest procés s'anirà repetint, produint un moviment vibratori dels fulls.

Aquest fenomen es produeix de vegades a l'interior de les artèries o venes ocluses pel colesterol o alguna substància de les que convé que no s'hi dipositin. Com més estret és el pas, més gran és la velocitat amb què hi circula la sang, arribant a un moment que el vas sanguini comença a vibrar radialment, per un mecanisme semblant al que produïa la vibració dels dos fulls (fig. 12). Això pot arribar a esquinçar les parets del vas i produir una hemorràgia.



**Figura 12.** L'oclusió parcial d'un vas sanguini pot produir un aleteig.

### Objectes al vent

La força, F, que l'aire fa contra un objecte depèn de diversos factors: la densitat del fluid, ρ, la seva velocitat relativa, v, l'àrea frontal A que l'objecte presenta a l'aire, i finalment també la seva forma. Ho recull l'expressió

$$F = \frac{1}{2} \rho v^2 CA,$$

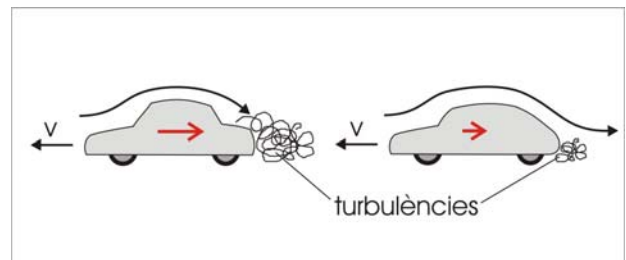
on C és un terme que depèn de la forma de l'objecte, i s'anomena *coeficient de resistència aerodinàmica*.

Aquests són els valors de C per a alguns models de cotxes:

Model	C
Opel Corsa	0,36
Ford Escort	0,38
Ford Sierra berlina	0,34
Ford sierra coupé	0,32
VW Golf	0,42
Audi 100	0,30
Mercedes 190	0,33

(Cal dir que els peixos tenen uns admirables valors de C entre 0,06 i 0,25).

Els valors d'aquest coeficient són menors en aquells models que tenen la forma adequada per evitar el màxim de turbulències. Així, els models tipus berlina generen més turbulències i sofreixen més força de resistència quan corren, que en els cotxes tipus coupé (fig. 13).



**Figura 13.** Comparació de turbulències en cotxes tipus berlina (esquerra) i en tipus coupé (dreta).

### Potència consumida

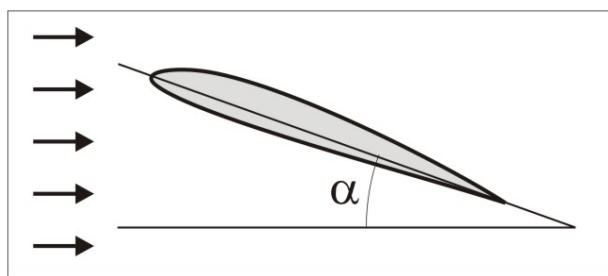
La potència consumida en un desplaçament es calcula multiplicant la força per la velocitat. Per això podem escriure

$$P = \frac{1}{2} \rho v^3 CA$$

Aquesta expressió ens indica que la potència d'una barca, per exemple, depèn del cub de la velocitat, mentre que la força de resistència era proporcional només al seu quadrat. Si volguéssim doblar la velocitat d'una barca, caldria multiplicar la potència del motor per  $2^3 = 8$ . Això dificulta que les barques puguin arribar a velocitats molt elevades, i si es vol aconseguir resulta molt car en combustible.

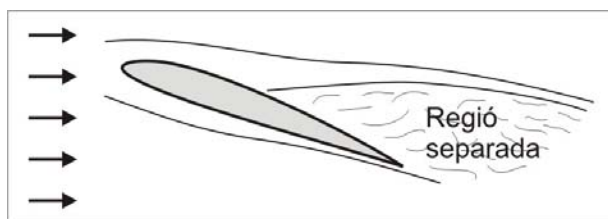
## Força de sustentació

Ja hem comentat que la força de sustentació dels avions és deguda a l'efecte Venturi per l'asimetria de perfil de les ales. Però cal dir que també hi té la seva part important el principi d'acció i reacció. Les ales no estan planes sinó inclinades un cert angle anomenat *angle d'atac* (fig. 14), especialment quan l'avió s'envola. Quan l'aire arriba a l'ala, la seva inclinació el desvia cap avall, i fa que l'aire, com a força de reacció, empenyi simultàniament l'ala cap amunt.



**Figura 14.** Angle d'atac de l'ala d'un avió ( $\alpha$ ).

Segons la forma i la inclinació de l'ala, es pot produir el que s'anomena un *despreniment de flux* (fig. 15), generant turbulències que disminueixen molt la força de sustentació. Per això cada model d'avió té el seu propi angle de sustentació màxim. Superar-lo pot significar que no es pugui aguantar en vol i patir una desgràcia.



**Figura 15.** Despreniment de flux.

Els avions militars, que requereixen uns moviments molt vigorosos, necessiten un disseny molt acurat de la forma de les seves ales.

Tant la força de sustentació com la de resistència tenen unes expressions molt semblants:

$$F_{res} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_x A_x \quad F_{sus} = \frac{1}{2} \rho v^2 C_y A_y,$$

on  $C_x$  y  $C_y$  són els coeficients de resistència i de sustentació, respectivament, que depenen de la forma dels avions i que són molt investigats pels enginyers aeronàutics.

## Lleis d'escala de velocitat i de potència

Quan els enginyers aeronàutics dissenyen un avió, amb simulacions per ordinador primer posen a prova diversos models d'avió, provant diverses formes i determinant les forces que hi actuen.

Un cop seleccionada la millor forma per a l'avió, per posar-la a prova en fan un model a escala que col·loquen en un túnel de vent. Es tracta d'un tub per on circula un important flux d'aire impulsat per un gran ventilador, a una velocitat que es pot controlar. El model, sotmès a aquest raig d'aire, experimenta diverses forces que es poden mesurar amb sensors.

Amb totes aquestes dades determinen la potència que haurà de tenir el model d'avió per poder volar. Això permet calcular la velocitat de l'avió i la potència que efectivament hauran de tenir els seus motors per mantenir-lo en vol, suposant que sigui, per exemple, cent vegades més gran. És una dada important per al vol però també per preveure la llargària de la pista per envolar-se o aterrar.

Se sap que la potència per fer volar l'avió real, comparada amb la de la maqueta, depèn d'un factor que consisteix en l'escala elevada a  $7/2$ :

$$P_{avió} = (escala)^{7/2} P_{maqueta}$$

En l'exemple de la maqueta a escala 1:100, la potència per fer volar l'avió serà:

$$P_{avió} = (100)^{7/2} P_{maqueta} = 10.000.000 P_{maqueta}$$

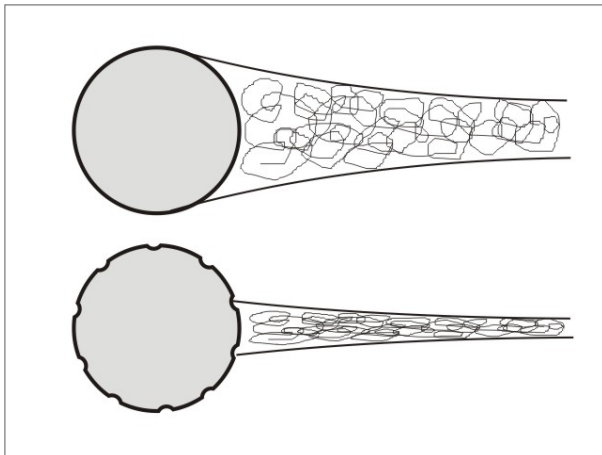
Per tant, l'avió haurà de ser 100 vegades més potent, com intuïtivament es podria pensar, sinó deu milions de vegades.

Això ens permet comprendre per què no hi ha ocells de 150 quilos. Tots els ocells que volen són relativament petits. Els estruços, massa pesats, no poden volar, només corren. Això és perquè, com hem vist, la potència per volar augmenta amb la grandària d'una manera molt acusada, molt més del que ho fa la potència muscular disponible.

## Les pilotes de golf i els avions supersònics

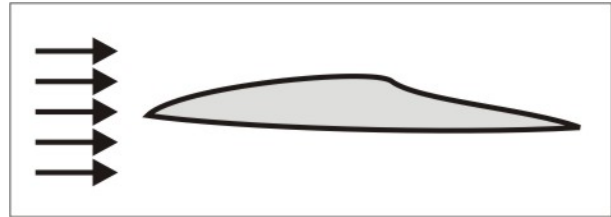
Les pilotes de golf no són llises, sinó que tenen una mena de cràters repartits per tota la seva superfície.

Podríem imaginar que la bola correria millor si la superfície fos llisa, però no és veritat. De fet, les pilotes llises no arriben tan lluny com les que tenen la superfície amb cràters. Els objectes de superfície llisa generalment sofreixen més resistència que no pas les rugoses, ja que en aquestes la zona de turbulències és més petita (fig. 16).



**Figura 16.** Zones de turbulències en una pilota llisa i en una de rugosa.

Com es pot veure, la física de les ales pot ser molt complicada, perquè de vegades pot convenir que en comptes de ser llises tinguin petites protuberàncies. Concretament en el cas d'avions supersònics convé que quan trenquen la barrera del so les seves ales tinguin en la part superior una petita concavitat (fig. 17), perquè sinó es podrien trencar les ales.



**Figura 17.** Diagrama del perfil de l'ala d'un avió supersònic.

Aquest fou un descobriment el retard del qual va costar diverses vides humanes en els inicis dels vols supersònics.

### Conclusions

En definitiva, la física de les forces produïdes pel moviment relatiu respecte de l'aire és molt interessant. Serveix per dissenyar avions i per comprendre el vol dels ocells i els insectes, per dissenyar ventiladors, extractors i xemeneies més eficaços, per optimitzar les formes dels cotxes i els avions per tal que ofereixin menys resistència i estalviïn combustible. Serveix per comprendre les bases físiques del sistema respiratori, per millorar les prediccions meteorològiques, per entendre millor com es produeixen i avancen les ones en el mar.

Les seves aplicacions són immediates i de gran utilitat, i la seva comprensió és una gran satisfacció intel·lectual.

### Lectures suggerides

J.E. Llebot, *Els fluids de la vida*, Editorial Enciclopèdia catalana, Barcelona, 1997

P. A. Tipler, *Física*, Editorial Reverté, Barcelona, 2002