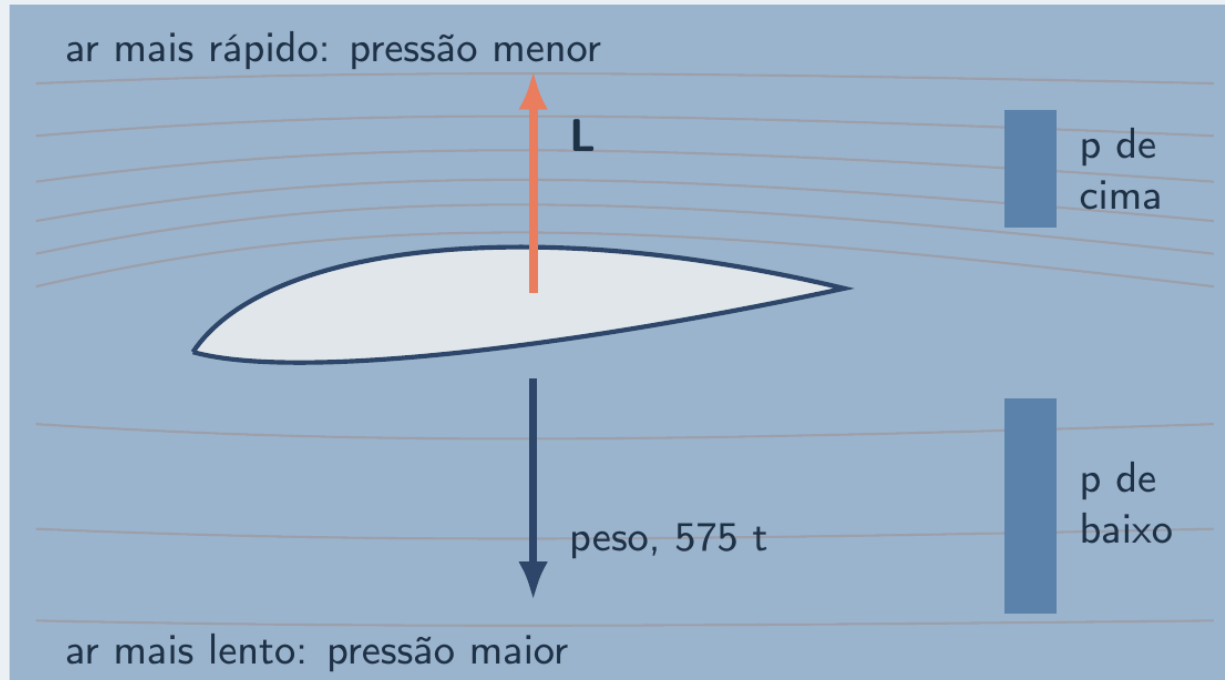


Mecânica IV · Episódio 12

As quinhentas e setenta e cinco toneladas que a asa segura

Vazão, Bernoulli na asa e o fecho da mecânica

O caso



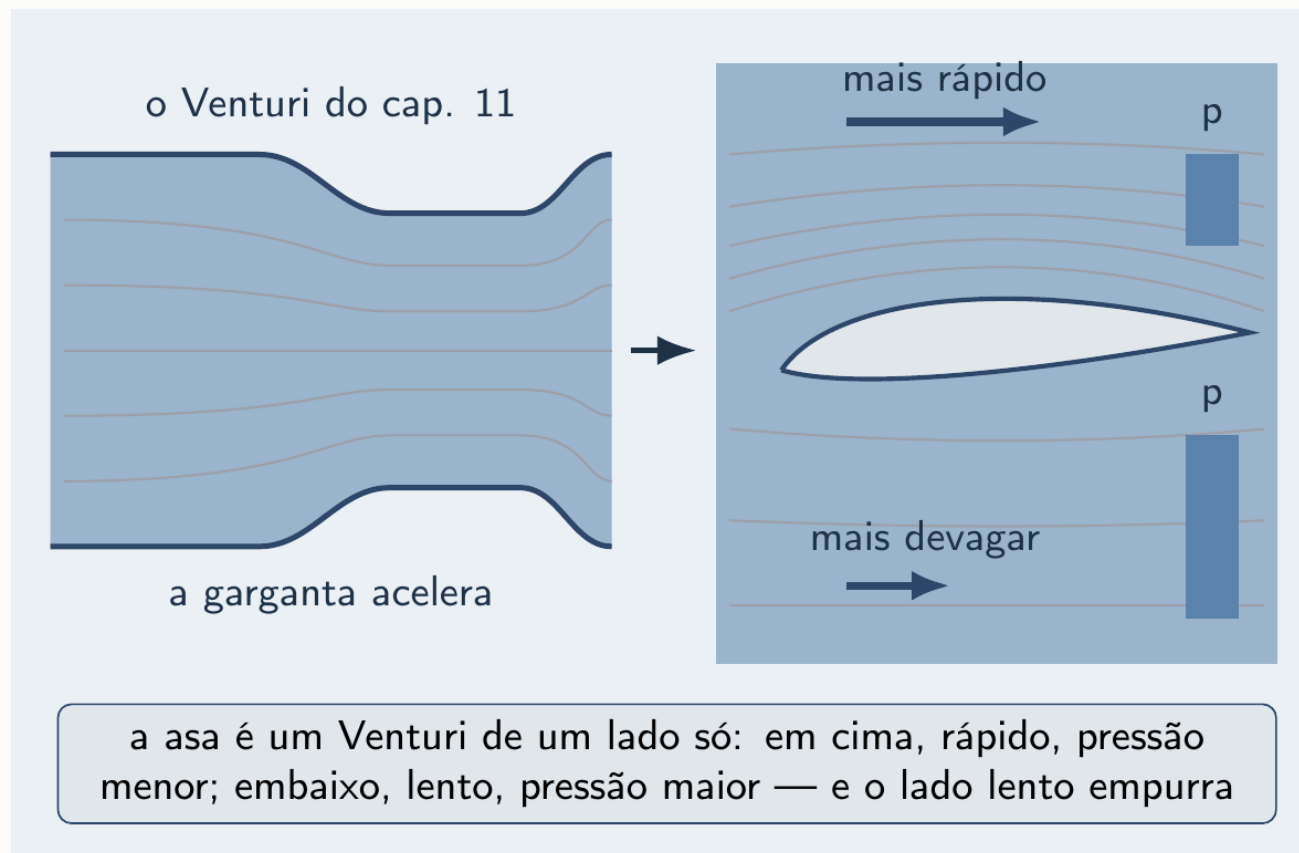
575 t sobre 845 m² de asa: $\Delta p \approx 7\%$
de uma atmosfera — só isso segura o avião

- maior avião de passageiros: dois andares, 80 m de envergadura
- decolagem até **575 t** · pouso até 386 t
- asas: 845 m² de área de referência
- peso sobre área: cerca de 6 800 Pa, 7 % de 1 atm

Pergunta do episódio

Como uma diferença de pressão tão pequena sustenta um prédio voando?

Conceito 1 – Asa: Venturi de um lado



- dorso curvo: ar acelera · barriga: ar mais lento
- mesma altura: veloz tem pressão menor
- saldo para cima vem do ar **de baixo**

Exemplo resolvido – as duas faces

Ar ($1,2 \text{ kg/m}^3$) a 70 m/s em cima e 60 m/s embaixo (valores ilustrativos nossos)

Fórmula:

$$\Delta p = \frac{\rho (v_2^2 - v_1^2)}{2}$$

Substituição:

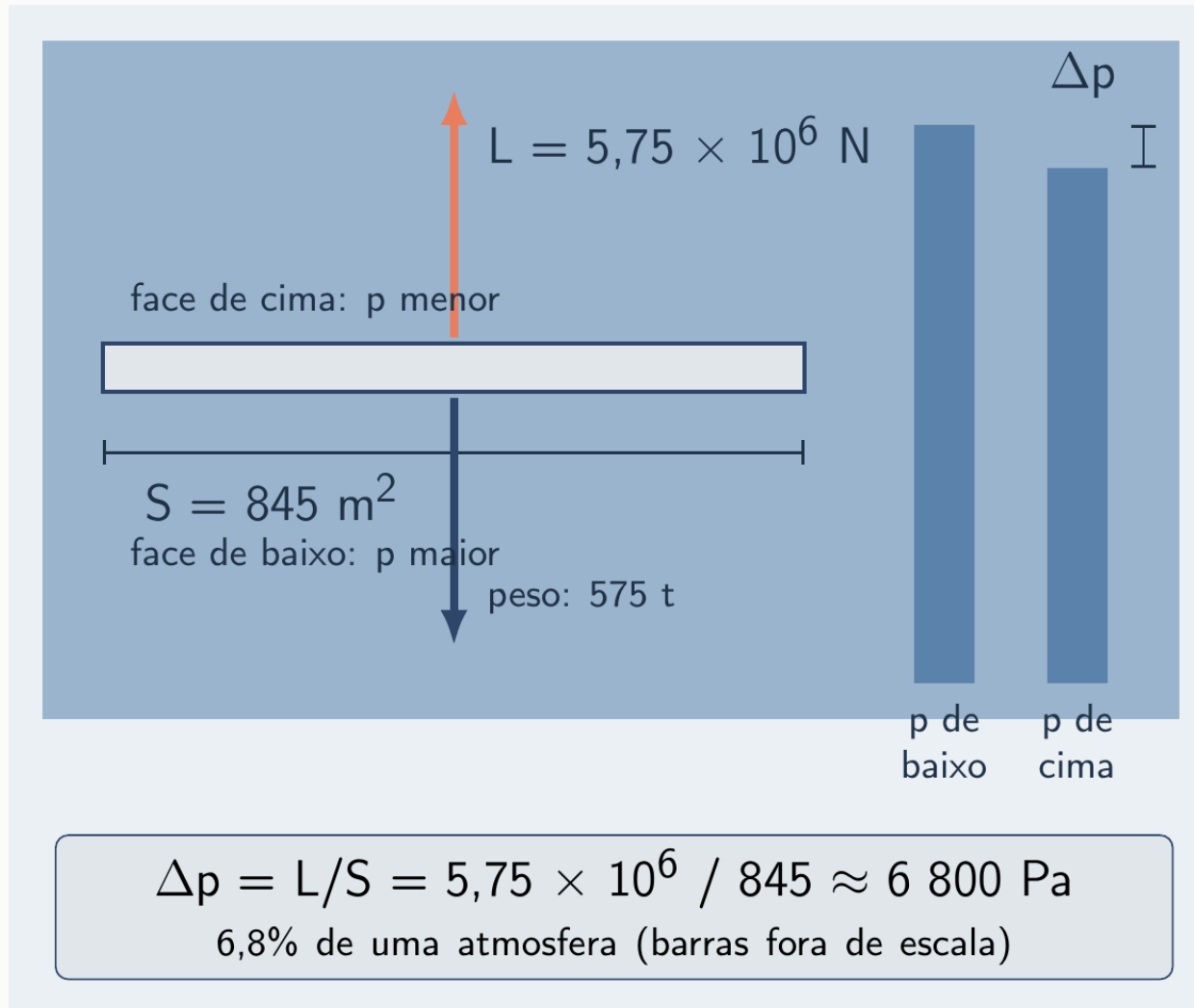
$$\Delta p = \frac{1,2 \cdot (4\,900 - 3\,600)}{2}$$

Resultado:

$$\Delta p = \mathbf{780 \text{ Pa}}$$

- maior embaixo

Conceito 2 – Sustentação, $L = \Delta p S$



- vetor, para cima:
 $L = \Delta p S$
- voo nivelado ($\Sigma F = 0$):
 $L = m g$
- mesma construção do empuxo, agora no ar

Exemplo resolvido – a diferença de pressão

Asa de 845 m^2 segurando $5,75 \times 10^6 \text{ N}$ (575 t , $g = 10 \text{ m/s}^2$)

Fórmula:

$$\Delta p = \frac{L}{S}$$

$$f = \frac{\Delta p}{p_0}$$

Substituição:

$$\Delta p = \frac{5,75 \times 10^6}{845}$$

$$f = \frac{6\,800}{100\,000}$$

Resultado:

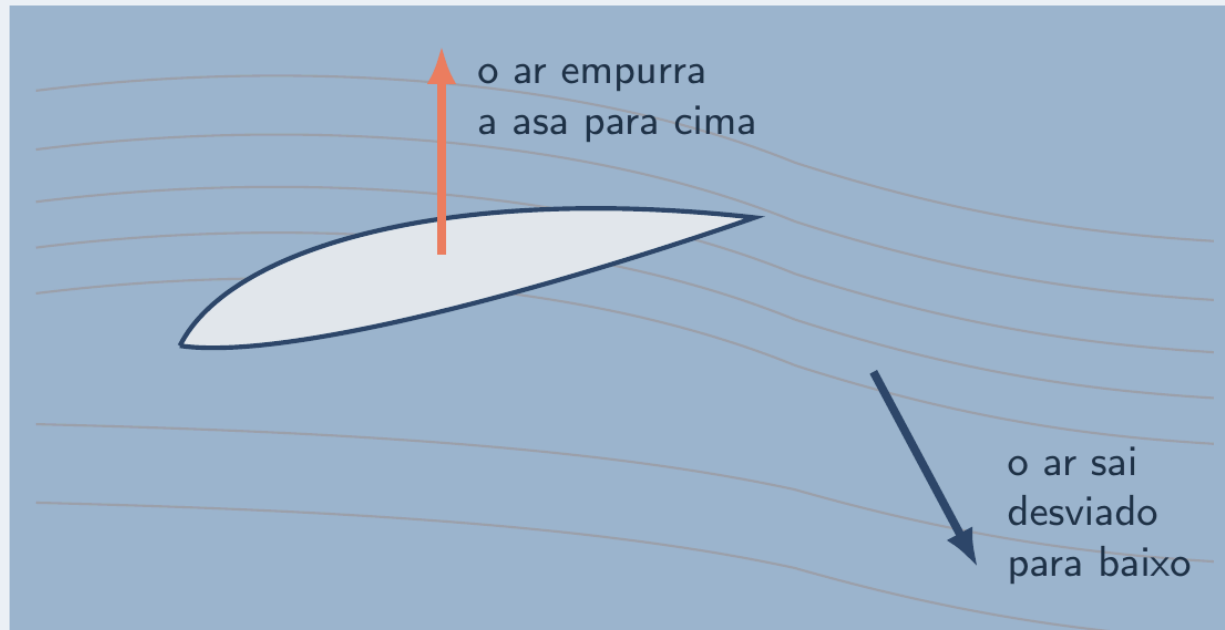
$$\Delta p \approx \mathbf{6\,800 \text{ Pa}}$$

$$f = \mathbf{0,068}$$

- cerca de 7 % de 1 atm

Conceito 3 – O mito do tempo igual

~~o ar de cima percorre um caminho maior e tem de chegar junto~~



terceira lei: a asa empurra o ar para baixo, o ar empurra a asa para cima — Bernoulli e Newton contam a mesma força

- "ar de cima chega junto": falso
· ele chega antes
- asa joga ar para baixo → ar joga asa para cima
- Bernoulli e 3ª lei: mesma força, duas contas

Exemplo resolvido – a reação no ar

Avião de 1 080 kg em voo nivelado: força da asa sobre o ar? (exercício nosso)

Fórmula:

$$L = m g$$

Substituição:

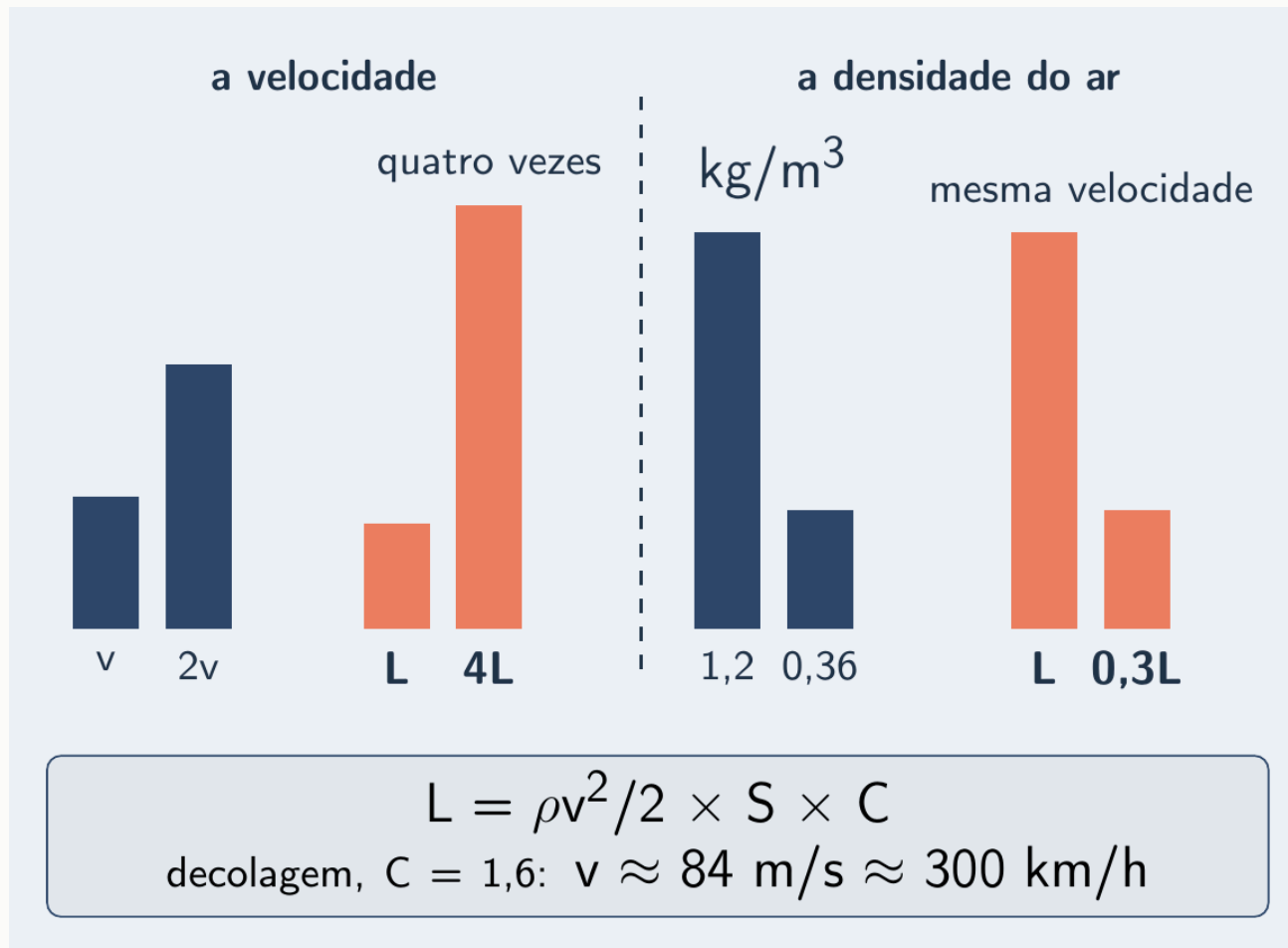
$$L = 1\,080 \cdot 10$$

Resultado:

$$L = \mathbf{10\,800\,N}$$

- 3ª lei: a asa empurra o ar com o mesmo valor, para baixo

Conceito 4 – Sustentação, ρ e v^2



$$L = \frac{\rho v^2}{2} S C$$

- C : forma, ângulo, flapes
- dobro de $v \rightarrow$ quádruplo de L ·
 ρ pela metade $\rightarrow L$ pela metade

$$v = \sqrt{\frac{2L}{\rho S C}}$$

Exemplo resolvido – decolagem

Ar a $1,2 \text{ kg/m}^3$, asa de 845 m^2 , coeficiente 1,6 (estimado), sustentação de $5,75 \times 10^6 \text{ N}$

Fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{2L}{\rho S C}}$$

Substituição:

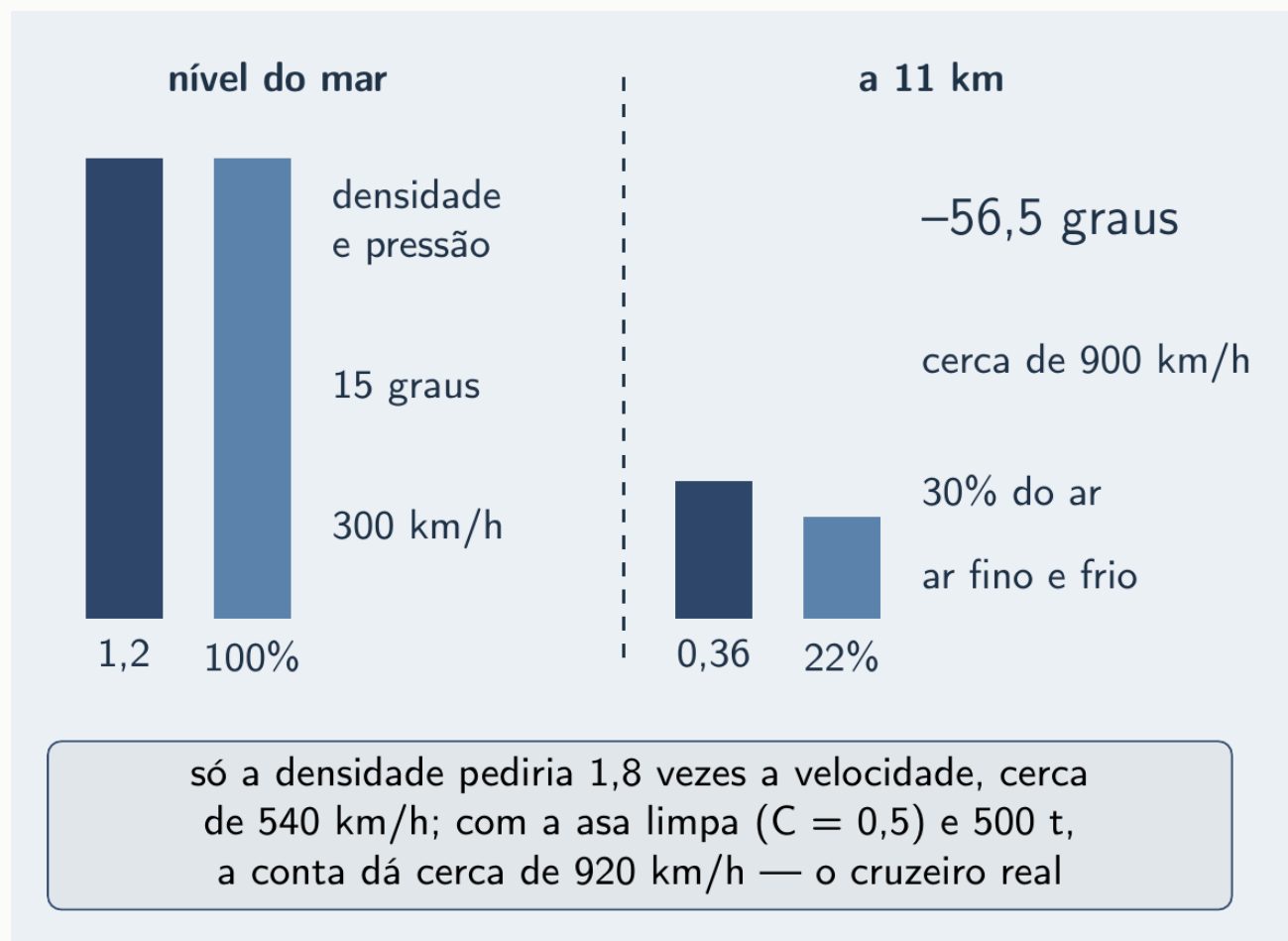
$$v = \sqrt{\frac{11\,500\,000}{1\,622}} \approx \sqrt{7\,100}$$

Resultado:

$$v \approx \mathbf{84 \text{ m/s}}$$

- cerca de 300 km/h

Conceito 5 – Cruzeiro a 11 km



- a 11 km: densidade 30 %, pressão 22 %, -56,5 °C
- ar ralo pede v maior:
$$v \propto \frac{1}{\sqrt{\rho}}$$
- asa limpa ($C = 0,5$) e avião mais leve → cerca de 900 km/h

Exemplo resolvido – velocidade de cruzeiro

Ar a $0,36 \text{ kg/m}^3$, coeficiente 0,5, 500 t (estimativas declaradas)

Fórmula:

$$v = \sqrt{\frac{2L}{\rho S C}}$$

Substituição:

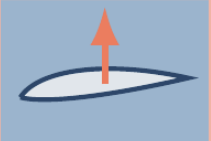
$$v = \sqrt{\frac{10^7}{0,36 \cdot 845 \cdot 0,5}}$$

Resultado:

$$v \approx \mathbf{256 \text{ m/s}}$$

- cerca de 920 km/h

Conceito 6 – O fecho: quem segura?

 torque resultante zero e torque zero	 pressão força por área; a coluna faz pressão	 empuxo diferença de pressão vezes área, na água	 a asa a mesma diferença vezes área, no ar
quem segura? resultante zero, e torque zero — a resposta muda de nome, a exigência não			

- sempre: soma das forças e dos torques nula
- empuxo e sustentação: diferença de pressão vezes área, água ou ar
- próxima pergunta: o que é temperatura?

Exemplo resolvido – o casco, mesma conta

Fundo de casco com 100 m^2 a 2 m de calado (exercício nosso)

Fórmula:

$$\Delta p = \rho g h$$

$$F = \Delta p A$$

Substituição:

$$\Delta p = 1\,000 \cdot 10 \cdot 2$$

$$F = 2 \times 10^4 \cdot 100$$

Resultado:

$$\Delta p = \mathbf{2 \times 10^4 \text{ Pa}}$$

$$F = \mathbf{2 \times 10^6 \text{ N}}$$

- segura 200 t

Radar ENEM

$$L = \Delta p \times S \quad L = \rho v^2 / 2 \times S \times C$$

Bernoulli na asa
rápido em cima, pressão menor; o ar de baixo empurra

o quadrado
dobrar a velocidade
quadruplica a sustentação

a densidade
ar fino pede mais
velocidade e mais pista

terceira lei
a asa desvia o ar para baixo;
o ar empurra a
asa para cima

~~o ar de cima tem de chegar junto~~

nada obriga o ar a chegar junto: a asa desvia o ar, e a diferença de pressão vezes a área é a força

- ✗ "tempo igual", caminho maior
- ✗ baixa pressão "suga" a asa
- ✗ esquecer o v^2
- ✗ desprezar a densidade do ar
- ✗ pressão no lugar da diferença
- ✓ ar fino ou quente → pista maior

Resumo em cinco peças

1 equilíbrio são duas contas: forças zero e torques zero; o CG cai na base

2 pressão é força por área, e a coluna faz pressão: de Torricelli ao Trieste

3 Pascal transmite, Arquimedes empurra: quem flutua é a densidade média

4 fluido em movimento: vazão e Bernoulli — rápido é pressão baixa

5 a asa: 7% de uma atmosfera vezes a área — parado ou voando, a mesma diferença

1. equilíbrio: ΣF e $\Sigma \tau$ nulos
2. coluna faz pressão: $p_0 + \rho g h$
3. Pascal transmite, Arquimedes empurra
4. fluxo: $Q = A v$ e Bernoulli
5. asa: $\Delta p S$ levanta

Treine no jogo



QR do jogo → <https://professorcanario.com.br/m4/c12/lista>

Canarinho · lista do Episódio 12

Depois da aula: o combo deste episódio

[Abrir arena](#)

Vídeo em capítulos



Vá direto ao trecho que precisa.

<https://professorcanario.com.br/m4/c12/video>

Lista no app



As questões deste episódio,
para treinar.

<https://professorcanario.com.br/m4/c12/lista>

Livro da minissérie



Com QR em cada capítulo, que
leva ao vídeo e à lista daquele
tema.

<https://professorcanario.com.br/mecanica4/livro/>