



INSTITUTO DE FÍSICA
Universidade Federal Fluminense

Física III

Fluidos, Termodinâmica, Ondas e Ótica

Instrutor: Prof. Daniel Jonathan

Sala: 507 (IF, torre nova, 5º andar)

Email: djonathan@id.uff.br

Site do curso: cursos.if.uff.br/!fisica3-0117

Twitter do curso: twitter.com/fisica3uff ou [@fisica3uff](https://twitter.com/fisica3uff)

Livro-texto recomendado

“Física, uma abordagem estratégica”, vol. 2
Randall L. Knight

Caps. 15 – 23



Calendário – 1p17 – (2as/4as)

	Seg.	Ter.	Qua.	Qui	Sex	Sab.
Março	20	21	22	23	24	
	27	28	29	30	31	
Abril	3	4	5	6	Feriado	7
	MT1 10	11	12	13	14	
	17	18	19	20	Feriado	21
	24	25	MT2 26	27	28	P1 29
Maio	Feriado 1	2	3	4	5	
	8	9	10	11	12	
	15	16	MT3 17	18	19	
	22	23	24	25	26	
	29	30	MT4 31	1	2	P2 3
Junho	5	6	7	8	9	
	12	13	14	Feriado 15	Recesso 16	
	19	20	MT5 21	22	23	
	26	27	28	29	30	
Julho	3	4	MT6 5	6	7	P3 8
	10	VR 11	12	13	14	VS 15
	17	18	19	Fim Per 20		

Tópicos

P1

15- Fluidos e Elasticidade

16- Descrição Macroscópica da Matéria

17- 1a Lei da Termodinâmica

Revisão

P2

18- Conexão micro/macro

19- Máquinas Térmicas

20- Ondas I

Revisão

P3

21- Ondas II - Superposição

22- Óptica Ondulatória

23- Óptica Geométrica

Revisão

MT1: Cap 15 10/abr

MT2: Caps 16 e 17 26/abr

MT3: Cap 18 17/mai

MT4: Caps 19 e 20 31/mai

MT5: Cap 21 21/jun

MT6: Caps 22 e 23 05/jul

Método do curso: *peer instruction* (*instrução pelos colegas*)

Metodologia desenvolvida originalmente em Princeton (EUA), com comprovado resultado na melhora da absorção de conteúdo de física universitária.

1) Testes conceituais em sala. São de múltipla escolha, envolvem pouca ou nenhuma matemática, e não valem nota.

Objetivo: aprender através da discussão de conceitos-chave com os colegas

2) Testes de leitura em casa. **Antes de cada aula**, você deve ler seções do livro e responder um teste simples online, valendo nota.

Objetivos: já chegar preparado para as discussões em sala, e tb não deixar a matéria acumular

Testes online: como funciona

- a) **Antes da aula** vá no [site](#) (ou twitter) do curso e clique no link do teste.
- b) Faça login com seu email do iduff (xxx@id.uff.br)
[Se não tiver um ainda, vai ser preciso criar um]
- c) Preencha suas respostas: são algumas questões valendo nota, em geral discursivas, mais um campo (obrigatório, mas sem valer nota) para você fazer comentários.
- d) Envie **até meia hora antes** do horário da aula

Avaliação

Provas (3): múltipla escolha

MiniTestes (2 por prova) : 1Q discursiva da lista de exs.

Testes de Leitura online (1 por aula): 5Q

Nota final = (Média 3 Provas) x 85%

+ (Média MiniTestes*) x 10%

+ (Média Testes de Leitura**) x 5%

* descontando pior nota

** descontando 25% piores notas (ex: 5 de 20, ou 6 de 24)

Obs: NÃO haverá reprovação por presença insuficiente, exceto para quem não comparecer a 2 ou mais provas. Porém, haverá lista de presença para fins estatísticos e/ou para avaliação subjetiva da participação.

Teste conceitual: como funciona

i.

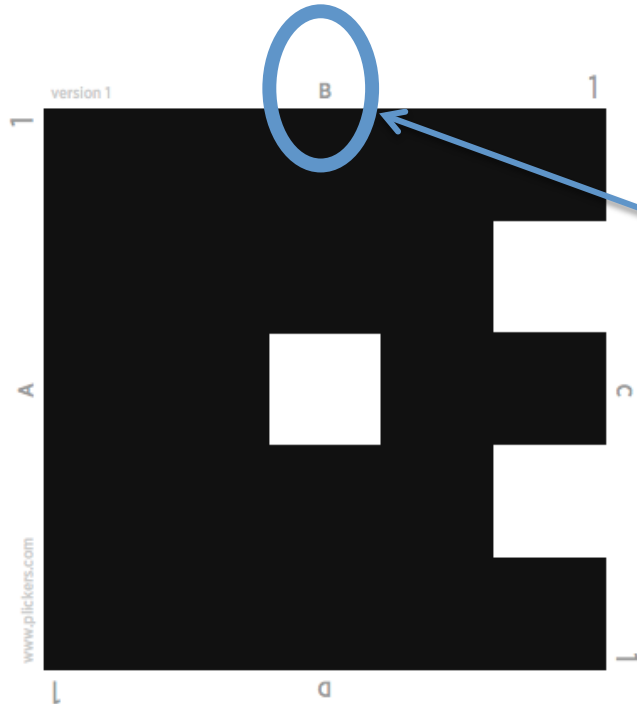
Questão Lançada

Vc pensa na resposta
durante **1 min**

Ao sinal do Prof, você
responde com um cartão-resposta

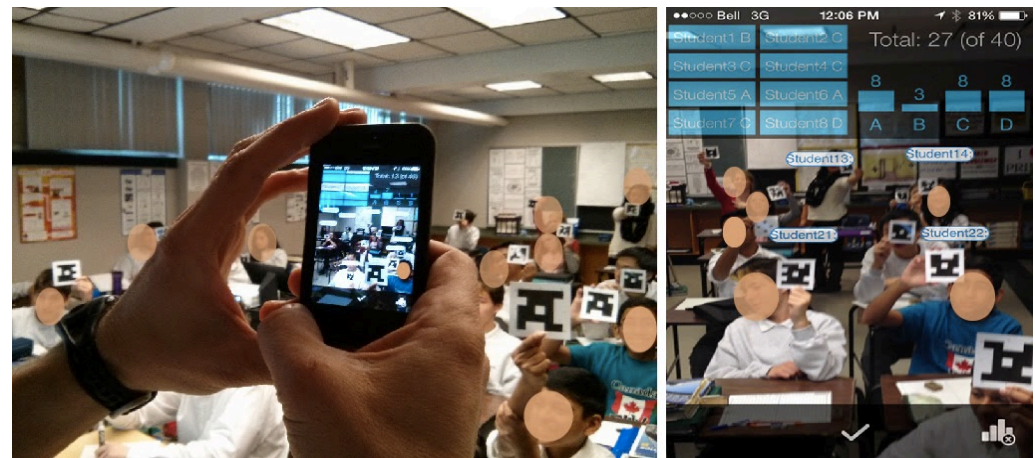
- Se $> \sim 70\%$ da turma acertar, o prof. segue com a matéria.
 - Se $< \sim 30\%$ da turma acertar, o prof. reexplica o conteúdo e refazemos a questão.
- ii. Se **30-70%** da turma acertar, você discute com um colega, cada um tentando convencer o outro de que a sua resposta é a correta
- iii. Fazemos uma segunda votação e vemos como as opiniões mudaram (ou não). Independente do resultado, o professor explica a questão.

Teste Conceitual: tecnologia



- 64 cartões, todos diferentes
- Resposta levantando o cartão com sua resposta virada pra cima
- Letras pequenas de propósito (p/ seu colega não ver sua resposta!)

Eu escaneio a turma usando um aplicativo no celular



Parte I – Fluidos e Elasticidade

(slides baseados parcialmente em material do prof. Carlos Eduardo R. de Sousa)

Fluidos: sistemas macroscópicos que fluem.



P: O que diferencia um sólido de um fluido?

Teste Conceitual 1.1:

O que diferencia um sólido de um fluido?

- A)** Um sólido é duro e um fluido é mole
- B)** Um sólido resiste a forças perpendiculares a sua superfície, ao contrário de um fluido
- C)** Um sólido resiste a forças tangenciais a sua superfície, ao contrário de um fluido
- D)** Um sólido colocado num recipiente fechado mantém o seu formato, mas um fluido se expande até ocupá-lo completamente



astronauta brincando com água no espaço –
ela mantém seu formato sem um recipiente!



“pingo mais lento do mundo” (piche)
– leva ~10 anos para cada um cair!
Caíram só 9 desde 1930!

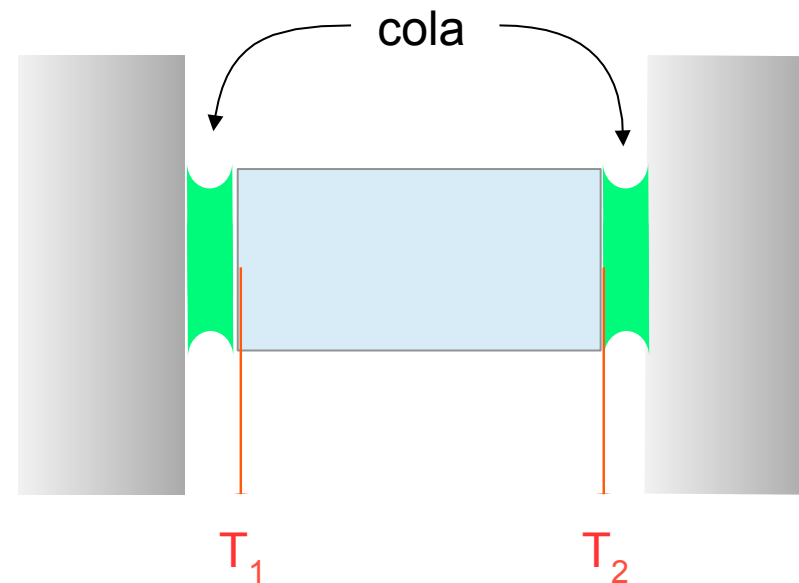
Teste Conceitual 1.1:

O que diferencia um sólido de um fluido?

- A)** Um sólido é duro e um fluido é mole
- B)** Um sólido resiste a forças perpendiculares a sua superfície, ao contrário de um fluido
- C)** Um sólido resiste a forças tangenciais a sua superfície, ao contrário de um fluido
- D)** Um sólido colocado num recipiente fechado mantém o seu formato, mas um fluido se expande até ocupá-lo completamente

Fluidos: sistemas macroscópicos que fluem.

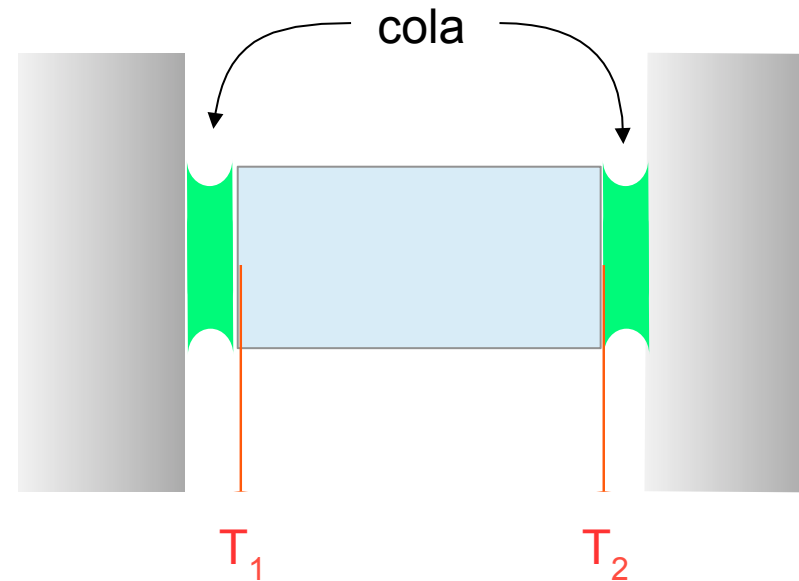
R: A diferença fundamental entre sólidos e líquidos está na forma de responder a forças (**tensões**) tangenciais à superfície



T = tensão superficial
(cisalhamento)

Fluidos: sistemas macroscópicos que fluem.

Se a cola não estiver seca, a tensão superficial provoca deslizamento de camadas adjacentes da cola, o que leva à descida do bloco.

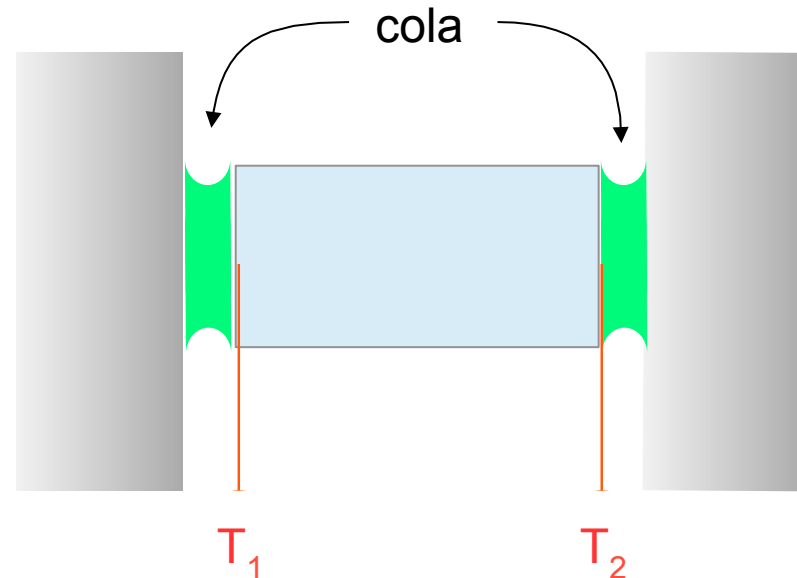


T = tensão superficial
(cisalhamento)

Fluidos: sistemas macroscópicos que fluem.

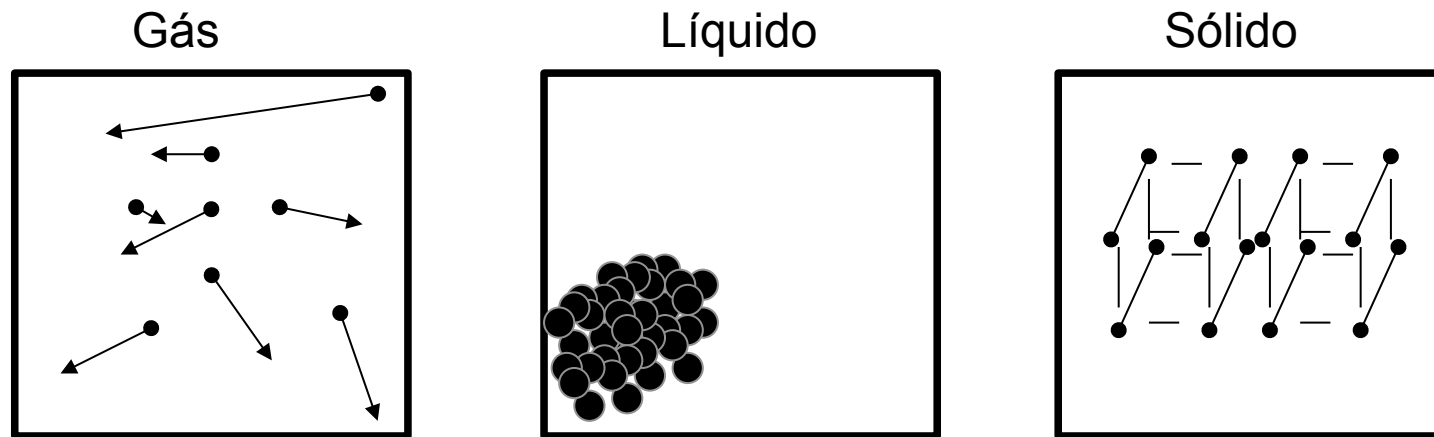
Sólido → se deforma até o equilíbrio quando sujeito a uma tensão superficial tangencial.

Fluido → não equilibra nenhuma tensão superficial tangencial, ele flui.



T = tensão superficial
(cisalhamento)

Origem das diferenças macroscópicas: propriedades dos constituintes microscópicos da matéria



Gás: partículas espaçadas, interagem apenas durante colisões
– é um fluido *compressível*.

Líquido: partículas ligadas fracamente umas às outras, sem deixar espaços significativos entre elas – podem fluir, mas não podem se aproximar mais – é um fluido (aprox.) *incompressível*

Sólido: partículas ligadas fortemente umas às outras, formando uma estrutura rígida - não fluem

Grandezas físicas relevantes

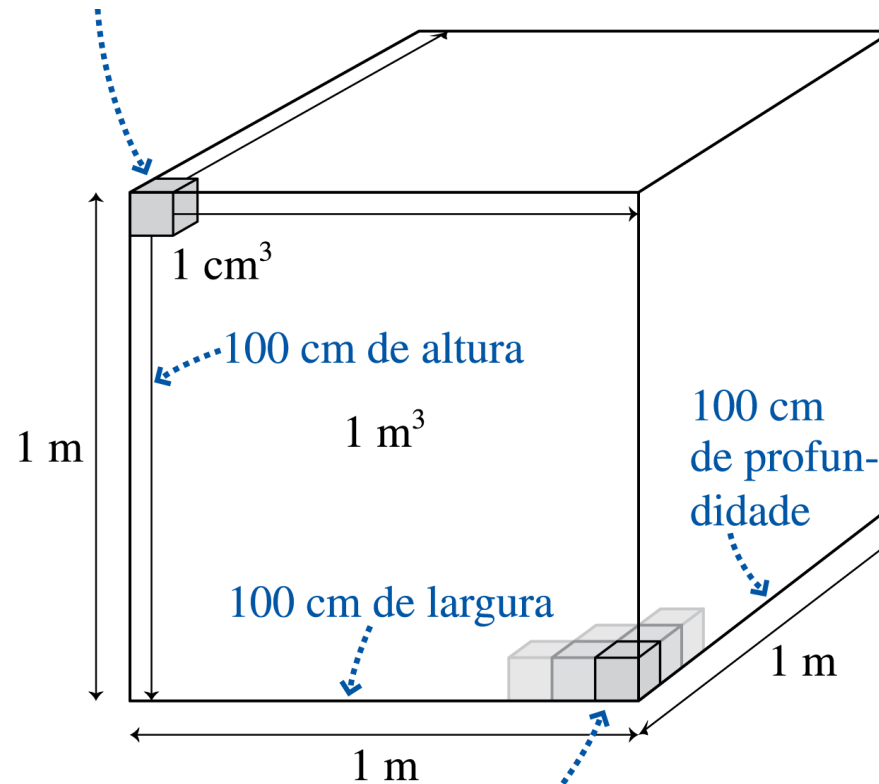
Volume

Densidade

Pressão

Temperatura (mais adiante...)

Volume \equiv espaço ocupado \rightarrow **[m³]**



$$1\text{m}^3 = 1\text{m} \times 1\text{m} \times 1\text{m} = 100\text{cm} \times 100\text{cm} \times 100\text{cm} = 10^6 \text{cm}^3$$

$$1\text{L} = 10\text{cm} \times 10\text{cm} \times 10\text{cm} = 10^3 \text{cm}^3 = 10^{-3} \text{m}^3$$

$$1\text{mL} = 1\text{cm}^3$$

Densidade \equiv Qtde de matéria por volume: $\rho = m/V \rightarrow [\text{kg/m}^3]$

TABELA 15.1 Densidades de fluidos em condições padrão de temperatura (0 °C) e pressão (1 atm)

Substância	ρ (kg/m ³)
Ar	1,28
Álcool etílico	790
Gasolina	680
Glicerina	1.260
Hélio gasoso	0,18
Mercúrio	13.600
Óleo (comum)	900
Água do mar	1.030
Água	1.000

querosene
 álcool
 óleo vegetal
 água
 detergente
 leite
 xarope de maple
 xarope de milho
 mel



← bolinha de pingue-pongue
 ← tampa plástica
 ← contas
 ← tomate cereja
 ← dado
 ← milho de pipoca
 ← parafuso

- densidade (média) de um **objeto** = massa **total** / volume **total** do objeto
- densidade de uma **substância** (ou '**massa específica**')
= massa/volume de uma porção pequena daquela substância

Grandezas relevantes

Densidade \equiv Qtde de matéria por volume: $\rho = m/V \rightarrow [\text{kg/m}^3]$

TABELA 15.1 Densidades de fluidos em condições padrão de temperatura (0 °C) e pressão (1 atm)

Substância	ρ (kg/m ³)
Ar	1,28
Álcool etílico	790
Gasolina	680
Glicerina	1.260
Hélio gasoso	0,18
Mercúrio	13.600
Óleo (comum)	900
Água do mar	1.030
Água	1.000

Teste conceitual 1.2

Se um objeto tem densidade igual a **1g/cm³**, ele é

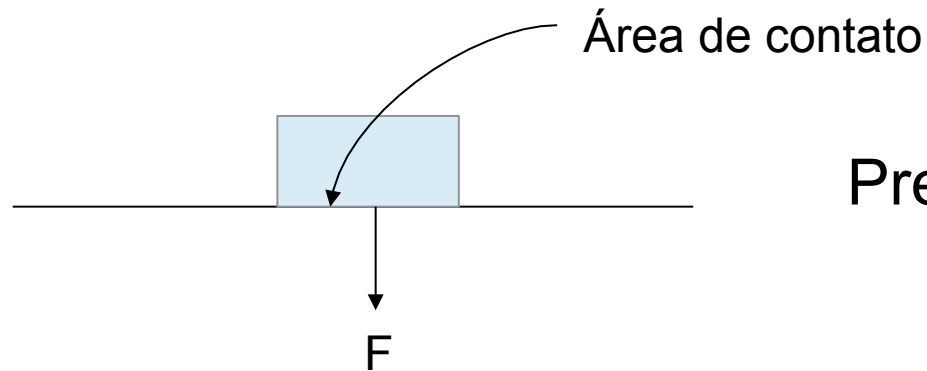
- A) Mais denso que a água
- B) Tão denso como a água
- C) Um pouco menos denso que a água
- D) Muito menos denso que a

água

Grandezas relevantes

Pressão

→ Uma grandeza relacionada com a força *perpendicular* a uma superfície.



$$\text{Pressão} \equiv | \text{Força} | / \text{Área}$$

unidade no SI: $\text{N/m}^2 = \text{Pa}$ (pascal)

Teste Conceitual 1.3

Considere um bloco apoiado em uma superfície horizontal

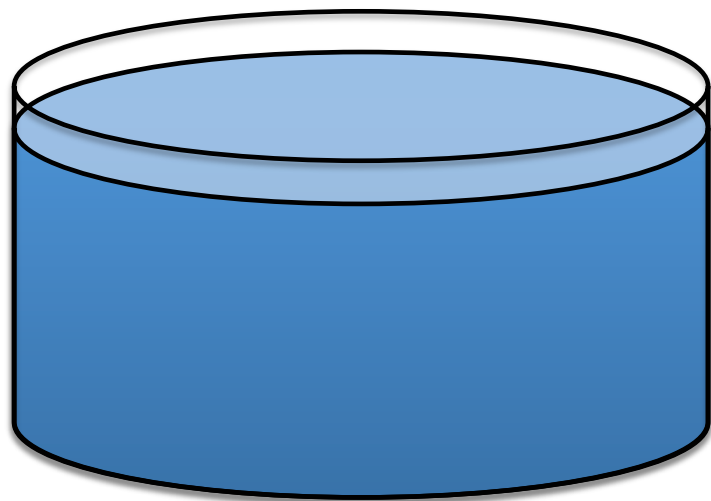


Se adicionarmos um segundo bloco idêntico ao lado do primeiro, a pressão sobre a superfície:

- A) Dobra
- B) Aumenta, mas não dobra
- C) Fica igual
- D) Diminui



Teste Conceitual 1.4



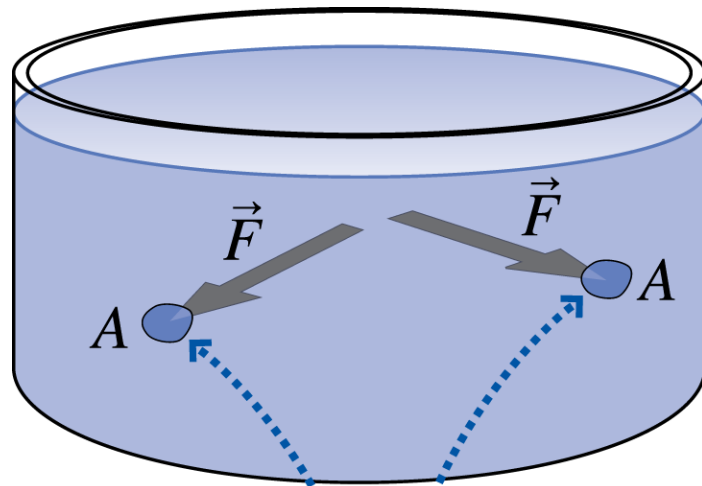
Considere um líquido num recipiente aberto.

Em que região(ões) do líquido existe pressão?

- A) No fundo do recipiente
- B) Nas paredes e no fundo do recipiente
- C) Nas paredes, no fundo e na superfície aberta ao ar
- D) Em todas as suas partes, seja nas superfícies ou no interior do seu volume

Pressão num fluido

A pressão existe em **todos** os pontos do fluido



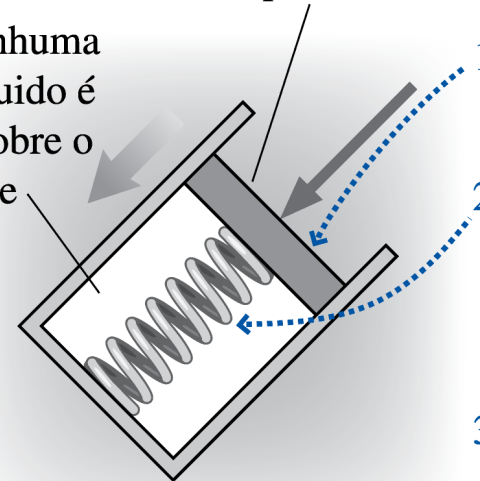
O fluido empurra a área A com força \vec{F} .

Considere um medidor formado por um pequeno pistão preso a uma mola. Quanto maior a pressão, maior a deformação

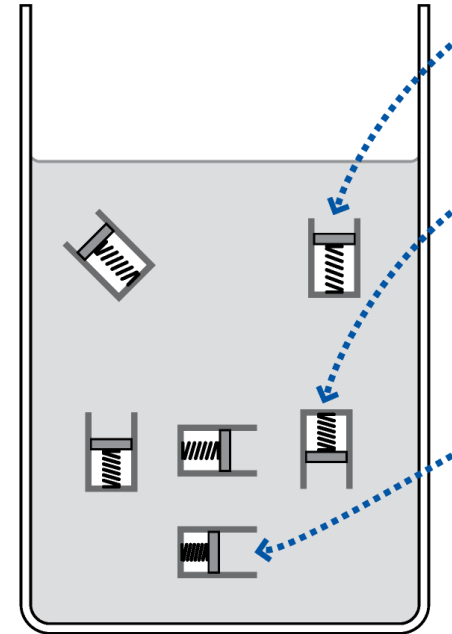
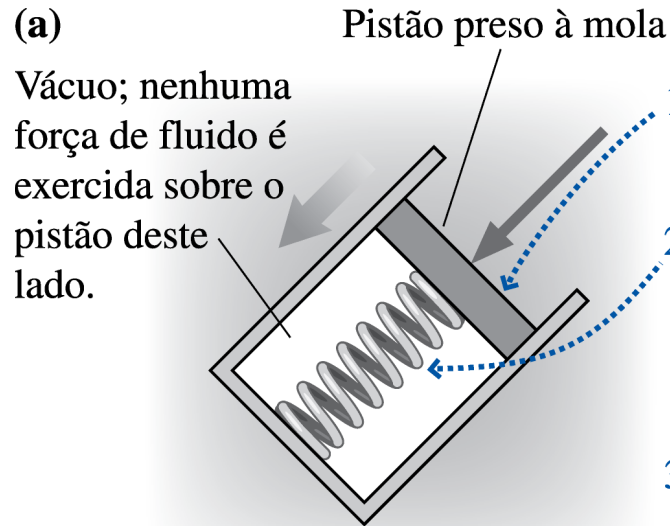
(a)

Vácuo; nenhuma força de fluido é exercida sobre o pistão deste lado.

Pistão preso à mola

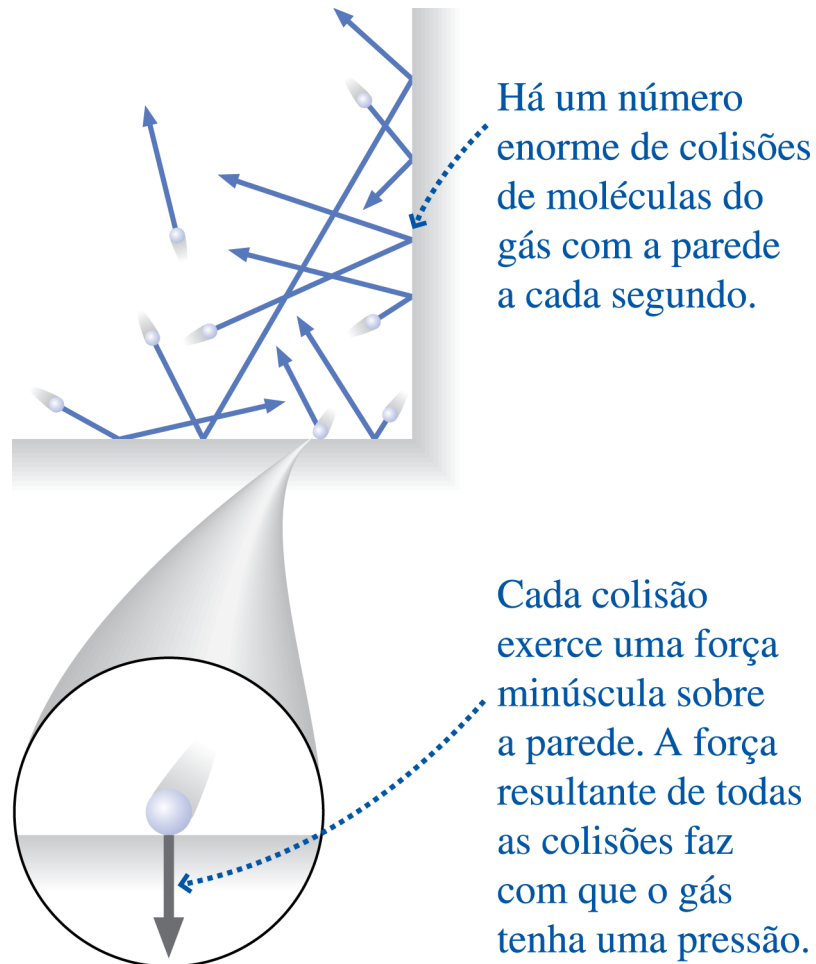


Num dado ponto do fluido, a deformação é a mesma independente da direção que aponta o medidor!



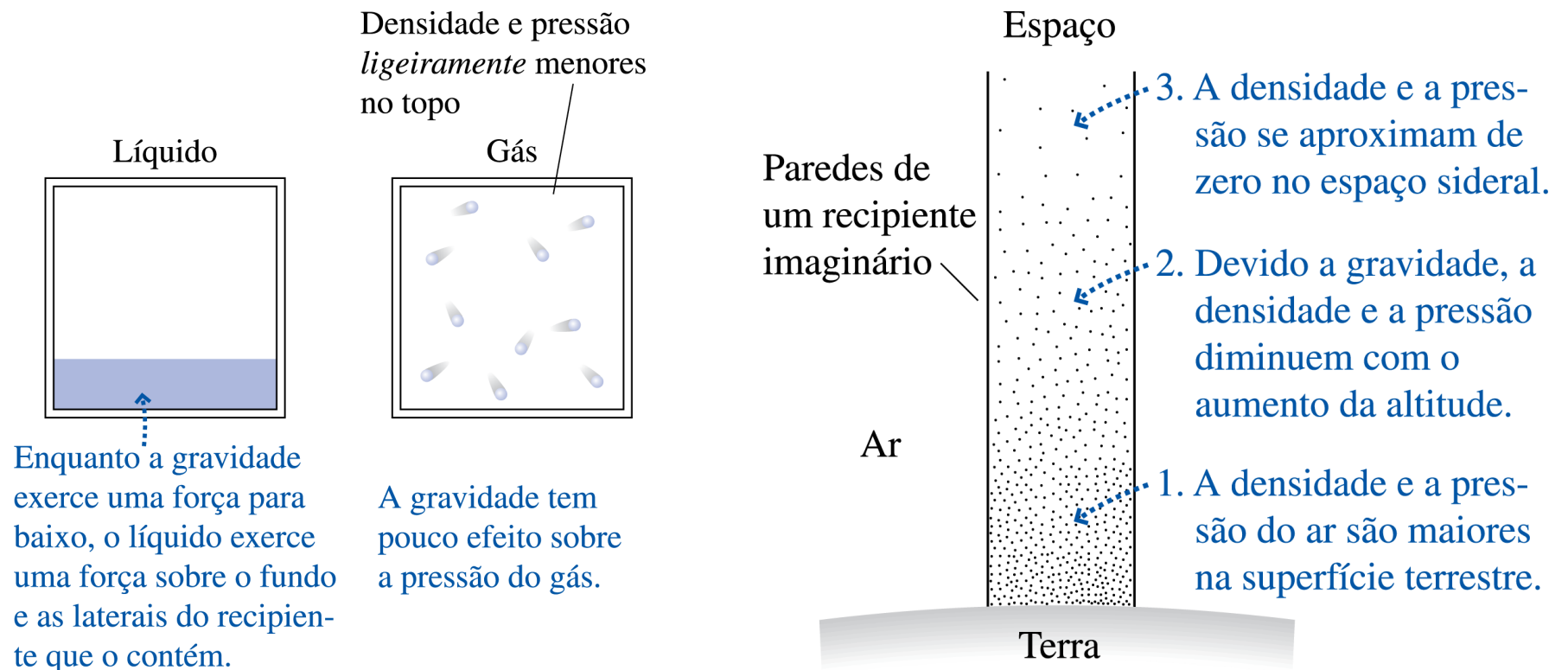
Conclusão: a pressão é uma quantidade escalar (não tem direção ou sentido, como as forças)!

Origem da pressão: colisões das partículas microscópicas do fluido umas com as outras, e com as paredes do recipiente



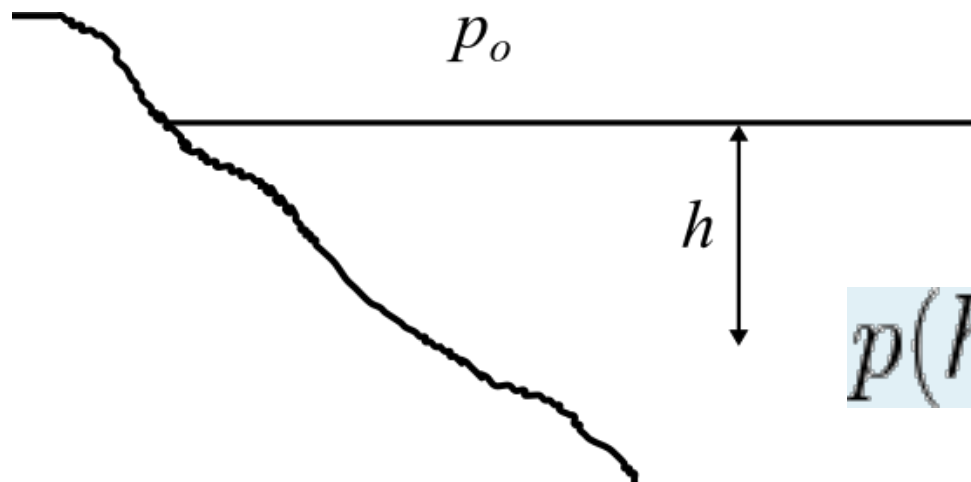
Duas contribuições para essas colisões:

- **Agitação térmica das partículas.**
Relevante em gases, pouco relevante em líquidos
- **A atração gravitacional sobre o fluido.** Relevante em líquidos ou em volumes imensos de gases (ex: a atmosfera inteira). Pouco relevante em pequenos recipientes de gás.



Lei de Stevin: Pressão sob a superfície de um fluido *incompressível* em *equilíbrio hidrostático* (não há *correntes* no seu interior)

Ex: líquido parado em um recipiente



$$p(h) = p_0 + \rho gh$$

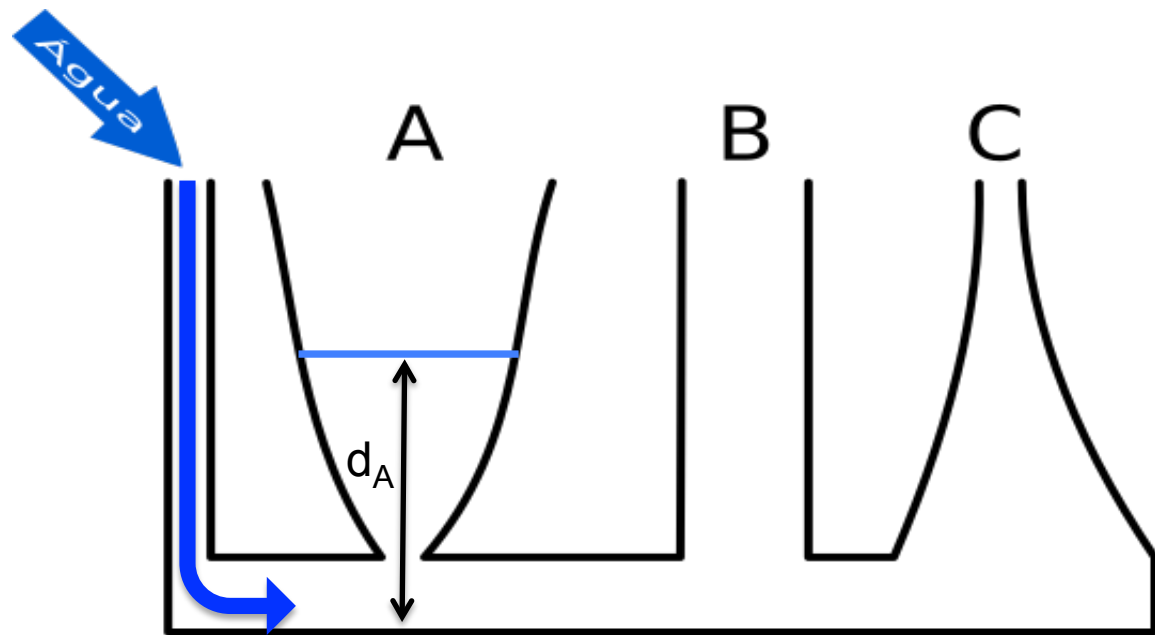
A pressão hidrostática só depende da profundidade e da pressão na superfície!

Teste Conceitual 1.5

Água é lentamente derramada no recipiente da figura abaixo até subir pelos tubos A, B e C. Interrompe-se o derramamento antes que haja o transbordamento.

Como se comparam entre si as profundidades de água nas três colunas (parcialmente cheias)?

- (A) $d_A > d_B > d_C$
- (B) $d_A < d_B < d_C$
- (C) $d_A > d_B = d_C$
- (D) $d_A = d_B = d_C$

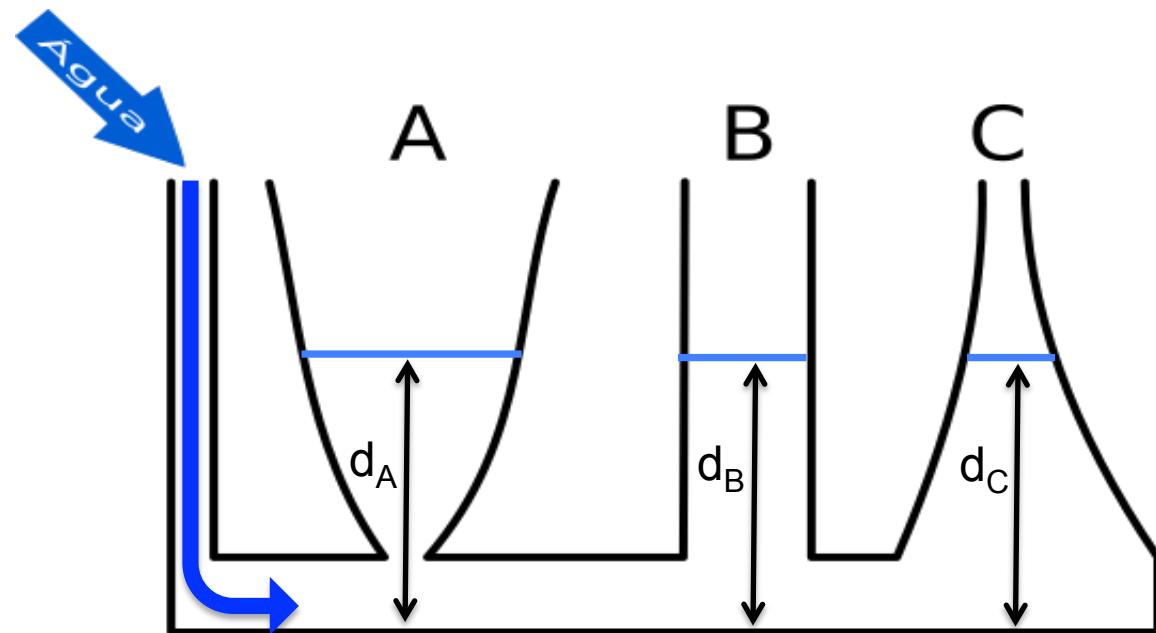


Teste Conceitual 1.5

Água é lentamente derramada no recipiente da figura abaixo até subir pelos tubos A, B e C. Interrompe-se o derramamento antes que haja o transbordamento.

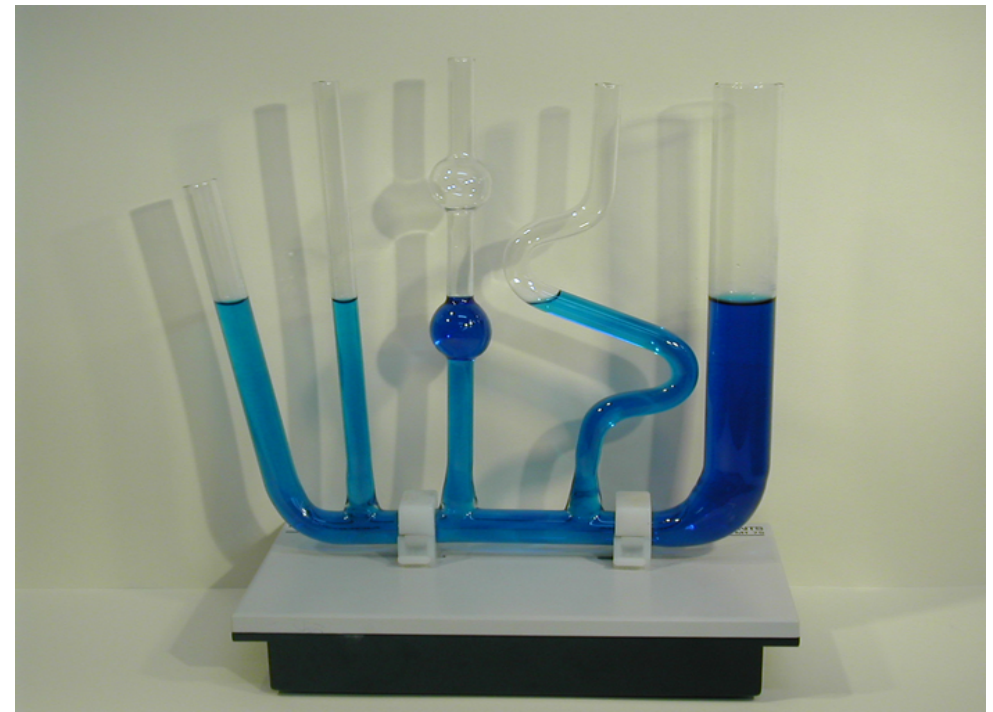
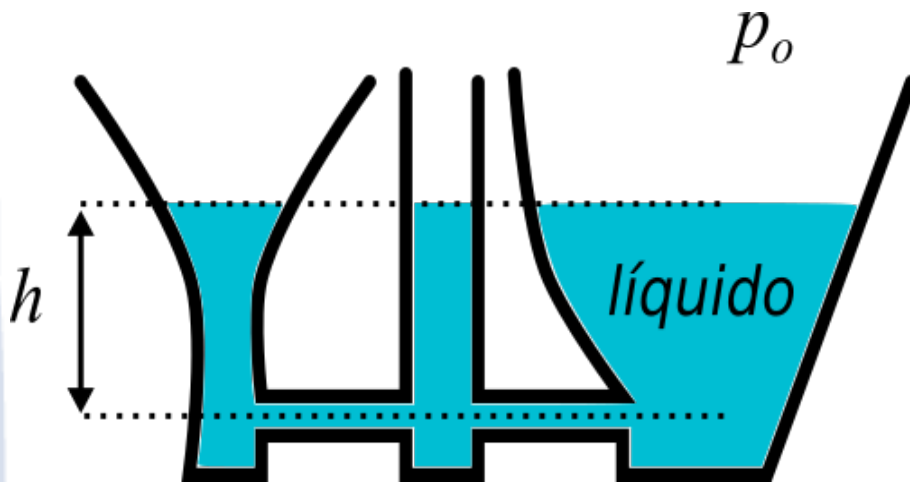
Como se comparam entre si as profundidades de água nas três colunas (parcialmente cheias)?

- (A) $d_A > d_B > d_C$
- (B) $d_A < d_B < d_C$
- (C) $d_A > d_B = d_C$
- (D) $d_A = d_B = d_C$



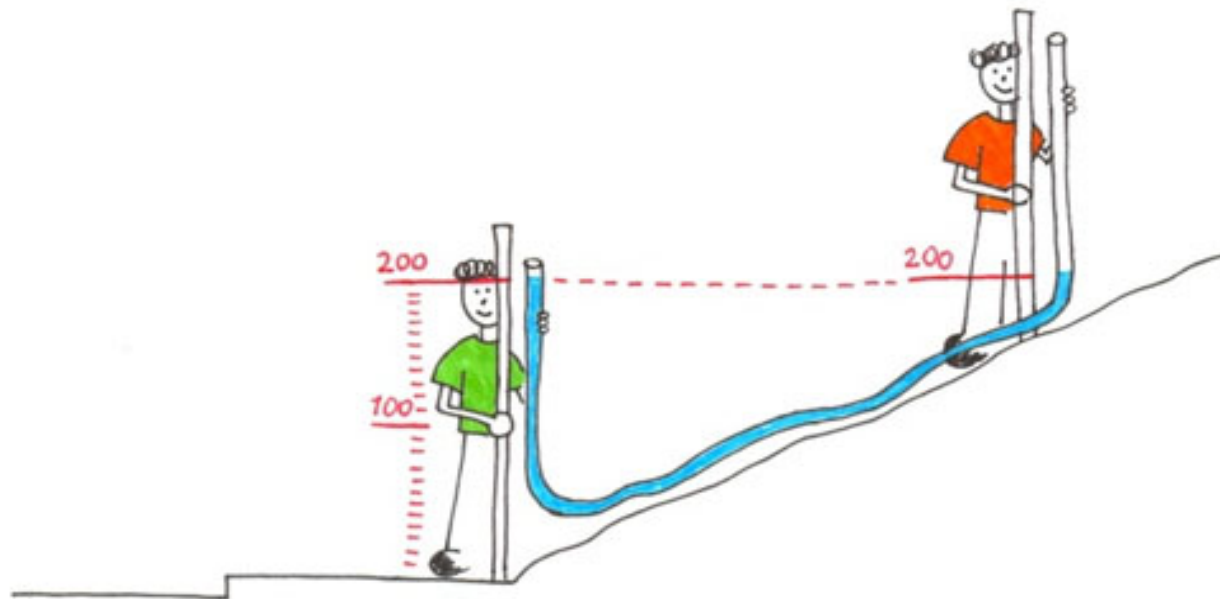
Vasos Comunicantes

Um líquido em equilíbrio hidrostático, contido num recipiente conectado, sobe até a mesma altura em todas as regiões!



Vasos Comunicantes

Um líquido em equilíbrio hidrostático, contido num recipiente conectado, sobe até a mesma altura em todas as regiões!

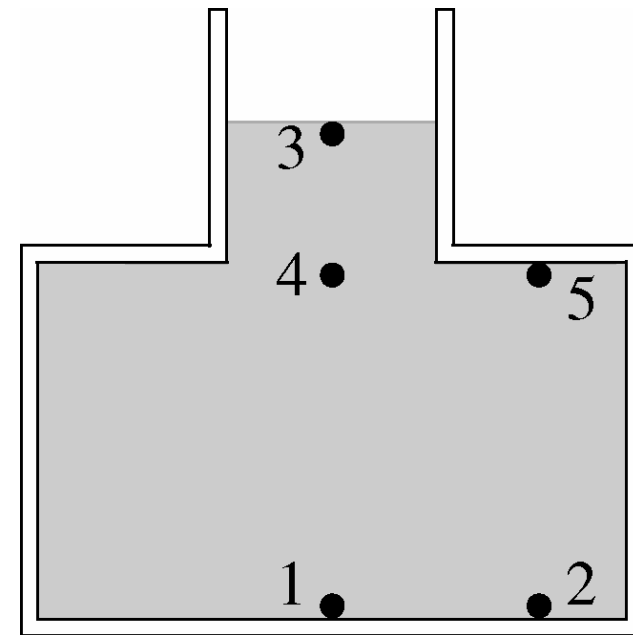


A mangueira de nível, utilizada na construção civil, é uma aplicação prática deste fenômeno!

Teste Conceitual 1.6

Supondo que o fluido na figura está todo em equilíbrio estático, a pressão no ponto 5 é

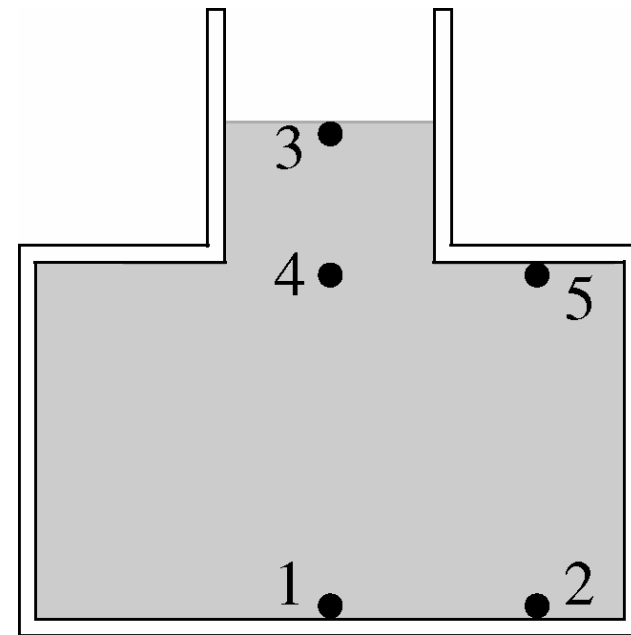
- A) Maior que a do ponto 4
- B) Igual à do ponto 4
- C) Menor que a do ponto 4
- D) Não dá para determinar



Teste Conceitual 1.6

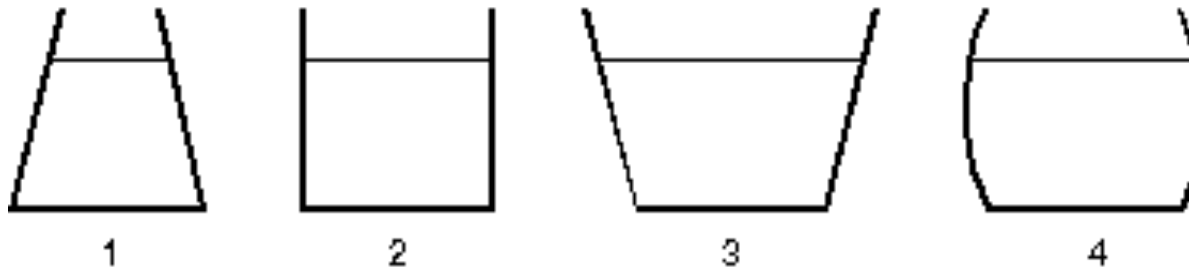
Supondo que o fluido na figura está todo em equilíbrio estático, a pressão no ponto 5 é

- A) Maior que a do ponto 4
- B) Igual à do ponto 4**
- C) Menor que a do ponto 4
- D) Não dá para determinar



Se abrirmos um furo no ponto 5, sairá um esguicho!

Teste Conceitual 1.7

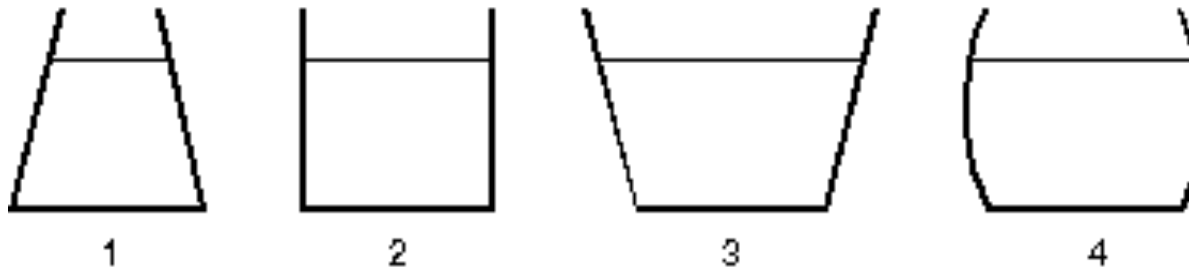


As vasilhas de água mostradas acima têm formatos e volumes diferentes, mas a mesma área de fundo, e estão preenchidas até a mesma altura.

Considere a força total exercida pela água no fundo de cada vasilha. Podemos dizer que

- A) $F_1 < F_2 < F_4 < F_3$
- B) $F_3 < F_4 < F_2 < F_1$
- C) $F_1 < F_2 = F_4 < F_3$
- D) $F_1 = F_2 = F_3 = F_4$

Teste Conceitual 1.7



As vasilhas de água mostradas acima têm formatos e volumes diferentes, mas a mesma área de fundo, e estão preenchidas até a mesma altura.

Considere a força total exercida pela água no fundo de cada vasilha. Podemos dizer que

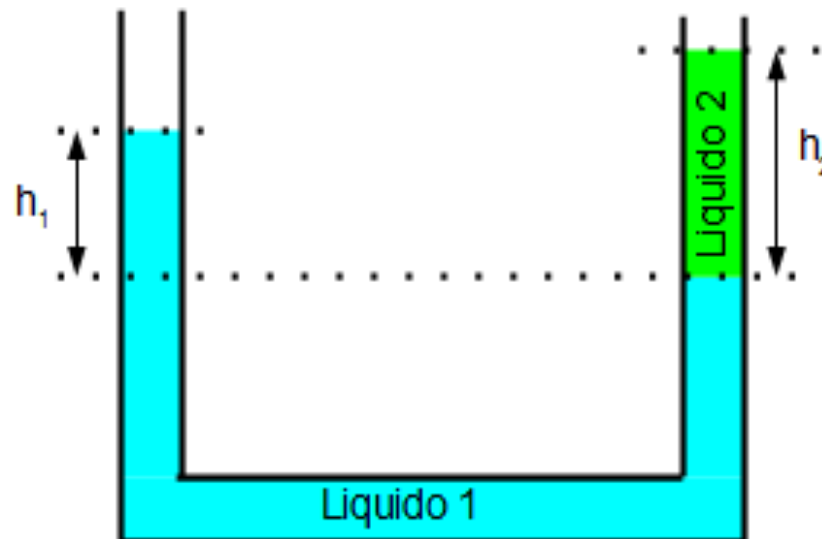
- A) $F_1 < F_2 < F_4 < F_3$
- B) $F_3 < F_4 < F_2 < F_1$
- C) $F_1 < F_2 = F_4 < F_3$
- D) $F_1 = F_2 = F_3 = F_4$**

Princípio de Pascal

Pela Lei de Stevin, a diferença de pressão entre dois pontos de um líquido em equilíbrio depende apenas do desnível entre esses pontos.

Logo, **se produzirmos uma variação de pressão num ponto do líquido, essa variação se transmite igualmente a todos os pontos do líquido.**

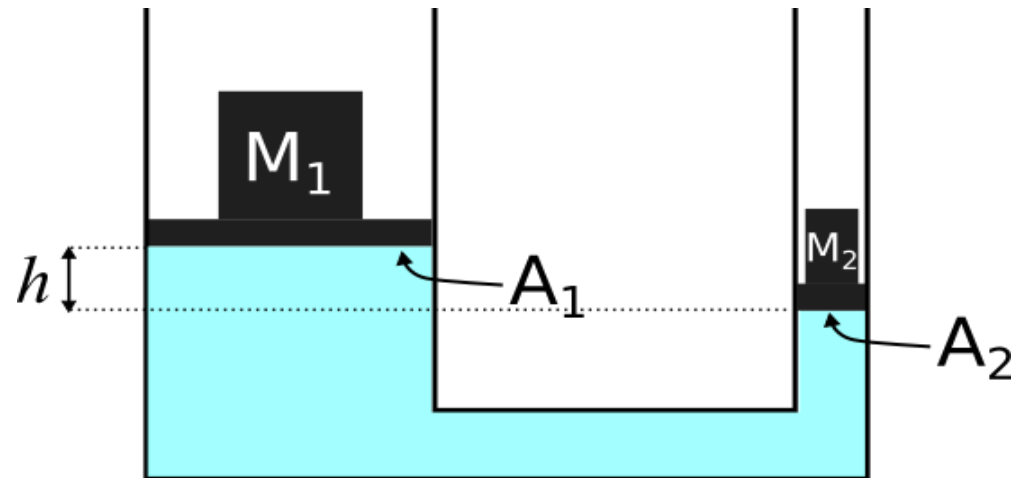
Exemplo: Tubo em U com dois líquidos distintos.



$$\rho_1 h_1 = \rho_2 h_2$$

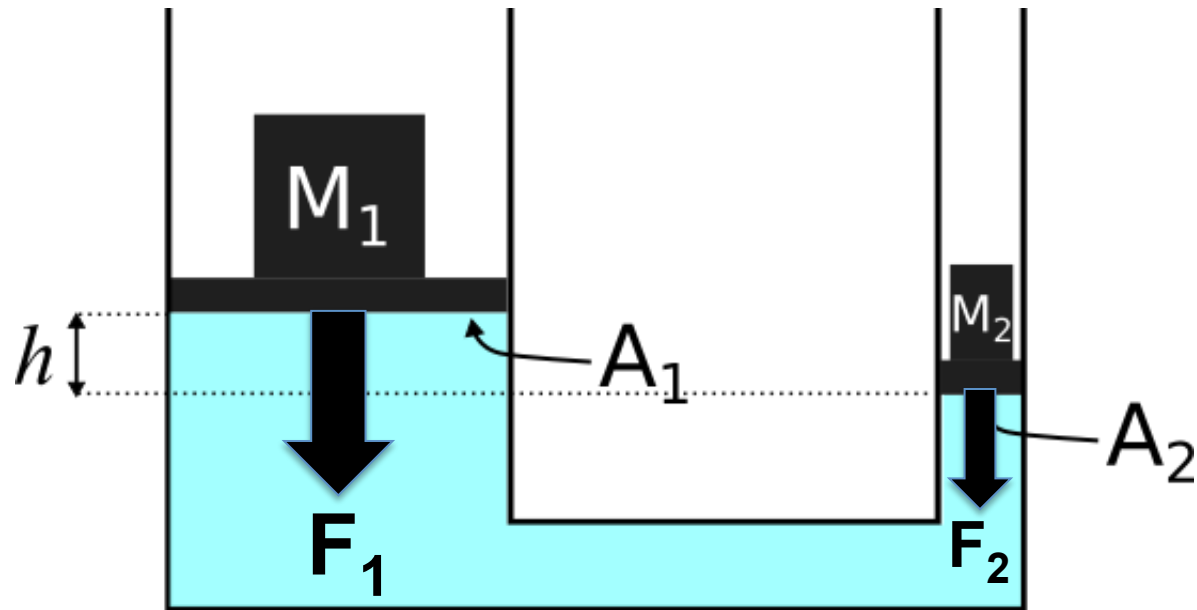
Teste Conceitual: Elevador Hidráulico

Na situação mostrada
(onde $A_1 > A_2$ e $h \neq 0$):

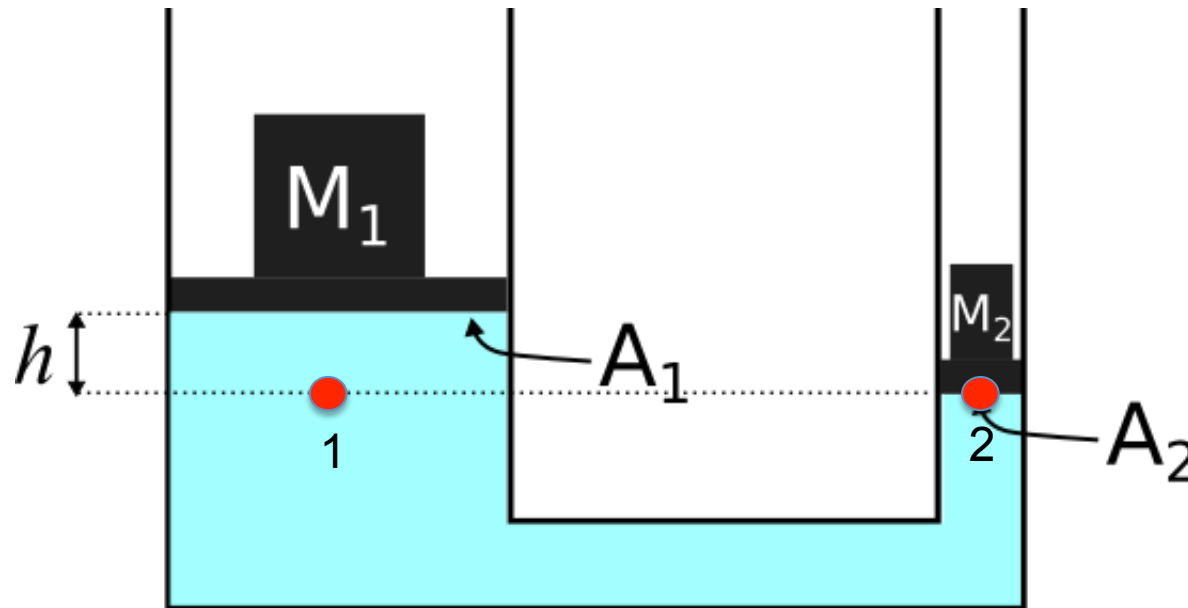


- A) Se $M_1 > M_2$, é impossível que os blocos estejam em equilíbrio
- B) Para os blocos estarem em equilíbrio, a pressão sobre a plataforma 1 deve ser menor que a pressão sobre a plataforma 2
- C) Para os blocos estarem em equilíbrio, a força sobre a plataforma 1 deve ser igual à força sobre a plataforma 2
- D) Para os blocos estarem em equilíbrio, a pressão sobre a plataforma 1 deve ser igual à pressão sobre a plataforma 2

Aplicação: Elevador Hidráulico

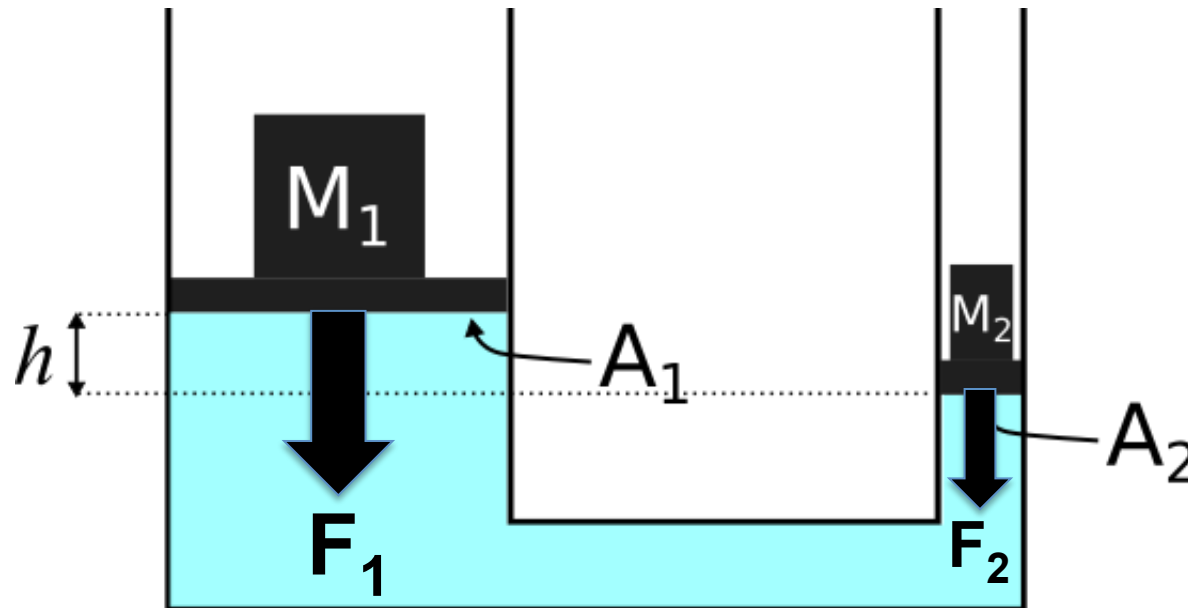


Aplicação: Elevador Hidráulico



$$p_1 = p_2 \Rightarrow p_0 + \frac{F_1}{A_1} + \rho g h = p_0 + \frac{F_2}{A_2}$$

Aplicação: Elevador Hidráulico



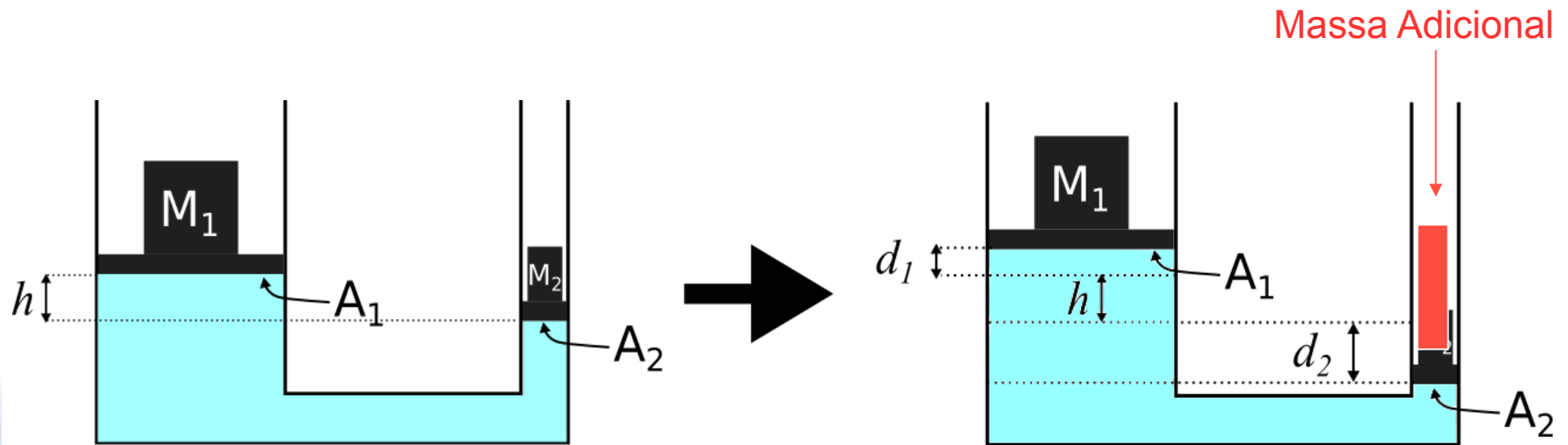
$$\frac{F_2}{A_2} = \frac{F_1}{A_1} + \rho g h$$

→ Uma peq. força numa peq. área equilibra uma gde força numa gde área!

(Usado p. ex. em elevadores de oficinas mecânicas)

Aplicação: Elevador Hidráulico

P: De quanto subirá o pistão 1 se deslocamos o pistão 2 para baixo de uma distância d_2 , colocando, por exemplo, uma massa adicional?

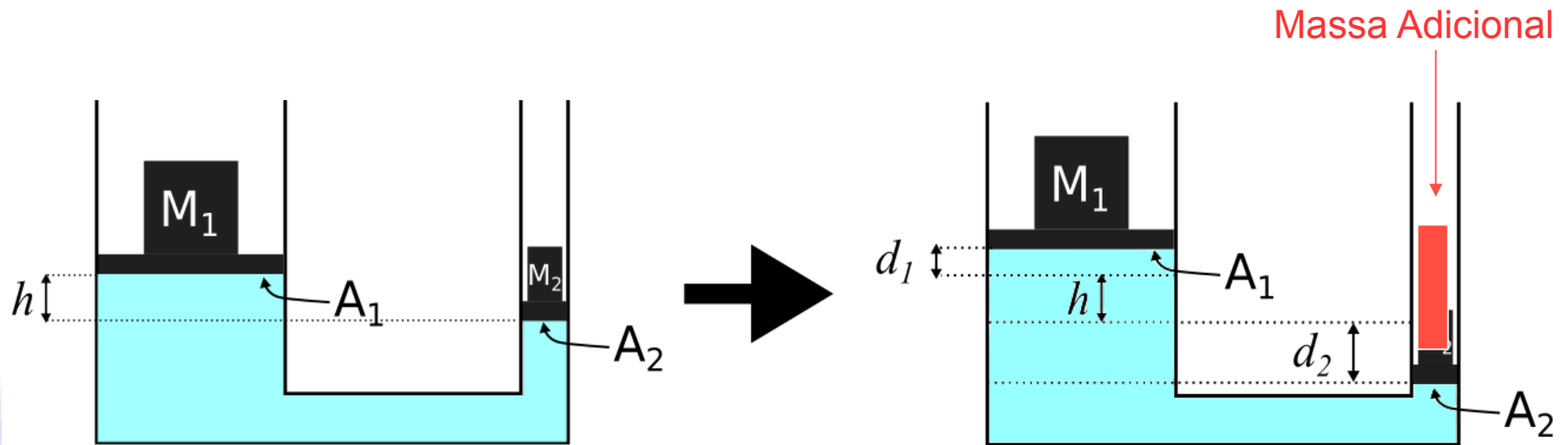


Como o líquido é incompressível:

$$d_1 = d_2 \frac{A_2}{A_1}$$

Aplicação: Elevador Hidráulico

P: Qual deve ser a força adicional para levantar o pistão 1 de uma distância d_1 ?

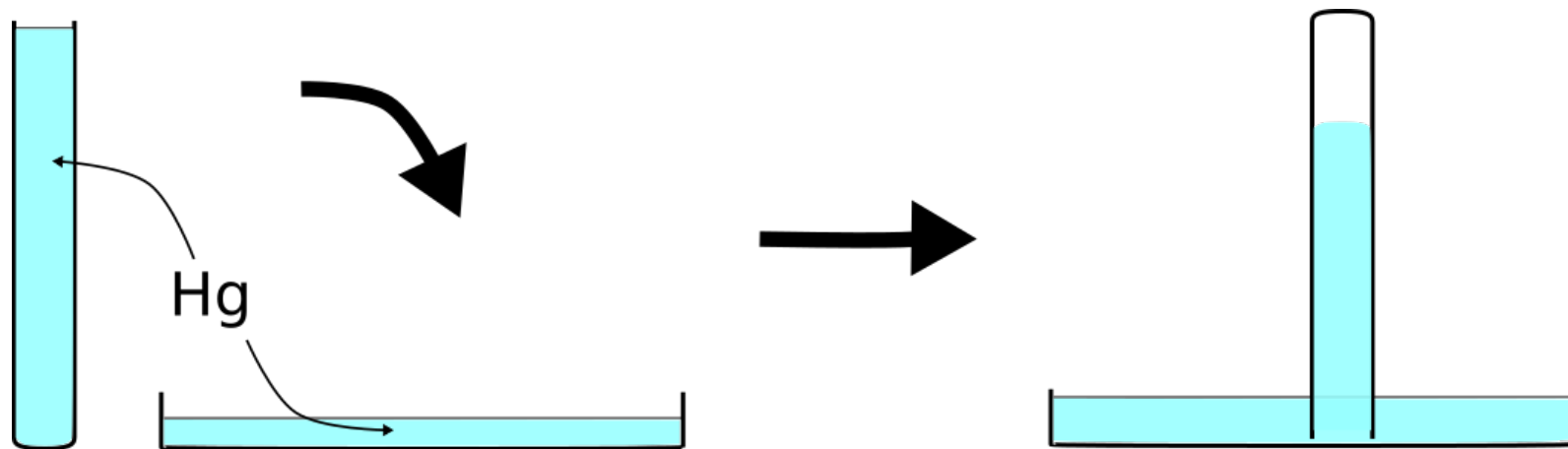


$$F'_2 - F_2 = \rho g d_1 (A_1 + A_2)$$

→ Olhar o problema resolvido 15.7 !

Medidores de Pressão: Barômetro de mercúrio (Hg)

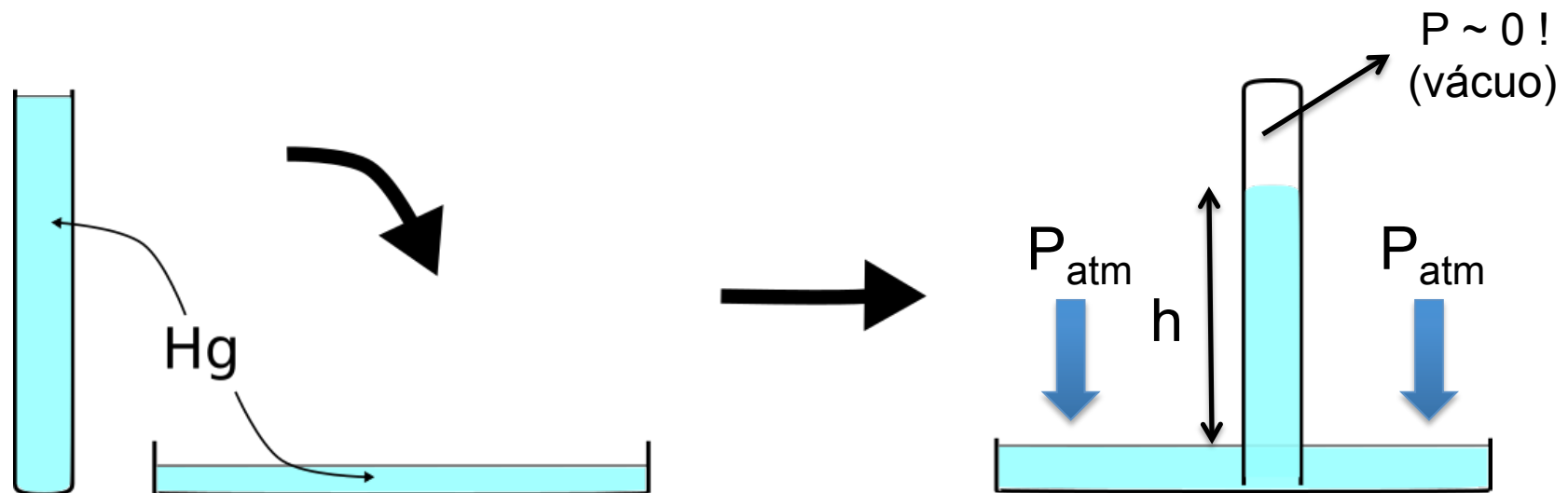
Hg é um metal líquido à temp. ambiente, com $\rho_{\text{Hg}} = 13600 \text{ kg / m}^3$



Por que o líquido não escorre totalmente?

Medidores de Pressão: Barômetro de mercúrio (Hg)

Hg é um metal líquido à temp. ambiente, com $\rho_{\text{Hg}} = 13600 \text{ kg / m}^3$



$$P_{\text{atm}} = \rho_{\text{Hg}} g h$$

Na altura do mar e a 0°C , $h = 0,760 \text{ m} \rightarrow P_{\text{atm}} = 101,3\text{kPa}$

Parando para pensar:

100kPa corresponde à pressão de um peso de
~10 toneladas (ou 2 elefantes) sobre cada m^2 !!

**Por que não somos esmagados por essa
enorme pressão?**



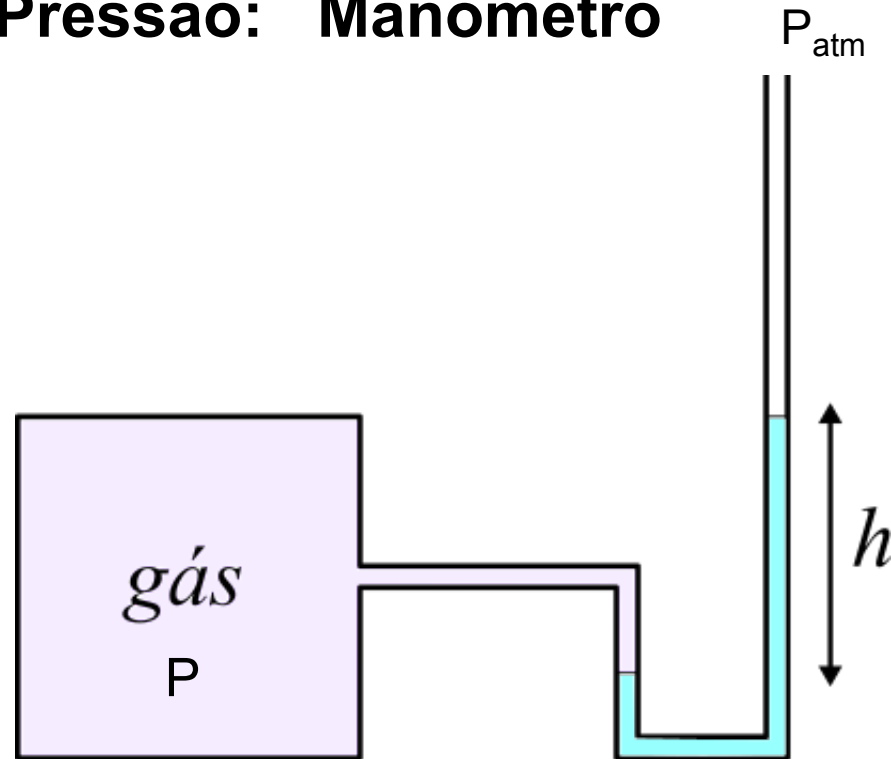
Outras unidades de pressão

Por tradição, em muitas situações práticas usa-se unidades de pressão diferentes do Pascal

TABELA 15.2 Unidades de pressão

Unidade	Abreviação	Valor correspondente a 1 atm	Usos
pascal	Pa	101,3 kPa	unidade do SI: 1 Pa = 1 N/m ²
atmosfera	atm	1 atm	geral
milímetros de mercúrio	mm de Hg	760 mm de Hg	pressão barométrica e gases
polegadas de mercúrio	pol	29,92 polegadas	pressão barométrica nas previsões de tempo nos EUA
libras por polegada quadrada	psi	14,7 psi	engenharia e indústria
100kPa	bar	1,013 bar	geral – útil pois é quase igual a 1atm mas é um ‘numero redondo’ no SI

Medidores de Pressão: Manômetro



A altura h fornece a pressão manométrica do gás.

$$P_m = \text{pressão manométrica} = P - P_{atm} = \rho gh$$

Ex: medidores de pressão de pneu em postos de gasolina

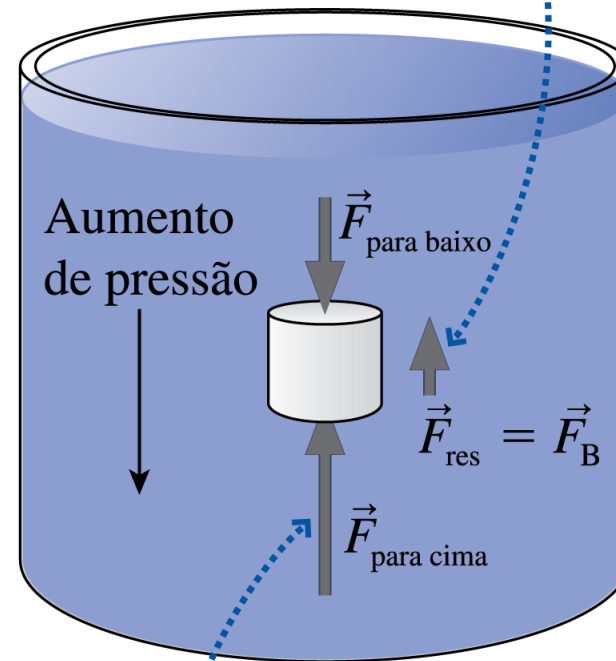
Obs: A **pressão manométrica** pode ser nula ou mesmo negativa!

Empuxo

Considere um objeto cilíndrico de um material qualquer, submerso em um fluido.

Como a pressão aumenta com a profundidade, a força sobre o objeto devido ao contato com o fluido é diferente de zero e aponta **para cima**.

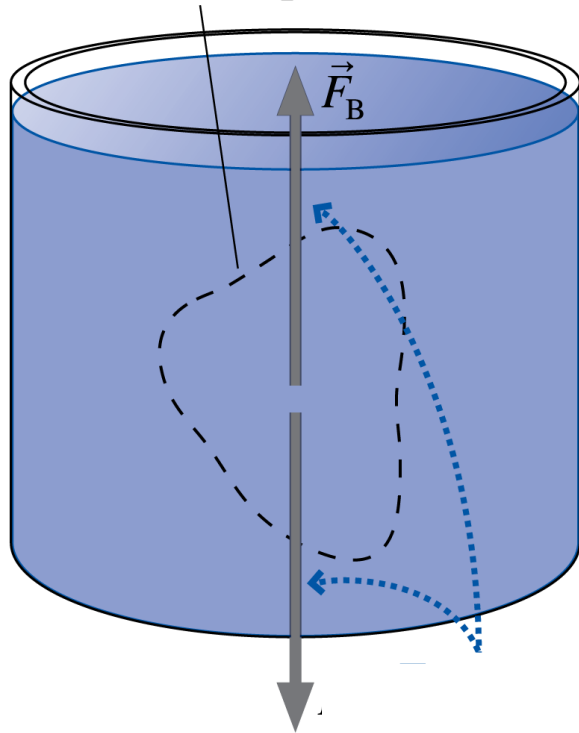
A força resultante do fluido sobre o cilindro é a força de empuxo \vec{F}_B .



$F_{\text{para cima}} > F_{\text{para baixo}}$ porque a pressão é maior no fundo. Logo, o fluido exerce uma força resultante orientada para cima.

A mesma conclusão se aplica para objetos de **qualquer** formato, total ou parcialmente submersos no fluido

(a) Limite imaginário em torno de uma parcela de fluido

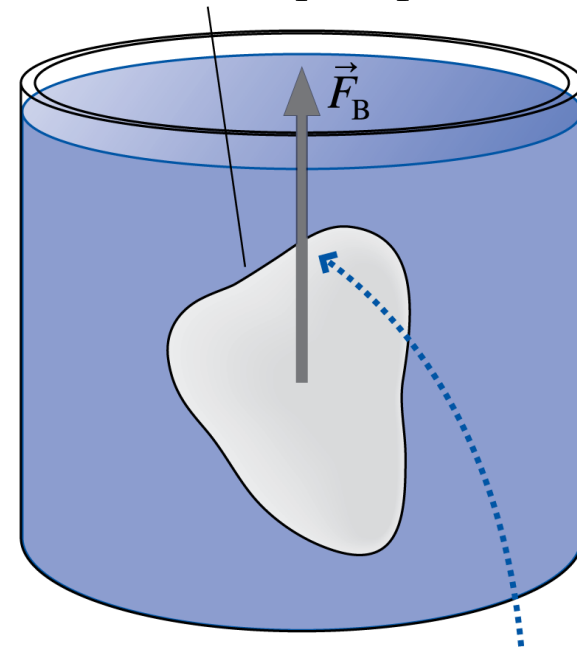


F_B = força de empuxo *sobre* o volume tracejado devido ao resto do fluido

F_G = peso do volume tracejado de fluido

Num fluido em equilíbrio: $F_B + F_G = 0$

(b) Objeto real de mesmo tamanho e formato que a parcela do fluido



O objeto sofre a MESMA força de empuxo vertical que seria sentida sobre o volume de fluido que ele deslocou, pois o restante do fluido não foi alterado

A noção da força de empuxo dá origem a um princípio muito importante e básico para a descrição de sistemas flutuantes e/ou submersos como os barcos e submarinos

Princípio de Arquimedes:

“Um corpo total ou parcialmente imerso num fluido recebe um empuxo igual e contrário ao peso da porção de fluido deslocado e aplicado no centro de gravidade do referido fluido deslocado.”

Arquimedes de Siracusa, no seu livro “Sobre corpos flutuantes” (séc III A.C.)



A noção da força de empuxo dá origem a um princípio muito importante e básico para a descrição de sistemas flutuantes e/ou submersos como os barcos e submarinos

Princípio de Arquimedes:

“Um corpo total ou parcialmente imerso num fluido recebe um empuxo igual e contrário ao peso da porção de fluido deslocado e aplicado no centro de gravidade do referido fluido deslocado.”

Arquimedes de Siracusa, no seu livro “Sobre corpos flutuantes” (séc III A.C.)



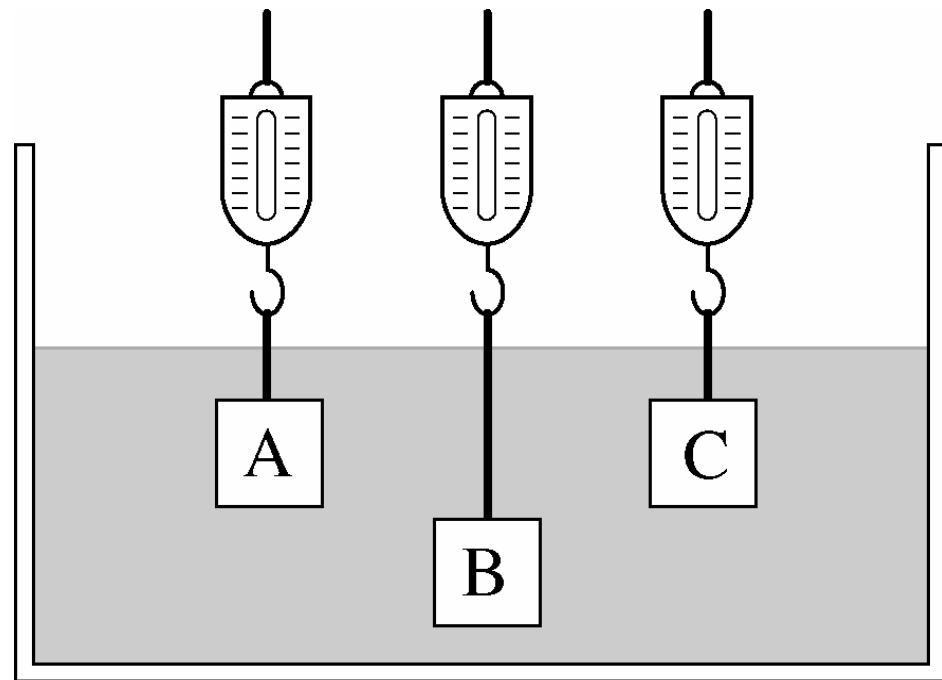
único exemplar existente do texto grego original, copiado por volta do ano 1000 DC e só encontrado em 1906 “escondido” atrás de outro texto do século XIII. Vejam <http://archimedespalimpsest.org>

Teste Conceitual 2.2

Três blocos de mesmo tamanho e com as massas indicadas estão suspensos de balanças enquanto são mergulhados num fluido, conforme a figura.

P: como se ordenam os 'pesos aparentes' dos blocos, indicados pelas balanças?

(Obs: Assuma que os fios são inextensíveis e de massa desprezível)

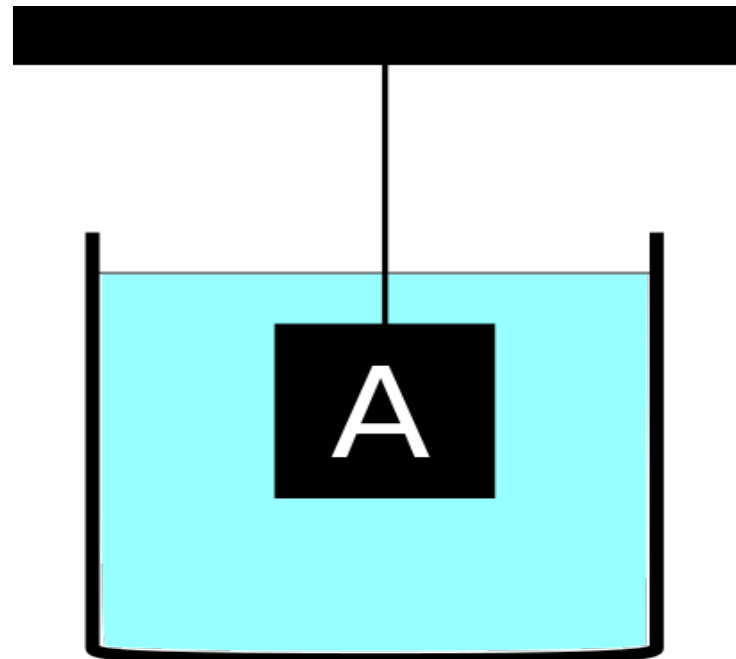


$$m_A = m_B$$

$$m_C > m_A$$

- A) $P_A^{\text{apar}} = P_C^{\text{apar}} < P_B^{\text{apar}}$
- B) $P_A^{\text{apar}} = P_B^{\text{apar}} < P_C^{\text{apar}}$
- C) $P_A^{\text{apar}} < P_B^{\text{apar}} < P_C^{\text{apar}}$
- D) $P_A^{\text{apar}} = P_B^{\text{apar}} = P_C^{\text{apar}}$

Problema: Qual a Tensão no barbante da figura abaixo?

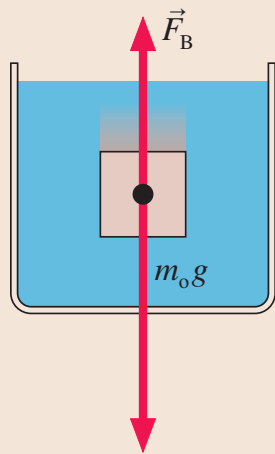


Fluido: Álcool Etílico – bloco: Alumínio sólido com volume 100cm^3 .

$$\rho_{\text{álcool}} = 790 \text{ kg/m}^3 ; \rho_{\text{Al}} = 2700 \text{ kg/m}^3$$

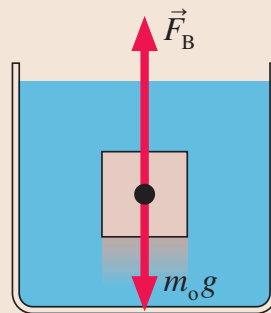
Empuxo e Flutuação

$$\rho_o > \rho_f$$



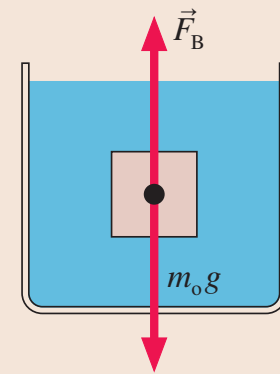
Objeto afunda

$$\rho_o < \rho_f$$



Objeto sobe até a superfície,
onde flutua parcialmente submerso

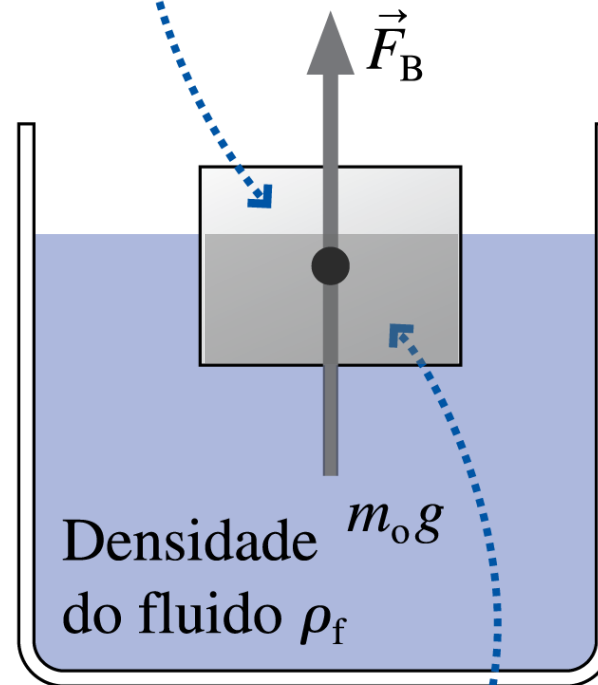
$$\rho_o = \rho_f$$



Objeto em equilíbrio
hidrostático

Empuxo e Flutuação

Um objeto de densidade ρ_o e volume V_o está flutuando num fluido de densidade ρ_f .

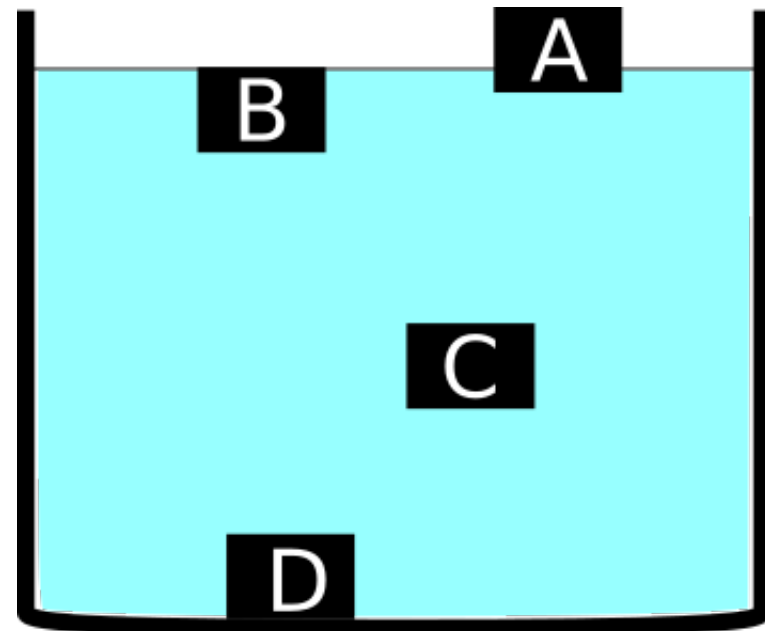


O volume submerso do objeto é igual ao volume V_f do fluido deslocado.

Teste Conceitual 2.3

Os blocos A, B, C e D têm o mesmo volume, e se equilibram nas posições indicadas. Determine a sequência correta referente aos Empuxos sobre cada um deles.

- (A) $E_A < E_B = E_C = E_D$
- (B) $E_A < E_B < E_C < E_D$
- (C) $E_A < E_B = E_C < E_D$
- (D) $E_D < E_C < E_B < E_A$



Teste Conceitual 2.4

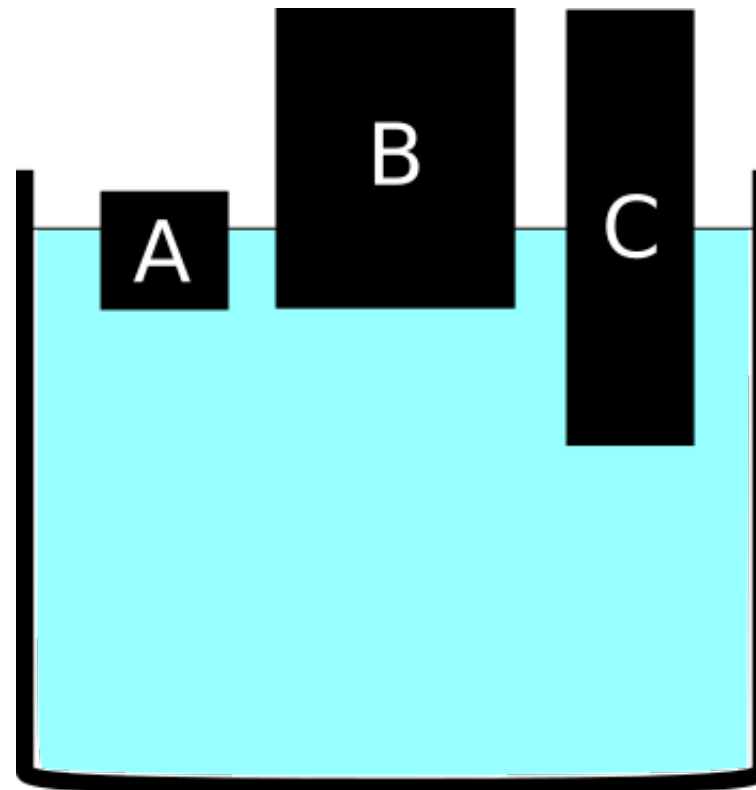
Ordene as densidades dos três blocos.

(A) $\rho_A < \rho_C < \rho_B$

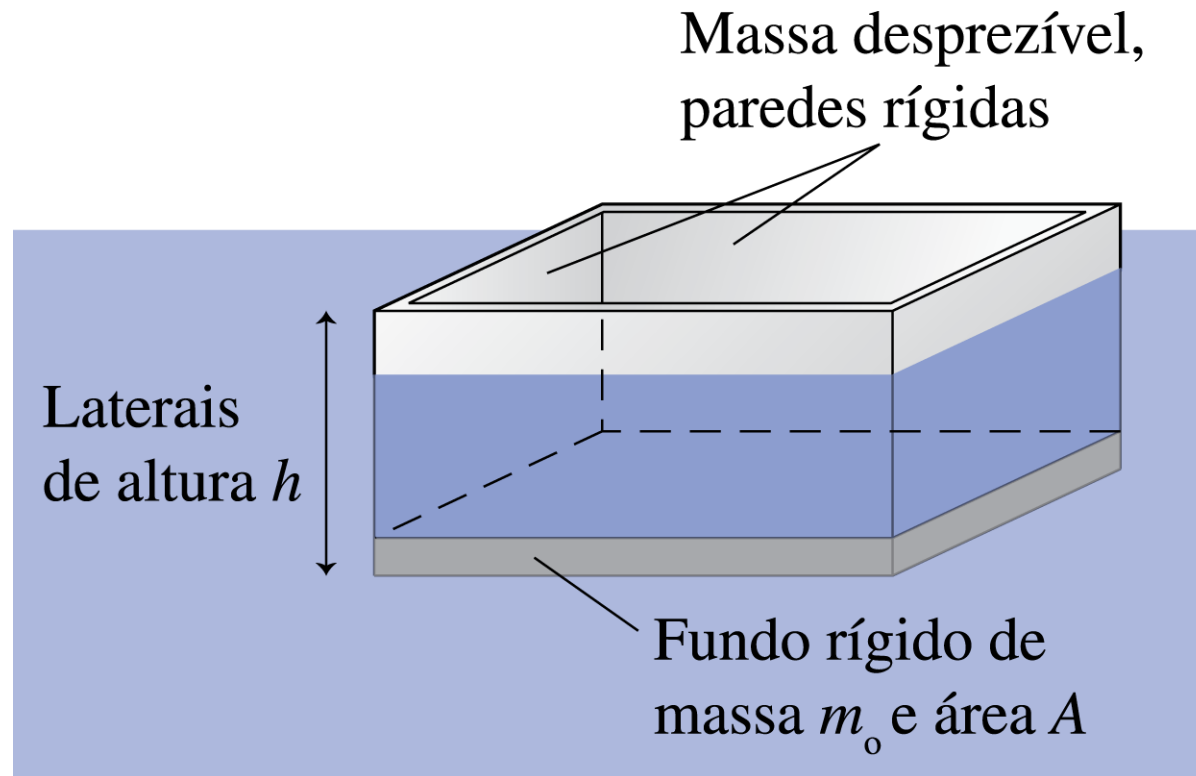
(B) $\rho_A = \rho_B < \rho_C$

(C) $\rho_B = \rho_C < \rho_A$

(D) $\rho_B < \rho_C < \rho_A$



Flutuação: “modelo” para um barco



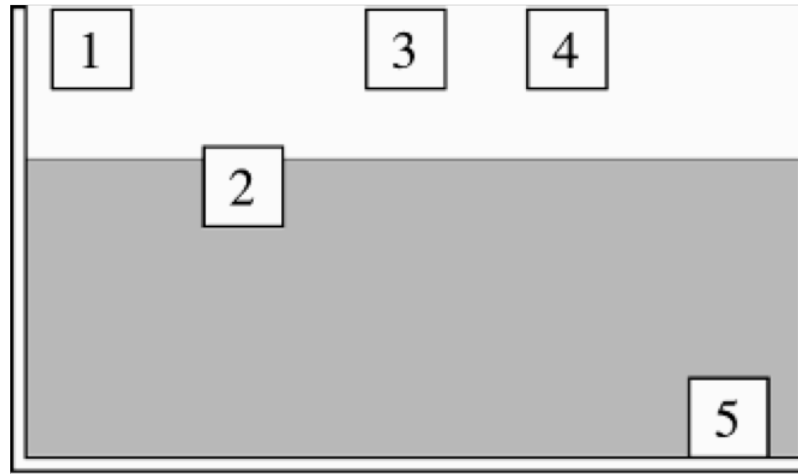
Teste Conceitual 2.5

Um navio pode flutuar tanto na água doce quanto na água salgada, a qual é mais densa que a água doce. Comparando os volumes de água deslocados pelo seu casco em cada caso, podemos dizer que o volume de água salgada deslocada é

- (A) maior que o de água doce.
- (B) menor que o de água doce.
- (C) igual ao de água doce.
- (D) a resposta depende do valor da pressão atmosférica.

Teste Online: Algumas respostas...

Blocos Mergulhados



Estudante 1- “O objeto 1 boiará, enquanto o 3 e 4 estarão em equilíbrio em profundidades entre os objetos 2 e 5, estando o 4 mais profundo que o 3. ”

Estudante 2- “o objeto 1 boiará um pouco mais acima que o objeto 2 e os outros, objetos 3 e 4, afundarão como o objeto 5. Tem a possibilidade de um deles permanecer no meio mas para que isso ocorra objeto terá que ter densidade igual ao do fluido.”

Teste Online: Algumas respostas...

Gelo derretendo no copo: nível sobe, desce ou fica igual?

Estudante 1- “Sobe, fazendo com que a água transborde. Pois ele está flutuando, portanto existe volume não submerso que não estará deslocando a água. Se o gelo estivesse em equilíbrio hidroestático o volume do copo seria o mesmo.”

Estudante 2- “Baixa. Como o gelo tem uma densidade menor do que a da água, ao derreter e se transformar no líquido mais denso, a mesma massa irá ocupar um espaço menor do que ocupava antes.”

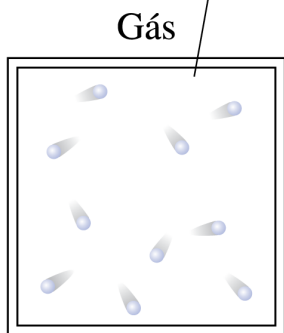
Estudante 3- “Fica igual, porque o peso do cubo de gelo é igual ao peso da água deslocada. Enquanto o gelo derrete e vira água, ela ocupa o volume que o cubo estava ocupando.”

Estudante 4- “O material me fez refletir sobre assuntos que antes não havia pensado. Porque o nível do mar vai subir pelo derretimento dos mantos de gelo emersos no mar, devido ao aquecimento global?”.

Pressão em gases

Atenção: a Lei de Stevin **não** se aplica no caso de fluidos compressíveis (ex: gases)

Densidade e pressão
ligeiramente menores
no topo



$$p(h) = p_0 + \rho gh$$

Paredes de
um recipiente
imaginário

Ar

Espaço

Terra

1. A densidade e a pressão do ar são maiores na superfície terrestre.
2. Devido a gravidade, a densidade e a pressão diminuem com o aumento da altitude.
3. A densidade e a pressão se aproximam de zero no espaço sideral.

Nesse caso, pode-se mostrar que, num gás a temperatura constante, vale a relação

$$P(z) \sim P_{\text{embaixo}} \exp(-z / c)$$

onde c é uma constante que vale $\sim 8,6$ km na superfície da Terra

Assim, para recipientes com dimensões $\ll 8,6$ km, $P(z) \sim$ constante

Teste Conceitual

Vimos antes que o empuxo sofrido por um corpo dentro de um líquido se deve à diferença entre as pressões sobre a sua parte de cima e sua parte de baixo, descrita pela Lei de Stevin ($P = P_0 + \rho_L gh$).

Vemos agora porém que, no caso de um corpo pequeno mergulhado em um gás, a Lei de Stevin não se aplica, pois a pressão externa é praticamente uniforme sobre ele.

P: Por que, então, um balão de festa, cheio com gás Hélio, sobe rapidamente quando é solto?



Teste Conceitual

Por que um balão de festa, cheio com gás Hélio, sobe rapidamente quando é solto?

- A) Pois a pressão no seu interior é maior que a externa, e portanto ele subirá até uma altitude onde elas equalizarão.
- B) Pois ainda existe uma minúscula diferença entre a pressão atmosférica sobre o lado de baixo do balão e aquela sobre o lado de cima, e isso é suficiente para gerar empuxo.
- C) Pois como o Hélio é menos denso que o ar, a pressão no interior do balão é menor que a externa, de modo que a diferença dessas pressões (fora e dentro) gera um empuxo.
- D) O professor estava brincando – é claro que a lei de Stevin também se aplica para gases!

Dados possivelmente úteis (ou não):

- nas CNTP, a densidade do Hélio é de 0.18 kg/m^3 , cerca de $1/7$ a do ar
- um balão de borracha vazio tem cerca de 10g de massa
- dimensões típicas de um balão cheio: $\sim 15\text{cm}$ de raio $\sim 35\text{cm}$ de altura



Teste Conceitual

Por que um balão de festa, cheio com gás Hélio, sobe rapidamente quando é solto?

- A) Pois a pressão no seu interior é maior que a externa, e portanto ele subirá até uma altitude onde elas equalizarão.
- B) Pois ainda existe uma minúscula diferença entre a pressão atmosférica sobre o lado de baixo do balão e aquela sobre o lado de cima, e isso é suficiente para gerar empuxo.

Continua sendo verdade que $\text{Empuxo} = \rho_{\text{ar}} Vg!$

(pois continua verdade que a resultante das forças de pressão sobre o ar deslocado equilibraria seu próprio peso.)

Como o Hélio é muito menos denso que o ar, o peso total (borracha +hélio) do balão não supera o do ar deslocado, portanto a força resulta para cima

Dados possivelmente úteis (ou não):

- nas CNTP, a densidade do Hélio é de 0.18 kg/m^3 , cerca de $1/7$ a do ar
- um balão de borracha vazio tem cerca de 10g de massa
- dimensões típicas de um balão cheio: $\sim 15\text{cm}$ de raio $\sim 35\text{cm}$ de altura

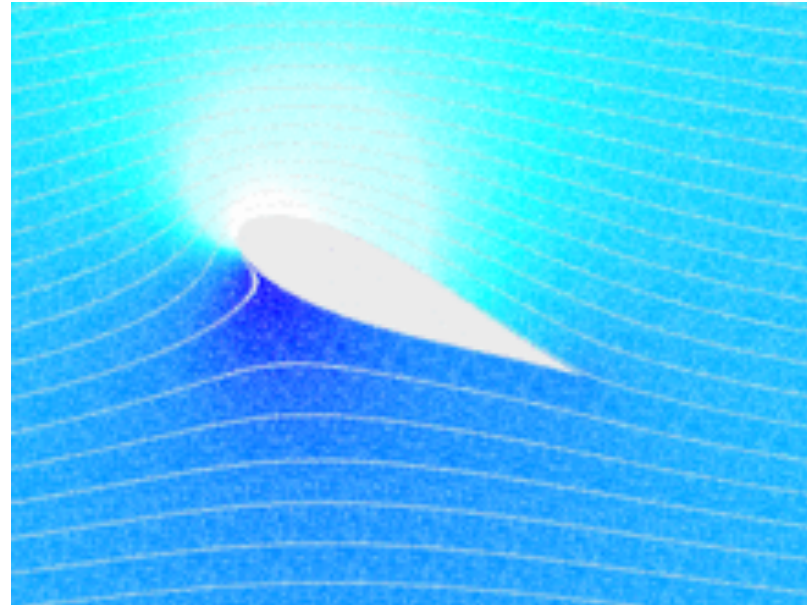


A uma certa profundidade no oceano, a pressão absoluta vale P . Se você afunda, de forma que sua profundidade dobra, a pressão absoluta observada valerá $2P$." Essa afirmativa é correta? Justifique sua resposta

Estudante 1- "Sim. A pressão na profundidade P de um líquido é dada pela seguinte equação: $p = p_0 + \rho g P$, onde ρ é a densidade do líquido. Uma vez que o fluido encontra-se em repouso (pressão hidrostática) a pressão será proporcional a profundidade."

Estudante 2- "Não. A altura influencia sim na pressão, mas não dobrando a pressão como um todo. $P = P_0 + \rho gh$, logo, a altura só dobra a segunda parte da equação, enquanto a pressão inicial permanece a mesma não importando a altura que a pessoa descer."

Hidrodinâmica : Fluidos em movimento



Hidrodinâmica : Fluidos em movimento

Porém, entender o movimento de fluidos reais no caso mais geral é um dos problemas mais difíceis da Física !

Vórtices

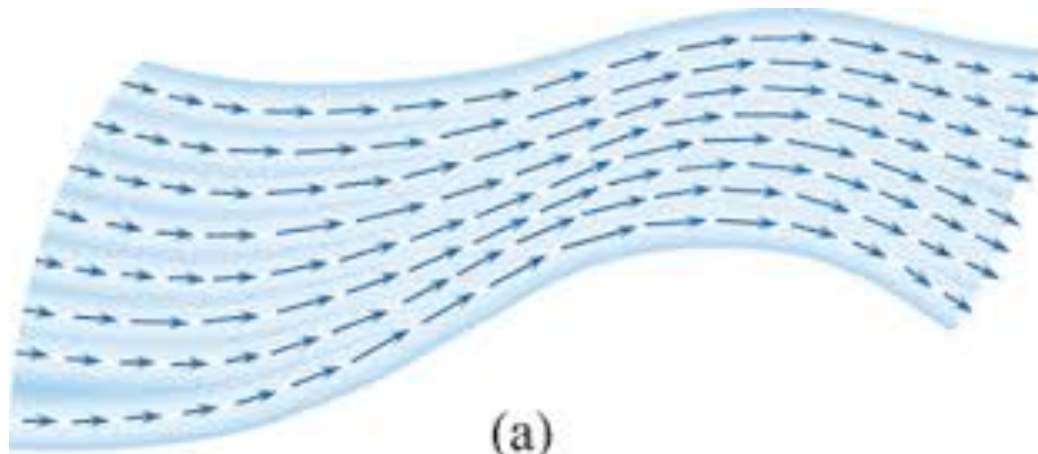


Turbulência

Hidrodinâmica : Fluidos em movimento

Aqui vamos nos restringir inicialmente a situações idealizadas, suficientes para uma 1ª aproximação. Vamos supor que o fluido:

- é **incompressível**
- Flui de forma **estacionária**: a velocidade das partículas passando por um dado ponto do fluido não muda no tempo.

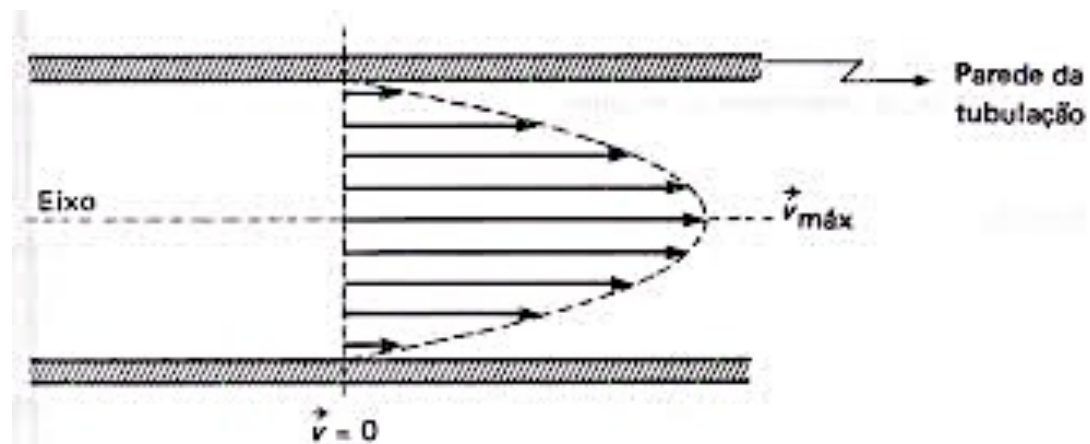


Hidrodinâmica : Fluidos em movimento

- **não possui viscosidade** ou seja, desprezaremos o atrito entre as partículas do fluido, bem como com as paredes ao longo dos quais ocorre um escoamento.

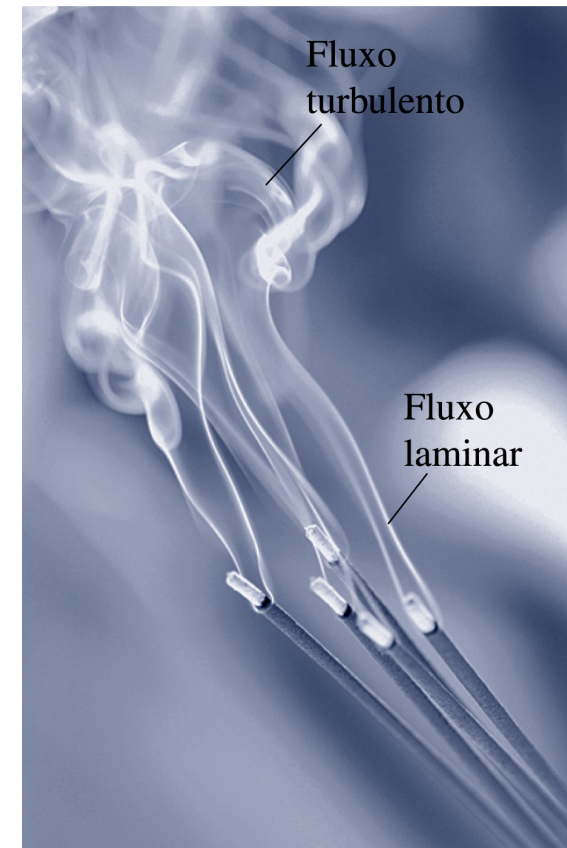
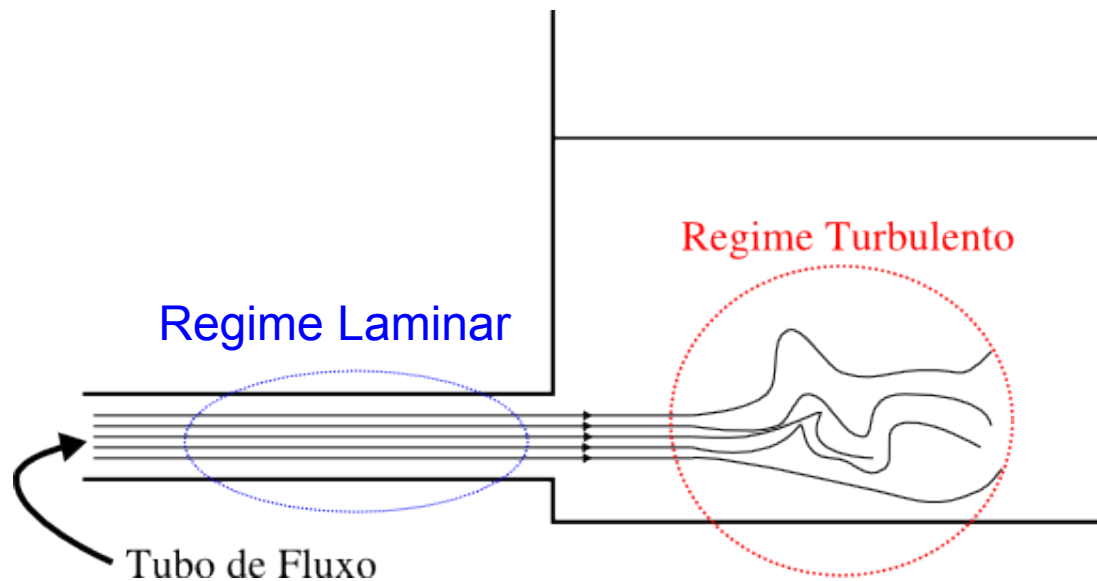
Obs: A viscosidade é essencial para compreender o comportamento de fluidos em muitas situações reais – desprezá-la é “como estudar as propriedades da água seca” (R. Feynman).

um fluido viscoso
“agarra nas paredes”



Fluxo laminar

Um fluxo estacionário é chamado de fluxo laminar, oposto de fluxo turbulento.



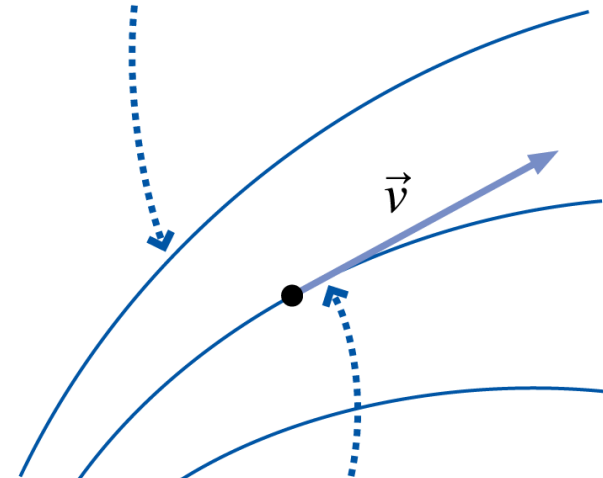
Linhas de Fluxo e tubos de fluxo

Linha de fluxo : trajetória seguida por uma partícula qualquer em um fluido em movimento estacionário.

Linha de fluxo



1. Linhas de fluxo nunca se cruzam.



2. A velocidade da partícula do fluido é tangente à linha de fluxo.

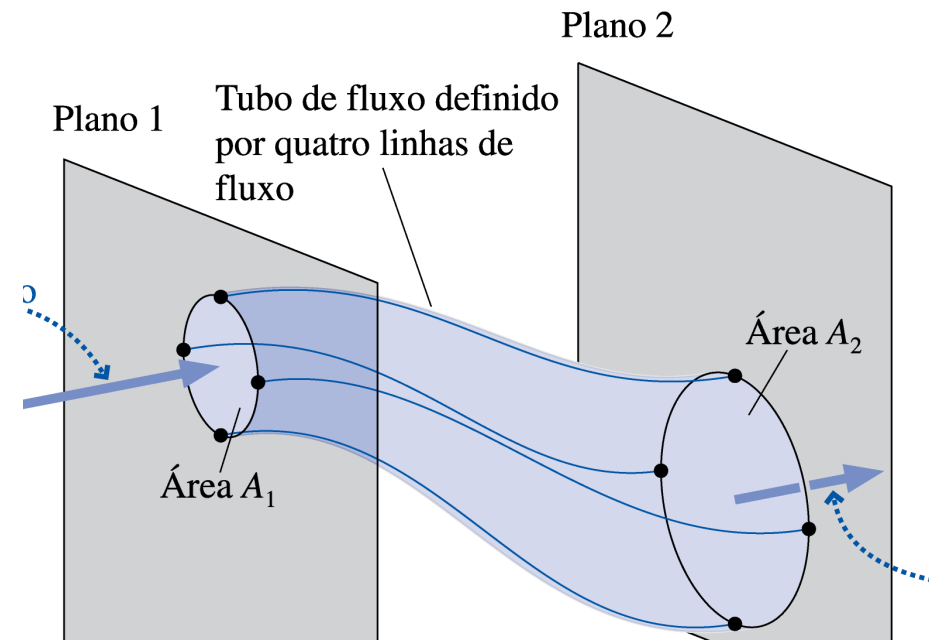
3. A velocidade é maior onde as linhas de fluxo estão mais próximas.

Linhas de Fluxo e tubos de fluxo

Linha de fluxo : trajetória seguida por uma partícula qualquer em um fluido em movimento estacionário.

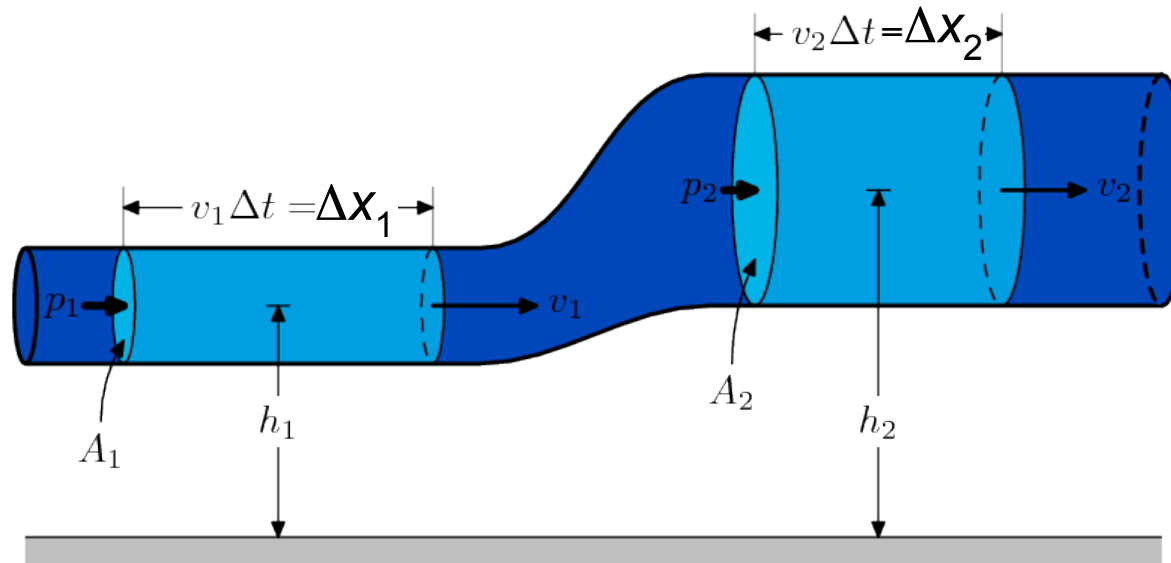


Tubo de fluxo: feixe de linhas de fluxo que atravessa uma determinada área do fluido



Equação da Continuidade

Considerando o movimento de um fluido em um tubo de fluxo

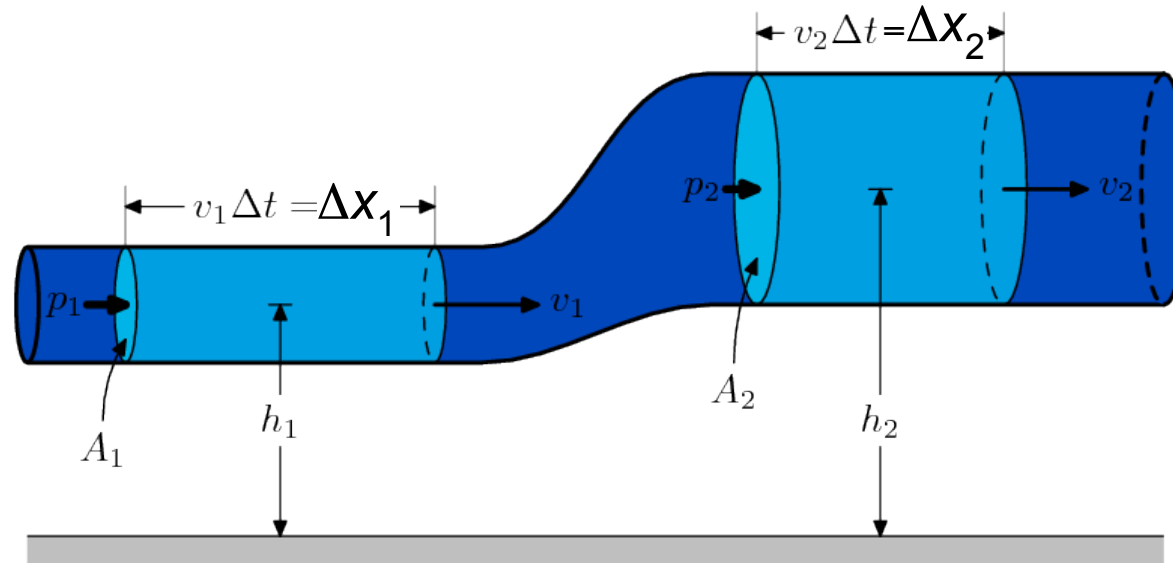


Em Δt um vol V_1 do líquido atravessa A_1 . Se a velocidade do fluido é v_1 ,

$$V_1 = A_1 v_1 \Delta t$$

Equação da Continuidade

Considerando o movimento de um fluido em um tubo de fluxo

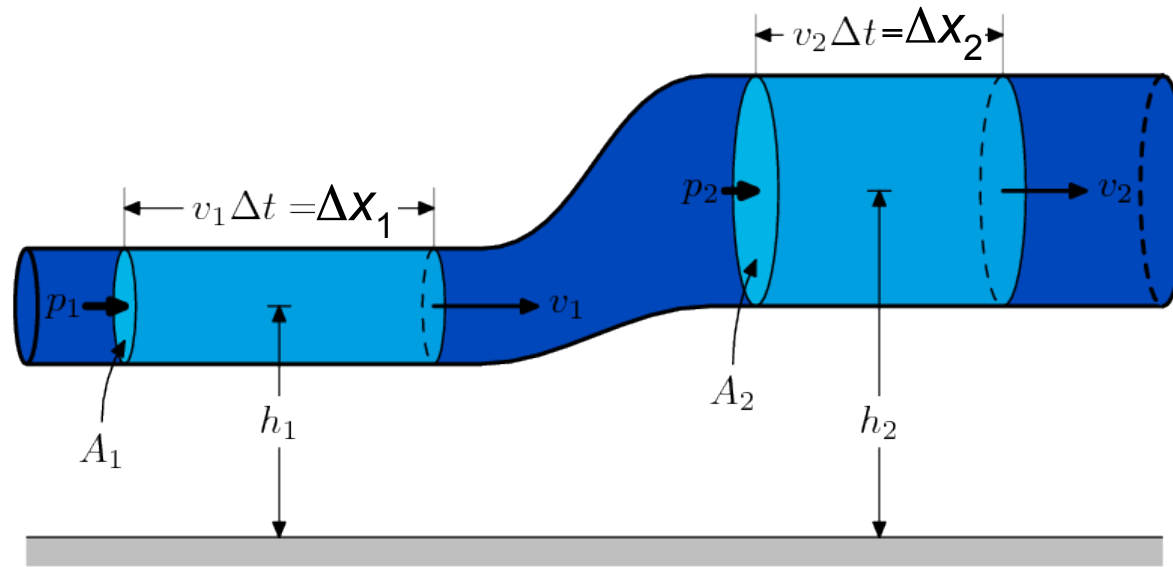


A mesma análise pode ser feita para A_2 , de forma que em Δt , um vol V_2 do líquido atravessa A_2 . Neste caso, a velocidade do fluido é v_2 ,

$$V_2 = A_2 v_2 \Delta t$$

Equação da Continuidade

Como o fluido não é criado e nem destruído entre A_1 e A_2 ,

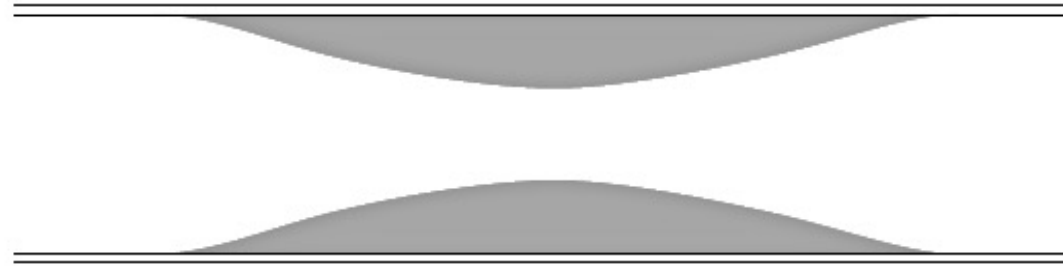


$$V_1 = V_2 \mapsto A_1 v_1 \Delta t = A_2 v_2 \Delta t$$

$$A_1 v_1 = A_2 v_2 = Q \text{ (vazão de volume)}$$

$[\text{m}^3/\text{s}]$

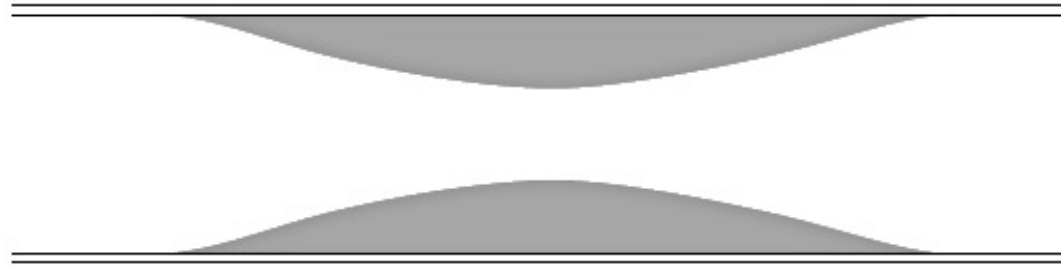
Teste Conceitual



Sangue corre por uma artéria coronária que está parcialmente bloqueada por depósitos nas paredes. **Em qual parte da artéria o fluxo (qtde de sangue fluindo por unidade de tempo) é maior?**

- A) Na parte mais estreita
- B) Na parte mais larga
- C) O fluxo é igual em ambas as partes

Teste Conceitual

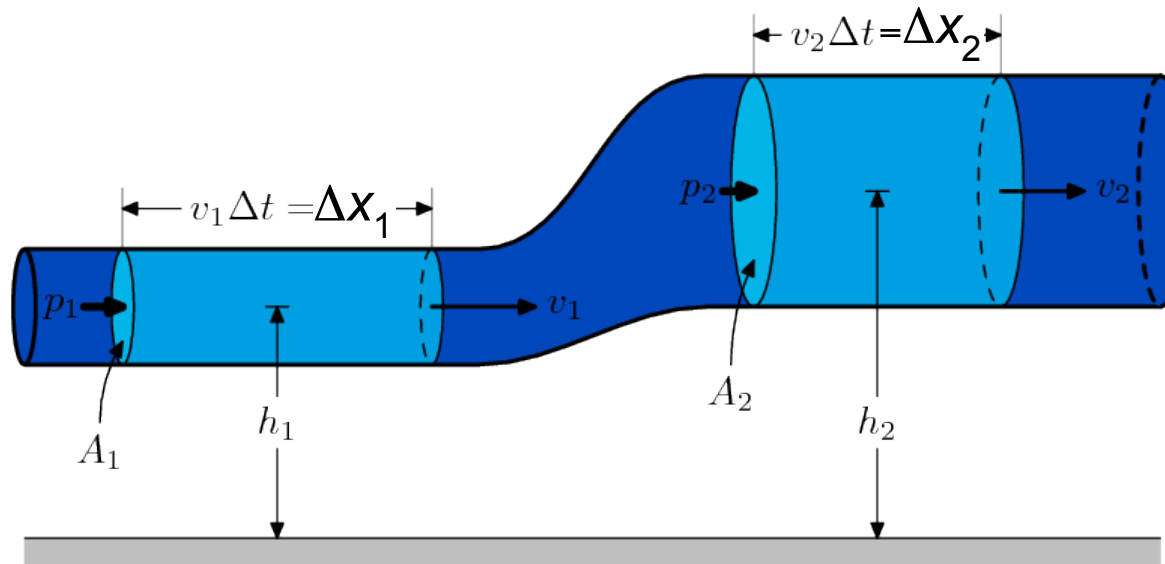


Sangue corre por uma artéria coronária que está parcialmente bloqueada por depósitos nas paredes.
Em qual parte da artéria o sangue corre mais rápido?

- A) Na parte mais estreita
- B) Na parte mais larga
- C) A velocidade é igual em ambas as partes

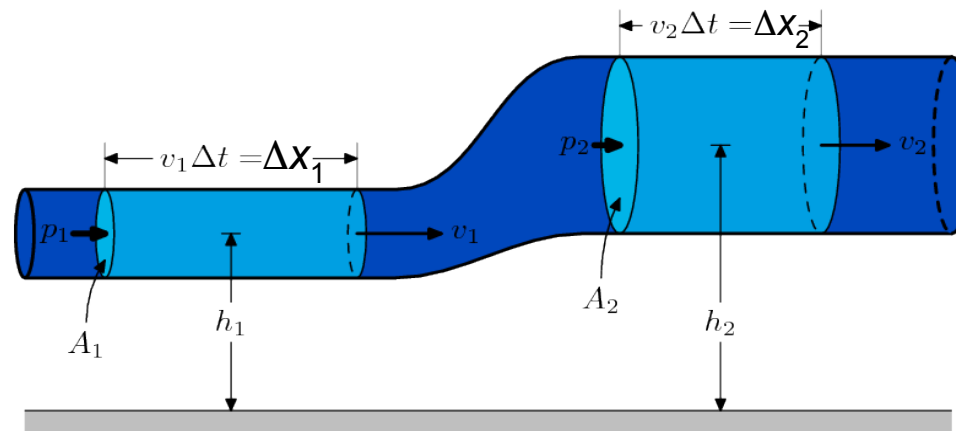
Equação de Bernoulli (Daniel Bernoulli, 1738)

Expressa a **Conservação de Energia** em um fluido ideal



P: quais são as trocas de energia envolvidas qdo o líquido, inicialmente compreendido entre A_1 e A_2 , se move para a região entre $A_1 + \Delta x_1$ e $A_2 + \Delta x_2$?

Equação de Bernoulli

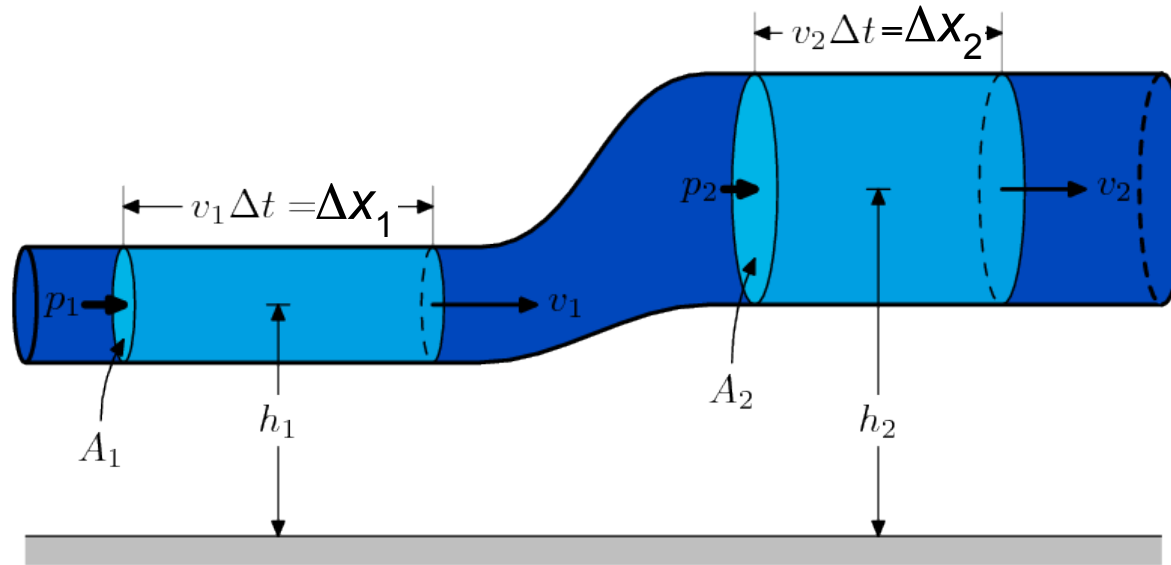


Conservação de Energia: $\Delta E^{cin} + \Delta U = W^{ext}$

$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 + mgy_2 - mgy_1 = W^{ext}$$

Equação de Bernoulli

Considere o **trabalho** W^{ext} realizado **sobre** o fluido enquanto ele se desloca

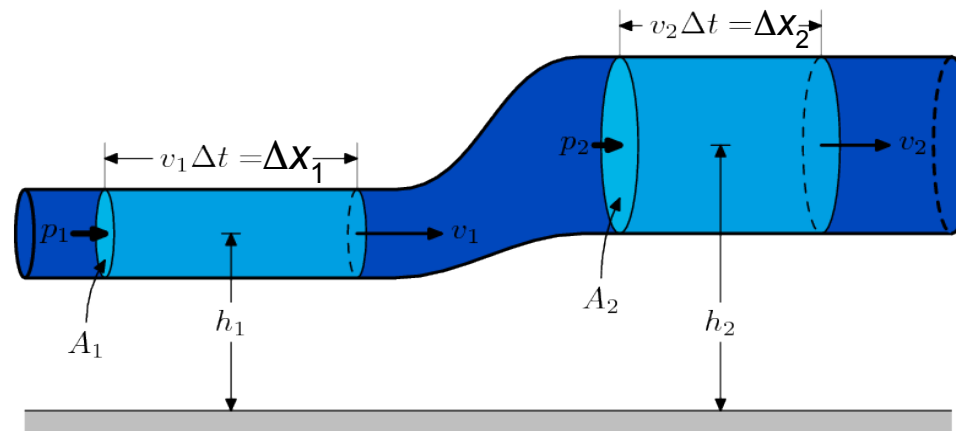


$$W^{ext} = W_1 + W_2 + \cancel{W^{lateral}} = 0 \text{ (forças } \perp \text{ desloc)}$$

$$W_1 = F_1 \Delta x_1 = P_1 A_1 \Delta x_1 = P_1 V$$

$$W_2 = -F_2 \Delta x_2 = -P_2 A_2 \Delta x_2 = -P_2 V$$

Equação de Bernoulli

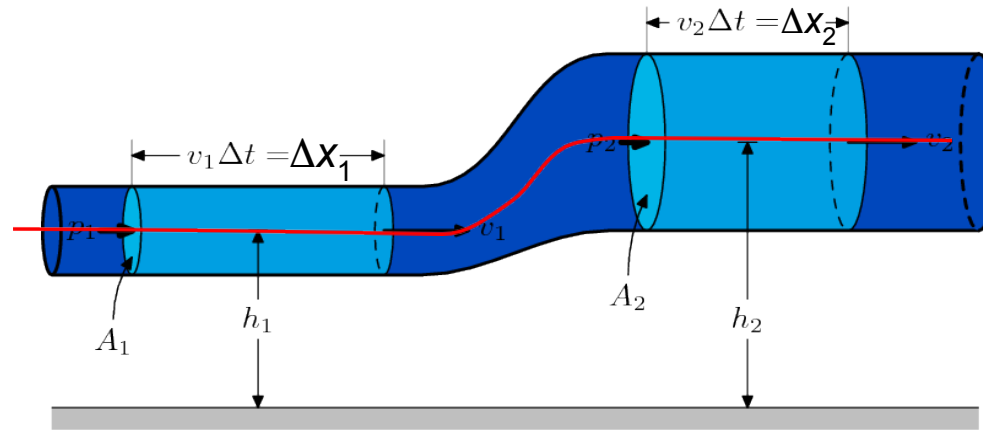


Conservação de Energia: $\Delta E + \Delta U = W^{ext}$

$$W^{ext} = W_1 + W_2 = P_1 V - P_2 V$$

$$\frac{1}{2} m v_2^2 - \frac{1}{2} m v_1^2 + m g y_2 - m g y_1 = P_1 V - P_2 V$$

Equação de Bernoulli



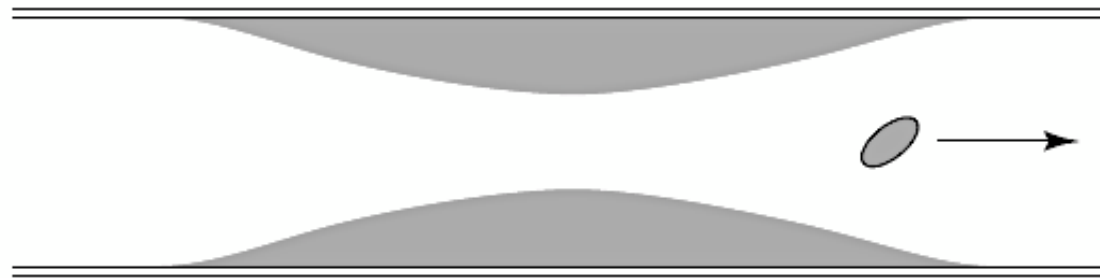
$$\frac{1}{2}mv_2^2 - \frac{1}{2}mv_1^2 + mgy_2 - mgy_1 = P_1V - P_2V$$

Equação de Bernoulli

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

ATENÇÃO: A Equação de Bernoulli relaciona dois pontos na mesma linha de fluxo.

Teste Conceitual



Uma plaqueta é carregada pelo fluxo de sangue através de uma artéria coronária que está parcialmente bloqueada por depósitos nas paredes. Quando a plaqueta sai da região estreita e passa para a região mais larga ela sente

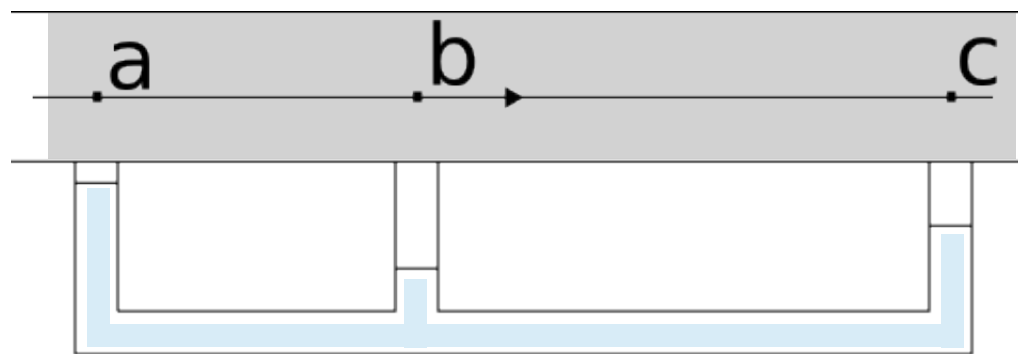
- A) um aumento na pressão
- B) nenhuma mudança na pressão
- C) uma queda na pressão.

Teste Conceitual

Gás flui no cano cinza abaixo, o qual tem variações internas de diâmetro que não podem ser vistas diretamente.

Um tubo parcialmente cheio de água é ligado a diferentes pontos do cano. Qual a sequência correta entre as velocidades do gás nos pontos a, b, c?

Obs: assuma que podemos usar a eq. de Bernoulli



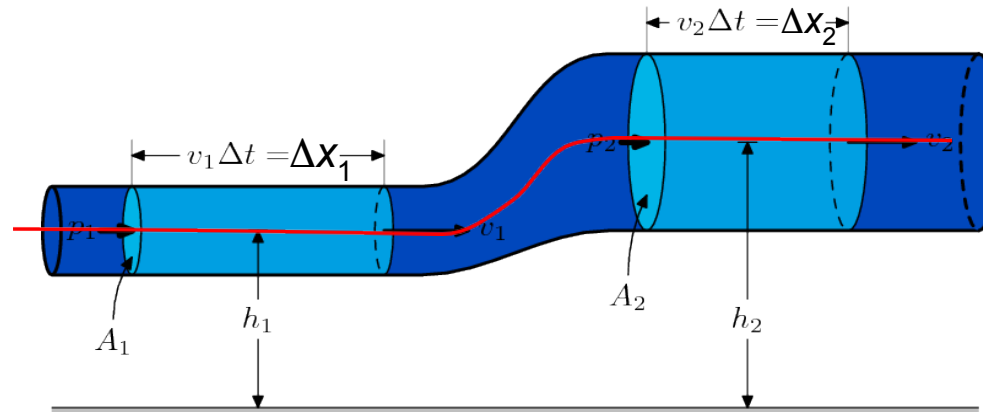
(A) $v_a < v_b < v_c$

(B) $v_a < v_b > v_c$

(C) $v_a > v_c > v_b$

(D) $v_a < v_c < v_b$

Equação de Bernoulli – Como usar

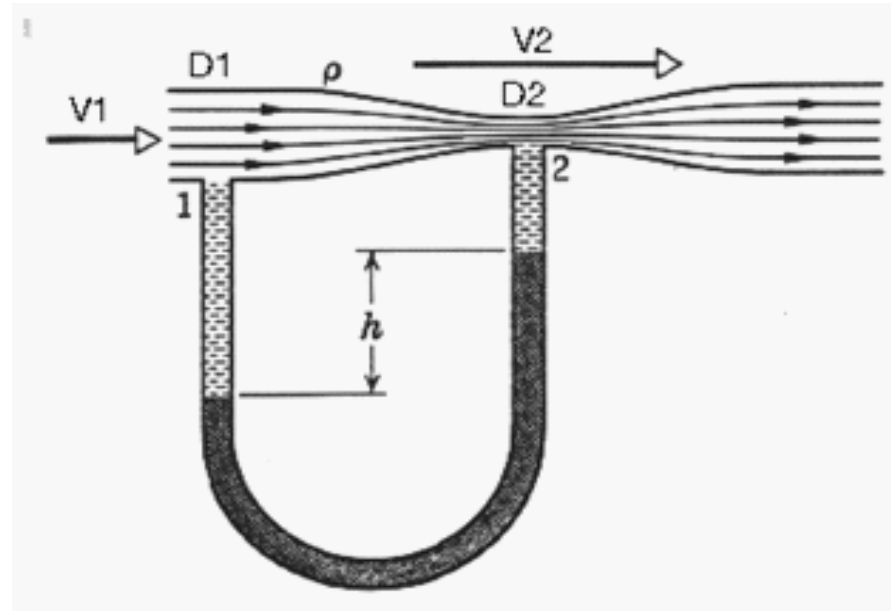


$$P_1 + \frac{1}{2}\rho v_1^2 + \rho g y_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho v_2^2 + \rho g y_2$$

1. Encontre dois pontos 1 e 2 de interesse que estejam **na mesma linha de fluxo.** **Cuidado na escolha, pois a relação não se aplica a pontos em linhas de fluxo diferentes!**
2. Onde possível, elimine variáveis desconhecidas usando outras relações, como a conservação de vazão, ou condições conhecidas do ambiente naquele ponto.

Exemplo: Tubo de Venturi

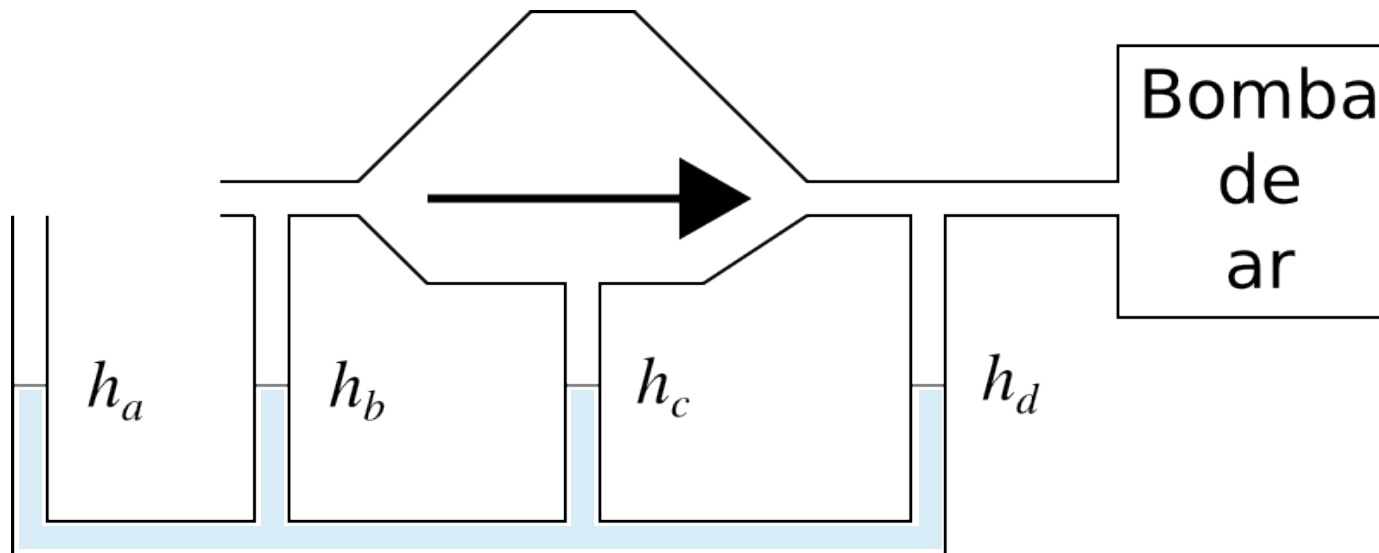
(mede a velocidade de fluidos em um tubo fechado)



$$v_1 = \sqrt{\frac{2\rho_{liq}gh}{\rho(A_1^2 - A_2^2)}} A_2$$

Teste Conceitual

Qual a sequência correta entre as alturas $h_a - h_d$?



- (A) $h_a < h_c < h_b < h_d$
- (B) $h_a > h_c > h_b > h_d$
- (C) $h_a > h_c > h_b = h_d$
- (D) $h_a < h_c < h_b = h_d$

Um estudante pergunta:

Como é possível cortar chapas de aço com um jato de água se segundo a equação de Bernoulli quanto maior a velocidade menor a pressão?



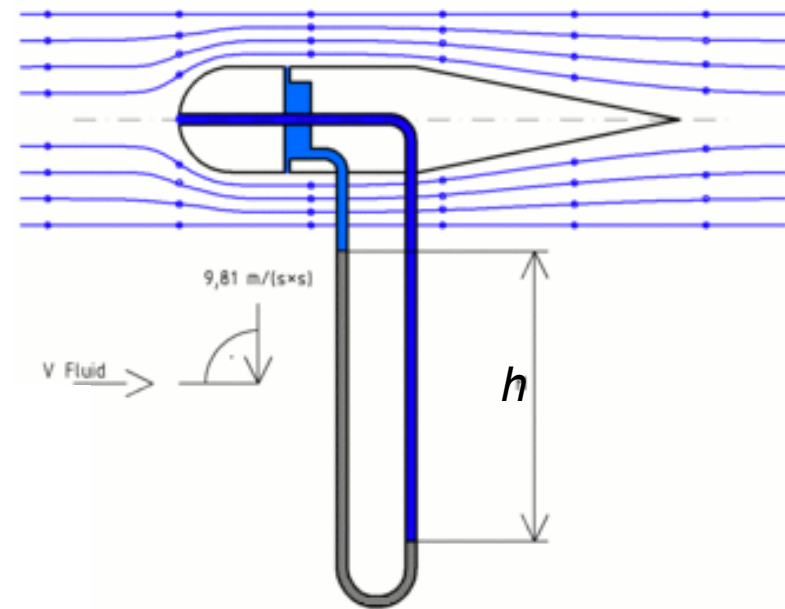
P: o que acontece com velocidade da água **ao impactar na chapa?**

R: ela cai rapidamente (a “zero”), levando a um **enorme aumento na pressão !**
(ie, a pressão sobre a chapa na área de contato é muito maior que a pressão dentro do fluido qdo este ainda está em movimento em direção à chapa)

obs: para cortar é preciso que a água não ‘quique’ simplesmente na chapa ,mas transfira energia para ela, o que exige que haja atrito com ela. Como água ‘pura’ não tem muito atrito, para cortar eficientemente costuma-se misturar a ela partículas sólidas abrasivas

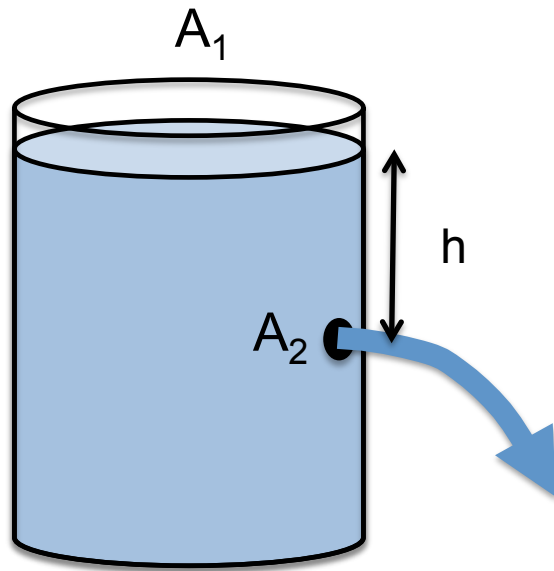
Exemplo: Tubo de Pitot

(medidor da velocidade de fluidos ao redor de um objeto)



$$v = \sqrt{2 \frac{\rho_{\text{líq}}}{\rho_{\text{ar}}} gh}$$

Exercício: escoamento por um furo

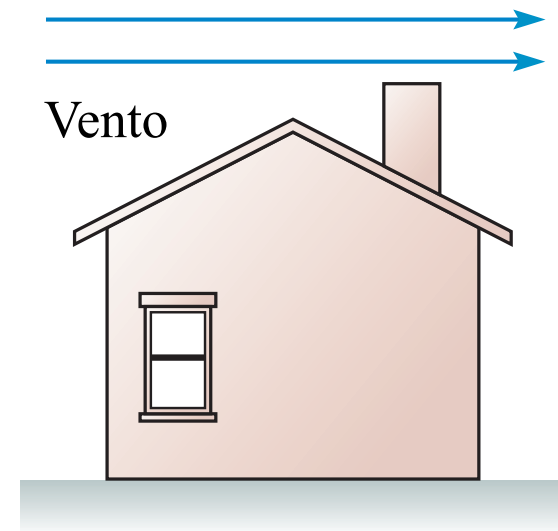


- Calcule quanto vale a vel. na saída do furo (v_2)
- Calcule quanto vale a vel. de descida da superfície (v_1)
- Quanto tempo leva até toda a água acima do furo escoar?

Teste Conceitual

Vento sopra sobre a chaminé de uma casa. Se uma janela no térreo for aberta

- A) Haverá uma corrente de ar da janela para a chaminé
- B) Haverá uma corrente de ar da chaminé para a janela
- C) Não haverá uma corrente de ar.



Teste Experimental

Repita o 'teste da tira de papel' que foi feito em casa, dessa vez tomando o cuidado de testar separadamente 2 situações:

1. tira saindo da boca na horizontal
2. tira saindo da boca na vertical

A) No 1o caso a tira não se move mas no 2o caso ela se move para o lado soprado

B) No 1o caso a tira se move para o lado soprado mas no 2o caso ela se move no sentido contrário

C) No 1o caso a tira se move para o lado soprado mas no 2o caso ela não se move

D) Nos dois casos, a tira se move para o lado soprado



1. Segure uma tira de papel na ponta do lábio inferior, apenas tocando o lábio.

2. Contraia os lábios e assopre com força sobre a parte superior da tira.

Teste Experimental

Repita o 'teste da tira de papel' que foi feito em casa, dessa vez tomando o cuidado de testar separadamente 2 situações:

1. tira saindo da boca na horizontal
2. tira saindo da boca na vertical

A) No 1o caso a tira não se move mas no 2o caso ela se move para o lado soprado

B) No 1o caso a tira se move para o lado soprado mas no 2o caso ela se move no sentido contrário

C) No 1o caso a tira se move para o lado soprado mas no 2o caso ela não se move

D) Nos dois casos, a tira se move para o lado soprado



1. Segure uma tira de papel na ponta do lábio inferior, apenas tocando o lábio.

2. Contraia os lábios e assopre com força sobre a parte superior da tira.

Teste Experimental

C) No 1o caso a tira se move para o lado soprado mas no 2o caso ela não se move

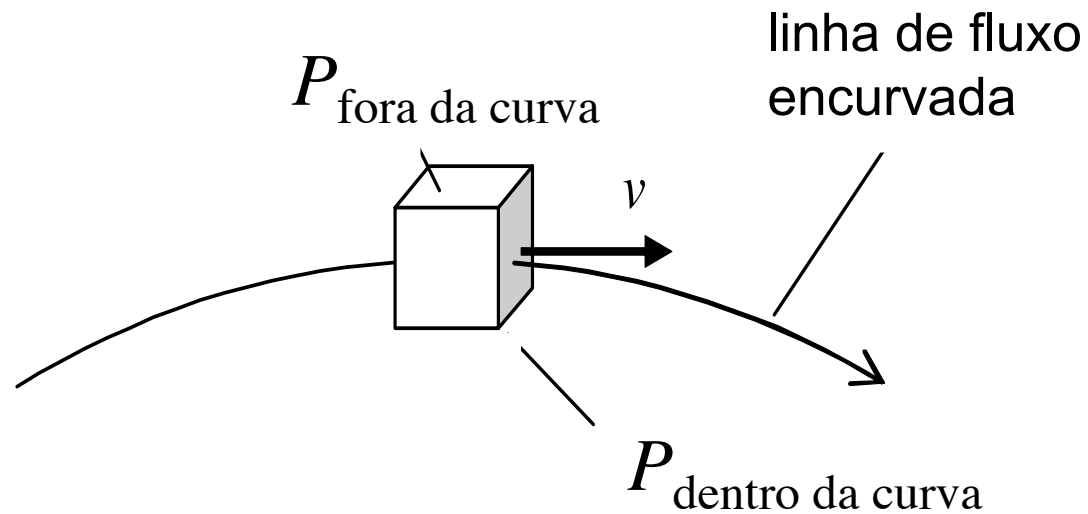
Conclusão: na verdade, a simples diferença de velocidades de um lado e de outro NÃO causa uma diferença de pressão.

Isso não contradiz a eq. de Bernoulli, pois os dois lados não fazem parte da mesma linha de fluxo!

A explicação correta é mais complicada, e se baseia no chamado **Efeito Coanda**, que faz uma linha de fluxo acompanhar a curvatura de um objeto sólido próximo. Esse efeito só surge por causa da viscosidade e da turbulência!



Teste Conceitual

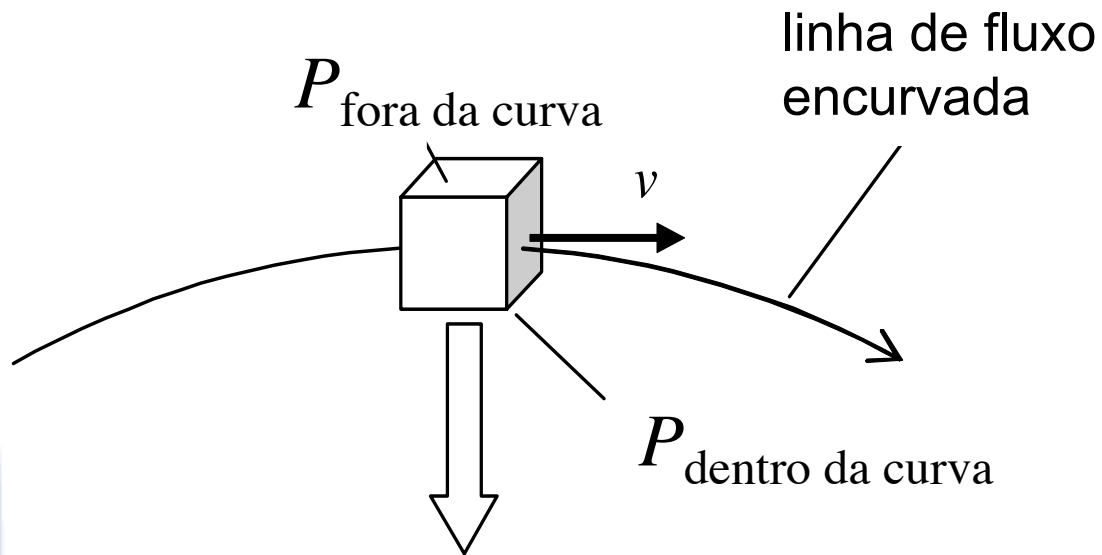


Uma linha de fluxo de um fluido faz uma curva como a indicada.

Comparando-se as pressões sobre as superfícies 'dentro da curva' e 'fora da curva' de uma pequena porção de fluido que segue essa linha, pode-se concluir que

- A) $P_{\text{dentro}} > P_{\text{fora}}$
- B) $P_{\text{dentro}} < P_{\text{fora}}$
- C) $P_{\text{dentro}} = P_{\text{fora}}$
- D) Não existe nenhuma relação especial entre P_{dentro} e P_{fora}

Indo além de Bernoulli: Variação da pressão na direção perpendicular a uma linha de fluxo [obs: não tem no livro]

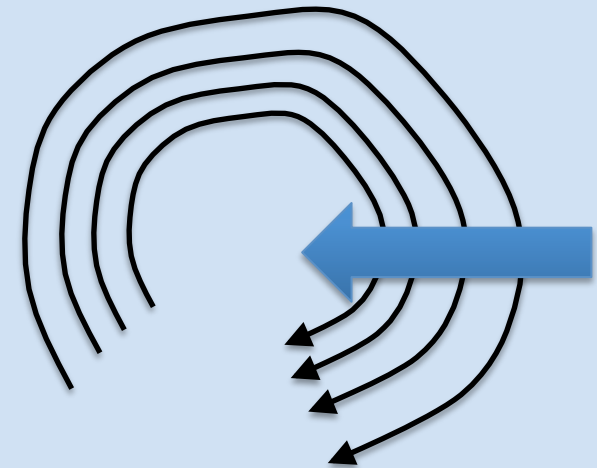


Força resultante sobre a porção de fluido

$$P_{\text{fora da curva}} > P_{\text{dentro da curva}}$$

Exemplo:
furacão ou tornado

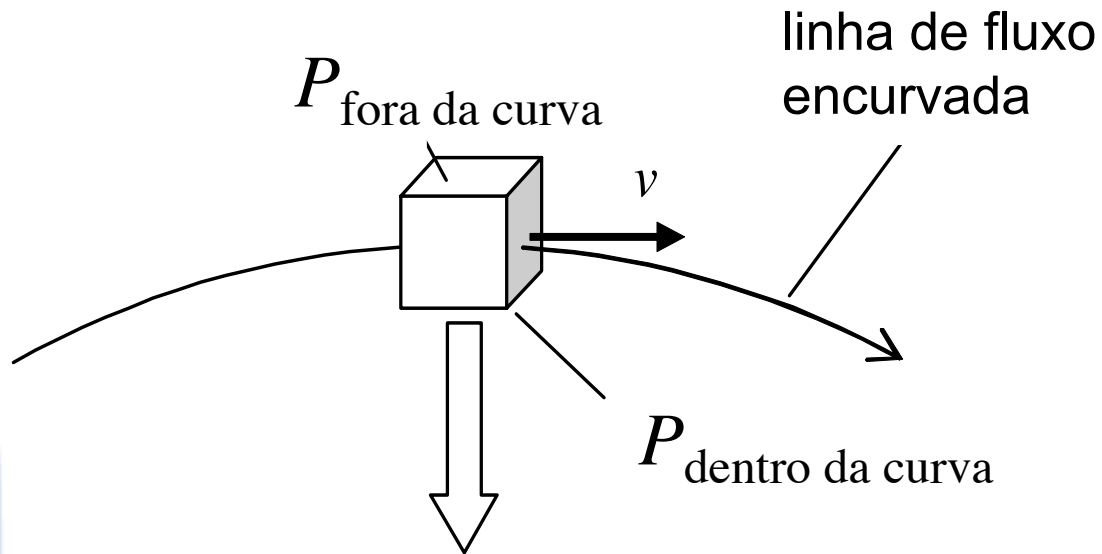
linhas de fluxo
concêntricas



pressão cai / velocidade aumenta
em direção ao centro

por isso o tornado 'suga' objetos!

Indo além de Bernoulli: Variação da pressão na direção perpendicular a uma linha de fluxo [obs: não tem no livro]



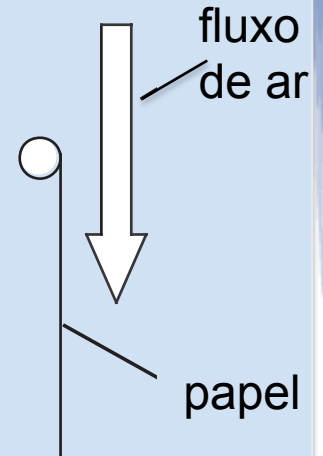
Força resultante sobre a porção de fluido

$$P_{\text{fora da curva}} > P_{\text{dentro da curva}}$$

fonte: H. Babinsky, *Physics Education* v38, 6, p497 (2003)

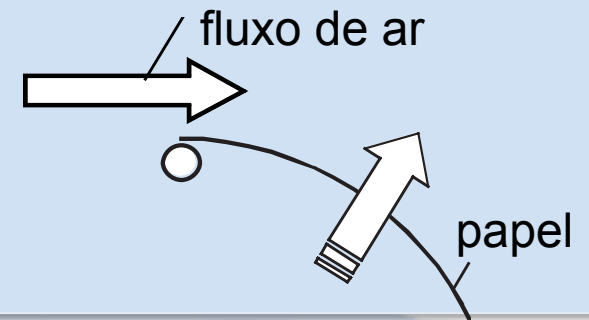
Papel na vertical:

fluxo não se curva, não há diferença entre as pressões dos dois lados, portanto não há força lateral!

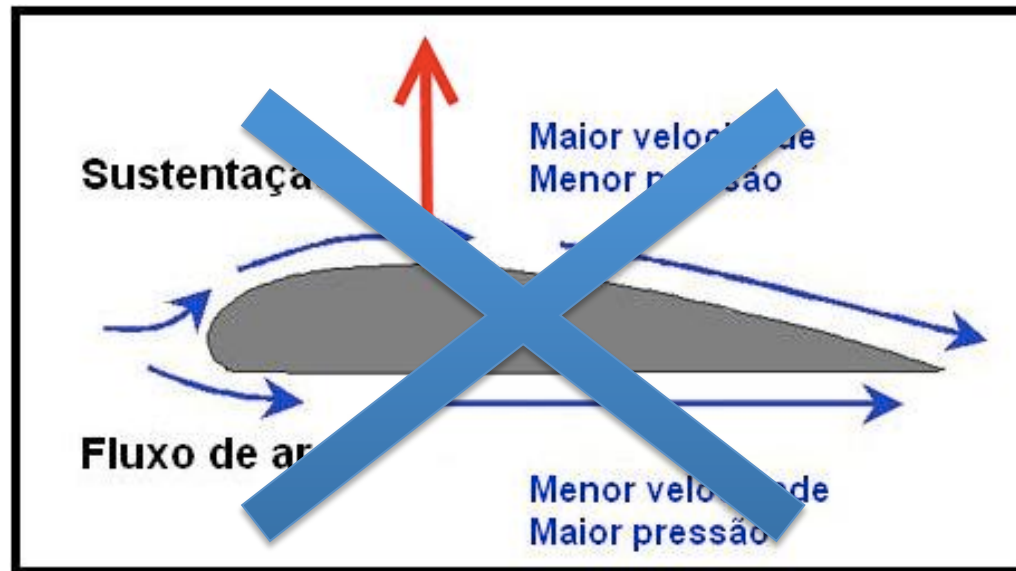


Papel encurvado:

fluxo se curva devido ao efeito Coanda. Força do papel sobre o fluxo é para baixo, então pela 3a Lei de Newton, força do fluxo sobre o papel é para cima!



Asa de avião – não é bem o que você já ouviu por aí...

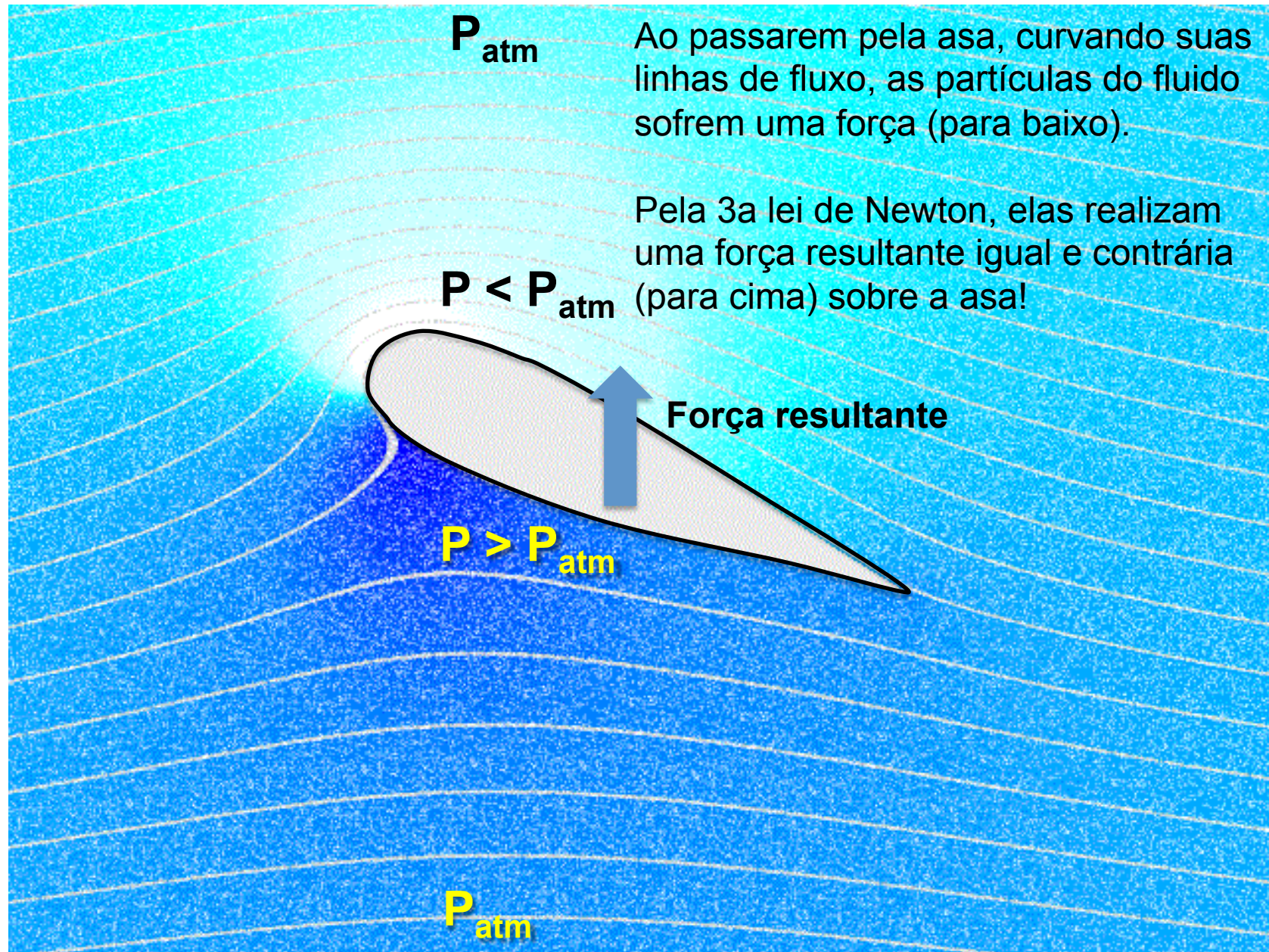


Problemas com a explicação usual:

- 1) as linhas de fluxo 'por cima' e 'por baixo' são diferentes. **Não podemos** usar a eq. Bernoulli para comparar diretamente pontos de uma e de outra
- 2) não é verdade que o fluxo 'por cima' tem de "andar mais rápido para poder reencontrar o fluxo 'por baixo', já que o caminho é mais longo". Experimentos mostram que os fluxos não se 'reencontram'.
- 3) Aviões podem voar de cabeça para baixo!

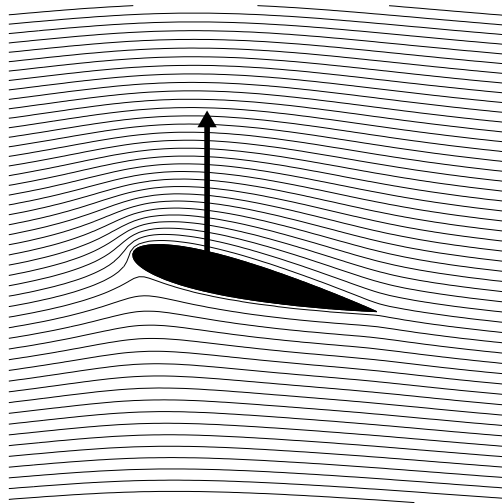


Asa de avião: o que realmente ocorre

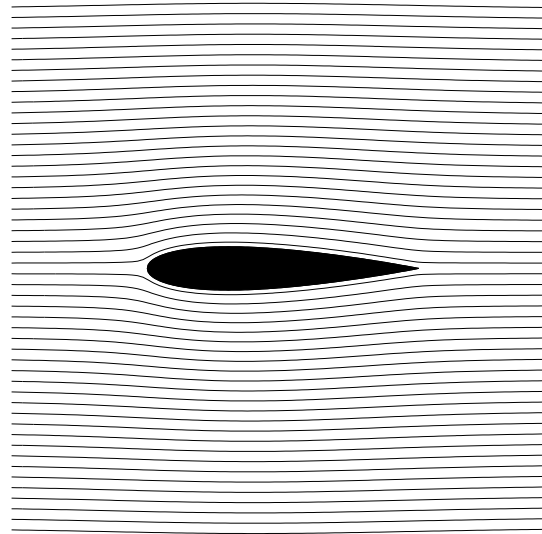


Aplicação: Asa de avião

Fluxo ao redor de uma asa simétrica



(a)



(c)

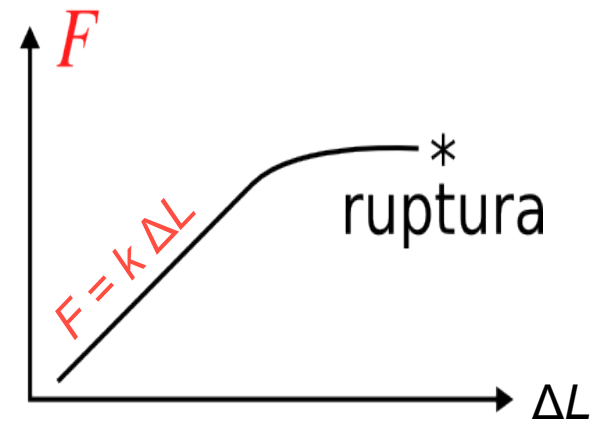
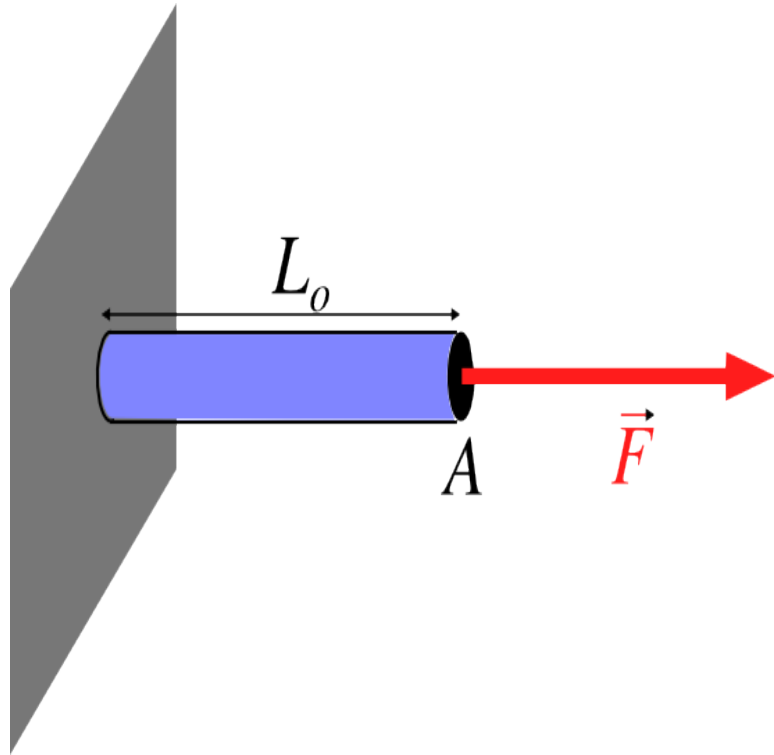
Dependendo do 'ângulo de ataque' (angulação entre o eixo da asa e a direção de movimento do avião), a mesma asa pode gerar

- a) força resultante para cima (flutuação)
- b) zero força resultante
- c) força resultante para baixo! (útil em aerofólios de carros de F1...)

Elasticidade

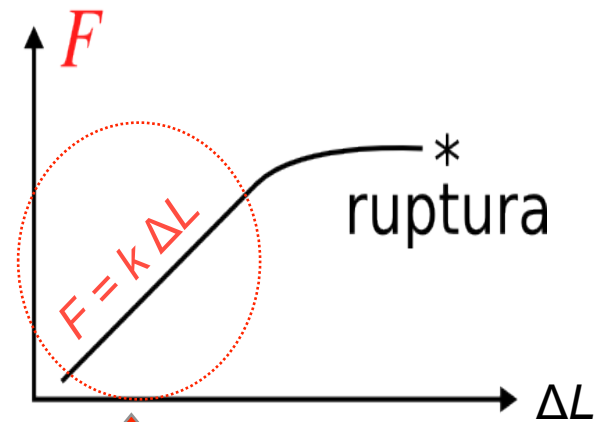
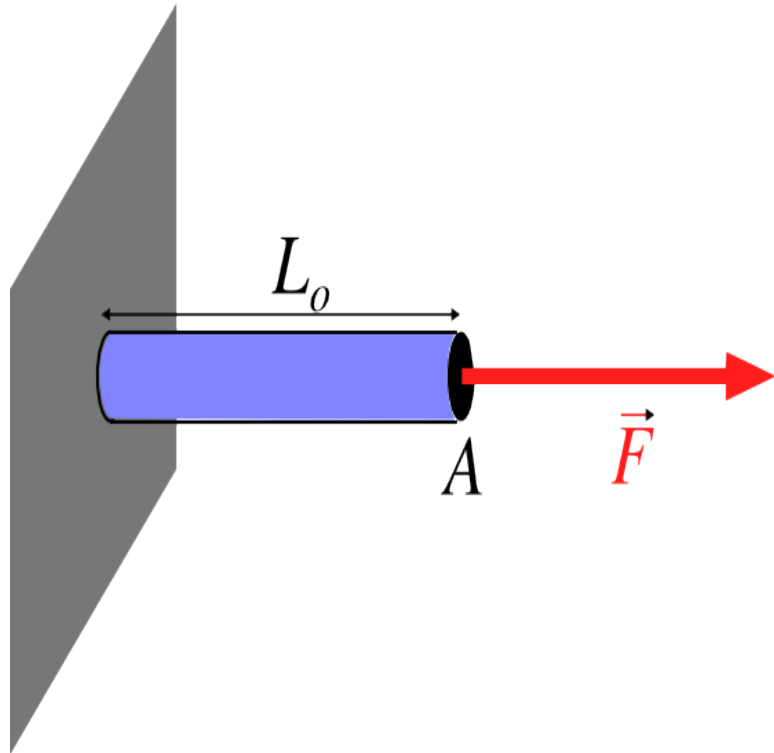
Elasticidade

Sólidos



Elasticidade

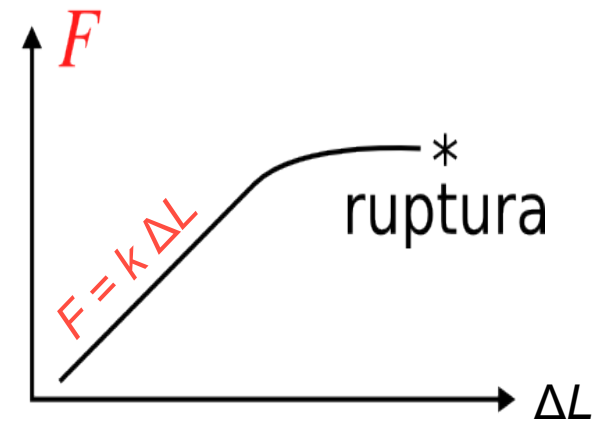
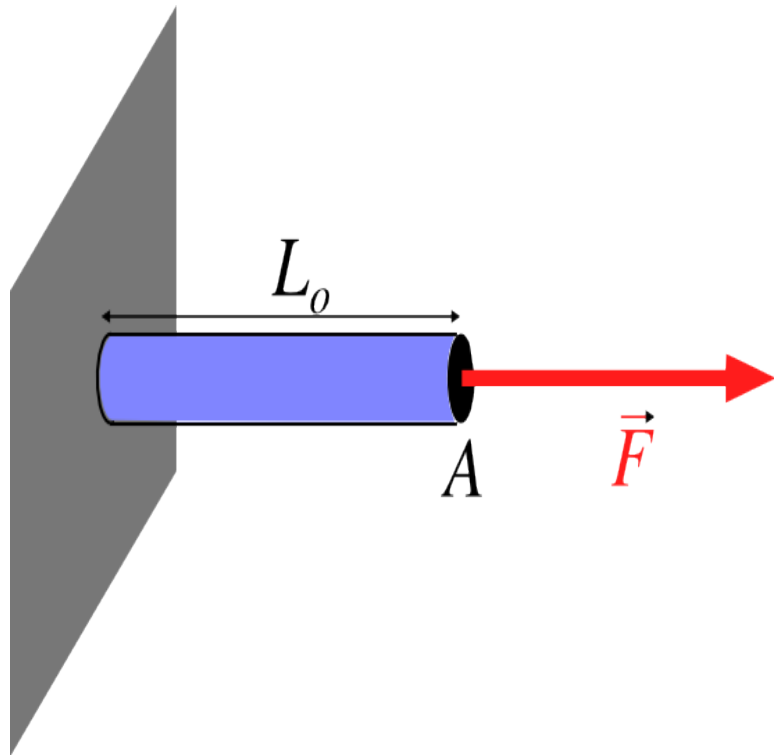
Sólidos



Região linear

Elasticidade

Sólidos

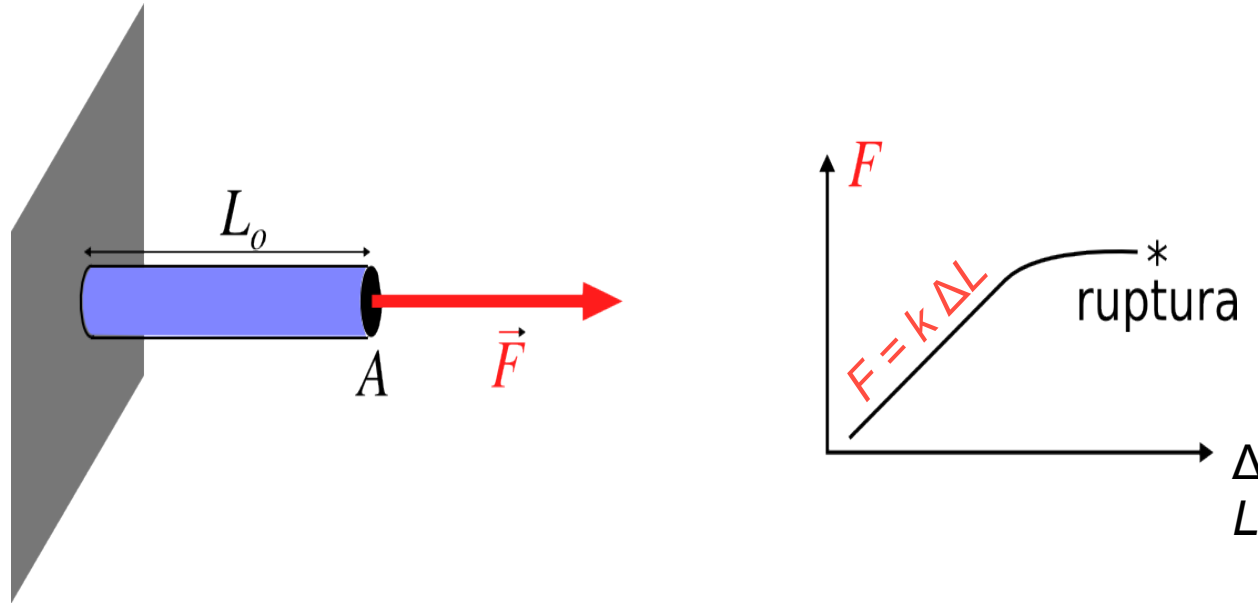


Cada objeto tem uma constante elástica k .

→ k depende de L_0 , A e do material

Elasticidade

Sólidos



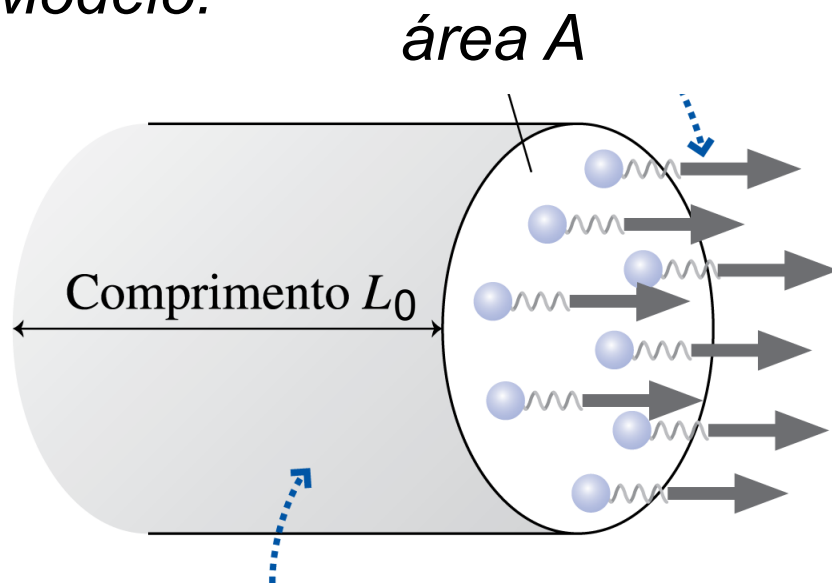
→ k depende de L_0 , A e do material

Seria interessante encontrar uma outra constante que caracterize o material e não dependa da geometria do objeto!

Módulo de Young

Ideia básica: A elasticidade de um material está diretamente relacionada com a cte elástica das suas ligações moleculares.

Modelo:



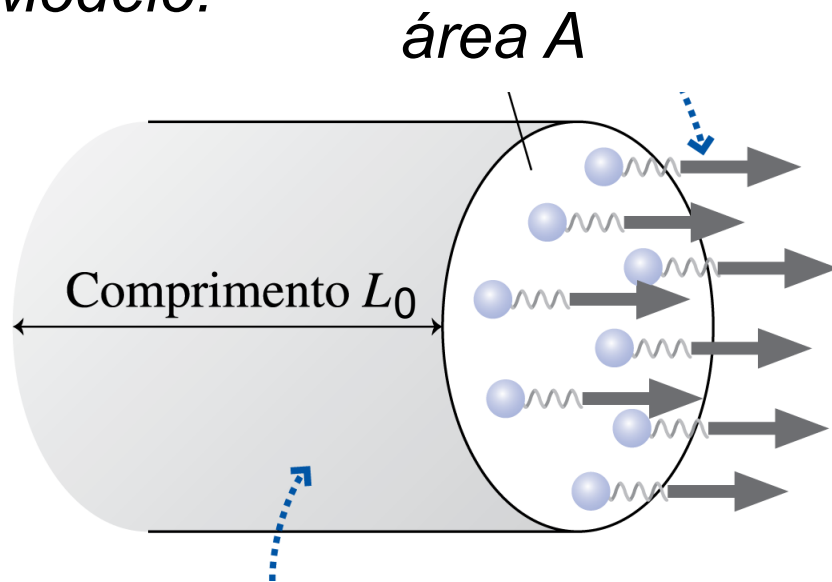
Para cada ligação entre partículas

$$\text{Força } f \propto F/A$$

$$\text{Deformação } \Delta l \propto \Delta L / L_0$$

Ideia básica: A elasticidade de um material está diretamente relacionada com a cte elástica das suas ligações moleculares.

Modelo:



Aplicando a lei de Hooke para cada ligação: $f \propto \Delta l$

Para cada ligação entre partículas

$$\text{Força } f \propto F/A$$

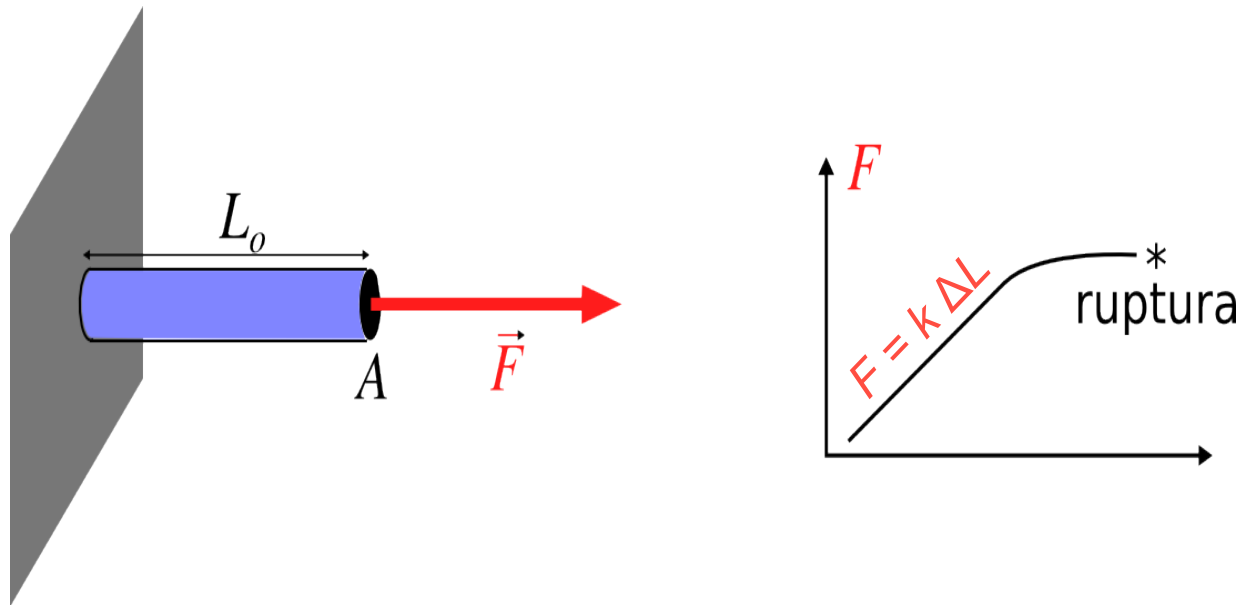
$$\text{Deformação } \Delta l \propto \Delta L / L_0$$

$$\begin{array}{l} \text{Tensão de tração (unid: N/m}^2\text{)} \\ \text{Deformação relativa (adimensional)} \end{array} \quad \left(\frac{F}{A} \right) = Y \left(\frac{\Delta L}{L_0} \right)$$

↑
Módulo de Young (N/m²)

Conclusão: o Módulo de Young é uma 'constante elástica' que não depende da geometria do objeto

$$F/A = Y \Delta L/L_0$$



$$F = k \Delta L \rightarrow k = AY/L_0 \leftrightarrow Y = kL_0/A$$

k, L_0, A : Parâmetros que podem ser medidos no laboratório.

TABELA 15.3 Propriedades elásticas de vários materiais

Substância	Módulo de Young (N/m²)
Alumínio	7×10^{10}
Concreto	3×10^{10}
Cobre	11×10^{10}
Mercúrio	–
Plástico (poliestireno)	$0,3 \times 10^{10}$
Aço	20×10^{10}
Água	–
Madeira (abeto)	1×10^{10}

Obs: mesmos valores de Y valem tb para compressão elástica

Ex: Uma pilastra de concreto ($Y = 3 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$) tem $0,1\text{m}^2$ de área transversa e 10m de altura. Qual o máximo peso que ela pode suportar sem se deformar mais do que 0,05% (5mm)?



R: $1,5 \times 10^6 \text{ N}$
(ou o peso de 150 toneladas, aprox.)

Se a pilastra fosse feita de alumínio ($Y=7 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$), ela se deformaria

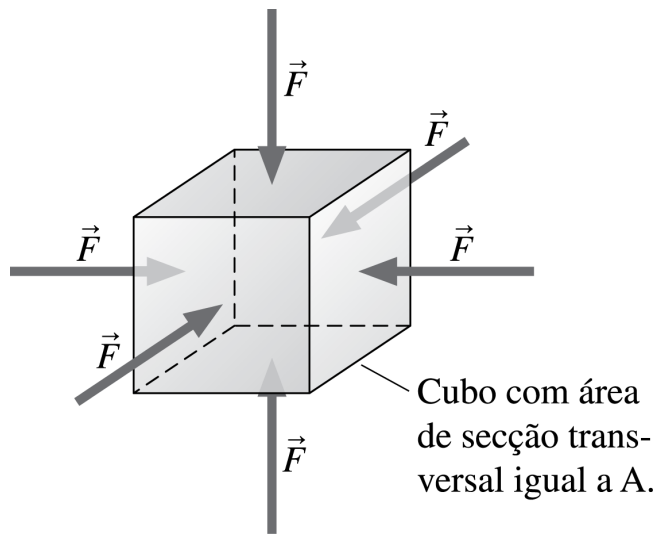
- A) o mesmo sob o mesmo peso
- B) o mesmo sob 2,5 menos peso
- C) 2,5 vezes menos sob o mesmo peso
- D) 2,5 vezes mais sob o mesmo peso

O Módulo de Young caracteriza a resposta da substância ao ser tracionada ou comprimida em uma direção específica.

Uma outra propriedade elástica chamada

módulo de elasticidade volumétrico (B)

caracteriza o quanto uma substância é comprimida (reduz seu volume) quando sujeita a pressões iguais de todos os lados



$$F/A = \text{Pressão} = -B \underbrace{\Delta V/V_0}$$

< 0 em geral !

(ex: objetos pequenos submersos)

TABELA 15.3 Propriedades elásticas de vários materiais

Substância	Módulo de Young (N/m²)	Módulo de elasticidade volumétrica (N/m²)
Alumínio	7×10^{10}	7×10^{10}
Concreto	3×10^{10}	–
Cobre	11×10^{10}	14×10^{10}
Mercúrio	–	3×10^{10}
Plástico (poliestireno)	$0,3 \times 10^{10}$	–
Aço	20×10^{10}	16×10^{10}
Água	–	$0,2 \times 10^{10}$
Madeira (abeto)	1×10^{10}	–

Mesma unidade de tensão de tração (N/m²)

Exemplo: sabemos que a água do mar tem densidade $\rho_{\text{mar}} = 1030 \text{ Kg/m}^3$ na superfície. Qual a sua densidade no oceano a 5000m de profundidade ?

Dado: $B = 0,2 \times 10^{10} \text{ N/m}^2$

- A) Qual é a pressão a essa profundidade?
- B) Qual a variação relativa de volume?
- C) Qual a densidade da água do mar a essa pressão?