

# Termodinâmica e Transferência de Calor 2022/2023

Aula n°1: Conceitos básicos da Termodinâmica

José M. Castanheira  
Departamento de Física, Universidade de Aveiro

21 de setembro de 2022

FUNDAMENTALS OF

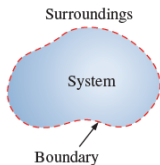
# Thermal-Fluid Sciences

Sixth Edition

Mc  
Graw  
Hill

Yunus A. Çengel  
John M. Cimbala  
Afshin J. Ghajar

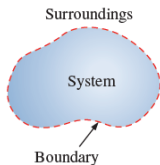
- ✓ Um **sistema termodinâmico** é uma porção do universo constituída por matéria e/ou radiação e separada da sua **vizinhança** por **paredes** reais ou imaginárias.



**FIGURE 2-1**

System, surroundings, and boundary.

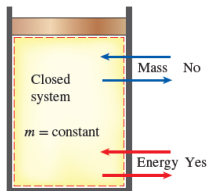
- ✓ Um **sistema termodinâmico** é uma porção do universo constituída por matéria e/ou radiação e separada da sua **vizinhança** por **paredes** reais ou imaginárias.



**FIGURE 2-1**

System, surroundings, and boundary.

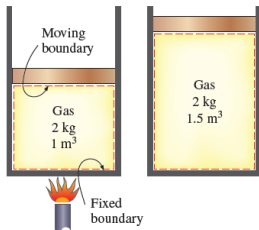
- Consoante as interações permitidas entre o **sistema** e a sua **vizinhança (ou ambiente)**, os sistemas termodinâmicos têm diferentes classificações:



► Sistema fechado!

**FIGURE 2-2**

Mass cannot cross the boundaries of a closed system, but energy can.



**FIGURE 2-3**

A closed system with a moving boundary.

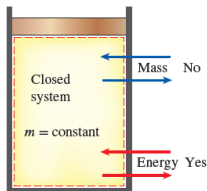


FIGURE 2-2

Mass cannot cross the boundaries of a closed system, but energy can.

► Sistema fechado!

► Se as paredes do sistema também não permitirem trocas de energia com a vizinhança teremos um **sistema isolado**.

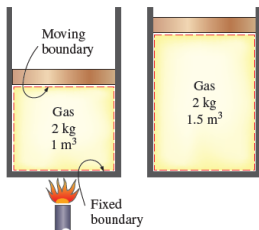
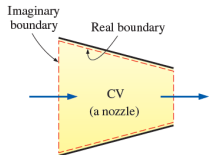
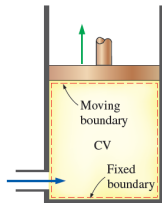


FIGURE 2-3

A closed system with a moving boundary.

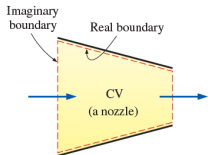


(a) A control volume (CV) with real and imaginary boundaries

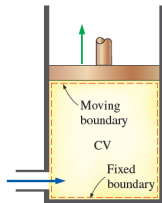


(b) A control volume (CV) with fixed and moving boundaries as well as real and imaginary boundaries

► **Sistemas abertos!**



(a) A control volume (CV) with real and imaginary boundaries



(b) A control volume (CV) with fixed and moving boundaries as well as real and imaginary boundaries

► **Sistemas abertos!**

- Os sistemas fechados e os sistemas abertos são muitas vezes também designados por **massas de controlo** e **volumes de controlo**, respectivamente.





► Exemplo de um sistema aberto.

**FIGURE 2-5**

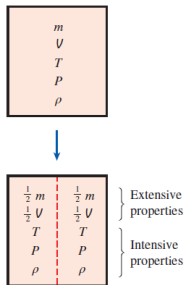
An open system (a control volume)  
with one inlet and one exit.



**Problema 1.1** Considere uma garrafa de mergulho que contém ar comprimido.

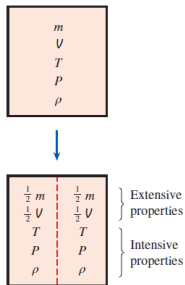
- a. Diga, justificando, se o ar pode ser considerado como um sistema termodinâmico e, em caso afirmativo, defina a sua fronteira e a sua vizinhança.
- b. Mesma questão que a anterior, mas agora para o oxigénio do ar.

- ✓ Os sistemas termodinâmicos são caracterizados pelos valores das suas propriedades, tais como a pressão,  $P$ , a temperatura,  $T$ , o volume,  $V$ , a massa,  $m$ , etc. As propriedades separam-se em **propriedades intensivas** e em **propriedades extensivas**.



**FIGURE 2-6**  
Criterion to differentiate intensive and extensive properties.

- ✓ Os sistemas termodinâmicos são caracterizados pelos valores das suas propriedades, tais como a pressão,  $P$ , a temperatura,  $T$ , o volume,  $V$ , a massa,  $m$ , etc. As propriedades separam-se em **propriedades intensivas** e em **propriedades extensivas**.

**FIGURE 2-6**

Criterion to differentiate intensive and extensive properties.

- Propriedades extensivas por unidade de massa são chamadas de **propriedades específicas**. Um exemplo é o volume específico  $v = V/m = 1/\rho$ , onde  $\rho$  é a massa volúmica.

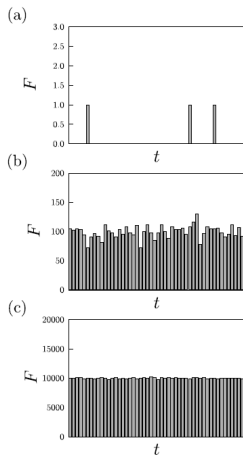
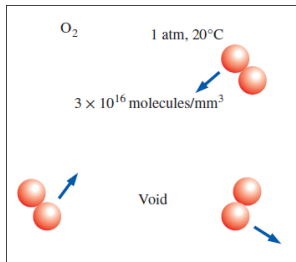


Fig. 1.1 Graphs of the force on a roof as a function of time due to falling rain drops.

- A matéria é constituída por moléculas que podem encontrar amplamente espaçadas na fase gasosa. No entanto, a descrição Termodinâmica clássica dos sistemas ignora a estrutura atômica/molecular da matéria, descrevendo-a com um contínuo e atribuindo valores das propriedades a cada ponto. A validade desta aproximação exige que as flutuações estatísticas das propriedades não sejam observáveis na precisão com que se medem. Força

$$\text{pressure} = \frac{\text{Force}}{\text{area}}$$

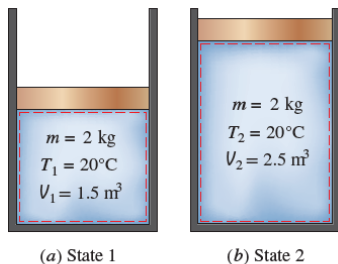
- O diâmetro da molécula de oxigénio é  $\sim 3 \times 10^{-10}$  m e a sua massa é  $5.3 \times 10^{-26}$  kg. O percurso livre médio das moléculas de oxigénio à pressão de 1 atm e temperatura de  $20^\circ\text{C}$  é  $6.8 \times 10^{-8}$  m.



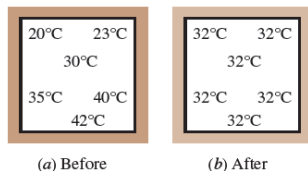
**FIGURE 2-7**

Despite the relatively large gaps between molecules, a gas can usually be treated as a continuum because of the very large number of molecules even in an extremely small volume.

- ✓ Alterando as condições da vizinhança, **os estados dos sistemas**, i.é. o conjunto dos valores da suas propriedades podem alterar-se ao longo do tempo. Fixando as condições externas, os sistema evoluem para um estado terminal, que não varia mais com o tempo e é independente da sequência de estados porque passou. Esse estado terminal é um **estado de equilíbrio termodinâmico**, que só se alterará se o sistema for sujeito a acções externas.

**FIGURE 2-9**

A system at two different states.

**FIGURE 2-10**

A closed system reaching thermal equilibrium.

- ▶ Um sistema em equilíbrio não sofre mudanças quando é isolado de seu ambiente.



- ▶ Um sistema em equilíbrio não sofre mudanças quando é isolado de seu ambiente.
- ▶ Iremos dedicar muita da nossa atenção a **sistemas compressíveis simples**, definidos como sistemas que são macroscopicamente homogêneos, isotrópicos e não carregados, que são grandes o suficiente para que os efeitos de superfície possam ser desprezados, e que não sofrem acção de campos eléctricos, magnéticos ou gravíticos.

- ▶ Um sistema em equilíbrio não sofre mudanças quando é isolado de seu ambiente.
- ▶ Iremos dedicar muita da nossa atenção a **sistemas compressíveis simples**, definidos como sistemas que são macroscopicamente homogêneos, isotrópicos e não carregados, que são grandes o suficiente para que os efeitos de superfície possam ser desprezados, e que não sofrem acção de campos eléctricos, magnéticos ou gravíticos.
- ▶ Mostra a experiência que podemos assumir o seguinte **postulado de estado**:

*O estado de um sistema compressível simples é completamente especificado por duas propriedades independentes a massa de cada substância que o constitui.*

- As propriedades que caracterizam os estados de equilíbrio são muitas vezes referidas por **variáveis de estado**. Elas têm valores definidos para cada estado de equilíbrio, e, no caso dos sistemas compressíveis simples, apenas duas são independentes.



**FIGURE 2–11**

The state of nitrogen is fixed by two independent, intensive properties.

- ▶ As propriedades que caracterizam os estados de equilíbrio são muitas vezes referidas por **variáveis de estado**. Elas têm valores definidos para cada estado de equilíbrio, e, no caso dos sistemas compressíveis simples, apenas duas são independentes.

**FIGURE 2–11**

The state of nitrogen is fixed by two independent, intensive properties.

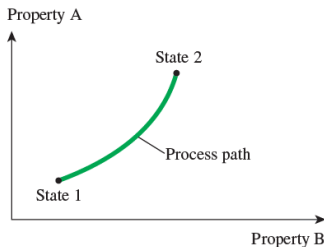
- ▶ Os sistemas compressíveis simples são geralmente caracterizados pela pressão,  $P$ , temperatura,  $T$ , volume,  $V$ , e composição.

- ▶ Portanto, o postulado de estado implica que uma das variáveis é determinada pelas outras duas através da **equação de estado**

$$X_3 = f(X_1, X_2),$$

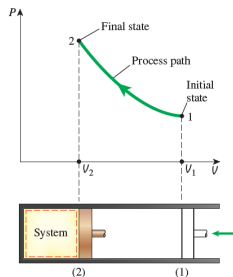
onde  $X_i$  representa uma variável de estado.

- ✓ Qualquer mudança que um sistema sofre de um estado de equilíbrio para outro é chamada de **processo**, e a sequência de estados intermédios pelos quais o sistema evolui é designada por **caminho termodinâmico**.



**FIGURE 2-12**

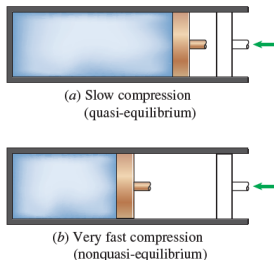
A process between states 1 and 2 and the process path.



**FIGURE 2-14**

The  $P$ - $V$  diagram of a compression process.

- ✓ Um processo ocorre de maneira que o sistema permaneça infinitesimalmente próximo de um estado de equilíbrio, em cada instante, é designado de processo **quase-estático**, ou de **quase-equilíbrio**.



**FIGURE 2-13**

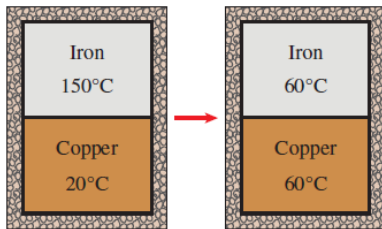
Quasi-equilibrium and nonquasi-equilibrium compression processes.

- ✓ O senso comum associa o conceito de **temperatura** às sensações fisiológicas que nos são fornecidas através do sentido do tacto, as quais se traduzem em adjetivos como "gélido", "frio", "morno", "quente", "escaldante", etc. O sentido do tacto não proporciona, no entanto, uma avaliação fidedigna da temperatura. Por exemplo, mergulharmos uma mão em água fria e a outra mão em água quente e, seguidamente, mergulharmos as duas em água morna, a primeira mão dará uma sensação de quente e a outra de frio (Draft do livro de Carlos da Camara).



- ✓ O senso comum associa o conceito de **temperatura** às sensações fisiológicas que nos são fornecidas através do sentido do tacto, as quais se traduzem em adjetivos como "gélido", "frio", "morno", "quente", "escaldante", etc. O sentido do tacto não proporciona, no entanto, uma avaliação fidedigna da temperatura. Por exemplo, mergulharmos uma mão em água fria e a outra mão em água quente e, seguidamente, mergulharmos as duas em água morna, a primeira mão dará uma sensação de quente e a outra de frio (Draft do livro de Carlos da Camara).
- ▶ O conceito macroscópico de temperatura pode ser definido de forma mais precisa depois de introduzirmos o conceito de equilíbrio térmico e a **lei zero da termodinâmica**.

- A experiência mostra que colocando dois sistemas A e B em contacto por paredes diatérmicas, com estados iniciais  $(X_1, Y_1)$  e  $(X_2, Y_2)$ , respectivamente, eles evoluirão para estados finais  $(X'_1, Y'_1)$  e  $(X'_2, Y'_2)$  de **equilíbrio térmico**.



**FIGURE 2-17**

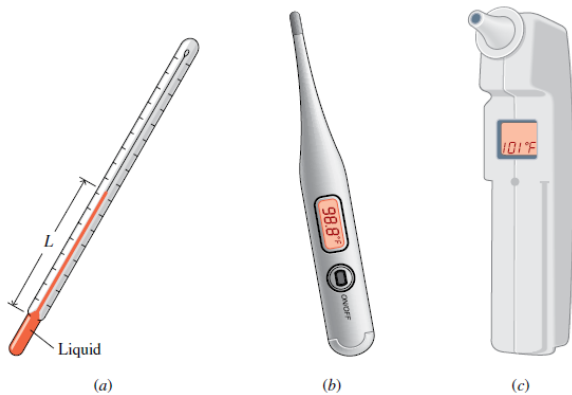
Two bodies reaching thermal equilibrium after being brought into contact in an isolated enclosure.

- ▶ **Lei zero da termodinâmica:** Dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si.

- ▶ **Lei zero da termodinâmica:** Dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si.
- ▶ Pode-se, assim, definir **Temperatura** de um sistema como sendo uma propriedade que determina se um sistema está ou não em equilíbrio térmico com outros sistemas.

- ▶ **Lei zero da termodinâmica:** Dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si.
- ▶ Pode-se, assim, definir **Temperatura** de um sistema como sendo uma propriedade que determina se um sistema está ou não em equilíbrio térmico com outros sistemas.
- ▶ É a transitividade do equilíbrio térmico, expressa pela lei zero da termodinâmica, que permite a construção de termómetros e a definição de escalas de temperatura.

- ▶ **Lei zero da termodinâmica:** Dois sistemas em equilíbrio térmico com um terceiro estão em equilíbrio térmico entre si.
- ▶ Pode-se, assim, definir **Temperatura** de um sistema como sendo uma propriedade que determina se um sistema está ou não em equilíbrio térmico com outros sistemas.
- ▶ É a transitividade do equilíbrio térmico, expressa pela lei zero da termodinâmica, que permite a construção de termómetros e a definição de escalas de temperatura.
- ▶ Qualquer objecto com pelo menos uma propriedade mensurável que muda, de forma única e repetível, à medida que sua temperatura muda pode ser usado como termómetro. Essa propriedade é designada de **propriedade termométrica**.



**FIG. 1.13** Thermometers. (a) Liquid-in-glass. (b) Electrical-resistance. (c) Infrared-sensing ear thermometer.

- ▶ A definição de uma escala de temperatura objectiva requer a escolha de estados de referência fiduciais reprodutíveis, usualmente referidos como **pontos fixos**.



- ▶ A definição de uma escala de temperatura objectiva requer a escolha de estados de referência fiduciais reprodutíveis, usualmente referidos como **pontos fixos**.
  - **Ponto de fusão do gelo:** Uma mistura de gelo e água líquida em equilíbrio com ar saturado de vapor à pressão de 1 atm.
  - **Ponto de ebulição da água:** Uma mistura de água líquida e vapor de água (sem ar) em equilíbrio à pressão de 1 atm.

- A definição de uma escala de temperatura objectiva requer a escolha de estados de referência fiduciais reproduzíveis, usualmente referidos como **pontos fixos**.
- **Ponto de fusão do gelo:** Uma mistura de gelo e água líquida em equilíbrio com ar saturado de vapor à pressão de 1 atm.
  - **Ponto de ebulição da água:** Uma mistura de água líquida e vapor de água (sem ar) em equilíbrio à pressão de 1 atm.

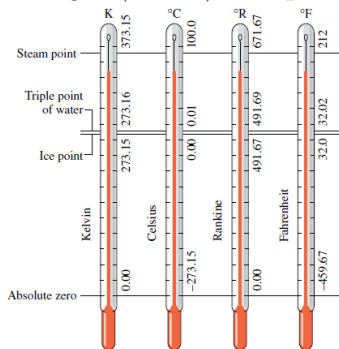
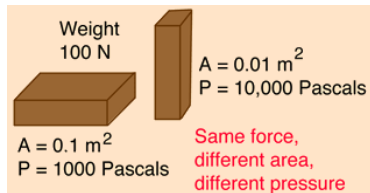
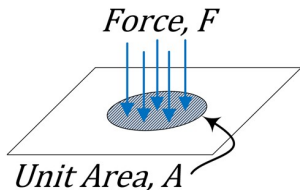


FIG. 1.14 Comparison of temperature scales.

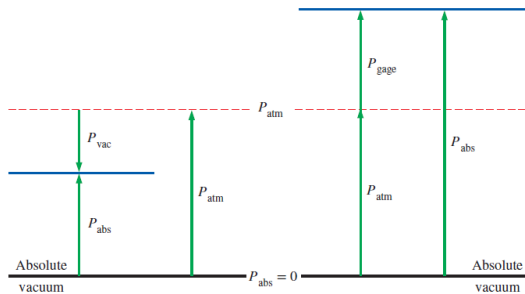
- ✓ A pressão é definida com a força por unidade de área exercida perpendicularmente contra uma superfície

$$P = \lim_{\Delta A \rightarrow 0} \frac{\Delta F}{\Delta A} = \frac{dF_{\text{normal}}}{dA}. \quad (1)$$



$$P_{\text{gauge}} = P_{\text{abs}} - P_{\text{atm}}$$

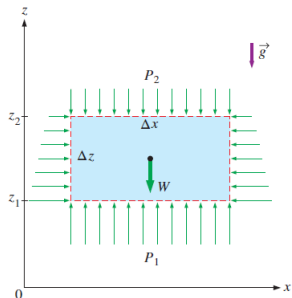
$$P_{\text{vac}} = P_{\text{atm}} - P_{\text{abs}}$$



**FIGURE 2–24**

Absolute, gage, and vacuum pressures.

- ✓ A pressão de um fluido em repouso num campo gravítico,  $\vec{g}$ , cresce no sentido do campo.



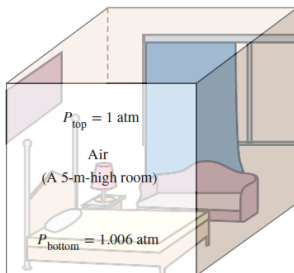
**FIGURE 2-26**

Free-body diagram of a rectangular fluid element in equilibrium.

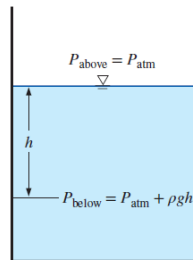
$$\begin{aligned} \sum F_z &= P_1 \Delta x \Delta y - P_2 \Delta x \Delta y \\ &\quad - \rho g \Delta x \Delta y \Delta z = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

- Considerando um volume muito pequeno (infinitesimal), obteremos a [equação hidrostática](#)

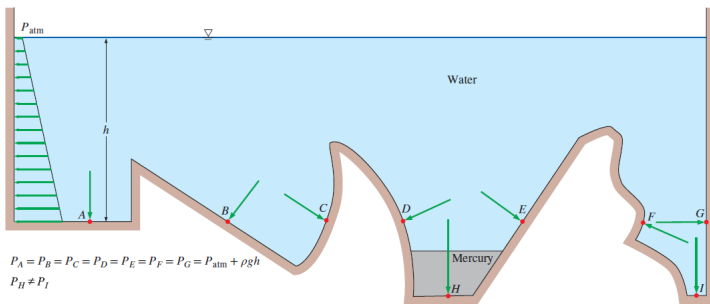
$$\frac{dP}{dz} = -\rho g. \quad (3)$$

**FIGURE 2-27**

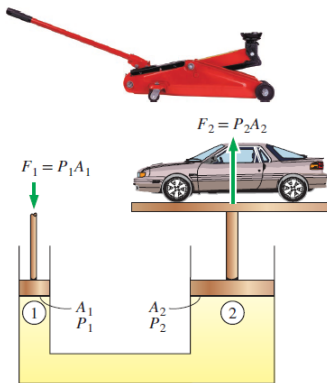
In a room filled with a gas, the variation of pressure with height is negligible.

**FIGURE 2-28**

Pressure in a liquid at rest increases linearly with distance from the free surface.

**FIGURE 2-29**

Under hydrostatic conditions, the pressure is the same at all points on a horizontal plane in a given fluid regardless of geometry, provided that the points are interconnected by the same fluid.

**FIGURE 2-30**

Lifting of a large weight by a small force by the application of Pascal's law. A common example is a hydraulic jack.

(Top) ©Stockbyte/Getty Images



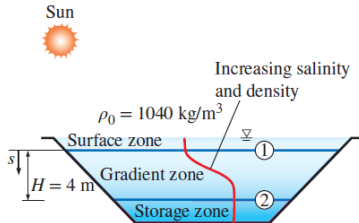
**Problema:**

Lagoas solares são pequenos lagos artificiais, com alguns metros de profundidade, que são usados para armazenar energia solar. A subida de água aquecida (e, portanto, menos densa) para a superfície é evitada pela adição de sal no fundo da lagoa. Numa lagoa solar típica concentração de sal aumenta na zona de gradiente, como mostrado na Fig. 2-35. A variação da densidade é dada pela seguinte equação

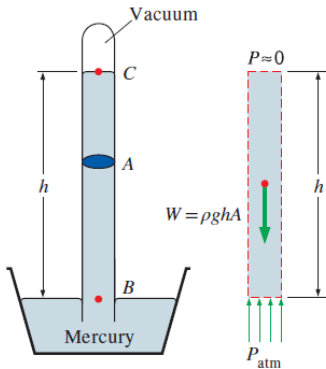
$$\rho = \rho_0 \sqrt{1 + \tan^2 \left( \frac{\pi s}{4H} \right)},$$

onde  $\rho_0$  é a densidade na superfície da água,  $s$  é a distância medida para baixo a partir do topo da zona de gradiente, e  $H$  é a espessura da zona de gradiente.

Sendo  $H = 4 \text{ m}$ ,  $\rho_0 = 1040 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$  e  $0.8 \text{ m}$  a espessura da zona de superfície, calcule a pressão manométrica na parte inferior da zona de gradiente.



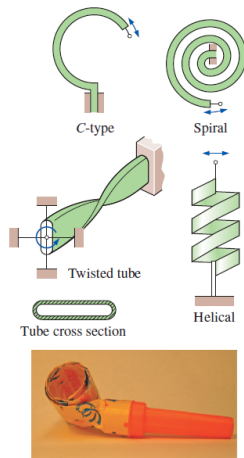
**FIGURE 2-35**  
Schematic for Example 2-5.



**FIGURE 2-31**  
The basic barometer.



**FIGURE 2-37**  
A simple U-tube manometer, with high pressure applied to the right side.



**FIGURE 2-43**

Various types of Bourdon tubes used to measure pressure. They work on the same principle as party noisemakers (bottom photo) due to the flat tube cross section.