

TMEC153 – REFRIGERAÇÃO E CLIMATIZAÇÃO

CAPÍTULO 01 – INTRODUÇÃO

Prof. Felipe R. Loyola
Disciplina: Refrigeração e Climatização
1º Semestre de 2020

Objetivos

- O ensino da **refrigeração** e **condicionamento de ar** utiliza conceitos e aplicações de Termodinâmica e Transferência de Calor.
- A aula de hoje busca trazer alguns conceitos básicos que servirão como introdução a projetos e análise de sistemas térmicos.
- Os conceitos vistos aqui serão utilizados ao longo das próximas aulas.

Propriedades Termodinâmicas

- Qualquer **quantidade física** pode ser caracterizada por dimensões.
- As magnitudes relacionadas a essas dimensões são chamadas de **unidades**.
- Algumas dimensões básicas como massa, comprimento, tempo e temperatura são fundamentais (**primárias**), enquanto outras como energia, volume e velocidade são expressas em termos de dimensões fundamentais, sendo chamadas de **secundárias** (derivadas)

TABLE 1–1

The seven fundamental (or primary) dimensions and their units in SI

Dimension	Unit
Length	meter (m)
Mass	kilogram (kg)
Time	second (s)
Temperature	kelvin (K)
Electric current	ampere (A)
Amount of light	candela (cd)
Amount of matter	mole (mol)

TABLE 1–2

Standard prefixes in SI units

Multiple	Prefix
10^{12}	tera, T
10^9	giga, G
10^6	mega, M
10^3	kilo, k
10^2	hecto, h
10^1	deka, da
10^{-1}	deci, d
10^{-2}	centi, c
10^{-3}	milli, m
10^{-6}	micro, μ
10^{-9}	nano, n
10^{-12}	pico, p

Propriedades Termodinâmicas

$$1 \text{ lbm} = 0,45359 \text{ kg}$$

$$1 \text{ pé} = 0,3048 \text{ m}$$

Trabalho = Força \times Distância

$$1 \text{ J} = 1 \text{ N}\cdot\text{m}$$

$$1 \text{ cal} = 4,1868 \text{ J}$$

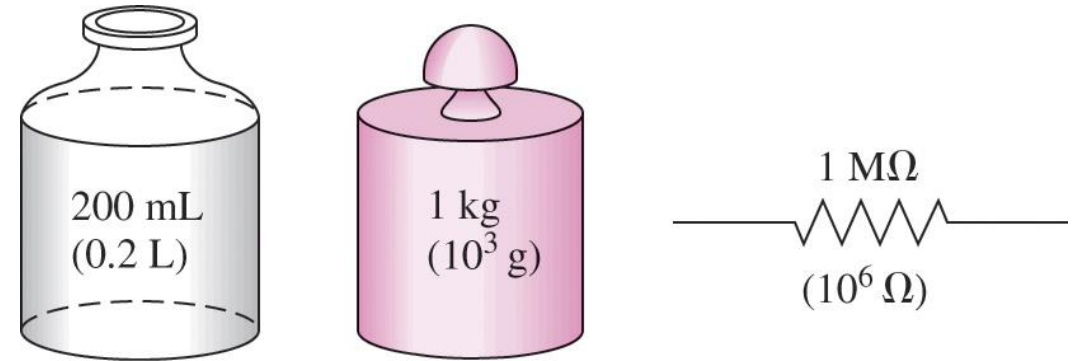
$$1 \text{ Btu} = 1,0551 \text{ kJ}$$

Força = massa \times aceleração

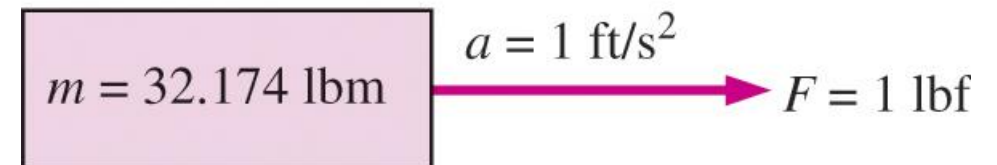
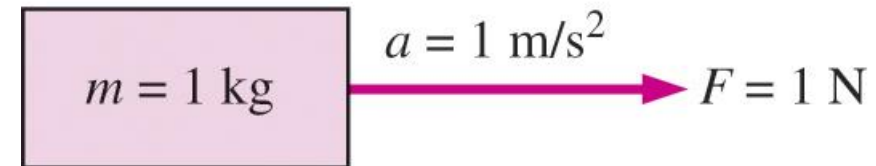
$$F = m a$$

$$1 \text{ N} = 1 \text{ kg}\cdot\text{m/s}^2$$

$$1 \text{ lbf} = 32,174 \text{ lbm}\cdot\text{ft/s}^2$$



As unidades do Sistema Internacional (SI) tem os prefixos utilizados em todos os ramos da engenharia



A definição das unidades de força

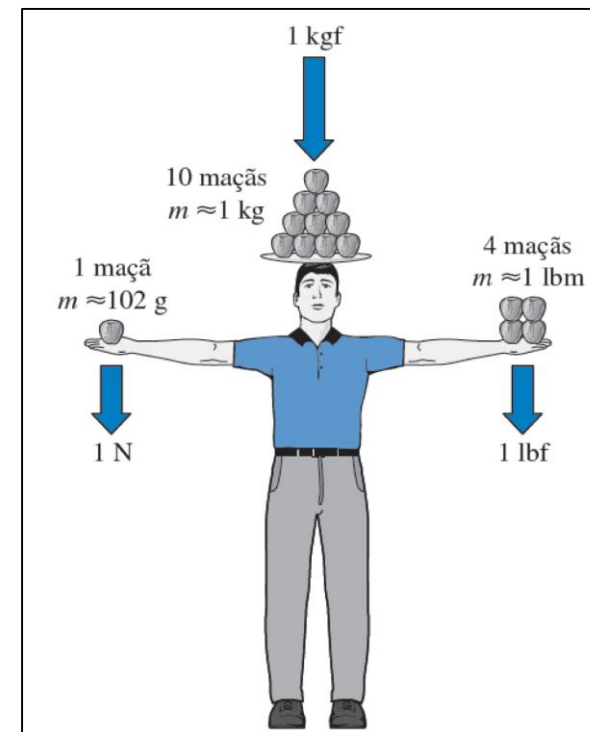
Propriedades Termodinâmicas



Um corpo com peso de 60 kgf na Terra vai pesar somente 10 kgf na Lua

$$W = mg \quad (\text{N})$$

W peso
 m massa
 g aceleração gravitacional



kg

$$g = 9,807 \text{ m/s}^2$$
$$W = 9,807 \text{ kg} \cdot \text{m/s}^2$$
$$= 9,807 \text{ N}$$
$$= 1 \text{ kgf}$$

lbm

$$g = 32,174 \text{ pé/s}^2$$
$$W = 32,174 \text{ lbm} \cdot \text{pé/s}^2$$
$$= 1 \text{ lbf}$$

O peso de uma unidade de massa no nível do mar

As magnitudes relativas das unidades de força: Newton (N), kilograma-força (kgf) e libra-força (lbf)

Propriedades Termodinâmicas

Todas as equações devem ser dimensionalmente **homogêneas**

Razões de conversão de unidades

Todas unidades não-primárias (secundárias) podem ser combinações de unidades primárias

Unidades de força, por exemplo, podem ser expressas por:

$$N = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 \text{ e } \text{lbf} = 32,174 \text{ lbm} \cdot \text{ft/s}^2$$

Elas também podem ser expressas mais convenientemente como **razões de conversão de unidades** por:

$$\frac{N}{\text{kg} \cdot \text{m/s}^2} = 1 \quad \text{e} \quad \frac{\text{lbf}}{32.174 \text{ lbm} \cdot \text{ft/s}^2} = 1$$

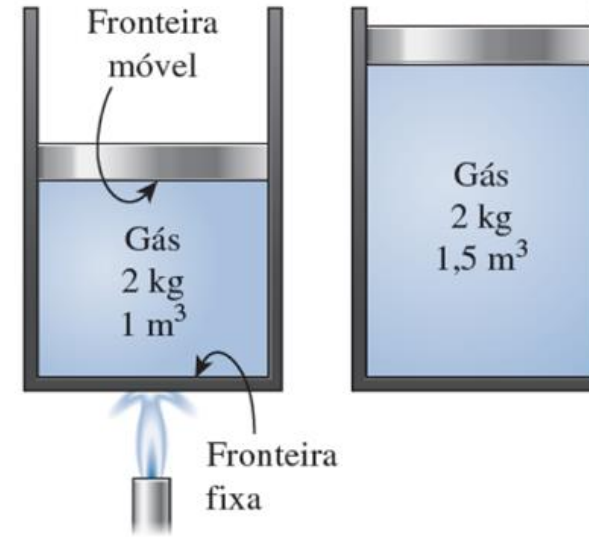
Unidades de conversão de unidades são identicamente iguais a 1 e não possuem unidades, assim as razões (e suas inversas) podem ser inseridas convenientemente em qualquer cômputo para conversão de unidades



Todos os termos de uma equação devem ter a mesma unidade, para que ela seja dimensionalmente homogênea.
BLONDIE©KING FEATURES SYNDICATE.

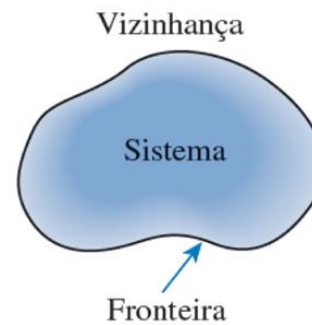
Sistemas e Volumes de Controle

- **Sistema:** A quantidade de matéria ou uma região do espaço escolhida para estudo
- **Vizinhança:** A massa ou região além do Sistema
- **Fronteira:** A fronteira real ou imaginária que separa um Sistema de sua vizinhança
- A fronteira de um Sistema pode ser fixa ou móvel
- Sistemas podem ser considerados abertos ou fechados

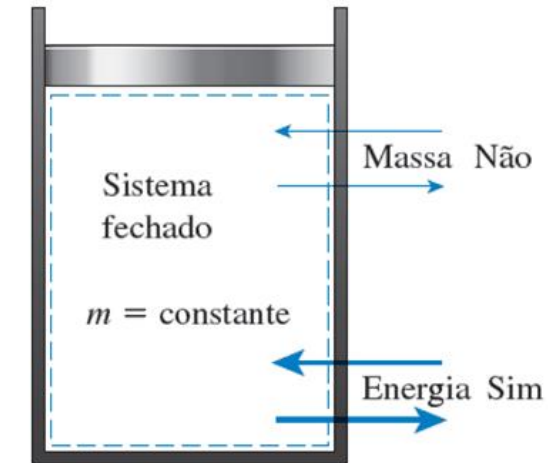


Um sistema fechado com uma fronteira móvel.

- **Sistema fechado (massa de controle):** Uma quantidade fixa de massa, onde nenhuma quantidade de massa pode cruzar a fronteira

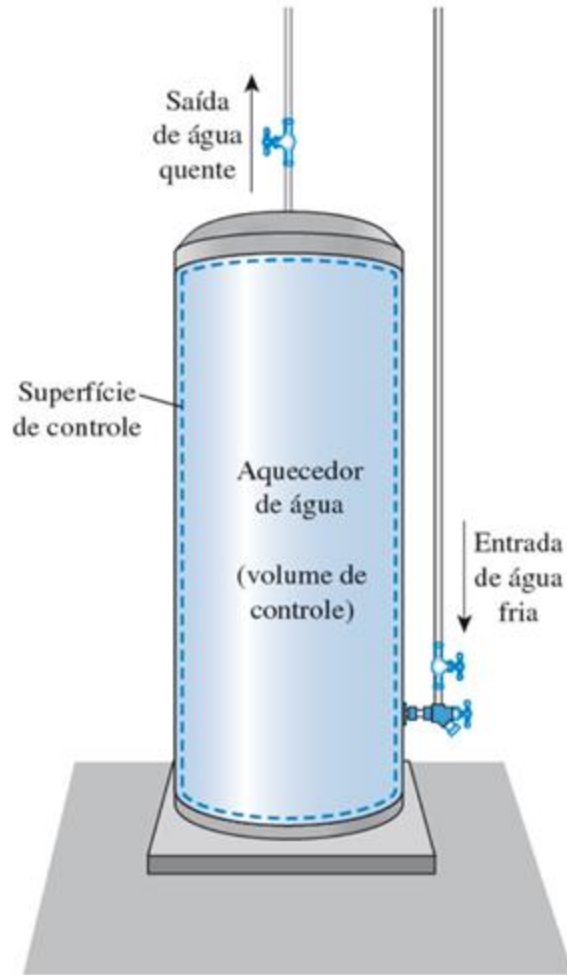


Sistema, vizinhança, e fronteira.



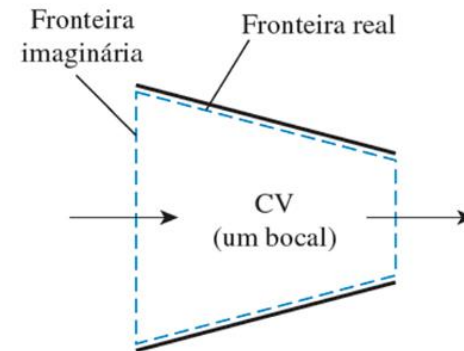
A massa não pode atravessar as fronteiras de um sistema fechado, mas a energia pode.

Sistemas e Volumes de Controle

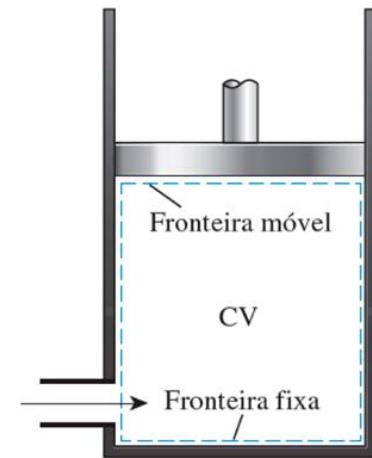


Sistema aberto (um volume de controle) com uma entrada e uma saída.

- **Sistema aberto (volume de controle):** Uma região do espaço selecionada
- Ela normalmente envolve um dispositivo que trabalha com escoamento de massa, como compressor, turbina ou bocal.
- Ambas massa e energia podem atravessar as fronteiras de um volume de controle
- **Superfície de controle:** As fronteiras de um volume de controle. Pode ser real ou imaginária



(a) Um volume de controle com fronteiras real e imaginária

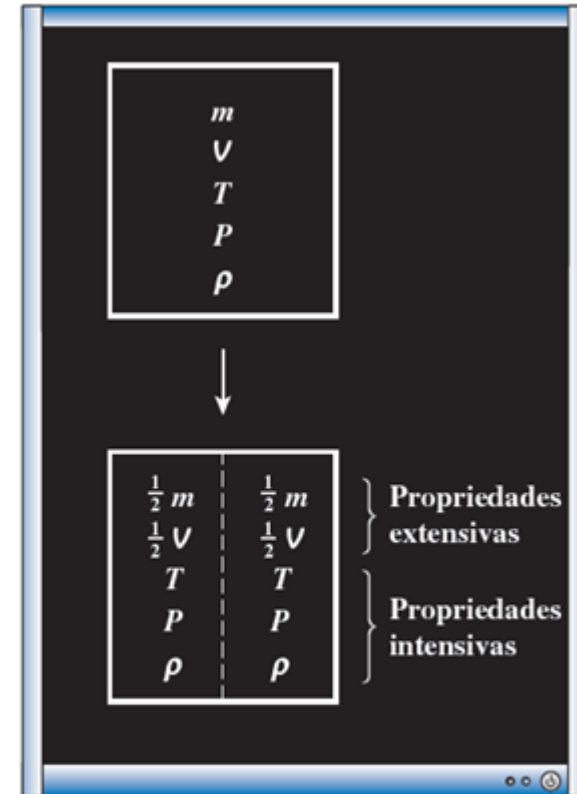


(b) Um volume de controle com fronteiras fixa e móvel

Um volume de controle pode conter fronteiras fixas, móveis, reais e imaginárias.

Propriedades de um sistema

- **Propriedade:** Qualquer característica de um sistema
- Algumas propriedades familiares são a pressão P , temperatura T , volume V e massa m
- Propriedades podem ser consideradas extensivas ou intensivas
- **Propriedades intensivas:** Aquelas que são independentes da massa de um Sistema, como a temperatura, pressão e densidade
- **Propriedades extensivas:** Aqueças cujos valores dependem do tamanho ou da extensão de um Sistema
- **Propriedades específicas:** Propriedades extensivas por unidade de massa.



Critério para diferenciar propriedades intensivas e extensivas.

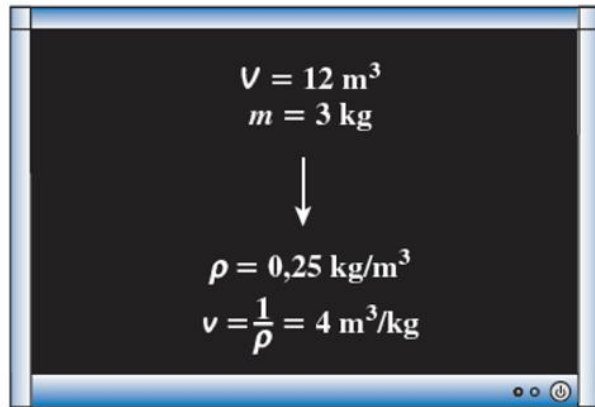
Propriedades Termodinâmicas

Densidade

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (\text{kg/m}^3)$$

Volume específico

$$v = \frac{V}{m} = \frac{1}{\rho}$$



Densidade é massa por unidade de volume; volume específico é volume por unidade de massa.

Gravidade específica (SG):

A razão entre a densidade da substância e a densidade de uma substância padrão a uma temperatura específica (normalmente água a 4°C).

$$SG = \frac{\rho}{\rho_{\text{H}_2\text{O}}}$$

TABLE 1-3

Specific gravities of some substances at 0°C

Substance	SG
Water	1.0
Blood	1.05
Seawater	1.025
Gasoline	0.7
Ethyl alcohol	0.79
Mercury	13.6
Wood	0.3–0.9
Gold	19.2
Bones	1.7–2.0
Ice	0.92
Air (at 1 atm)	0.0013

Peso específico: O peso de uma unidade de volume de uma substância

$$\gamma_s = \rho g \quad (\text{N/m}^3)$$

Propriedades Termodinâmicas

- Exemplo: Qual a massa de ar contida em um recinto de dimensões 4 x 6 x 3 m se o volume específico do ar é $0,83 \text{ m}^3 / \text{kg}$?

Propriedades Termodinâmicas

- Todas as escalas de temperatura são baseadas em estados facilmente reproduzíveis como: os pontos de congelamento e ebulição da água: o ponto do gelo e ponto de vapor
- **Ponto de gelo:** Mistura de água e gelo que está em equilíbrio com ar saturado de vapor à pressão de 1 atm (0°C ou 32°F)
- **Ponto de vapor:** Uma mistura de água líquida e vapor (sem ar) em equilíbrio à pressão de 1 atm (100°C ou 212°F)
- **Escala Celsius:** na SI
- **Escala Fahrenheit:** No Sistema inglês
- **Escala Termodinâmica de Temperatura:** Uma escala de temperatura que é independente das propriedades de qualquer substância
- **Escala Kelvin**(SI) **Escala Rankine** (Inglês)
- Uma escala de temperatura é praticamente idêntica à escala Kelvin é a **escala de temperatura de gás-ideal**. As temperaturas nessa escala são medidas com um termômetro a gás de volume constante

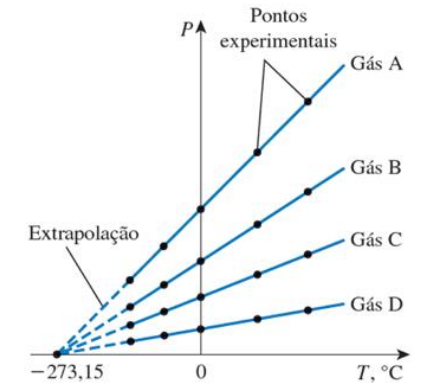
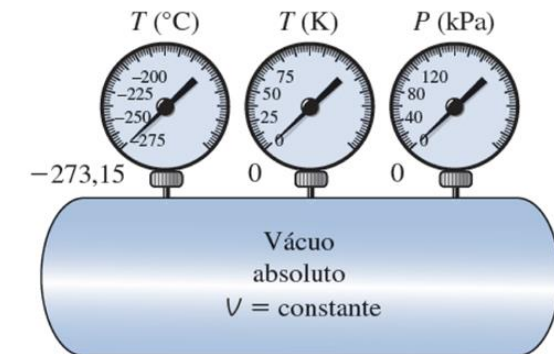
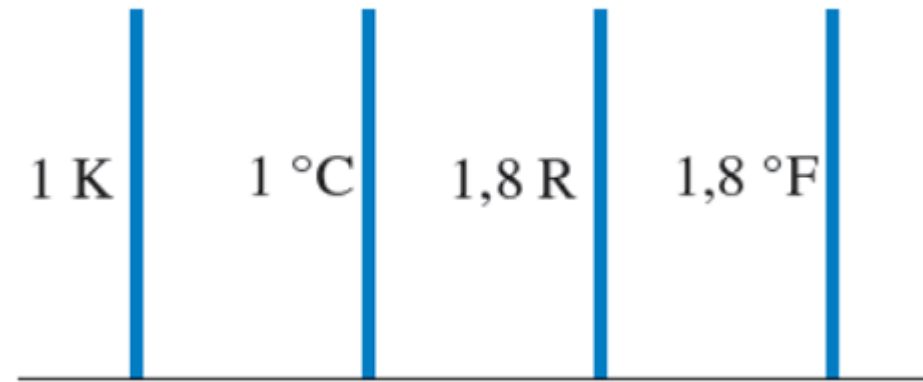
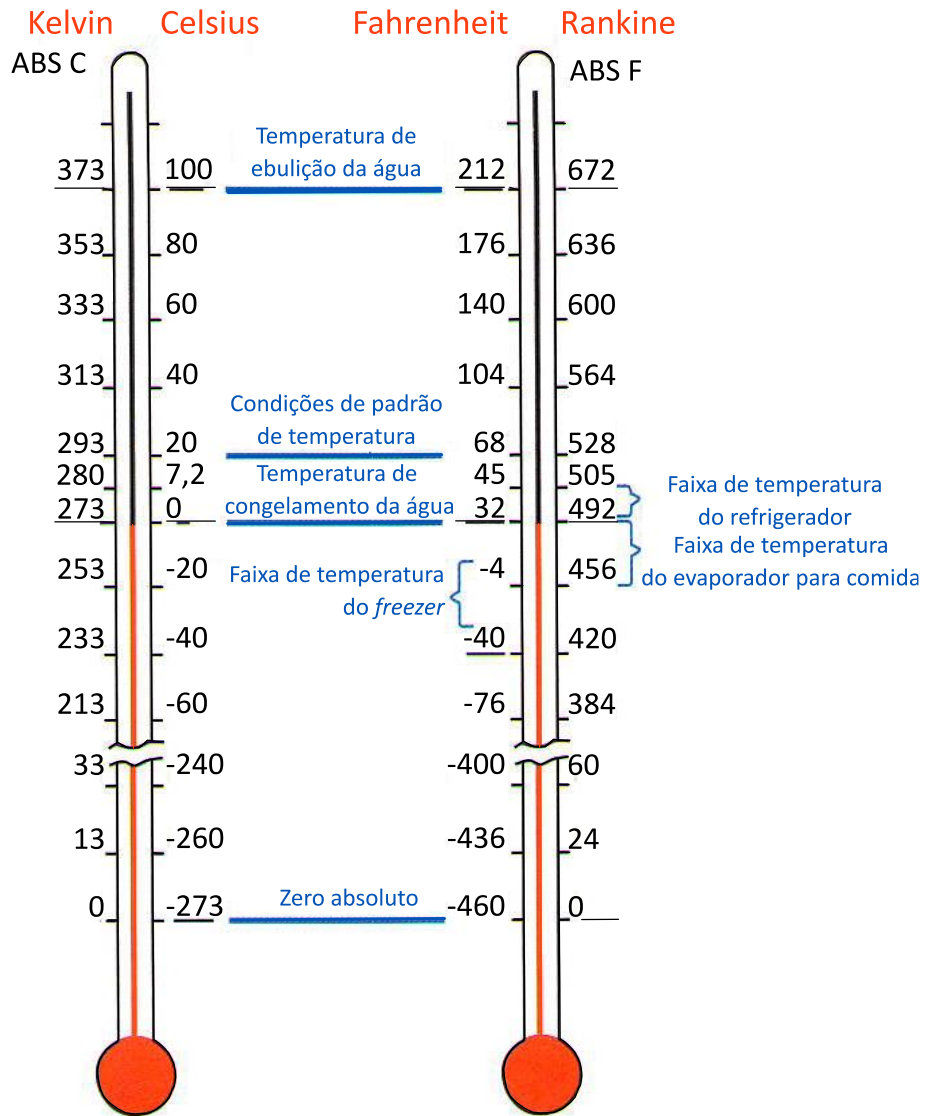


FIGURA 1-36 Curvas de P versus T dos dados experimentais obtidos de um termômetro a gás de volume constante, usando quatro gases diferentes a diferentes pressões (baixas pressões).



Um termômetro a gás de volume constante leria $-273,15$ °C à pressão absoluta zero.

Propriedades Termodinâmicas



Comparação das magnitudes de várias unidades de temperatura.

Propriedades Termodinâmicas

Pressão: Força normal de um fluido exercida por unidade de área



Alguns medidores de pressão básicos.

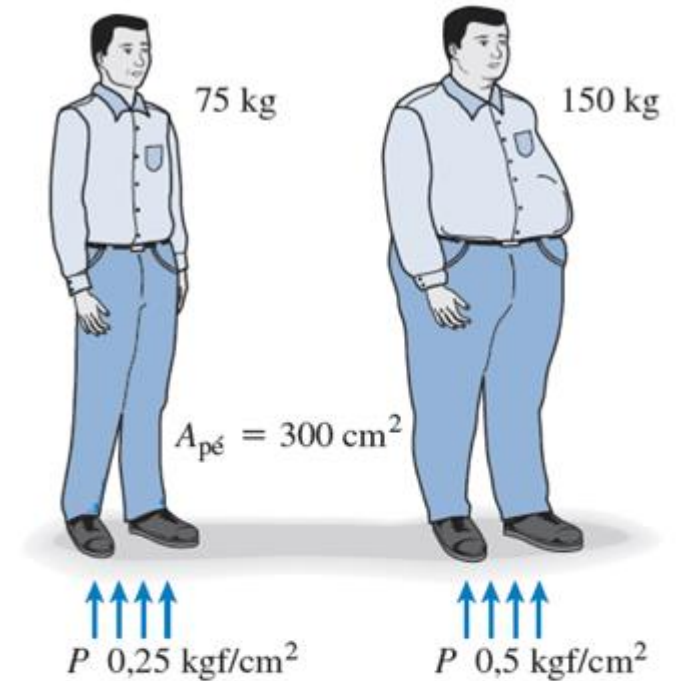
Dresser Instruments, Dresser, Inc. Usada com permissão.

$$1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$$

$$1 \text{ bar} = 10^5 \text{ Pa} = 0.1 \text{ MPa} = 100 \text{ kPa}$$

$$1 \text{ atm} = 101,325 \text{ Pa} = 101.325 \text{ kPa} = 1.01325 \text{ bars}$$

$$\begin{aligned} \text{kgf/cm}^2 &= 9.807 \text{ N/cm}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ N/m}^2 = 9.807 \times 10^4 \text{ Pa} \\ &= 0.9807 \text{ bar} \\ &= 0.9679 \text{ atm} \end{aligned}$$



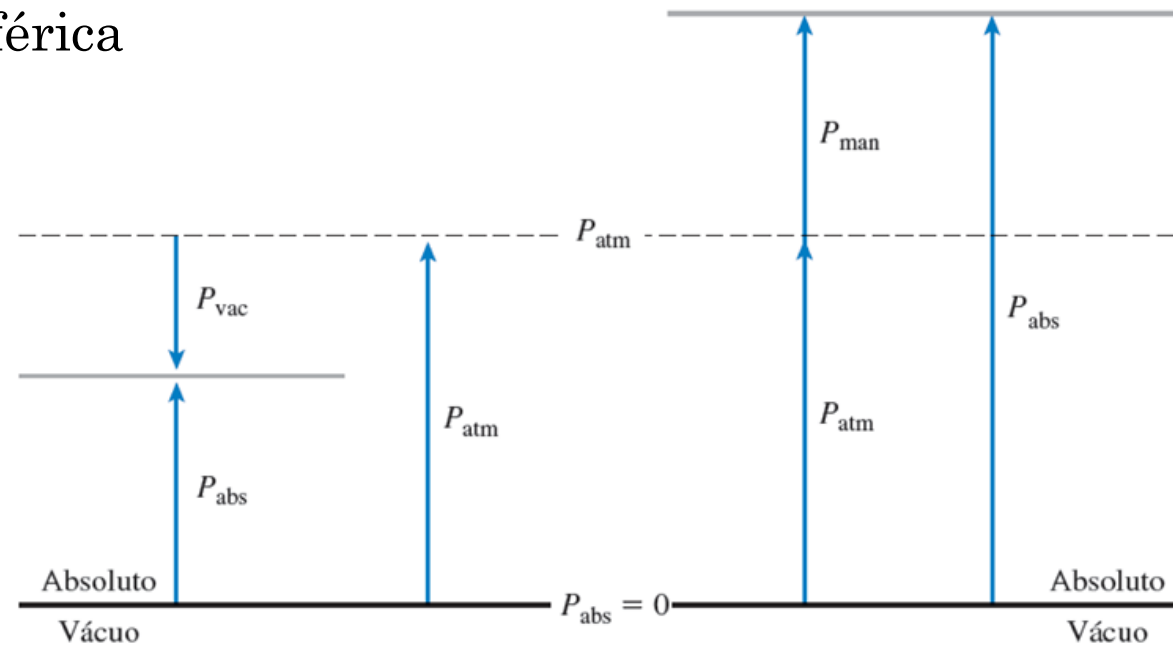
$$P = \sigma_n = \frac{W}{A_{\text{pé}}} = \frac{75 \text{ kgf}}{300 \text{ cm}^2} = 0,25 \text{ kgf/cm}^2$$

A tensão normal (ou “pressão”) sobre os pés de uma pessoa gorda é muito maior que a pressão sobre os pés de uma pessoa magra.

Propriedades Termodinâmicas

- **Pressão absoluta:** A pressão real dada em determinada posição. É medida com relação ao vácuo absoluto (i.e., pressão zero absoluta).
- **Pressão manométrica:** A diferença entre a pressão absoluta e a pressão local atmosférica. A maioria dos dispositivos medidores de pressão são calibrados para marcar a leitura zero na pressão atmosférica, mostrando a pressão manométrica.
- **Pressão de vácuo:** Pressões abaixo da pressão atmosférica

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

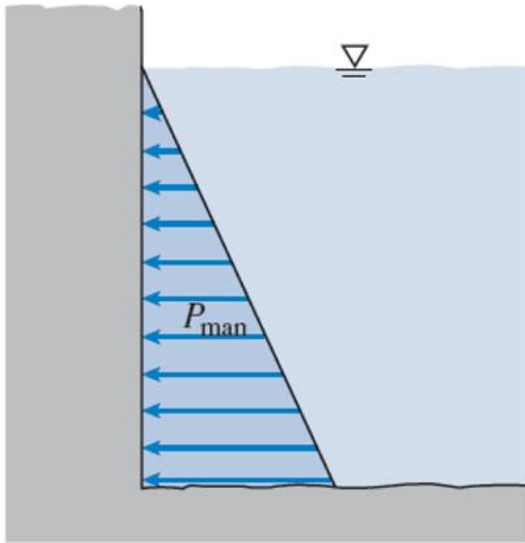


Pressões absoluta, manométrica e de vácuo.

Propriedades Termodinâmicas

$$\Delta P = P_2 - P_1 = \rho g \Delta z = \gamma_s \Delta z$$

$$P = P_{\text{atm}} + \rho g h \quad \text{or} \quad P_{\text{gage}} = \rho g h$$



A pressão de um fluido em repouso aumenta com a profundidade (como resultado do peso adicional).

Quando a variação da densidade com a elevação é conhecida

$$\Delta P = P_2 - P_1 = - \int_1^2 \rho g dz$$

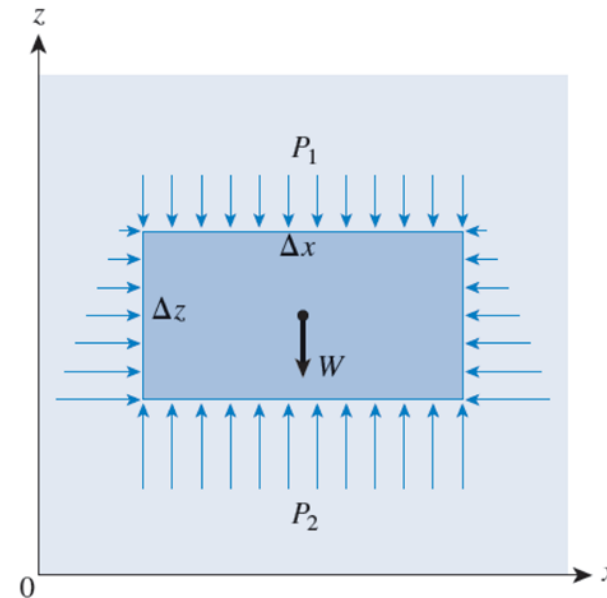
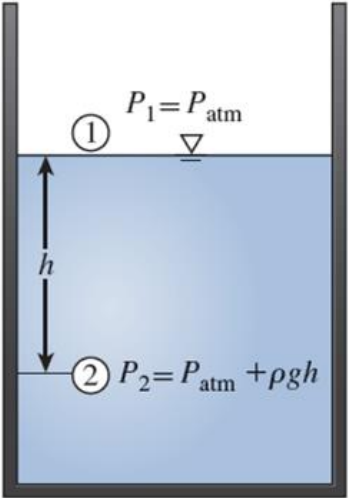
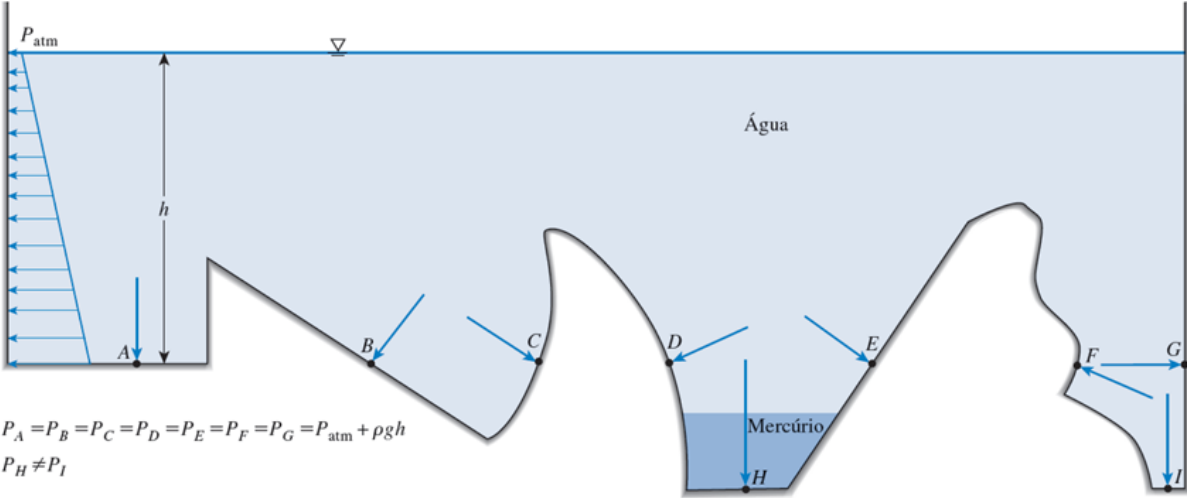


Diagrama de corpo livre de um elemento retangular de fluido em equilíbrio.

Propriedades Termodinâmicas

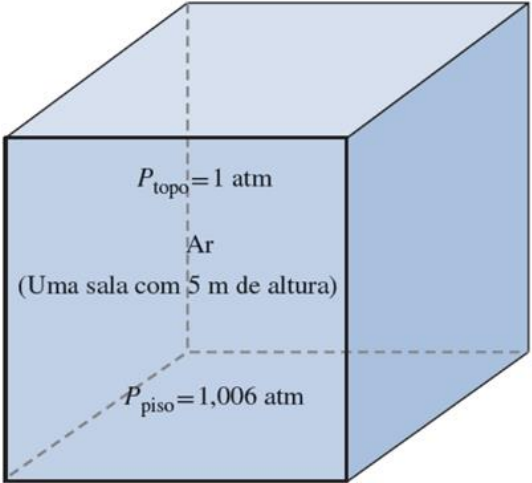


A pressão de um líquido em repouso aumenta linearmente com a distância de uma superfície livre.



$P_A = P_B = P_C = P_D = P_E = P_F = P_G = P_{atm} + \rho g h$
 $P_H \neq P_I$

A pressão é a mesma em todos os pontos de um plano horizontal em um fluido, independentemente da geometria, desde que os pontos estejam interconectados pelo mesmo fluido.



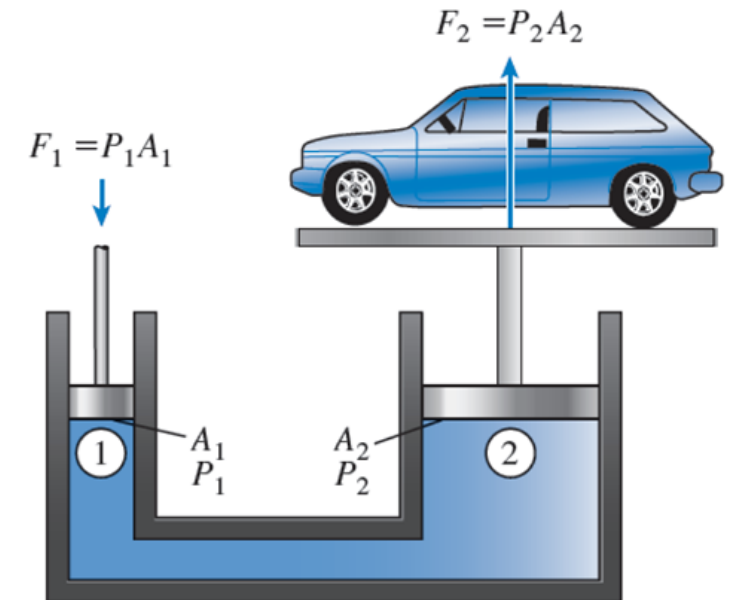
Em uma sala ocupada por um gás, a variação da pressão com a altura é desprezível.

Propriedades Termodinâmicas

Lei de Pascal: A pressão aplicada a um fluido confinado aumenta a pressão ao longo do fluido na mesma quantidade

$$P_1 = P_2 \rightarrow \frac{F_1}{A_1} = \frac{F_2}{A_2} \rightarrow \frac{F_2}{F_1} = \frac{A_2}{A_1}$$

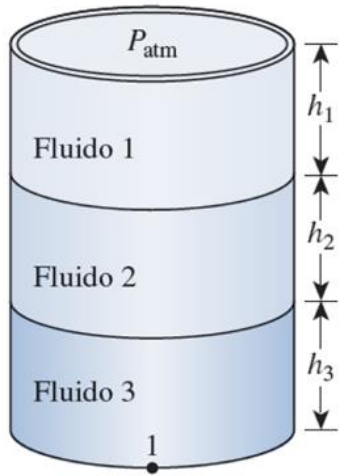
A razão entre áreas A_2/A_1 é chamada de **vantagem mecânica ideal** do levantamento hidráulico



Elevação de um grande peso por meio da utilização de uma pequena força pela aplicação da lei de Pascal.

Propriedades Termodinâmicas

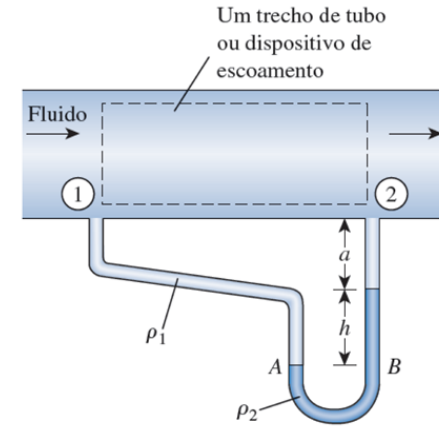
O manômetro é comumente utilizado para medir **variações de pressão** de pequena e moderadas intensidades. Um manômetro contém um ou mais fluidos, tais como mercúrio, água, álcool ou



Em camadas de fluidos

sobrepostas, a variação da pressão em uma camada de fluido de densidade ρ e altura h é ρgh .

$$P_{\text{atm}} + \rho_1 gh_1 + \rho_2 gh_2 + \rho_3 gh_3 = P_1$$

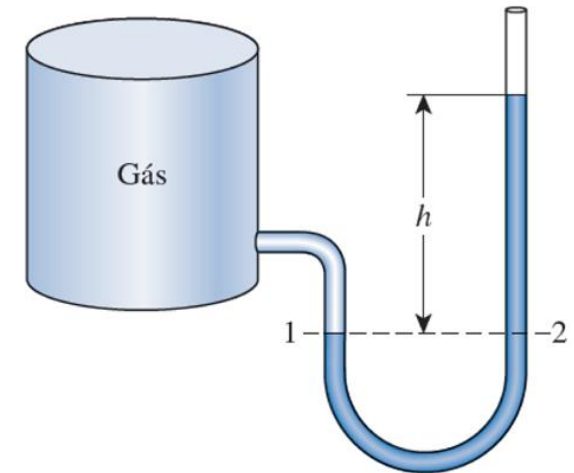


Medindo a queda de pressão através de um trecho de tubo ou de um dispositivo de escoamento por meio de um manômetro diferencial.

$$P_1 + \rho_1 g(a + h) - \rho_2 gh - \rho_1 ga = P_2$$

$$P_1 - P_2 = (\rho_2 - \rho_1)gh$$

$$P_2 = P_{\text{atm}} + \rho gh$$

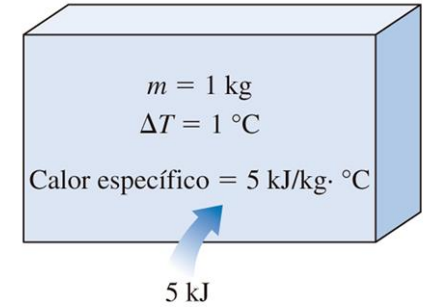


O manômetro de coluna básica.

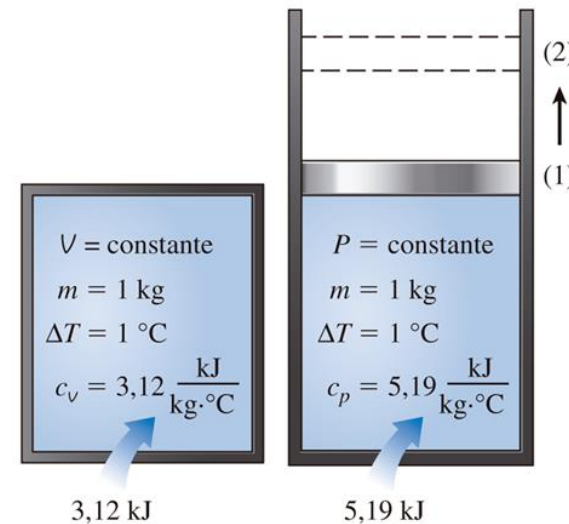
Calor específico

- O **calor específico** de uma substância é a **energia necessária** para elevar 1 K a temperatura de uma massa unitária dessa substância. Para tanto, o modo que o calor é trocado deve ser descrito.
- O calor específico mais comumente utilizado em refrigeração é o a pressão constante (c_p), enquanto o dado a volume constante (c_v) é menos utilizado.
- Alguns valores aproximados:

$$c_p = \begin{cases} 1,00 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} & \text{ar seco} \\ 4,19 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} & \text{água} \\ 1,88 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K} & \text{vapor d'água} \end{cases}$$



Calor específico é a energia necessária para elevar em um grau a temperatura de uma unidade de massa de uma substância em um determinado processo.



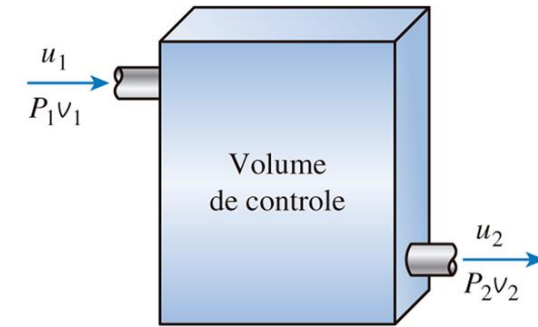
Calores específicos ao volume e a pressão constantes c_v e c_p (os valores apresentados são do gás hélio).

Propriedades Termodinâmicas

- Exemplo: Qual a taxa de transferência de calor em um aquecedor de água se 0,4 kg/s de água entram a 82°C e deixam o aquecedor a 93°C?

Entalpia

- Se ao processo a **pressão constante** for imposta a condição que nenhum trabalho seja realizado sobre a substância, o **calor** adicionado ou removido por unidade de massa é igual à variação de **entalpia**.
- Os valores de entalpia são baseados em um estado de referência arbitrariamente escolhido.
- A entalpia pode expressar a **taxa de transferência de calor** em processos onde ocorre mudança de fase (evaporação ou condensação), como por exemplo serpentinas de aquecimento de ar onde o vapor de água se condensa.



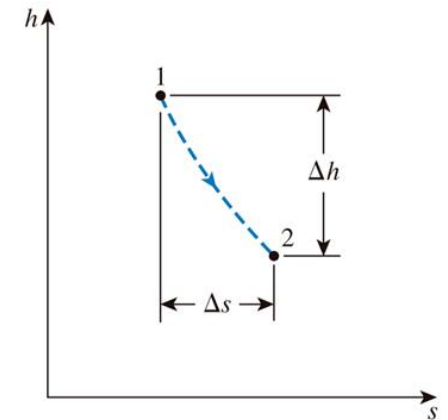
A combinação $u + Pv$ é geralmente encontrada na análise de volumes de controle.

Propriedades Termodinâmicas

- Exemplo: Água, com vazão em $0,06 \text{ kg/s}$, entra em uma caldeira a 90°C , sendo sua entalpia de $376,9 \text{ kJ/kg}$. A água deixa a caldeira como vapor a 100°C . Qual é a taxa de calor transferido na caldeira?

Entropia

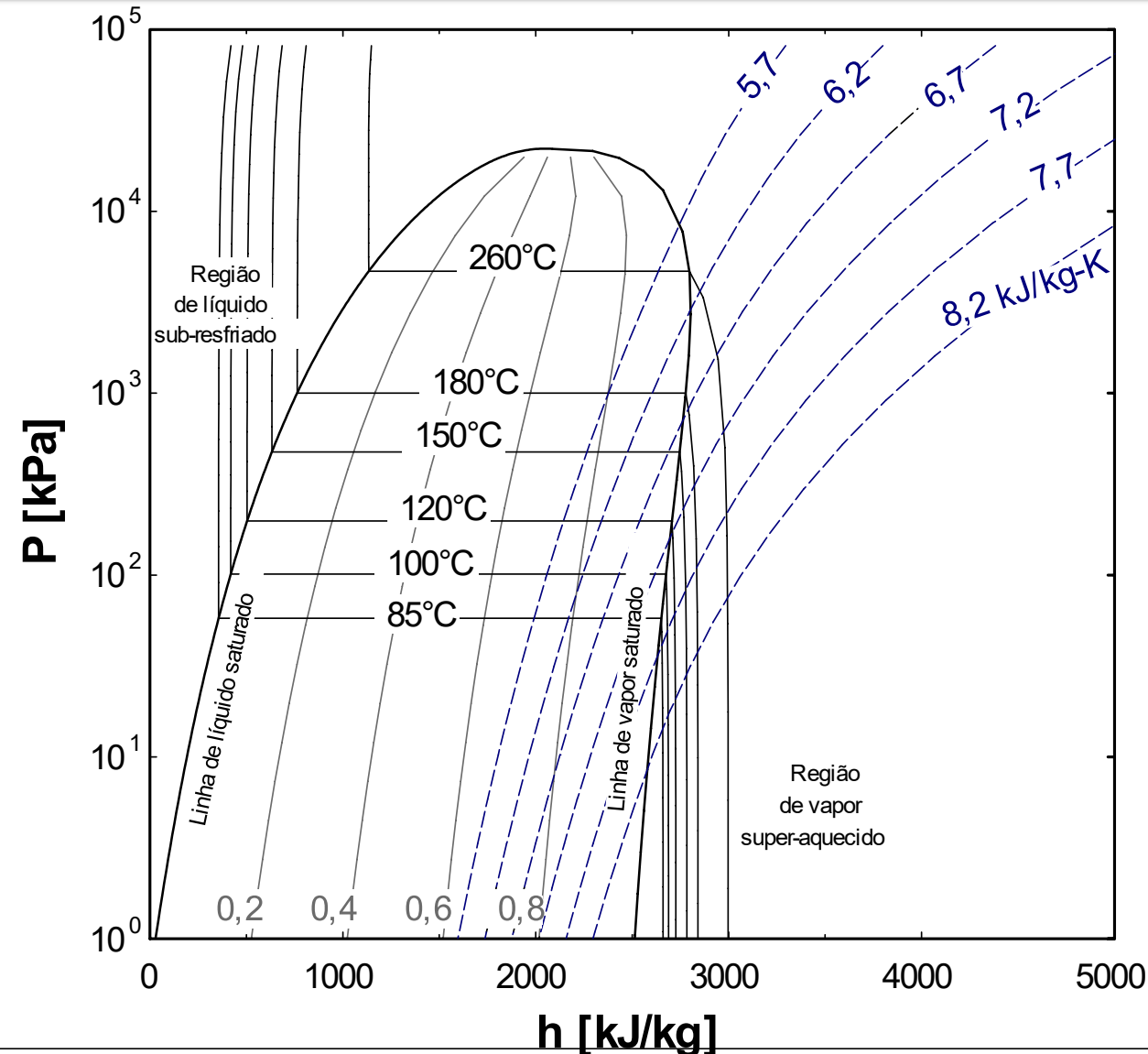
- Para esse curso, as implicações da propriedade entropia serão:
- A compressão ou expansão sem atrito de um gás ou vapor sem intercâmbio de calor é um processo em que a entropia se mantém constante
- No processo acima, a variação de entalpia representa o trabalho por unidade de massa necessário para a compressão ou obtido da expansão.



Nos dispositivos adiabáticos com escoamento em regime permanente, a distância vertical Δh em um diagrama $h-s$ é uma medida do trabalho, e a distância horizontal Δs é uma medida das irreversibilidades.

Propriedades características do equilíbrio Líquido-Vapor

- A maioria dos sistemas de aquecimento ou resfriamento operam com substâncias que mudam da fase líquido para a fase vapor e vice-versa durante um ciclo completo. As substâncias mais comuns são a água e os refrigerantes. As pressões, temperaturas e entalpias são as propriedades mais importantes.



Propriedades Termodinâmicas


- Exemplo: Qual a transferência de calor para a água de uma caldeira, se a vazão de 9 kg/s e a água entra no estado líquido a 50°C e deixa a caldeira como vapor superaquecido a 150°C? O processo ocorre à pressão atmosférica normal.

A lei dos gases ideais

- Para um **gás ideal**, a pressão, a temperatura e o volume específico são relacionados pela seguinte equação

$$pv = RT$$

- Nas aplicações de refrigeração e ar condicionado, o **ar seco** e o **vapor** (altamente) superaquecido poderão ser admitidos como gases ideais. O que não pode ser considerado para vapores de água e de refrigerantes próximos da saturação.

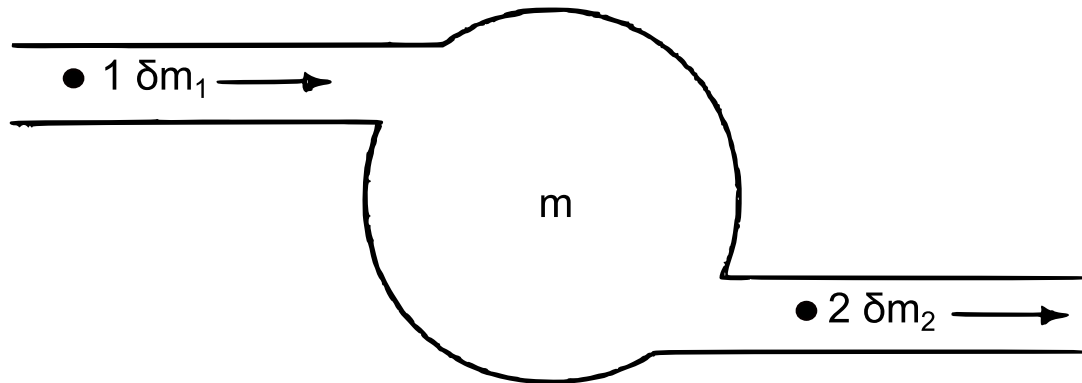


<u>Substância</u>	<u>R, kJ/kg·K</u>
Ar	0,2870
Hélio	2,0769
Argônio	0,2081
Nitrogênio	0,2968

Diferentes substâncias têm diferentes constantes do gás.

Conservação da Massa

- A **massa** não é criada e nem destruída por qualquer processo. Ela pode ser **armazenada** ou **transferida** do sistema para o meio, mas tais processos devem ser considerados em um balanço global.



- Expressando o fluxo de massa por $\dot{m} = \frac{\delta m}{\delta t}$
- A taxa de variação da massa em um dado instante pode ser descrita por:

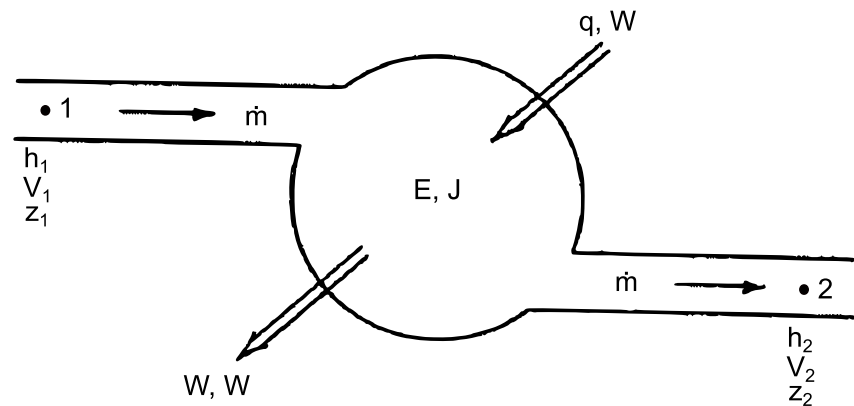
$$\frac{\delta m}{\delta t} = \dot{m}_2 - \dot{m}_1 = 0$$

- Se a taxa de variação da massa do sistema é nula, então:

$$\dot{m}_2 = \dot{m}_1$$

Conservação da Energia para R.P.

- O balanço de **energia** pode ser descrito como a **taxa de energia** que entra com o escoamento no ponto 1, adicionada à taxa com que energia é cedida ao sistema na forma de calor menos a taxa de realização de trabalho e a taxa de energia que deixa o sistema com o escoamento pelo ponto 2, é igual à taxa de variação de energia do volume de controle A



$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + q - \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) - W = \frac{dE}{dt}$$

- Para o regime permanente

$$\dot{m} \left(h_1 + \frac{V_1^2}{2} + gz_1 \right) + q = \dot{m} \left(h_2 + \frac{V_2^2}{2} + gz_2 \right) + W$$

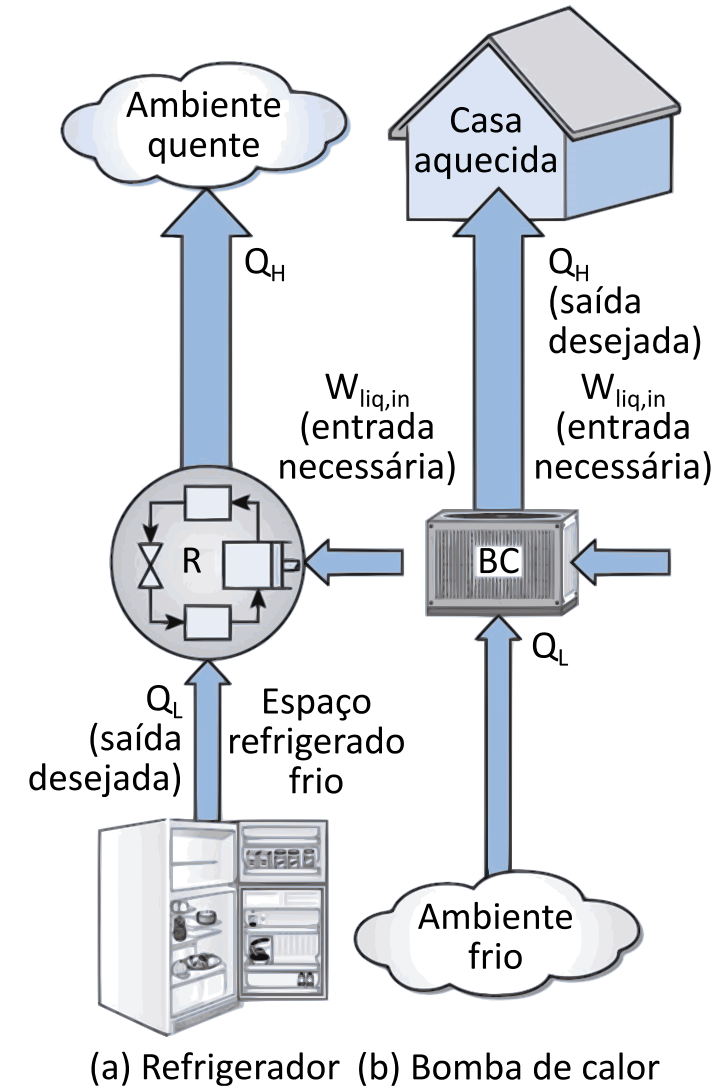
Aquecimento e resfriamento

- Na maioria dos processos de aquecimento e resfriamento, as variações de algumas formas de energia podem ser desprezadas. Em geral, as variações de energia cinética e potencial entre dois pontos são desprezíveis se comparadas à variação de **entalpia**, do **trabalho** realizado ou do **calor trocado**. Caso não haja realização de trabalho no processo ($W = 0$), tem-se:

$$q + \dot{m}h_1 = \dot{m}h_2$$

Ou

$$q = \dot{m}(h_2 - h_1)$$

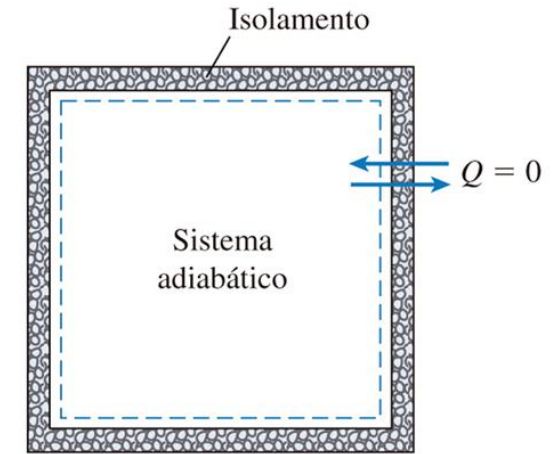


Aquecimento e resfriamento

- Exemplo: Água com vazão de $1,2 \text{ kg/s}$ deve ser resfriada de 10 até 4°C para posteriormente ser fornecida a uma serpentina de resfriamento de um sistema de ar condicionado. Determine a taxa de transferência de calor.

O processo adiabático

- **Adiabático** que dizer que nenhum calor é transferido ao sistema, isto é, $q = 0$.
- Quando as fronteiras de um sistema são **termicamente isoladas** o processo é considerado adiabático, pois a taxa de transferência de calor é muito pequena se comparada aos fluxos líquidos de energia do sistema.



Durante um processo adiabático, um sistema não troca calor com sua vizinhança.

Trabalho de compressão

- Um exemplo que pode ser modelado como adiabático é o de **compressão de gás**. Desconsiderando-se as variações de energia cinética e potencial, tem-se:

$$W = \dot{m}(h_1 - h_2)$$

A potência necessária para a compressão é igual ao produto da vazão pela variação de entalpia. A potência, W , é negativa para o compressor.

Trabalho de compressão

- Exemplo: Determine a potência necessária para comprimir 1,5 kg/s de vapor de água saturada de uma pressão de 34kPa até uma pressão de 150 kPa.

Equação de Bernoulli

- A equação de Bernoulli pode ser obtida a partir da equação da conservação de energia a partir dos argumentos advindos da Segunda Lei da Termodinâmica (equação de Gibbs)

$$Tds = du + pdv$$

Para o caso de um escoamento adiabático de um fluido em duto e sem a realização de trabalho, temos:

$$h + \frac{v^2}{2} + gz = \text{constante}$$

que na sua forma diferencial é:

$$dh = du + p dv + v dp$$

Equação de Bernoulli

- Combinando as equações, temos:

$$Tds = dh - v dp$$

Para um processo isoentrópico

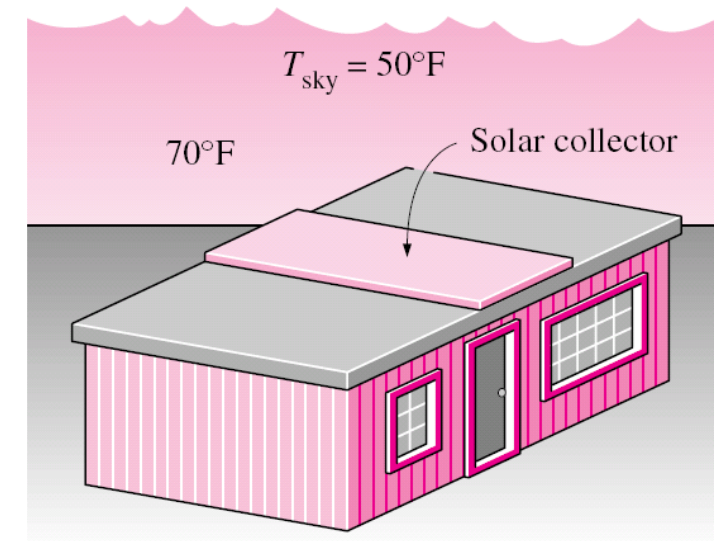
$$dh = v dp = \frac{1}{\rho} dp$$

Assim, para um fluido de densidade considerada constante:

$$\frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz = \text{constante}$$

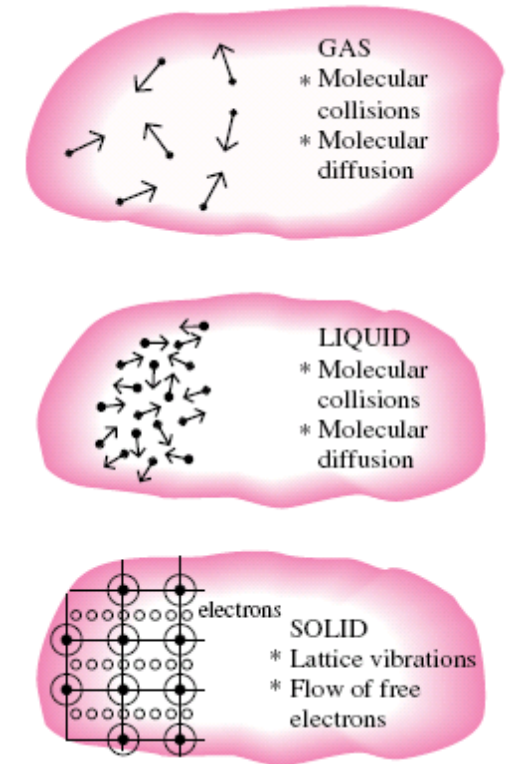
Mecanismos de Transferência de Calor

- O calor pode ser transferido por três mecanismos básicos:
 - **Condução**
 - **Convecção**
 - **Radiação**
- Todos os mecanismos requerem a existência de uma diferença de temperatura
- Todos os mecanismos permitem a troca de calor do meio de maior temperatura para o meio de menor (Segunda Lei da Termodinâmica)



Condução

- A condução é a transferência de energia das partículas com mais energia de uma substância para as partículas adjacentes com menor energia como resultado de interações entre elas.
- A condução pode acontecer em sólidos, líquidos ou gases
 - Em **gases** e **líquidos** a condução acontece devido às **colisões** e aos processos de **difusão** das moléculas durante os movimentos aleatórios
 - Em **sólidos**, a condução acontece devido a combinação da **vibração** das moléculas em sequência e pela energia transportada pelos **elétrons livres**



Condução

Taxa de transferência de calor $\propto \frac{(\text{Área})(\text{Diferença de temperatura})}{\text{Espessura}}$

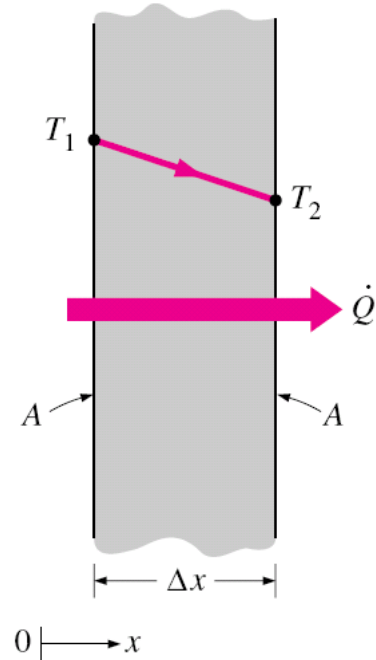
$$\dot{Q}_{cond} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W})$$

Onde a constante de proporcionalidade k é a **condutividade térmica** do material

Na forma diferencial

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{W})$$

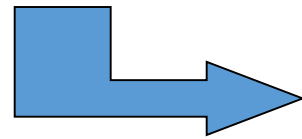
Que é chamada de **Lei de Fourier** de condução



Condutividade Térmica

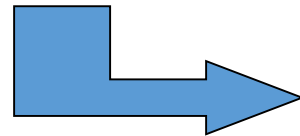
- A condutividade térmica de um material é a medida da capacidade do mesmo em conduzir calor.

- **Alto valor** de condutividade térmica



bom conductor de calor

- **Baixo valor**

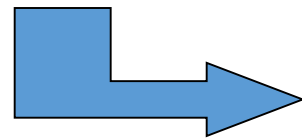


fraco condutor ou isolante.

Condutividade Térmica

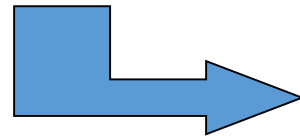
- A condutividade térmica de um material é a medida da capacidade do mesmo em conduzir calor.

- **Alto valor** de condutividade térmica



bom conductor de calor

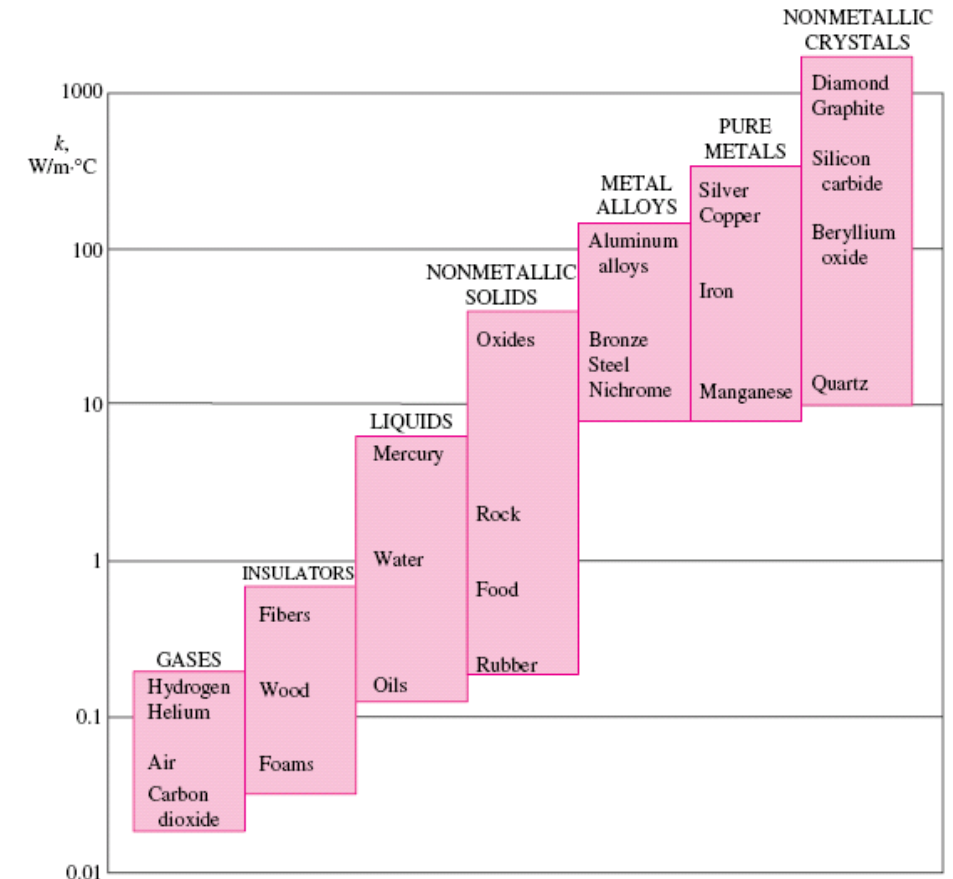
- **Baixo valor**



fraco condutor ou isolante.

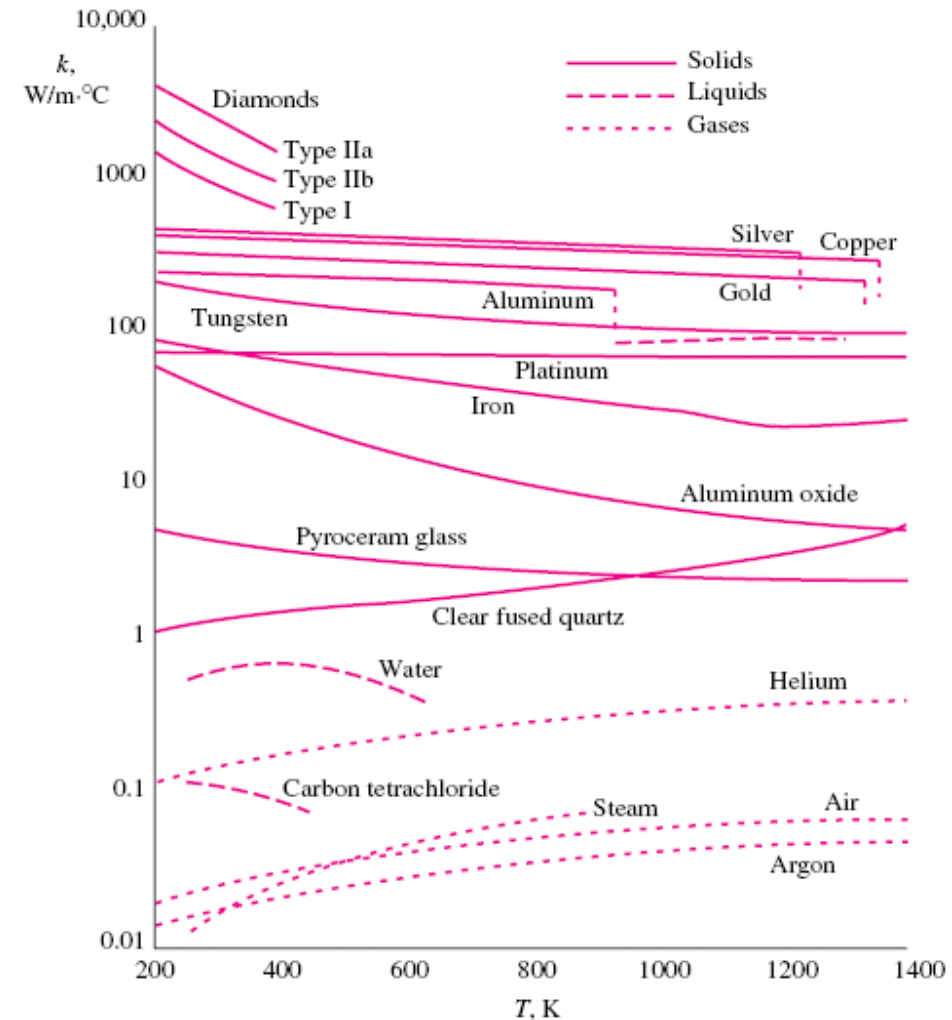
Condutividade Térmica dos Materiais

- As condutividades térmicas dos **gases**, como o ar, variam em um fator de 10^4 daquelas dos **metais puros**, como o cobre.
- **Cristais puros** e **metais** possuem as maiores condutividades térmicas. Enquanto os **gases** e os materiais **isolantes** as menores.



Condutividade Térmica e temperatura

- As **condutividades térmicas** dos materiais **variam com a temperatura**
- A dependência das condutividades com as temperaturas causam uma complexidade considerável na análise do processo de condução



Difusividade Térmica

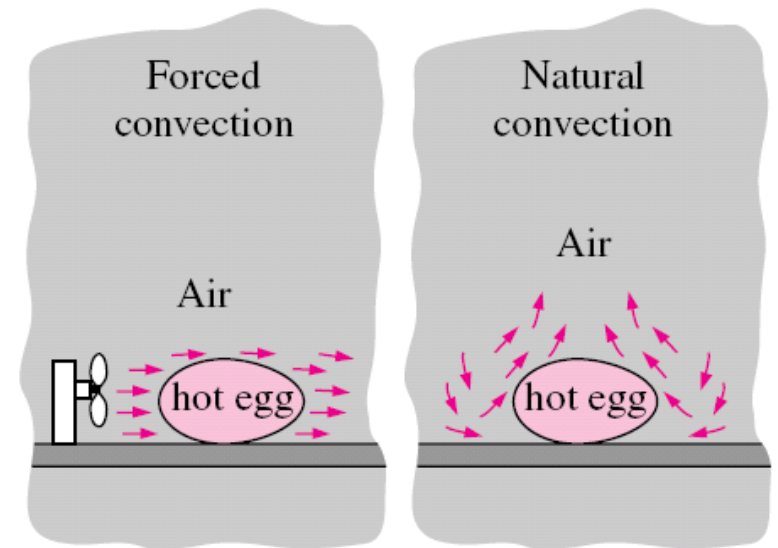
$$\alpha = \frac{\text{Calor conduzido}}{\text{Calor armazenado}} = \frac{k}{\rho c_p} \quad \left(\frac{\text{m}^2}{\text{s}}\right)$$

- A difusividade térmica representa o quão rápido o calor é difundido pelo material
- Ela aparece na análise do processo de **condução de calor transiente**
- Um material que tem uma maior condutividade térmica ou uma menor capacidade calorífica terá uma **grande difusividade térmica**
- Quanto **maior** a difusividade térmica, **mais rápida** será a propagação de calor pelo meio

Convecção

Convecção = **Condução** + **Advecção**
(movimento do fluido)

- Convecção é o modo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um fluido adjacente que está em movimento
- Convecção é comumente classificada em três sub-modos
 - **Convecção forçada**,
 - **Convecção natural** (ou livre),
 - **Mudança de fase** (líquido/vapor, sólido/líquido, etc.)



Convecção

- A taxa de transferência de calor por convecção é expressa pela **Lei de Newton de Resfriamento** por:

$$\dot{Q}_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (W)$$

- h é o coeficiente de transferência de calor por convecção em **W/m²°C**.
- h depende de variáveis como a geometria da superfície, natureza do fluido em movimento, propriedades do fluido e a velocidade média do mesmo

TABLE 1-5

Typical values of convection heat transfer coefficient

Type of convection	h , W/m ² · °C*
Free convection of gases	2–25
Free convection of liquids	10–1000
Forced convection of gases	25–250
Forced convection of liquids	50–20,000
Boiling and condensation	2500–100,000

*Multiply by 0.176 to convert to Btu/h · ft² · °F.

Radiação

- A **radiação** é a energia emitida por um meio na forma de **ondas eletromagnéticas** (ou **fótons**) como resultado da mudança das configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas
- A transferência de calor por radiação **não necessita** da presença de um meio **intermediário**
- Na transferência de calor, o foco está na **radiação térmica** (radiação emitida pelos corpos devido à sua temperatura)
- Radiação é um **fenômeno volumétrico**. De todo modo, a radiação normalmente é considerada um fenômeno de superfície para sólidos que são opacos à radiação térmica

Radiação - Emissão

- A **máxima** taxa de radiação que pode ser emitida de uma superfície a uma temperatura termodinâmica T_s (em K ou R) é dada pela **Lei de Stefan-Boltzmann** como:

$$\dot{Q}_{emit,max} = \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W})$$

- $\sigma = 5.670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ é a constante de Stefan-Boltzmann
- A superfície ideal que emite radiação à máxima taxa é chamada de **corpo negro**
- A radiação emitida por superfícies reais são menores do que aquelas emitidas por um corpo negro na mesma temperatura, como expresso a seguir:

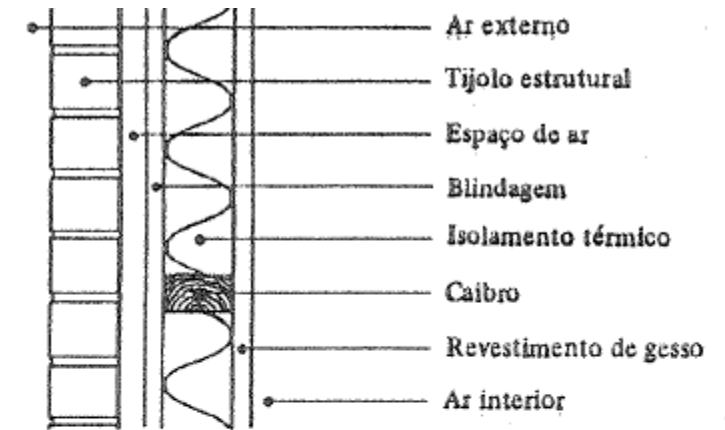
$$\dot{Q}_{emit,max} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W})$$

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

- ε é a **emissividade** da superfície

Transferência de Calor

- Exemplo: Utilize os dados da figura ao lado para determinar a taxa de transferência de calor em W/m^2 através da parede e a temperatura de superfície externa do isolamento de $t_{ext} = 0^\circ C$ e $t_{int} = 21^\circ C$. Admita que na região isolada da parede, 20% do espaço seja ocupado por elementos estruturais constituídos de caibros de madeira



	L, m	$k, W/m \cdot K$	A, m^2	R_{i1}^*	R_A^*	R_B^*	R_C^*	R_D^*	R_{i2}^*
Ar externo			1,0	0,029					
Tijolo estrutural	0,09	1,30	1,0		0,070				
Espaço de ar			1,0		0,170				
Blindagem	0,013	0,056	1,0		0,232				
Isolamento térmico	0,09	0,038	0,8			2,96			
Caibro	0,09	0,14	0,2				3,2		
Revestimento de gesso	0,013	0,16	1,0					0,08	
Ar interior			1,0						0,125
			Subtotal	0,029	0,472	2,96	3,2	0,08	0,125