

SEM0360

Fundamentos Termodinâmicos

AULA 2: Propriedades físicas

Arthur V. S. Oliveira
(avs.oliveira@usp.br)

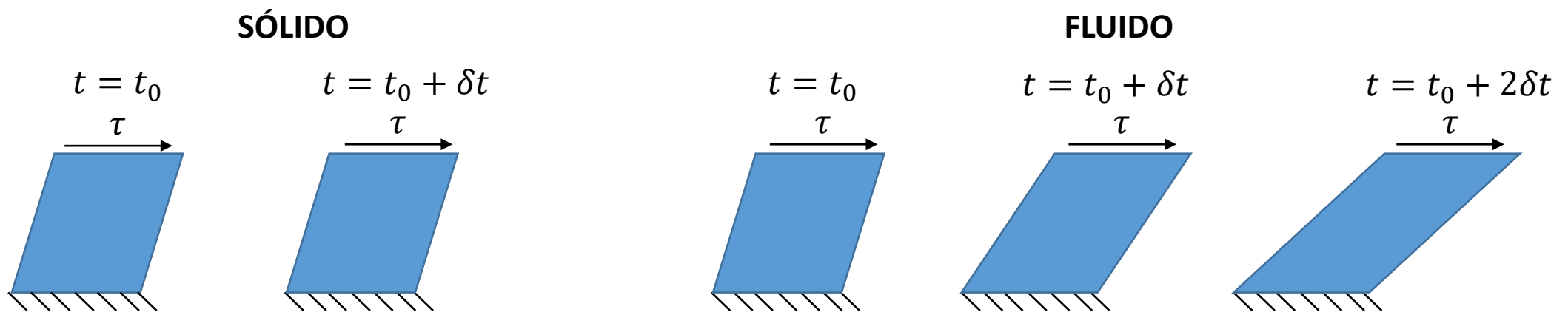


Aula de hoje

- Moran e Shapiro (8ª ed): Capítulo 1
- Çengel e Boles (7ª ed): Capítulo 1

Diferença sólido x fluido, líquido x gás

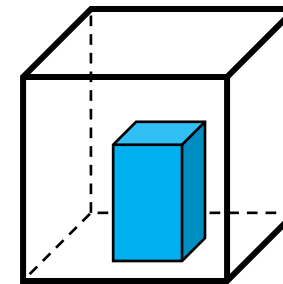
- Dada uma tensão de cisalhamento num volume elementar:
 - Sólido: deformação estática dada pela elasticidade do material
 - Fluido: deformação contínua, resultando em movimento



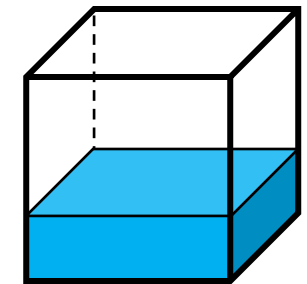
Diferença sólido x fluido, líquido x gás

- Fluidos: diferença entre líquido e gás
 - Líquido: forças intermoleculares de coesão significativas; agrupamento entre as moléculas de forma que o fluido adote a forma do reservatório com superfície superior livre devido à força gravitacional
 - Gás: moléculas espaçadas, logo forças de coesão desprezíveis; expansão do fluido caso não esteja completamente confinado.

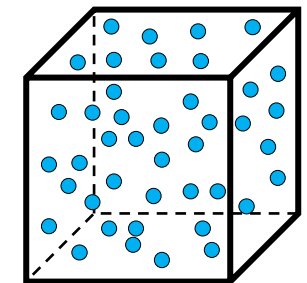
SÓLIDO



LÍQUIDO



GÁS



FLUIDOS

Propriedades físicas

- Definição de **propriedade**
 - Atributo ou característica de um material, componente ou sistema, intrínsecas ou não, que podem ser medidas para determinar seu estado.
- É ou não é uma propriedade?
 - Pressão
 - Temperatura
 - Densidade
 - Condutividade térmica
 - Velocidade
 - Trabalho

Classificação das propriedades

- Propriedades cinemáticas
 - Velocidade linear, velocidade angular, vorticidade, aceleração
 - *Fluidos: propriedades do fluido; porém, mais relacionadas ao escoamento*
- Propriedades de transporte
 - Viscosidade, condutividade térmica, difusividade mássica

Classificação das propriedades

- Propriedades termodinâmicas
 - Pressão, massa específica, temperatura, entalpia, entropia, calor específico, módulo volumétrico

- Outras propriedades físicas
 - Tensão superficial (termodinâmica), pressão de vapor

Algumas das propriedades termodinâmicas

- Massa específica (ρ)
 - Unidades: [**kg/m³**], [g/ml], [lb/ft³], [slugs/ft³]
 - Quantidade de massa por unidade de volume
 - Comumente chamado de densidade

- Volume específico (v)
 - Unidades: [**m³/kg**], [ml/g], [ft³/lb], [ft³/lb]
 - Quantidade de volume por unidade de massa
 - Mais comum em equações na termodinâmica (como EoS)

Algumas das propriedades termodinâmicas

- Pressão (p)
 - Unidades: [$\mathbf{N/m^2 = Pa}$], [bar], [atm], [lbf/ft²]
 - Tensão de compressão (força / área) em uma área infinitesimal
 - Diferenças de pressão causam movimento do fluido e, logo, escoamento
 - Esta força de compressão advém da movimentação e impacto das moléculas do fluido contra as paredes do sistema

Algumas das propriedades termodinâmicas

- Temperatura (T)
 - Unidades: [$^{\circ}\text{C}$], [**K**], [$^{\circ}\text{F}$], [$^{\circ}\text{R}$]
 - Uma forma indireta de medição da energia cinética interna de um sistema
 - Diferenças de temperatura causam transferência de calor

Algumas das propriedades termodinâmicas

- Energia interna (U)
 - Unidades SI: **[J]**
 - Çengel (termodinâmica): soma de **todas as formas de energia** de todas as moléculas que compõem a substância, inclusive intermoleculares e intramoleculares.
 - White (mecânica dos fluidos): **soma das energias ligadas à atividade molecular e forças intermoleculares** – neste caso, energia química e nuclear, por exemplo, não são consideradas como energia interna.
 - Não se mede diretamente a energia interna. Seu valor é tabelado a partir de um **valor de referência**.
 - Energia interna específica: u **[J/kg]**

Algumas das propriedades termodinâmicas

- Entalpia (H)
 - Unidades SI: [J]
 - Pode-se vê-la como a energia total de um fluido ou sistema, é a soma da energia interna e do produto da pressão e do volume do sistema: $H = U + PV$
 - Não se mede a entalpia de um sistema, mas sim a sua variação (**valor de referência**). Enquanto a energia interna está ligada à troca de calor, o produto PV quantifica o trabalho realizado ou promovido para a expansão ou compressão do sistema.
 - Entalpia específica: h [J/kg]

Algumas das propriedades termodinâmicas

- Entropia (S)
 - Unidades SI: [J/K]
 - Mede o **grau de liberdade molecular de um sistema**, estando associado ao número de configurações possíveis que o conjunto de partículas podem se organizar
 - Numa análise estatística, a entropia é definida pela expressão $S = k_B \ln \Omega$, sendo Ω a quantidade de configurações (microestados) possíveis. A variação de entropia é, portanto, $S_2 - S_1 = k_B \ln \frac{\Omega_2}{\Omega_1}$
 - Assim como U e H , não se mede S diretamente, mas sim sua variação. Os valores fornecidos são fornecidos comparativamente a um **valor de referência**.
 - Entropia específica: s [J/(kg.K)]



Fonte: Wikipedia

Algumas das propriedades termodinâmicas

- Entropia (S): exemplo ilustrativo

Algumas das propriedades termodinâmicas

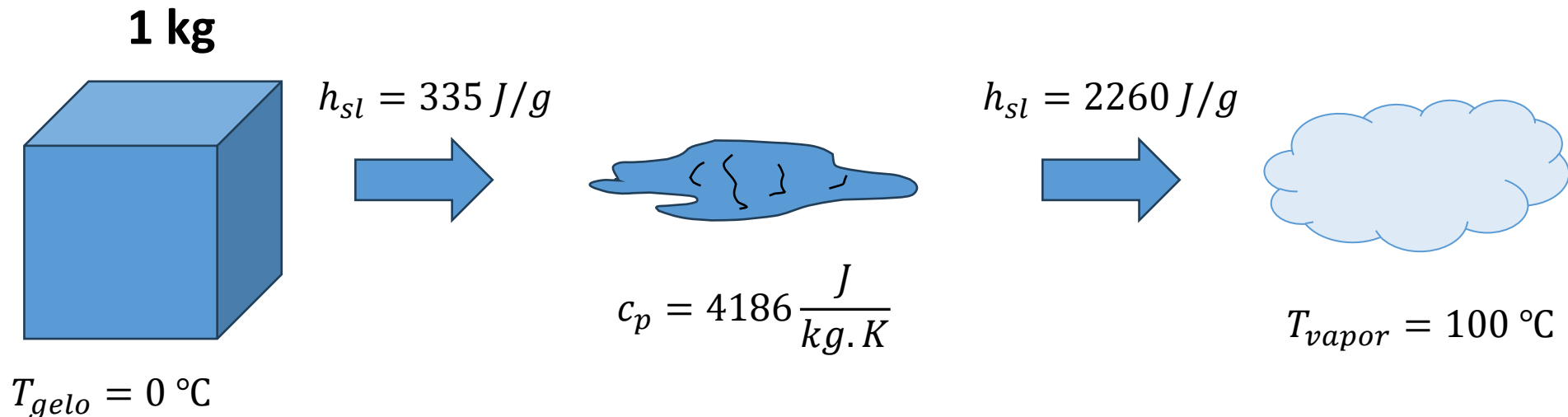
- Calores específicos (c_p e c_v)
 - Unidades SI: **[J/(kg.K)]**
 - Estas propriedades indicam a quantidade de energia necessária para aumentar a temperatura de uma unidade de massa do sistema em uma unidade de temperatura, ou a pressão constante (c_p) ou a volume constante (c_v).

Algumas das propriedades termodinâmicas

- Entalpia de vaporização e de fusão (h_{lv} e h_{sl})
 - Unidades SI: [J/kg]
 - Quantidade de energia necessária para que haja mudança de fase líquido-vapor (vaporização) e sólido-líquido (fusão)
 - O valor se mantém para o sentido contrário de mudança de fase:
 - h_{lv} : vaporização ou condensação
 - h_{sl} : fusão ou solidificação

Gelo-água-vapor: análise de escala

- Quanto de energia é necessário para derreter um bloco de 1 kg de gelo a 0 °C e depois evaporá-lo a pressão ambiente?



Gases perfeitos ou ideais

- Hipótese simplificadora – porém muito útil em muitas aplicações
- Idealizações:
 - Moléculas com direções de movimento aleatórias
 - O número de moléculas é alto, justificando abordagens estatísticas, porém seus volumes são desprezíveis
 - Não há forças de atração ou repulsão entre as moléculas, exceto durante colisões elásticas entre moléculas ou da molécula com a parede do reservatório

Gases perfeitos ou ideias

- Lei dos gases perfeitos:

$$Pv = R_{gas}T$$

- P : pressão [Pa]
- v : volume específico [m^3/kg]
- R_{gas} : constante específica do gás [$\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$]
- T : temperatura [K]

Gases perfeitos ou ideias

- Constante do gás \rightarrow constante universal dos gases

$$R_{gas} = \frac{R}{M}$$

Constante universal dos gases \rightarrow R

Massa molar [kg/mol] \rightarrow M

$$R = \begin{cases} 8,31447 \text{ kJ/kmol}\cdot\text{K} \\ 8,31447 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K} \\ 0,0831447 \text{ bar}\cdot\text{m}^3/\text{kmol}\cdot\text{K} \\ 1,98588 \text{ Btu/lbmol}\cdot\text{R} \\ 10,7316 \text{ psia}\cdot\text{pé}^3/\text{lbmol}\cdot\text{R} \\ 1.545,37 \text{ pé}\cdot\text{lb}_f/\text{lbmol}\cdot\text{R} \end{cases}$$

• Logo: $Pv = R_{gas}T \rightarrow Pv = \frac{R}{M}T \rightarrow P \frac{V}{m} = \frac{R}{M}T \rightarrow PV = \frac{m}{M}RT$

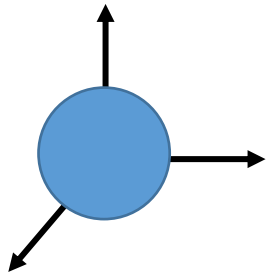
$$PV = nRT$$

Pressão e temperatura para gases ideais

- **Pressão:** relacionada à variação da quantidade de movimento das partículas do fluido ao colidirem com a parede do volume confinado – logo, uniforme
 - Cálculo para gás monoatômico
- **Temperatura:** relacionada à média da energia cinética das partículas dos gases
 - Cálculo considerando apenas translação

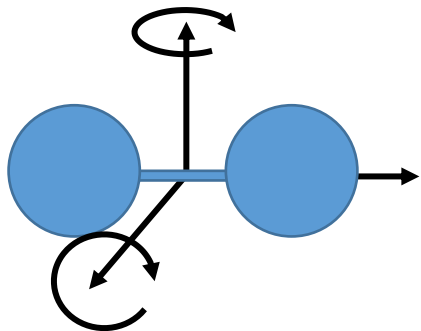
Energia interna para gases ideais

- Gases monoatômicos (He, Ar, Ne, ...) – três graus de liberdade:



$$U = \frac{3}{2} N k_B T = \frac{3}{2} P V$$

- Gases diatômicos (H₂, O₂, CO, NO) – cinco graus de liberdade:



$$U = \frac{5}{2} N k_B T = \frac{5}{2} P V$$

Gás ideal como um sistema

- Sistema: não há troca de massa. Logo: $nR = cte$
- Podemos então fazer a seguinte relação para uma massa de gás definida em dois estados diferentes:

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$

- Próxima aula: variações desta equação para diferentes processos.