



CAPÍTULO 1 – INTRODUÇÃO

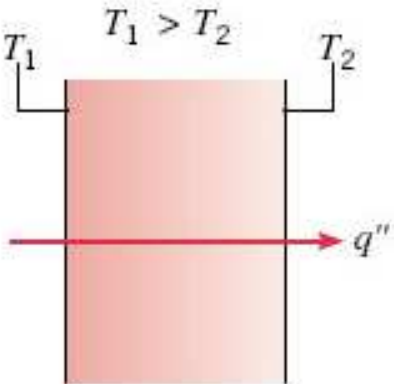
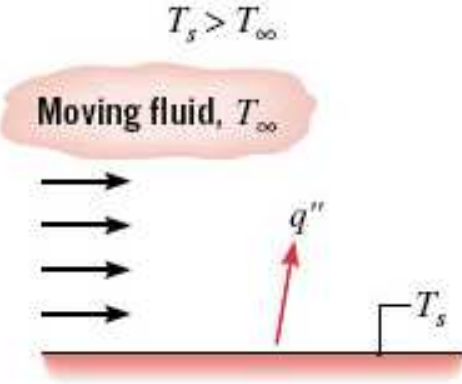
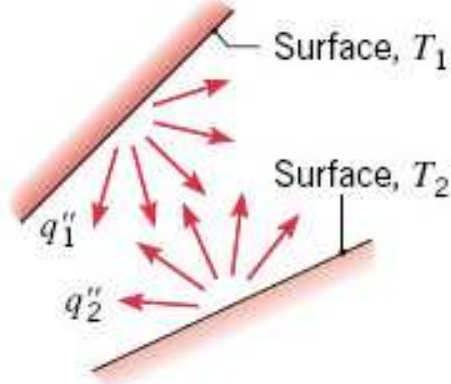
DISCIPLINA: TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA 1

PROF. DR. SANTIAGO DEL RIO OLIVEIRA

1.1 O QUE E COMO?

- Transferência de calor é **energia térmica em trânsito** devido a uma **diferença de temperaturas** no espaço.
- Os diferentes tipos de transferência de calor são conhecidos por **modos de transferência de calor**.
- Gradiente de temperatura em um meio estacionário (sólido ou fluido): transferência de calor por **CONDUÇÃO TÉRMICA**.
- Gradiente de temperatura entre uma superfície e um fluido em movimento: transferência de calor por **CONVECÇÃO TÉRMICA**.

- Todas as superfícies com temperatura não-nula emitem energia na forma de ondas eletromagnéticas. Dessa forma, na ausência de um meio interposto participante, há transferência de calor líquida entre duas superfícies a diferentes temperaturas: transferência de calor por **RADIAÇÃO TÉRMICA**.

Conduction through a solid or a stationary fluid	Convection from a surface to a moving fluid	Net radiation heat exchange between two surfaces
		

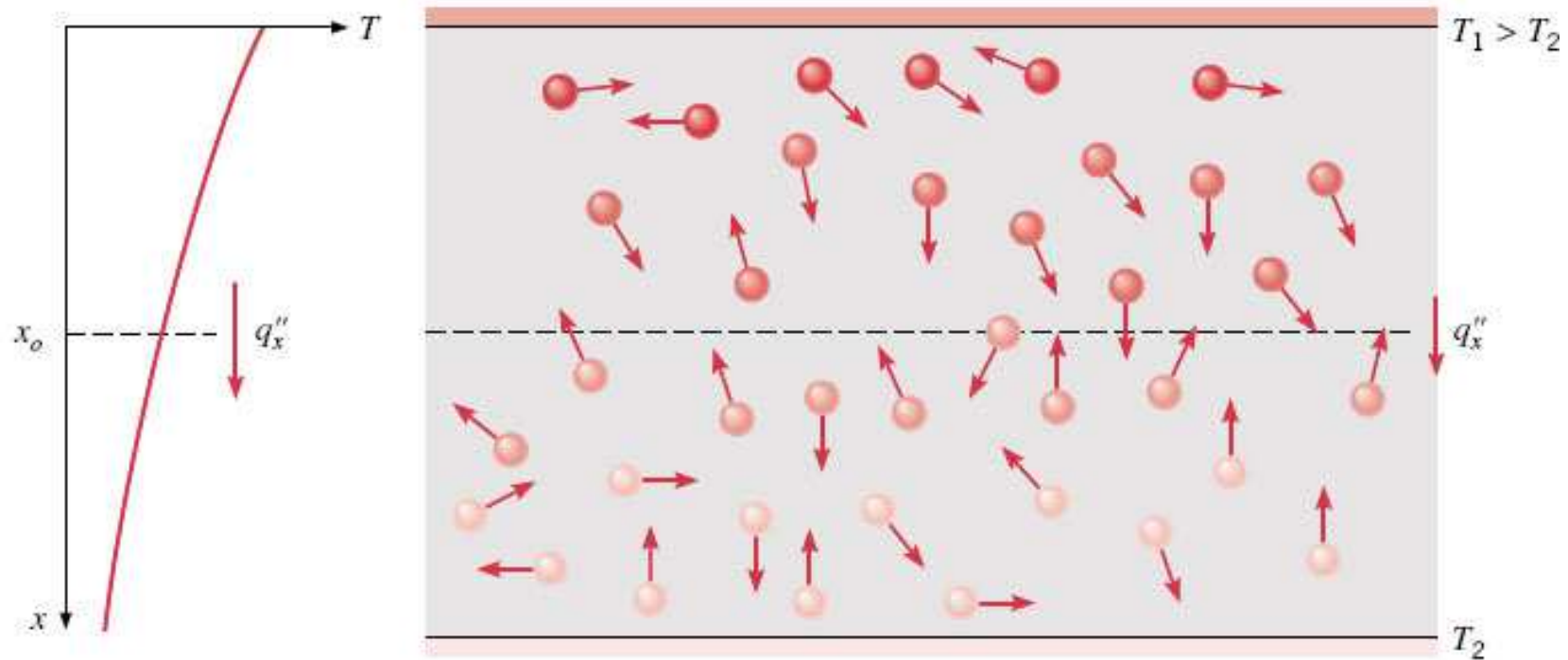
1.2 ORIGENS FÍSICAS E EQUAÇÕES DE TAXA

- Importância para a engenharia:
 1. Compreender os mecanismos físicos dos modos de transferência de calor.
 2. Utilizar as equações das taxas para determinar a quantidade de energia sendo transferida por unidade de tempo.

1.2.1 CONDUÇÃO

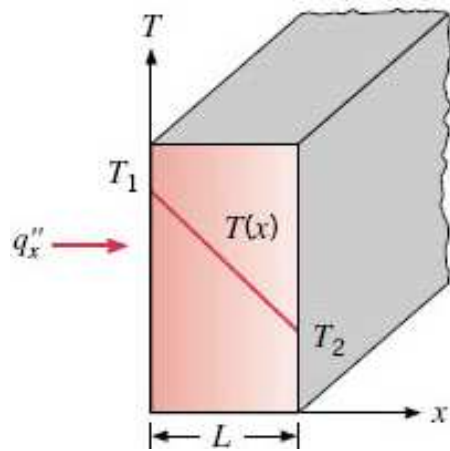
- Transferência de energia das partículas **mais energéticas para as menos energéticas** de uma substância devido às interações entre partículas (**ATIVIDADES ATÔMICAS E MOLECULARES**).

- As atividades atômicas e moleculares estão relacionadas ao movimento de **translação aleatório**, assim como aos **movimentos internos de rotação e vibração das moléculas**.



DIFUSÃO DE ENERGIA DEVIDO À ATIVIDADE MOLECULAR (GASES E LÍQUIDOS)

- Temperaturas mais altas: energias moleculares mais altas.
- Temperaturas mais baixas: energias moleculares mais baixas.
- As moléculas mais energéticas transferem energia para as moléculas menos energéticas. Transferência de calor por condução ocorrerá na direção da diminuição da temperatura.
- Para sólidos, a condução pode ser atribuída à atividade atômica na forma de vibrações dos retículos.
- Para quantificar a taxa de condução térmica, utiliza-se a lei de Fourier. Para uma parede plana unidimensional, com distribuição de temperaturas $T(x)$ tem-se que:



$$q''_x = -k \frac{dT}{dx}$$

- q''_x : fluxo térmico (W/m^2) – taxa de transferência de calor na direção x por unidade de **área perpendicular à direção da transferência**.
- k : propriedade de transporte conhecida como condutividade térmica (W/m.K) – característica do material da parede.

- O sinal **(-)** indica que o calor é transferido no sentido da diminuição de temperatura.
- Para uma distribuição linear de $T(x)$ o gradiente de temperatura pode ser representado como:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L}$$

- O fluxo de calor é então:

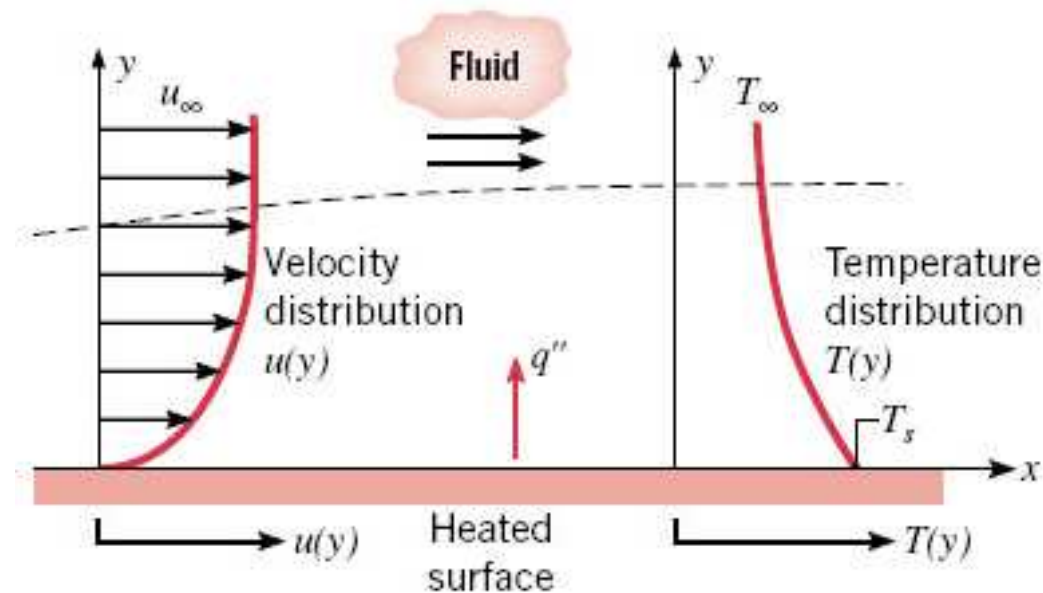
$$q_x'' = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$$

- A taxa de transferência de calor correspondente é:

$$q_x = q_x'' \cdot A = kA \frac{\Delta T}{L}$$

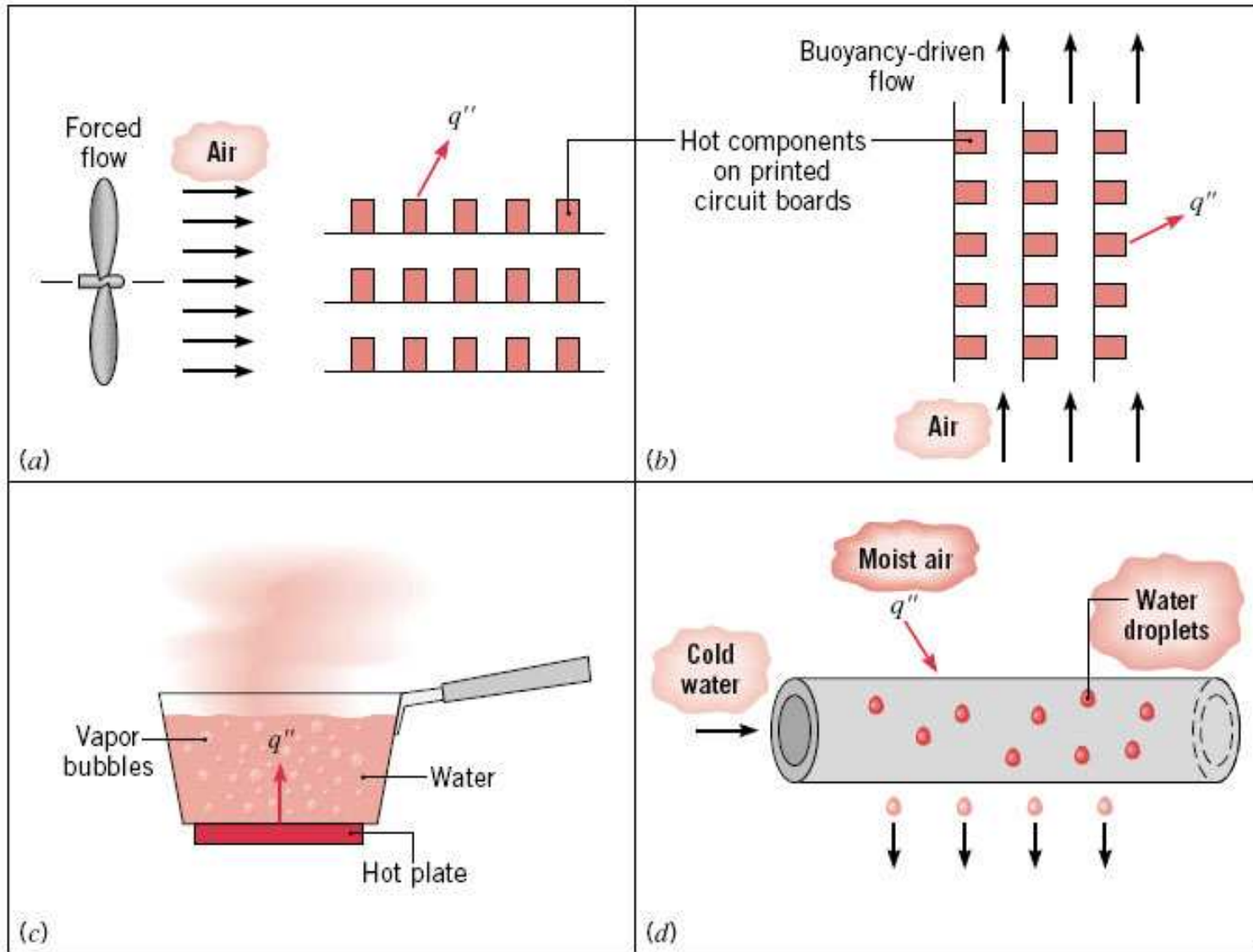
1.2.2 CONVECÇÃO

- Abrange dois mecanismos: movimento molecular aleatório (**difusão**) + movimento global do fluido (**advecção**).
- É de interesse a transferência de calor por convecção entre um fluido em movimento e uma superfície.
- Da interação entre o fluido e a superfície, surge uma **camada limite de velocidades** (hidrodinâmica), que é a região do fluido na qual sua velocidade varia entre zero ($y = 0$) até um valor u_∞ .



- Surge também uma **camada limite de temperaturas** (térmica), que é a região do fluido na qual sua temperatura varia entre T_s ($y = 0$) até um valor T_∞ .
- Se $T_s > T_\infty$ o fluido será aquecido. Se $T_s < T_\infty$ o fluido será resfriado.

- **Convecção forçada:** quando o escoamento é causado por meios externos (bomba, ventilador, soprador).
- **Convecção livre** (ou natural): o escoamento do fluido é induzido por forças de empuxo, que são originadas a partir de diferentes densidades causadas por variações de temperatura no fluido.
- **Convecção mista:** convecção forçada + convecção livre.
- **Convecção com mudança de fase:** envolve a troca de calor latente, em particular os processos de ebulição (líquido – vapor) e condensação (vapor – líquido). Para ambos os processos ocorre movimentação de fluido e dessa forma são classificados como transferência de calor por convecção.



- Independente da natureza específica do processo de convecção, a equação apropriada da taxa de transferência possui a forma:

$$q'' = h(T_s - T_\infty)$$

- A expressão acima é a **lei do resfriamento de Newton** e o parâmetro h (W/m².K) é o **coeficiente de transferência de calor por convecção**.
- h depende das condições na camada-limite:
 1. Geometria da superfície.
 2. Natureza do escoamento do fluido.
 3. Propriedades termodinâmicas e de transporte do fluido.

- Na tabela abaixo podem ser encontrados valores típicos de h :

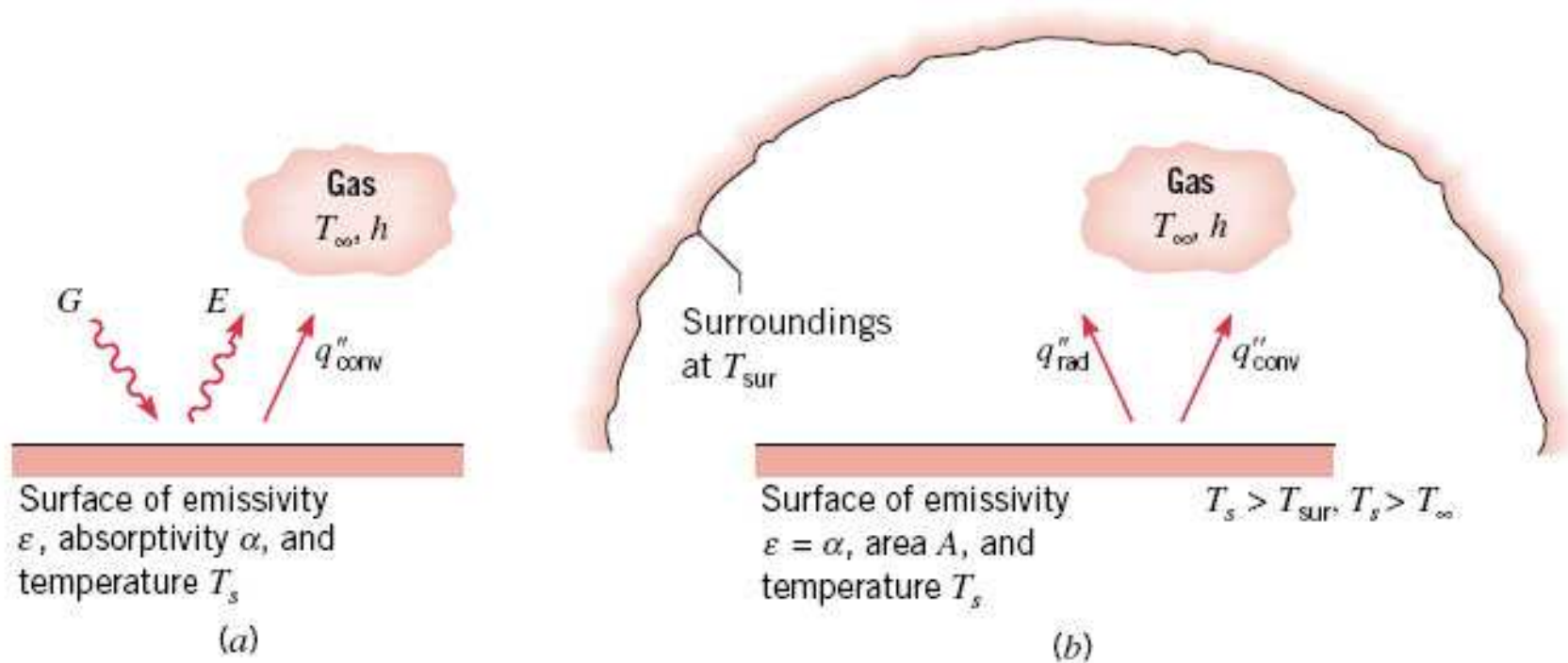
Processo	h (W/m².K)
Convecção natural	
Gases	2-25
Líquidos	50-1000
Convecção forçada	
Gases	25-250
Líquidos	100-20000
Convecção com mudança de fase	
Ebulição e condensação	2500-100000

- O fluxo de calor por convecção é considerado positivo se $(T_s > T_\infty)$ e negativo se $(T_s < T_\infty)$.

1.2.3 RADIAÇÃO

- Energia emitida pela matéria que se encontra a uma **temperatura não-nula**.
- Ocorre a partir de superfícies sólidas, gases e líquidos.
- Independente da forma da matéria, a emissão pode ser atribuída a **mudanças nas configurações eletrônicas** dos átomos e moléculas.
- A energia do campo de radiação é transportada por **ondas eletromagnéticas**.
- A radiação **não necessita de um meio material** para se propagar.

- A transferência por radiação ocorre de maneira mais eficiente no vácuo.



- No caso (a), a taxa na qual a energia é liberada por unidade de área (W/m^2) é o **poder emissivo**, E , da superfície.

- O limite superior do poder emissivo de um corpo (radiador ideal ou corpo negro) é obtido pela **lei de Stefan-Boltzmann**:

$$E_n = \sigma T_s^4$$

- $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ (constante de Stefan-Boltzmann).
- O fluxo térmico emitido por uma superfície real é menor que aquele obtido por um corpo negro à mesma temperatura, ou seja:

$$E = \varepsilon \sigma T_s^4$$

- ε é uma propriedade radiante da superfície conhecida como **emissividade**. Seus valores variam de 0 a 1.

- Fornece uma medida da **eficiência na qual uma superfície emite energia em relação ao corpo negro**.
- Depende do material da superfície e de seu acabamento.
- A radiação pode **incidir** sobre uma superfície (radiação solar ou outras superfícies às quais a superfície de interesse esteja exposta).
- A taxa de radiação incidente é chamada de **irradiação**, G . Uma porção, ou toda a irradiação pode ser absorvida por uma superfície (**aumento de energia térmica**).
- A taxa na qual a energia radiante é absorvida, por unidade de área da superfície (W/m^2), é calculada como:

$$G_{abs} = \alpha G$$

- α é uma propriedade radiante da superfície conhecida como **absortividade**. Seus valores variam de 0 a 1.
- Se $\alpha < 1$, a superfície é opaca e porções da radiação são refletidas.
- Se a superfície é transparente, porções da irradiação podem ser transmitidas.
- **Radiação absorvida**: aumenta a energia térmica da matéria.
- **Radiação emitida**: reduz a energia térmica da matéria.

- **Radiações refletida e transmitida:** não tem efeito sobre essa energia.
- α depende da natureza da radiação, assim como da superfície.
- De maneira geral: **líquidos são opacos e gases são transparentes.**
- No caso (b), existe uma troca de radiação entre uma pequena superfície a T_s e uma superfície isotérmica a T_{viz} muito maior (paredes de uma sala ou um forno), que envolve completamente a menor.
- Será visto na Capítulo 12, que nessa condição, a **irradiação pode ser aproximada pela emissão de um corpo negro** a T_{viz} , ou seja:

$$G = \sigma T_{viz}^4$$

- Para uma **superfície cinza** ($\alpha = \varepsilon$) a taxa líquida de transferência de calor saindo da superfície, por unidade de área da superfície, é:

$$q_{rad}'' = \frac{q_{rad}}{A} = \varepsilon E_n(T_s) - \alpha G = \varepsilon \sigma T_s^4 - \alpha \sigma T_{viz}^4 = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4)$$

- A expressão acima fornece a **diferença entre a energia térmica que é liberada devido à emissão de radiação e aquela que é ganha devido à absorção de radiação**.
- Às vezes é conveniente expressar a troca líquida por radiação através de uma **expressão linearizada** na forma:

$$q_{rad} = h_r A(T_s - T_{viz})$$

- O coeficiente de transferência de calor por radiação h_r pode ser expresso como:

$$h_r A(T_s - T_{viz}) = \varepsilon \sigma A(T_s^4 - T_{viz}^4) \Rightarrow h_r = \frac{\varepsilon \sigma (T_s^2 - T_{viz}^2)(T_s^2 + T_{viz}^2)}{(T_s - T_{viz})}$$

$$h_r = \frac{\varepsilon \sigma (T_s - T_{viz})(T_s + T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2)}{(T_s - T_{viz})} \Rightarrow h_r = \varepsilon \sigma (T_s + T_{viz})(T_s^2 + T_{viz}^2)$$

- A superfície do caso (b) pode também transferir calor por convecção para um gás adjacente. Neste caso:

$$q = q_{conv} + q_{rad} = hA(T_s - T_{\infty}) + \varepsilon\sigma A(T_s^4 - T_{viz}^4)$$

1.2.4 RELAÇÃO COM A TERMODINÂMICA

- A termodinâmica está voltada para as **interações envolvendo calor** e para o papel que elas desempenham na primeira e segunda leis.
- Ela não considera nem os **mecanismos** nem os **métodos** para o cálculo da taxa de troca de calor.
- A **termodinâmica lida com estados de equilíbrio** enquanto que a **transferência de calor é por essência um processo de não-equilíbrio**.

- Para que a transferência de calor ocorra, deve existir um gradiente de temperatura, logo, um não-equilíbrio termodinâmico.

1.3 A EXIGÊNCIA DA CONSERVAÇÃO DE ENERGIA

- A primeira lei enuncia que a **energia total de um sistema é conservada** e a única forma na qual a quantidade de energia em um sistema pode mudar é se **energia cruzar sua fronteira**.
- Para um **sistema fechado**: transferência de calor e trabalho realizado.
- Para um **sistema aberto** (volume de controle): transferência de calor, trabalho realizado, entrada e saída de massa.

1.3.1 CONSERVAÇÃO DE ENERGIA EM UM VOLUME DE CONTROLE

- Equação das energias térmica e mecânica para um intervalo de tempo (Δt) - todos os termos medidos em Joules no SI:

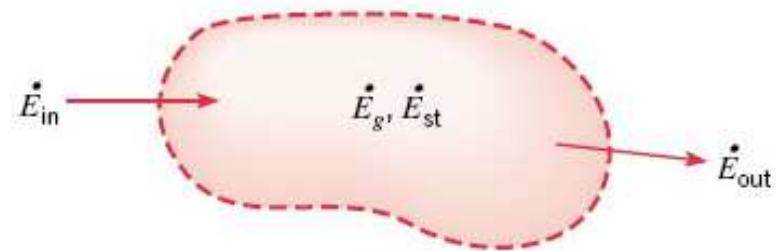
O aumento na quantidade de energia térmica e mecânica acumulada (armazenada) em um volume de controle deve ser igual à quantidade de energia térmica e mecânica que entra no volume de controle, menos a quantidade de energia térmica e mecânica que deixa o volume de controle, mais a quantidade de energia térmica que é gerada no interior do volume de controle.

- Equação das energias térmica e mecânica em um instante (t) - todos os termos medidos em Watts no SI:

A taxa de aumento da quantidade de energia térmica e mecânica acumulada (armazenada) em um volume de controle deve ser igual à taxa na qual as energias térmica e mecânica entram no volume de controle, menos a taxa na qual as energias térmica e mecânica deixam o volume de controle, mais a taxa na qual a energia térmica é gerada no interior do volume de controle.

- Fazendo E a soma das energias térmica (interna) e mecânica (cinética e potencial) os enunciados da conservação da energia são:

$$\Delta E_{acu} = E_{ent} - E_{sai} + E_g$$
$$\dot{E}_{acu} = \frac{dE_{acu}}{dt} = \dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} + \dot{E}_g$$



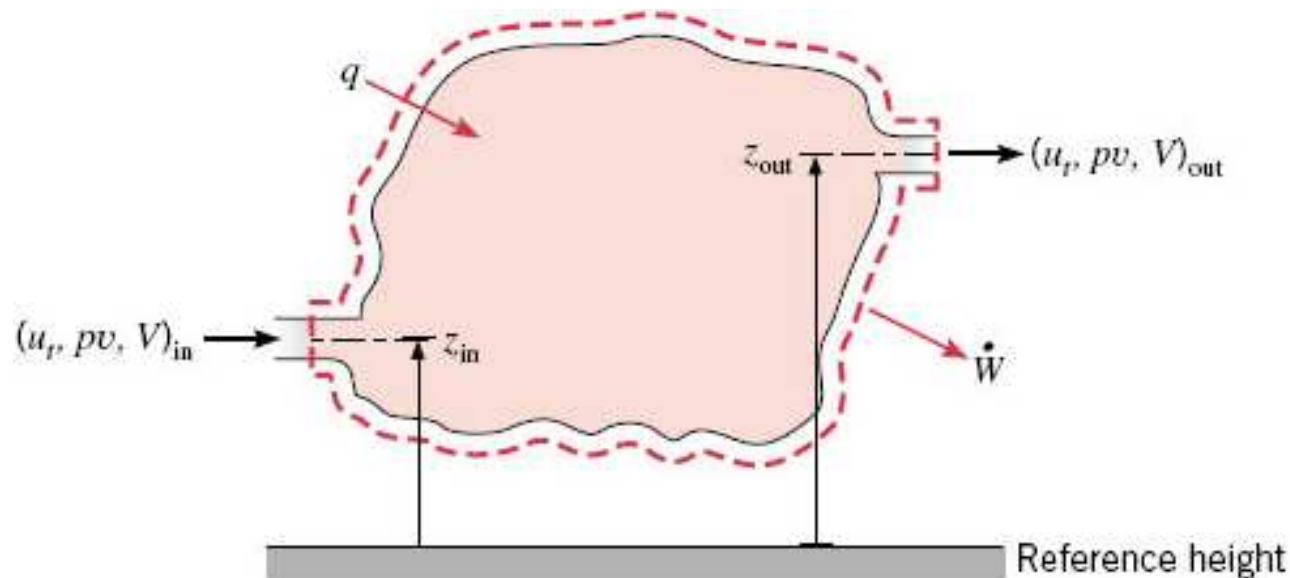
- Se $\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g > \dot{E}_{sai} \Rightarrow$ aumento de $\dot{E}_{acu}$
- Se $\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g < \dot{E}_{sai} \Rightarrow$ diminuição de $\dot{E}_{acu}$
- Se $\dot{E}_{ent} + \dot{E}_g = \dot{E}_{sai} \Rightarrow \dot{E}_{acu}$ é constante (regime permanente)
- O termo de energia acumulada pode ser dividido em:

$$E_{acu} = EC + EP + U_{sen} + U_{lat} = \frac{mV^2}{2} + mgz + U_{tot}$$

- O termo U_{sen} está associado às variações de temperatura enquanto o termo U_{lat} está associado às mudanças de fase.

- O termo $\dot{E}_g$ está associado à conversão de alguma outra forma de energia (química, elétrica, nuclear) em energia térmica.
- É um fenômeno volumétrico e ocorre no interior do volume de controle, sendo proporcional a esse volume.
- Nesse curso, se efeitos químicos, elétricos ou nucleares estiverem presentes, eles serão tratados como fontes (fonte positiva) ou sumidouros (fonte negativa) de energia térmica.
- Os termos relacionados à entrada e saída de energia são fenômenos de superfície e geralmente proporcionais à área. Esses termos incluem:

1. Transferência de calor (condução, convecção, radiação).
2. Trabalho (exceto trabalho de escoamento).
3. Fluxo de massa (energias térmica e mecânica).
4. Trabalho de escoamento.



$$\dot{m} \left(u_t + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{ent} - \dot{m} \left(u_t + pv + \frac{V^2}{2} + gz \right)_{sai} + q - \dot{W} = \frac{dE_{acu}}{dt}$$

- A soma $u_t + pv$ é a **entalpia por unidade de massa**:

$$i = u_t + pv$$

- Para escoamento de um **gás ideal com calores específicos constantes** tem-se que:

$$(i_{ent} - i_{sai}) = c_p (T_{ent} - T_{sai})$$

- Para líquido incompressível, $c_p = c_v = c$ e tem-se que:

$$(u_{t,ent} - u_{t,sai}) = c (T_{ent} - T_{sai})$$

- Para líquidos, a não ser que a queda de pressão seja muito alta, $(pv)_{ent} - (pv)_{sai}$ é desprezível.
- Casos especiais da 1ª lei para sistemas com escoamento:

1. Escoamento em regime estacionário de um gás ideal com variações das energias cinética e potencial desprezíveis e trabalho desprezível (outro além do trabalho de escoamento):

$$\dot{m} \left(u_t + pv + \frac{\overbrace{V^2}^{=0}}{2} + \overbrace{gz}^{=0} \right)_{ent} - \dot{m} \left(u_t + pv + \frac{\overbrace{V^2}^{=0}}{2} + \overbrace{gz}^{=0} \right)_{sai} + q - \overbrace{\dot{W}}^{=0} = \overbrace{\frac{dE_{acu}}{dt}}^{=0}$$

$$q = \dot{m}[(u_t + pv)_{sai} - (u_t + pv)_{ent}] \Rightarrow q = \dot{m}(i_{sai} - i_{ent})$$

$$q = \dot{m} c_p (T_{sai} - T_{ent})$$

2. Escoamento em regime estacionário de um líquido incompressível com variações das energias cinética e potencial desprezíveis e trabalho desprezível (incluindo trabalho de escoamento):

$$\dot{m} \left(u_t + \overbrace{pv}^{\approx 0} + \frac{\overbrace{V^2}^{\approx 0}}{2} + \overbrace{gz}^{\approx 0} \right)_{ent} - \dot{m} \left(u_t + \overbrace{pv}^{\approx 0} + \frac{\overbrace{V^2}^{\approx 0}}{2} + \overbrace{gz}^{\approx 0} \right)_{sai} + q - \overbrace{\dot{W}}^{\approx 0} = \overbrace{\frac{dE_{acu}}{dt}}^{\approx 0}$$

$$q = \dot{m}(u_t)_{sai} - \dot{m}(u_t)_{ent} \Rightarrow q = \dot{m}(u_{t,sai} - u_{t,ent})$$

$$q = \dot{m}c_p(T_{sai} - T_{ent})$$

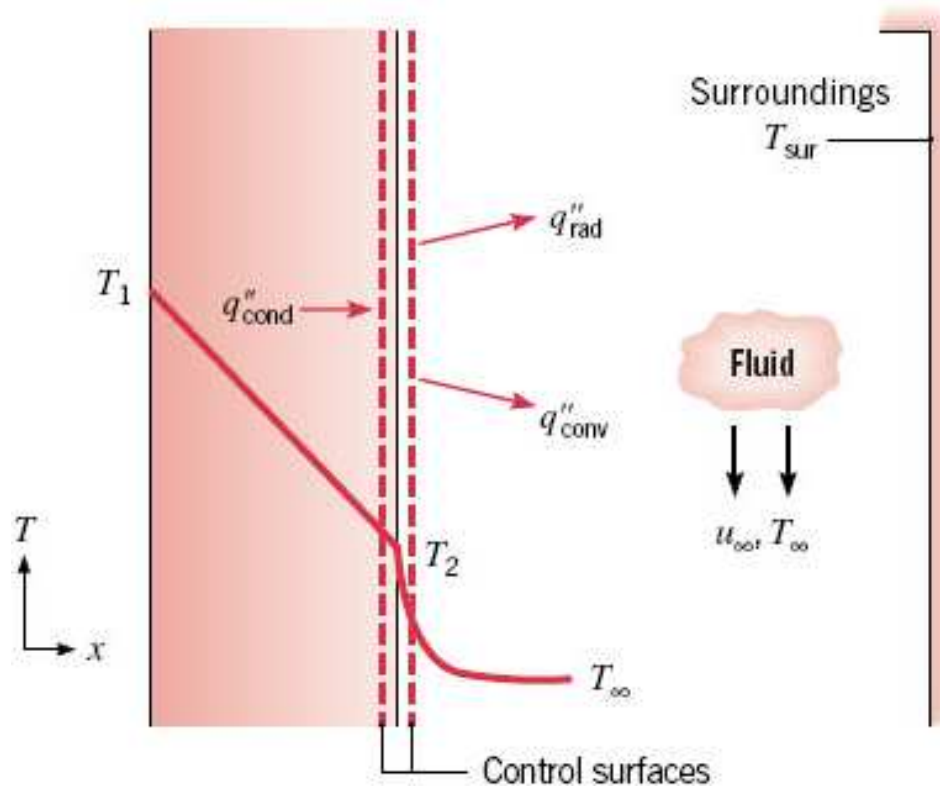
- Vazão mássica: $\dot{m} = \rho VA_{sr}$

- Vazão volumétrica: $\dot{V} = VA_{sr} = \frac{\dot{m}}{\rho}$

1.3.2 O BALANÇO DE ENERGIA EM UMA SUPERFÍCIE

- Nesse caso, **não há massa ou volume envolvidos**.
- Caso haja geração de energia no meio (fenômeno volumétrico), esse processo não afeta o balanço de energia na superfície de controle, já que a superfície não possui volume.

- Como o termo de acúmulo de energia também depende do volume, e uma superfície de controle não possui volume, a exigência da conservação da energia em uma superfície vale **tanto para condição de regime estacionário como de regime transiente**.



$$\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai} = 0$$

$$q''_{cond} - q''_{conv} - q''_{rad} = 0$$

1.3.3 APLICAÇÃO DAS LEIS DE CONSERVAÇÃO: METODOLOGIA

- Deve-se definir o volume de controle e superfície de controle apropriadas.
- A base de tempo apropriada deve ser identificada.
- Os processos de transferência de calor devem ser identificados e mostrados no volume de controle por setas.
- A equação de conservação deve ser escrita e expressões apropriadas para as taxas de calor devem ser substituídas.