

Introdução à Transferência de Calor

PME3398

Prof. Antonio Luiz Pacífico

1º Semestre de 2019

Conteúdo da Aula

- 1 Definições
- 2 Origens Físicas e Equações das Taxas de Transferência
- 3 Conservação da Energia
- 4 Exercícios

Definição de Transferência de Calor

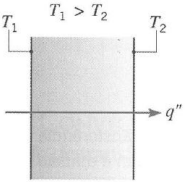
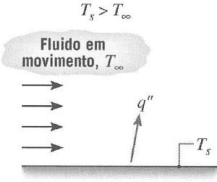
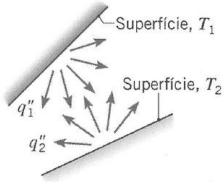
Transferência de calor é energia em trânsito devido a uma diferença de temperatura.

Nomenclatura que será utilizada:

- $Q \equiv$ Calor [J];
- $\dot{Q} \equiv$ Taxa de transferência de calor [J/s \equiv W];
- $q \equiv$ Calor por unidade de massa [J/kg];
- $\dot{q}' \equiv$ Taxa de transferência de calor por unidade de comprimento [W/m];
- $\dot{q}'' \equiv$ Taxa de transferência de calor por unidade de área \equiv Fluxo de calor [W/m²];
- $\dot{q}''' \equiv$ Taxa de transferência de calor por unidade de volume \equiv Taxa de geração volumétrica [W/m³].

Modos de Transferência de Calor

Os três modos de transferência de calor são: condução, convecção e radiação.

| Condução através de um sólido ou fluido estacionário | Convecção de uma superfície para um fluido em movimento | Transferência líquida de calor por radiação entre duas superfícies |
|---|---|--|
|  |  |  |

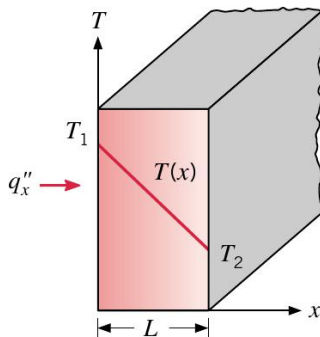
OBS: na figura, $q'' \equiv \dot{q}''$ segundo nossa nomenclatura.

Condução

O termo *condução de calor* é utilizado para se referir à transferência de calor, devida ao gradiente de temperatura em um meio estacionário, através de um meio que, na sua grande maioria é um sólido (vibrações nos retículos e migração de elétrons), mas também pode ser um fluido (difusão de energia).

O mecanismo físico da condução envolve conceitos de atividade atômica e molecular, que sustenta a transferência de energia das partículas mais energéticas para as partículas de menor energia de uma substância devido às interações que existem entre as partículas.

Condução



Para o modo de condução de calor a equação do fluxo de calor é conhecida como **Lei de Fourier**. Para uma parede plana unidimensional, como a ilustrada ao lado, essa lei é dada por:

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

nesta equação k é uma constante de proporcionalidade conhecida como **condutividade térmica** (W/m.K ou W/m.°C). O sinal negativo é consequência do fato de que calor é sempre transferido no sentido da diminuição da temperatura. OBS: na figura, $q_x'' \equiv \dot{q}_x''$ segundo nossa nomenclatura.

Condução

Em condições de regime permanente, para a qual a distribuição de temperatura é linear numa parede plana unidimensional (o porque disso será visto no próximo capítulo), pode-se escrever:

$$\frac{dT}{dx} = \frac{T_2 - T_1}{L} \therefore \dot{q}_x'' = -k \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} = k \cdot \frac{T_1 - T_2}{L}$$

A taxa de transferência de calor é obtida multiplicando-se o fluxo de calor pela área ortogonal à direção do fluxo de calor, A , na parede:

$$\dot{Q}_x = A \cdot \dot{q}_x''$$

Convecção

O termo *convecção* refere-se à transferência de calor que ocorre entre uma superfície (sólida ou líquida) e um fluido em movimento ou estacionário, quando estes se encontram em temperaturas diferentes.

A transferência de calor por convecção envolve dois mecanismos de troca de calor:

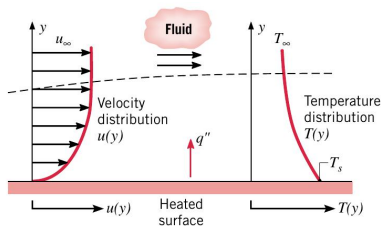
- o movimento molecular aleatório (condução);
- o movimento global, macroscópico, do fluido (advecção).

Na convecção as *camadas limite hidrodinâmica e térmica* desempenham papel fundamental.

Convecção

A **Lei do resfriamento de Newton** estabelece que:

$$\dot{q}'' = h \cdot (T_s - T_\infty)$$



onde h é o coeficiente de proporcionalidade entre \dot{q}'' e $(T_s - T_\infty)$ conhecido como **coeficiente de transferência de calor por convecção** ($\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$ ou $\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$). h também é conhecido como coeficiente de película. OBS: na figura, $q'' \equiv \dot{q}''$ segundo nossa nomenclatura.

Convecção

A convecção é classificada em função da natureza e localização relativa do escoamento.

Natureza do escoamento:

- **Convecção forçada:** escoamento causado por meios externos, como ventiladores, vento, etc.;
- **Convecção natural (ou livre):** escoamento induzido por forças de empuxo (diferenças entre massas específicas devido a gradientes de temperatura no fluido);

Localização relativa do escoamento:

- **Convecção externa:** superfícies e corpos imersos no fluido;
- **Convecção interna:** escoamento contido em superfícies e dutos.

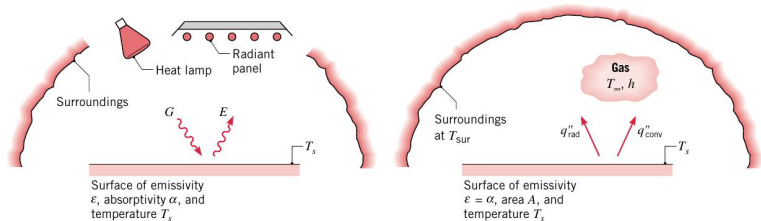
Radiação

A *Radiação térmica* é a energia emitida por toda matéria que se encontra a uma temperatura não-nula. Não é necessário a existência de um meio material entre dois ou mais corpos que trocam calor por radiação, porém a existência de um meio afeta esta troca. Como é um fenômeno associado à matéria, esta pode estar em qualquer fase: sólida, líquida ou gasosa.

As emissões de energia são atribuídas a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria. O transporte da radiação é feito por ondas eletromagnéticas.

Radiação

Defini-se **irradiação**, G , ao fluxo de calor, proveniente que qualquer corpo e/ou matéria, que incide sobre uma superfície; e **poder emissivo** de um corpo, E , ao fluxo de calor que emerge de uma superfície (ou que é emitido por uma superfície).



OBS: na figura, $q''_{rad} \equiv \dot{q}''_{rad}$ e $q''_{conv} \equiv \dot{q}''_{conv}$ segundo nossa nomenclatura.

Radiação

A **Lei de Stefan-Boltzmann** estabelece que o limite superior para o poder emissivo, E_b , é dado por:

$$E_b = \sigma \cdot T_s^4$$

onde E_b é conhecido como poder emissivo de um corpo negro; T_s é a temperatura absoluta da superfície; e σ é a constante de Stefan-Boltzmann, cujo valor é $\sigma = 5,67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$.

Para uma superfície real seu poder emissivo, E , é menor que E_b e é dado por:

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

onde ε é uma propriedade da superfície denominada **emissividade**, sendo que $0 \leq \varepsilon \leq 1$.

Radiação

Uma parte ou toda da irradiação pode ser absorvida pela superfície, aumentando assim a energia interna do material. A fração da irradiação que é absorvida por uma superfície é dada pela **absortividade** da superfície, α ($0 \leq \alpha \leq 1$). Assim, chamando G_{abs} ao fluxo de calor absorvido pela superfície a partir de uma irradiação, G , que o atinge, tem-se que:

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

Quando $\alpha < 1$ significa que uma parte da irradiação pode ser refletida ou transmitida ou ambas.

Define-se **superfície cinza difusa** à superfície que apresenta como propriedade $\alpha = \varepsilon$. Para superfícies deste tipo, o fluxo líquido de radiação deixando a superfície é dado por:

$$\dot{q}''_{rad} = \varepsilon \cdot E_b(T_s) - \alpha \cdot G = \varepsilon \cdot \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4)$$

Conservação da Energia em Volumes de Controle

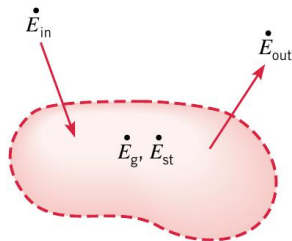


Figura: subscritos: in
 $\equiv e$; out $\equiv s$; g $\equiv g$; e
 st $\equiv arm$. Note que
 $\dot{q}''' = \dot{E}_g/V$

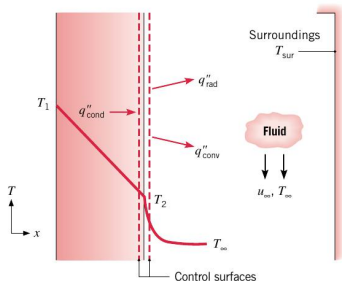
Num volume de controle, as taxas (ou quantidades) de energias térmica e mecânica que entram, \dot{E}_e ou E_e , mais a taxa (ou quantidade) de energia térmica *gerada*, \dot{E}_g ou E_g , menos as taxas (ou quantidades) de energias térmica e mecânica que saem, \dot{E}_s ou E_s , deve ser igual à taxa de aumento (ou aumento da quantidade) de energia armazenada no seu interior, dE_{arm}/dt ou ΔE_{arm} .

Matematicamente:

$$\dot{E}_e + \dot{E}_g - \dot{E}_s = \frac{dE_{arm}}{dt}$$

$$E_e + E_g - E_s = \Delta E_{arm}$$

Conservação da Energia em Superfícies de Controle



Superfícies de controle não possuem massa e volume. Assim, os termos \dot{E}_g ou E_g e dE_{arm}/dt ou ΔE_{arm} não existem. Deste modo:

$$\dot{E}_e - \dot{E}_s = 0$$

$$E_e - E_s = 0$$

Na figura ao lado,

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

Figura: $q''_{cond} \equiv \dot{q}''_{cond}$;
 $q''_{conv} \equiv \dot{q}''_{conv}$; $q''_{rad} \equiv \dot{q}''_{rad}$;
 $T_{sur} \equiv T_{viz}$.

$$-k \cdot \frac{T_2 - T_1}{L} - h \cdot (T_2 - T_\infty) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot (T_2^4 - T_{viz}^4) = 0$$

Exercício de Aula 1

Enunciado: Uma placa de alumínio, com 4 mm de espessura, encontra-se na posição horizontal e a sua superfície inferior está isolada termicamente. Um fino revestimento especial é aplicado sobre sua superfície superior de tal forma que a mesma pode ser considerada uma superfície cinza com emissividade 0,50. A massa específica ρ e o calor específico c do alumínio são iguais a 2700 kg/m^3 e 900 J/(kg.K) , respectivamente.

(a) Considere condições nas quais a placa está à temperatura de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ e a sua superfície superior é subitamente exposta a uma corrente de ar com $T_\infty = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ estando numa câmara cujas paredes estão a $150 \text{ }^\circ\text{C}$. O coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície e o ar é de $h = 20 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$. Qual é a taxa inicial da variação de temperatura da placa?

(b) Qual será a temperatura de equilíbrio da placa quando as condições de regime estacionário forem atingidas?