



Instituto de Química
IQ - UFG



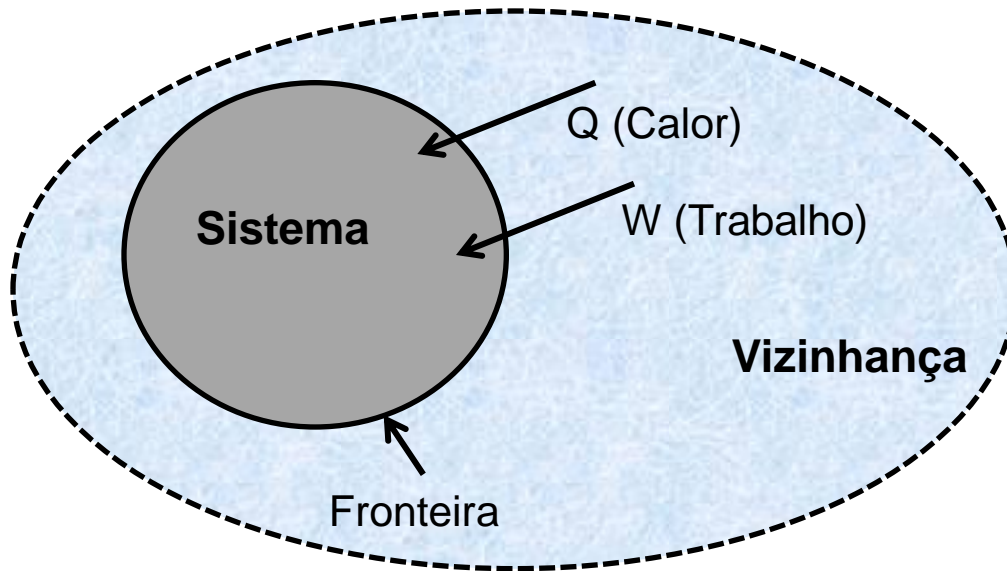
ENGENHARIA QUÍMICA
Universidade Federal de Goiás

Introdução à Transferência de Calor

Professor Dyrney Araújo dos Santos
Universidade Federal de Goiás
site: www.dyrney.com

1 . Introdução

Da Termodinâmica tem-se: A energia pode ser transferida através de interações de um sistema com a sua vizinhança. Essas interações chamadas de trabalho (W) e calor (Q).



A termodinâmica lida com os estados extremos (inicial e final) do processo ao longo do qual uma interação ocorre e não fornece informação sobre a natureza da interação ou sobre a taxa na qual ela ocorre.

Objetivo do estudo de transferência de Calor: Estender a análise termodinâmica através do estudo dos *modos de transferência de calor* e desenvolver relações para calcular *taxas de transferência de calor*

1 . Introdução

O que é Transferência de calor?

É a energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço. Sempre que existir uma diferença de temperaturas (ou gradiente de temperaturas) em um meio ou entre meios, haverá, necessariamente, transferência de calor.

Modos de Transferência de calor



Condução: Transferência de calor através de um sólido ou de um fluido estacionário.

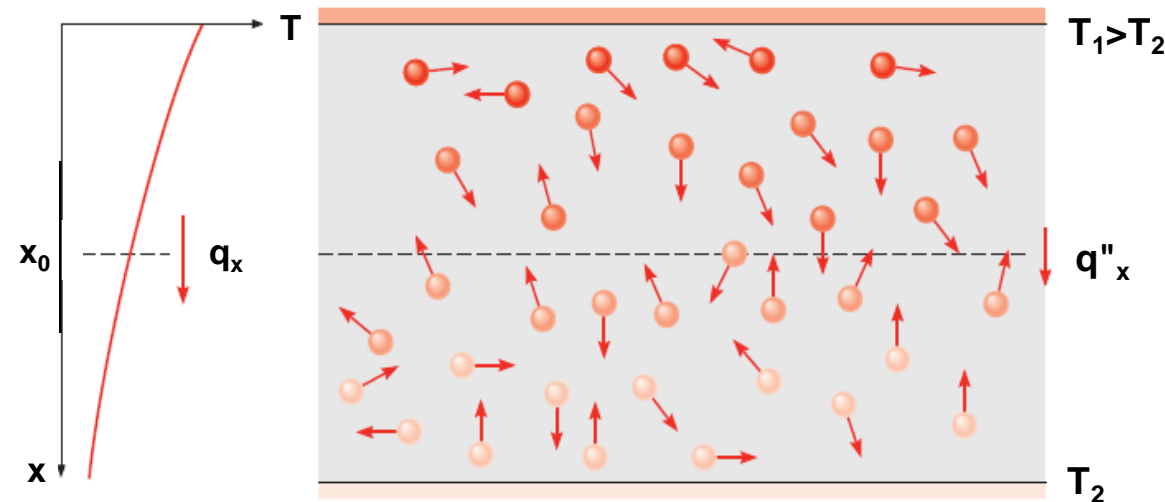
Convecção: Transferência de calor entre uma superfície e um fluido em movimento.

Radiação: Transferência de calor entre duas superfícies na ausência de um meio interposto participante.

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.1 Condução Térmica

Caso: gás confinado entre duas superfícies no qual exista um gradiente de temperatura e admita que não haja movimento *global*, ou *macroscópico*.



Transferência a nível molecular e atômico (nível microscópico)

A energia das moléculas está relacionada aos seus movimentos de translação, vibração e rotação

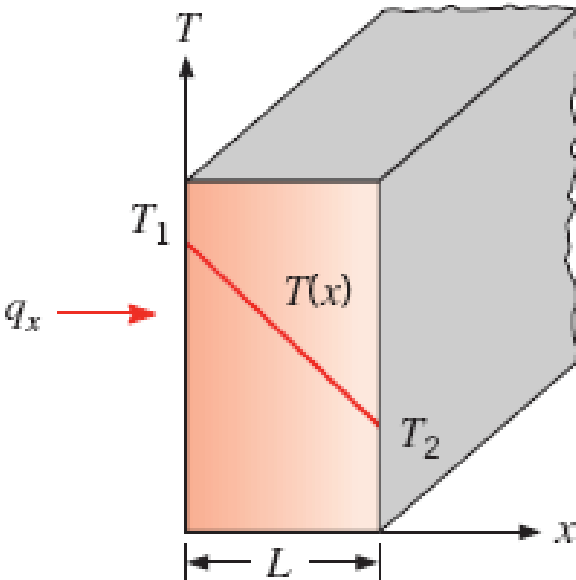
Condução: transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas devido às interações entre partículas. A condução em sólidos pode ser atribuída à atividade atômica na forma de vibrações dos retículos.

OBS: O fluxo de calor é sempre contrário ao gradiente de temperatura, ou seja, ocorre no sentido da diminuição da temperatura

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.1 Condução Térmica

Transferência de calor podem ser quantificados através de equações de taxa apropriadas.



Para uma parede plana unidimensional, com uma distribuição de temperaturas $T(x)$, a equação da taxa pode ser escrita como:

$$q_x = -k \frac{dT}{dx}$$

A equação da taxa para a condução é conhecida como lei de Fourier em homenagem a Joseph Fourier.



Jean-Baptiste Joseph Fourier
(1768-1830)

• **O fluxo térmico q [W/m²]:** é a taxa de transferência de calor na direção x por unidade de área perpendicular à direção da transferência e é proporcional ao gradiente de temperatura (dT/dx).

• **Parâmetro k :** é uma propriedade de transporte (condutividade térmica [W/(m.K)]) e é característico do material da parede.

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.1 Condução Térmica

Condutividade térmica: PROPRIEDADE TERMODINÂMICA

- **Efeito da Temperatura:** FORTE
- **Efeito da Pressão:** MODERADO, considera-se desprezível para $P \leq 100\text{atm}$

Condutividade dos gases aumenta com a temperatura.



$$\frac{k}{k_0} \approx \begin{cases} \left(\frac{T}{T_0}\right)^n & \text{Lei de Potência} \\ \frac{(T/T_0)^{3/2} (T_0 + S)}{T + S} & \text{Lei de Sutherland} \end{cases}$$

Condutividade dos líquidos e sólidos diminui com a temperatura.



$$\ln\left(\frac{k}{k_0}\right) \approx a + b\left(\frac{T_0}{T}\right) + c\left(\frac{T_0}{T}\right)^2$$

OBS: 1) k_0 é uma condutividade conhecida a uma temperatura absoluta T_0 (273K)

2) As constantes n e S e a , b e c são ajustadas aos dados (depende do material)

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.1 Condução Térmica

VALORES DE CONDUTIVIDADE TÉRMICA PARA DIVERSOS MATERIAIS

Material	K (W/m°C)
Prata	410
Cobre	385
Alumínio	202
Chumbo	35
Arenito	1,83
Vidro	0,78
Lã de vidro	0,038
Água	0,556
Amônia	0,540
Hidrogênio	0,175
Hélio	0,141
Ar	0,024
Dióxido de Carbono	0,0146

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.1 Condução Térmica

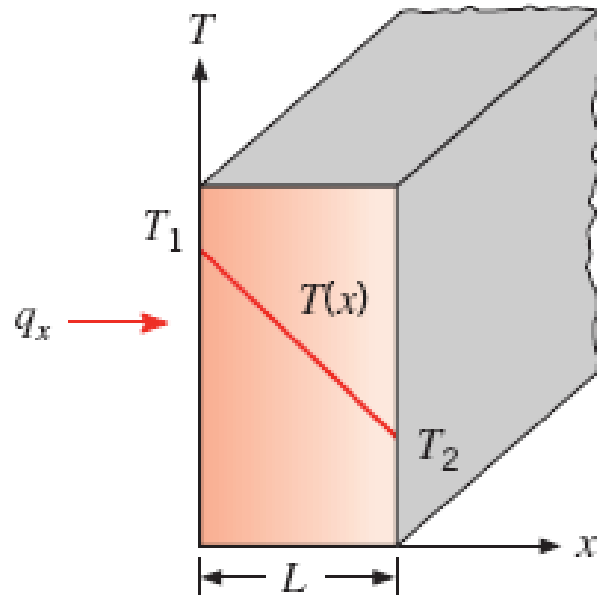
Simplificação da Equação de Fourier com distribuição de temperatura linear

Caso: condições de estado estacionário nas quais a distribuição de temperaturas é linear, o gradiente de temperaturas pode ser representado como:

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

e o fluxo térmico é, então:

$$q_x = k \frac{(T_1 - T_2)}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$$



OBS: 1) **fluxo térmico (q)**: taxa de transferência de calor por unidade de área (A).

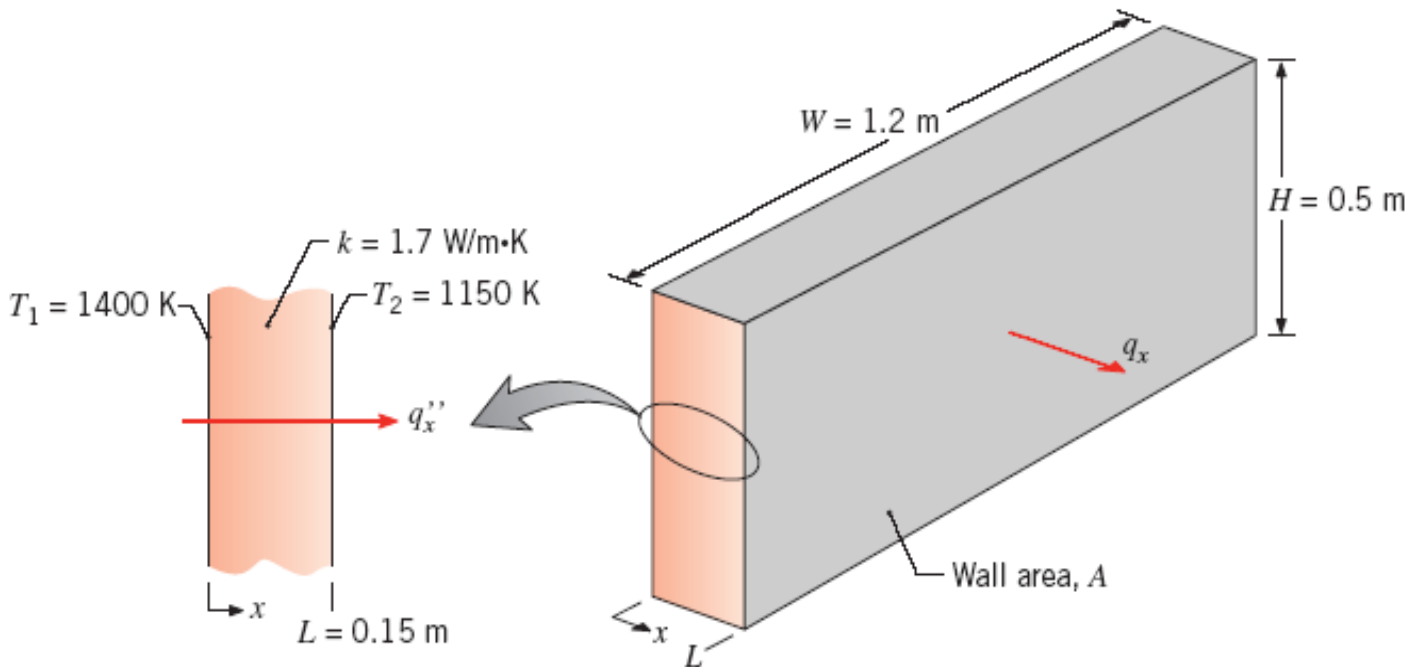
2) A taxa de transferência de calor por condução, **Q (W)**, através de uma parede plana com área A, é, então, o produto do fluxo e da área, **Q=q.A**.

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

Exemplo: A parede de um forno industrial é construída com tijolo refratário com 0,15 m de espessura, cuja condutividade térmica é de 1,7 W/(m.k). Medidas efetuadas ao longo da operação revelam temperaturas de 1400 e 1150 K nas paredes internas e externa, respectivamente. Qual é a taxa de calor perdida através de uma parede que mede 0,5 m x 1,2 m?

Solução:

1° passo: Inicialmente esquematize o problema a ser resolvido levando-se em conta as informações dadas e verificar a compatibilidade das unidades



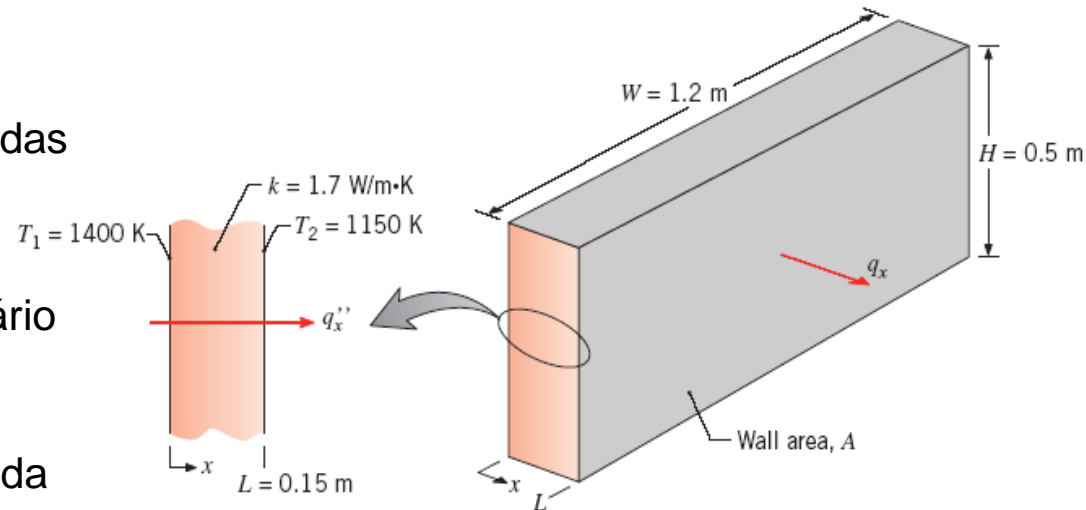
1.1 Origem Física e Equações de Taxas

Exemplo: A parede de um forno industrial é construída com tijolo refratário com 0,15 m de espessura, cuja condutividade térmica é de 1,7 W/(m.k). Medidas efetuadas ao longo da operação revelam temperaturas de 1400 e 1150 K nas paredes internas e externa, respectivamente. Qual é a taxa de calor perdida através de uma parede que mede 0,5 m x 1,2 m?

Solução:

2º passo: Hipóteses a serem consideradas

- ✓ Condição de regime estacionário (variáveis independente do tempo);
- ✓ Condução unidimensional através da parede (gradiente de temperatura apenas na direção x);
- ✓ Condutividade térmica constante.



1.1 Origem Física e Equações de Taxas

Exemplo: A parede de um forno industrial é construída com tijolo refratário com 0,15 m de espessura, cuja condutividade térmica é de 1,7 W/(m.k). Medidas efetuadas ao longo da operação revelam temperaturas de 1400 e 1150 K nas paredes internas e externa, respectivamente. Qual é a taxa de calor perdida através de uma parede que mede 0,5 m x 1,2 m?

Solução:

Visto que a transferência de calor através da parede é por condução, o fluxo térmico pode ser determinado com a lei de Fourier.

$$q_x = k \frac{\Delta T}{L} = 1,7 \frac{W}{(m.K)} \frac{(1150K - 1400K)}{0,15m}$$

$$q_x = 2833 \frac{W}{m^2}$$

O fluxo térmico representa a taxa de transferência de calor por unidade de área e é uniforme ao longo da superfície da parede.

Desta forma, a perda de calor através da parede de área $A = \text{altura} \times \text{espessura}$ é dada por:

$$q_x = \frac{\dot{Q}}{A}$$

$$\dot{Q} = q_x A = 2833 \frac{W}{m^2} (0,5m \times 1,2m)$$

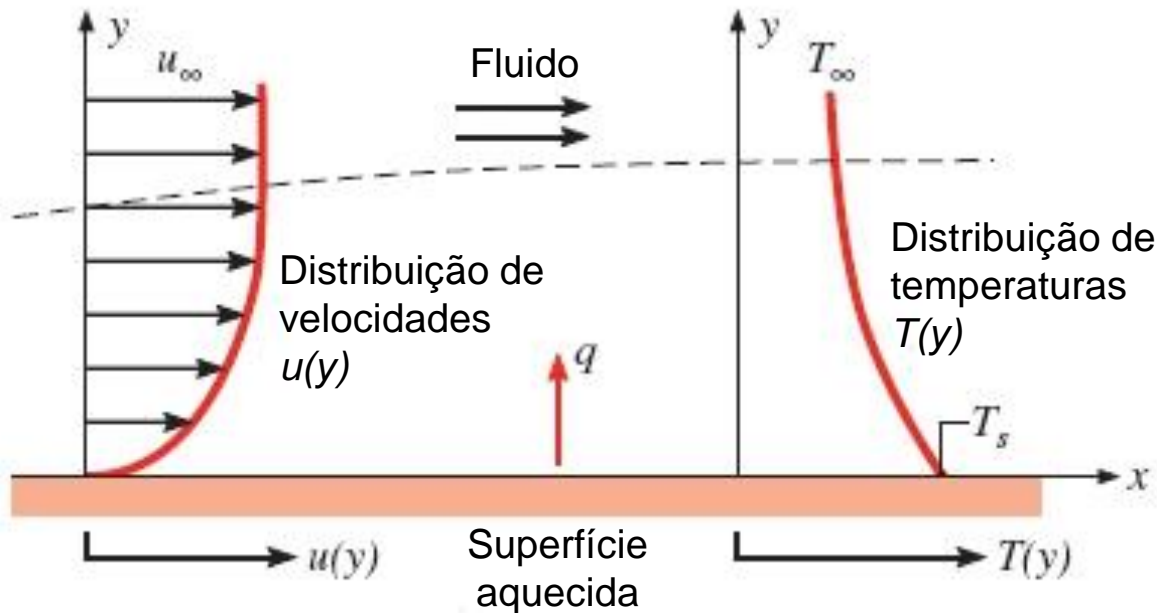
$$\dot{Q} = 1700W = 1700 \frac{J}{s}$$

Observe o sentido do fluxo térmico e a diferença entre o fluxo térmico e a taxa de transferência de calor.

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.2 Convecção Térmica

A transferência de calor por convecção se dá pelo contato entre um fluido em movimento e uma superfície, estando os dois a diferentes temperaturas.



Surgimento de uma camada-limite hidrodinâmica, onde a velocidade varia de zero na parede ($y=0$) até u_∞ , associado ao escoamento, e de uma camada-limite térmica, onde a temperatura varia de T_s na parede ($y=0$) a T_∞ numa região afastada da parede.

- A contribuição do movimento global do fluido origina-se no fato de que a espessura da camada-limite cresce à medida que o escoamento progride na direção do eixo x .
- O calor que é conduzido para o interior desta camada é arrastado na direção do escoamento, sendo, posteriormente transferido para o fluido que se encontra no exterior da camada-limite.

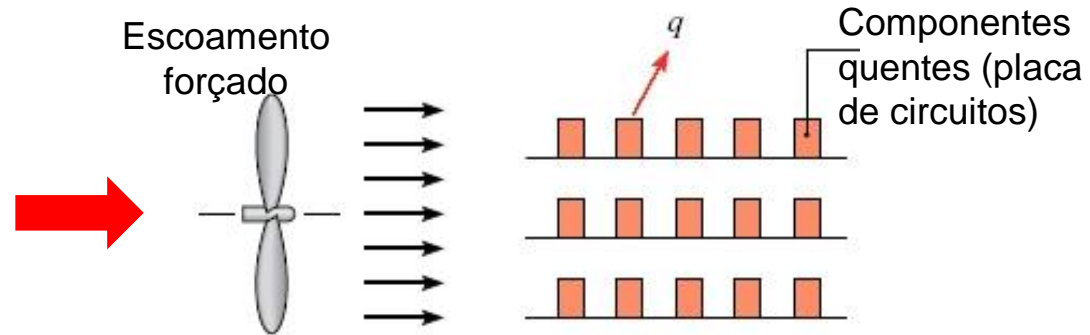
1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.2 Convecção Térmica

A transferência de calor por convecção pode ser classificada de acordo com a natureza do escoamento do fluido.

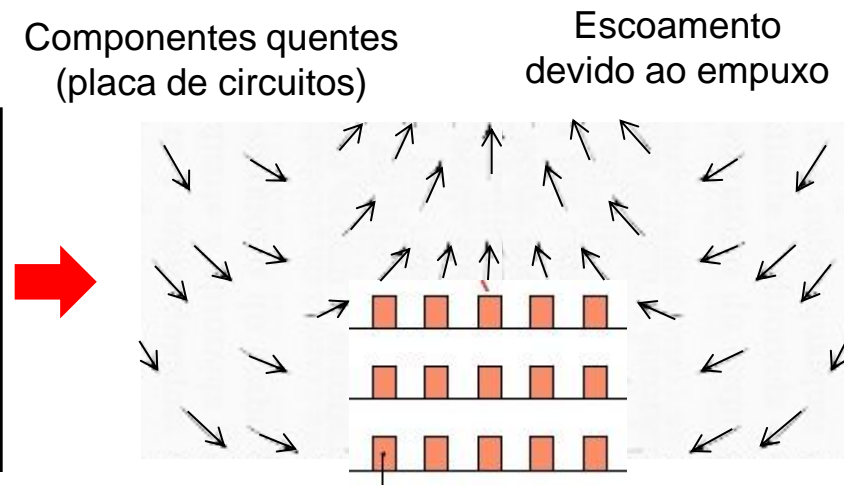
Convecção Forçada: Escoamento causado por meios externos.

Ex: Uso de um ventilador para propiciar o resfriamento dos componentes eletrônicos quentes de placas de circuito



Convecção Natural: Escoamento induzido por forças de empuxo.

Ex: Série de placas contendo componentes quentes. A densidade do ar que está em contato diminui devido ao aumento de temperatura e, desta forma, ascende (força de empuxo) e é substituído por ar à temperatura ambiente.



1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.2 Convecção Térmica

Independente da natureza do processo de transferência de calor por convecção, a equação apropriada para a taxa de transferência possui a forma:

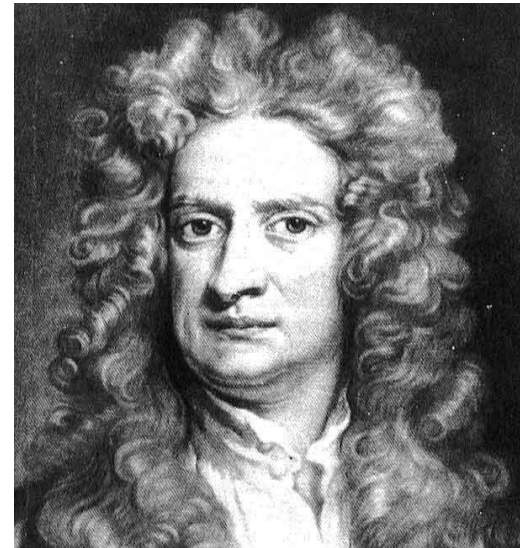
$$q = h(T_s - T_\infty)$$

• **Fluxo de calor por convecção (q [W/m²]):** é proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície (T_s) e do fluido (T_∞);

• **Parâmetro h (W/(m².K)):** é chamado de *coeficiente de transferência de calor por convecção* ou *coeficiente de película*;

OBS: h depende das condições na camada-limite, que por sua vez, são influenciadas pela geometria da superfície, pela natureza do escoamento e por uma série de outras variáveis. **Logo, h é uma propriedade do escoamento e não do fluido.**

Esta equação é conhecida como a lei do resfriamento de Newton em homenagem a Sir Isaac Newton.



Sir Isaac Newton
(1642-1726)

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.2 Convecção Térmica

FAIXAS DE VALORES DE h PARA DIFERENTES SITUAÇÕES

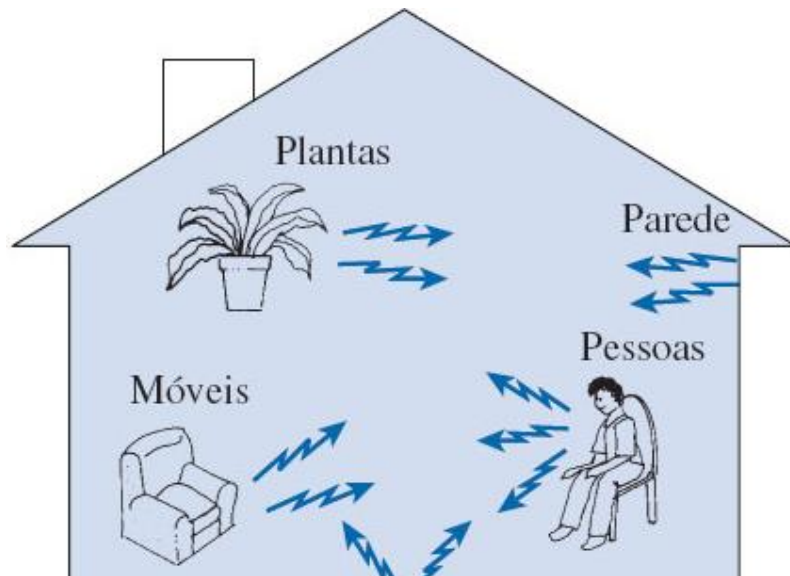
Processo	h (W/m ² °C)
Convecção natural	
Gases	2-25
Líquidos	50-1.000
Convecção forçada	
Gases	25-250
Líquidos	100-20.000
Convecção com mudanças de fase	
Ebulição ou condensação	2.500-100.000

Obs: h é função da velocidade do fluido, da temperatura, bem como de outras variáveis.

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

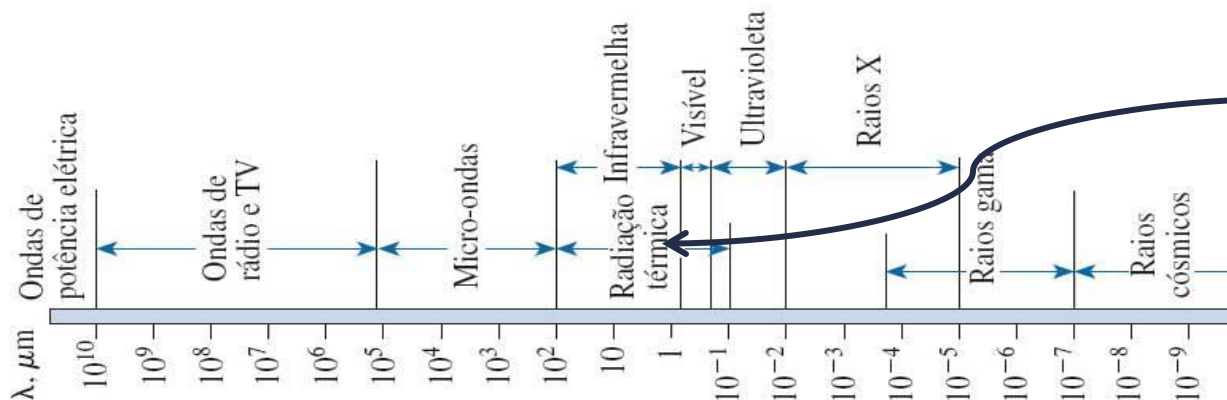
1.1.3 Radiação Térmica

A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura diferente do zero absoluto (-273°C).



A emissão da radiação pode se atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas de átomos ou moléculas.

A radiação é transportada por ondas eletromagnéticas e, diferentemente da transferência de energia por condução e convecção, a radiação não necessita de um meio material.



A radiação térmica é apenas um dos tipos da radiação eletromagnética. Apresenta comprimento de onda entre 0,1 e 100 μm .

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

1.1.3 Radiação Térmica

Poder emissivo: energia liberada por unidade de área (W/m^2). A máxima energia liberada é dada pela Lei de *Stefan-Boltzmann* (**corpo ideal** ou **corpo negro**):

$$E_b = \sigma T_s^4$$

T_s : temperatura absoluta (K) da superfície;
 σ : constante de *Stefan-Boltzmann* ($5,67 \times 10^{-8} \text{W}/(\text{m}^2\text{K}^4)$).



Ludwig Boltzmann (1844-1906)
Josef Stefan (1835-1893)

Para uma superfície real, o fluxo é sempre **menor** do que o ideal e é dado por:

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

ε : emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$).
Fornece uma medida da eficiência de emissão de uma superfície (propriedade do material).

Taxa líquida de transferência de calor por radiação entre duas superfícies

$$\dot{Q} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{viz}^4)$$

A_s área superficial

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

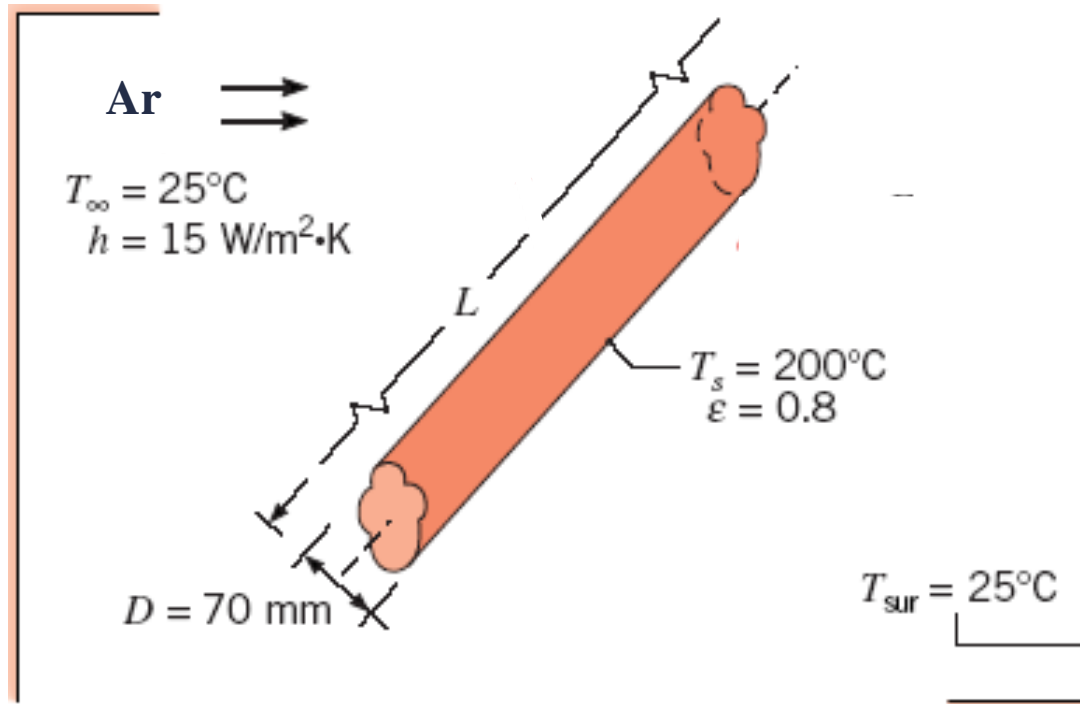
Resumo dos Mecanismos de Transferência de Calor

Mecanismo	Equações	Propriedades de Transporte
Condução	<i>Lei de Fourier</i>	
	$q_x = -k \frac{dT}{dx}$ $q_x = k \frac{(T_1 - T_2)}{L} = k \frac{\Delta T}{L}$	k (W/mK)
Convecção (forçada ou natural)	<i>Lei de Resfriamento de Newton</i>	
	$q = h(T_s - T_\infty)$	h (W/m ² K)
Radiação	<i>Lei de Steffan-Boltzmann</i>	
	$E = \varepsilon \sigma T_s^4$ $q = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{viz}^4)$	ε σ (W/m ² K ⁴)

1.1 Origem Física e Equações de Taxas

Exercício 1: Uma tubulação de vapor d'água atravessa uma sala na qual o ar e as paredes se encontram a 25°C . O diâmetro externo do tubo é de 70 mm, a temperatura de sua superfície é de 200°C e esta superfície tem emissividade igual a 0,8. Sendo o coeficiente de transferência de calor por convecção natural (h) igual a $15 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, qual é a taxa de calor perdida pela superfície por unidade de comprimento do tubo?

OBS: Neste caso, considerar a troca de calor tanto por convecção quanto por radiação



1.1 Origem Física e Equações de Taxas

Exercício 2: Um *chip* quadrado, com lado $w = 5\text{mm}$, opera em condições isotérmicas. O *chip* é posicionado em um substrato de modo que suas superfícies laterais e inferior estão isoladas termicamente, enquanto sua superfície superior encontra-se exposta ao escoamento de um refrigerante a $T_{\infty} = 15^{\circ}\text{C}$. A partir de considerações de confiabilidade, a temperatura do chip não pode exceder a $T = 85^{\circ}\text{C}$. Sendo a substância refrigerante o ar, com um coeficiente de transferência de calor por convecção correspondente $h = 200\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, qual é a potência máxima permitida para o chip? Sendo o refrigerante um líquido dielétrico para o qual $h = 3000\text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$, qual é a potência máxima permitida? Comente os resultados.