



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



ENGENHARIA FÍSICA

FENÔMENOS DE TRANSPORTE B

Prof. Dr. Sérgio R. Montoro

sergio.montoro@usp.br

srmontoro@dequi.eel.usp.br



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



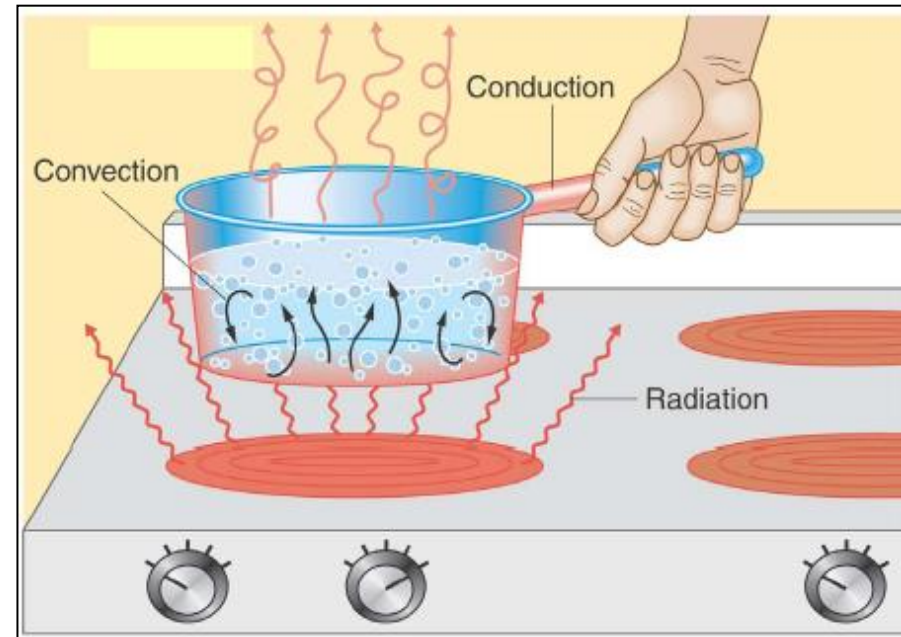
AULA 3

**MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE
TRANSFERÊNCIA DE CALOR**



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

- ✓ A) CONDUÇÃO (meio estacionário)
- ✓ B) CONVECÇÃO (superfície e fluído)
- ✓ C) RADIAÇÃO (ausência de um meio interveniente)





MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

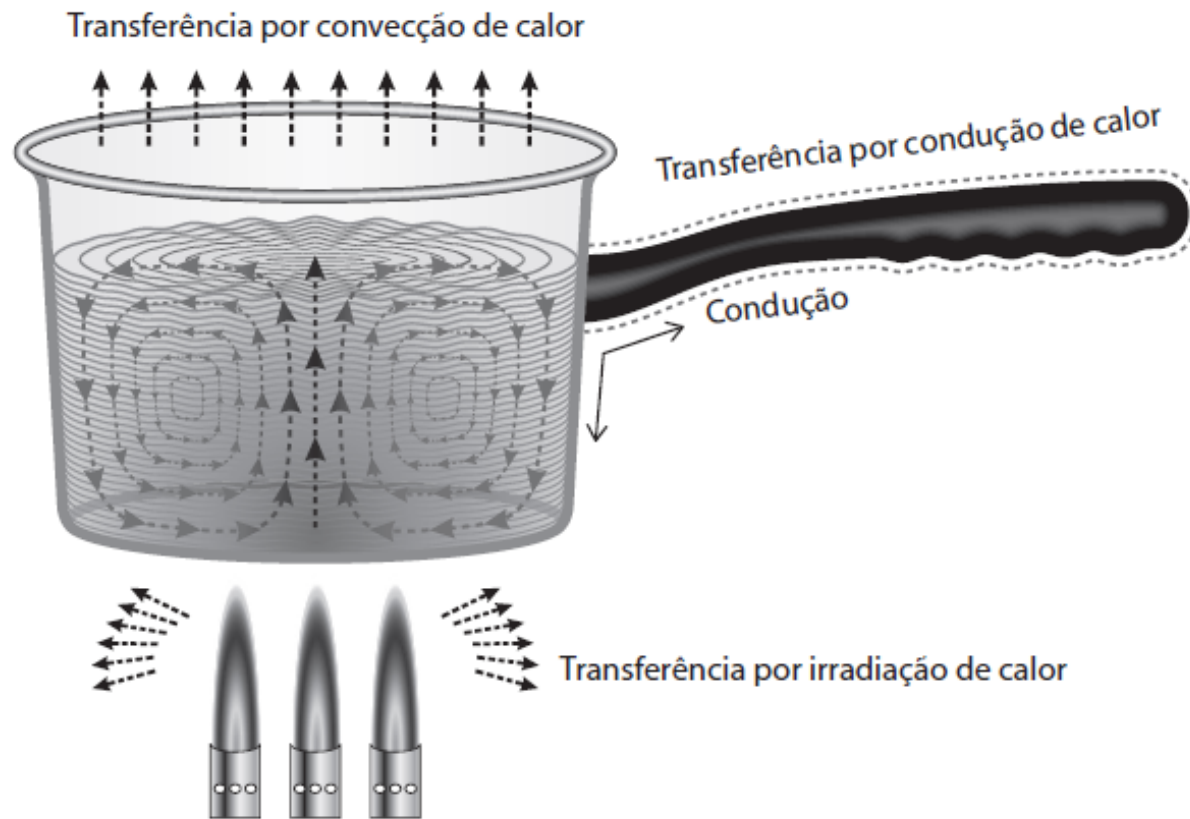


Figura 2. Representação das formas de transferência de calor por condução, convecção e irradiação.

Fonte: Adaptada de Fouad A. Saad/Shutterstock.com.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



CONDUÇÃO TÉRMICA

Considerações Iniciais



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

A) CONDUÇÃO

A condução é um processo pelo qual o calor flui de uma região de temperatura mais alta para uma região de temperatura mais baixa, dentro de um meio (sólido, líquido ou gás) ou entre meios diferentes em contato físico direto.

Na condução, a energia é transmitida por comunicação molecular direta, sem apreciável deslocamento das moléculas.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

A) CONDUÇÃO

O fluxo de calor por condução ocorre via as colisões entre átomos e moléculas de uma substância e a transferência de energia cinética.

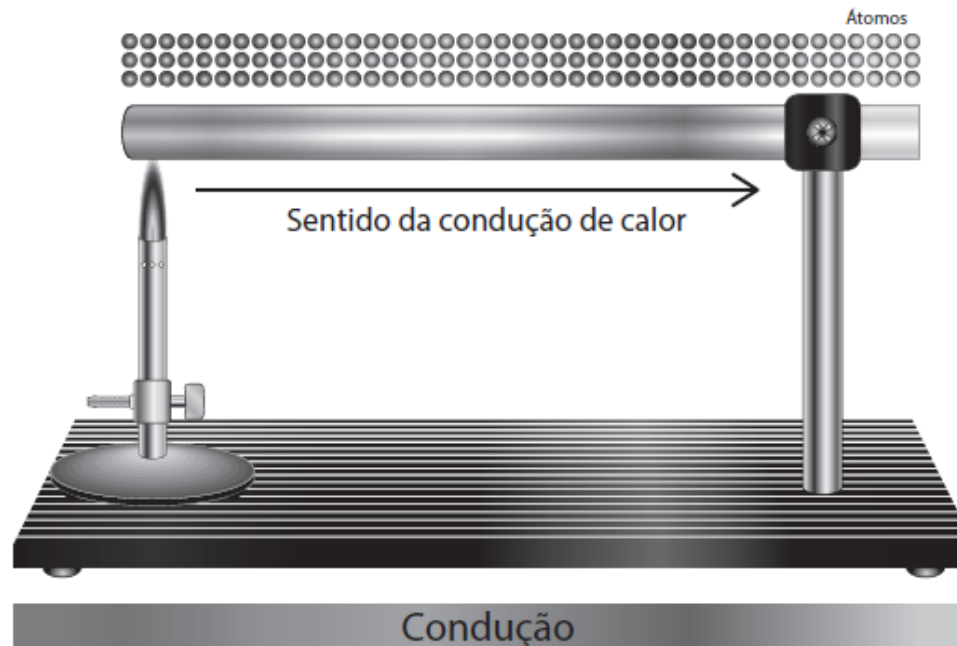


Figura 4. Representação da condução de calor do meio com maior para o de menor calor.

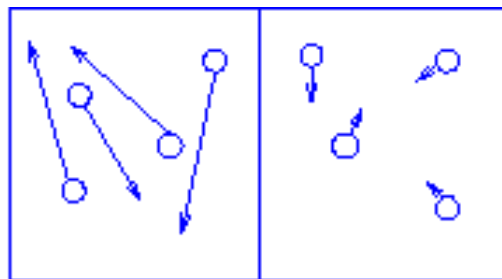
Fonte: Adaptada de Fouad A. Saad/Shutterstock.com.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

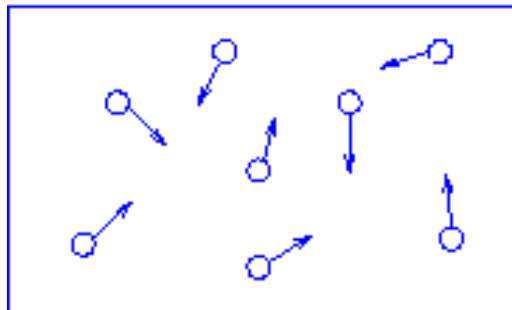
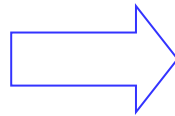
A) CONDUÇÃO

Vamos considerar duas substâncias a diferentes temperaturas separadas por uma barreira que é removida subitamente, como mostra a figura abaixo.



átomos quentes
(rápidos)

átomos frios
(lentos)



temperatura comum

Quando a barreira é removida, os átomos "quentes" colidem com os átomos "frios". Em tais colisões os átomos rápidos perdem alguma velocidade e os mais lentos ganham velocidade. Logo, os mais rápidos transferem alguma de sua energia para os mais lentos. Esta transferência de energia do lado quente para o lado frio é chamada de fluxo de calor por condução.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

A) CONDUÇÃO

Equação Fundamental (Lei de Fourier):

$$q = -k.A.\frac{\partial T}{\partial x} \Rightarrow q = k.A.\frac{\Delta T}{\Delta x} \Rightarrow q = k.A.\frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1}$$

Onde:

q = fluxo de calor, em [W]

A = área da seção, perpendicular ao fluxo, em [m²]

$\Delta T/\Delta x$ = gradiente de temperatura, em [°C/m]

k = condutividade térmica do material, em [W/m.°C] ou [W/m.K]

$$T_1 > T_2$$

$$x_2 - x_1 = L$$



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

A) CONDUÇÃO

OBS: Taxa de calor

$$q' = \left[\frac{W}{m} \right]$$

$$q'' = \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

$$q''' = \left[\frac{W}{m^3} \right]$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



CONVECÇÃO TÉRMICA

Considerações Iniciais



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

B) CONVECÇÃO

A convecção é um processo de transporte de energia pela ação combinada de condução de calor, armazenamento de energia e movimento de mistura. A convecção é importante principalmente como mecanismo de transferência de energia entre uma superfície sólida e um líquido ou gás.

O mecanismo de convecção se caracteriza pela transferência de calor causada pelo deslocamento de massa fluida.

Em um fluido em movimento, onde existe uma distribuição não-uniforme de temperatura, o calor é transferido pelo transporte de massa fluida e, também, por condução devido aos gradientes de temperatura



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

B) CONVECÇÃO

O fluxo de calor por convecção é diretamente proporcional à diferença entre as temperaturas da superfície sólida e do fluido, e é determinada por meio da equação conhecida como a [lei de Newton](#) para o resfriamento:

$$q = h.A.(T_p - T_{\infty})$$

q = fluxo de calor, em [W]

h = coeficiente de convecção, em [W/m².°C]

A = área do sólido em contato com o fluido, em [m²]

T_p = temperatura da superfície ou parede sólida, em [°C]

T_{∞} = temperatura do fluido, em [°C]

OBS: h = coeficiente de película

h = coeficiente de filme



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

B) CONVECÇÃO

Este mecanismo não envolve transferência microscópica de calor, por átomos ou moléculas. Convecção é o fluxo de calor devido a um movimento macroscópico, carregando partes da substância de uma região quente para uma região fria.

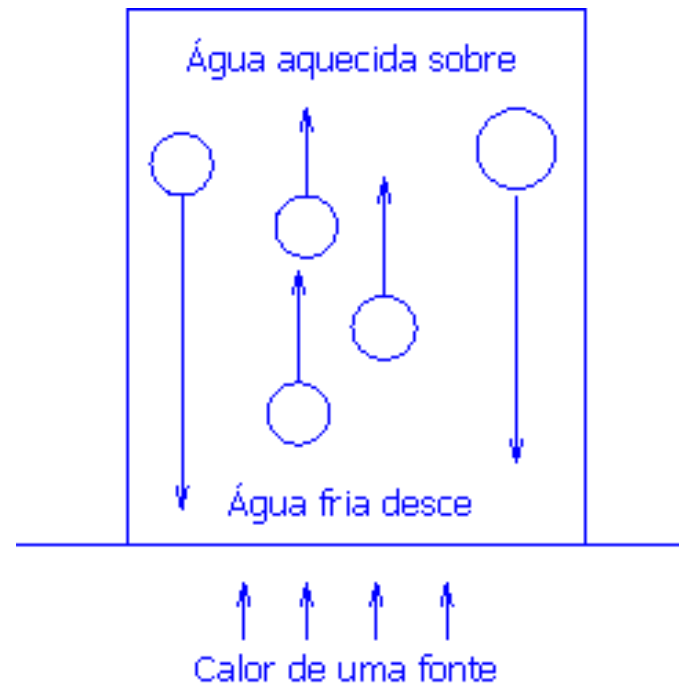
Suponha que tenhamos uma região de ar que se aquece. À medida que o ar se aquece as moléculas de ar se espalham, fazendo com que esta região se torne menos densa que o ambiente em torno, o ar não aquecido. Sendo menos denso ele se elevará - este movimento de ar quente para uma região mais fria é chamada de transferência de calor por convecção.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

B) CONVECÇÃO

Um bom exemplo de convecção é o aquecimento de uma panela de água.





UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



RADIAÇÃO TÉRMICA

Considerações Iniciais



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

RADIAÇÃO TÉRMICA – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

- ✓ Transferência de Calor por Condução e Convecção $\Rightarrow$ exigem a presença de um gradiente de temperatura em alguma forma de matéria;
- ✓ De maneira distinta, a transferência de calor por **radiação térmica** não exige a presença de um meio material;



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

RADIAÇÃO TÉRMICA – CONSIDERAÇÕES INICIAIS

- ✓ Ela é um processo extremamente importante e, no sentido físico, é talvez o modo mais interessante de transferência de calor;
- ✓ É relevante em muitos processos industriais de aquecimento, resfriamento e secagem, assim como em métodos de conversão de energia que envolvem a combustão de combustíveis fósseis e a radiação solar.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



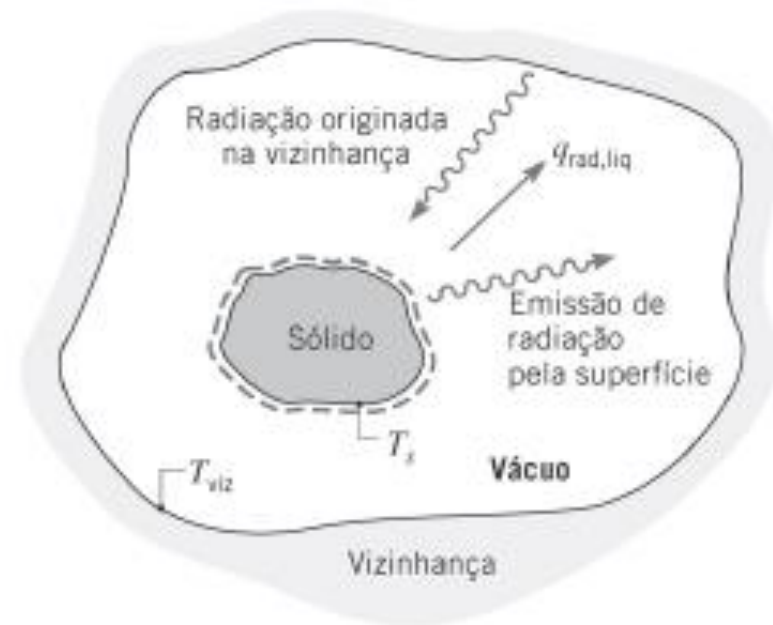
RADIAÇÃO TÉRMICA

Conceitos Fundamentais



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Considere um sólido que se encontra inicialmente a uma temperatura mais elevada T_s do que a de sua vizinhança T_{viz} , ao redor do qual há vácuo, conforme ilustrado na figura ao lado.



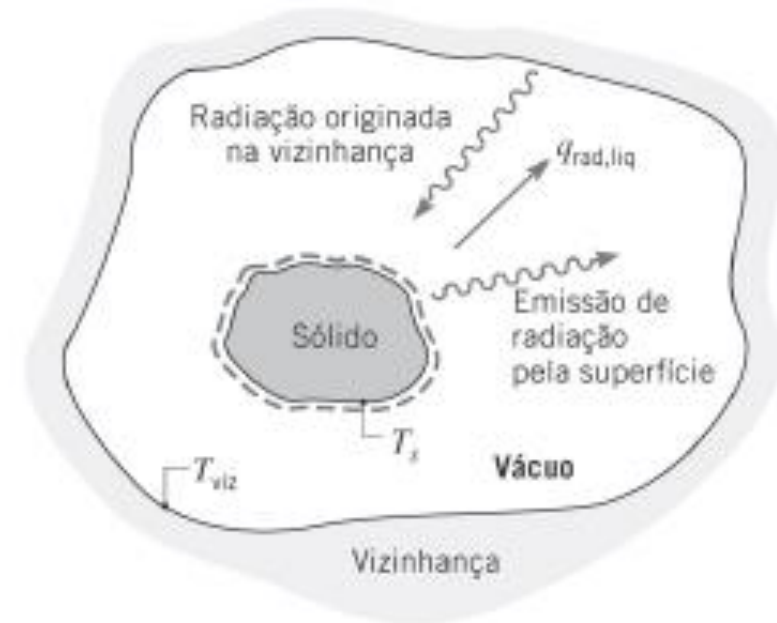
Resfriamento radiante de um sólido aquecido.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

A presença do vácuo impede a perda de energia na superfície do sólido por condução ou convecção.

Contudo, nossa intuição nos diz que o sólido irá esfriar e finalmente atingir o equilíbrio térmico com sua vizinhança.

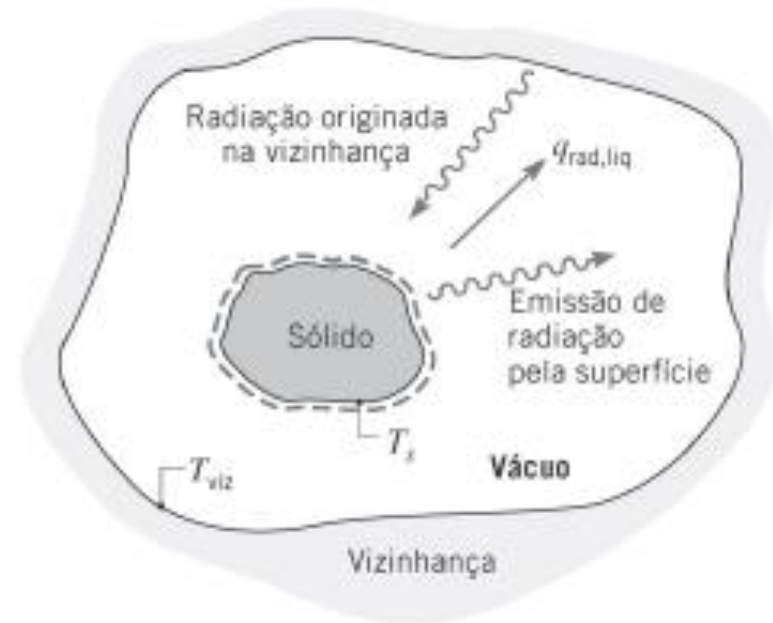


Resfriamento radiante de um sólido aquecido.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Esse resfriamento está associado a uma redução na energia interna armazenada pelo sólido e é uma consequência direta da **emissão** de radiação térmica pela sua superfície.



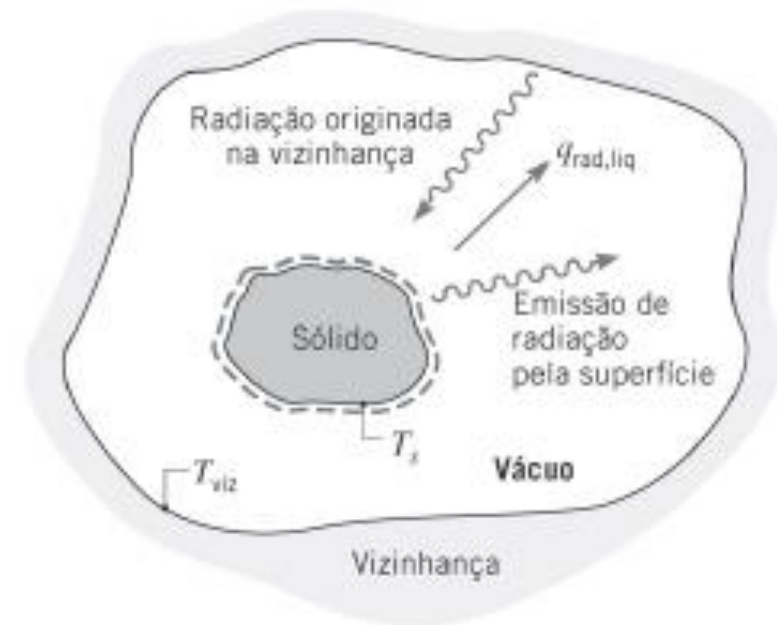
Resfriamento radiante de um sólido aquecido.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Por sua vez, a superfície irá interceptar e absorver radiação originada na vizinhança.

Entretanto, se $T_s > T_{viz}$ a taxa de transferência de calor por radiação líquida, $q_{rad,liq}$, está *saindo* da superfície e a mesma resfriará até que T_s atinja T_{viz} .



Resfriamento radiante de um sólido aquecido.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Associamos a radiação térmica à taxa na qual a energia é emitida pela matéria como um resultado de sua temperatura não nula.

Nesse momento, radiação térmica está sendo emitida por toda matéria que circula você: pela mobília e pelas paredes da sala, se você estiver em um ambiente fechado, ou pelo solo, pelos prédios e pela atmosfera e sol, se você estiver em um ambiente aberto.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

EXEMPLO: Dimensionamento de Ar Condicionado

Cálculo de Btus



Preencha os campos abaixo para calcular a potência (Btus) necessária para climatizar seu ambiente.

Tamanho do ambiente

Comprimento

1m

Largura

1m

Quantidade de janelas



1

Quantidade de eletrônicos



1

Quantidade de pessoas



1

Exposição ao sol



☐

Manhã

☐

Tarde

Potência necessária (BTU/s)

Calcular



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

O mecanismo de emissão está relacionado à energia liberada como um resultado de oscilações ou transições dos muitos elétrons que constituem a matéria.

Essas oscilações são, por sua vez, sustentadas pela energia interna e, conseqüentemente, pela temperatura da matéria.

Dessa forma, associamos a emissão de radiação térmica às condições excitadas termicamente no interior da matéria.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

TODAS AS FORMAS DE MATÉRIA EMITEM RADIAÇÃO!!!

Em gases e sólidos semitransparentes, como o vidro e cristais de sais a elevadas temperaturas, a emissão é um **fenômeno volumétrico**, como ilustrada na figura ao lado.



O processo de emissão como um fenômeno volumétrico.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

TODAS AS FORMAS DE MATÉRIA EMITEM RADIAÇÃO!!!

Isto é, a radiação que emerge de um volume finito de matéria corresponde ao efeito integrado da emissão local em todo o volume.



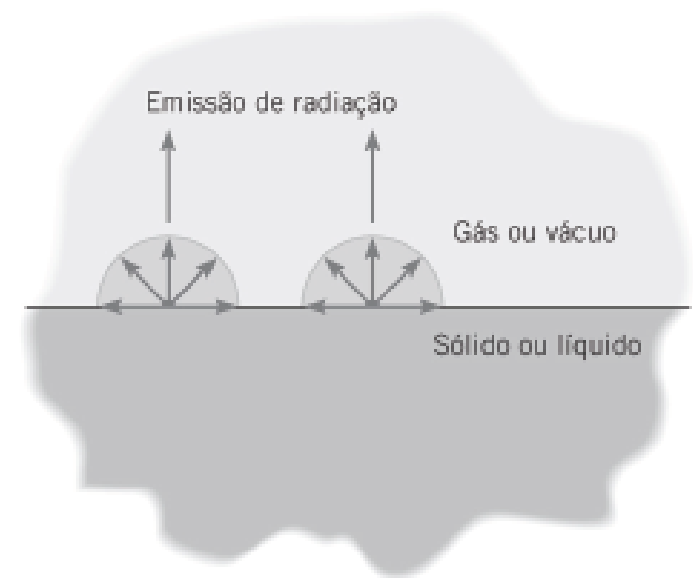
O processo de emissão como um fenômeno volumétrico.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

TODAS AS FORMAS DE MATÉRIA EMITEM RADIAÇÃO!!!

Entretanto, em nossas aulas nos concentraremos em situações nas quais a radiação pode ser tratada como um ***fenômeno de superfície***, como ilustrada na figura ao lado.



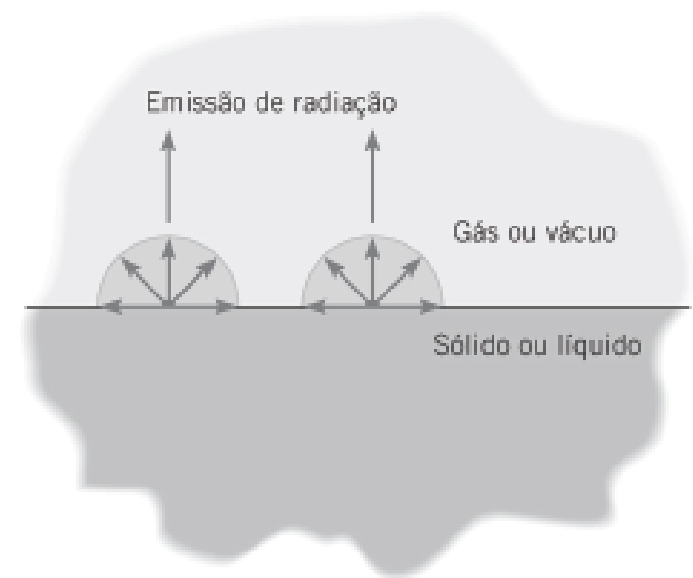
O processo de emissão como um fenômeno superficial.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

TODAS AS FORMAS DE MATÉRIA EMITEM RADIAÇÃO!!!

Na maioria dos sólidos e líquidos, a radiação emitida pelas moléculas localizadas no interior do volume é fortemente absorvida pelas moléculas e elas adjacentes.



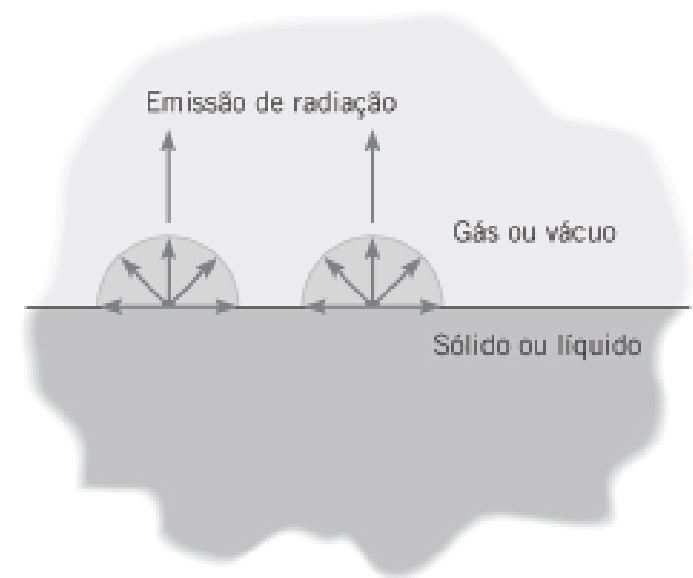
O processo de emissão como um fenômeno superficial.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

TODAS AS FORMAS DE MATÉRIA EMITEM RADIAÇÃO!!!

Consequentemente, a radiação que é emitida por um sólido ou um líquido se origina nas moléculas que se encontram a uma distância de até aproximadamente $1\ \mu\text{m}$ de sua superfície exposta.



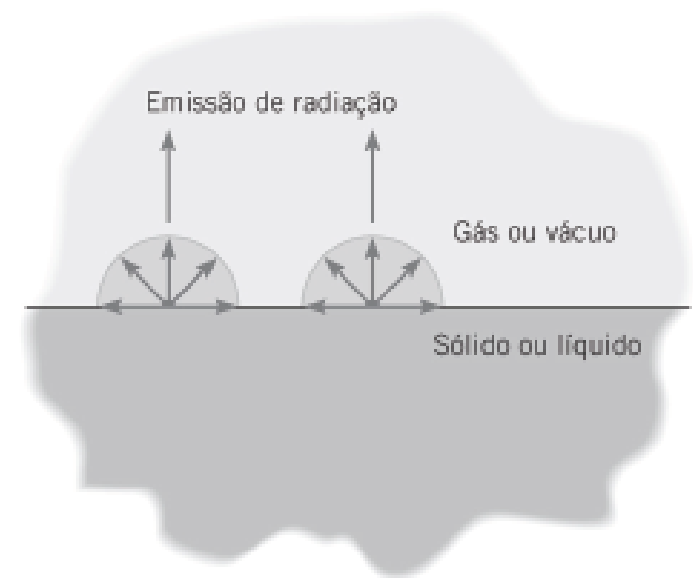
O processo de emissão como um fenômeno superficial.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

TODAS AS FORMAS DE MATÉRIA EMITEM RADIAÇÃO!!!

É por essa razão que a emissão a partir de um sólido ou de um líquido para o interior de um gás a eles adjacente ou para o vácuo pode ser vista como um fenômeno superficial, exceto em situações envolvendo dispositivos em nano ou microescala.



O processo de emissão como um fenômeno superficial.



RADIAÇÃO TÉRMICA – CONCEITOS FUNDAMENTAIS

Sabemos que a radiação surge da emissão pela matéria e que seu transporte subsequente não exige a presença de qualquer matéria.

Mas qual a natureza desse transporte?

Uma teoria vê a radiação como a propagação de um conjunto de partículas conhecidas por *fótons* ou *quanta*. Alternativamente, a radiação pode ser vista como a propagação de *ondas eletromagnéticas* (veremos mais detalhes mais adiante).



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



RADIAÇÃO TÉRMICA

Reflexão – Absorção - Transmissão



RADIAÇÃO TÉRMICA – REFLEXÃO – ABSORÇÃO - TRANSMISSÃO

A transferência de calor por radiação consiste no transporte de energia por radiação térmica.

Uma das características é que, além de não necessitar de um meio material para a transferência de calor, o transporte de energia térmica tem eficiência máxima através do vácuo absoluto.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



RADIAÇÃO TÉRMICA – REFLEXÃO – ABSORÇÃO - TRANSMISSÃO

É um processo pelo qual o calor é transmitido de um corpo a alta temperatura para um corpo a baixa temperatura mesmo quando tais corpos estão separados no espaço (vácuo).



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

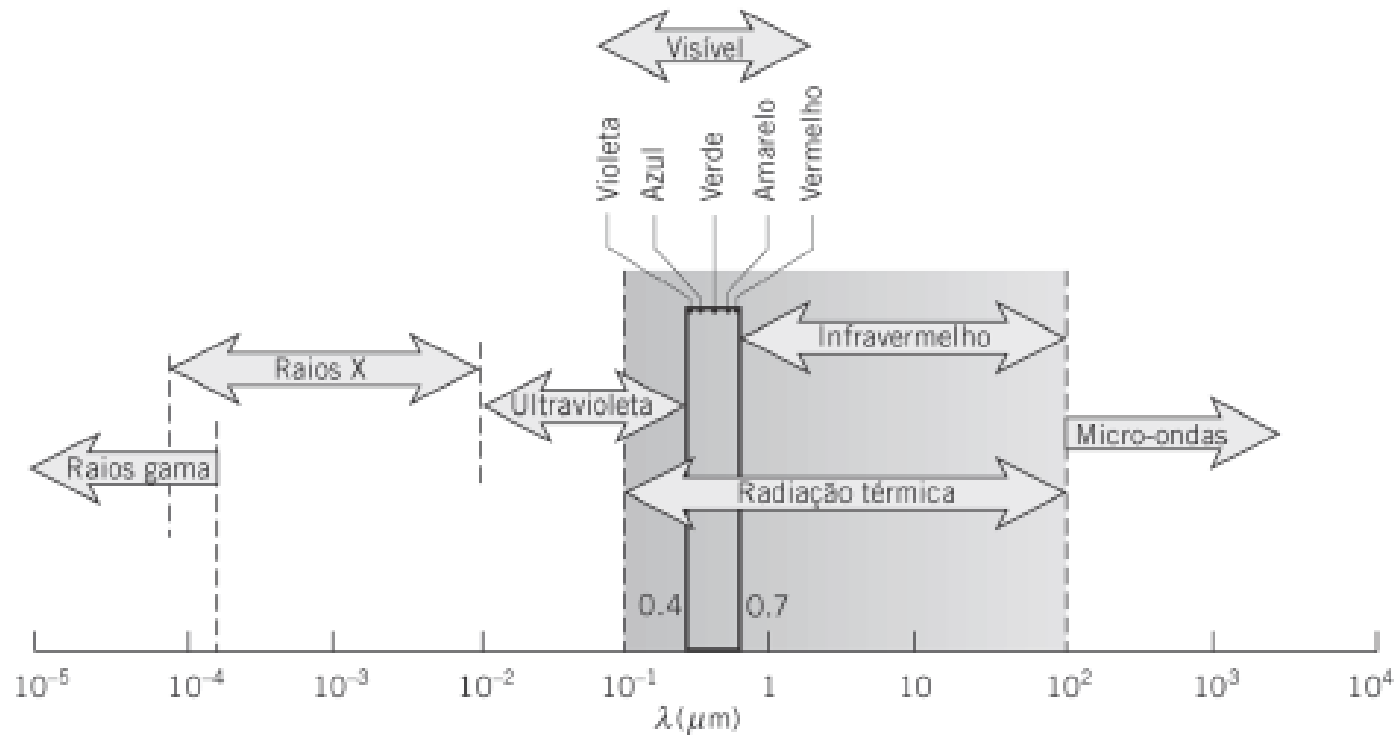


RADIAÇÃO TÉRMICA – REFLEXÃO – ABSORÇÃO - TRANSMISSÃO

O termo radiação geralmente é aplicado a todas as espécies de fenômenos com **ondas eletromagnéticas**, mas na Transferência de Calor são de interesse também os efeitos decorrentes da diferença de temperatura (energia radiante).



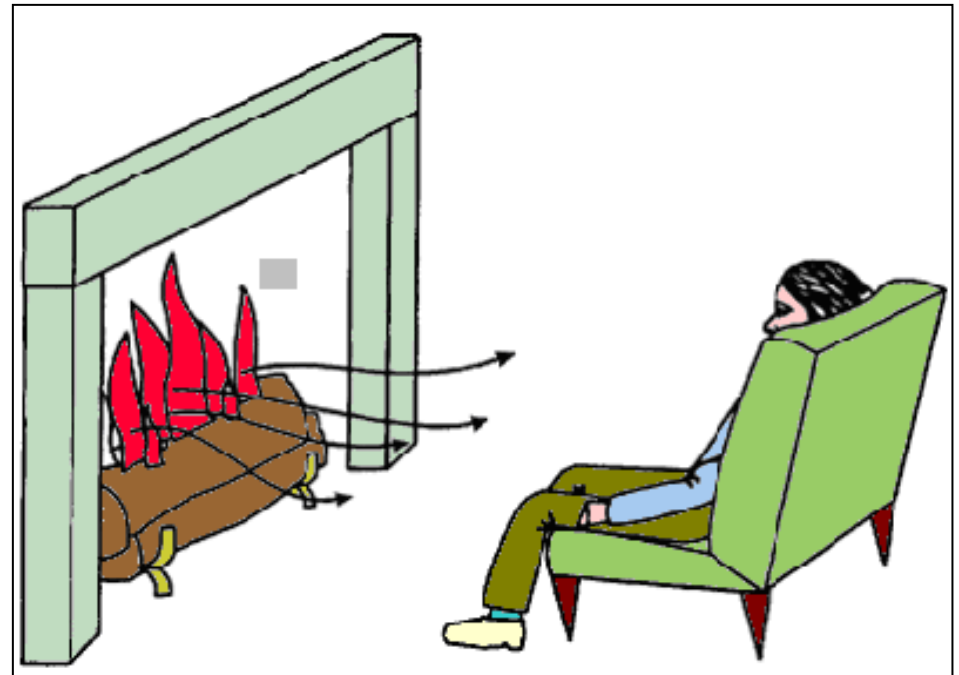
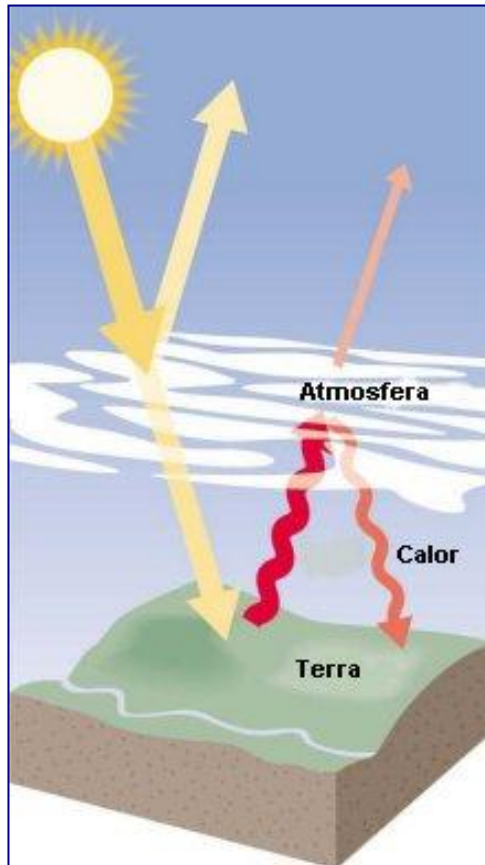
RADIAÇÃO TÉRMICA – REFLEXÃO – ABSORÇÃO - TRANSMISSÃO



Espectro da radiação eletromagnética.



RADIAÇÃO TÉRMICA – REFLEXÃO – ABSORÇÃO - TRANSMISSÃO





RADIAÇÃO TÉRMICA – REFLEXÃO – ABSORÇÃO - TRANSMISSÃO

Qualquer superfície com temperatura acima de zero kelvin emite radiação térmica.

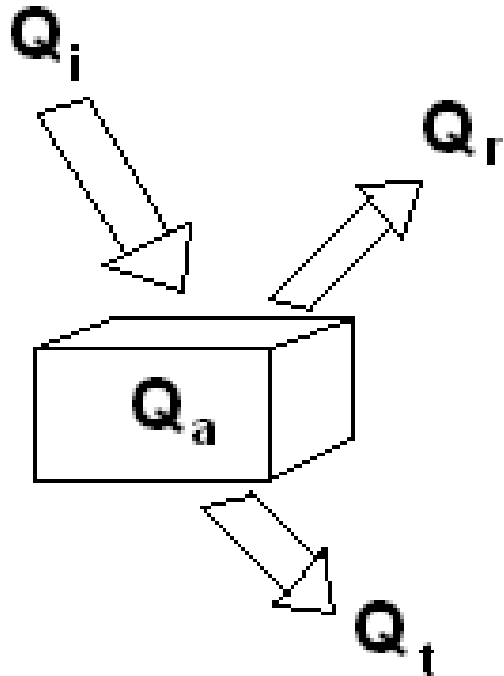
Não necessita de meio material para ocorrer, pois a energia é transportada por meio de ondas eletromagnéticas.

Define-se como corpo negro uma superfície que absorve totalmente a radiação que incide sobre ela.

Um radiador ideal (corpo negro) emite radiação térmica com uma densidade de fluxo dada pela lei de **Stefan-Boltzmann (Lei Fundamental da Radiação)**.



RADIAÇÃO TÉRMICA – REFLEXÃO – ABSORÇÃO - TRANSMISSÃO



$$Q_a + Q_r + Q_t = Q_i \quad \Rightarrow \quad a + r + t = 1$$

$$a = \frac{Q_a}{Q_i} \text{ (absorvidade)} \quad r = \frac{Q_r}{Q_i} \text{ (refletividade)} \quad t = \frac{Q_t}{Q_i} \text{ (transmissividade)}$$



RADIAÇÃO TÉRMICA – REFLEXÃO – ABSORÇÃO - TRANSMISSÃO

Reflexão

- O refletor perfeito (espelho ideal), $r = 1$.

Absorção

- Um corpo negro (absorvedor perfeito), $a = 1$.
- Um corpo cinzento, $a < 1$.

Transmissão

- Um corpo transparente, $t \neq 0$ (zero).
- Um corpo opaco, $t = 0$ (zero).

$$a + r + t = 1$$



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



RADIAÇÃO TÉRMICA

Corpo Negro – Lei de Stefan-Boltzmann

Fluxo de Radiação (q_{rad})



TRANSMISSÃO DE CALOR POR RADIAÇÃO

Lei dos Intercâmbios: Todo bom absorvedor é um bom emissor de radiação térmica e todo bom refletor é um mau emissor de radiação térmica.



Corpo negro é também o emissor ideal de radiação térmica (radiador ideal)!!!!

Corpos Escuros: bons absorvedores e emissores de radiação térmica. Ex.: fuligem ($\alpha = \varepsilon = 0,94$).

Corpos claros e polidos: maus absorvedores e emissores de radiação térmica. Ex.: prata polida ($\alpha = \varepsilon = 0,02$).



FLUXO DE CALOR NA RADIAÇÃO

“Lei de Stefan-Boltzmann”:

$$E \text{ (corpo negro)} = \left(\frac{\dot{q}_{\text{rad}}}{A} \right)_{\text{máxima}} = \sigma \cdot T^4 \text{ (corpo negro)}$$

$$E = \left(\frac{\dot{q}_{\text{rad}}}{A} \right) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \text{ (corpos reais)}$$

E – Poder emissivo [W/m^2];

ε – emissividade ($0 \leq \varepsilon \leq 1$);

σ – Constante de Stefan-Boltzmann [$5,7 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \text{ K}^4)$];

T – Temperatura absoluta do corpo (K).



FLUXO DE CALOR NA RADIAÇÃO

Para a troca de calor por radiação entre duas superfícies, uma dentro da outra, separadas por um gás que não interfere na transferência por radiação:

$$\left(\frac{\dot{q}_{rad}}{A} \right) = \varepsilon \cdot \sigma \cdot \left(T_{Superfície}^4 - T_{vizinhança}^4 \right)$$

$T_{superfície}$ – Temperatura absoluta da superfície menor, suposta mais quente;

$T_{vizinhança}$ – Temperatura absoluta da superfície maior, suposta mais fria.



FLUXO DE CALOR NA RADIAÇÃO

Um radiador ideal (corpo negro) emite radiação térmica com uma densidade de fluxo dada pela lei de [Stefan-Boltzmann \(Lei Fundamental da Radiação\)](#), que pode ser escrita como:

$$q = \sigma \cdot A \cdot e \cdot T^4$$



FLUXO DE CALOR NA RADIAÇÃO

$$q = \sigma \cdot A \cdot e \cdot T^4$$

Onde:

q = fluxo de calor, em [W]

σ = constante de Stefan-Boltzmann, [$5,68 \cdot 10^{-8}$ W/m².K⁴]

A = área externa do corpo, em [m²]

e = emissividade ($e=1$, para um “corpo negro ideal”)

T = temperatura absoluta do corpo, em [K]



FLUXO DE CALOR NA RADIAÇÃO

$$q = \sigma \cdot A \cdot e \cdot (T_1^4 - T_2^4)$$



Considerando a transformação de calor por radiação
(corpos iguais)



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



RADIAÇÃO TÉRMICA - APLICAÇÕES

- Fonte alternativa de energia;
- Previsões meteorológicas: baseiam-se nas emissões de infra-vermelho provenientes da terra.



Vídeo aula no Youtube:

<https://www.youtube.com/watch?v=LLDQOyaVnR8>

The screenshot shows a YouTube video player with the URL <https://www.youtube.com/watch?v=LLDQOyaVnR8> in the address bar. The video content displays a mind map titled "Transferência de Calor" (Heat Transfer) created with Coggle. The mind map branches into two main categories:

- Com necessidade de meio físico interveniente** (With the need for an intervening physical medium):
 - Convecção** (Convection):
 - Líquidos (Liquids)
 - Gases (Gases)
 - Condução** (Conduction):
 - Gases (pouco significativo) (Gases (not very significant))
 - Líquidos (pouco significativo) (Liquids (not very significant))
 - Sólidos → MUITO MAIS IMPORTANTE! (Solids → MUCH MORE IMPORTANT!)
- Sem necessidade de meio físico interveniente** (Without the need for an intervening physical medium):
 - RADIAÇÃO** (RADIATION):

*Radiação térmica: radiação térmica ou radiação de corpo negro é a radiação eletromagnética emitida por um corpo em equilíbrio térmico, caracterizada como forma de transferência de calor de um corpo para outro através da radiação eletromagnética.

The URL <https://coggle.it/> is visible in the bottom right corner of the video frame.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



MECANISMOS COMBINADOS

Introdução



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS

Na maioria das situações práticas ocorrem ao mesmo tempo dois ou mais mecanismos de transferência de calor atuando ao mesmo tempo.

Nos problemas da engenharia, quando um dos mecanismos domina quantitativamente, soluções aproximadas podem ser obtidas desprezando-se todos, exceto o mecanismo dominante.

Entretanto, deve ficar entendido que variações nas condições do problema podem fazer com que um mecanismo desprezado se torne importante.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS

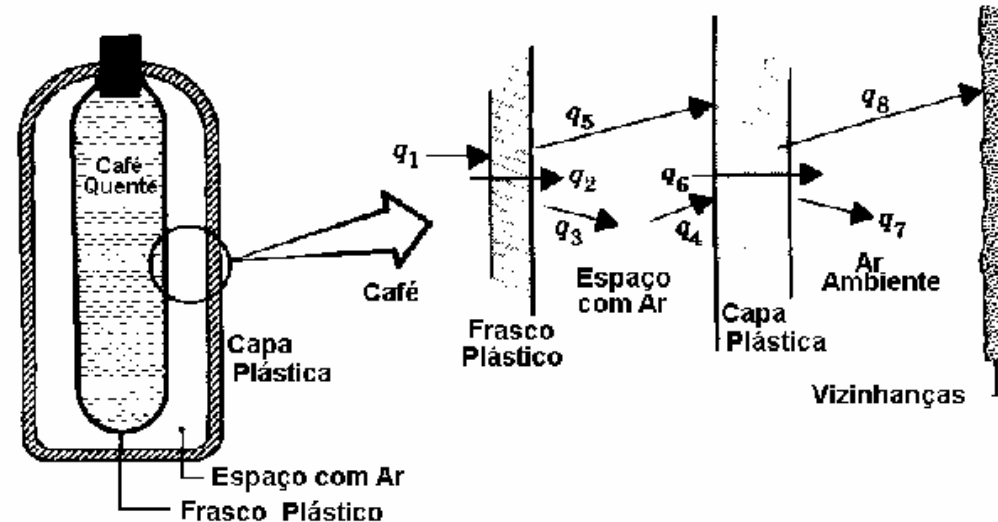
Como exemplo de um sistema onde ocorrem ao mesmo tempo vários mecanismos de transferência de calor consideremos uma garrafa térmica.

Neste caso, podemos ter a atuação conjunta dos seguintes mecanismos esquematizados na figura:



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS



q_1 : convecção natural entre o café e a parede do frasco plástico

q_2 : condução através da parede do frasco plástico

q_3 : convecção natural do frasco para o ar

q_4 : convecção natural do ar para a capa plástica

q_5 : radiação entre as superfícies externa do frasco e interna da capa plástica

q_6 : condução através da capa plástica

q_7 : convecção natural da capa plástica para o ar ambiente

q_8 : radiação entre a superfície externa da capa e as vizinhanças



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS



Figura 5. Representação de três situações envolvendo transferência de calor.

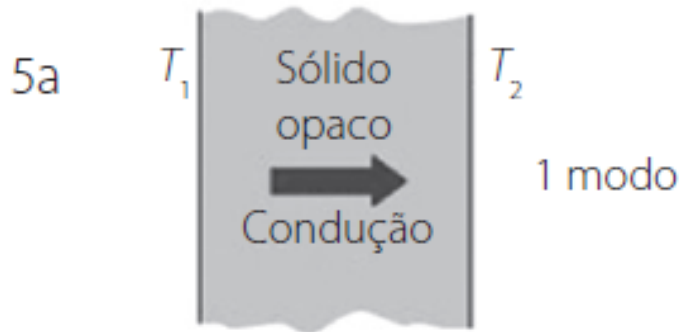
Fonte: Adaptada de Çengel e Ghajar (2012).



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS

A **Figura 5a** apresenta um material sólido e opaco.

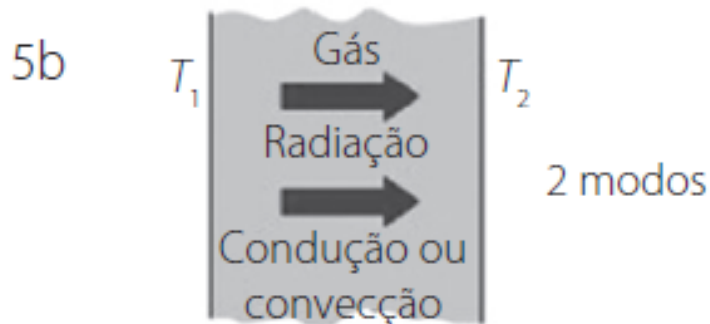


Nesse tipo de material, a transferência de calor pode ocorrer apenas por condução, entretanto, se o material apresentar características de sólido semitransparente, a transferência de calor pode ocorrer pela combinação dos mecanismos de condução e irradiação.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS



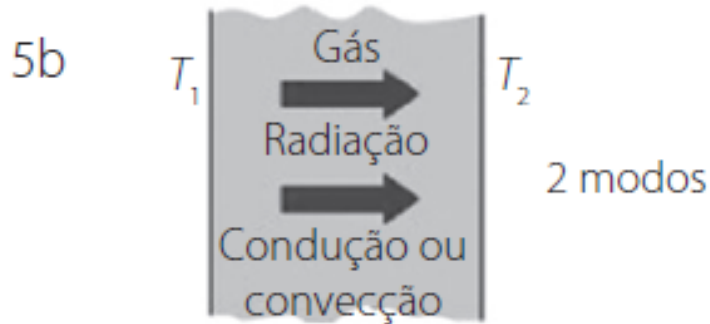
Quando analisamos os fluidos em repouso (**Figura 5b**), ou seja, quando a massa do fluido está estática, os mecanismos de transferência de calor podem ocorrer a partir da condução e também por irradiação.

Já para fluidos em movimento, a transferência ocorre pela combinação dos mecanismos de convecção e irradiação.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS

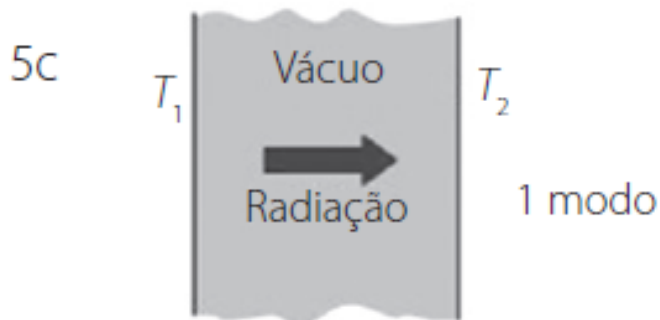


Como as três formas de transferência de calor não coexistem em um sistema, se a transferência por irradiação estiver ausente, o mecanismo de troca de calor irá ocorrer por condução ou convecção, o que dependerá da presença de qualquer movimento de massa do fluido.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS

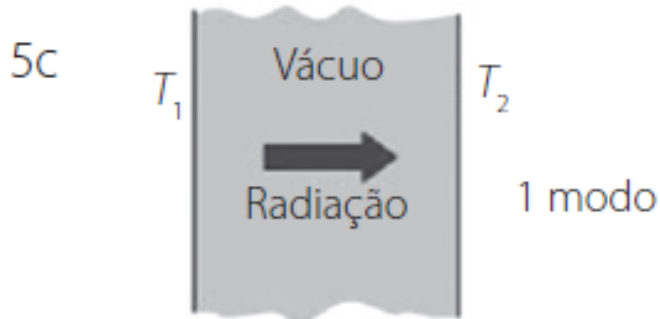


A **Figura 5c** representa o contexto da transferência de calor no vácuo. Na ausência de fluidos ou materiais sólidos, como no vácuo, a transferência de calor só pode acontecer pelo mecanismo de irradiação, pois a transferência de calor ocorre pela emissão de energia na forma de ondas eletromagnéticas entre duas superfícies, sem a presença de um meio.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS



Já os mecanismos de condução e convecção precisam o meio com fluido ou um material sólido, sendo impossível a transferência de calor no vácuo.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS

Melhorias estão associadas com:

- ✓ uso de superfícies aluminizadas (baixa emissividade) para o frasco e a capa de modo a reduzir a radiação;
- ✓ evacuação do espaço com ar para reduzir a convecção natural.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

MECANISMOS COMBINADOS

Em relação ao calor transferido, as seguintes unidades são usualmente usadas:

q = fluxo de calor transferido (potência): W, Btu/h, Kcal/h

Q = quantidade de calor transferido (energia) : J, Btu, Kcal



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL



EXERCÍCIOS

...na próxima aula...