



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA  
CTS – Centro de Ciências, Tecnologia e Saúde  
EES – Departamento de Energia e Sustentabilidade

---

# TRABALHO E CALOR

# Definição de trabalho

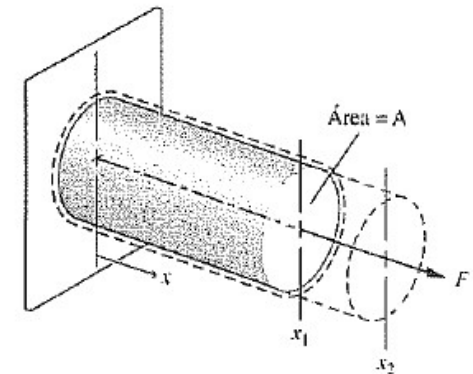
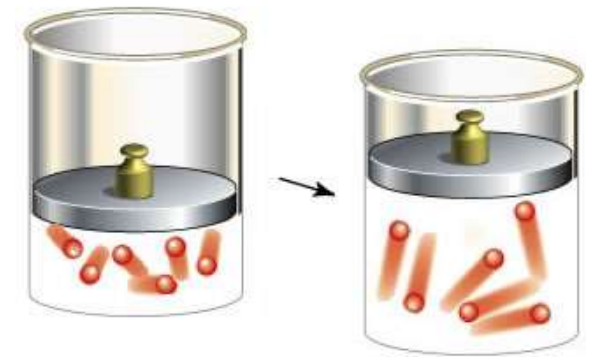
---

Da mecânica clássica, a definição de trabalho é:

$$W = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} ds$$

em que  $s_1$  e  $s_2$  representam as posições inicial e final. Essa relação pode ser utilizada para calcular:

- trabalho de compressão/expansão
- trabalho para esticar um fio/barra
- trabalho para mover uma partícula em um campo magnético
- ...

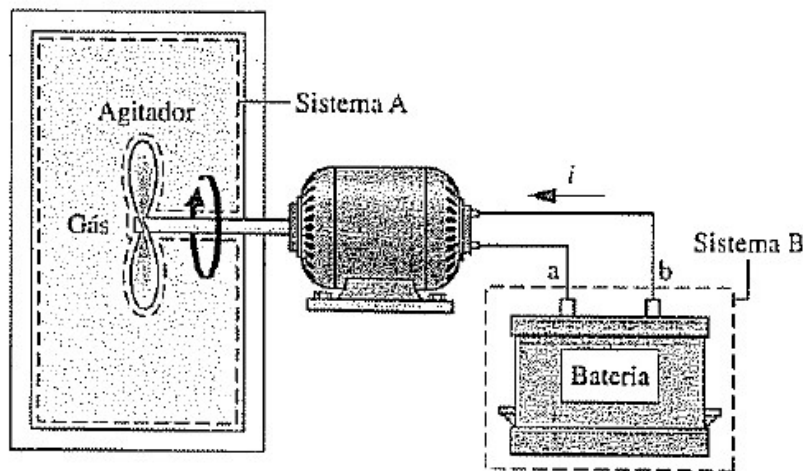


# Definição de trabalho

---

## Definição termodinâmica de trabalho:

*Um sistema realiza trabalho sobre sua vizinhança se o único efeito sobre tudo que é externo ao sistema puder ser interpretado como o levantamento de um peso.*



**SISTEMA A:** Agitador realiza trabalho sobre o gás. As pás aplicam uma força sobre o mesmo, misturando-o. Consistente  $W = \int F ds$

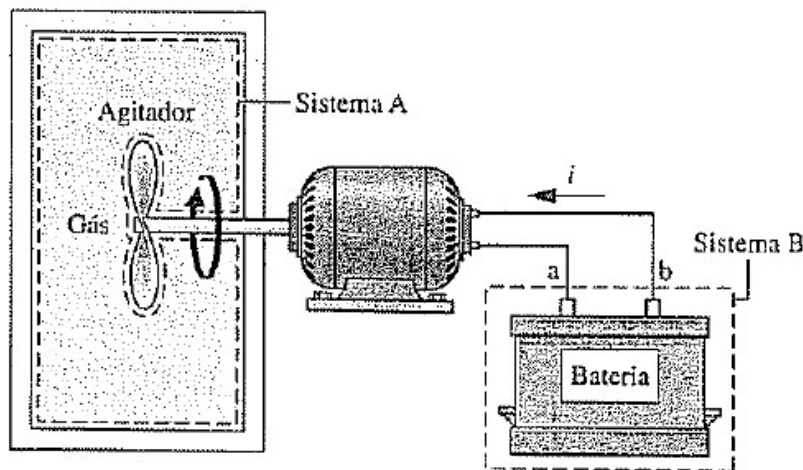
**SISTEMA B:** Não há movimento evidente. Corrente elétrica atravessa as fronteiras de B, alimenta o motor e movimenta o ventilador (eleva o peso).

# Definição de trabalho

---

## Definição termodinâmica de trabalho:

*Um sistema realiza trabalho sobre sua vizinhança se o único efeito sobre tudo que é externo ao sistema puder ser interpretado como o levantamento de um peso.*



## Convenção de sinais:

Trabalho realizado PELO sistema:  $W > 0$

Trabalho realizado SOBRE o sistema:  $W < 0$

O trabalho associado ao sistema A é positivo ou negativo?

O trabalho associado ao sistema B é positivo ou negativo?

# Definição de trabalho

---

Trabalho – uma variável de processo:

Ao inspecionar a equação  $W = \int_{s_1}^{s_2} \vec{F} ds$ , nota-se que é necessário conhecer como  $F$  varia ao longo de  $s$  para determinar  $W$ . Logo, o trabalho depende da interação entre sistema e vizinhança durante **o processo** que leva do ponto 1 para o ponto 2.

Em outras palavras, o trabalho não é uma propriedade do sistema, mas sim do processo (não se diz que o sistema possui trabalho em 1 ou em 2).

# Definição de trabalho

---

Trabalho – uma variável de processo:

Matematicamente, dizemos que o trabalho não é uma função de ponto, mas uma função de linha. Sua diferencial é dita inexata e denotada por  $\delta W$ . A integral do trabalho ao longo de um processo é:

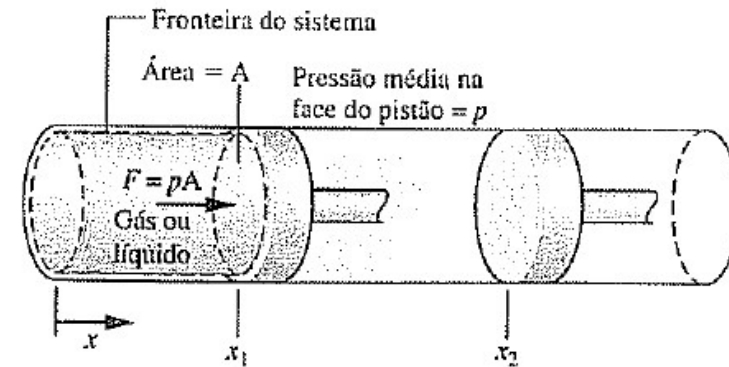
$$\int_1^2 \delta W = W_{1-2} \quad \text{Trabalho ao longo do processo 1-2}$$

que difere da integral de uma função de ponto (diferencial exata). Propriedades do sistema como T, p e V são funções de ponto:

$$\int_1^2 dV = V_2 - V_1 \quad \begin{array}{l} V_1 - \text{volume no estado 1} \\ V_2 - \text{volume no estado 2} \end{array}$$

# Trabalho de compressão ou expansão

Considere o esquema ao lado:



A pressão do gás sobre o pistão é  $p$ , e que está associada a uma força  $F = pA$ , sendo  $A$  a área da face do pistão. Assim, o trabalho realizado pelo sistema à medida que o pistão se desloca ao longo de  $x$  é:

$$\delta W = pA dx = p dV$$

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$

V1 – volume no estado 1

V2 – volume no estado 2

# Trabalho de compressão ou expansão

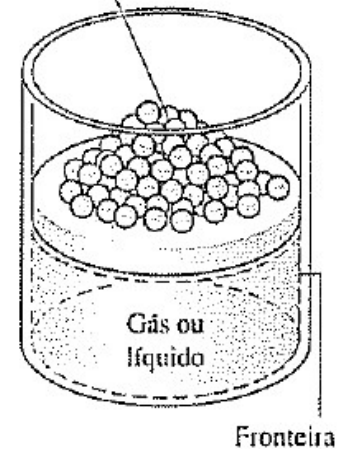
## Processo de quase-equilíbrio (quase-estático):

É o processo em que o afastamento da condição de equilíbrio termodinâmico é infinitesimal. Assim, todos os estados termodinâmicos durante o processo são de equilíbrio.

Inicialmente, o sistema está em equilíbrio. Ao remover uma massa, ocorre uma expansão infinitesimal e o estado do gás se afasta ligeiramente do estado anterior, mas atinge instantaneamente o equilíbrio.

Continuando o processo, uma série de estados de equilíbrio se sucedem. Como as propriedades são uniformes, a equação  $W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$  pode ser utilizada para calcular o trabalho, sendo  $p$  a pressão na fronteira, que é a mesma em todo o sistema.

Massas infinitesimais  
removidas durante a expansão  
de um gás ou líquido



$$W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$$



# Trabalho de compressão ou expansão

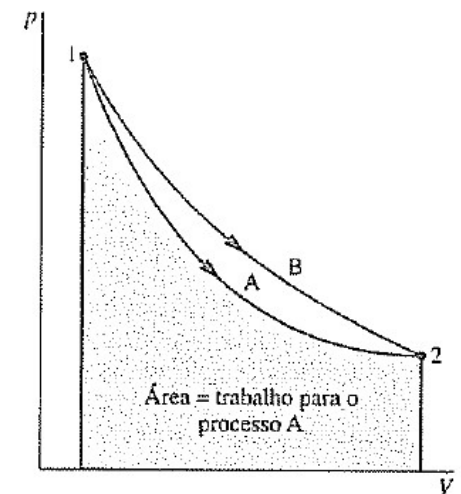
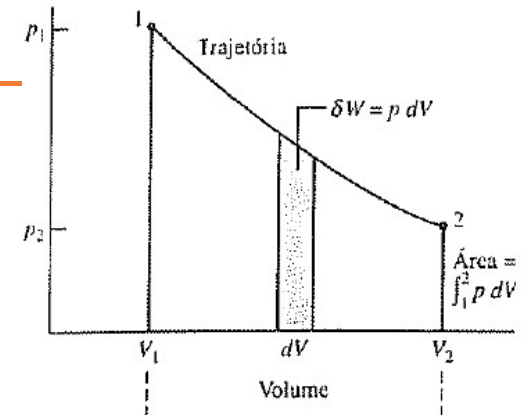
## Processo de quase-equilíbrio (quase-estático):

Analisando em um diagrama p-V:

O caminho contínuo 1-2 representa os infinitos estados de equilíbrio que o sistema percorre durante o processo quase-estático.

Logo, a área sob a curva corresponde ao trabalho de expansão para levar o estado termodinâmico de 1 para 2.

A análise gráfica comprova que o trabalho depende do processo (caminho). Dependendo do processo, a quantidade de trabalho realizada pelo sistema ao expandir de 1 a 2 é diferente.



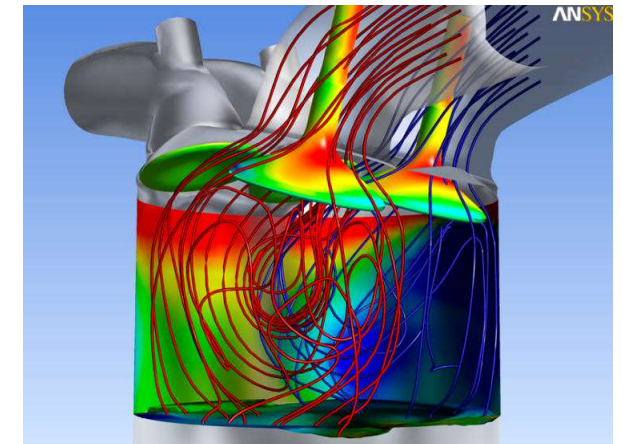
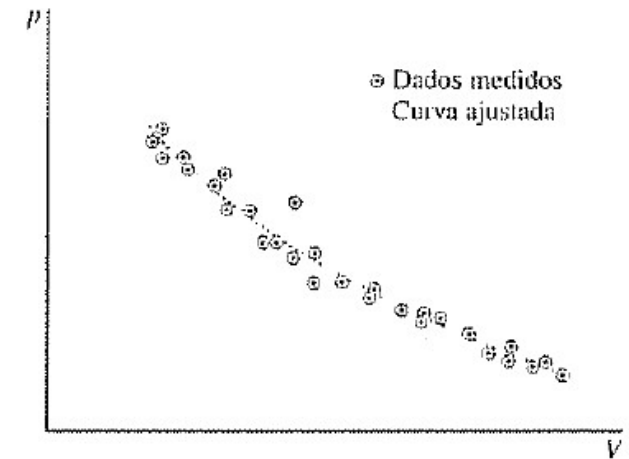
# Trabalho de compressão ou expansão

## Processo real:

A integração da equação  $W = \int_{V_1}^{V_2} p dV$  exige que a relação entre  $p$  e  $V$  seja conhecida. Contudo, em muitos processos reais, tal relação não é facilmente identificada, devido à sequência de estados de **não-equilíbrio**.

**Estado de não-equilíbrio:** *Propriedades variam no espaço e no tempo. A rigor, todos os processos passam por estados de não-equilíbrio.*

Ex.: Cilindro de motor de automóvel. A combustão e outros efeitos de não-equilíbrio causam não uniformidade de propriedades em todo o cilindro.



# Trabalho de compressão ou expansão

## Processo politrópico:

É o processo representado por  $pV^n = cte$ , onde  $n$  é o índice politrópico e pode assumir valores entre 0 e  $\infty$ .

Pode descrever muitos processos de compressão/expansão típicos em análises de engenharia. Por exemplo:

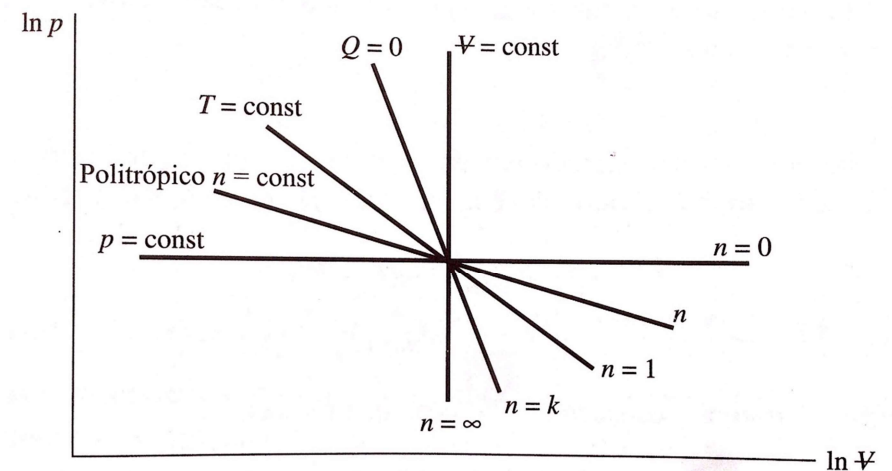
$n = 0$  -- processo isobárico ( $p$  cte)

$n = \infty$  -- processo isocórico ( $V$  cte)

Utilizando um modelo de gás ideal ( $pV = mRT$ ):

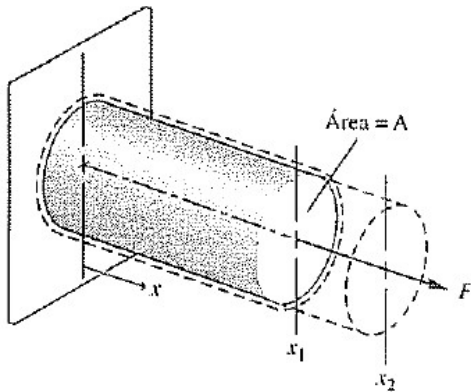
$n = 1$  -- processo isotérmico ( $T$  cte)

$n = k = c_p/c_v$  -- processo adiabático



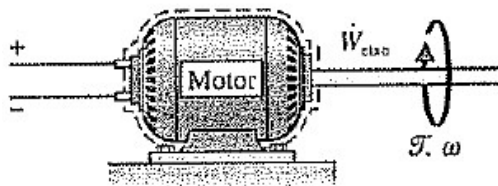
# Outras formas de trabalho (potência)

- Alongamento de uma barra



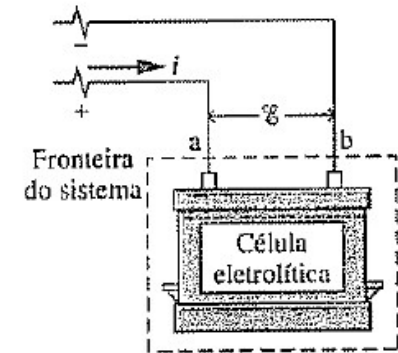
$$W = \int_{x_1}^{x_2} \sigma A dx$$

- Potência transmitida por um eixo



$$\dot{W} = F \cdot V = \frac{T}{R} \omega R = T \omega$$

- Potência elétrica



$$\dot{W} = VI$$

# Trabalho de compressão ou expansão

---

**Exemplo:** Um gás em um conjunto cilindro-pistão passa por um processo de expansão, cuja relação entre pressão e volume é dada por  $pV^n = cte$ . A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de  $0,1 \text{ m}^3$  e o volume final é de  $0,2 \text{ m}^3$ . Determine o trabalho para o processo, em kJ, no caso de (a)  $n = 1,5$ ; (b)  $n = 1,0$  e (c)  $n = 0$ .

# Trabalho de compressão ou expansão

---

**Exemplo:** Um gás em um conjunto cilindro-pistão passa por um processo de expansão, cuja relação entre pressão e volume é dada por  $pV^n = cte$ . A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de  $0,1 \text{ m}^3$  e o volume final é de  $0,2 \text{ m}^3$ . Determine o trabalho para o processo, em kJ, no caso de (a)  $n = 1,5$ ; (b)  $n = 1,0$  e (c)  $n = 0$ .

**Hipóteses:** (a) Gás é o sistema; (b) única forma de trabalho é o de fronteira; (c) processo politrópico.

Assim,

$$W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{cte}{V^n} dV = cte \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = \frac{cteV_2^{1-n} - cteV_1^{1-n}}{1-n}$$

# Trabalho de compressão ou expansão

---

**Exemplo:** Um gás em um conjunto cilindro-pistão passa por um processo de expansão, cuja relação entre pressão e volume é dada por  $pV^n = cte$ . A pressão inicial é de 3 bar, o volume inicial é de  $0,1 \text{ m}^3$  e o volume final é de  $0,2 \text{ m}^3$ . Determine o trabalho para o processo, em kJ, no caso de (a)  $n = 1,5$ ; (b)  $n = 1,0$  e (c)  $n = 0$ .

**Hipóteses:** (a) Gás é o sistema; (b) única forma de trabalho é o de fronteira; (c) processo politrópico.

Assim,

$$W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} \frac{cte}{V^n} dV = cte \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V^n} = \frac{cte V_2^{1-n} - cte V_1^{1-n}}{1-n}$$

mas como  $p_1 V_1 = p_2 V_2$ , temos: 
$$W_{1-2} = \frac{p_2 V_2^n V_2^{1-n} - p_1 V_1^n V_1^{1-n}}{1-n} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1-n}$$

Relação válida para qualquer  $n \neq 1$

## Trabalho de compressão ou expansão

---

(a)  $n = 1,5$

$$p_1 V_1^{1,5} = p_2 V_2^{1,5} \quad \rightarrow \quad p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{1,5} \quad \rightarrow \quad p_2 = 3 \left( \frac{0,1}{0,2} \right)^{1,5} = 1,06 \text{ bar}$$

$$W_{1-2} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - n} = \frac{1,06 \cdot 10^5 \cdot 0,2 - 3 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{1 - 1,5} = \mathbf{17,6 \text{ kJ}}$$



# Trabalho de compressão ou expansão

---

(a)  $n = 1,5$

$$p_1 V_1^{1,5} = p_2 V_2^{1,5} \quad \rightarrow \quad p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{1,5} \quad \rightarrow \quad p_2 = 3 \left( \frac{0,1}{0,2} \right)^{1,5} = 1,06 \text{ bar}$$

$$W_{1-2} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - n} = \frac{1,06 \cdot 10^5 \cdot 0,2 - 3 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{1 - 1,5} = \mathbf{17,6 \text{ kJ}}$$

(b)  $n = 1,0$

$$W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} cte \frac{dV}{V} = cte \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = p_1 V_1 \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = 3 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \ln \left( \frac{0,2}{0,1} \right) = \mathbf{20,8 \text{ kJ}}$$

$$p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_2} \quad \rightarrow \quad p_2 = 3 \frac{0,1}{0,2} = 1,5 \text{ bar}$$

# Trabalho de compressão ou expansão

---

(a)  $n = 1,5$

$$p_1 V_1^{1,5} = p_2 V_2^{1,5} \rightarrow p_2 = p_1 \left( \frac{V_1}{V_2} \right)^{1,5} \rightarrow p_2 = 3 \left( \frac{0,1}{0,2} \right)^{1,5} = 1,06 \text{ bar}$$

$$W_{1-2} = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - n} = \frac{1,06 \cdot 10^5 \cdot 0,2 - 3 \cdot 10^5 \cdot 0,1}{1 - 1,5} = \mathbf{17,6 \text{ kJ}}$$

(b)  $n = 1,0$

$$W_{1-2} = \int_{V_1}^{V_2} cte \frac{dV}{V} = cte \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = p_1 V_1 \ln \left( \frac{V_2}{V_1} \right) = 3 \cdot 10^5 \cdot 0,1 \ln \left( \frac{0,2}{0,1} \right) = \mathbf{20,8 \text{ kJ}}$$

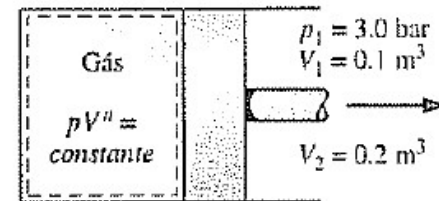
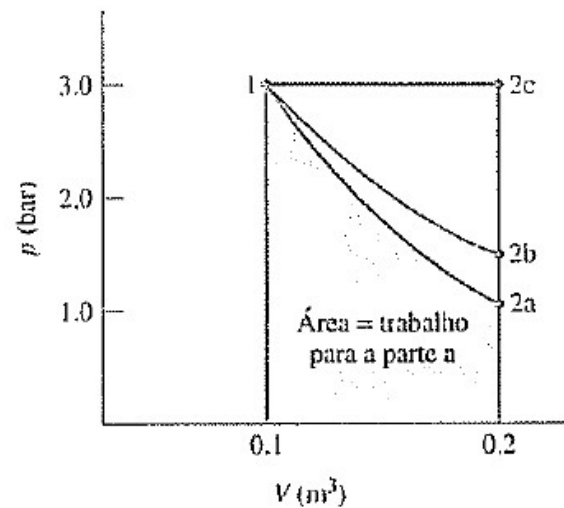
$$p_2 = p_1 \frac{V_1}{V_2} \rightarrow p_2 = 3 \frac{0,1}{0,2} = 1,5 \text{ bar}$$

(c)  $n = 0$

$$W_{1-2} = p(V_2 - V_1) = 3(0,2 - 0,1) = \mathbf{30 \text{ kJ}}$$

# Trabalho de compressão ou expansão

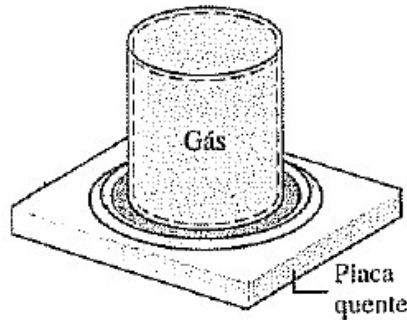
---



# Calor

---

Forma de interação energética entre o sistema e sua vizinhança que não ocorre através de trabalho.



A energia do sistema (gás) é aumentada, pois esse recebe calor de sua vizinhança (placa quente). O calor sempre é transferido da maior para menor temperatura.

O calor também não é uma propriedade de estado, estando associado apenas ao processo.

$$\int_1^2 \delta Q = Q_{1-2}$$

Quantidade de calor transferida durante o processo 1-2. Não existe calor do ponto 1 ou do ponto 2.

# Calor

---

Taxa de transferência de calor ( $\dot{Q}$ ): Calor por unidade de tempo. Unidade no SI [J/s] = [W]. Conhecendo a taxa de transferência de calor em função do tempo, pode-se calcular a quantidade de calor trocado:

$$Q = \int_1^2 \dot{Q} dt \quad [\text{J}]$$

Fluxo de calor ( $\dot{Q}''$ ): Taxa de transferência de calor por unidade de área. Medida da “densidade” de troca de calor. Unidade no SI [W/m<sup>2</sup>].

$$\dot{Q}'' = \frac{\dot{Q}}{A} \quad [\text{W/m}^2]$$

$$\dot{Q} = \int_A \dot{Q}'' dA \quad [\text{W}]$$

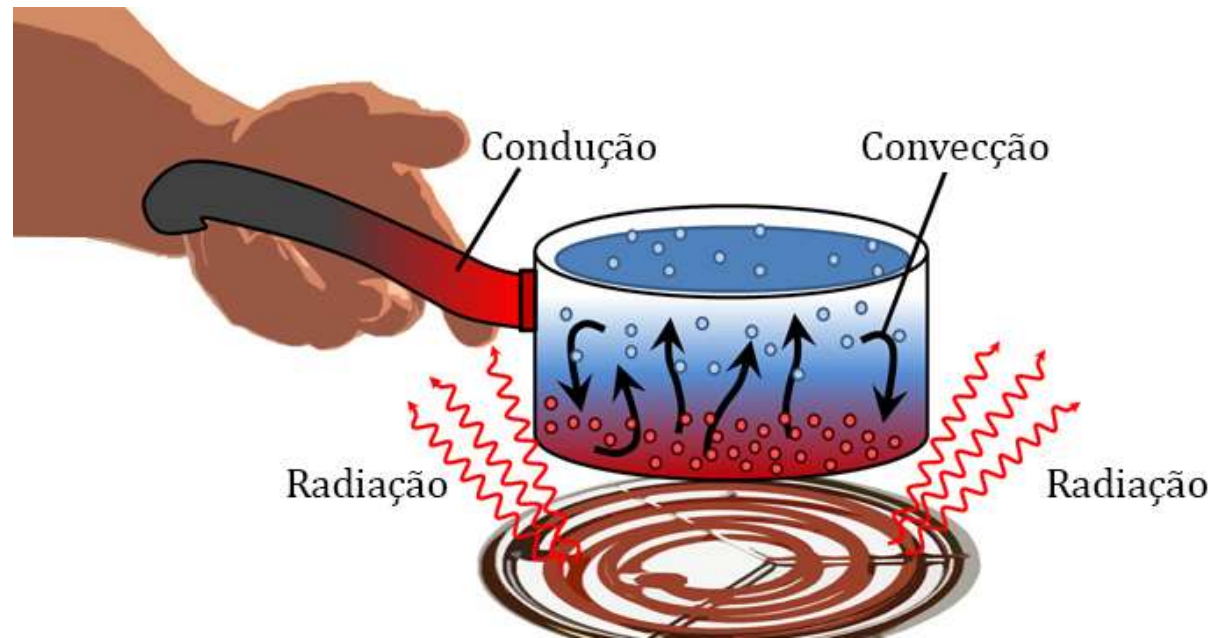
**A** – área superficial de troca de calor

# Mecanismos de transferência de calor

---

O calor pode ser transferido de três formas:

- Condução
- Convecção
- Radiação

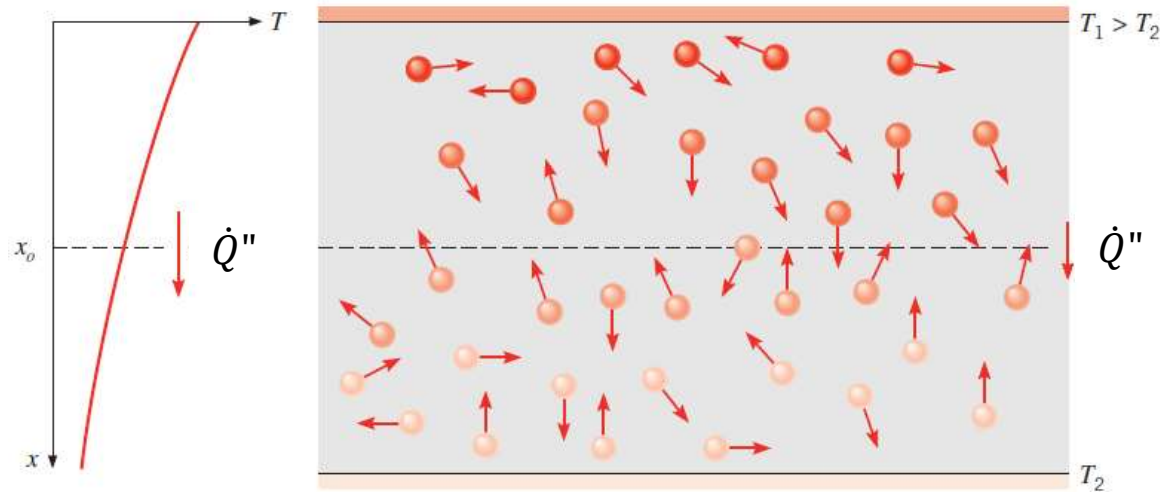


# Mecanismos de transferência de calor

## Condução:

Transferência de calor através de um meio estacionário (sólido ou fluido), devido à diferença de temperatura. Ex: transferência de calor através de uma parede plana.

A troca de calor por condução é originada da **movimentação molecular ou dos elétrons livres**, sempre no sentido de maior para menor atividade energética (temperatura).

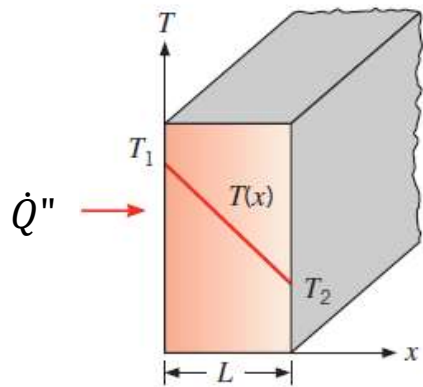


# Mecanismos de transferência de calor

---

## Condução:

A equação que permite calcular o fluxo de calor por condução em um meio é dada pela Lei de Fourier. Para uma parede plana:



$$\dot{Q}'' = -k \frac{dT}{dx} \quad [\text{W/m}^2] \quad \text{k – condutividade térmica do meio } [\text{W/(m.K)}]$$

Sinal – decorre de o fluxo de calor atuar no sentido contrário do gradiente de  $T$ .

Em regime permanente e sem geração,  $\frac{dT}{dx} = \frac{\Delta T}{\Delta x}$



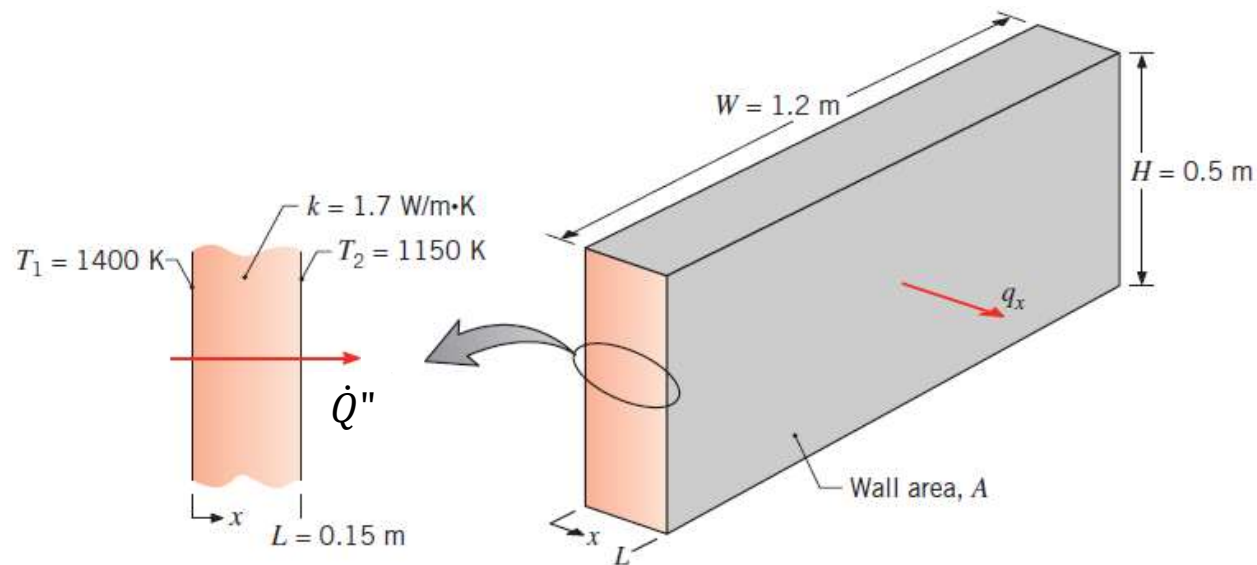
# Mecanismos de transferência de calor

---

Exemplo: A parede de um forno industrial é construída de um tijolo especial de 0,15m de espessura e condutividade térmica de  $1,7 \text{ W/(m.K)}$ . Medições feitas durante operação em regime permanente indicam temperaturas de 1400 e 1150 K nas superfícies interna e externa, respectivamente. Qual é a taxa de transferência de calor através da parede de dimensões 0,5 m x 1,2 m?

# Mecanismos de transferência de calor

---



Lei de Fourier

$$\dot{Q} = -kA \frac{dT}{dx} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

$$\dot{Q} = -1,7 * 0,6 * \frac{(1150 - 1400)}{0,15}$$

$$\dot{Q} = 1700 \text{ [W]}$$

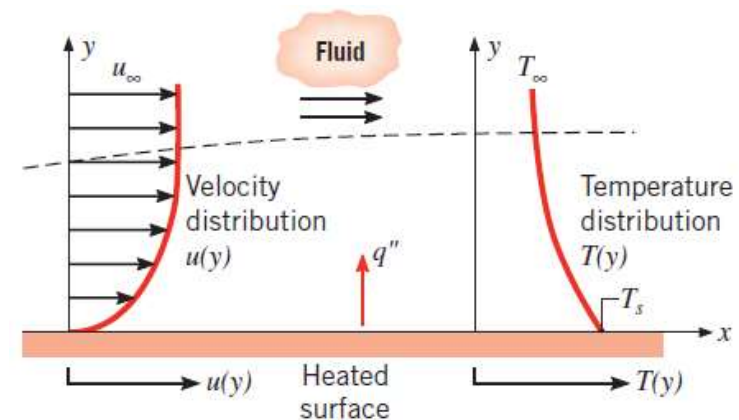
# Mecanismos de transferência de calor

## Convecção:

O mecanismo de convecção está associado à sobreposição de movimentos macroscópicos e microscópicos do meio. Sendo assim, a convecção requer um **meio fluido** para troca de calor.

Em analogia à camada limite hidrodinâmica de um escoamento, há uma **camada limite térmica** formada entre uma superfície e um fluido com temperaturas distintas.

O calor é trocado por condução na superfície, mas transmitido por convecção no interior do fluido.

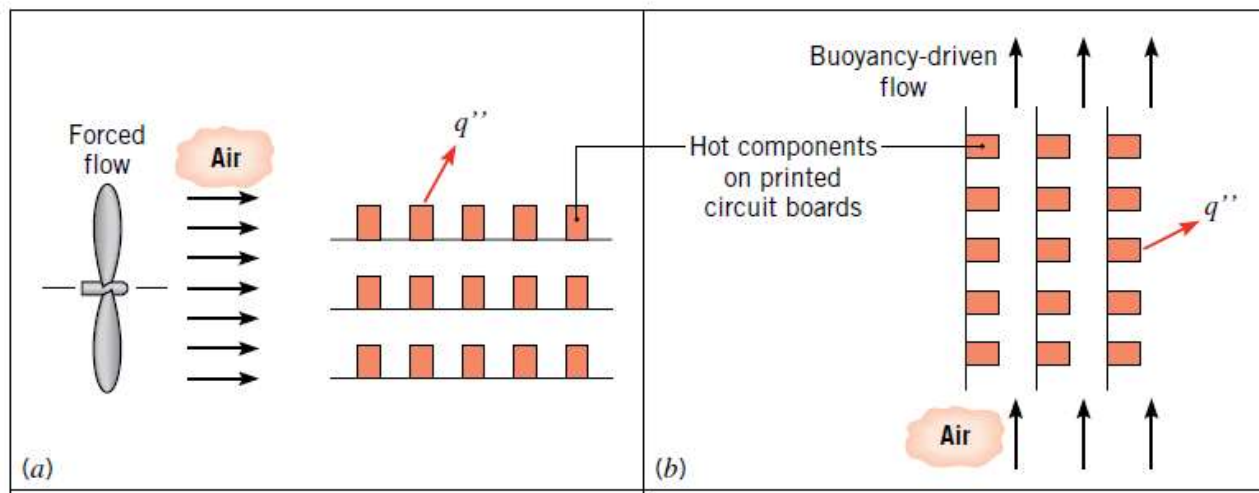


# Mecanismos de transferência de calor

## Convecção:

**a) Convecção forçada:** ação de meios externos como ventiladores e bombas.

**b) Convecção natural:** escoamento induzido por força de empuxo decorrente da diferença de temperatura no fluido (diferença de densidade).

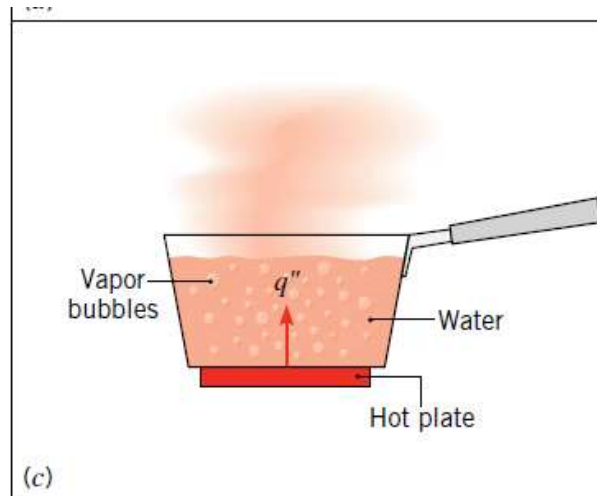


**Convecção mista:** combinação dos efeitos forçado e natural.

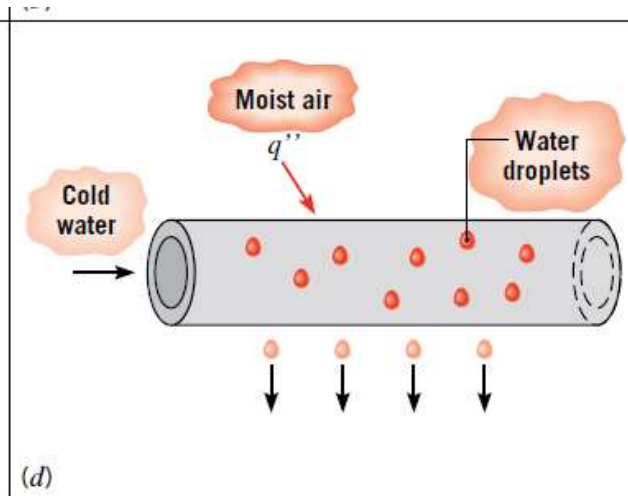
# Mecanismos de transferência de calor

## Convecção:

### c) Ebulição:



### d) Condensação:



# Mecanismos de transferência de calor

---

## Convecção:

A troca de calor por convecção é calculada através da Lei de Resfriamento de Newton:

$$\dot{Q}'' = h(T_s - T_\infty) \quad [\text{W/m}^2]$$

Fluido,  $T_\infty$   
→  
→  $h$   
→

---

Superfície,  $T_s$

$h$  é o coeficiente de transferência de calor por convecção [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ] e depende de diversos fatores como: (i) geometria da superfície (plana, curva, interno, externo); (ii) a natureza do escoamento (laminar ou turbulento); (iii) propriedades do fluido.

# Mecanismos de transferência de calor

---

## Convecção:

Valores típicos de  $h$  [ $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ ]:

- Convecção natural
  - Gás 2-25
  - Líquido 50-100
- Convecção forçada
  - Gás 25-250
  - Líquido 100-20.000
- Mudança de fase (ebulição/condensação)  
2.500-100.000

# Mecanismos de transferência de calor

---

## Radiação:

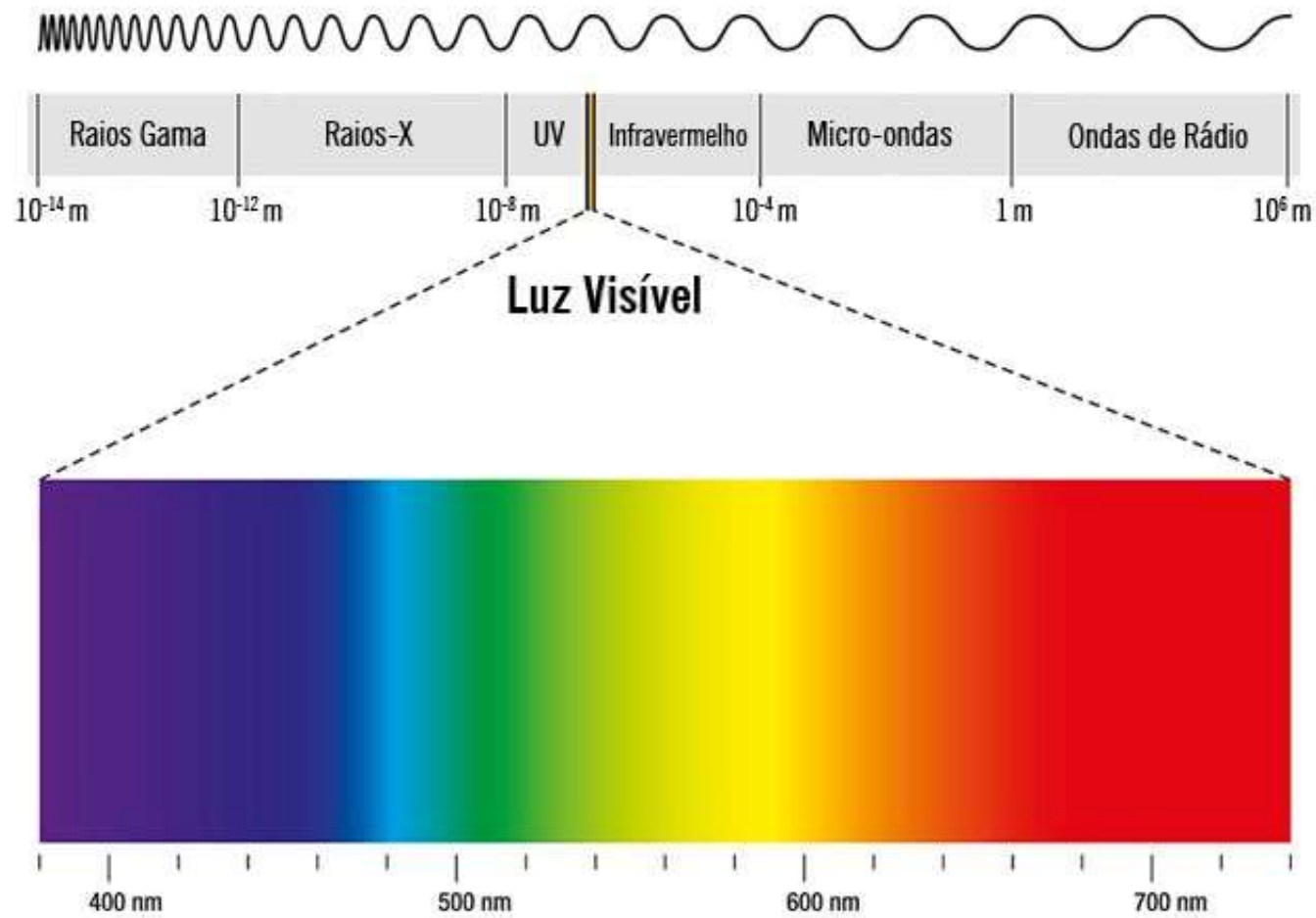
A radiação térmica é a energia emitida pela matéria que está a uma temperatura diferente de 0 K (zero absoluto =  $-273,15^{\circ}\text{C}$ ).

A radiação se propaga através de ondas eletromagnéticas, ou seja, é o único mecanismo de troca térmica que atua no vácuo.





# Mecanismos de transferência de calor

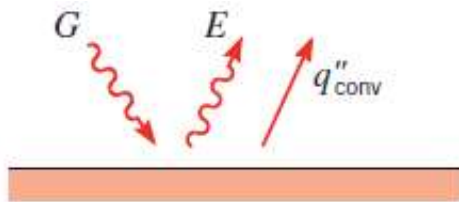


# Mecanismos de transferência de calor

---

## Radiação:

Considere a situação



A radiação emitida pela superfície origina-se da energia do corpo e a taxa na qual é liberada por unidade de área [W/m<sup>2</sup>] é denominada **poder emissivo, E**. O máximo poder emissivo é definido pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T_s^4$$

$T_s$  Temperatura da superfície [K]

$\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann  
[5,67\*10<sup>-8</sup> W/(m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>)]

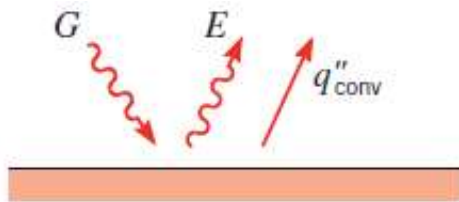
O limite superior do poder emissivo  $E_b$  é atribuído à superfície radiadora ideal (corpo negro).

# Mecanismos de transferência de calor

---

## Radiação:

Considere a situação



A radiação emitida pela superfície origina-se da energia do corpo e a taxa na qual é liberada por unidade de área [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] é denominada **poder emissivo, E**. O máximo poder emissivo é definido pela Lei de Stefan-Boltzmann:

$$E_b = \sigma T_s^4$$

$T_s$  Temperatura da superfície [K]

emissividade

$\sigma$  Constante de Stefan-Boltzmann  
[ $5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ]

$$0 \leq \varepsilon \leq 1$$

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

O limite superior do poder emissivo  $E_b$  é atribuído à superfície radiadora ideal (corpo negro).

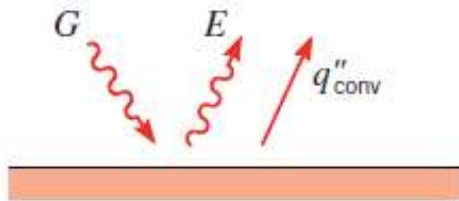
# Mecanismos de transferência de calor

---

## Radiação:

A radiação também pode ser incidente sobre uma superfície, proveniente de sua vizinhança (sol ou outra superfície).

A taxa de incidência de radiação sobre uma superfície por unidade de área [ $\text{W}/\text{m}^2$ ] é chamada de **irradiação,  $G$** .



Uma porção ou toda a irradiação pode ser absorvida pela superfície, aumentando a energia do corpo. A taxa de absorção por unidade de área,  $G_{abs}$ , é dada por:

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

$\alpha$  absortividade  $0 \leq \alpha \leq 1$

# Mecanismos de transferência de calor

---

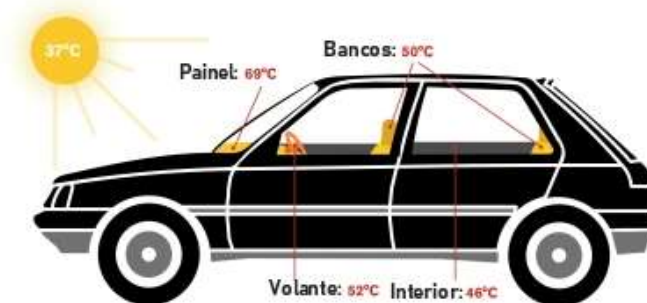
## Radiação:

Se  $\alpha < 1$  e a superfície é **opaca (não transparente)**, porção da irradiação é **refletida**. Se a superfície é **semi-transparente**, porção da irradiação é **transmitida**.

Em muitas aplicações: líquidos são opacos e gases são transparentes. Metais são geralmente opacos (refletem parte da radiação). Finas lâminas de materiais poliméricos são meios semi-transmissores (acrílico, por ex.)



Carro estacionado ao sol. Temperatura ambiente de 37° C

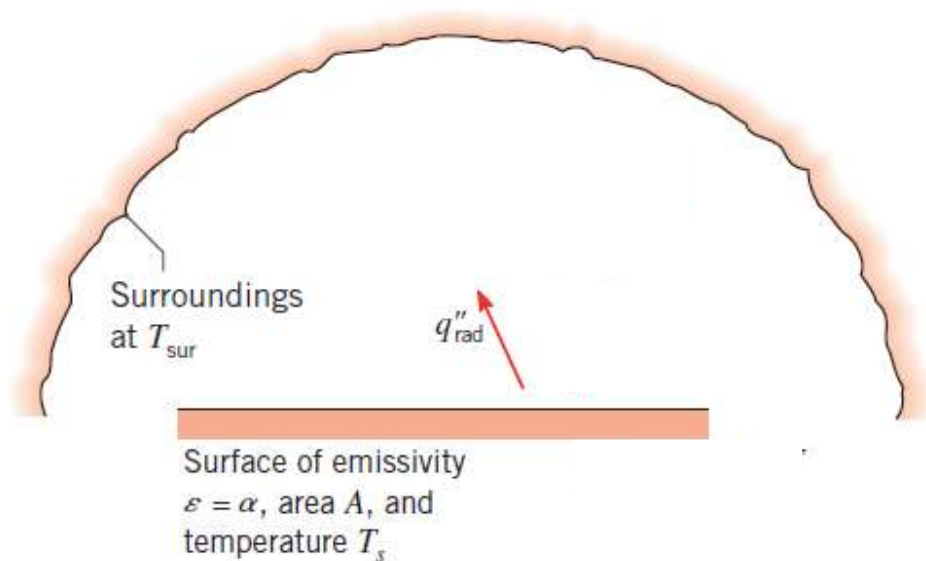


# Mecanismos de transferência de calor

---

## Radiação:

Um caso especial que ocorre com frequência é a troca de calor por radiação entre um corpo pequeno envolto por um corpo muito maior (paredes de uma sala ou forno, por exemplo).



A irradiação,  $G$ , pode ser aproximada pela emissão de corpo negro,  $E_b$ , à  $T_{sur}$ .

$$G = E_b = \sigma T_{sur}^4$$

A superfície pode ser modelada tal que  $\alpha = \varepsilon$ . Assim, o fluxo de calor fica:

$$\dot{Q}'' = \varepsilon E_b - \alpha G = \varepsilon \sigma (T_s^4 - T_{sur}^4) \quad [\text{W/m}^2]$$

# Mecanismos de transferência de calor

---

Exemplo: Uma tubulação para transporte de vapor passa por uma sala na qual o ar e as paredes se encontram a  $25^{\circ}\text{C}$ . O diâmetro externo do tubo é de 70 mm, sua temperatura é de  $200^{\circ}\text{C}$  e sua emissividade é de 0,8. Determine o poder emissivo da superfície e a irradiação. Se o coeficiente de troca de calor por convecção é  $15 \text{ W/m}^2\cdot\text{K}$ , qual é a taxa de rejeição de calor pelo tubo por unidade de comprimento?