



# OPERAÇÕES UNITÁRIAS II

## AULA 1: REVISÃO

### TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Profa. Dra. Milena Martelli Tosi

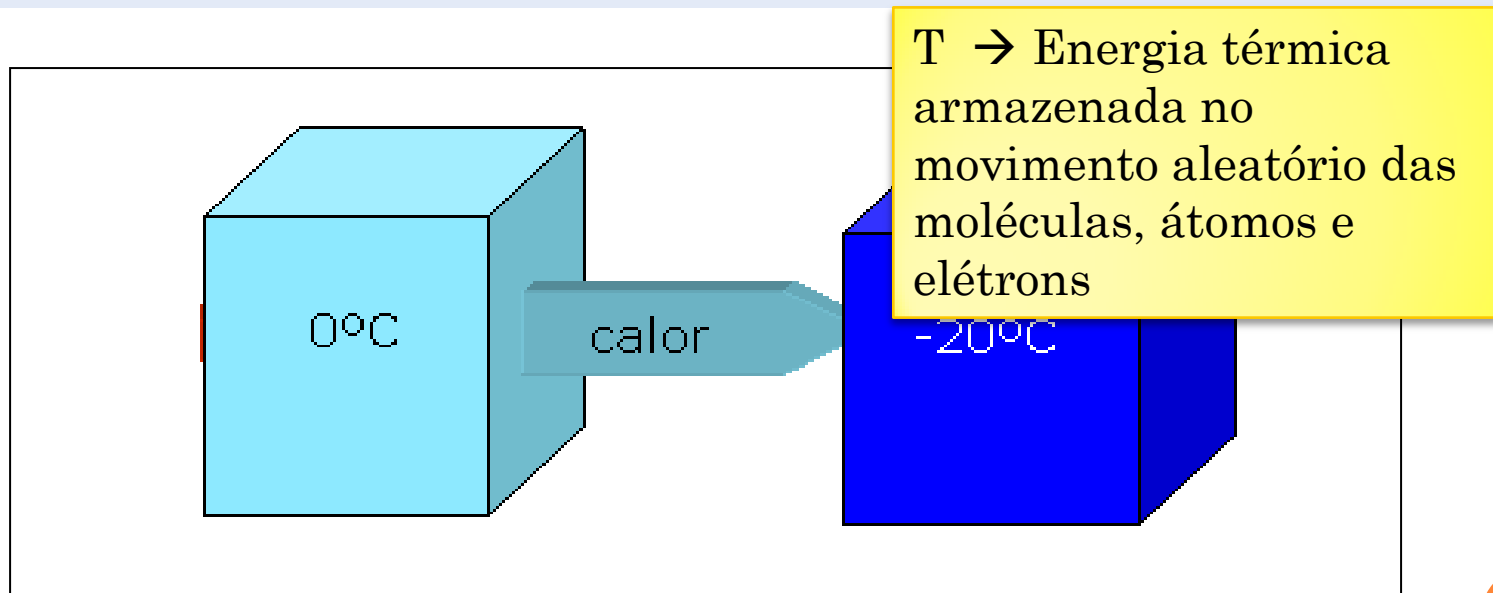
# A IMPORTÂNCIA DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

- **Introdução**
- **Revisão: Mecanismos de transferência de calor**
  - Condução
  - Convecção
  - Radiação
- **Transferência de calor por condução**
  - Lei de Fourier
  - Condutividade térmica
  - Condução através de paredes cilíndricas e esféricas no estado estacionário
  - Obtenção das propriedades termofísicas de alimentos
- **Transferência de calor por convecção**
- **Coeficiente Global de Troca Térmica**
- **Transferência de calor por radiação**



**Transferência de calor:** energia térmica em trânsito devido a uma diferença de temperaturas no espaço

## Natureza do fluxo de calor



Há **transferência líquida** de calor, **espontaneamente**, do corpo mais quente para o corpo mais frio.

# DEFINIÇÕES

- Calor:  $Q$  (J): certa quantidade de energia térmica transferida de uma região a outra;
- Taxa de transferência de calor:  $\dot{q}$  ( $\text{J}\cdot\text{s}^{-1}=\text{W}$ ): representa a velocidade com que essa transferência de energia ocorre
- Fluxo de calor: taxa de TC dividida pela área:  $\dot{q}/A$  ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )



# TRANSFERÊNCIA DE CALOR E A TERMODINÂMICA

- A 1ª Lei da Termodinâmica:
  - A energia ( $E$ ) pode ser transferida através de interações entre o sistema e suas vizinhanças. Estas interações são denominadas calor (Q) e trabalho (W).

$$E_2 - E_1 = {}_1Q_2 - {}_1W_2$$

**"A variação líquida de energia de um sistema é sempre igual a transferência líquida de energia na forma de calor e trabalho".**



# TRANSFERÊNCIA DE CALOR E A TERMODINÂMICA

**Termodinâmica** → determinar a quantidade de energia requerida na forma de calor para um sistema passar de um estado de equilíbrio para outro.

**Transferência de calor** → permite calcular a **taxa** (velocidade) na qual a transferência do calor ocorre.





**E NA INDÚSTRIA DE  
ALIMENTOS??**

# IMPORTÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS





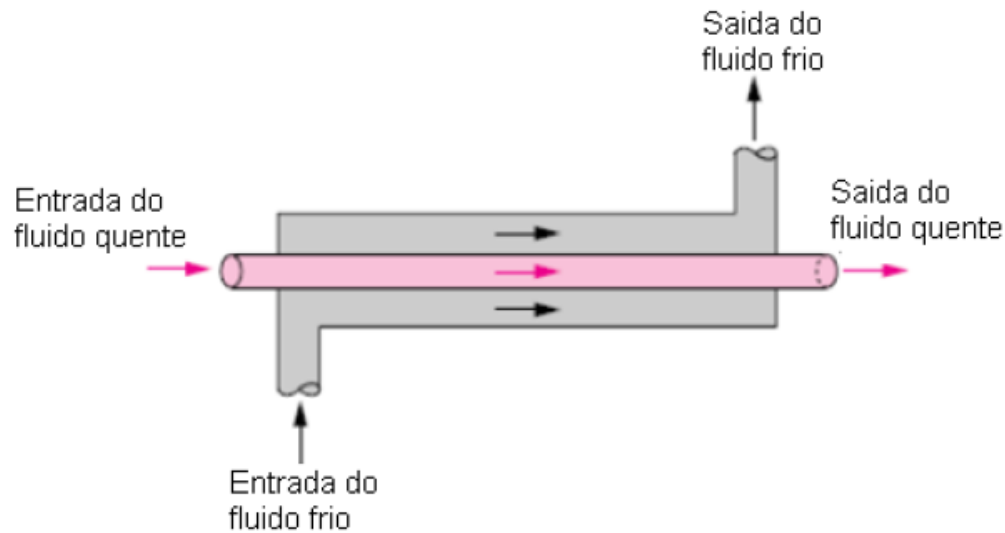
# ALGUNS PROCESSOS TÉRMICOS

<b>Processo</b>	<b>Meio externo</b>	<b>Temperatura do meio externo (°C)</b>	<b>Temperatura do alimento (°C)</b>
Resfriamento	Ar	0 (<0 para sub-resfriamento)	-1 a 5
Branqueamento	Água	70 a 90	60 a 80
Pasteurização	Água/Vapor	80 a 100	70 a 90
Esterilização	Água/Vapor	100 a 140	100 a 135
UHT	Trocadores de calor com superfície raspada	160	130 a 150
Fritura	Óleo	165	100 a 120
Torrefação/Assar	Ar/ Infravermelho	250	120 a 150
Cozimento	Ar/ Vapor/ Infravermelho	200 a 250	100 a 200

# IMPORTÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

- Como dimensionar um trocador de calor para resfriamento ou pasteurização do leite??

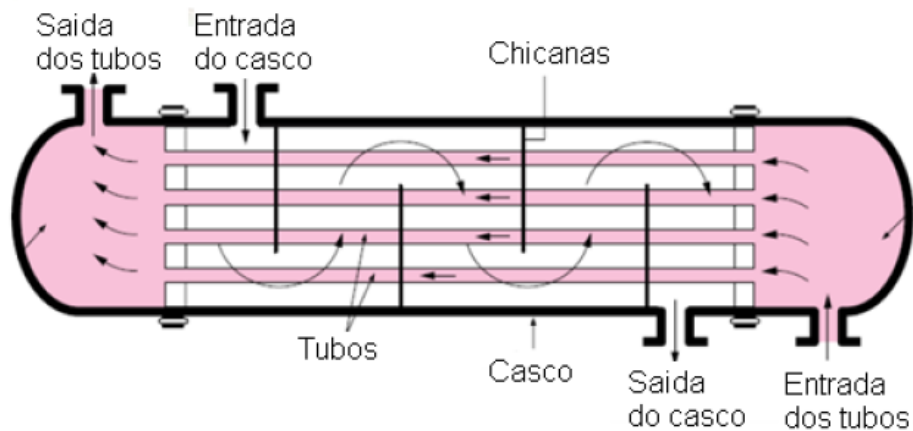
**Exemplo:** transporte do leite da ordenha até o laticínio: condições de HIGIENE durante a **ORDENHA**, e posterior **REFRIGERAÇÃO** (4°C max 2h após)



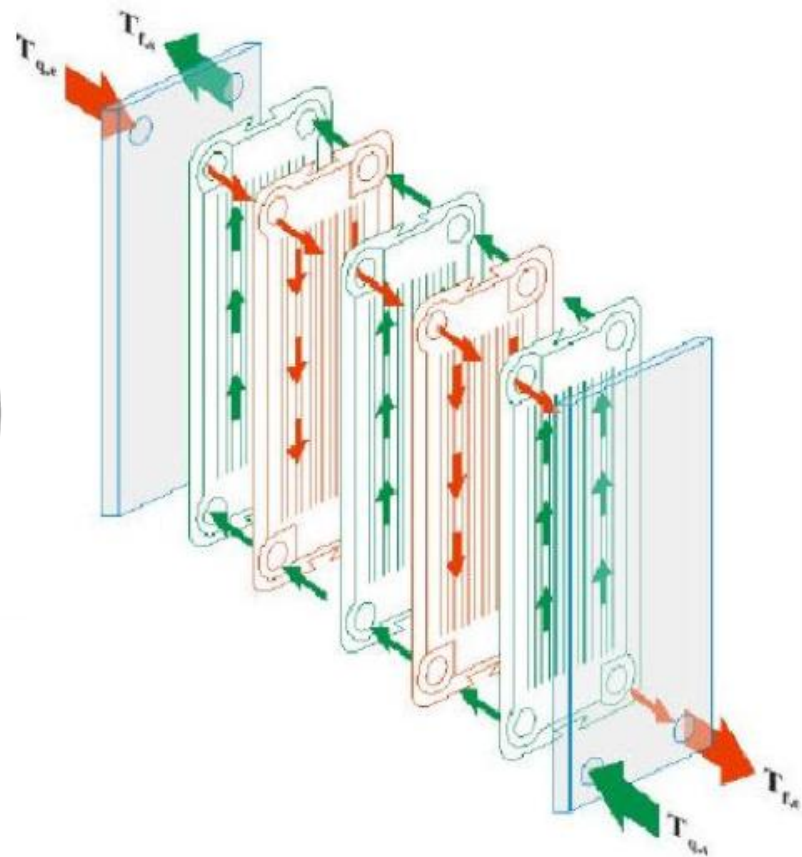
Trocador de calor tubo duplo



# IMPORTÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS

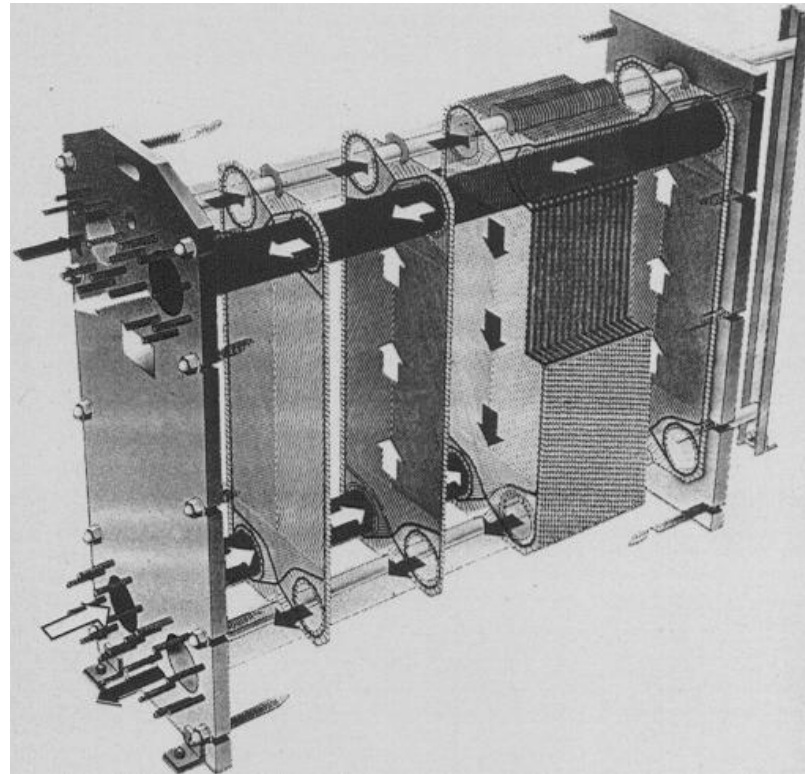
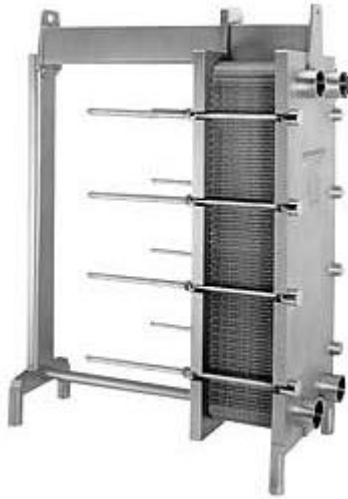


Trocador de calor carcaça e tubos



Trocador de calor a placas

# IMPORTÂNCIA DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR NA INDÚSTRIA DE ALIMENTOS



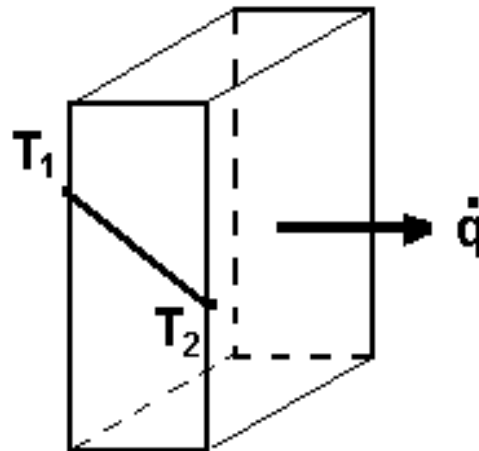


# **MECANISMOS DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR**

# MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

## ○ Transferência de calor por condução

- Transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas → interações entre as partículas
- **TC em meio estacionário**, que pode ser um sólido ou um fluido, em virtude de um gradiente de temperatura.

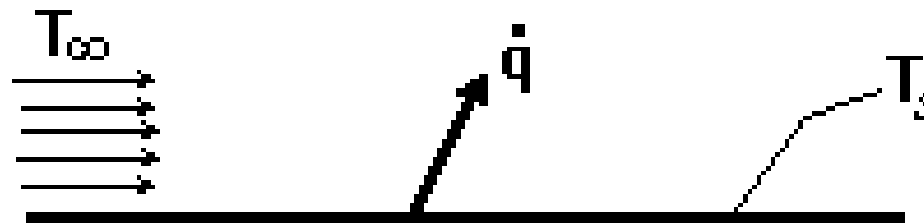


# MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

- Transferência de calor por convecção
  - Quando a transferência de energia ocorrer entre uma **superfície e um fluido** em movimento em virtude da diferença de temperatura entre eles.

fluido em  
movimento

$$T_s > T_\infty$$



Placa aquecida



# MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

- Transferência de calor por convecção

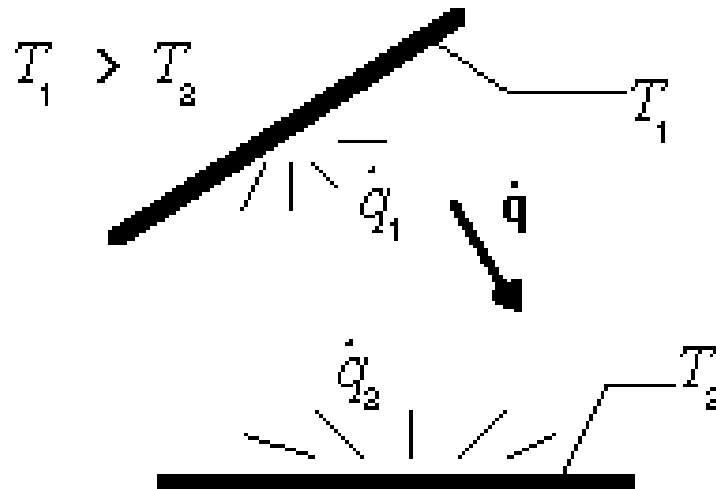
A convecção pode ser classificada como **forçada** se o movimento é causado por um agente externo (ventilador, bomba, compressor, etc) ou **livre (ou natural)** se o movimento ocorrer devido a diferença de densidade no meio



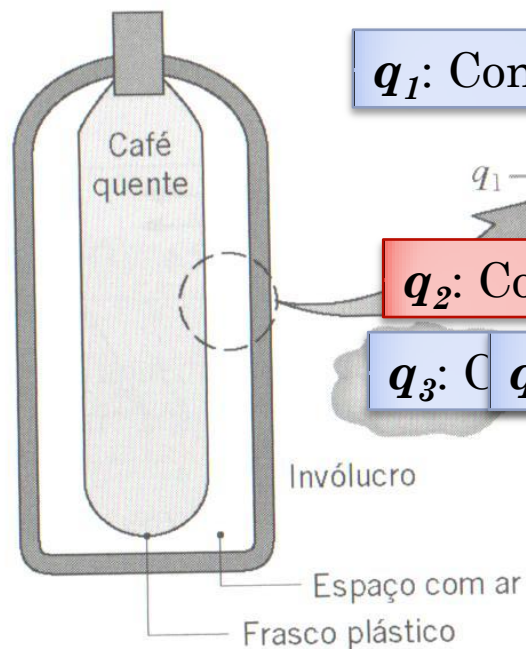


# MECANISMOS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

- Transferência de calor por radiação
  - Quando, na **ausência de um meio interveniente**, existe uma troca líquida de energia (emitida na forma de ondas eletromagnéticas) entre duas superfícies a diferentes temperaturas



- **Exemplo 1:** Um recipiente fechado cheio com café quente encontra-se em uma sala cujo ar e paredes estão a uma temperatura fixa. Identifique todos os processos de transferência de calor que contribuem com o resfriamento do café. Comente sobre as características que contribuiriam para um melhor projeto de recipiente.



$q_1$ : Convecção

$q_5$ : troca líquida radiante entre superfície ext. do frasco e sup. int. do invólucro

$q_8$ : troca líquida radiante da superfície ext. do invólucro e a vizinhança

$q_2$ : Condução

$q_6$ : Condução através do invólucro

$q_3$ : C

$q_7$ : Convecção natural do invólucro para o ar da sala

$q_4$ : Convecção natural do ar para o invólucro

# FENÔMENOS DE TRANSFERÊNCIAS



# FENÔMENOS DE TRANSFERÊNCIAS

$$\chi = K \cdot \Delta\omega$$

Fluxo da Grandeza

Constante de  
Proporcionalidade ou  
Resistência

Potencial



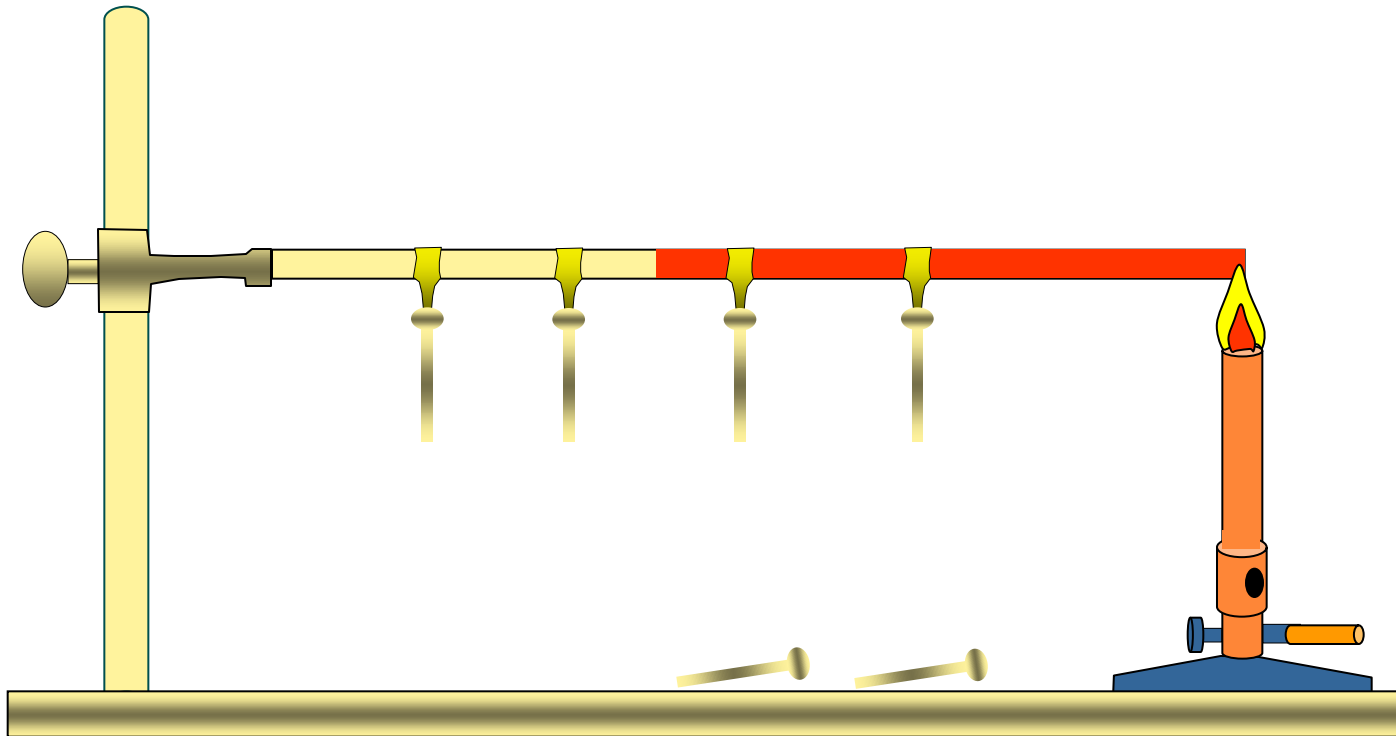
# TRANSFERÊNCIA DE CALOR POR CONDUÇÃO

21

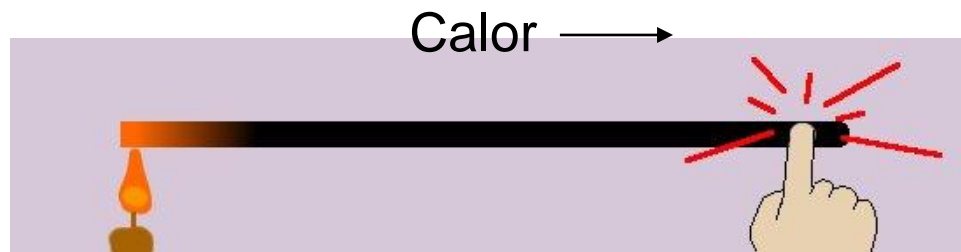


Fonte:  
[www.terra.com.br/fisicanet](http://www.terra.com.br/fisicanet)

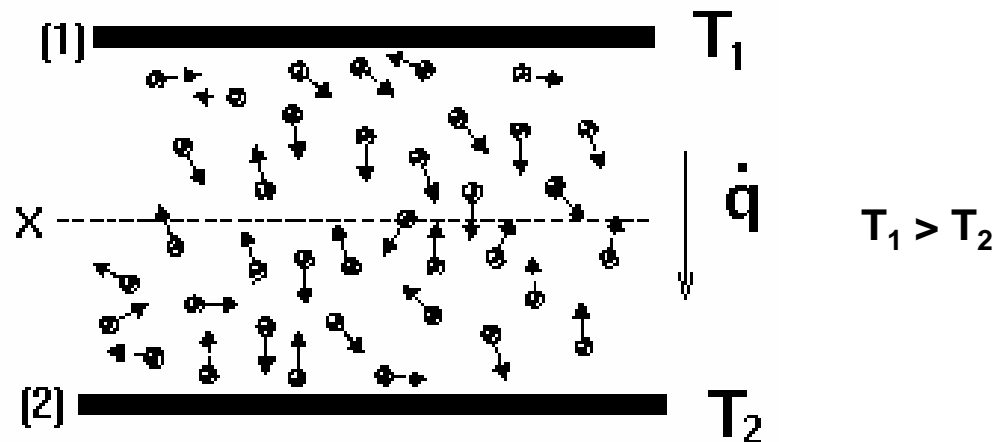
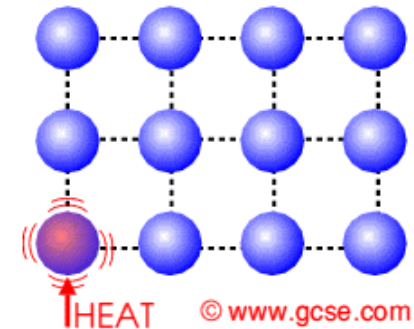
**Condução de calor:** Transferência de energia (calor) das partículas mais energéticas para as menos energéticas devido às interações entre as partículas



# CONDUÇÃO



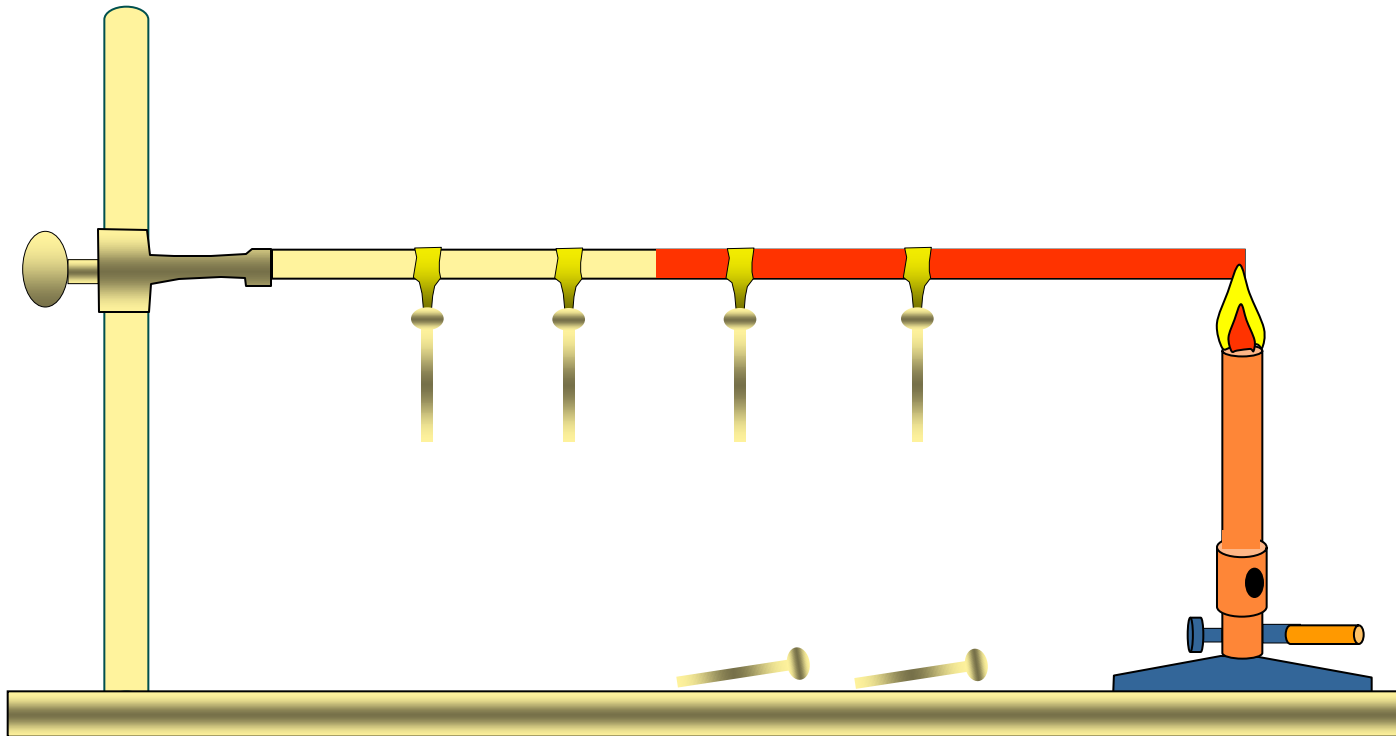
Condução de calor ao longo de uma barra.



Condução de calor ao longo de gás confinado.

A transmissão de calor ocorre, **partícula a partícula, somente através da agitação molecular e dos choques entre as moléculas do meio.**

**Como quantificar processos de transferência de calor (quantidade de energia sendo transferida por unidade de tempo)?**





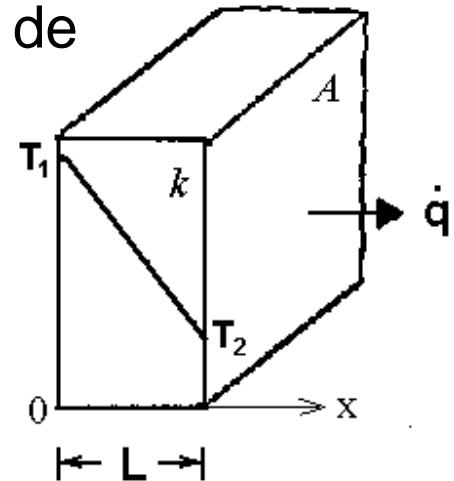
# EQUAÇÃO DE TAXA: CONDUÇÃO EM SÓLIDOS

- Condição: sólidos homogêneos isotrópicos (não há convecção) e o efeito da radiação é desprezível
- Equação de taxa para a condução térmica: Lei de Fourier (Fenomenológica)

$$\frac{dq}{dA} = -k \frac{\partial T}{\partial x}$$

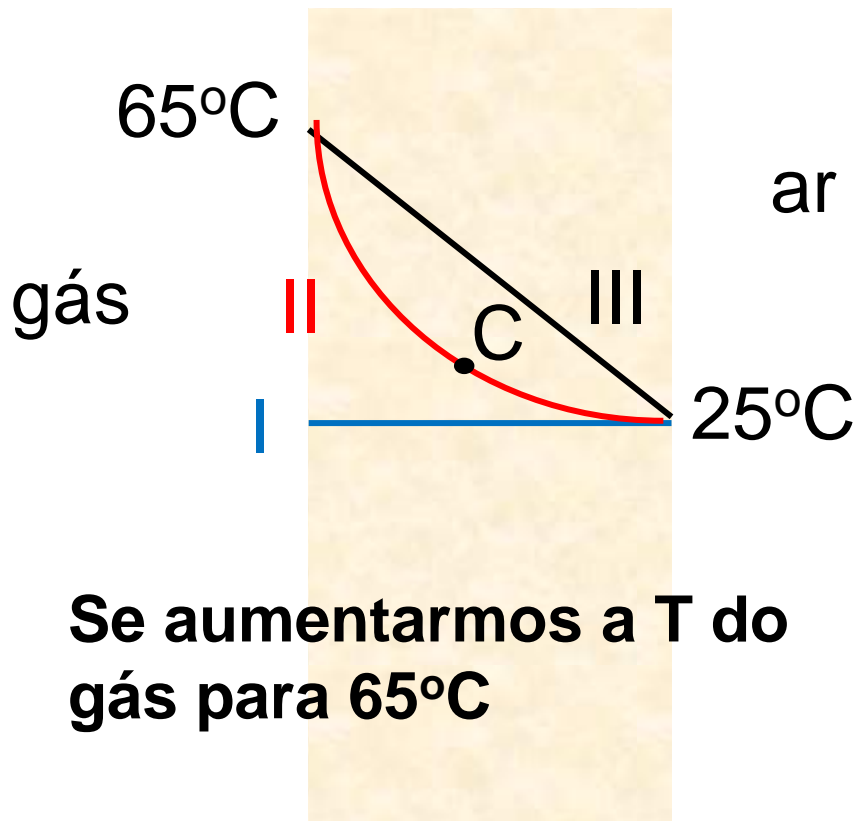
- Onde:

- $q$ : fluxo térmico (W)
- $A$ : área perpendicular à direção da transferência da superfície isotérmica
- $T$ : Temperatura
- $x$ : distância na direção normal a superfície
- $k$ : constante de proporcionalidade conhecida como constante de condutividade térmica do meio condutor



# EQUAÇÃO DE TAXA: CONDUÇÃO EM SÓLIDOS

- Esta equação pode ser utilizada para o fluxo de calor através de uma superfície qualquer, não necessariamente isotérmica



**Se aumentarmos a T do gás para 65°C**

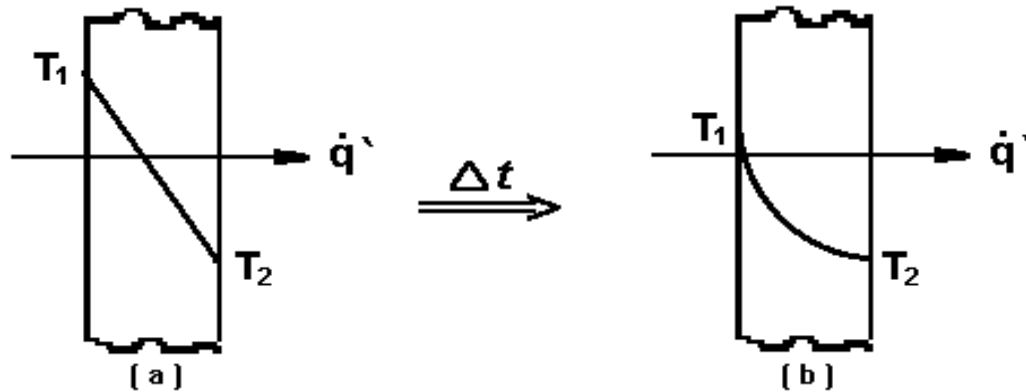
**t(0):** distribuição de temperaturas I

**t(1):** distribuição II, a T em C está aumentando. Ocorre condução em estado não estacionário

**t(2):** para t suficiente/e gde → distribuição III: estado estacionário

# REGIMES DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

- Exemplo: Estufa de secagem



Regime permanente  
*Estufa ligada*

Regime transiente  
*Estufa desligada*



# FLUXO ESTACIONÁRIO UNI-DIMENSIONAL

- Lei de Fourier

$$\frac{\dot{q}}{A} = -k \frac{dT}{dx}$$

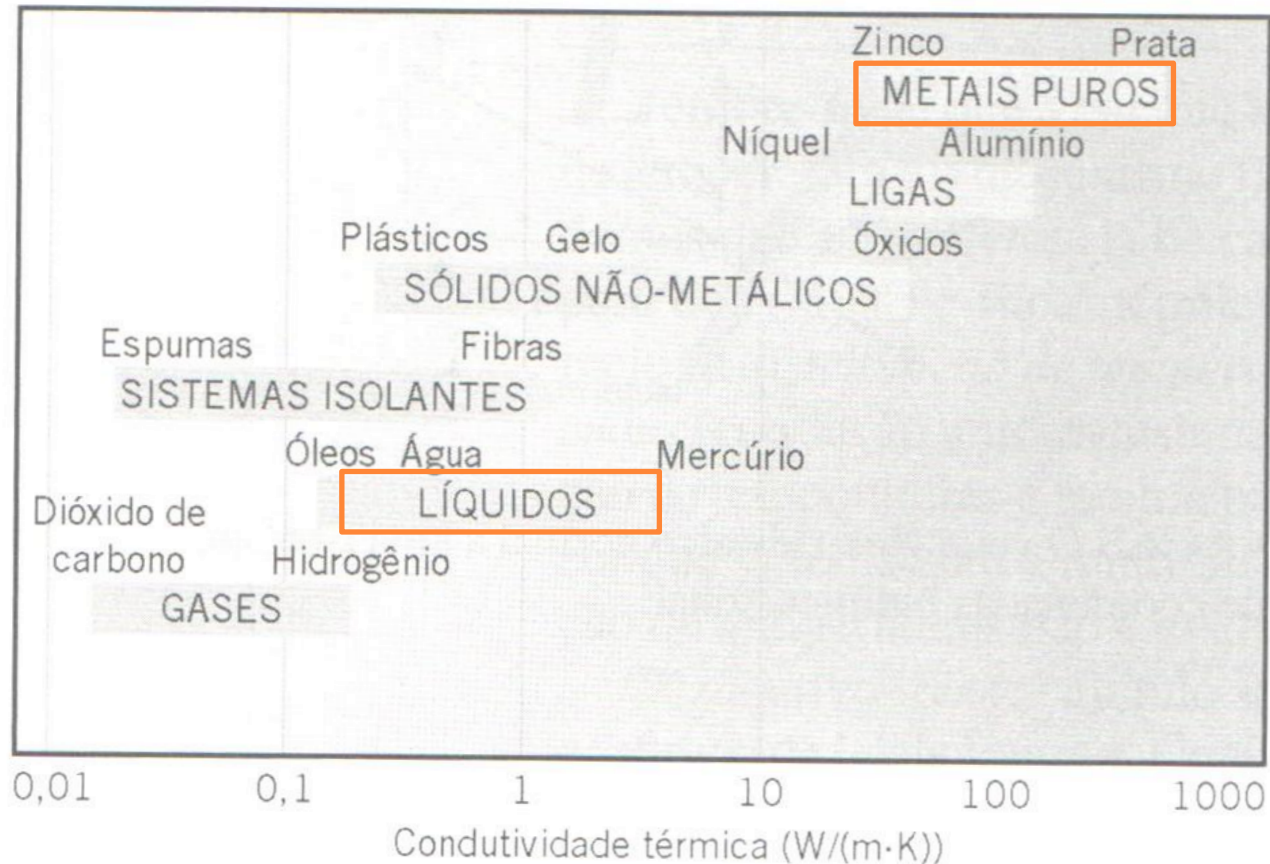
- Unidades:

- q: kcal/h ou kcal/s ou kJ/s
- dT/dx: °C/m
- k: kcal/(h°C)

O fluxo de calor depende da forma (dx)!!

A Lei de Fourier estabelece que k é independente de T → verdade para intervalos de T pequenos!!

# Faixa de condutividade térmica de vários estados da matéria a T e P normais

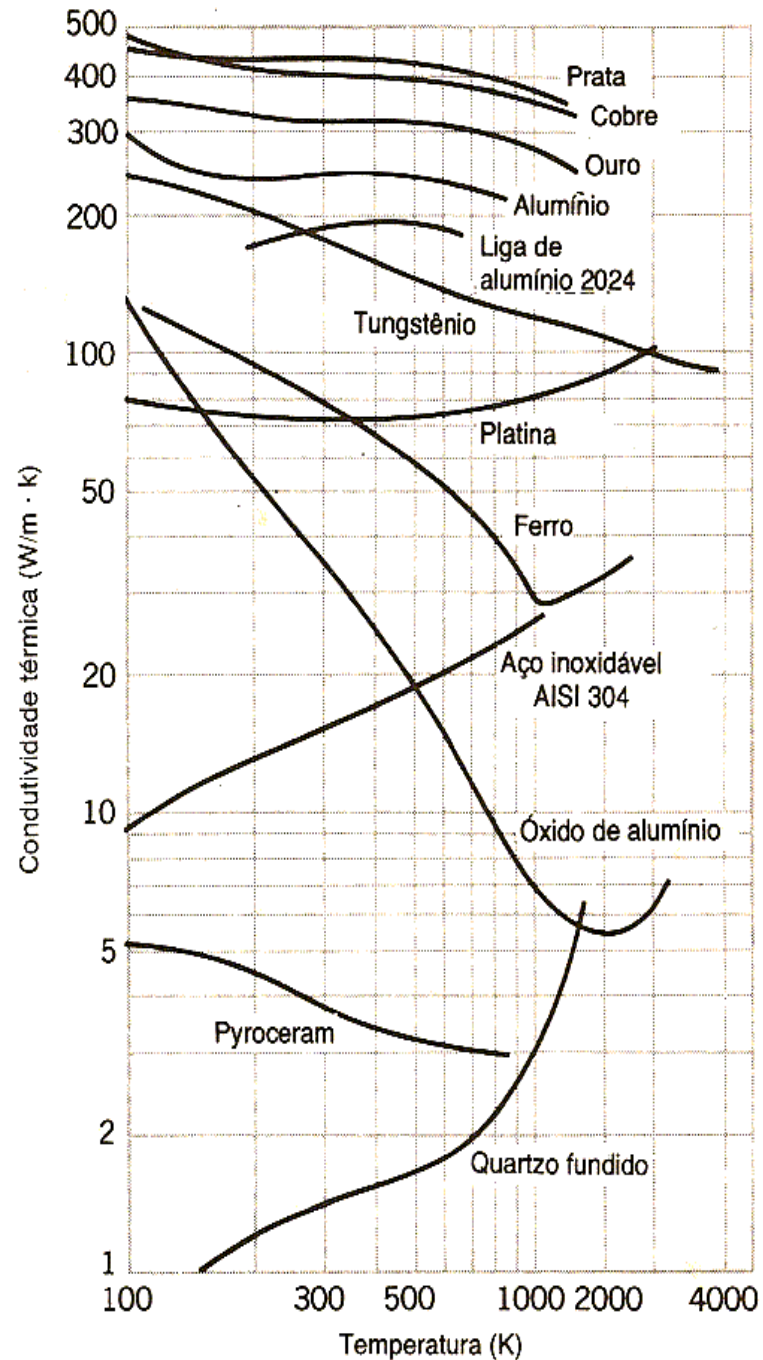


Fonte: Incropera et al. (2008)

- A **condutividade térmica**, ou constante de proporcionalidade de Fourier é característica do material e sua **T média também influi em k**. Na determinação de k para líquidos e gases, este deve ser mantido entre placas metálicas horizontais muito próximas para evitar o movimento de mistura no fluido (advecção) interfira.
- **Quanto maior for a distância entre átomos e moléculas no material, menor será a condutividade térmica**, pois o menor contato entre as partículas dificulta o transporte de energia térmica. Essa tendência pode ser constatada na figura anterior, que mostra as faixas de condutividade térmica de diferentes tipos de materiais. Dentre os sólidos, **os metais tem maiores k graças aos elétrons livres que colaboram com a difusão de energia térmica. Os sistemas de isolamento térmico são normalmente matrizes porosas contendo ar (espumas e fibras) e, portanto, apresentam valores de k próximos ao dos gases.**

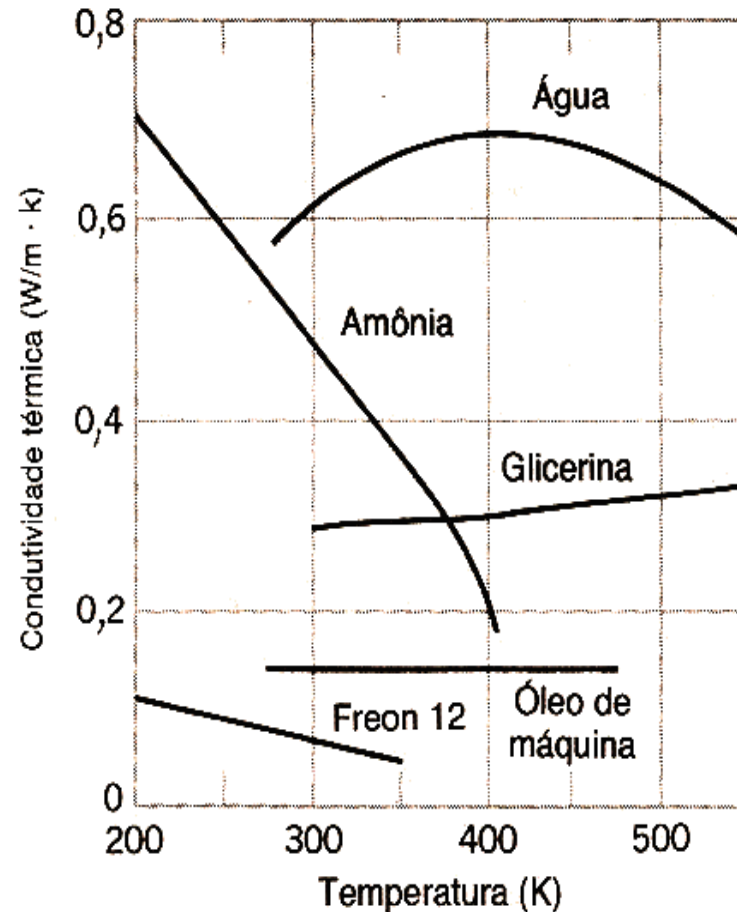


# Dependência com a T da Condutividade Térmica de sólidos selecionados



Fonte: Incropera et al. (2008)

# Dependência com a T da Condutividade Térmica de líquidos não metálicos em condições de saturação



Fonte: Incropera et al. (2008)



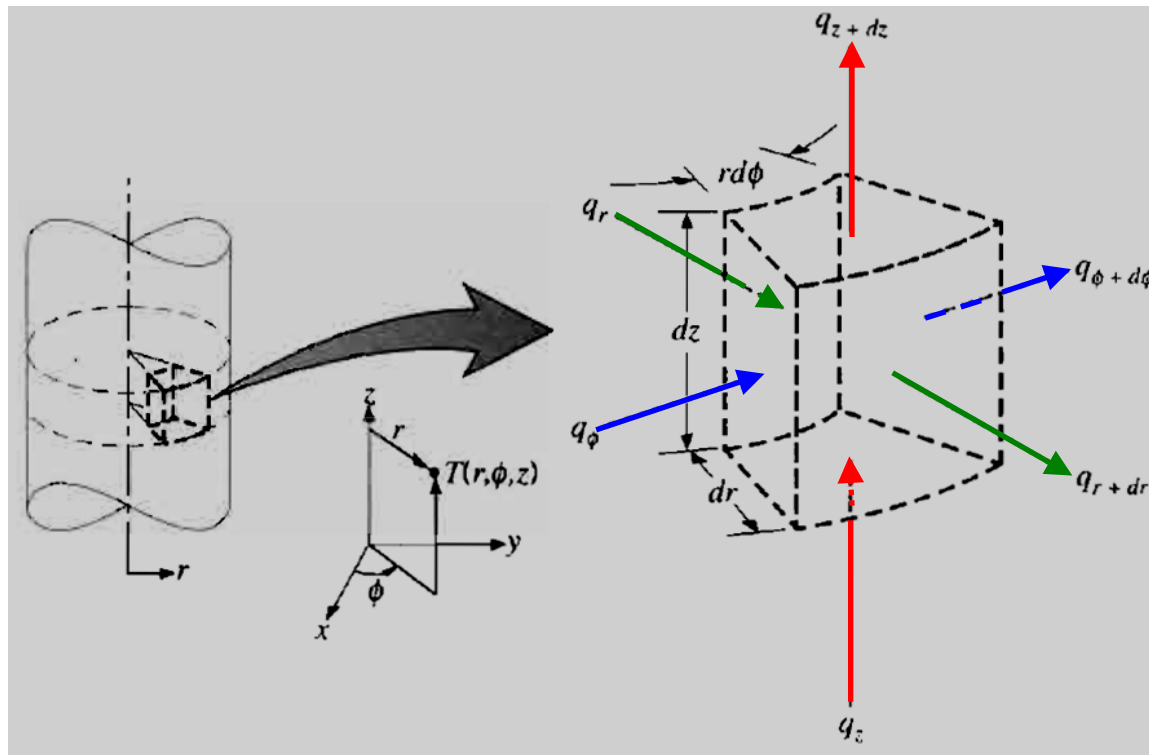
# Dependência com a T da Condutividade Térmica de alguns alimentos

Fonte: Tadini et al. (2016)

- **Exemplo 2:** Considere um forno a gás industrial, confeccionado com paredes planas de tijolo refratário com 7,0 cm de espessura. A temperatura na superfície interior da parede é de 200°C. A temperatura média na superfície externa dessa parede é de 40°C. Estime qual é a perda de energia térmica no interior do forno para o ambiente por unidade de área, no estado estacionário.
- Condutividade Térmica da parede:  $k=1,0 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

# Fluxo de calor através de um configuração cilíndrica (Cilindro oco)

## Coordenadas Cilíndricas

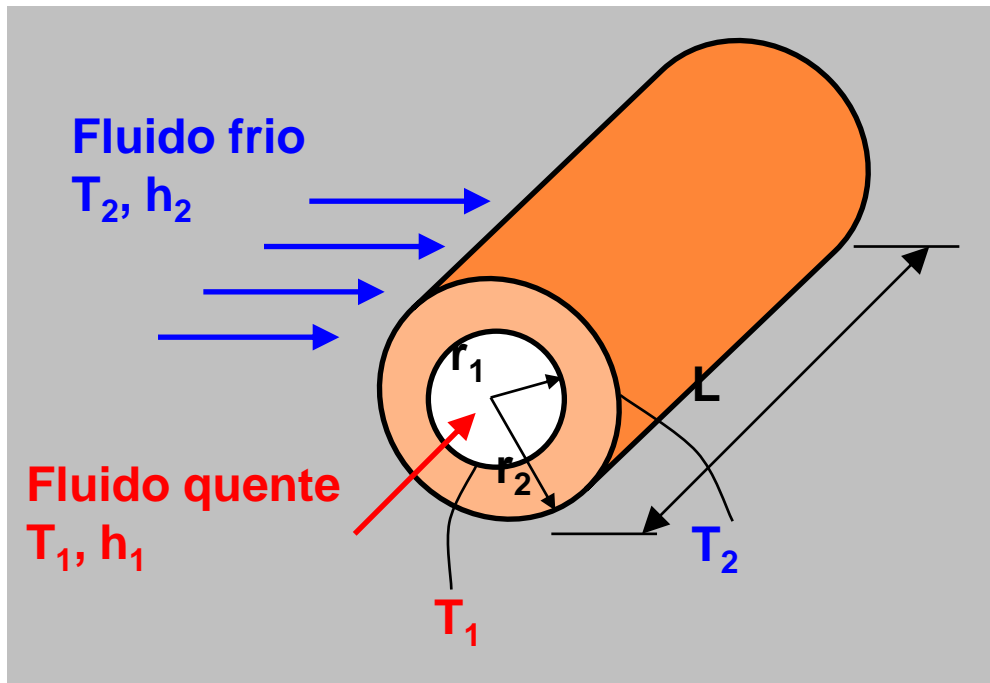


$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \kappa r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial \phi} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial \phi} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \kappa \frac{\partial T}{\partial z} \right) = \dot{q}$$

# CONDUÇÃO UNIDIMENSIONAL DE CALOR EM REGIME ESTACIONÁRIO

**Sistemas Radiais:** grad de T → direção radial

- Cilindro oco, sistema unidimensional, sem geração de calor, em regime estacionário, com  $\kappa$  constante



**Lei de Fourier**

$$\dot{q}_r = -kA \frac{dT}{dr}$$

Área perpendicular ao fluxo

$$A_r = 2.\pi.rL$$

???

**Mas  $r$  varia de  $r_1$  a  $r_2$**

$$\dot{q}_r = \frac{-2\pi kL(T_2 - T_1)}{\ln(r_2 / r_1)}$$



**Exercício 3:** Faça a passagem da Equação (1) para (3)

# ÁREA MÉDIA DE TRANSFERÊNCIA

- Coordenadas cilíndricas: Área média logarítmica ( $A_{ln}$ )

$$\dot{q}_r = -kA_{ln} \frac{\Delta T}{\Delta r}$$

Sendo:

$$A_{ln} = \frac{A_1 - A_2}{\ln\left(\frac{A_1}{A_2}\right)}$$

Inferior à média aritmética

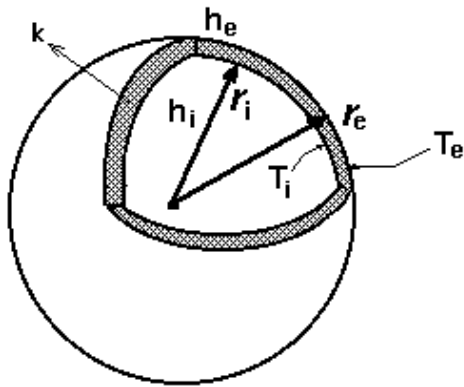


$$\dot{q}_r = \frac{-2\pi kL.(T_2 - T_1)}{\ln(R_2 / R_1)}$$



# Fluxo de calor através de uma configuração esférica

$\dot{q} = -k.A.\frac{dT}{dr}$  onde  $\frac{dT}{dr}$  é o gradiente de temperatura na direção radial



$$A = 4.\pi.r^2$$

$$\dot{q} = -k.(4.\pi.r^2).\frac{dT}{dr}$$

$$\int_{r_1}^{r_2} \dot{q}.\frac{dr}{r^2} = -\int_{T_1}^{T_2} k.4.\pi.dT$$

$$\dot{q}_r = \frac{-4.k.\pi.(T_2 - T_1)}{(1/r_1) - (1/r_2)} = \frac{4.k.\pi.(T_1 - T_2)}{(1/r_2) - (1/r_1)}$$

Com  $T_1 > T_2$



# ÁREA MÉDIA DE TRANSFERÊNCIA

- Coordenadas esféricas: Média geométrica entre as áreas ( $A_{gm}$ )

$$\dot{q}_r = -kA_{gm} \frac{\Delta T}{\Delta r}$$

Sendo:

$$A_{gm} = \sqrt{A_1 A_2}$$

Inferior à média logarítmica

**DESAFIO...**

$$\dot{q}_r = \frac{-4.k.\pi.(T_2 - T_1)}{(1/r_1) - (1/r_2)}$$



- **Exemplo 4:** Retomando o Exemplo 2, considere que a parede do forno seja agora no formato de um iglu, ou seja, metade de uma casca esférica sobre uma superfície plana. A espessura da parede de tijolo refratário com é de 7,0 cm de espessura, e o raio interno da casca é de 50 cm. Sabendo que a temperatura média da superfície interna é de 200°C e que a temperatura média na superfície externa é de 40°C, determine a taxa de calor e o fluxo de calor que atravessam radialmente a superfície externa do forno no estado estacionário.
- $k=1,0 \text{ W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$

