

Transferência de Calor

Aplicada a Sistemas

Aeroespaciais

Introdução e conceitos básicos

- Compreender como a termodinâmica e a transferência de calor estão relacionadas;
- Distinguir a energia térmica de outras formas de energia e a transferência de calor de outras formas de transferência de energia;
- Fazer balanços gerais de energia e balanços de energia em superfícies;
- Entender os mecanismos de transferência de calor (condução, convecção e radiação térmica), a lei de Fourier da condução de calor, a lei de Newton do resfriamento e a lei de Stefan-Boltzmann da radiação;
- Identificar os mecanismos de transferência de calor que ocorrem de forma simultânea na prática;
- Conscientizar-se dos custos associados às perdas de calor;
- Solucionar os vários problemas de transferência de calor encontrados na prática;

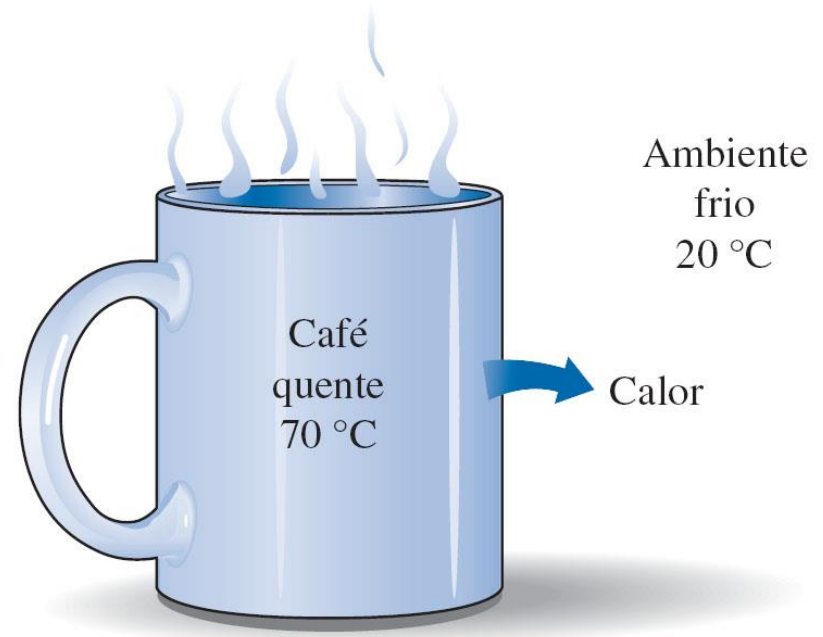
- **Calor:** A forma de energia que pode ser transferida de um sistema para outro como em consequência da diferença de temperatura entre eles;
- **Termodinâmica:** A termodinâmica está focada na *quantidade* transferida de calor quando um sistema passa de um estado de equilíbrio para o outro, *sem* fornecer informações sobre o *tempo de duração do processo*;
- **Transferência de calor** lida com a determinação das *taxas* de transferência de energia e variação de temperatura;
- A transferência de energia em forma de calor ocorre do meio de maior temperatura para o meio de menor temperatura;
- A transferência de calor cessa quando os dois meios atingem a mesma temperatura;
- O calor pode ser transferido em três maneiras diferentes:
condução, convecção e radiação

Geralmente, estamos mais interessados em saber qual é o tempo necessário para o café quente que está no interior de uma garrafa térmica resfriar até certa temperatura. Essa informação não pode ser determinada somente por meio da análise termodinâmica.

Garrafa
térmica



Isolamento
térmico



Fluxo de calor na direção da
temperatura decrescente.

ÁREAS DE APLICAÇÃO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR



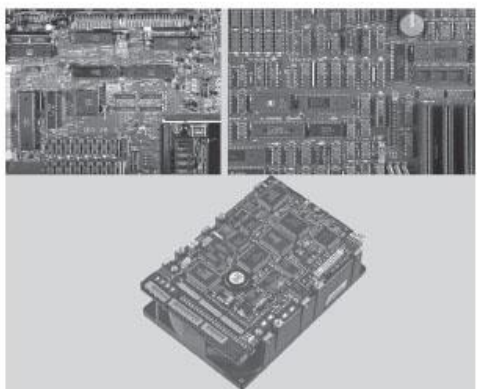
O corpo humano
(© Vol. 121/Photo Disc.)



Sistemas de ar condicionado
(© The McGraw-Hill Companies, Inc./Jill Braaten, photographer.)



Sistemas de aquecimento
(© Comstock RF.)



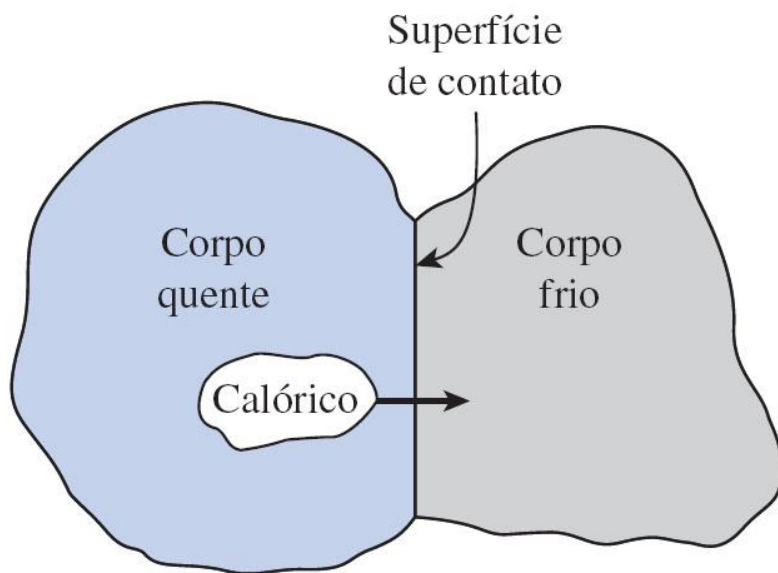
Equipamentos eletrônicos
(© Alamy RF.)
(© Brand X/Jupiter Images RF.)
(© Punchstock RF.)



Usinas de potência
(© Vol. 57/Photo Disc.)



Sistemas de refrigeração
(© The McGraw-Hill Companies, Inc./Jill Braaten, photographer.)



No início do século XIX, o calor foi concebido como um tipo de fluido invisível, denominado **calórico**, que fluía do corpo mais quente para o mais frio.

Teoria cinética: Entende as moléculas como pequenas bolas em movimento que têm, portanto, energia cinética.

Calor: Energia associada ao movimento aleatório de átomos e moléculas.

Teoria do calórico: Calor é um tipo de substância semelhante ao fluido e denominado **calórico**, que é sem massa, incolor, inodoro, insípido, e capaz de fluir de um corpo para outro.

Somente na metade do século XIX alcançamos o verdadeiro entendimento físico sobre a natureza do calor;

Experimentos cuidadosamente realizados pelo inglês James P. Joule e publicados em 1843 convenceram os céticos de que o calor não era, afinal, uma substância, pondo fim à teoria do calórico.



(Arquivo - AIP Emilio Segre Visual)

O físico britânico **James Prescott Joule** (1818 - 1889) nasceu em Salford, Lancashire, Inglaterra;

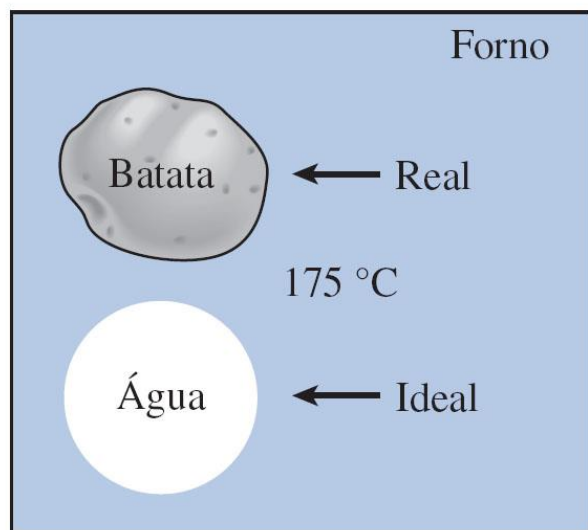
Joule é mais conhecido por seu trabalho sobre a conversão de energia elétrica e mecânica em calor e pela primeira lei da termodinâmica;

A unidade de energia, o Joule (J), foi nomeada em sua homenagem;

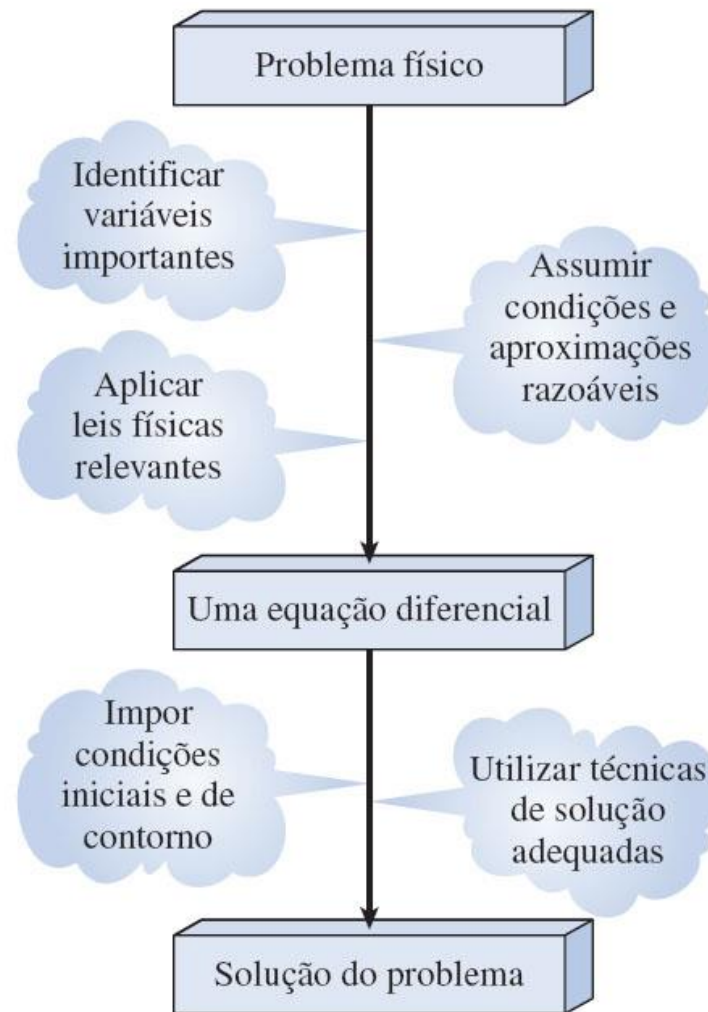
Por meio experimentos Joule demonstrou a equivalência mecânica de calor, ou seja, a conversão de energia mecânica em quantidade equivalente de energia térmica, que estabelece fundamentação para o princípio da conservação da energia;

Joule e William Thomson (mais tarde Lord Kelvin) descobriram a queda de temperatura de uma substância durante a livre expansão, fenômeno conhecido como efeito Joule- Thomson, que forma a fundamentação do funcionamento da refrigeração de compressão de vapor comum e de sistemas de ar condicionado;

- Equipamentos de transferência de calor, como trocadores de calor, caldeiras, condensadores, radiadores, aquecedores, fornos, refrigeradores e coletores de energia solar, são projetados principalmente com base na análise de transferência de calor;
- Os problemas de transferência de calor encontrados na prática podem ser separados em dois grupos: (1) *de avaliação* e (2) *de dimensionamento*.
- Os problemas de avaliação lidam com a determinação da taxa de transferência de calor para um **sistema existente** com diferença de temperatura específica;
- Os problemas de dimensionamento tratam da **determinação do tamanho do sistema** de forma a transferir calor em dada taxa para uma diferença de temperatura específica;
- Sistemas ou processos de engenharia podem ser estudados *experimentalmente* (testando e tomando medidas) ou *analiticamente* (por meio de cálculos ou análises matemáticas);
- A abordagem experimental oferece a vantagem de trabalhar com o sistema físico real, e a quantidade desejada é determinada por medição dentro dos limites dos erros experimentais. No entanto, essa abordagem é cara, demorada e frequentemente impraticável pelo fato de o sistema em estudo pode nem mesmo existir;
- A abordagem analítica (incluindo a abordagem numérica) tem a vantagem de ser rápida e barata, no entanto os resultados obtidos estão sujeitos ao acerto das condições assumidas, das aproximações e das idealizações feitas na análise.



A modelagem é uma poderosa ferramenta de engenharia que fornece uma boa ideia do fenômeno, de modo simples, com alguma imprecisão.



Modelagem matemática de problemas físicos.

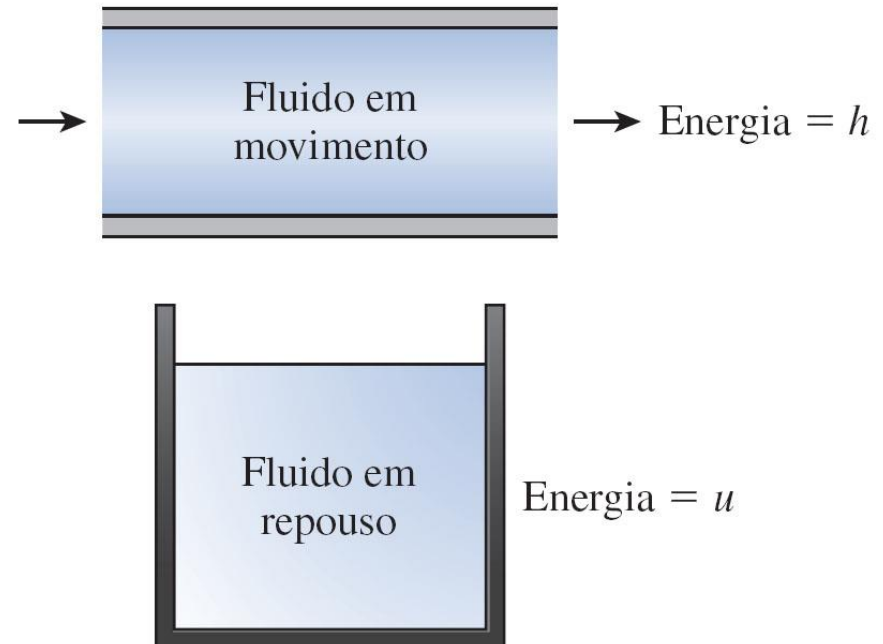
➤ Existem várias formas de energia, tais como:

- ✓ Térmica
- ✓ Mecânica
 - Cinética
 - Potencial
- ✓ Elétrica
- ✓ Magnética
- ✓ Química
- ✓ Nuclear

- A soma de todas elas constitui a **energia total E** (ou **e** por unidade de massa) de um sistema;
- A soma de todas as formas microscópicas de energia (relacionadas com a estrutura ou grau de atividade molecular) é denominada **energia interna U** do sistema (ou **u** por unidade de massa).

- No Sistema Internacional de unidades (**SI**) a unidade de energia é o joule (**J**);
- No **sistema inglês** de unidades, a unidade de energia é o “**British Thermal Unit**” (**BTU**);
- **BTU** = Energia necessária para elevar a temperatura em 1 °F de 1 lbm de água a 60°F;
1 BTU = 1,055056 kJ
- **Caloria** = Energia necessária para elevar a temperatura em 1 °C de 1 g de água a 14,5 °C;
1 cal = 4,1868 J
- **Energia interna**: Entendida como a soma das energias cinética e potencial das moléculas;
- **Calor sensível**: A energia cinética das moléculas.
- **Calor latente**: A energia interna associada com a fase de um sistema;
- **Energia química ou de ligação**: A energia interna associada com às ligações dos átomos na molécula;
- **Energia nuclear**: A energia interna associada com as ligações dentro do núcleo de um átomo.

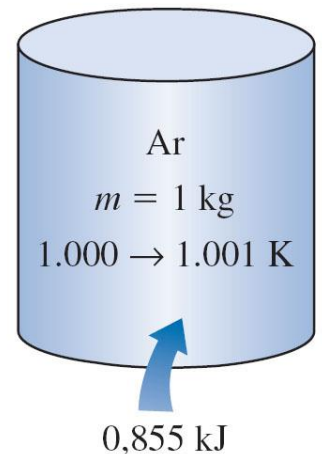
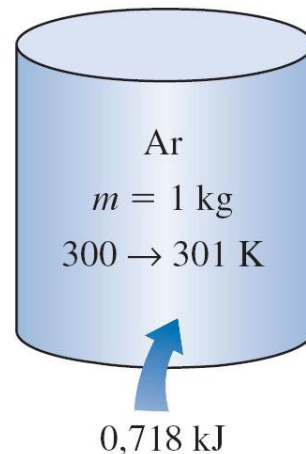
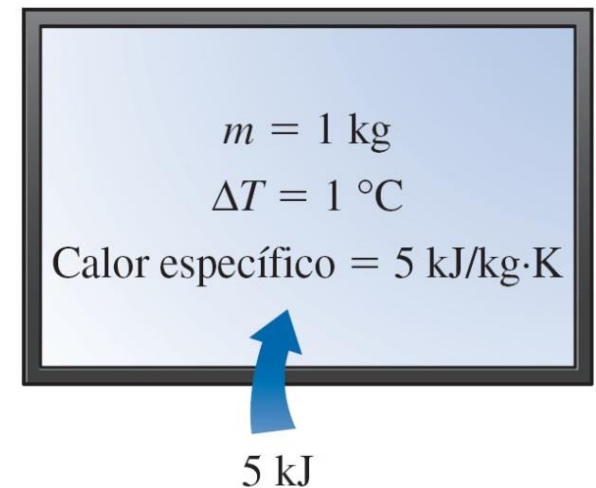
- Na análise de sistemas que envolvem escoamento de fluidos, frequentemente encontramos a combinação das propriedades u e Pv .
- Essa combinação é definida como **entalpia** ($h = u + Pv$).
- O termo Pv representa a **energia de escoamento** do fluido (também chamado trabalho de bombeamento).



A *energia interna* u representa a energia microscópica de um fluido em repouso, enquanto a entalpia h representa a energia microscópica de um fluido em movimento .

CALOR ESPECÍFICO DE GÁS, LÍQUIDO E SÓLIDO

- **Calor específico:** A energia necessária para aumentar a temperatura em um grau de uma unidade de massa de dada substância.
- Dois tipos de calores específicos:
 - calor específico a volume constante c_v
 - calor específico a pressão constante c_p
- Em geral, os **calores específicos** de uma substância dependem de **duas propriedades independentes** como temperatura e pressão.
- Para um gás ideal o calor específico depende apenas da **temperatura**;
- Em **baixas pressões**, todos os **gases reais** se aproximam do comportamento de gás ideal, logo seus calores específicos dependem apenas da **temperatura**.



CALOR ESPECÍFICO DE GÁS, LÍQUIDO E SÓLIDO

- As variações finitas na energia interna e entalpia para um gás ideal durante um processo podem ser expressas usando valores do calor específico para a temperatura média:

$$\Delta h = c_{v, med} \Delta T \quad (\text{J/g})$$

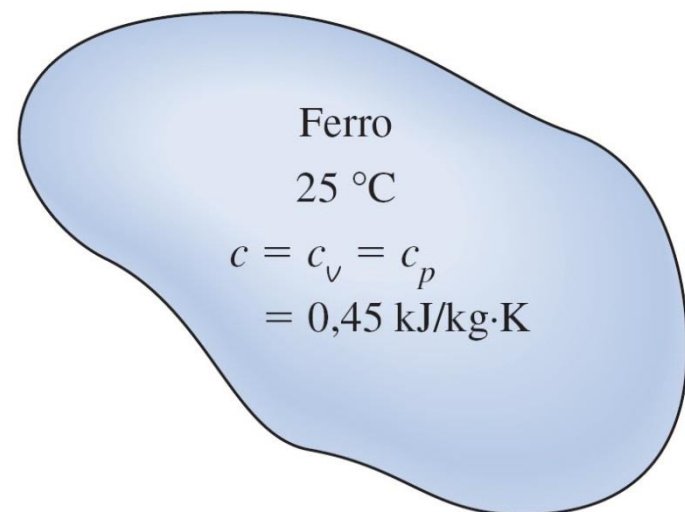
$$\Delta H = m c_{p, med} \Delta T \quad (\text{J})$$

- **Substância incompressível:** Uma substância cujo volume específico (ou densidade) não varia significativamente com a variação da pressão.
- Os calores específicos a volume constante e a pressão constante são idênticos para substâncias ditas incompressíveis (sólidos e líquidos):

$$c_v = c_p = c$$

- O calor específico de uma substância incompressível depende apenas da temperatura. Assim, a variação de energia interna em sólidos e líquidos pode ser expressa por:

- ΔU ou Δu de sistemas que permanecem durante o processo em uma única fase pode ser determinada pela utilização de c_{med} .



$$\Delta U = m c_{med} \Delta T \quad (\text{J})$$

ou

$$\Delta u = c_{med} \Delta T \quad (\text{J/g})$$

A energia pode ser transferida de ou para uma massa por meio de dois mecanismos:

transferência de calor e trabalho.

Taxa de transferência de calor (\dot{Q}): A quantidade de calor transferido (Q) por unidade de tempo (Δt).

Fluxo de calor (\dot{q}): A taxa de transferência de calor por unidade de área normal à direção da transferência de calor.

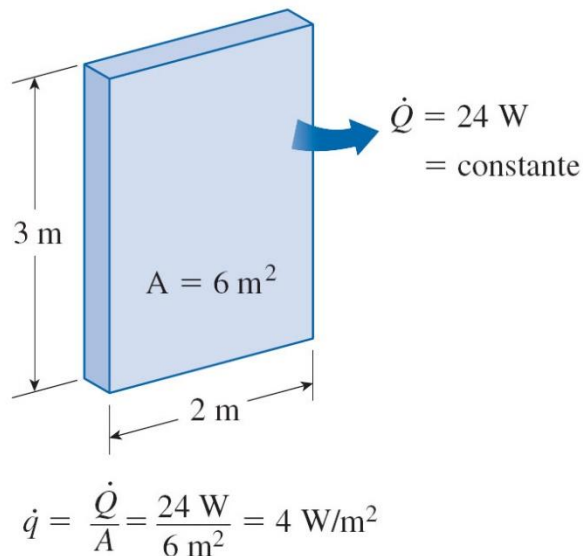
Potência: Trabalho *por unidade de tempo*. (**W**)

$$Q = \int_0^{\Delta t} \dot{Q} dt \quad (\text{J})$$

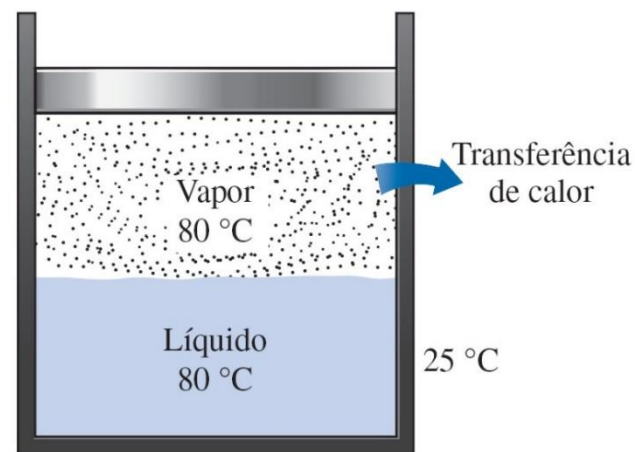
Quando \dot{Q} é constante:

$$Q = \dot{Q} \Delta t \quad (\text{J})$$

$$\dot{q} = \frac{\dot{Q}}{A} \quad (\text{W/m}^2)$$



Fluxo de calor é o calor transferido por unidade de tempo e por unidade de área, e é igual a $\dot{q} = \dot{Q} / A$, admitindo-se \dot{Q} uniforme na área A .



As formas sensível e latente da energia interna podem ser transferidas como resultado da diferenças de temperatura e são denominadas *calor* ou *energia térmica*.

A **primeira lei da termodinâmica** (**princípio da conservação de energia**), estabelece que a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo; pode *apenas mudar de forma*.

$$\left(\begin{array}{c} \text{Energia total} \\ \text{na entrada} \\ \text{do sistema} \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Energia total} \\ \text{na saída} \\ \text{do sistema} \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Mudança de} \\ \text{energia total} \\ \text{no sistema} \end{array} \right)$$

$$\underbrace{E_{ent} - E_{sai}} = \underbrace{\Delta E_{sistema}} \quad (J)$$

Energia líquida transferida por calor, trabalho e massa

Mudança de energia interna cinética, potencial, etc

A variação líquida (aumento ou diminuição) na energia total de um sistema durante um processo é igual à diferença entre a energia total recebida e a energia total rejeitada pelo sistema durante o processo.

$$\underbrace{\dot{E}_{ent} - \dot{E}_{sai}} = \underbrace{dE_{sistema}/dt} \quad (W)$$

Taxa líquida de transferência de energia por calor, trabalho e massa

Taxa de mudança da energia interna, cinética, potencial, etc.

O **balanço de energia** para qualquer sistema sofrendo qualquer processo pode ser expresso por:

Forma da taxa em regime permanente:

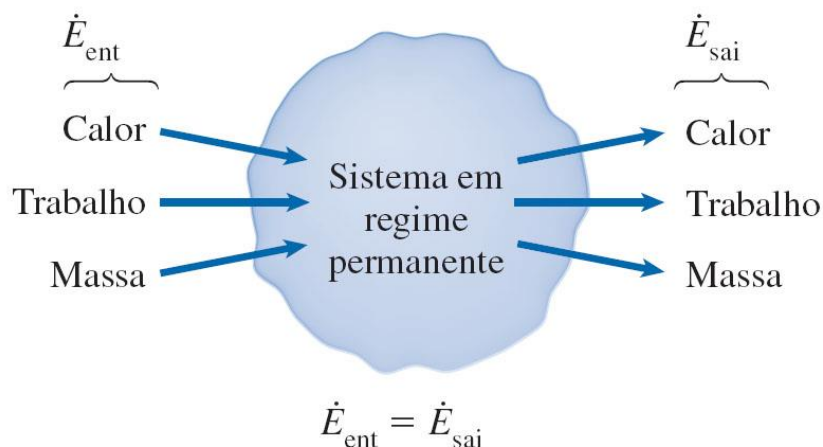
$$\dot{E}_{ent}$$

=

$$\dot{E}_{sai}$$

Taxa de energia líquida na entrada transferida por calor, trabalho e massa

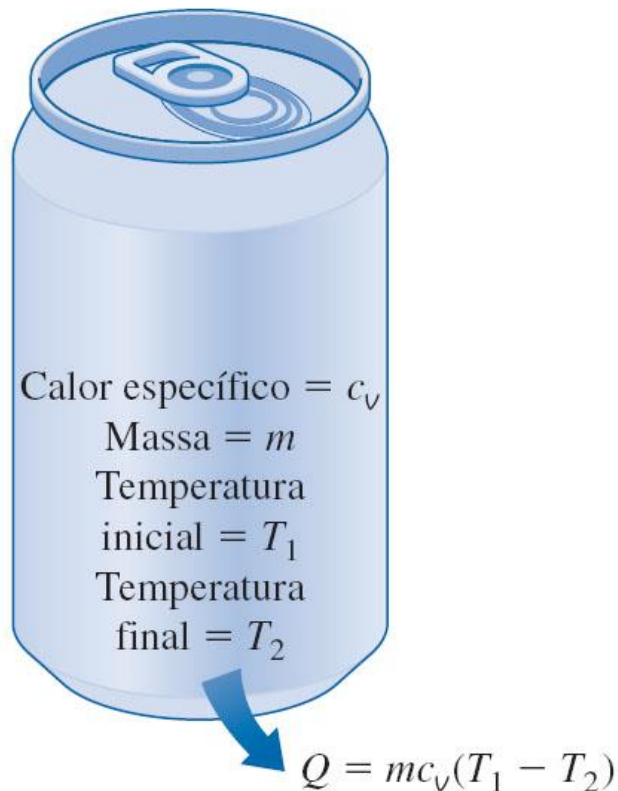
Taxa de energia líquida na saída transferida por calor, trabalho e massa



Nas análises de transferência de calor é conveniente escrever um **balanço de calor** e representar conversões de energia nuclear, química, mecânica e elétrica em energia térmica, como *calor gerado*.

Em processos de regime permanente, a taxa de energia transferida que entra em um sistema é igual à taxa de energia que sai dele.

$$\underbrace{Q_{ent} - Q_{sai}}_{\text{Energia líquida transferida}} + \underbrace{E_{ger}}_{\text{Geração de calor}} = \underbrace{\Delta E_{term, sist}}_{\text{Mudança da energia térmica do sistema}} \quad (J)$$



Na ausência de trabalho, a variação na quantidade de energia de um sistema fechado é igual à quantidade líquida de calor transferido.

Um sistema fechado é um sistema de massa constante;

Na prática a energia total E da maioria dos sistemas consiste em energia interna U .

Especialmente no caso dos sistemas estacionários, uma vez que não sofrem nenhuma mudança em sua velocidade ou elevação durante o processo.

Sistema estacionário fechado:

$$E_{ent} - E_{sai} = \Delta U = mc_v \Delta T \quad (J)$$

Sistema estacionário fechado (trabalho nulo):

$$Q = mc_v \Delta T \quad (J)$$

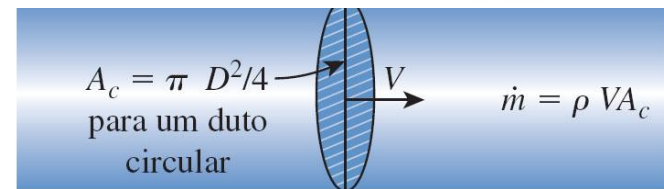
Um grande número de equipamentos de engenharia, como aquecedores de água e radiadores de automóveis, envolve fluxo de massa para dentro e para fora do sistema e são modelados utilizando o conceito de *volume de controle*.

A maioria dos volumes de controle é analisada sob condições de operações estacionárias.

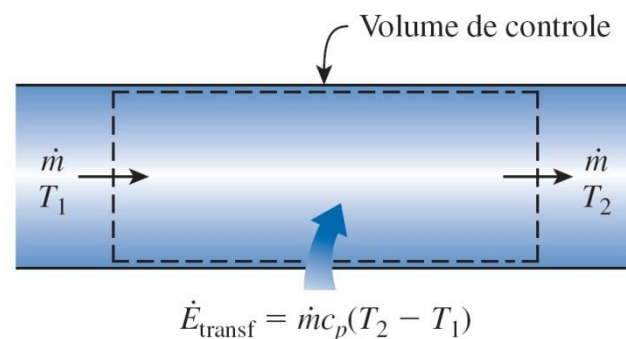
A expressão *regime permanente* significa *invariância no tempo*, em um determinado ponto.

Vazão mássica: a quantidade de massa que flui por meio de uma seção transversal de um dispositivo por unidade de tempo.

Vazão volumétrica: o volume de fluido que escoar por meio de um duto por unidade de tempo.



A vazão mássica de um fluido em uma seção transversal é igual ao produto da massa específica do fluido, à velocidade média do fluido e à área de seção transversal.



Sob condições de regime permanente, a taxa líquida de energia transferida para um fluido em volume de controle é igual à taxa de aumento da energia que escoar por meio do volume de controle.

$$\dot{m} = \rho V A_c \quad (\text{kg/s})$$

$$\dot{V} = V A_c = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad (\text{m}^3/\text{s})$$

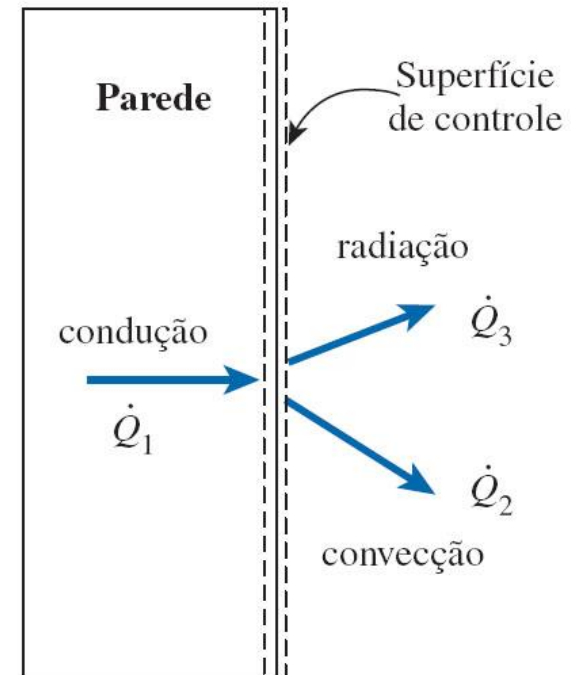
$$\dot{Q} = \dot{m} \Delta h = \dot{m} c_p \Delta T \quad (\text{kJ/s})$$

Uma superfície não contém volume ou massa, portanto não contém energia. Assim, uma superfície pode ser visualizada como um sistema fictício cuja quantidade de energia permanece constante durante um processo.

Balanço de energia na superfície $\dot{E}_{ent} = \dot{E}_{sai}$

Essa relação é válida para ambas as condições, permanente e transiente, e o balanço de energia na superfície não envolve geração de calor, uma vez que superfícies não apresentam volume.

$$\dot{Q}_1 = \dot{Q}_2 + \dot{Q}_3$$



Trocas de energia na superfície externa da parede de uma casa.

Quando as direções de troca não são conhecidas, todas as trocas de energia podem ser assumidas como dirigidas para a superfície, e assim, o balanço de energia na superfície pode ser expresso como $\sum \dot{E}_{ent} = 0$. Observe que as trocas no sentido oposto assumirão valores negativos, balanceando, assim, a equação.

- *Calor* pode ser definido como a forma de energia possível de ser transferida de um sistema para outro como resultado da diferença de temperatura;
- A análise termodinâmica está relacionada com a *quantidade* de transferência de calor como um sistema passa por um processo de um estado de equilíbrio para o outro;
- A ciência que lida com a determinação das *taxas* de tais transferências de energia é a *transferência de calor*;
- A transferência de energia na forma de calor é sempre a partir do meio de maior temperatura para o de menor temperatura e a transferência de calor para quando os dois meios atingirem a mesma temperatura;
- O calor pode ser transferido em três diferentes modos:

Condução

Convecção

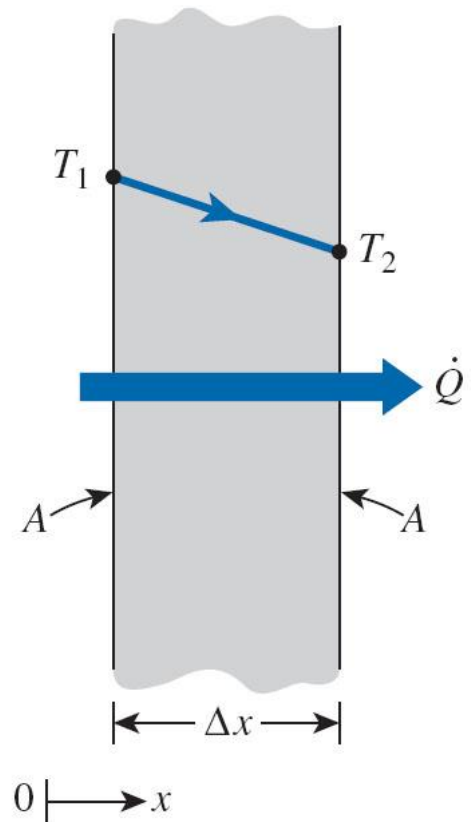
Radiação

- Todos os modos de transferência de calor exigem a existência de uma diferença de temperatura.

- **Condução:** A transferência de energia das partículas mais energéticas de uma substância para as menos energéticas adjacentes, como resultado das interações entre as partículas.
- **Em gases e líquidos** a condução é devido às *colisões* e *difusão* das moléculas durante o seu movimento aleatório.
- **Em sólidos** isso é devido à combinação de *vibrações* das moléculas na rede cristalina e ao transporte de energia através dos *elétrons livres*.
- A taxa de condução de calor através de uma camada plana é proporcional à diferença de temperatura através da camada e a área de transferência de calor, mas é inversamente proporcional à espessura da camada.

Taxa de condução de calor $\propto \frac{(\text{Área})(\text{Diferença de temperatura})}{\text{espessura}}$

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = kA \frac{T_1 - T_2}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad (\text{W})$$



Condução de calor através de uma grande parede plana de espessura Δx e área A .

Quando $x \rightarrow 0$ $\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx}$ Lei de Fourier da condução térmica

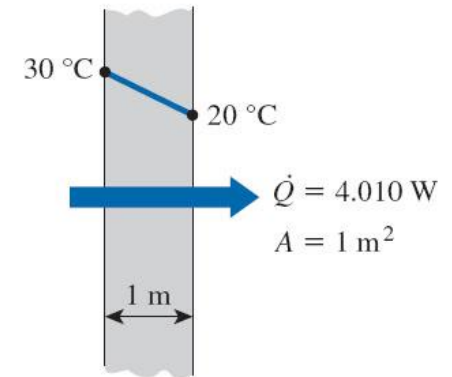
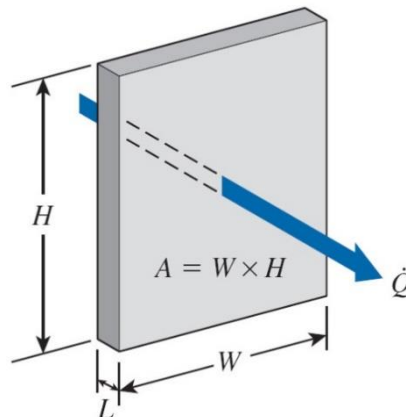
Condutividade térmica, k : A medida da capacidade do material de conduzir calor.

Gradiente de temperatura dT/dx : A inclinação da curva de temperatura no diagrama T - x ;

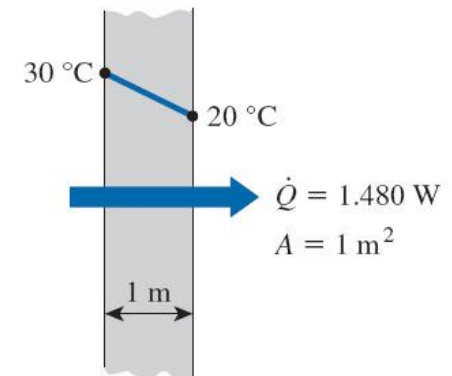
O calor é conduzido no sentido da temperatura decrescente, e o gradiente de temperatura torna-se negativo quando a temperatura decresce com o aumento de x ;

O **sinal negativo** assegura que a transferência de calor no sentido positivo de x seja uma quantidade positiva.

Na análise de condução de calor, A representa a área *normal* à direção da transferência de calor.



(a) Cobre ($k = 401 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)



(b) Silicone ($k = 148 \text{ W/m}\cdot\text{K}$)

A taxa de condução de calor por meio de um sólido é diretamente proporcional à sua condutividade térmica



(Foto do museu Deutches.)

Jean Baptiste Joseph Fourier (1768 - 1830), matemático e físico, nasceu em Auxerre, França;

Conhecido por seu trabalho na série infinita de funções trigonométricas que leva seu nome e pelo desenvolvimento da teoria matemática de condução de calor;

Fourier estabeleceu a equação diferencial parcial que rege a difusão de calor, resolvendo isso pelo uso da série de Fourier;

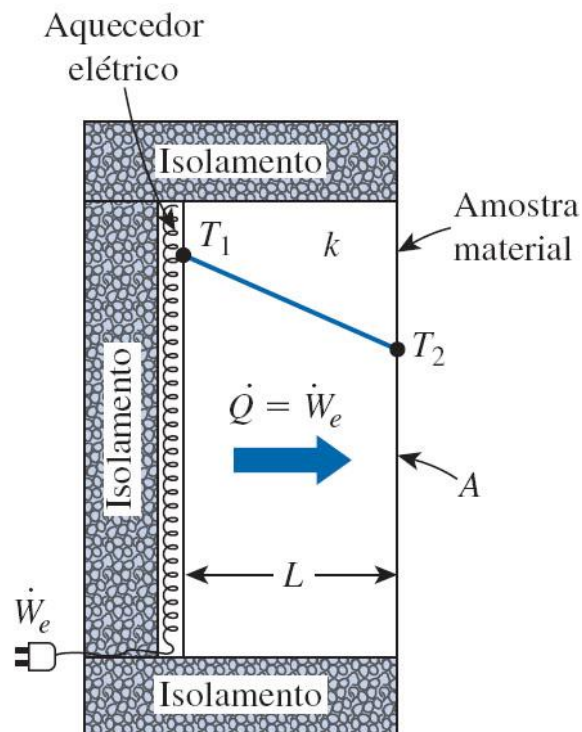
A transformada de Fourier, o número de Fourier e a lei de Fourier sobre condução de calor foram nomeados em sua homenagem;

Credita-se a ele também a descoberta do efeito estufa em 1824.

Condutividade térmica: A taxa de transferência de calor através de uma unidade de espessura do material por unidade de área por unidade de diferença de temperatura.

Condutividade térmica de um material é a medida da capacidade de o material conduzir calor.

Um alto valor de condutividade indica que o material é bom condutor de calor enquanto valor baixo indica que o material é um mau condutor de calor ou *isolante térmico*.



$$k = \frac{L}{A(T_1 - T_2)} \dot{Q}$$

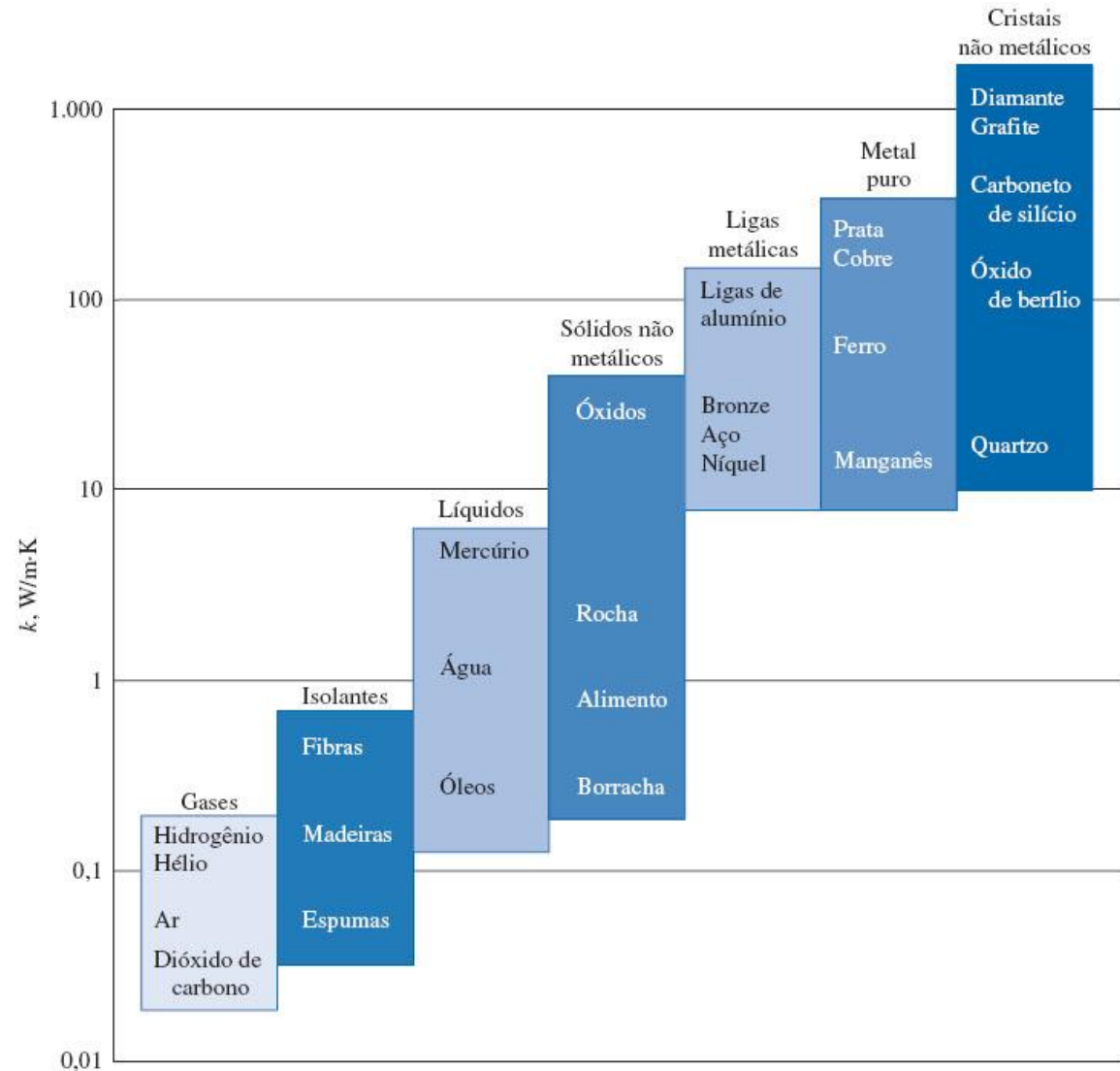
Um arranjo experimental simples para determinar a condutividade de um material.

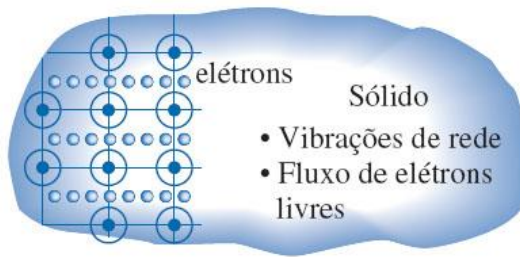
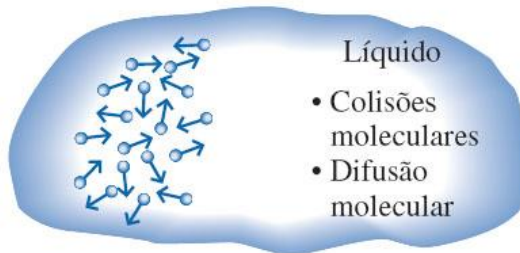
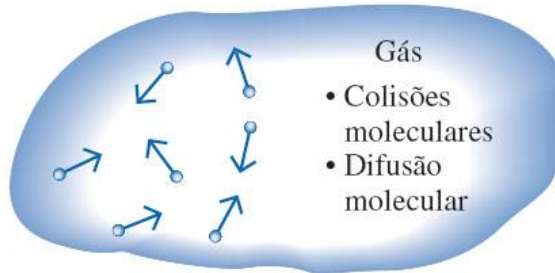
TABELA 1-1

Condutividade térmica de alguns materiais em temperatura ambiente

Material	k , W/m.K
Diamante	2.300
Prata	429
Cobre	401
Ouro	317
Alumínio	237
Ferro	80,2
Mercúrio (l)	8,54
Vidro	0,78
Tijolo	0,72
Água (l)	0,607
Pele humana	0,37
Madeira (carvalho)	0,17
Hélio (g)	0,152
Borracha macia	0,13
Fibra de vidro	0,043
Ar (g)	0,026
Uretano, espuma rígida	0,026

Faixa de condutividade térmica de diversos materiais em temperatura ambiente.





Mecanismos de condução de calor em diferentes fases de uma substância.

A condutividade térmica de gases como o ar pode variar um fator de 10^4 em relação aos metais puros, como o cobre.

Os cristais e os metais puros têm os maiores valores de condutividade térmica, enquanto que os gases e materiais isolantes têm os menores.

TABELA 1-2

A condutividade térmica de uma liga é normalmente muito menor que as condutividades térmicas de cada metal dos quais ela é composta

Metal puro ou liga	k , W/m·K, a 300 K
Cobre	401
Níquel	91
<i>Constantan</i> (55% Cu, 45% Ni)	23
Cobre	401
Alumínio	237
<i>Bronze comercial</i> (90% Cu, 10% Al)	52

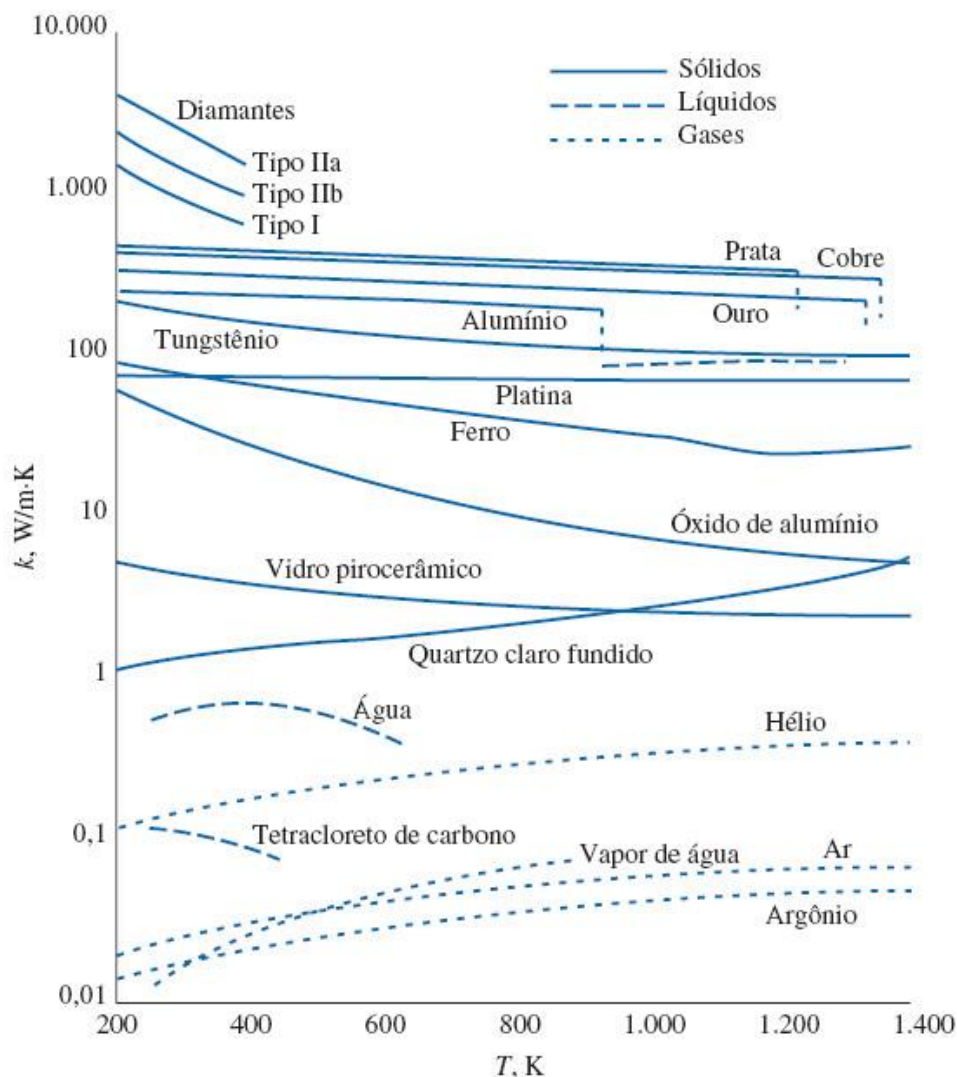


TABELA 1-3

A condutividade térmica dos materiais varia com a temperatura

T , K	k , W/m·K	
	Cobre	Alumínio
100	482	302
200	413	237
300	401	237
400	393	240
600	379	231
800	366	218

A variação da condutividade térmica de vários sólidos, líquidos e gases com a temperatura.

c_p Calor específico, $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$: Capacidade de armazenamento de calor de um material por unidade de massa;

ρc_p Capacidade térmica, $\text{J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$: Capacidade de armazenamento de calor por unidade de volume;

α Difusividade térmica, m^2/s : Representa a velocidade com que o calor se difunde através de um material:

$$\alpha = \frac{\text{Condução de calor}}{\text{Armazenamento de calor}} = \frac{k}{\rho c_p} \quad (\text{m}^2/\text{s})$$

Um material com alta condutividade térmica (k) ou baixa capacidade térmica (ρc_p) terá obviamente grande difusividade térmica;

Quanto maior a difusividade térmica, mais rápido será a propagação do calor no meio.

Um pequeno valor de difusividade térmica indica que a maior parte do calor é absorvida pelo material e uma pequena quantidade de calor é conduzida adiante.

TABELA 1–4

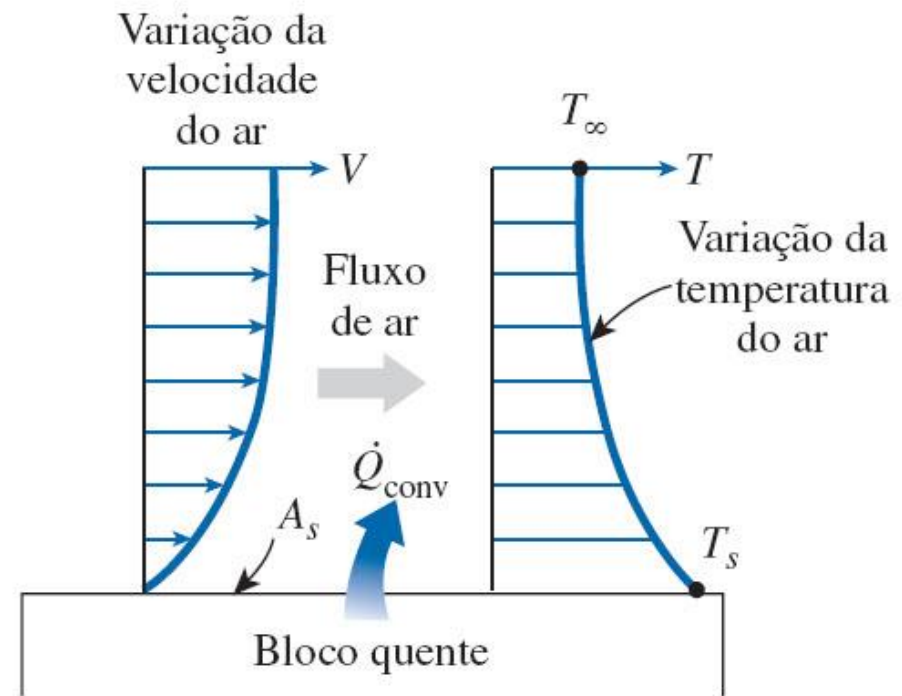
Difusividade térmica de alguns materiais em temperatura ambiente

Material	α , m^2/s
Prata	149×10^{-6}
Ouro	127×10^{-6}
Cobre	113×10^{-6}
Alumínio	$97,5 \times 10^{-6}$
Ferro	$22,8 \times 10^{-6}$
Mercúrio (ℓ)	$4,7 \times 10^{-6}$
Mármore	$1,2 \times 10^{-6}$
Gelo	$1,2 \times 10^{-6}$
Concreto	$0,75 \times 10^{-6}$
Tijolo	$0,52 \times 10^{-6}$
Solo denso (seco)	$0,52 \times 10^{-6}$
Vidro	$0,34 \times 10^{-6}$
Lã de vidro	$0,23 \times 10^{-6}$
Água (ℓ)	$0,14 \times 10^{-6}$
Bife	$0,14 \times 10^{-6}$
Madeira (carvalho)	$0,13 \times 10^{-6}$

Convecção: O modo de transferência de energia entre a superfície sólida e o líquido ou gás adjacente, que está em movimento e que envolve os efeitos combinados de *condução* e de *movimento de um fluido*.

Quanto mais rápido for o movimento do fluido, maior será a transferência de calor por convecção;

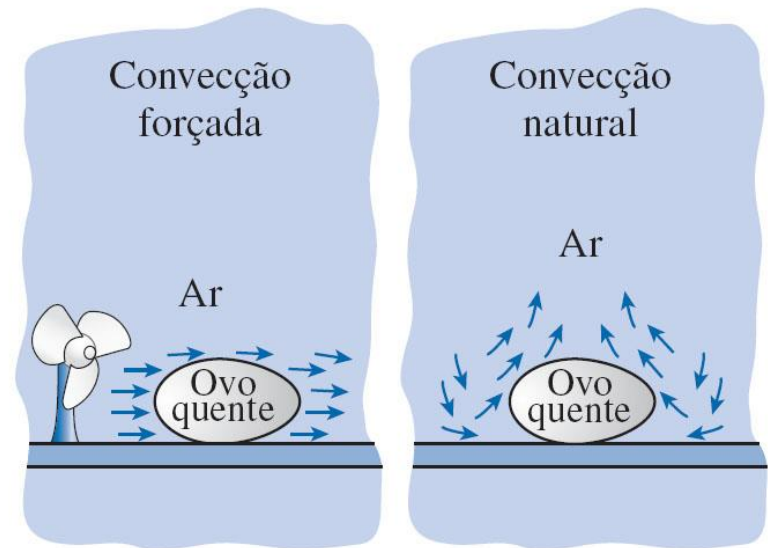
Na ausência de qualquer movimento da massa de fluido, a transferência de calor entre a superfície sólida e o fluido adjacente se dá por condução.



Transferência de calor de uma superfície quente para o ar por convecção.

Convecção forçada: Se o fluido é forçado a escoar sobre a superfície por meios externos, como ventilador, bomba ou vento.

Convecção natural (ou livre): Se o movimento do fluido é causado por forças de flutuação induzidas pela diferença de massa específica, decorrentes da variação da temperatura no fluido.



O resfriamento de um ovo quente por convecção forçada e natural.

Processos de transferência de calor que envolvem **mudança de fase** de fluido também são considerados convecção por causa do movimento induzido durante o processo, como subida de bolhas de vapor durante a ebulição ou queda de gotículas de líquido durante a condensação (**ou injeção de combustível**).

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{W}) \quad \text{Lei de Newton do resfriamento}$$

h coeficiente de transferência de calor por convecção, $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$;
 A_s área da superfície por meio da qual a transferência de calor ocorre;
 T_s temperatura da superfície;
 T_{∞} temperatura do fluido suficientemente longe da superfície.

O coeficiente de transferência de calor por convecção h não é uma propriedade do fluido.

Trata-se de um parâmetro determinado experimentalmente, cujo valor depende de todas as variáveis que influenciam a convecção:

- geometria da superfície
- natureza do movimento do fluido
- propriedades do fluido
- velocidade da massa de fluido

TABELA 1-5

Valores típicos do coeficiente de transferência de calor por convecção

Tipo de convecção	h , $\text{W/m}^2 \cdot \text{K}$
Convecção livre de gases	2-25
Convecção livre de líquidos	10-1.000
Convecção forçada de gases	25-250
Convecção forçada de líquidos	50-20.000
Ebulição e condensação	2.500-100.000



(© Pixtal/age Fotostock RF.)

O matemático. Físico e astrônomo **Issac Newton** (1642 - 1727), nasceu em Lincolnshire, Inglaterra;

Considerado um dos maiores cientistas e matemáticos da história;

Suas contribuições para a matemática incluem o teorema binomial do cálculo diferencial e integral;

Conhecido como pai da mecânica clássica por ter concebido a lei da gravidade e as três leis fundamentais que levam seu nome;

Credita-se a ele também a descoberta da natureza composta da luz branca e da separação de cores diferentes por um prisma;

A lei de resfriamento, que rege a taxa de transferência de calor a partir de uma superfície mais quente para um fluido circundante mais frio, é também atribuída a Newton.

- **Radiação:** A energia emitida pela matéria sob a forma de *ondas eletromagnéticas* (ou *fótons*) como resultado das mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas;
- Ao contrário da condução e da convecção, a transferência de calor por radiação não exige a presença de um *meio interveniente*;
- De fato, a transferência de calor por radiação é mais rápida (na velocidade da luz) e não sofre atenuação no vácuo. Essa é a forma como a energia do Sol atinge a Terra;
- Em estudos de transferência de calor estamos interessados em *radiação térmica*, que é a forma de radiação emitida pelos corpos por causa de sua temperatura;
- **Todos os corpos a uma temperatura superior ao zero absoluto emitem radiação térmica;**
- Radiação é um *fenômeno volumétrico*, e todos os sólidos, líquidos e gases emitem, absorvem ou transmitem radiação em diferentes graus;
- No entanto, a radiação é geralmente considerada um *fenômeno superficial* para sólidos opacos à radiação térmica, como metais, madeira e rochas, uma vez que a radiação emitida pelas regiões do interior desses materiais não pode nunca chegar à superfície, e a radiação incidente sobre esses corpos normalmente é absorvida por alguns microns a partir da superfície .

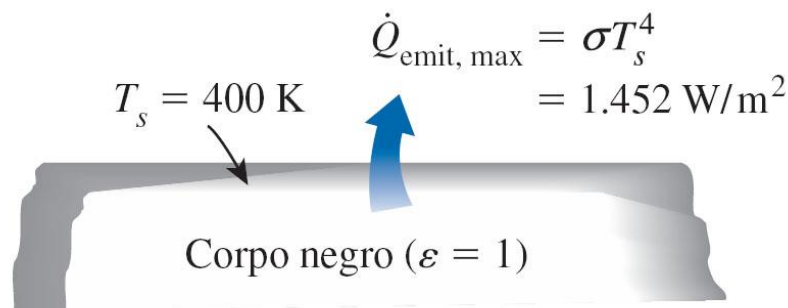
$$\dot{Q}_{\text{emit, max}} = \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad \text{Lei de Stefan-Boltzmann}$$

$$\sigma = 5,670 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4 \quad \text{Constante de Stefan-Boltzmann}$$

Corpo negro: A superfície idealizada que emite a máxima taxa de radiação

$$\dot{Q}_{\text{emit}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad \text{Radiação emitida por superfícies reais}$$

Emissividade ε : A medida de quanto uma superfície aproxima-se do comportamento de um corpo negro, para o qual $\varepsilon = 1$. $0 \leq \varepsilon \leq 1$.



A radiação de um corpo negro representa a quantidade máxima de *radiação que pode ser emitida por uma superfície em uma determinada temperatura.*

TABELA 1-6

Emissividades de alguns materiais a 300 K

Material	Emissividade
Alumínio em folhas	0,07
Alumínio anodizado	0,82
Cobre polido	0,03
Ouro polido	0,03
Prata polida	0,02
Aço inoxidável polido	0,17
Pintura preta	0,98
Pintura branca	0,90
Papel branco	0,92-0,97
Pavimento asfáltico	0,85-0,93
Tijolo vermelho	0,93-0,96
Pele humana	0,95
Madeira	0,82-0,92
Terra	0,93-0,96
Água	0,96
Vegetação	0,92-0,96

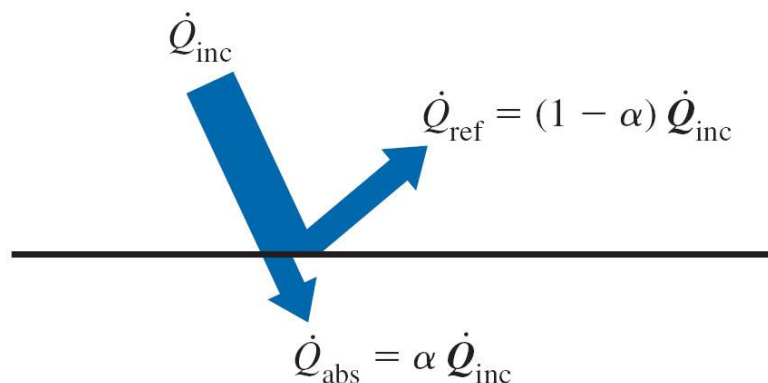
Absortividade α : A fração de energia de radiação incidente sobre uma superfície que é por ela absorvida. $0 \leq \alpha \leq 1$

Um corpo negro absorve toda a radiação incidente sobre ele ($\alpha = 1$).

Um corpo negro é um perfeito absorvedor e um perfeito emissor de radiação.

Lei de Kirchhoff: A emissividade e a absortividade de uma superfície a uma dada temperatura e comprimento de onda são iguais.

$$\dot{Q}_{\text{absorbed}} = \alpha \dot{Q}_{\text{incident}} \quad (\text{W})$$



Absorção de radiação incidente sobre uma superfície opaca de absortividade α .

Transferência de calor líquida por radiação: A diferença entre as taxas de radiação emitida pela superfície e a de radiação absorvida.

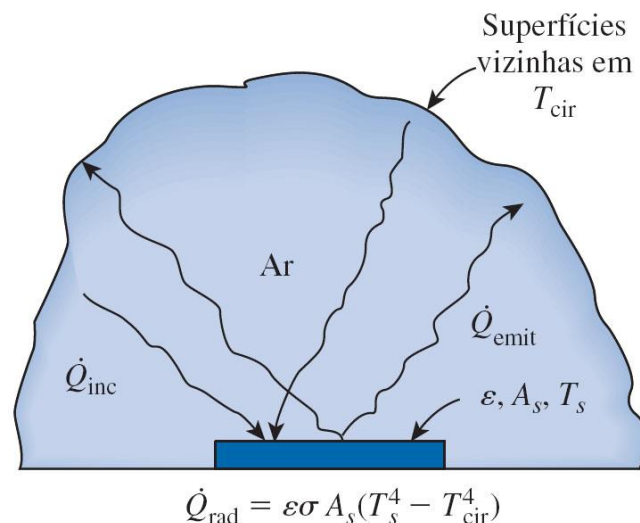
A determinação da taxa líquida de transferência de calor por radiação entre duas superfícies é uma questão complicada, uma vez que depende de:

- Propriedades da superfície
- Das orientações de uma em relação à outra;
- Interação no meio entre as superfícies com radiação;

Radiação normalmente é significativa em relação à condução ou à convecção natural, mas insignificante em relação à convecção forçada.

Quando uma superfície de emissividade ε e área superficial A_s a uma temperatura termodinâmica T_s é *completamente delimitada* por uma superfície muito maior (ou preta) a temperatura termodinâmica T_{circ} separadas por um gás (como o ar) que não intervém na radiação, a taxa líquida de transferência de calor por radiação entre essas duas superfícies é dada por:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{circ}}^4) \quad (\text{W})$$



Transferência de calor por radiação entre uma superfície e superfícies vizinhas.

Quando a radiação e a convecção ocorrem simultaneamente entre uma superfície e um gás:

$$\dot{Q}_{\text{total}} = h_{\text{combinado}} A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{W})$$

Coeficiente combinado de transferência de calor $h_{\text{combinado}}$, inclui tanto os efeitos da radiação quanto os efeitos da convecção.

$$\dot{Q}_{\text{total}} = \dot{Q}_{\text{conv}} + \dot{Q}_{\text{rad}} = h_{\text{conv}} A_s (T_s - T_{\text{circ}}) + \varepsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{\text{circ}}^4)$$

$$\dot{Q}_{\text{total}} = h_{\text{combinado}} A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{W})$$

$$h_{\text{combinado}} = h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}} = h_{\text{conv}} + \varepsilon \sigma (T_s - T_{\text{circ}}) (T_s^2 + T_{\text{circ}}^2)$$

A transferência de calor é apenas por condução em *sólidos opacos*, mas por condução e radiação em *sólidos semitransparentes*.

Um sólido pode envolver condução e radiação, mas não convecção.

No entanto, um sólido pode apresentar transferência de calor por convecção e/ou radiação em suas superfícies expostas a um fluido ou a outras superfícies.

A transferência de calor ocorre por condução e, possivelmente, por radiação em um *fluido em repouso* (sem movimento de massa de fluido) e por convecção e radiação em um fluido escoando.

Na ausência de radiação, a transferência de calor através de um fluido ocorre por condução ou convecção, o que dependerá da presença de qualquer movimento de massa do fluido.

Convecção = Condução + movimento da massa de fluido

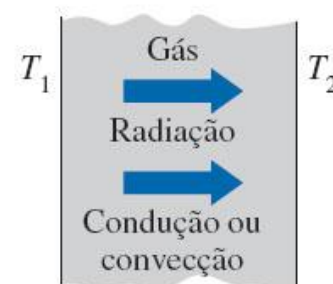
Transferência de calor através do *vácuo* só ocorre por radiação.

A maioria dos gases entre duas superfícies sólidas não interferem com a radiação (Exceção Ozônio que absorve radiação ultravioleta).

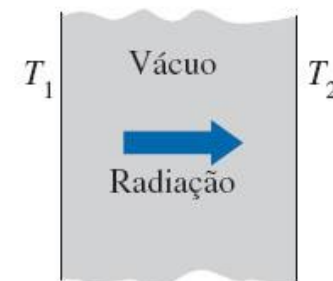
Os líquidos são, em geral, fortes absorvedores de radiação.



1 modo



2 modos



1 modo

Embora existam três mecanismos de transferência de calor, um meio pode envolver apenas dois deles simultaneamente.

- Termodinâmica e transferência de calor
 - Áreas de aplicação de transferência de calor
 - Contexto histórico
- Transferência de calor na engenharia
 - Modelagem na engenharia
- Calor e outras formas de energia
 - Calor específico de um gás, líquido e sólido
 - Transferência de energia
- Primeira lei da termodinâmica
 - Balanço de energia para sistemas fechados (Massa constante)
 - Balanço de energia para sistemas de escoamento em regime permanente
 - Balanço de energia em superfícies

- Mecanismos de transferência de calor:
 - Condução
 - Lei de Fourier da condução térmica
 - Condutividade térmica
 - Difusividade térmica
 - Convecção
 - Lei de Newton do resfriamento
 - Radiação
 - Lei de Stefan-Boltzmann
- Mecanismos simultâneos de transferência de calor