



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
Escola de Engenharia de Lorena – EEL

ENGENHARIA DE MATERIAIS

Fenômenos de Transporte em Engenharia de Materiais (Transferência de Calor e Massa)

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 1

INTRODUÇÃO

DEFINIÇÃO DE CALOR; CONDUTIVIDADE TÉRMICA
DIFUSIVIDADE TÉRMICA; MECANISMOS FUNDAMENTAIS



CALOR (Q):

Forma de energia que se propaga de um corpo para outro ou mesmo partes de um mesmo corpo por diferença de temperatura.

Unidade de calor: Joule (J)

TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

Ciência que estuda as leis e princípios que regem a propagação de calor.



TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

A transferência de calor estuda a transferência de energia entre dois corpos que ocorre devido a uma diferença de temperatura, determinando quanta energia é transferida e em que taxa esta energia é transferida.

MAS O QUE É A TRANSFERÊNCIA DE CALOR? E COMO SE PROCESSA?

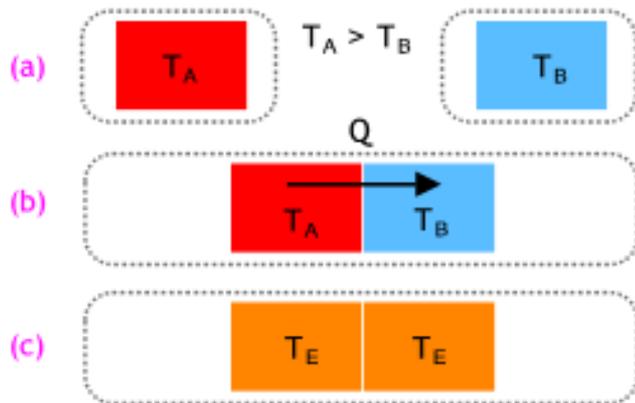
A transferência de calor é a energia em trânsito, devido a uma diferença de temperatura. E sempre que existir esta diferença de temperatura em um meio ou entre meios ocorrerá transferência de calor.



UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO

Escola de Engenharia de Lorena – EEL

Por exemplo, se dois corpos a diferentes temperaturas são colocados em contato, ocorrerá uma transferência de calor do corpo de temperatura mais elevada para o corpo de menor temperatura, até que haja equivalência de temperatura entre eles, ou seja, o equilíbrio térmico.



A transferência de calor cessa quando não existe mais uma diferença de temperatura.



RELAÇÃO ENTRE A TERMODINÂMICA E A TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

A Termodinâmica trata da relação entre o calor e as outras formas de energia. A energia pode ser transferida através de interações entre o sistema e suas vizinhanças. Estas interações são denominadas calor (Q) e trabalho (W).

CALOR = energia transferida para ou de um sistema, unicamente por diferença de temperatura.

- A 1ª Lei da Termodinâmica governa quantitativamente estas interações:

$$\Delta U = U_2 - U_1 = Q - W$$



Ou seja, a variação da energia interna de um sistema é igual à diferença entre o calor transferido para o sistema e o trabalho executado pelo sistema.



RELAÇÃO ENTRE A TERMODINÂMICA E A TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

- A 1ª Lei da Termodinâmica pode ser enunciada assim: "A variação líquida de energia de um sistema é sempre igual a transferência líquida de energia na forma de calor e trabalho".
- A 2ª Lei da Termodinâmica pode ser enunciada assim: "É impossível o processo cujo único resultado seja a transferência líquida de calor de uma região fria para uma região quente".

Porém, existe uma diferença fundamental entre a transferência de calor e a termodinâmica. Embora a termodinâmica trate das interações do calor e o papel que ele desempenha na primeira e na segunda leis, ela não leva em conta nem o mecanismo de transferência nem os métodos de cálculo da **taxa de transferência de calor**.



RELAÇÃO ENTRE A TERMODINÂMICA E A TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

A termodinâmica trata com estados de equilíbrio da matéria onde inexistem gradientes de temperatura. Embora a termodinâmica possa ser usada para determinar a quantidade de energia requerida na forma de calor para um sistema passar de um estado de equilíbrio para outro, ela não pode quantificar a **taxa** (velocidade) na qual a transferência do calor ocorre.

A disciplina de transferência de calor procura fazer aquilo o que a termodinâmica é inerentemente incapaz de fazer.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Diferentes materiais armazenam calor de modo distinto, e definimos a propriedade **calor específico** c_p como a medida da capacidade do material de armazenar energia térmica. Por exemplo, $c_p = 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ para a água e $c_p = 0,45 \text{ kJ/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ para o ferro em temperatura ambiente, o que indica que a água pode armazenar quase 10 vezes mais energia do que o ferro por unidade de massa.

Da mesma forma, a **condutividade térmica** k é a medida da capacidade de um dado material conduzir calor. Por exemplo, $k = 0,607 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ para a água e $k = 80,2 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ para o ferro em temperatura ambiente, o que significa que o ferro conduz calor cem vezes mais rápido do que a água.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Logo, dizemos que a água é um pobre condutor de calor em relação ao ferro, entretanto a água é um excelente meio para armazenar energia térmica.

A equação para a taxa de transferência de calor por condução sob condições permanentes também pode ser visualizada como uma equação que define a condutibilidade térmica.

$$q = k.A. \frac{T_1 - T_2}{x_2 - x_1}$$



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Assim, a **condutividade térmica** de um dado material pode ser definida como *a taxa de transferência de calor através de uma unidade de comprimento de dado material por unidade de área por unidade de diferença de temperatura.*

A condutividade térmica de um material é a medida da capacidade do material conduzir calor. Um alto valor de condutividade indica que o material é bom condutor de calor, enquanto um valor baixo indica que o material é um mal condutor de calor ou um isolante. As condutividades térmicas, em temperatura ambiente, de alguns materiais comuns, são dadas na Tabela 1-1.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Por exemplo, a condutividade térmica do cobre, em temperatura ambiente, é $k = 401 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$, o que indica que uma parede de cobre de 1 m de espessura deverá conduzir calor na taxa de 401 W por m^2 de área por $^\circ\text{C}$ de diferença de temperatura através da parede. Perceba que materiais como cobre e prata são bons condutores elétricos e também bons condutores de calor, tendo altos valores de condutividade térmica. Materiais como borracha, madeira e isopor são maus condutores de calor, logo possuem valores menores de condutividade.

TABELA 1-1

Condutividade térmica de alguns materiais em temperatura ambiente

Material	$k, \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}^*$
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

*Multiplicar por 0,5778 para converter para $\text{Btu/h} \cdot \text{pé} \cdot ^\circ\text{F}$.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

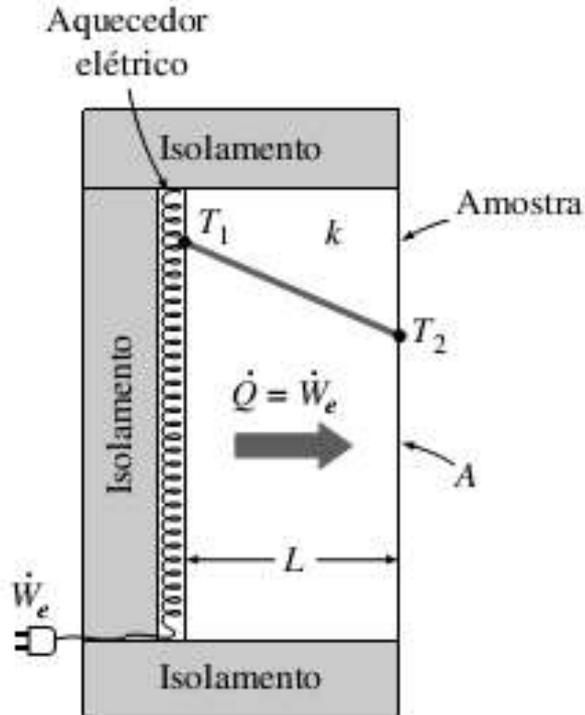
CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Uma camada de material de espessura e área conhecidas pode ser aquecida em um dos lados por um aquecedor de resistência elétrica de comportamento conhecido. Se a outra face do aquecedor for apropriadamente isolada, todo o calor liberado pela resistência será transferido para o material como um todo, cuja condutividade deve ser determinada. Assim, medindo a temperatura das duas superfícies do material quando a transferência de calor em regime permanente é atingida e substituindo na equação para a taxa de transferência de calor por condução, juntamente com outras quantidades conhecidas, obtemos a condutividade térmica (Figura a seguir).



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):



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

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



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

A condutividade térmica dos materiais varia ao longo de uma ampla faixa, como ilustra a figura a seguir. A condutividade térmica de gases como o ar pode variar por um fator de 10^4 em relação aos metais puros, como o cobre. Observe que cristais puros e metais possuem os maiores valores de condutividade térmica, enquanto gases e materiais isolantes possuem os menores.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

A temperatura é uma medida da energia cinética de partículas como moléculas ou átomos de uma substância. Em líquidos ou gases, a energia cinética das moléculas é devida ao seu movimento translacional aleatório, assim como seu movimento rotacional e vibracional. Quando duas moléculas detentoras de energias cinéticas distintas colidem, parte da energia cinética da partícula mais energética (maior temperatura) é transferida para a menos energética (menor temperatura), semelhante à colisão de duas bolas elásticas de mesma massa, mas com velocidades diferentes, quando parte da energia cinética da mais veloz é transferida para a outra menos veloz. Quanto maior a temperatura, mais rápido é o movimento das moléculas e maior o número de colisões e, assim, melhor é a transferência de calor.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

A teoria cinética dos gases prediz, e os experimentos confirmam, que a condutividade térmica dos gases é proporcional à raiz quadrada da temperatura termodinâmica T_e inversamente proporcional à raiz quadrada da massa molar M .

Dessa forma, a condutividade térmica de um gás aumenta com a temperatura e diminui com a massa molar. Assim, não é surpreendente que a condutividade térmica do hélio ($M = 4$) seja muito maior que a do ar ($M = 29$) e a do argônio ($M = 40$).



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

As condutividades térmicas de gases na pressão de 1 atm são listadas em tabelas. Todavia, tais valores também podem ser utilizados em outras pressões, uma vez que a condutividade térmica dos gases é independente da pressão em um grande intervalo de pressões encontradas na prática.

O mecanismo da condução do calor em um líquido é complicado pelo fato da maior proximidade das moléculas, o que permite um forte campo de força intermolecular. As condutividades térmicas de líquidos normalmente estão no intervalo entre os valores de líquidos e gases. A condutividade térmica de uma substância é normalmente maior na fase sólida e menor na fase gasosa.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Diferentemente dos gases, a condutividade térmica da maioria dos líquidos decresce com o aumento da temperatura, com a água sendo uma notável exceção. Como os gases, a condutividade térmica dos líquidos decresce com o aumento da massa molar.

Metais líquidos como o mercúrio e o sódio possuem alto valor de condutividade e são bastante adequados para o uso em aplicações onde uma alta taxa de transferência de calor para um líquido é desejada, como em usinas nucleares.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

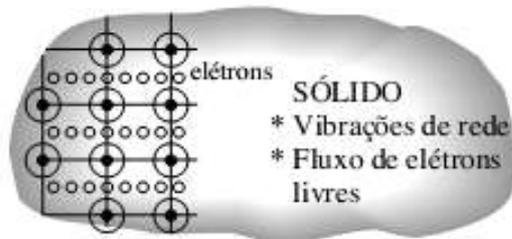
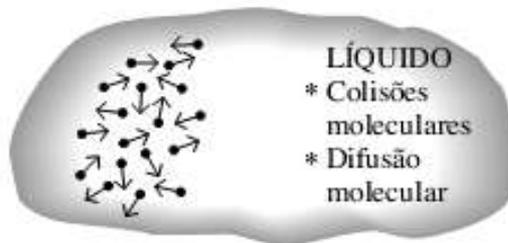
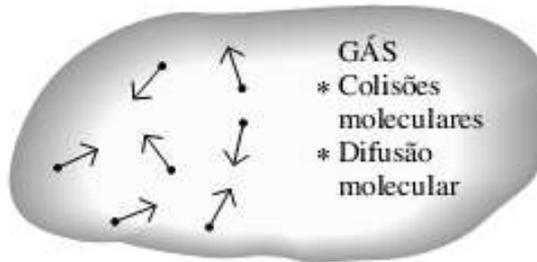
CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Nos sólidos, a condução de calor é devida a dois efeitos: as ondas de vibração de rede motivadas pelos movimentos vibracionais das moléculas arranjadas em posições relativamente fixas, de forma periódica, constituindo uma rede, e a energia transportada através do movimento livre dos elétrons presentes nos sólidos (figura a seguir). A condutividade térmica de sólidos é determinada pela soma da componente de rede e da componente eletrônica. A relativamente alta condutividade térmica de metais puros é principalmente devida à componente eletrônica. A componente da rede da condutividade térmica depende fortemente de como as moléculas são arranjadas. Por exemplo, o diamante, que é um sólido cristalino altamente ordenado, possui o maior valor conhecido de condutividade térmica na temperatura ambiente.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):



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



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Diferentemente dos metais, que são bons condutores de calor e eletricidade, sólidos cristalinos como o diamante e semicondutores como o silício são bons condutores de calor, mas pobres condutores de eletricidade. Como resultado, tais materiais encontram uma ampla aplicação na indústria eletrônica.

Apesar de seu alto custo, diamantes são utilizados como dissipadores de calor de dispositivos eletrônicos sensíveis devido à sua excelente condutividade térmica. Óleo e juntas de silício são comumente utilizados na montagem de componentes eletrônicos, uma vez que ambos apresentam bom contato térmico e bom isolamento elétrico.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Metais puros têm condutividades térmicas elevadas e poderíamos pensar que ligas metálicas também deveriam ter altas condutividades. Seria de se esperar que uma liga feita de dois metais com condutividades térmicas k_1 e k_2 tivessem condutividade k entre k_1 e k_2 . Mas esse não é o caso.

A condutividade térmica de uma liga de dois metais é normalmente muito menor do que a de cada metal, como mostrado na Tabela 1-2.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

Mesmo pequenas quantidades de moléculas estranhas em metais puros, que são bons condutores, podem prejudicar seriamente a transferência de calor no metal.

Por exemplo, a condutividade térmica de aço contendo apenas 1% de cromo é de 62 W/m · °C, enquanto as condutividades térmicas do ferro e do cromo são 83 e 95 W/m · °C, respectivamente.

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 · °C, 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



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

As condutividades térmicas dos materiais variam com a temperatura (Tabela 1–3).

A variação de condutividade térmica ao longo de certos intervalos de temperatura é insignificante para alguns materiais, mas significativa para outros, como mostrado na figura a seguir.

TABELA 1–3

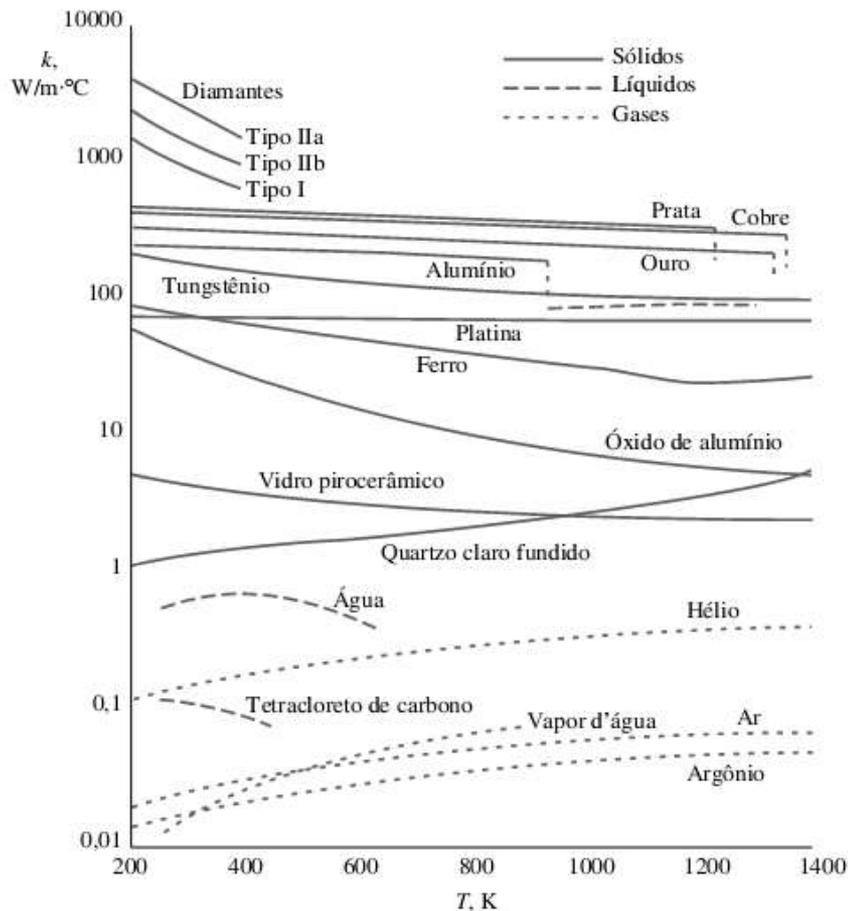
A condutividade térmica dos materiais varia com a temperatura

T, K	$k, W/m \cdot ^\circ C$	
	Cobre	Alumínio
100	482	302
200	413	237
300	401	237
400	393	240
600	379	231
800	366	218



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):



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



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

As condutividades térmicas de certos sólidos exibem um aumento dramático para temperaturas próximas de zero absoluto, quando estes se tornarem sólidos supercondutores. Por exemplo, a condutividade do cobre atinge um valor máximo de cerca de $20000 \text{ W/m} \cdot ^\circ\text{C}$ a 20 K, que é de cerca de 50 vezes a condutividade à temperatura ambiente. As condutividades térmicas e outras propriedades térmicas de vários materiais são indicadas nas tabelas A-3 até A-16. ***Essas tabelas serão disponibilizadas via e-mail.***



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

CONDUTIVIDADE TÉRMICA (k):

A dependência da condutividade térmica sobre a temperatura não provoca uma complexidade considerável na análise da condução. Por isso, é comum avaliar a condutividade térmica k na temperatura média e tratá-la como uma constante nos cálculos.

Na análise da transferência de calor, um material é geralmente considerado isotrópico, isto é, com propriedades uniformes em todas as direções. Essa hipótese é realista para a maioria dos materiais, exceto aqueles que apresentam características estruturais diferentes em direções diferentes, tais como materiais compostos laminados e madeira. A condutividade térmica da madeira normal à fibra, por exemplo, é diferente do que a paralela à fibra.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α):

O produto ρc_p , que é frequentemente encontrado na análise da transferência de calor, é chamado de **capacidade térmica** de um material. Tanto o calor específico c_p quanto a capacidade térmica ρc_p representam a capacidade de armazenamento de calor de um material. Mas c_p representa isso por unidade de massa enquanto ρc_p por unidade de volume, como pode ser notado a partir de suas unidades $\text{J/kg} \cdot ^\circ\text{C}$ e $\text{J/m}^3 \cdot ^\circ\text{C}$, respectivamente.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α):

Outra propriedade de um material que aparece na análise da condução de calor transiente é a **difusividade térmica**, que representa a velocidade com que o calor se difunde através de um material e é definida como:

$$\alpha = \frac{\text{calor}_{\text{conduzido}}}{\text{calor}_{\text{armazenado}}} = \frac{k}{\rho c_p}$$



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α):

Note que a condutividade térmica k representa quanto um material conduz bem o calor, e a capacidade térmica ρc_p representa quanta energia um material pode armazenar por unidade de volume.

Por isso, a difusividade térmica de um material pode ser entendida como a razão entre o *calor conduzido* através do material e o *calor armazenado* por unidade de volume.

Um material que tenha uma alta condutividade térmica ou uma baixa capacidade térmica terá obviamente uma grande difusividade térmica.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α):

Quanto maior for a difusividade térmica, mais rapidamente será a propagação de calor no meio.

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



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

DIFUSIVIDADE TÉRMICA (α):

As difusividades térmicas de alguns materiais comuns, a 20 °C, são apresentadas na Tabela 1–4. Note que a difusividade térmica varia de $\alpha = 0,14 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, para a água, a $149 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, para a prata, que é uma diferença de mais de mil vezes. Observe também que as difusividades térmicas da carne bovina e da água são as mesmas. Isso não é surpreendente, uma vez que a carne, assim como os vegetais e as frutas frescas, são constituídos principalmente de água, e, portanto, possuem as mesmas propriedades térmicas da água.

TABELA 1–4

A difusividade térmica de alguns materiais na temperatura ambiente

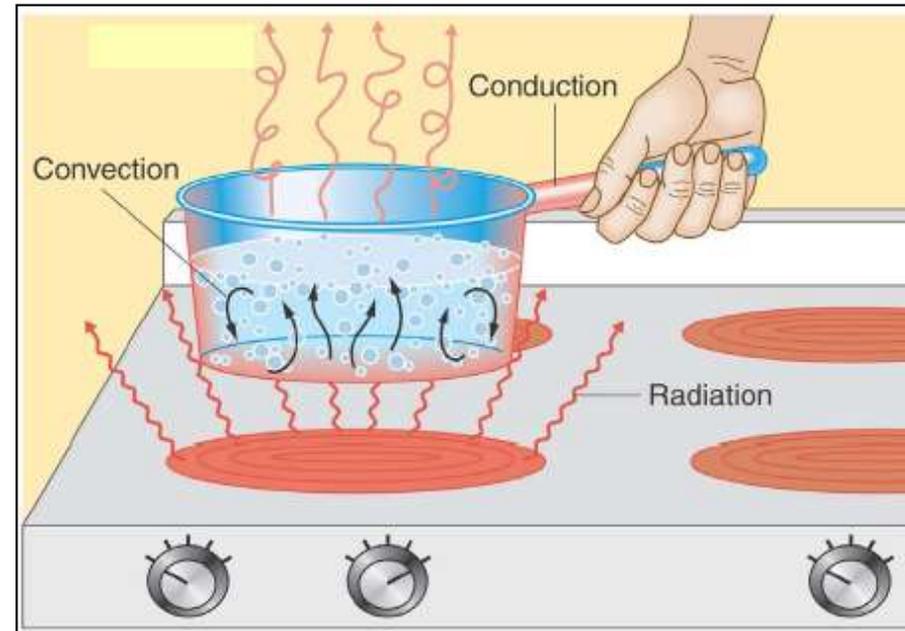
Material	α , m^2/s^*
Prata	149×10^{-6}
Ouro	127×10^{-6}
Cobre	113×10^{-6}
Alumínio	$97,5 \times 10^{-6}$
Ferro	$22,8 \times 10^{-6}$
Mercúrio	$4,7 \times 10^{-6}$
Mármore	$1,2 \times 10^{-6}$
Gelo	$1,2 \times 10^{-6}$
Concreto	$0,75 \times 10^{-6}$
Tijolo	$0,52 \times 10^{-6}$
Solo denso (seco)	$0,52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

* Multiplicar por 10,76 para converter para pé²/s.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

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





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.

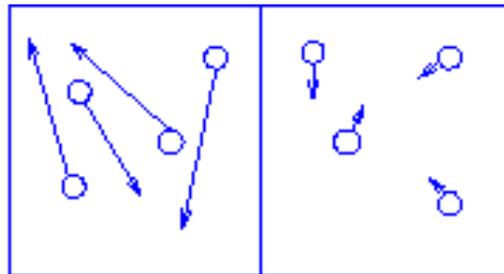
O fluxo de calor por condução ocorre via as colisões entre átomos e moléculas de uma substância e a transferência de energia cinética.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

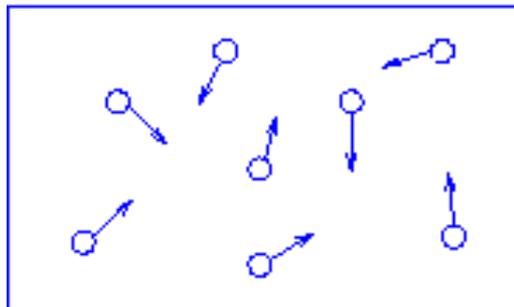
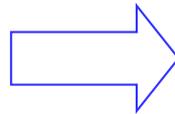
A) CONDUÇÃO

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

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

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

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



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:

$$q = h \cdot A \cdot (T_p - T_\infty)$$

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.

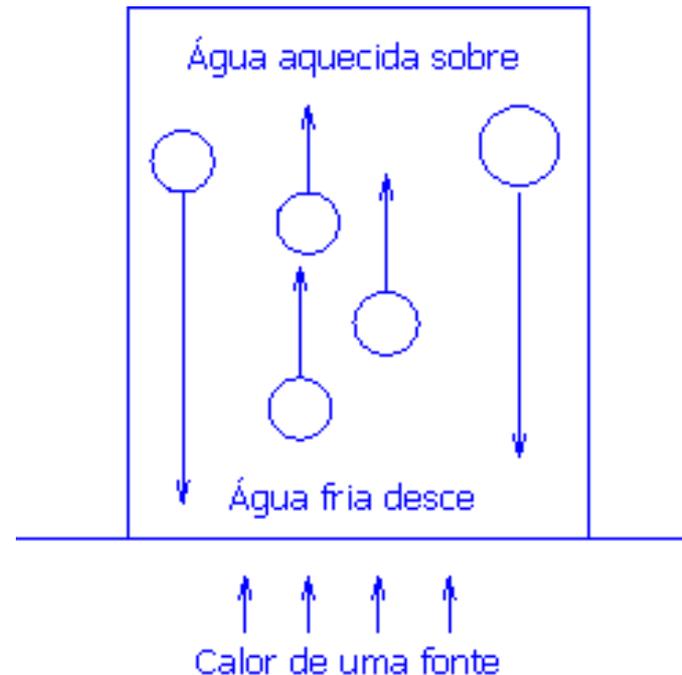
Suponha que tenhamos uma região de ar que se aquece. À medida que o ar se aquece as moléculas de ar se espalham, fazendo com que esta região se torne menos densa que o ambiente em torno, o ar não aquecido. Sendo menos denso ele se elevará - este movimento de ar quente para uma região mais fria é chamada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





MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

C) RADIAÇÃO

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

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.



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

C) RADIAÇÃO

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

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 \(Lei Fundamental da Radiação\)](#), que pode ser escrita como:



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

C) 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]



MECANISMOS FUNDAMENTAIS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR:

C) RADIAÇÃO

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



Considerando a transformação de calor por radiação (corpos iguais)



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

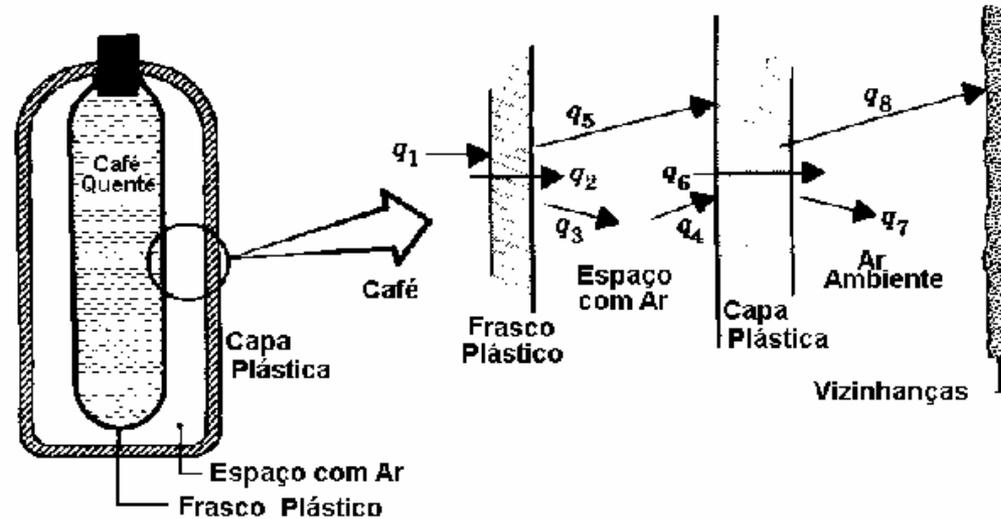
Como exemplo de um sistema onde ocorrem ao mesmo tempo vários mecanismos de transferência de calor consideremos uma garrafa térmica.

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

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.



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