

# Condução de calor e Lei de Fourier

Alisson Ferreira Martins

IFSP

2024

## Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>2</b>
1.1	Energia térmica . . . . .	2
1.2	Calor . . . . .	2
1.3	Unidade usual de calor . . . . .	3
<b>2</b>	<b>Processos de propagação do calor</b>	<b>5</b>
2.1	A condução . . . . .	5
2.2	Forças intermoleculares explicando a condução . . . . .	5
<b>3</b>	<b>Cálculo do Fluxo de Calor <math>\Phi</math> - Lei de Fourier</b>	<b>7</b>

# 1 Introdução

Quando observamos o mundo material à nossa volta, encontramos casas, plantas, automóveis, pessoas, a atmosfera (o ar), água, pedras e tantos outros representantes da matéria. Todos têm em comum o fato de serem formados por pequenas partículas, as moléculas. Essas partículas possuem energia de agitação, exceto no zero absoluto.

podemos dizer que essa energia de agitação das partículas é a energia térmica do corpo. Portanto, o somatório das energias de agitação das partículas de um corpo estabelece a energia térmica do mesmo.

A energia térmica do corpo depende de dois fatores: da energia de agitação média de cada partícula (que determina a temperatura do corpo) e do número de partículas que o corpo possui.

## 1.1 Energia térmica

A energia térmica de um corpo é o somatório das energias de agitação das suas partículas e depende da temperatura do corpo e do número de partículas nele existentes.

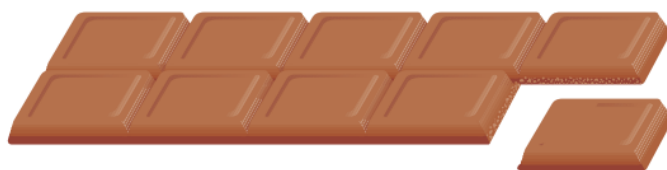


Figura 1: A barra de chocolate foi dividida em duas partes. Apesar de ambas estarem à mesma temperatura, a parte maior possui mais energia térmica que a menor, por ser constituída de um número maior de partículas.

É oportuno observar que o fato de um corpo A estar a uma temperatura maior que um outro B não implica, necessariamente, que A tenha maior quantidade de energia térmica que B. O corpo B, por exemplo, pode ter mais partículas que A, de tal forma que o somatório das energias de vibração de suas partículas supere o de A.

## 1.2 Calor

Quando dois corpos com temperaturas diferentes são colocados em contato térmico, eles tendem a alcançar um equilíbrio térmico, onde suas temperaturas se igualam. Para que isso ocorra, o corpo com a temperatura mais alta transfere uma quantidade de energia térmica para o corpo com a temperatura mais baixa. Esse processo faz com que a temperatura do corpo mais quente diminua e a do corpo mais frio aumente, até que ambos alcancem a mesma temperatura. Durante esse processo de transferência de energia, o termo utilizado para descrever essa energia em movimento é "calor".

Calor é energia térmica em trânsito de um corpo para outro ou de uma parte para outra de um mesmo corpo, trânsito este provocado por uma diferença de temperaturas.

O calor flui, espontaneamente, da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

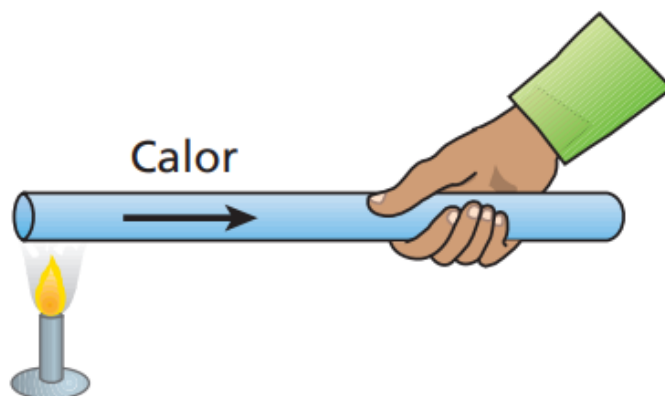


Figura 2: Na situação representada acima, o calor propaga-se da extremidade esquerda da barra, em contato com o fogo, para a extremidade direita. Note que o calor flui naturalmente da região de maior temperatura para a de menor temperatura.

### 1.3 Unidade usual de calor

Sendo o calor uma forma de energia, no Sistema Internacional de Unidades (SI) sua unidade é o joule (J). Esse nome foi uma forma de a comunidade científica homenagear o físico inglês James Prescott Joule (1818-1889), que, entre outros trabalhos, demonstrou a equivalência entre a energia mecânica e a energia térmica.

Além do joule, podemos usar também a unidade caloria (cal) para avaliar quantidades de calor. Essa unidade é pouco utilizada nos laboratórios, mas muito usada nos livros escolares. Inicialmente, a caloria foi definida como a quantidade de calor necessária para fazer 1 grama de água sofrer a variação de 1 grau Celsius em sua temperatura. Porém, observou-se que essa quantidade de energia era um pouco diferente quando se aquecia 1 grama de água de 10 °C para 11 °C e de 90 °C para 91 °C, por exemplo. Assim, foi estabelecido um valor médio, que acabou se encaixando entre 14,5 °C e 15,5 °C.

**Uma caloria (cal) é a quantidade de calor que 1 grama de água pura deve receber, sob pressão normal, para que sua temperatura seja elevada de 14,5 °C a 15,5 °C.**

Na comparação com a definição de joule, estabelecida como o trabalho realizado por uma força de 1 newton quando o ponto em que a força é aplicada se desloca 1 metro na direção da força, encontramos a equivalência entre essas unidades:

$$1 \text{ cal} = 4,186 \text{ J}$$

Para facilitar os cálculos, é comum utilizar a equivalência de que 1 caloria é aproximadamente igual a 4,2 joules. Isso pode ser representado da seguinte forma:

$$1 \text{ caloria} = 4,2 \text{ joules}$$

Essa relação é útil para converter entre joules e calorias. Por exemplo, se você tem uma quantidade de energia em joules e deseja convertê-la para calorias, você pode usar a fórmula:

$$Q \text{ (calorias)} = \frac{J \text{ (joules)}}{4,2}$$

ou, de forma inversa, para converter calorias para joules:

$$J \text{ (joules)} = 4,2 \times Q \text{ (calorias)}$$

Além da unidade caloria, um dos múltiplos mais comuns é a quilocaloria (kcal). A relação entre calorias e quilocalorias é dada por:

$$1 \text{ kcal} = 10^3 \text{ calorias}$$

A quilocaloria é frequentemente utilizada para expressar o valor energético dos alimentos, conforme encontrado nos rótulos dos produtos.

## 2 Processos de propagação do calor

A energia térmica pode mudar de local, indo, espontaneamente, da região de maior temperatura para a de menor temperatura. Essa mudança pode processar-se de três maneiras distintas, denominadas condução, convecção e radiação.

### 2.1 A condução

Ao colocarmos a ponta de uma barra de metal em contato com uma fonte térmica e segurarmos a outra extremidade, notamos que o local que está em contato com a mão se torna, rapidamente, cada vez mais quente, apesar de estar distante da fonte de calor. É o que acontece quando uma cozinheira fica mexendo o conteúdo de uma panela com uma colher metálica. Após algum tempo ela não consegue manter a colher em sua mão, já que toda a colher se encontra muito quente. As cozinheiras mais experientes usam colher de madeira, material que conduz o calor de forma mais lenta do que o metal.

**Condução é o processo de propagação de calor no qual a energia térmica passa de partícula para partícula de um meio.**

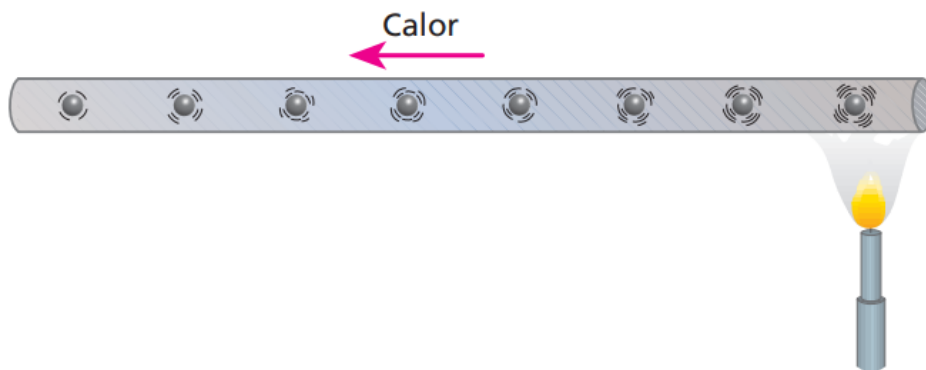


Figura 3: Esquema, sem rigor na escala, que representa a condução do calor através de uma barra. Note que a energia térmica é passada sequencialmente de partícula para partícula e que vibram mais as partículas mais próximas da fonte de calor.

É importante notar que, na condução, as partículas permanecem vibrando em torno de suas posições de equilíbrio. As partículas não se deslocam, ao contrário do que acontece com a energia. Como a ocorrência da condução requer a existência de um meio material, esse fenômeno não ocorre no vácuo.

### 2.2 Forças intermoleculares explicando a condução

**As forças de interação molecular são de origem eletromagnética.**

Num corpo, duas moléculas vizinhas estão na posição de equilíbrio quando a resultante das forças de interação entre elas é nula.  $d_0$  é a distância que separa essas moléculas. Quando a distância  $d$  entre as moléculas é maior que  $d_0$ ,  $d > d_0$ , surgem forças de interações atrativas. É por isso que uma barra de ferro resiste a trações.

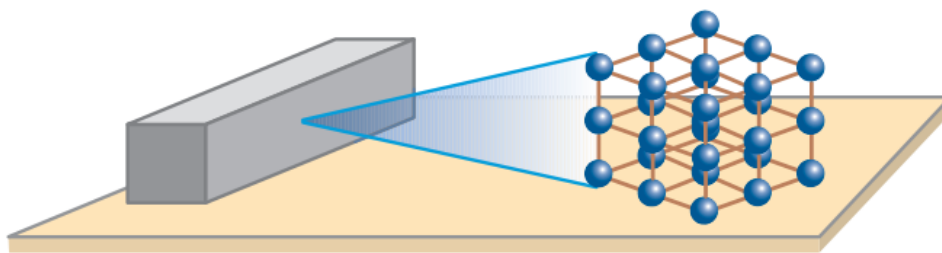


Figura 4: Representação esquemática da estrutura cristalina de um sólido. As partículas se mantêm coesas devido às forças intermoleculares.

Quando as moléculas são aproximadas de modo que a distância  $d$  entre elas torna-se menor que  $d_0$ , surgem as forças de interação repulsivas. É por essa razão que a barra de ferro do exemplo anterior resiste a esforços de compressão

Seja  $F$  o valor algébrico da força de interação entre as moléculas vizinhas pertencentes a um dado corpo. O gráfico a seguir mostra a variação de  $F$  em função da distância  $d$  entre essas moléculas.

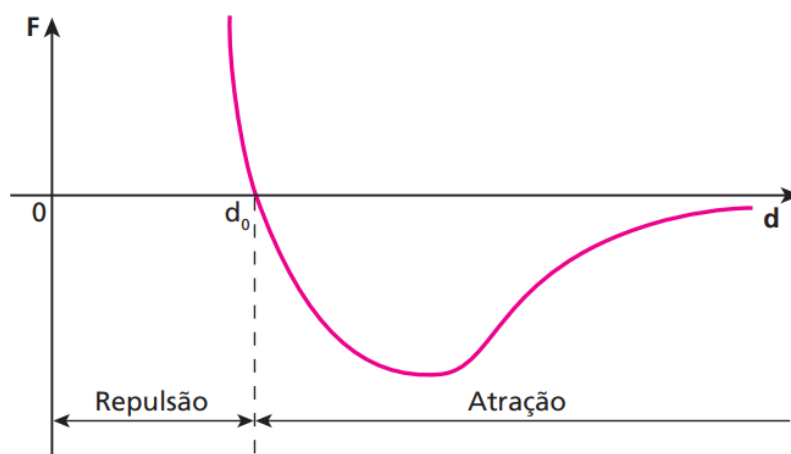


Figura 5: Os valores positivos de  $F$  correspondem a forças de repulsão ( $d < d_0$ ), enquanto os valores negativos correspondem a forças de atração ( $d > d_0$ ). A força atrativa praticamente se anula quando  $d$  vale aproximadamente  $10 d_0$ .

Dessa forma, podemos concluir que as moléculas, ao vibrarem com maior amplitude, conseguem aproximar-se mais de moléculas vizinhas, intensificando-se as forças repulsivas. Consequentemente, essas moléculas vizinhas são “sacudidas” pelas primeiras, passando a um estágio de vibração de amplitudes maiores. Assim, a energia térmica (o calor) é conduzida de molécula para molécula do meio a que elas pertencem

### 3 Cálculo do Fluxo de Calor $\Phi$ - Lei de Fourier

Vamos realizar um estudo quantitativo do calor que flui através de uma barra com seção transversal uniforme. Suponha que o comprimento da barra seja  $L$  e a área de sua seção transversal seja  $A$ . Consideramos que as extremidades da barra estão em contato térmico com dois meios cujas temperaturas constantes são, respectivamente,  $\theta_a$  e  $\theta_b$ , com  $\theta_a > \theta_b$ . Para evitar possíveis perdas de calor, a barra é isolada termicamente ao longo de sua superfície.

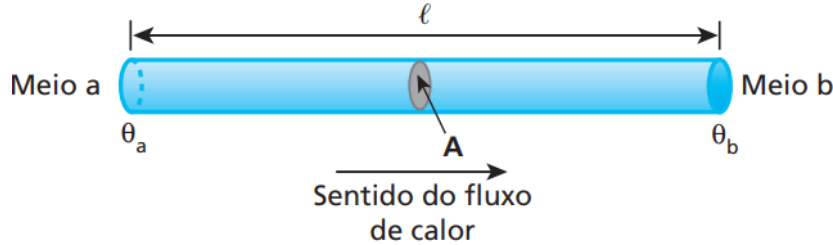


Figura 6: Diagrama da barra com seção transversal uniforme em contato térmico com dois meios a diferentes temperaturas. A barra possui comprimento  $L$  e área de seção transversal  $A$ . As temperaturas das extremidades são  $\theta_a$  e  $\theta_b$ , sendo  $\theta_a > \theta_b$ .

Devido à diferença de temperatura entre as extremidades  $a$  e  $b$ , ocorre um fluxo de calor (ou corrente térmica) através da barra, do lado mais quente para o lado mais frio. A intensidade desse fluxo térmico é definida como a razão entre a quantidade de calor  $Q$  que atravessa uma seção transversal da barra e o intervalo de tempo  $\Delta t$  correspondente:

$$\Phi = \frac{Q}{\Delta t}$$

Inicialmente, as diferentes seções da barra apresentam temperaturas variáveis. No entanto, após um certo intervalo de tempo, essas seções alcançam temperaturas constantes, embora ainda diferentes entre si. Nesse ponto, a barra atinge um estado de equilíbrio térmico, e o fluxo de calor se estabelece em regime permanente ou estacionário. Em regime estacionário, o fluxo de calor é uniforme em qualquer seção da barra, e a distribuição de temperatura ao longo da barra segue o perfil representado no gráfico a seguir.

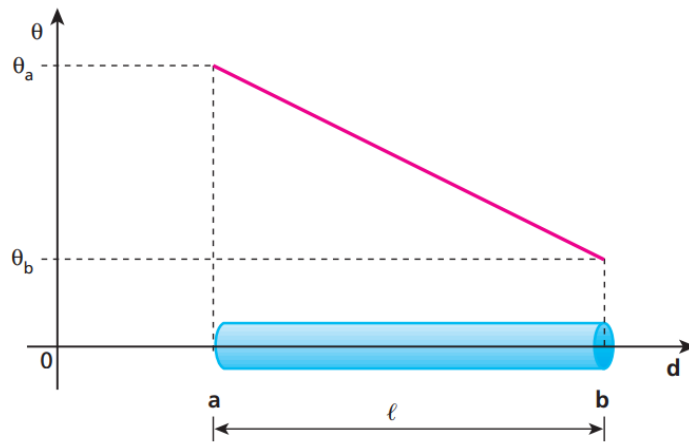


Figura 7: No regime permanente, o fluxo térmico depende de quatro fatores: da área  $A$  da seção transversal da barra, do comprimento  $L$  da barra, da diferença de temperaturas  $\Delta\theta$  entre os meios  $a$  e  $b$ , e da condutividade térmica  $k$  do material da barra.

Matematicamente, essas grandezas estão relacionadas pela equação a seguir, conhecida como Lei de Fourier:

$$\Phi = \frac{k \cdot A \cdot \Delta\theta}{L}$$

onde:

- $\Phi$  é o fluxo de calor,
- $k$  é a condutividade térmica do material,
- $A$  é a área da seção transversal da barra,
- $\Delta\theta$  é a diferença de temperatura entre as extremidades da barra,
- $L$  é o comprimento da barra.

A grandeza  $k$  é uma constante característica do material da barra, sendo denominada coeficiente de condutibilidade térmica. Os maiores valores do coeficiente  $k$  pertencem aos metais, que são os melhores condutores de energia térmica. Os menores valores de  $k$  ficam para os isolantes térmicos, como a lã de vidro, a cortiça, a madeira, os gases em geral e outros