CAPÍTULO 5: CONDUÇÃO DE ENERGIA

5.1 CONDUTIVIDADE TÉRMICA

Além da transferência de energia por radiação, uma outra forma de *calor* (transferência de energia) é a *condução*. Enquanto a radiação ocorre e é até favorecida pela ausência de matéria (vácuo), a condução de energia entre dois sistemas somente ocorre enquanto há contato material entre os dois. Nesse caso, ela ocorre com uma densidade de fluxo (q, W m^{-2}) que é descrita pela *Lei de Fourier*:

$$q = -\lambda \frac{\Delta T}{\Delta x} \qquad (5.1)$$

Nessa equação, ΔT (K ou °C) é a diferença de temperatura entre os dois sistemas e Δx (m) é a distância. Denomina-se o quociente $\Delta T / \Delta x$ (K/m) também de *gradiente térmico*. O sinal negativo aparece na equação para indicar que a energia flui do ponto de maior temperatura ao de menor temperatura, contrário ao gradiente térmico. Pela equação 5.1 verifica-se, portanto, que a densidade de fluxo de energia é proporcional ao gradiente térmico conforme um fator de proporcionalidade λ, denominado de *condutividade térmica*. A unidade da condutividade térmica, no SI, é W m^{-1} K^{-1}. A condutividade térmica é uma propriedade do material pelo qual a condução ocorre, e seu valor pode ser determinado experimentalmente. Para diversos materiais comuns os valores da condutividade são listados na Tabela 5.1.

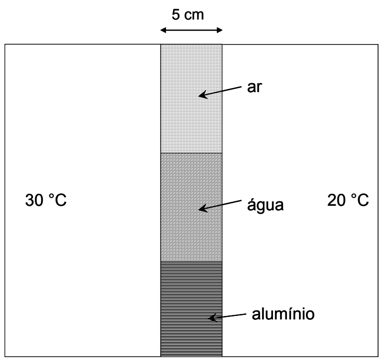
Tabela 5.1 - Condutividade térmica de alguns materiais

Tipo	Material	Condutividade térmica λ (W m^{-1} K^{-1})
Metais sólidos	Alumínio	220
	Ferro	75
	Cobre	390
	Prata	420
Outros sólidos	Vidro	0,93
	Acrílico	1,9
	PVC	0,04
	Polietileno ("plástico")	0,06
	Náilon	0,3
	Gelo	2,1
Líquidos	Água	0,60
	Etanol	0,17
	Petróleo	0,15
	Mercúrio	10,4
Gases	Ar	0,024
	Vapor d´água	0,016
Materiais compostos	Madeira seca	0,06
	Isopor	0,03
	Solo seco	0,3
	Solo úmido	2,0

Pela Tabela 5.1 verifica-se que, em geral, a condutividade térmica decresce na seqüência sólidos – líquidos – gases, exceções feitas aos plásticos PVC e polietileno, que possuem valores de λ muito inferiores aos outros sólidos, e ao mercúrio líquido que apresenta uma maior λ do que os sólidos não metálicos. Os metais sólidos possuem os maiores valores de condutividade térmica; eles são, em outras palavras, os melhores *condutores* de calor. Os gases apresentam valores muito pequenos de condutividade térmica; eles são maus condutores ou *isolantes* térmicos.

Exemplo 1: Utilização da equação de Fourier:

Na figura abaixo se observa uma divisão entre um reservatório a 30 °C e outro a 20 °C. A divisão tem uma espessura de 5 cm e é subdividida em uma parte com ar, outra com água e outra com alumínio. Solicita-se calcular a densidade de fluxo de calor por condução através de cada parte da divisão.



Solução:

Calcula-se em primeiro lugar o gradiente térmico. Se olharmos, na figura acima, da esquerda para a direita, ΔT = 20-30 = -10 °C e $\Delta T / \Delta x$ = -10 °C / 0,05 m = -200 °C m^{-1}. Utilizando a equação 5.1 e os dados da Tabela 5.1 verifica-se portanto que:

Pelo ar: q = -0,024.-200 = 4,8 W m^{-2}

Pela água: q = -0,60.-200 = 120 W m^{-2}

Pelo alumínio: q = -220.-200 = 44.000 W m^{-2}

Os valores são positivos, o que significa que o sentido do fluxo é o mesmo que consideramos para calcular o gradiente, ou seja, da esquerda à direita.

Exemplo 2: Utilização da equação de Fourier:

A temperatura no interior de uma casa de vegetação de plástico é 32 °C, enquanto a temperatura fora dela é 23 °C. O plástico tem uma espessura de 1 mm e sua condutividade térmica é 0,06 W m^{-1} K^{-1}. A área da casa de vegetação é 200 m^2. Calcular quanto é a transferência de energia entre a casa de vegetação e o meio pelo processo de condução.

Solução:

Aplicando a equação de Fourier obtemos, nesse caso:

q = -0,06 . (32-23)/0,001 = -540 W m^{-2}

Nota que, nesse exemplo de cálculo, consideramos T_2 como a temperatura no interior; dessa forma, olhamos de fora para dentro. Como a densidade de fluxo calculada é negativa, conclui-se que a energia flui contrário ao sentido considerado, ou seja, de dentro para fora. Para saber qual o total de energia que flui de dentro para fora, multiplicamos a densidade de fluxo de energia pela área total:

Q = q.A = -540 W m^{-2} . 200 m^2 = -108.000 W ou -108.000 J s^{-1}.

5.2 RESISTÊNCIA TÉRMICA

Define-se como resistência térmica (R_T) de um material a sua espessura dividida pela sua condutividade térmica:

$$R_T = \frac{\Delta x}{\lambda} \tag{5.2}$$

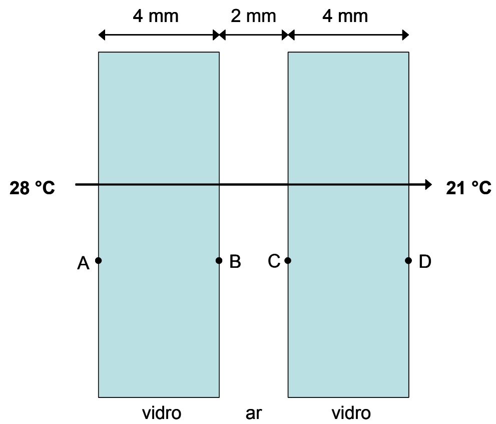
Fazendo análise dimensional de equação 5.2, verifica-se que a unidade da resistência térmica é m^2 K W^{-1}. Pela substituição da equação 5.2 na equação 5.1 obtemos uma segunda versão da Lei de Fourier:

$$q = -\frac{\Delta T}{R_T} \tag{5.3}$$

A vantagem de se trabalhar com a resistência térmica ao invés da condutividade térmica é que, no caso do fluxo de energia por condução por um sistema composto por diferentes camadas em série, as resistências das camadas podem ser somadas para se encontrar a resistência total.

Exemplo 3: Utilização da equação de Fourier com resistência térmica.

Um vidro duplo é composto por duas lâminas de vidro de 4 mm de espessura, separadas por uma camada de 2 mm de ar (veja figura a seguir). De um lado do vidro a temperatura é 28 °C, do outro lado 21 °C. Calcular a densidade de fluxo de calor por condução através do vidro duplo.



Solução:

Como nesse caso temos a condução de energia através de um sistema composto por vidro e ar, devemos aplicar a equação de Fourier com resistência térmica (equação 5.3). Inicialmente calculamos a resistência térmica de cada parte do sistema pela equação 5.3, utilizando os valores de λ da Tabela 5.1:

Vidro (4 mm = 0,004 m): $R_T = 0{,}004 / 0{,}93 = 0{,}0043$ m^2 K W^{-1}

Ar (2 mm = 0,002 m): $R_T = 0{,}002 / 0{,}024 = 0{,}083$ m^2 K W^{-1}

A resistência térmica total do sistema é a soma das resistências parciais, e assim:

$R_{T,total} = R_{T,vidro} + R_{T,ar} + R_{T,vidro} = 0{,}0043 + 0{,}083 + 0{,}0043 = 0{,}092$ m^2 K W^{-1}

Agora, aplicando a equação 5.3:

$$q = -\frac{\Delta T}{R_T} = -\frac{21-28}{0{,}092} = 76{,}1 \text{ W m}^{-2}$$

Exemplo 4: Cálculo da temperatura nas interfaces de um sistema composto.

No problema acima, em equilibro dinâmico, qual é a temperatura nas interfaces vidro-ar (pontos A, B, C e D da figura)?

Solução:

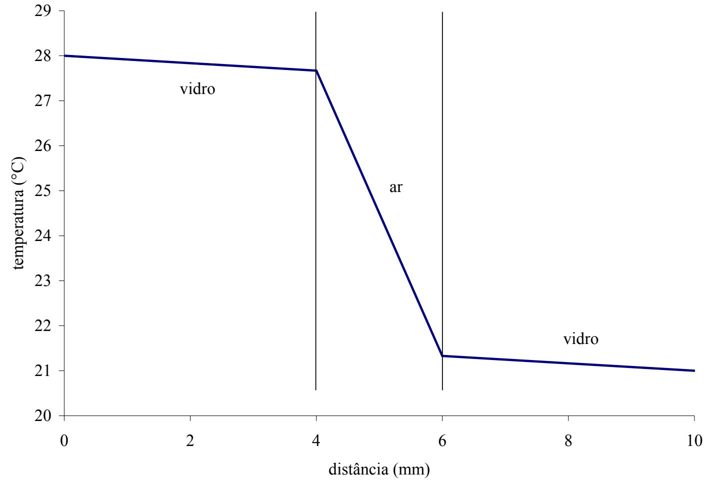
Em equilíbrio dinâmico, a densidade de fluxo de energia (calculada acima) é igual em todo o sistema. Aplicando a equação 5.1 à primeira camada de vidro, obtém-se portanto:

$$q = -\lambda\frac{\Delta T}{\Delta x} = -0{,}93\frac{T_B - T_A}{0{,}004} = 76{,}1 \text{ W m}^{-2}$$

A temperatura T_A é 28 °C, e assim:

$$T_B = -\frac{76{,}1.0{,}004}{0{,}93} + 28 = 27{,}67 \text{ °C}$$

Fazendo uma conta análoga para a segunda camada de vidro, encontra-se $T_C = 21{,}33$ °C. A figura abaixo mostra a relação entre a posição no sistema e a temperatura.



Observa-se que, nas partes de vidro, que têm uma maior condutividade térmica, o decréscimo da temperatura com a distância (o gradiente térmico) é muito menor que na camada de ar, que tem uma menor condutividade térmica. Dessa forma, o produto da condutividade e gradiente, que resulta na densidade de fluxo de energia (q) pela equação 5.1, é igual em toda parte do sistema.

Exemplo 5: Cálculo da temperatura do fundo de uma panela.

Uma panela de alumínio encontra-se com água fervendo (a 100 °C) num fogão. Verifica-se que o nível da água na panela diminui de 4 mm/minuto. O fundo da panela tem uma espessura de 2 mm. Qual é a temperatura do fundo da panela? (Calor latente específico de evaporação da água L_v = 2260 kJ kg^{-1})

Solução:

Em equilíbrio dinâmico, a mesma quantidade necessária para a evaporação da água deve ser fornecida pelo fogão e passar, por condução, pelo fundo da panela. Lembramos que 4 mm de diminuição de nível de água equivale a 0,004 m, que é igual a 0,004 m^3/m^2. Assim:

V_a / t.A = 0,004 m^3/m^2.min

m_a / t.A = ρ_a . V_a / t.A = 1000 kg m^{-3} . 0,004 m^3/m^2.min = 4 kg/min.m^2

Ou, expressando por segundo:

m_a / t.A = 4 kg/min.m^2 . 1 min/60 s = 0,067 kg s^{-1} m^{-2}

Assim, o calor de evaporação (Q_v) por unidade de tempo e área será igual a:

Q_v / t.A = L_v . m_a / t.A = 2260 kJ kg^{-1} . 0,067 kg s^{-1} m^{-2} = 150,7 kW m^{-2}

Ou seja, a densidade de fluxo de energia que passa pelo fundo da panela é

$q = Q_v / t / A = 150{,}7\ kW\ m^{-2} = 150{,}7.10^3\ W\ m^{-2}$

Reescrevendo a equação de Fourier (equação 5.1) obtemos:

$$\Delta T = -\frac{q\Delta x}{\lambda}$$

Utilizando a condutividade térmica de alumínio da Tabela 5.1 (λ_{Al} = 220 W m^{-1} K^{-1}) calculamos:

$$\Delta T = T_2 - T_1 = -\frac{150{,}7.10^3.0{,}002}{220} = -1{,}37\ °C$$

Ou seja, o fundo interior da panela terá uma temperatura 1,37 °C inferior ao fundo exterior.

EXERCÍCIOS

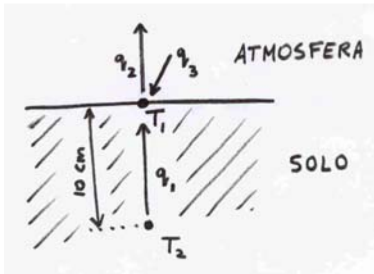
5.1 Deduzir que a unidade de resistência térmica equivale a kg m^4 K s^{-3}

5.2 A condutividade térmica de vidro é 0,93 W m^{-1} K^{-1} e a do ar é 0,024 W m^{-1} K^{-1}. Calcular a resistência térmica de:
a) Vidro com espessura de 3 mm.
b) Vidro com espessura de 6 mm.
c) Vidro duplo (3 mm de vidro, 2 mm de ar, 3 mm de vidro)

5.3 Uma casa possui paredes com espessura de 25 cm (λ = 0,6 W m^{-1} K^{-1}). A temperatura do ar fora está em 32 °C e dentro está em 24 °C.
a) Calcular a densidade de fluxo de energia através da parede.
b) Calcular a densidade de fluxo de energia através dos três tipos de vidro da questão anterior, nas condições de temperatura desta questão.
c) Qual será, nessas condições, a temperatura em cada uma das interfaces vidro-ar (externas e internas) do vidro duplo?
d) Qual será o fluxo total através de uma parede de 15 m^2 com uma janela de vidro de 2 m^2?

5.4 Por que um “piso frio” parece mais frio que um carpete? Será que uma barata que anda no piso “frio” também acha que ele é frio?

5.5 Na figura abaixo que representa os fluxos de energia próximos à superfície do solo durante a noite, q_1 é a densidade de fluxo no solo por condução, q_2 é a densidade de fluxo por radiação térmica emitida e q_3 é a densidade de fluxo por radiação difusa refletida e emitida pela atmosfera e absorvida pela superfície.



Dados:
T_1 = 12°C = 285 K
T_2 = 18°C = 291 K
λ = 4,6 W K^{-1} m^{-1}
ε = 0,9
σ = 5,67.10^{-8} W K^{-4} m^{-2}

Sabendo que a temperatura T_1 não está variando no tempo, pergunta-se qual é o valor do fluxo q_3.

5.6 Por que a areia da parte seca da praia aquece muito mais que a areia úmida? Qual é a parte da praia (a úmida ou a seca) que esfria mais de noite?

5.7 O ar tem uma condutividade térmica muito baixa. Por que é que mesmo assim, para se manter quente temos que nos cobrir com um cobertor durante uma noite fria?