

A photograph of solar panels installed on a tiled roof, viewed from a low angle looking up. The panels are dark with a grid of thin lines. The roof tiles are light-colored and have a wavy pattern. A green geometric shape is overlaid on the bottom left of the image.

João Carlos Martins Coelho

# **ENERGIA E FLUIDOS**

## Transferência de calor

**Blucher**

Vol. **3**

---

# **ENERGIA E FLUIDOS**

**Volume 3 – Transferência de calor**

# **ENERGIA E FLUIDOS**

**Volume 3 – Transferência de calor**

## Coleção Energia e Fluidos



Volume 1  
**Coleção Energia e Fluidos:  
Termodinâmica**

ISBN: 978-85-212-0945-4  
330 páginas



Volume 2  
**Coleção Energia e Fluidos:  
Mecânica dos fluidos**

ISBN: 978-85-212-0947-8  
394 páginas



Volume 3  
**Coleção Energia e Fluidos:  
Transferência de calor**

ISBN: 978-85-212-0949-2  
292 páginas

**Blucher**

[www.blucher.com.br](http://www.blucher.com.br)

*João Carlos Martins Coelho*

# **ENERGIA E FLUIDOS**

**Volume 3 – Transferência de calor**

Energia e Fluidos – volume 3: Transferência de calor

© 2016 João Carlos Martins Coelho

Editora Edgard Blücher Ltda.

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4º andar  
04531-934 – São Paulo – SP – Brasil  
Tel.: 55 11 3078-5366  
**contato@blucher.com.br**  
**www.blucher.com.br**

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme  
5. ed. do *Vocabulário Ortográfico da Língua  
Portuguesa*, Academia Brasileira de Letras,  
março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por  
quaisquer meios sem autorização escrita da  
Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard  
Blücher Ltda.

FICHA CATALOGRÁFICA	
Coelho, João Carlos Martins Energia e fluidos, volume 3: transferência de calor / João Carlos Martins Coelho. — São Paulo: Blucher, 2016. 292 p. : il.	
Bibliografia ISBN 978-85-212-0949-2	
1. Engenharia mecânica 2. Engenharia térmica 3. Meios de transferência de calor I. Título	
15-0995	CDD 621.402
Índices para catálogo sistemático: 1. Engenharia térmica	



# Prefácio

Com o passar do tempo, o ensino das disciplinas da área da Engenharia Mecânica, frequentemente denominada Engenharia Térmica, começou a ser realizado utilizando diversas abordagens. Em alguns cursos de engenharia foi mantido o tratamento tradicional desse assunto dividindo-o em três disciplinas clássicas: Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor. Em contraposição a essa abordagem, existe o ensino dos tópicos da Engenharia Térmica agrupados em duas disciplinas, sendo uma a Termodinâmica e outra a constituída pela união de mecânica dos fluidos e transmissão de calor, frequentemente denominada Fenômenos de Transporte. Por fim, há casos em que se agrupam todos os tópicos abordados pelas disciplinas clássicas em um único curso que recebe denominações tais como Fenômenos de Transporte, Ciências Térmicas e Engenharia Térmica.

Tendo em vista esse cenário, verificamos a necessidade de criar uma série de livros que permitisse o adequado apoio ao desenvolvimento de cursos que agrupassem diversos tópicos, permitindo ao aluno o trânsito suave através dos diversos assuntos abrangidos pela Engenharia Térmica. Nesse contexto, nos propusemos a iniciar a preparação desta série por meio da publicação de três livros, abordando conhecimentos básicos, com as seguintes características:

- serem organizados de forma a terem capítulos curtos, porém em maior nú-

mero. Dessa forma cada assunto é tratado de maneira mais compartimentada, facilitando a sua compreensão ou, caso seja desejo do professor, a sua exclusão de um determinado curso;

- terem seus tópicos teóricos explanados de forma precisa, no entanto concisa, premiando a objetividade e buscando a rápida integração entre o aluno e o texto;
- utilizarem uma simbologia uniforme ao longo de todo o texto independentemente do assunto tratado, buscando reduzir as dificuldades do aluno ao transitar, por exemplo, da termodinâmica para a mecânica dos fluidos;
- incluírem nos textos teóricos, sempre que possível, correlações matemáticas equivalentes a correlações gráficas. O objetivo não é eliminar as apresentações gráficas, mas sim apresentar, adicionalmente, correlações que possam ser utilizadas em cálculos computacionais;
- apresentarem uma boa quantidade de exercícios resolvidos com soluções didaticamente detalhadas, de modo que o aluno possa entendê-los com facilidade, sem auxílio de professores; e
- utilizarem apenas o Sistema Internacional de Unidades.

Um dos problemas enfrentados ao se escrever uma série como é a dificuldade

de definir quais tópicos devem ou não ser abordados e com qual profundidade eles serão tratados. Diante dessa questão, realizamos algumas opções com o propósito de tornar os livros atraentes para os estudantes, mantendo um padrão de qualidade adequado aos bons cursos de engenharia.

A coleção de exercícios propostos e resolvidos apresentada ao longo de toda a série é fruto do trabalho didático que, naturalmente, foi realizado ao longo dos últimos 15 anos com apoio de outros textos. Assim, é inevitável a ocorrência de semelhanças com exercícios propostos por outros autores, especialmente em se tratando dos exercícios que usualmente denominamos clássicos. Pela eventual e não intencional semelhança, pedimos desculpas desde já.

Uma dificuldade adicional na elaboração de livros-texto está na obtenção de tabelas de propriedades termodinâmicas e de transpor-

te de diferentes substâncias. Optamos por vencer essa dificuldade desenvolvendo uma parcela muito significativa das tabelas apresentadas nesta série utilizando um programa computacional disponível no mercado.

Finalmente, expressamos nossos mais profundos agradecimentos a todos os professores que, com suas valiosas contribuições e com seu estímulo, nos auxiliaram ao longo destes anos na elaboração deste texto. Em particular, agradecemos ao Prof. Dr. Antônio Luiz Pacífico, Prof. Dr. Marco Antônio Soares de Paiva, Prof. Me. Marcelo Otávio dos Santos, Prof. Dr. Maurício Assumpção Trielli, Prof. Dr. Marcello Nitz da Costa e, também, aos muitos alunos da Escola de Engenharia Mauá que, pelas suas observações, críticas e sugestões, contribuíram para o enriquecimento deste texto.

João Carlos Martins Coelho  
jcmcoelho@maua.br



# Conteúdo

## **Lista dos principais símbolos ..... 11**

## **Introdução ..... 13**

- 1 Sistema e volume de controle .....14
- 2 Algumas propriedades.....15
- 3 Avaliação da massa específica de alguns fluidos .....16
- 4 A transferência de calor e a termodinâmica..... 17

## **Capítulo 1 – Introdução à transferência de energia por calor ..... 19**

- 1.1 Condução .....19
- 1.2 Convecção .....22
- 1.3 Radiação .....24
- 1.4 A transferência de calor e a primeira lei da termodinâmica .....27
- 1.5 Balanço de energia em superfícies .....28
- 1.6 Exercícios resolvidos .....29
- 1.7 Exercícios propostos .....34

## **Capítulo 2 – Condução unidimensional estacionária..... 39**

- 2.1 A equação da condução .....39
- 2.2 Condução através de placas planas sem geração .....43
- 2.3 Condução através de cascas cilíndricas .....50
- 2.4 Condução através de cascas esféricas .....53
- 2.5 Condução com geração .....55
- 2.6 Superfícies estendidas – aletas .....57
- 2.7 Exercícios resolvidos .....62
- 2.8 Exercícios propostos .....73

## **Capítulo 3 – Condução bidimensional estacionária ..... 101**

- 3.1 Fator de forma de condução .....101
- 3.2 Exercícios resolvidos .....104
- 3.3 Exercícios propostos .....105

**Capítulo 4 – Condução em regime transiente ..... 107**

4.1 O método da capacidade concentrada .....	107
4.2 Sistemas com temperatura interna espacialmente variável .....	109
4.3 Soluções exatas para placa plana, cilindro e esfera .....	110
4.4 Exercícios resolvidos .....	113
4.5 Exercícios propostos .....	117

**Capítulo 5 – Introdução à análise numérica – condução ..... 121**

5.1 O método dos volumes finitos .....	122
5.2 Análise da condução bidimensional em estado estacionário .....	123
5.3 Exercícios resolvidos .....	126
5.4 Exercícios propostos .....	129

**Capítulo 6 – Convecção forçada sobre superfícies externas..... 133**

6.1 Introdução .....	133
6.2 Convecção forçada sobre superfícies externas .....	134
6.3 Convecção forçada sobre placas planas .....	137
6.4 Convecção forçada sobre cilindros lisos .....	140
6.5 Convecção forçada sobre esferas lisas .....	140
6.6 Convecção forçada sobre feixes de tubos .....	141
6.7 Exercícios resolvidos .....	143
6.8 Exercícios propostos .....	151

**Capítulo 7 – Convecção natural ..... 163**

7.1 Convecção natural sobre placa plana lisa vertical .....	166
7.2 Convecção natural sobre placa plana horizontal .....	166
7.3 Convecção natural sobre cilindro horizontal .....	167
7.4 Convecção natural sobre esfera .....	168
7.5 Exercícios resolvidos .....	168
7.6 Exercícios propostos .....	171

**Capítulo 8 – Convecção forçada interna ..... 187**

8.1 Aspectos dinâmicos e térmicos do escoamento em dutos.....	187
8.2 Comportamento dinâmico dos escoamentos plenamente desenvolvidos .....	189
8.3 Temperatura média de escoamento .....	192
8.4 Balanço de energia em um tubo .....	193
8.5 Avaliação dos coeficientes convectivos .....	196

8.6 Escoamento plenamente desenvolvido em regiões anulares .....	198
8.7 Transferência de calor no comprimento de entrada .....	198
8.8 Exercícios resolvidos .....	200
8.9 Exercícios propostos .....	203

## **Capítulo 9 – Trocadores de calor..... 213**

9.1 Introdução .....	213
9.2 Trocadores de calor de duplo tubo .....	214
9.3 Trocadores de calor casco e tubos .....	214
9.4 Trocadores de placas .....	216
9.5 Aplicação da primeira lei da termodinâmica .....	217
9.6 Dimensionamento .....	218
9.7 Coeficiente global de transferência de calor.....	223
9.8 Exercícios resolvidos .....	225
9.9 Exercícios propostos .....	228
9.10 Exercícios abertos .....	237

## **Capítulo 10 – Radiação ..... 245**

10.1 Introdução à radiação .....	245
10.2 Conceitos básicos em radiação .....	246
10.3 O corpo negro e os corpos reais .....	249
10.4 O fator de forma .....	251
10.5 Transferência de calor por radiação entre duas superfícies negras .....	254
10.6 Transferência de calor por radiação em cavidade formada por superfícies negras ....	254
10.7 Troca por radiação entre duas superfícies opacas não negras .....	255
10.8 Troca por radiação em cavidades formadas por diversas superfícies .....	257
10.9 Superfície reirradiante .....	260
10.10 Escudo de radiação .....	260
10.11 Radiação combinada com convecção e condução .....	261
10.12 Diagramas para a determinação de fatores de forma.....	261
10.13 Exercícios resolvidos .....	262
10.14 Exercícios propostos .....	271

## **Apêndice A – Algumas propriedades..... 281**

A.1 Propriedades de alguns gases ideais a 25°C .....	281
A.2 Calores específicos a pressão constante de alguns gases .....	281
A.3 Viscosidade de alguns gases .....	282
A.4 Viscosidade de alguns líquidos .....	283
A.5 Propriedades de substâncias a 20°C e 1 bar .....	284

**Apêndice B – Propriedades termofísicas ..... 285**

    B.1 Propriedades termofísicas do ar a 1 bar .....285

    B.2 Propriedades termofísicas da água saturada .....286

    B.3 Propriedades termofísicas de óleo lubrificante novo .....287

**Referências bibliográficas ..... 289**

# Lista dos principais símbolos

Símbolo	Denominação	Unidade
$A$	Área	$m^2$
$a$	Aceleração	$m/s^2$
$c$	Calor específico	$J/(kg.K)$
$c_p$	Calor específico a pressão constante	$J/(kg.K)$
$c_v$	Calor específico a volume constante	$J/(kg.K)$
$d$	Diâmetro	$m$
$d_r$	Densidade ou densidade relativa	
$E$	Energia	$J$
$e$	Energia específica	$J/kg$
$e$	Espessura	$m$
$F$	Força	$N$
$G$	Irradiação	$W/m^2$
$g$	Aceleração da gravidade local	$m/s^2$
$H$	Entalpia	$J$
$h$	Entalpia específica	$J/kg$
$h$	Coeficiente de transferência de calor por convecção	$W/(m^2.K)$
$k$	Razão entre os calores específicos a pressão constante e a volume constante	
$k$	Condutibilidade térmica	$W/(m.K)$
$M$	Massa molar de uma substância pura	$kg/kmol$
$m$	Massa	$kg$
$\dot{m}$	Vazão mássica	$kg/s$
$P$	Perímetro	$m$
$p$	Pressão	$Pa$
$Q$	Calor	$J$
$q$	Calor por unidade de massa	$J/kg$
$\dot{Q}$	Taxa de calor	$W$
$\dot{Q}'$	Taxa de calor por unidade de comprimento	$W/m$
$R$	Constante particular de um gás tido como ideal	$kJ/(kg.K)$

Símbolo	Denominação	Unidade
$\bar{R}$	Constante universal dos gases ideais (= 8314,34)	J/(mol.K)
$S$	Entropia	kJ/K
$s$	Entropia específica	kJ/(kg.K)
$T$	Temperatura	K
$t$	Tempo	s
$U$	Energia interna	J
$u$	Energia interna específica	kJ/kg
$\nabla$	Volume	m <sup>3</sup>
$v$	Volume específico	m <sup>3</sup> /kg
$\dot{V}$	Vazão volumétrica	m <sup>3</sup> /s
$V$	Velocidade	m/s
$W$	Trabalho	kJ
$w$	Trabalho específico ou por unidade de massa	J/kg
$\dot{W}$	Potência	W
$x$	Título de uma mistura líquido-vapor	
$y$	Fração mássica	
$\bar{y}$	Fração molar	
$Z$	Fator de compressibilidade	
$z$	Elevação	m
Símbolos Gregos		
$\beta$	Coeficiente de expansão volumétrica	K <sup>-1</sup>
$\beta$	Coeficiente de desempenho	
$\phi$	Umidade relativa	
$\gamma$	Peso específico	kg/(m <sup>2</sup> .s <sup>2</sup> )
$\eta$	Rendimento térmico	
$\theta$	Diferença de temperatura	K
$\rho$	Massa específica	kg/m <sup>3</sup>
$\sigma$	Produção de entropia	J/K
$\dot{\sigma}$	Taxa de produção de entropia	W/K
$\Omega$	Velocidade angular	s <sup>-1</sup>
$\omega$	Umidade absoluta	kg água/kg ar seco

# Introdução

O presente livro, Energia e Fluidos – Transferência de Calor, é o terceiro da Série Energia e Fluidos e, para o seu adequado uso, é pressuposto que o aluno já tenha adquirido um conjunto mínimo de conhecimentos anteriormente apresentados nos dois primeiros livros da série, dedicados ao estudo da Termodinâmica e da Mecânica dos Fluidos. Esta série é fruto de muitos anos de trabalho didático voltado ao ensino da engenharia, e nela se pretende apre-

sentar os temas essenciais que constituem a área que se costuma denominar Engenharia Térmica ou Ciências Térmicas.

Este texto foi elaborado utilizando-se o Sistema Internacional de Unidades (SI), e espera-se que o aluno tenha o adequado conhecimento deste sistema.

Na Tabela 1 apresentamos algumas unidades de interesse imediato, mesmo que associadas a grandezas que ainda serão definidas ao longo do texto.

Tabela 1 Algumas unidades

Grandeza	Unidade	Símbolo	Equivalências	
Massa	quilograma	kg	–	–
Comprimento	metro	m	–	–
Tempo	segundo	s	–	–
Tempo	minuto	min	–	–
Tempo	hora	h	–	–
Temperatura	grau Celsius	°C	–	–
Força	newton	N	kg.m/s <sup>2</sup>	–
Pressão	pascal	Pa	N/m <sup>2</sup>	kg/(m.s <sup>2</sup> )
Energia	joule	J	N.m	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>2</sup>
Potência	watt	W	J/s	kg.m <sup>2</sup> /s <sup>3</sup>



Observe que a denominação das unidades se escreve com letras minúsculas, mesmo que elas derivem de nomes de pessoas, como, por exemplo, o newton. A única exceção a esta regra é a unidade de temperatura denominada grau Celsius. Note que os símbolos das unidades cujos nomes são derivados de nomes próprios são sempre escrito com letras maiúsculas, por exemplo: N, J, W etc.

Cuidado: unidades não são grafadas no plural; a quantidade cem metros deve ser grafada como 100 m, dez horas como 10 h, e assim por diante. Recomenda-se que entre o numeral e a sua unidade seja deixado um espaço em branco.

Na Tabela 2 apresentamos prefixos das unidades. Note que o prefixo quilo, k, sempre se escreve com letra minúscula.

Tabela 2 Prefixos

Prefixo	Símbolo	Fator multiplicativo	Prefixo	Símbolo	Fator multiplicativo
tera	T	$10^{12}$	mili	m	$10^{-3}$
giga	G	$10^9$	micro	$\mu$	$10^{-6}$
mega	M	$10^6$	nano	n	$10^{-9}$
quilo	k	$10^3$	pico	p	$10^{-12}$

No estudo das ciências térmicas nos deparamos com uma grande quantidade de variáveis, e um problema que se apresenta é o uso do mesmo símbolo para diversas variáveis ou, em certos casos, o uso de diferentes simbologias para a mesma variável em livros distintos. Procurando minorar esse problema, será utilizada ao longo deste livro essencialmente a mesma simbologia utilizada ao longo dos outros livros desta série. Em particular, observamos que optamos por utilizar a letra *V* (vê maiúscula) para simbolizar a *velocidade* e a letra  $\nabla V$  (vê maiúscula cortada) para simbolizar a grandeza *volume*. Em decorrência, o símbolo a ser utilizado para a *vazão* será  $\nabla \nabla V$ , reservando-se a letra *Q* para simbolizar a grandeza *calor*.

Com propósito introdutório, apresentamos a seguir alguns conceitos fundamentais para o desenvolvimento dos assuntos que trataremos ao longo deste livro.

1 SISTEMA E VOLUME DE CONTROLE

Ao estudar um fenômeno físico, podemos utilizar duas metodologias distintas de

observação. A primeira consiste em escolher e identificar uma determinada massa do material objeto de estudo, e observá-la. A segunda consiste em identificar um determinado espaço físico e voltar a atenção para as ocorrências que se dão nesse espaço. Nesse contexto, definimos:

- Sistema: é uma determinada quantidade fixa de massa, previamente escolhida e perfeitamente identificada, que será objeto da atenção do observador.
- Volume de controle: é um espaço, previamente escolhido, que será objeto de atenção do observador, permitindo a análise de fenômenos com ele relacionados.

Ao analisar a definição de sistema, vemos que uma das palavras-chave é “escolhida”, porque cabe a quem for analisar o fenômeno escolher a massa que será objeto de estudo. Essa massa é, física ou virtualmente, separada do meio que a circunda por uma superfície denominada fronteira do sistema, a qual pode se deformar com o passar do tempo. Como a massa do sistema é fixa e perfeitamente identificada, não há nenhum tipo de transferência de massa

através da sua fronteira. Um sistema pode estar fixo ou em movimento em relação a um determinado referencial.

O volume de controle também deve ser escolhido pelo observador. É delimitado por uma superfície denominada superfície de controle, a qual também pode se deformar com o passar do tempo. Note que o volume de controle, assim como um sistema, pode estar em movimento em relação a um sistema de coordenadas e que, normalmente, através da superfície de controle ocorre transferência de massa.

## 2 ALGUMAS PROPRIEDADES

Ao trabalhar com propriedades, verificamos que podemos abordar a matéria constituinte de um sistema do ponto de vista macroscópico ou microscópico. A abordagem microscópica não é o propósito deste texto, embora possa se tornar importante em algumas situações. Por outro lado, estamos diretamente interessados no comportamento global do conjunto de partículas que compõem a matéria, o que recomenda o seu tratamento segundo a visão macroscópica. Essa abordagem nos permite adotar a hipótese de que a matéria objeto de estudo está sempre uniformemente distribuída ao longo de uma determinada região tão diminuta quanto se queira e que, por esse motivo, pode ser tratada como infinitamente divisível, ou seja: como um meio contínuo.

As propriedades de uma determinada substância podem depender ou não da sua massa. As que dependem da massa são chamadas extensivas, e as que não dependem são chamadas intensivas. Como exemplo, tem-se: o volume total de uma determinada quantidade de água é uma propriedade extensiva, enquanto que a temperatura em um determinado ponto dessa massa de água é uma propriedade intensiva. Notemos que somente podemos

pensar em atribuir propriedades à matéria presente em um ponto sob a hipótese de que o meio é contínuo. Essa visão é fundamental porque nos permite, por exemplo, criar uma expressão matemática que descreva o comportamento da temperatura de uma massa sólida em função da posição e do tempo. Isso é algo que faremos algumas vezes ao longo deste texto.

### 2.1 Volume específico, massa específica e peso específico

Estas propriedades específicas têm a característica de serem intensivas e, por esse motivo, se aplicam a matéria sob a hipótese de que o meio analisado é contínuo.

Consideremos, inicialmente, a massa específica de uma substância. Essa propriedade é tradicionalmente simbolizada pela letra grega  $\rho$ , e é definida como:

$$\rho = \lim_{\forall \rightarrow \forall_0} \frac{m}{\forall} \quad (1)$$

Nessa equação, o volume  $\forall_0$  é o menor volume para o qual a substância pode ser tratada como um meio contínuo.

A unidade da massa específica no Sistema Internacional de Unidades é  $\text{kg/m}^3$ .

O volume específico de uma substância,  $\nu$ , é uma propriedade intensiva que pode ser definida como sendo o inverso da massa específica, ou seja:

$$\nu = \frac{1}{\rho} \quad (2)$$

No Sistema Internacional de Unidades, sua unidade é  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

O peso específico é definido como sendo igual ao produto da massa específica pela aceleração da gravidade, ou seja:

$$\gamma = \rho g \quad (3)$$

No Sistema Internacional de Unidades, sua unidade é  $\text{N/m}^3$ .

Observamos que, para a realização de cálculos, adotamos neste livro o valor  $9,81 \text{ m/s}^2$  para a aceleração da gravidade.

## 2.2 Pressão

Pressão,  $p$ , é uma propriedade intensiva definida como:

$$p = \lim_{A \rightarrow A_0} \frac{F_n}{A} \quad (4)$$

Nessa equação,  $F_n$  é a magnitude da componente normal da força  $F$  aplicada sobre a área  $A$  e  $A_0$  é a menor área para a qual o meio puder ser tratado como sendo contínuo.

No Sistema Internacional de Unidades, sua unidade é o pascal:  $1 \text{ Pa} = 1 \text{ N/m}^2$ , sendo com frequência utilizados os seus múltiplos, kPa e MPa. Outras unidades usuais são: o bar ( $1 \text{ bar} = 100000 \text{ Pa}$ ) e a atmosfera ( $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ ). A unidade pascal foi adotada em homenagem ao físico, matemático e filósofo Blaise Pascal.

O meio mais comum de medição desta propriedade resulta na determinação da diferença entre duas pressões e, nesse caso, a pressão medida é dita relativa. A pressão relativa de uso mais comum consiste naquela determinada utilizando-se instrumentos denominados manômetros, os quais medem, usualmente, a diferença entre a pressão desconhecida e a atmosférica. A pressão assim medida é denominada pressão manométrica ou efetiva, e é, por definição, a diferença entre a pressão absoluta e a pressão atmosférica, ou seja:

$$p_{man} = p_{abs} - p_{atm} \quad (5)$$

onde  $p_m$  é a pressão manométrica,  $p$  é a pressão absoluta e  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica local. A Figura 1 esquematiza o relacionamento entre as pressões definido por meio da Equação (5).

A pressão atmosférica é medida utilizando-se um instrumento denominado

barômetro e, por esse motivo, é frequentemente denominada pressão barométrica. Dessa forma, a determinação da pressão absoluta, muitas vezes, se dá pela medida da pressão manométrica, à qual é adicionado o valor da pressão atmosférica local.

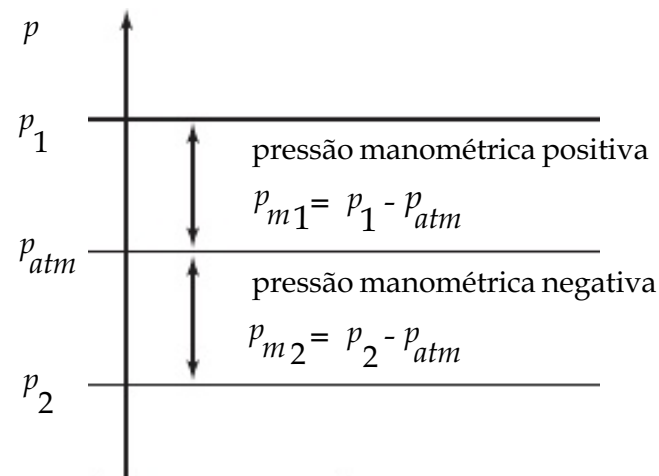


Figura 1 Pressão absoluta e manométrica

## 2.3 Densidade relativa

A grandeza densidade relativa, também denominada densidade ou gravidade específica, é uma propriedade adimensional definida como sendo a relação entre a massa específica de um fluido e uma de referência, podendo, assim, ser definida para sólidos, líquidos e para gases ou vapores.

Para sólidos e líquidos, esta propriedade é definida como sendo a razão entre a massa específica da substância sob análise e a da água na fase líquida. Opta-se, neste texto, pelo uso de um valor de referência fixo, tendo-se para tal escolhido a massa específica da água a  $4^\circ\text{C}$  e  $1 \text{ bar}$ , que é igual a  $1000 \text{ kg/m}^3$ , ou seja:

$$d_r = \frac{\rho}{\rho_{\text{água a } 4^\circ\text{C e } 1 \text{ bar}}} \quad (6)$$

## 3 AVALIAÇÃO DA MASSA ESPECÍFICA DE ALGUNS FLUIDOS

É comum, ao conduzir a solução de problemas de mecânica dos fluidos, ser ne-

cessário obter informações sobre propriedades de substâncias.

Não podemos deixar de observar que, em princípio, a massa específica das substâncias depende da sua temperatura e pressão. Consideremos, inicialmente, um gás ideal. Nesse caso podemos determinar a sua massa específica utilizando a

equação de estado dos gases ideais, resultando em:

$$\rho = p / (RT)$$

(7)

Nessa expressão,  $p$  é a pressão absoluta do gás,  $T$  é a sua temperatura absoluta e  $R$  é a constante do gás. Na Tabela 3 apresentamos valores para constantes de alguns gases ideais.

Tabela 3 Constantes de gases

Gás	Ar seco	Oxigênio	Nitrogênio	Dióxido de carbono	Argônio	Metano	Hélio
Constante (J/(kg.K))	287	260	297	189	208	412	2077

Note que, utilizando-se a constante em J/(kg.K), devemos realizar os cálculos utilizando a pressão em Pa, e a Equação (7) nos proporcionará a massa específica em kg/m³.

No caso dos sólidos e líquidos, a massa específica varia de forma mais fraca com a pressão. Para ilustrar esse fato, apresentamos na Tabela 4 alguns valores da massa específica da água saturada na fase líquida.

Tabela 4 Massa específica da água na fase líquida

Temperatura (°C)	10	20	30	40	50
Massa específica (kg/m³)	999,7	998,2	995,6	992,2	988,0

Observamos que os valores constantes da Tabela 4 foram determinados considerando-se a água como líquido saturado.

#### 4 A TRANSFERÊNCIA DE CALOR E A TERMODINÂMICA

Voltemos à termodinâmica, em particular a uma de suas leis. A primeira lei da termodinâmica, que, em essência, consiste no princípio da conservação da energia, pode se apresentar segundo diversas formulações matemáticas. Vamos nos atentar a duas delas. A primeira consiste na formulação na forma de taxa aplicada a um sistema, a saber:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt}$$

(8)

Nessa equação,  $\dot{Q}$  é a taxa de calor que observada entre o sistema e o meio, e  $\dot{W}$  é a potência desenvolvida pelo sistema. A derivada  $dE/dt$  estabelece como a energia da massa constituinte do sistema varia ao longo do tempo. Observemos a Figura 2. Ela representa um sistema com massa  $m$  ao qual é adicionada a taxa de calor  $\dot{Q}_a$  e que rejeita para o meio a taxa de calor  $\dot{Q}_r$ . Consideremos que não haja transferência de energia por trabalho entre esse sistema e o meio. Nesse caso, a aplicação da primeira lei da termodinâmica ao fenômeno que estamos observando resulta em:

$$\dot{Q}_a + \dot{Q}_r = \frac{dE}{dt}$$

(9)

Ou seja: a taxa de variação da energia da massa da substância constituinte do sis-

tema é igual à soma algébrica das taxas de calor observadas na fronteira do sistema.

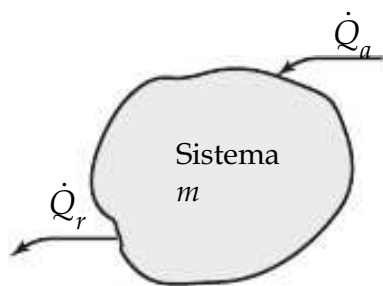


Figura 2 Sistema

A segunda formulação da primeira lei da termodinâmica de interesse é aquela aplicada a um volume de controle que tem um número finito de entradas e de saídas nas quais o escoamento do fluido é uniforme:

$$\begin{aligned} \dot{Q}_{VC} + \sum \dot{m}_e \left( h_e + \frac{V_e^2}{2} + gz_e \right) = \\ = \frac{\partial E}{\partial t} + \dot{W}_{VC} + \sum \dot{m}_s \left( h_s + \frac{V_s^2}{2} + gz_s \right) \end{aligned} \quad (10)$$

Nessa equação,  $\dot{Q}_{VC}$  é a taxa de calor observada na superfície de controle,  $h$  e  $V$  são, respectivamente, a entalpia e a velocidade média do fluido nas seções de entrada e saída e  $z$  é cota dessas seções. Completamente,  $\dot{W}_{VC}$  é a potência mecânica

desenvolvida pelo volume de controle e o termo  $\partial E / \partial t$  é a derivada parcial da energia da massa contida no volume de controle em relação ao tempo.

Consideremos o volume de controle esquematizado na Figura 3. Ele tem apenas uma entrada e uma saída e, através dele, escoam um fluido. A Equação (10) permite correlacionar os fenômenos que observamos na superfície de controle com a taxa de variação da energia da massa presente no interior do volume de controle com o tempo.

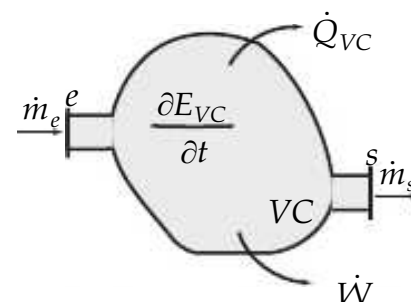


Figura 3 Volume de controle

Ressaltamos, então, que nestas representações matemáticas da primeira lei da termodinâmica existe um termo comum, que é a taxa de calor observada entre o sistema ou volume de controle e o meio. Conhecer esse termo é, em essência, o objetivo da *transferência de calor*.

# INTRODUÇÃO À TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA POR CALOR

A primeira lei da termodinâmica formulada para um sistema na forma de taxa apresenta dois termos básicos de transferência de energia, por trabalho e por calor, aos quais se acrescenta um termo referente à variação da energia do sistema. O estudo do tópico *transferência de energia por calor* terá por objetivo compreender, equacionar, buscar meios e procedimentos para avaliar o termo da primeira lei referente a esse processo de transferência de energia por calor. Devemos também nos ater ao fato de que o termo *transferência de calor*, usualmente utilizado na literatura, não é conceitualmente correto, porque nele está embutida a ideia de que calor é algo que pode ser “tirado” de um local e “transportado” para outro. Essa ideia, subjacente ao termo, é essencialmente conflitante com o fato de que calor é um fenômeno de fronteira, não se identificando essa grandeza em qualquer outro local que não seja uma superfície, a qual pode ser, por exemplo, a de um volume de controle ou aquela que constitui uma fronteira de um sistema. Entretanto,

como o uso do termo *transferência de calor* faz parte da cultura da engenharia para denominar os fenômenos que estudaremos, mesmo sendo inadequado, nós o utilizaremos ao longo deste texto.

## 1.1 CONDUÇÃO

Esta forma de transferência de calor é aquela que ocorre em uma substância estática devido única e exclusivamente a um gradiente de temperatura nela existente. Qualificamos a substância como estática para indicar que esse modo de transferência de calor ocorre sem que haja movimento macroscópico relativo entre as partículas que a constituem. Considere, por exemplo, uma barra de aço que esteja inicialmente na temperatura ambiente. Nós podemos pegá-la com nossas mãos e colocar uma das suas extremidades em contato com um brazeiro. Imediatamente, a temperatura dessa extremidade começará a se elevar e, com o tempo, energia será transferida ao restante da barra até que ela atinja uma tempera-



tura que impeça o toque das nossas mãos. O processo de transferência de calor que ocorreu através da matéria constituinte da barra é denominado *condução* e é descrito pela *lei de Fourier*, que na sua forma unidimensional é matematicamente estabelecida como:

$$\dot{Q} = -k A \frac{dT}{dx} \quad (1.1)$$

Nessa equação:

- $\dot{Q}$  é a taxa temporal de transferência de energia por calor, denominada *taxa de calor* ou *taxa de transferência de calor*, J/s ou W. Não nos esqueçamos de que o termo taxa de transferência de calor é largamente utilizado em toda a literatura sobre o assunto;
- $A$  é a área através da qual ocorre a transferência de calor e que denominamos *área de transferência de calor*, m<sup>2</sup>. Os termos *área de troca de calor* e *área de troca térmica* também são costumeiramente utilizados;
- $T$  é a temperatura, K. Como diferenças de temperatura na escala kelvin são iguais às na escala Celsius, usamos al-

ternativamente a temperatura em graus Celsius;

- $x$  é a coordenada na direção em que ocorre o processo de transferência de calor, m; e
- $k$  é uma propriedade da substância denominada *condutibilidade* ou *condutividade térmica*, e a sua unidade no Sistema Internacional de Unidades é W/(m.K).

A lei de Fourier, na sua forma unidimensional, também pode ser expressa como:

$$\dot{Q}'' = -k \frac{dT}{dx} \quad (1.2)$$

Nessa equação,  $\dot{Q}''$  é a quantidade de energia transferida por calor por unidade de tempo e por unidade de área, que denominamos *fluxo de calor*, e sua unidade no Sistema Internacional de Unidades é W/m<sup>2</sup>. É uma grandeza local que usualmente varia de ponto para ponto da superfície através da qual identificamos a taxa de calor  $\dot{Q}$ .

Devemos observar que a condutibilidade térmica dos materiais varia com a temperatura. Na Figura 1.1 observamos o comportamento da condutibilidade térmica em função da temperatura de alguns sólidos.

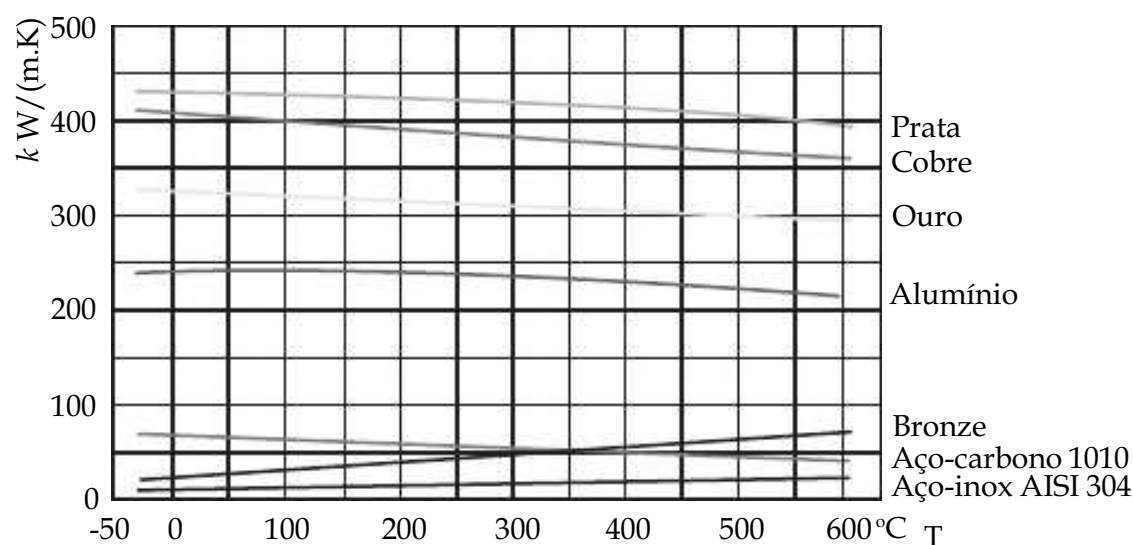


Figura 1.1 Condutibilidade térmica *versus* temperatura

Observe a Figura 1.2. Quando a derivada da temperatura em relação à variável  $x$  é negativa, a temperatura estará decrescendo à medida que o valor de  $x$  aumenta.

Como o fluxo de calor é causado por diferença de temperatura e como ele ocorre de temperaturas maiores para menores, seu sentido será o do eixo  $x$ , o que justifica o



sinal negativo da Equação (1.2). Naturalmente, se a derivada for positiva, o sentido do fluxo de calor será o inverso.

Materiais que apresentam altas condutibilidades térmicas são chamados bons condutores de calor; nessa categoria, encontram-se os metais. Os materiais que apresentam baixas condutibilidades térmicas são chamados isolantes térmicos, por exemplo: borracha, madeira etc. Observamos que essa propriedade varia com a temperatura, e essa variação pode, dependendo do fenômeno analisado, ser importante ou

não. Apresentamos na Tabela 1.1 alguns valores dessa propriedade para alguns materiais de uso comum, que serão utilizados com frequência na solução de exercícios.

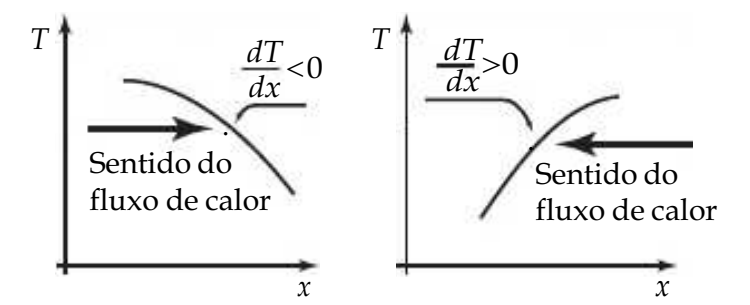


Figura 1.2 Sentido do fluxo de calor

Tabela 1.1 Propriedades de alguns materiais a 20°C

Material	Massa específica $\rho$ (kg/m <sup>3</sup> )	Calor específico $c_p$ (J/kg.K)	Condutibilidade térmica $k$ (W/m.K)
Aço-carbono – AISI 1010	7855	431	60,7
Aço inoxidável – tipo 304	7902	472	14,7
Alumínio	2703	896	236
Borracha vulcanizada macia	1100	2,01	0,13
Bronze	8530	376	115
Cobre	8936	383	402
Fibra de vidro – manta	24	–	0,0376
Fibra de vidro – manta	48	–	0,0325
Madeira compensada	545	1,22	0,12
Isopor (peças moldadas a partir de prensagem de miniesferas)	16	1210	0,04

A lei de Fourier nos permite, por exemplo, analisar o processo de transferência de calor através de uma placa plana. Embora esse assunto seja rediscutido no próximo capítulo, podemos afirmar que, se o processo de transferência de calor por condução ocorrer de forma unidimensional, sem geração de calor e em estado estacionário, o gradiente de temperatura no interior da placa será linear, conforme ilustrado na Figura 1.3.

Aplicando a lei de Fourier, obtemos:

$$\dot{Q}'' = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{T_2 - T_1}{L} = k \frac{T_1 - T_2}{L}$$

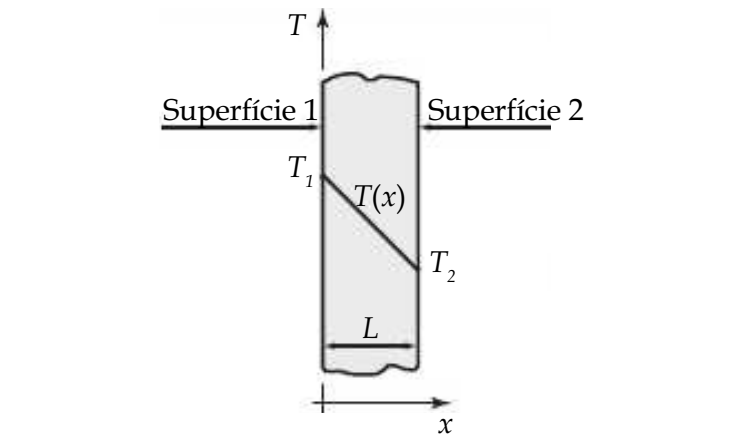


Figura 1.3 Distribuição de temperatura em placa plana

Assim, se as temperaturas das superfícies 1 e 2 forem, respectivamente, 60°C e 20°C, se a placa tiver espessura de 100 mm e se ela for constituída por madeira com

condutibilidade térmica igual a  $0,15 \text{ W/(m.K)}$ , o fluxo de calor será:

$$\dot{Q}'' = 0,15 \frac{60 - 20}{0,1} = 60 \text{ W/m}^2$$

Ou seja, através de uma área de  $1,0 \text{ m}^2$ , tomada perpendicularmente ao eixo  $x$  no interior da placa, ocorrerá uma taxa de transferência de calor igual a  $60 \text{ J/s}$ . Se a área da parede for igual a  $3,0 \text{ m}^2$ , a taxa de calor através dela será:

$$\dot{Q} = \dot{Q}'' A = 60 \cdot 3 = 180 \text{ W}$$

## 1.2 CONVECÇÃO

O processo de transferência de calor por convecção é aquele que ocorre entre uma superfície e um fluido. Como exemplo, podemos considerar a superfície externa da parede vertical de um forno doméstico. Quando o forno está em uso, essa superfície apresenta temperatura mais elevada que a do meio externo. O ar ambiente em contato com a parede é aquecido, sua temperatura aumenta, seu volume específico também aumenta e, conseqüentemente, sua massa específica é reduzida, o que provoca a movimentação do ar na direção vertical, sentido ascendente, provocando a sua renovação e permitindo o contínuo aquecimento da corrente de ar assim criada. Esse processo de transferência de calor é denominado *convecção natural*. O termo *natural* é devido ao fato de que, neste caso, a movimentação do fluido é causada pelo próprio processo de transferência de calor, não havendo nenhum tipo de ação externa. Consideremos, agora, que a parede do forno seja resfriada por uma corrente de ar criada por um meio não natural, por exemplo, pelo uso de um ventilador. Nesse caso, o processo de transferência de calor é denominado *convecção forçada*.

A taxa de calor por convecção, natural ou forçada, entre um fluido e uma super-

fície, pode ser quantificada por intermédio da expressão:

$$\dot{Q} = hA(T_s - T_\infty) \quad (1.3)$$

Nessa expressão:

- $\dot{Q}$  é a taxa de calor, W;
- $A$  é a área da superfície em contato com o fluido através da qual observamos a transferência de calor por convecção,  $\text{m}^2$ ;
- $h$  é o *coeficiente médio de transferência de calor por convecção* na área  $A$ ,  $\text{W/(m}^2\text{.K)}$ , que usualmente também é denominado *coeficiente convectivo*;
- $T_s$  é a temperatura da superfície,  $^\circ\text{C}$ ;
- $T_\infty$  é a temperatura do fluido,  $^\circ\text{C}$ , longe da superfície.

Nos processos de convecção, supomos que a temperatura simbolizada por  $T_\infty$  é a temperatura do fluido em uma posição suficientemente distante da área de transferência de calor para não ser influenciada pelo processo em si, de forma que ela é constante ao longo do tempo. Naturalmente, há situações nas quais se deseja avaliar taxas de transferência de calor entre uma superfície e um fluido cuja temperatura esteja variando; nesse caso não se utiliza o símbolo  $T_\infty$ .

A partir da Equação (1.3), podemos obter o fluxo de calor, que é dado por:

$$\dot{Q}'' = \lim_{A \rightarrow A_0} \frac{\dot{Q}}{A} = h_x(T_s - T_\infty) \quad (1.4)$$

Nessa expressão, o termo  $A_0$  é a menor área da superfície na qual observamos a taxa de calor na qual podemos considerar o meio como contínuo e, nesse caso, o coeficiente  $h_x$  é uma grandeza local que usualmente varia de ponto para ponto ao longo da superfície  $A$ .

A Equação (1.4), que nos fornece o fluxo de calor por convecção, é denominada *lei do resfriamento de Newton*. Note que o fluxo de calor também é uma grandeza local e, dependendo das condições influen-

ciadoras do processo de transferência de calor por convecção, poderá variar de ponto para ponto da superfície.

Consideremos uma superfície horizontal, estática, quente, posicionada em um plano  $x$ - $z$  e em contato com um fluido em menor temperatura que escoar paralelamente a ela, conforme esquematizado na Figura 1.4. Certamente ocorrerá transferência de calor por convecção e o fenômeno será governado pela lei do resfriamento de Newton. Lembremo-nos do princípio da aderência. Ele nos garante que as partículas fluidas em contato com a superfície aquecida adquirem a velocidade dessa superfície. Esse fato causa a formação de um perfil de velocidades conforme esquematizado na Figura 1.4. Similarmente, a temperatura das partículas de fluido em contato com a superfície será igual à da superfície,  $T_s$ , e distante desta será  $T_\infty$ , o que nos leva a observar a formação do perfil de temperaturas esquematizado na Figura 1.4. Como as partículas de fluido que estão junto da superfície estão estáticas, podemos aplicar a lei de Fourier e obter o fluxo de calor no fluido para  $y = 0$  em uma determinada posição definida pelas coordenadas  $x$  e  $z$ :

$$\dot{Q}''(x, z) = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} \quad (1.5)$$

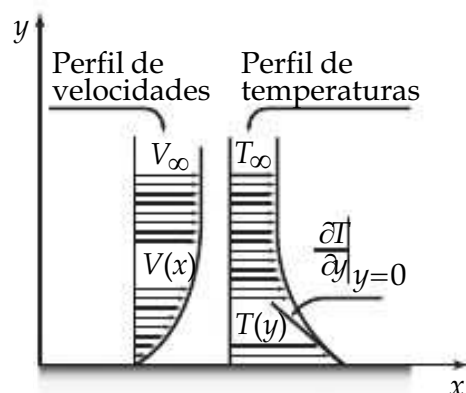


Figura 1.4 Perfis de velocidade e de temperatura

Observe que o índice  $f$  indica que a condutibilidade  $k_f$  é a do fluido. O fluxo de calor pode estar variando ao longo da superfície. Para o mesmo local para o qual foi

aplicada a Equação (1.5), podemos expressar o fluxo utilizando a lei do resfriamento de Newton; considerando que a temperatura da superfície no ponto em que estamos avaliando o fluxo é simbolizada por  $T_s$ , obtemos:

$$\dot{Q}''(x, z) = -k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0} = h_x (T_s - T_\infty) \quad (1.6)$$

Isolando o coeficiente convectivo, obtemos:

$$h_x = \frac{-k_f \left. \frac{\partial T}{\partial y} \right|_{y=0}}{(T_s - T_\infty)} \quad (1.7)$$

Essa expressão é válida para qualquer posição  $(x, z)$  da superfície estudada e define o coeficiente convectivo nesse local.

Frequentemente, não estamos interessados em avaliações de fluxos de calor em determinados locais, e sim no efeito global em uma determinada área  $A$  pré-escolhida. Nesse caso poderemos optar pelo uso do coeficiente convectivo médio, já apresentado na Equação (1.3), dado por:

$$h = \frac{1}{A} \int_A h_x dA \quad (1.8)$$

Já compreendendo um pouco melhor esse processo, surge a questão: a transferência de calor por convecção depende de quais variáveis? Podemos enumerar algumas que envolvem aspectos térmicos, fluidodinâmicos, características próprias do fluido propriamente dito e as condições da superfície.

A primeira variável importante é a diferença entre a temperatura da superfície e a temperatura do fluido longe dessa superfície. Quanto maior essa diferença, maior será o fluxo de calor. Outras variáveis importantes do problema são aquelas que descrevem o escoamento. Por exemplo, se o movimento do fluido se dá de modo

forçado por se utilizar, por exemplo, um ventilador, deveremos obter fluxos de calor maiores do que aqueles obtidos por movimentação natural. Se o escoamento for forçado, sua direção também é importante, pois deveremos ter fluxos de calor diferentes para escoamento paralelo, oblíquo ou perpendicular à superfície.

As características do fluido também são importantes, já que a nossa experiência do dia a dia nos mostra que existe uma grande diferença entre resfriar um corpo por convecção utilizando ar ou água na fase líquida. Por fim, não devemos nos esquecer que a geometria da superfície influi sobremaneira no escoamento e que a sua rugosidade pode desempenhar um papel importante no processo de transferência de calor.

Esse conjunto de comentários indica que o processo de transferência de calor por convecção é complexo e envolve um grande número de variáveis. Por outro lado, a lei do resfriamento de Newton é uma expressão bastante simples. Esse fato sugere a seguinte pergunta: como então esta lei aparentemente tão simples pode governar este fenômeno tão complexo? A resposta a essa questão está no fato de que, realmente, o coeficiente convectivo  $h$  depende de um grande número de variáveis e, muitas vezes, a sua determinação é complexa. Isso indica que, de maneira geral, a dificuldade encontrada na solução de problemas que envolvem convecção está ligada à determinação de coeficientes convectivos, que são, frequentemente, avaliados por meio do uso de correlações desenvolvidas a partir de trabalho experimental e disponíveis na literatura.

A magnitude do coeficiente convectivo depende de todas as variáveis já comentadas. Faixas típicas são apresentadas na Tabela 1.2.

Processos de transferência de calor por convecção também podem envolver mudança de fase, tal como a que ocorre em um condensador de vapor de uma central

termoelétrica ou em um evaporador de um sistema de refrigeração por compressão de vapor.

Tabela 1.2 Faixas típicas de coeficientes convectivos

Fluido – processo	$h$ (W/(m <sup>2</sup> .K))
Ar, convecção natural	6-25
Vapor superaquecido ou ar, convecção forçada	25-250
Óleo, convecção forçada	50-1500
Água, convecção forçada	250-20000
Água, ebulição	3000-60000
Vapor, condensação	6000-100000

### 1.3 RADIAÇÃO

Matéria em temperatura não nula emite energia por um mecanismo que ora pode ser tratado como emissão de ondas eletromagnéticas, ora como a emissão de fótons, a qual é absorvida pela sua vizinhança, e que denominaremos *radiação térmica*. Para efeito puramente didático, trataremos a radiação térmica como ocorrendo por intermédio de ondas eletromagnéticas.

Notamos que a intensidade segundo a qual a energia é emitida pela matéria depende, em essência, da sua temperatura, o que caracteriza a radiação térmica como um processo de transferência de calor do corpo para a sua vizinhança.

Esse fenômeno é facilmente percebido de diversas formas. Podemos notar a sua existência ao tomar sol na praia, e nesse caso estaremos observando um processo em que estamos recebendo energia que chega a nós por meio de radiação térmica. Podemos, também, aquecer uma barra de ferro e notar que, à medida que a sua temperatura se eleva, a sua superfície emite energia térmica de forma crescente, mudando continuamente de cor. Como as superfícies do meio em que vivemos estão em temperatura não nula, elas estão continuamente

emitindo energia e, como todas estão emitindo uma em presença da outra, todas estão também recebendo. Não podemos nos esquecer de que meios não sólidos, como os gases e vapores, também emitem e podem participar ativamente, ou não, de processos de transferência de calor por radiação.

Como esse processo se dá por ondas eletromagnéticas, ele não requer um meio material para ocorrer, sendo que, de fato, usualmente os meios materiais contribuem no sentido de dificultar o processo. Por

exemplo, quando você está na sombra de uma árvore, ela (o meio material) está limitando a transferência de calor por radiação do sol para seu corpo. Do ponto de vista da transferência de calor, observamos que é importante apenas a chamada radiação térmica, que é constituída por parte do espectro eletromagnético, conforme ilustrado na Figura 1.5. Por esse motivo, dizemos de forma simplista que a transferência de calor por radiação envolve apenas parte do espectro eletromagnético que engloba a faixa do visível.

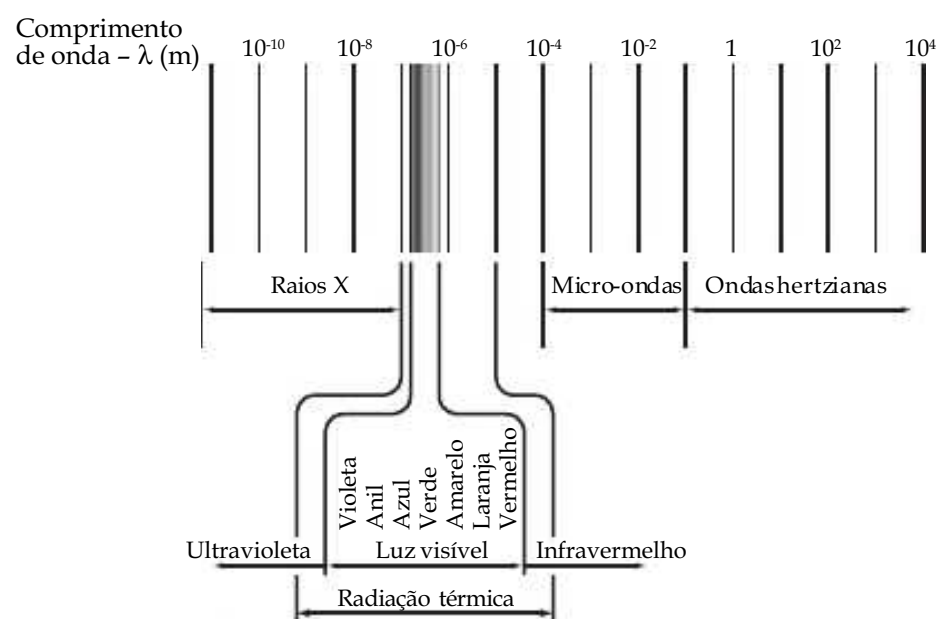


Figura 1.5 Espectro eletromagnético

As características da radiação emitida por um corpo dependem da natureza da sua superfície e da sua temperatura. Assim, se uma barra de ferro aquecida está vermelha, significa que ela está emitindo luz visível predominantemente nos comprimentos de onda que nossos olhos veem como vermelho.

Denominamos um corpo ideal que irradia perfeitamente *corpo negro*, e a taxa de emissão de energia radiante por esse corpo é dada pela expressão:

$$\dot{Q}_n = \sigma AT^4 \quad (1.5)$$

Nessa equação:

- $\dot{Q}_n$  é a taxa de energia radiante emitida pela superfície do corpo negro, em W;

- $\sigma$  é uma constante dimensional, *constante de Stefan-Boltzmann*, igual a  $5,67 \times 10^{-8} \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$ ;
- $A$  é a área por meio da qual a superfície do corpo negro emite energia radiante, em  $\text{m}^2$ ; e
- $T$  é a temperatura da superfície emissora medida em escala absoluta, em K.

Devemos observar que a taxa de calor radiante emitida por um corpo negro por unidade de área da superfície emissora é dada por  $\dot{Q}_n'' = \dot{Q}_n / A$  e coincide com uma grandeza denominada *poder emissivo* do corpo negro, usualmente representado pela letra  $E_n$ , ou seja:  $\dot{Q}_n'' = E_n = \sigma T^4$ .

Consideremos, agora, um corpo real. A taxa de emissão de energia radiante desse



corpo para a vizinhança é uma fração da taxa que ele emitiria se fosse um corpo negro e, por esse motivo, é dada por:

$$\dot{Q} = \epsilon \sigma A T^4 = \epsilon A E_n \quad (1.6)$$

Identificamos nessa equação um novo termo,  $\epsilon$ , menor ou igual à unidade, que é uma propriedade da superfície emissora denominada *emissividade* ou *emitância*, que depende das suas características e não é necessariamente a mesma para todos os comprimentos de onda emitidos.

Assim como uma superfície emite, simultaneamente ela pode receber radiação de diversas origens, tais como: solar, emitida por uma chama, por um painel de resistências elétricas radiantes, por lâmpadas, etc. A taxa de energia radiante incidente por unidade de área, nessa superfície, é denominado *irradiação*, sua unidade é  $\text{W/m}^2$  e a simbolizamos pela letra  $G$ . Dependendo das características da superfície e da radiação incidente, a irradiação pode ser *absorvida*, *refletida* ou *transmitida* pela superfície. A quantificação do fluxo de energia radiante absorvido por uma superfície pode ser realizada a partir do conhecimento de uma propriedade adimensional da superfície denominada *absortividade*, simbolizada pela letra grega  $\alpha$ .

$$\alpha = \frac{G_{abs}}{G} \quad (1.7)$$

Nessa equação,  $G_{abs}$  é o fluxo de energia efetivamente absorvido pela superfície, e  $G$ , o incidente.

Consideremos uma superfície real. Sua absortividade depende das suas próprias características e das da radiação incidente, além do que a sua magnitude poderá diferir da magnitude da sua emissividade,  $\epsilon$ . Uma superfície que tenha como característica o fato de que a sua emissividade e a sua absortividade independem do comprimento de onda é denominada cinza. Se, além disso,

a emissão e a absorção de energia radiante não dependerem do ângulo de emissão ou de incidência, a denominamos difusa. Com o propósito de apresentar formulações simplificadas para os problemas de radiação, costumeiramente se adota uma hipótese adicional, que é a de que a superfície, além de ser cinza e difusa, tem a sua absortividade igual à sua emissividade. Essa hipótese é adotada ao longo de todo este texto.

Até agora, discutimos somente o fato de que uma superfície pode emitir ou absorver radiação. Consideremos, então, dois corpos distintos, em temperaturas diferentes, estando um na presença do outro. Nesse caso, os dois emitem e os dois recebem, de forma que podemos identificar uma transferência líquida de energia radiante entre eles. Um caso particular é aquele de um corpo 1, cuja pequena superfície cinza difusa e na temperatura  $T_1$  esteja completamente envolvida por um corpo 2, cuja superfície interna é também cinza difusa e na temperatura  $T_2$ , diferente de  $T_1$ , conforme esquematizado na Figura 1.6. Se o processo de transferência de calor estiver ocorrendo em regime permanente, pode ser demonstrado que a taxa líquida de transferência de calor por radiação da superfície 1 para a 2 será dada por:

$$\dot{Q} = \dot{Q}'' A_1 = A_1 \epsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.8)$$

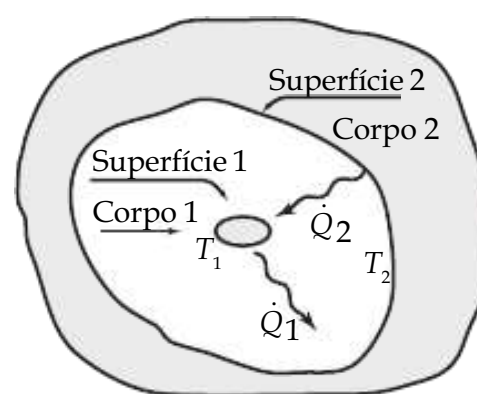


Figura 1.6 Transferência de calor por radiação

Note que, nessa equação, a área  $A_1$  é a área da superfície cinza difusa 1, da qual é

transferida a taxa líquida de calor  $\dot{Q}$  para a superfície negra 2, e  $\dot{Q}''$  é o fluxo líquido de calor que deixa a superfície 1 e atinge a superfície 2. Como estamos trabalhando sob a hipótese de regime permanente, energia deve ser suprida ao corpo 1 mantendo a sua energia interna e, simultaneamente, o corpo 2 deverá permanecer transferindo energia para seu meio externo, de forma a, também, manter constante a sua energia interna. Observe que esse modelo, uma grande superfície cinza difusa envolvendo uma pequena superfície cinza difusa, pode ser aplicado a situações nas quais uma superfície real está imersa em um meio com temperatura aproximadamente uniforme que pode ser tratado como se fosse uma superfície cinza difusa, por exemplo, um trecho de tubulação de transporte de um fluido aquecido em um ambiente industrial. Nesse caso entendemos que a tubulação é um corpo com pequena área superficial totalmente envolto pelo restante da fábrica suposta em uma temperatura uniforme. Assim sendo, o trecho de tubulação seria o corpo 1, sua superfície externa seria a superfície 1 e o ambiente industrial seria o corpo 2 que estaria envolvendo o corpo 1.

A Equação (1.8) pode ser algebricamente manipulada de forma a resultar:

$$\begin{aligned} \dot{Q}'' &= \varepsilon \sigma (T_1^4 - T_2^4) = \\ &= \varepsilon \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1^2 - T_2^2) \end{aligned} \quad (1.10)$$

$$\begin{aligned} \dot{Q}'' &= \varepsilon \sigma (T_1^2 + T_2^2) \\ &(T_1 + T_2) (T_1 - T_2) \end{aligned} \quad (1.11)$$

Podemos, agora, definir um *coeficiente de transferência de calor por radiação* que será dado por:

$$h_{rad} = \varepsilon \sigma (T_1^2 + T_2^2) (T_1 + T_2) \quad (1.12)$$

Esse coeficiente depende fortemente das temperaturas  $T_1$  e  $T_2$ . Substituindo-o na Equação (1.11), obtemos:

$$\dot{Q}'' = h_{rad} (T_1 - T_2) \quad (1.13)$$

Essa equação tem a vantagem de ser similar à lei do resfriamento de Newton e, no caso de ocorrerem simultaneamente processos de transferência de calor por radiação e por convecção, podemos equacioná-los, obtendo:

$$\dot{Q}'' = (h_{conv} + h_{rad}) (T_1 - T_2) \quad (1.14)$$

## 1.4 A TRANSFERÊNCIA DE CALOR E A PRIMEIRA LEI DA TERMODINÂMICA

Consideremos, inicialmente, um sistema com massa  $m$  conforme o ilustrado na Figura 1.7. A primeira lei da termodinâmica formulada para sistema na forma de taxa nos diz que:

$$\dot{Q} - \dot{W} = \frac{dE}{dt} = \dot{E} \quad (1.15)$$

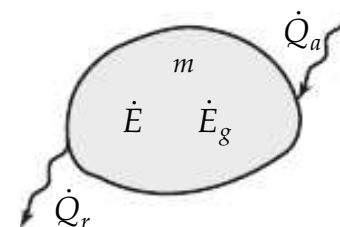


Figura 1.7 Transferência de calor em sistema

Afastemo-nos por instantes da convenção de sinais adotada ao estudar termodinâmica e consideremos que a taxa de calor  $\dot{Q}$  seja dada por  $\dot{Q} = \dot{Q}_a - \dot{Q}_r$ , sendo que  $\dot{Q}_a$  é o módulo da taxa de transferência de calor do meio para o sistema e  $\dot{Q}_r$  é o módulo da taxa de transferência de calor do sistema para o meio. Note que o índice  $a$  indica que energia está sendo adicionada ao sistema e que o índice  $r$  indica que energia está sendo rejeitada pelo sistema. Então:

$$\dot{Q}_a - \dot{Q}_r = \dot{E} + \dot{W} \quad (1.16)$$

Com base nas hipóteses adotadas ao estudar termodinâmica, podemos reafirmar



que um sistema somente pode interagir com o meio por intermédio de calor e trabalho. Assim, se uma corrente elétrica percorre o sistema provocando um aumento da sua energia interna, tratamos esse fenômeno como um processo de transferência de energia por trabalho. Ao estudar transferência de calor, costumamos substituir o termo  $\dot{W}$  por outro que é denominado, inadequadamente, *taxa de geração de energia*, o qual substitui todo e qualquer processo de adição de energia para o sistema que não seja por calor, incluindo, por exemplo, passagem de corrente elétrica, reações nucleares e químicas. O novo símbolo para esse termo é  $\dot{E}_g$ , que, substituído na Equação (1.16), resulta em:

$$\dot{E} = \dot{Q}_a - \dot{Q}_r + \dot{E}_g \quad (1.17)$$

Em determinadas situações, nas quais podemos supor que a taxa de geração de calor é proporcional ao volume, é conveniente definir uma *taxa volumétrica de geração de calor*:

$$\dot{Q}''' = \frac{\dot{E}_g}{V} \quad (1.18)$$

Devemos observar que, dado um sistema, nosso propósito ao estudar transferência de calor será, usualmente, determinar  $\dot{Q}_a$  e  $\dot{Q}_r$ .

## 1.5 BALANÇO DE ENERGIA EM SUPERFÍCIES

Voltemos ao caso de transferência de calor sem geração e em regime permanente através de uma placa. Podemos supor que ela está imersa em um meio fluido, por exemplo, ar, conforme ilustrado na Figura 1.8. O ar em contato com a superfície 1 da placa está, longe da placa, na temperatura  $T_{\infty 1}$ , mais elevada do que a temperatura  $T_1$ . Por esse motivo ocorre a transferência de calor por convecção do ar para a placa observada na superfície 1. Similarmente, o ar

em contato com a superfície 2 está, longe da placa, na temperatura  $T_{\infty 2}$ , que é mais baixa do que a temperatura  $T_2$ . E, por haver essa diferença, ocorre a transferência de calor por convecção da placa para o ar observada na superfície 2. Além disso, podemos considerar que simultaneamente ocorre transferência de calor por radiação entre a placa e o meio que a cerca.

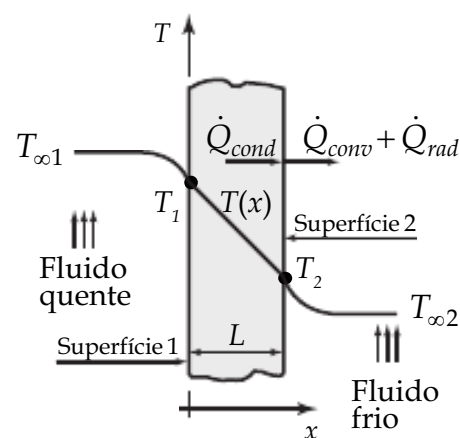


Figura 1.8 Taxa de calor em placa

Vamos analisar a transferência de calor através da superfície 2. Ela recebe a taxa  $\dot{Q}_{cond}$ , que é a taxa de calor por condução através da placa, e rejeita calor para o ar em parte por convecção,  $\dot{Q}_{conv}$ , e em parte por radiação,  $\dot{Q}_{rad}$ . Aplicando a primeira lei da termodinâmica para o sistema constituído pela superfície 2, obtemos:

$$\dot{E} = \dot{Q}_{cond} - \dot{Q}_{conv} - \dot{Q}_{rad} + \dot{E}_g \quad (1.19)$$

Como consideramos que não há geração,  $\dot{E}_g = 0$ . Como a massa do sistema é nula, ele é incapaz de armazenar energia, de forma que  $\dot{E} = 0$ , o que nos leva a:

$$\dot{Q}_{cond} = \dot{Q}_{conv} + \dot{Q}_{rad} \quad (1.20)$$

Esse resultado foi obtido considerando a transferência de calor através de uma superfície na qual identificamos os modos condução, convecção e radiação. Similarmente, podemos conduzir uma análise para uma superfície que constitui a interface entre duas placas conforme esquematizado na Figura 1.9 e, como resultado, obteremos:

$$\dot{Q}_{cond1} = \dot{Q}_{cond2} \quad (1.21)$$

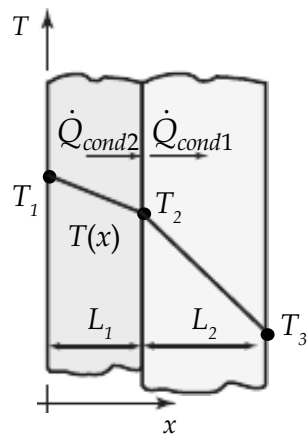


Figura 1.9 Taxa de calor entre placas

Esses dois resultados são muito importantes e serão utilizados com frequência em análises de processos de transferência de calor.

## 1.6 EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**Er1.1** Uma parede plana com espessura  $L = 20$  cm apresenta um perfil de temperaturas parabólico, conforme ilustrado na Figura Er1.1. Sabendo que a parede tem condutibilidade térmica igual a  $0,5 \text{ W/(m.K)}$ , que a superfície 1 é adiabática, que em determinado instante as temperaturas nas superfícies 1 e 2 são, respectivamente,  $100^\circ\text{C}$  e  $40^\circ\text{C}$ , pede-se para determinar o fluxo de calor na superfície perpendicular ao eixo  $x$  localizada em  $x = L/2$ .

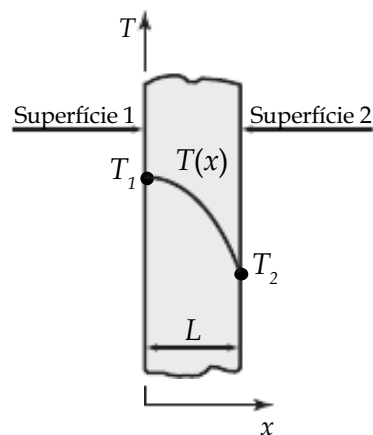


Figura Er1.1

### Solução

- a) **Dados e considerações**  
Inicialmente devemos fazer um croqui que ilustre com cuidado a questão

a ser solucionada e fazer considerações, estabelecer hipóteses e registrar dados importantes para a solução da questão. Neste caso, o croqui já é dado – veja a Figura Er1.1. Passamos, então, ao registro das considerações, hipóteses e dados:

- São dadas as seguintes informações:  $L = 0,20 \text{ m}$ ,  $k = 0,5 \text{ W/(m.K)}$ .
- São conhecidas as condições de contorno:  $T_1 = 100^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 40^\circ\text{C}$ , e o perfil de temperatura é parabólico, ou seja,  $T(x) = a + bx + cx^2$ .
- A superfície 1 é adiabática e o processo de transferência de calor é por condução e unidimensional, o que significa que, por hipótese, ele ocorre apenas na direção  $x$ .

b) **Análise e cálculos**

O primeiro passo é determinar a função  $T(x) = a + bx + cx^2$ , e, para tal, utilizaremos as condições de contorno dadas.

- **Uso da primeira condição de contorno**

Como a superfície 1 é adiabática, o fluxo de calor através dela é nulo. Nesse caso, a lei de Fourier nos garante que:

$$\begin{aligned} \dot{Q}'' &= -k \frac{\partial T}{\partial x} \Big|_{x=0} = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow -k \frac{\partial}{\partial x} (a + bx + cx^2) \Big|_{x=0} = 0 \Rightarrow \\ &\Rightarrow (b + 2cx) \Big|_{x=0} = 0 \end{aligned}$$

Ou seja:  $b = 0$ , logo:  $T(x) = a + cx^2$ .

- **Uso da segunda condição de contorno**

Na posição  $x = 0$ ,  $T(x) = T_1$ .

Então:  $T_1 = a + b(0)^2 \Rightarrow a = T_1$ ;  
logo:  $T(x) = T_1 + cx^2$ .

- **Uso da terceira condição de contorno**

Na posição  $x = L$ ,  $T(x) = T_2$ .

$$\text{Então: } T_2 = T_1 + cL^2 \Rightarrow c = \frac{T_2 - T_1}{L^2}.$$

Finalmente, obtemos o perfil de temperaturas:

$$T(x) = T_1 - \frac{T_1 - T_2}{L^2} x^2.$$

Podemos, agora, determinar o fluxo de calor em  $x = L/2$  utilizando a lei de Fourier:

$$\begin{aligned} \dot{Q}''(L/2) &= -k \left. \frac{\partial T}{\partial x} \right|_{x=L/2} = \\ &= -k \left( -2x \frac{T_1 - T_2}{L^2} \right) \Big|_{x=L/2} \\ \dot{Q}''(L/2) &= -0,5 \left( -2 \frac{0,20}{2} \frac{100 - 40}{0,20^2} \right) = \\ &= 150 \text{ W/m}^2 \end{aligned}$$

**Er1.2** A parede de uma residência tem 10 m de largura, 2,6 m de altura e espessura igual a 15 cm. Se as temperaturas das superfícies externa e interna dessa parede forem constantes, aproximadamente uniformes e iguais, respectivamente, a 40°C e 25°C e se a sua condutibilidade térmica for igual a 0,5 W/(m.K), qual será o fluxo de calor e a taxa de transferência de calor por condução através dessa parede?

### Solução

a) Dados e considerações

Inicialmente devemos fazer um croqui que ilustre com cuidado a questão a ser solucionada e fazer considerações, estabelecer hipóteses e registrar dados importantes para a solução da questão. O croqui é apresentado na Figura Er1.2. Para preparar esse croqui tivemos os seguintes cuidados:

- Definir os aspectos geométricos importantes e os símbolos utilizados para definir as dimensões,  $L$ ,  $H$  e  $b$ .

- Identificar as faces da parede sabendo-se exatamente qual é a externa, a interna e quais serão os símbolos utilizados para as suas temperaturas.
- Escolher uma direção e um sentido para a ordenada  $x$ .
- Escolher uma direção e um sentido para a ordenada  $T$ .
- Identificar o tipo de perfil de temperaturas.

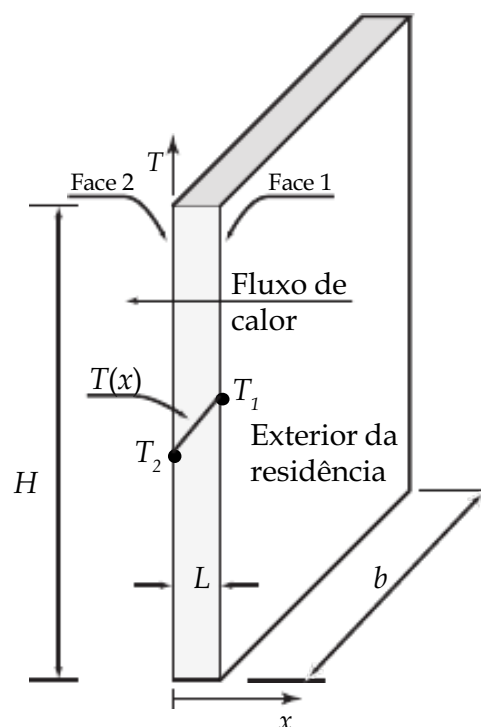


Figura Er1.2

Passamos, então, ao registro das considerações, hipóteses e dados:

- O processo de transferência de calor é unidimensional, ocorre em regime permanente, sem geração de calor, e o perfil de temperaturas é linear.
- Dimensões importantes: espessura,  $L = 15 \text{ cm} = 0,15 \text{ m}$ ; altura,  $H = 2,6 \text{ m}$ ; e largura da parede,  $b = 10 \text{ m}$ .
- $T_1 = 40^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 25^\circ\text{C}$ , e a condutibilidade térmica do material é  $k = 0,5 \text{ W/(m.K)}$ .

b)

Análise e cálculos

Aplicando a lei de Fourier, obtemos:

$$\dot{Q}'' = -k \frac{dT}{dx} = -k \frac{T_1 - T_2}{L}, \text{ e o fluxo de}$$

calor será:

$$\dot{Q}'' = -0,5 \frac{40 - 25}{0,15} = -50 \text{ W/m}^2.$$

O sinal negativo do fluxo de calor indica que ele ocorre no sentido negativo do eixo  $x$ .

A taxa de transferência de energia por calor através da parede será:

$$\dot{Q} = \dot{Q}'' A = -50 \cdot 2,6 \cdot 10,0 = -1300 \text{ W}$$

Novamente observamos que o sinal negativo indica que a transferência de energia ocorre no sentido negativo do eixo  $x$ . Devemos notar que poderíamos ter escolhido a orientação inversa do eixo  $x$  e teríamos obtido resultados positivos.

Observamos também que, neste caso, tanto o fluxo quanto a taxa de calor serão os mesmos em qualquer superfície interna da placa perpendicular ao eixo  $x$ .

Er1.3 A parede de uma residência tem 10 m de largura, 2,6 m de altura e espessura igual a 15 cm. Sabe-se que a temperatura da face interna da parede é igual a 25°C, que a taxa de calor através da parede é 1300 W e que o coeficiente convectivo observado entre o ar presente no interior da residência e a parede é igual a 10 W/(m².K). Estime a temperatura média do ar presente no interior da residência.

### Solução

#### a) Dados e considerações

Observamos que este exercício é complementar ao Er1.2. Repetindo o procedimento do exercício anterior, devemos fazer uns croquis que ilustre com cuidado a questão a ser solucionada e fazer considerações, estabelecer hipóteses e registrar dados importantes para a solução da questão. O croqui é apresentado na Figura Er1.3. Para prepará-lo, tivemos os seguintes cuidados:

- Definir os aspectos geométricos importantes e os símbolos utilizados para definir as dimensões,  $L$ ,  $H$  e  $b$ .
- Identificar as faces da parede sabendo-se exatamente qual é a externa, a interna e quais serão os símbolos utilizados para as suas temperaturas e para a temperatura do ar no interior da residência.
- Escolher uma direção e um sentido para a coordenada  $x$ ; observamos que, neste exercício, optamos por mudar o sentido desse eixo em relação ao Er1.2.
- Escolher uma direção e um sentido para a ordenada  $T$ .
- Identificar o tipo de perfil de temperaturas.

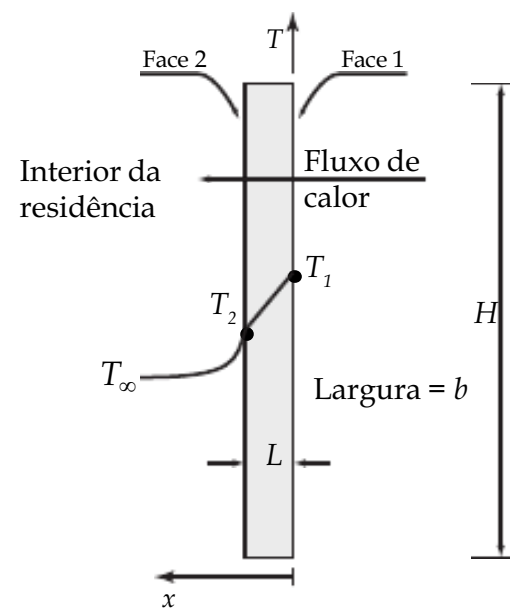


Figura Er1.3

Passamos, então, ao registro das considerações, hipóteses e dados:

- O processo de transferência de calor ocorre em regime permanente, por convecção, com  $h = 10 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ , produzindo um perfil de temperaturas conforme esquematizado na Figura Er1.3.
- Dimensões importantes: altura,  $H = 2,6 \text{ m}$ ; largura da parede,  $b = 10 \text{ m}$ .
- $T_2 = 25^\circ\text{C}$  e  $\dot{Q} = 1300 \text{ W}$ .

#### b)

#### Análise e cálculos

Aplicando a lei do resfriamento de Newton, obtemos:  $\dot{Q} = Ah(T_2 - T_\infty)$ . Nessa equação,  $T_\infty$  é a temperatura



do ar no interior da residência e  $A$  é a área da superfície na qual identificamos a transferência de calor por convecção da parede para o ar. Essa área é a da superfície interna da parede.

Utilizando os dados disponíveis, obtemos:

$$T_{\infty} = T_2 - \frac{\dot{Q}}{Ah} =$$

$$= 25 - \frac{1300}{10 \cdot 2,6 \cdot 10} = 20^{\circ}\text{C}$$

**Er1.4** O isolamento térmico de uma tubulação de transporte de vapor d'água tem diâmetro interno igual a 60,4 mm e espessura igual a 38,0 mm. Sabendo-se que a temperatura da sua superfície externa é igual a 40°C, que o coeficiente médio de transferência de calor por convecção entre o isolante e o meio ambiente é dado por  $h = 12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$  e que a temperatura ambiente é igual a 20°C, pede-se para calcular a taxa de calor por metro de tubo e o fluxo de calor na superfície interna e na externa do isolante.

### Solução

- a) Dados e considerações  
O croqui ilustrativo da questão é apresentado na Figura Er1.4 e deve ser utilizado para o correto registro dos dados fornecidos no enunciado.

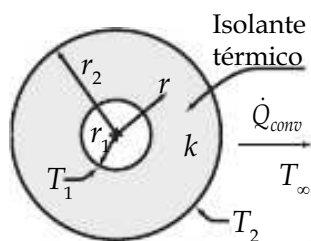


Figura Er1.4

Passamos, então, ao registro das considerações, hipóteses e dados:

- O processo de transferência de calor ocorre por condução através do iso-

lante em regime permanente e por convecção entre a superfície externa do isolante e o meio ambiente.

- Dimensões importantes:  $r_1 = 60,4/2 = 30,2 \text{ mm}$ ;  $r_2 = 30,2 + 38,0 = 68,2 \text{ mm}$ .
- $T_2 = 40^{\circ}\text{C}$ ,  $T_{\infty} = 20^{\circ}\text{C}$ ;  $h = 12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ .

- b) Análise e cálculos

Aplicando a lei do resfriamento de Newton, obtemos:  $\dot{Q} = Ah(T_2 - T_{\infty})$ . Nessa equação,  $T_{\infty}$  é a temperatura do ar ambiente e  $A$  é a área da superfície na qual identificamos a transferência de calor por convecção do isolante para o ar.

Utilizando os dados disponíveis, obtemos:

$$\frac{\dot{Q}}{L} = \dot{Q}' = \frac{A_{\text{externa}}}{L} h(T_2 - T_{\infty}) =$$

$$= 102,8 \text{ W/m}$$

O fluxo de calor na superfície externa é dado por:

$$\dot{Q}_{\text{ext}}'' = \frac{\dot{Q}}{A_{\text{externa}}} = h(T_2 - T_{\infty}) = 240 \text{ W}/\text{m}^2$$

O fluxo de calor na superfície interna é dado por:

$$\dot{Q}_{\text{int}}'' = \frac{\dot{Q}}{A_{\text{interna}}} = \frac{2\pi r_2 L}{2\pi r_1 L} h(T_2 - T_{\infty}) =$$

$$= 542 \text{ W/m}^2$$

**Er1.5** O isolamento térmico de uma tubulação de transporte de vapor d'água tem diâmetro interno igual a 60,4 mm e espessura igual a 38,0 mm. Sabendo-se que a temperatura da sua superfície externa é igual a 40°C, o coeficiente médio de transferência de calor por convecção entre o isolante e o meio ambiente é dado por  $h = 12 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$ , a temperatura ambiente é igual a 20°C e que a emissividade da superfície externa do isolamento é igual a 0,7, pede-se para calcular a taxa de calor por metro de tubo.

## Solução

## a) Dados e considerações

Este problema é similar ao Er1.4, tendo sido adicionada apenas a necessidade de avaliar a transferência de calor por radiação. O croqui ilustrativo da questão é apresentado na Figura Er1.5 e deve ser utilizado para o correto registro dos dados fornecidos no enunciado.

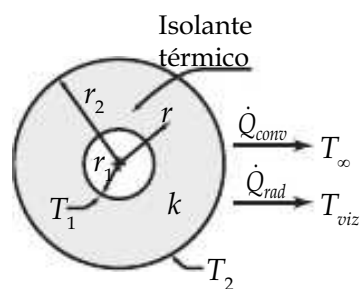


Figura Er1.5

Passamos, então, ao registro das considerações, hipóteses e dados:

- O processo de transferência de calor ocorre por condução através do isolante em regime permanente, e por convecção e por radiação entre a superfície externa do isolante e o meio ambiente.
- Dimensões importantes:  
 $r_1 = 60,4/2 = 30,2 \text{ mm};$   
 $r_2 = 30,2 + 38,0 = 68,2 \text{ mm}.$
- $T_2 = 40^\circ\text{C} = 313,15 \text{ K};$   
 $T_\infty = T_{viz} = 20^\circ\text{C} = 293,15 \text{ K};$   
 $h = 12 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}); \varepsilon = 0,7;$   
e  $\sigma = 5,67 \text{ E-}8 \text{ W}/(\text{m}^2.\text{K}^4).$

## b) Análise e cálculos

A taxa de calor por convecção é dada por:  $\dot{Q}_{conv} = Ah(T_2 - T_\infty).$

Substituindo os dados disponíveis, obtemos:

$$\frac{\dot{Q}_{conv}}{L} = \dot{Q}'_{conv} = \frac{A_{externa}}{L} h(T_2 - T_\infty) = 102,8 \text{ W/m}.$$

A taxa de calor por radiação é dada por:  $\dot{Q}_{rad} = \varepsilon \sigma A(T_2^4 - T_{viz}^4).$

Substituindo os dados disponíveis, obtemos:

$$\frac{\dot{Q}_{rad}}{L} = \dot{Q}'_{rad} = \frac{A_{externa}}{L} \varepsilon \sigma (T_2^4 - T_{viz}^4) = \varepsilon \sigma 2\pi r_2 (T_2^4 - T_{viz}^4) = 37,9 \text{ W/m}$$

E a taxa de transferência de calor por metro de tubo será:

$$\dot{Q}' = \dot{Q}'_{rad} + \dot{Q}'_{conv} = 140,7 \text{ W/m}.$$

**Er1.6** Uma das paredes verticais de uma estufa de uso clínico tem 600 mm de largura, 800 mm de altura e é constituída por duas chapas metálicas, uma interna e outra externa, e por um isolante térmico existente entre elas que tem espessura de 4 cm. A temperatura da sua superfície externa é constante, aproximadamente uniforme e igual a 45°C. Considere que o coeficiente convectivo observado entre a face externa da parede e o ar ambiente é igual a 15 W/(m².K), a emissividade da superfície é igual a 0,75 e que a temperatura do meio ambiente é igual a 20°C. Considerando também que a resistência térmica à transferência de calor por condução nas chapas metálicas constituintes da parede é desprezível, avalie a taxa de calor entre a superfície e o meio ambiente e a condutibilidade térmica do isolante.

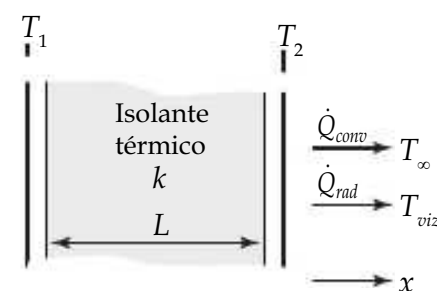


Figura Er1.6

## Solução

## a) Dados e considerações

O croqui ilustrativo da questão é

apresentado na Figura Er1.6 e deve ser utilizado para o correto registro dos dados fornecidos no enunciado.

Passamos, então, ao registro das considerações, hipóteses e dados:

- O processo de transferência de calor ocorre por condução através do isolante em estado estacionário, por convecção e por radiação entre a superfície externa da parede e o meio ambiente.
- Dimensões importantes:  
largura =  $W = 600$  mm;  
altura =  $H = 800$  mm;  $L = 4$  cm.
- $T_2 = 45^\circ\text{C} = 318,15$  K,  
 $T_\infty = T_{\text{viz}} = 20^\circ\text{C} = 293,15$  K;  
 $h = 15$  W/(m<sup>2</sup>.K).
- $\varepsilon = 0,75$  e  $\sigma = 5,67 \text{ E-}8$  W/(m<sup>2</sup>.K<sup>4</sup>).

b) Análise e cálculos

A taxa de transferência de calor por convecção é dada por:  
 $\dot{Q}_{\text{conv}} = Ah(T_2 - T_\infty)$ .

Substituindo os dados disponíveis, obtemos:  $\dot{Q}_{\text{conv}} = Ah(T_2 - T_\infty) = 180$  W.

A taxa de transferência de calor por radiação é dada por:  $\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon\sigma A(T_2^4 - T_{\text{viz}}^4)$ .

Substituindo os dados disponíveis, obtemos:

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = A\varepsilon\sigma(T_2^4 - T_{\text{viz}}^4) = 0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,75 \cdot 5,67 \text{ E-}8 (318,15^4 - 293,15^4) = 58,4 \text{ W}$$

E a taxa de calor entre a superfície e o meio ambiente será:

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{\text{rad}} + \dot{Q}_{\text{conv}} = 238,4 \text{ W}$$

## 1.7 EXERCÍCIOS PROPOSTOS

**Ep1.1** Uma manta de fibra de vidro,  $k = 0,038$  W/(m.K), com espessura de 2 cm, altura de 50 cm e comprimento de 1 m, é utilizada para isolar um equipamento. A temperatura da sua face interna é uniforme e igual a  $80^\circ\text{C}$  e a temperatura da sua face externa (face em contato com o ar ambiente) é

igual a  $40^\circ\text{C}$ . Determine o fluxo de calor e a taxa de calor através da placa.

Resp.:  $76 \text{ W/m}^2$ ;  $38 \text{ W}$ .

**Ep1.2** Um cabo elétrico é isolado eletricamente com uma camada de PVC,  $k = 0,09$  W/(m.K). O diâmetro externo do cabo é igual a 3,2 mm e o diâmetro do fio de cobre é igual a 2 mm. O perfil de distribuição temperaturas no isolante em função do raio é dado pela expressão:  $T = T_1 + [(T_2 - T_1)/\ln(r_2/r_1)]\ln(r/r_1)$ . Devido à passagem de corrente elétrica pelo cabo, tem-se  $T_1 = 24^\circ\text{C}$ , e, devido ao contato com o ar ambiente,  $T_2 = 22^\circ\text{C}$ . Determine o fluxo de calor na superfície do fio de cobre e na superfície externa da camada de PVC e a taxa de calor por metro de cabo para o meio ambiente.

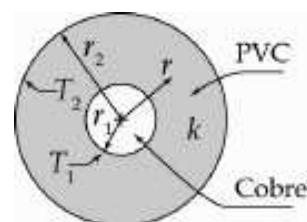


Fig. Ep1.2

Resp.:  $383 \text{ W/m}^2$ ;  $239 \text{ W/m}^2$ ;  $2,41 \text{ W/m}$ .

**Ep1.3** Uma estufa cuja temperatura interna é igual a  $120^\circ\text{C}$  deve ser isolada com manta de fibra de vidro,  $k = 0,038$  W/(m.K). Sabendo que a temperatura da superfície externa da estufa deve ser igual a, no máximo,  $40^\circ\text{C}$  quando a temperatura ambiente for igual a  $20^\circ\text{C}$  e que o coeficiente convectivo observado entre a superfície externa e o meio ambiente é igual a  $10 \text{ W/(m}^2\text{.K)}$ , pede-se para determinar a espessura desejada do isolamento térmico. Despreze os efeitos da radiação.

Resp.:  $15,2 \text{ mm}$ .

**Ep1.4** Um pequeno forno de uso laboratorial é internamente aquecido com resistências elétricas instaladas nas



suas paredes verticais. Sabendo que se deseja ter a temperatura média da sua superfície externa igual a  $45^{\circ}\text{C}$  quando a temperatura média da sua superfície interna for igual a  $216^{\circ}\text{C}$ , pede-se para avaliar o fluxo de calor através das suas paredes se elas forem construídas com tijolos isolantes com condutividade térmica igual a  $0,4 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  e espessura igual a  $228 \text{ mm}$ .

Resp.:  $300 \text{ W}/\text{m}^2$ .

**Ep1.5** Uma parede com  $30 \text{ cm}$  de espessura tem área superficial igual a  $60 \text{ m}^2$ . A superfície interna da parede está a  $30^{\circ}\text{C}$  e a externa está a  $0^{\circ}\text{C}$ . Considerando que a taxa de calor através da parede é igual a  $3000 \text{ W}$ , determine a condutividade térmica do material constituinte da parede.

Resp.:  $0,5 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ .

**Ep1.6** Uma parede plana com  $150 \text{ mm}$  de espessura tem área superficial igual a  $120 \text{ m}^2$ . A superfície interna da parede está a  $400^{\circ}\text{C}$  e a externa está a  $50^{\circ}\text{C}$ . Sabendo que a condutibilidade térmica do material constituinte da parede é igual a  $0,2 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , determine a taxa de transferência de calor através da parede. Desprezando os efeitos de transferência de calor por radiação, avalie o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície externa e o meio ambiente sabendo que a temperatura do ar ambiente é igual a  $20^{\circ}\text{C}$ .

Resp.:  $56,0 \text{ kW}$ ;  $15,6 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ .

**Ep1.7** Uma parede plana com  $150 \text{ mm}$  de espessura tem área superficial igual a  $120 \text{ m}^2$ . A superfície interna da parede está a  $400^{\circ}\text{C}$  e a externa está a  $50^{\circ}\text{C}$ . Sabe-se que a condutibilidade térmica do material constituinte da parede é igual a  $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  e que a emissividade da sua superfície é igual a  $0,65$ . Avalie o coeficiente de transferência de calor por convecção

entre a superfície externa e o meio ambiente sabendo que a temperatura do ar ambiente é igual a  $20^{\circ}\text{C}$  e que a temperatura da vizinhança é igual a  $30^{\circ}\text{C}$ . Qual é o fluxo líquido de calor transferido por radiação dela para o meio ambiente?

Resp.:  $4,76 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ;  $90,6 \text{ W}/\text{m}^2$ .

**Ep1.8** Uma placa plana com  $200 \text{ mm}$  de espessura tem as suas superfícies interna e externa, respectivamente, a  $450^{\circ}\text{C}$  e  $50^{\circ}\text{C}$ . Sabe-se que a condutibilidade térmica do material constituinte da parede é igual a  $0,05 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ , e que o coeficiente convectivo observado entre a face da placa a  $50^{\circ}\text{C}$  e o ar ambiente a  $20^{\circ}\text{C}$  é igual a  $5 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Pede-se para determinar o fluxo de calor através da placa, o fluxo de calor por radiação entre a face da placa a  $50^{\circ}\text{C}$  e o meio ambiente e a emissividade dessa superfície sabendo-se que a temperatura da vizinhança é igual a  $30^{\circ}\text{C}$ .

Resp.:  $75 \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $15 \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $0,108$ .

**Ep1.9** Uma parede plana apresenta temperatura superficial média igual a  $50^{\circ}\text{C}$  e emissividade igual a  $0,7$ . Se o coeficiente convectivo observado entre essa parede e o meio ambiente for igual a  $18 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  e se o ambiente estiver a  $20^{\circ}\text{C}$ , qual deverá ser o fluxo de calor líquido entre essa parede e o meio ambiente?

Resp.:  $679,7 \text{ W}/\text{m}^2$ .

**Ep1.10** A temperatura média de uma parede vertical com área total de  $12 \text{ m}^2$  é igual a  $35^{\circ}\text{C}$ . Sabendo que ela está exposta ao ar ambiente a  $22^{\circ}\text{C}$  e que o coeficiente convectivo observado entre a parede e o ar é igual a  $14 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , pede-se para determinar o fluxo médio de calor e a taxa de calor por convecção da parede para o ar.

Resp.:  $182 \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $2184 \text{ W}$ .

**Ep1.11** Um pequeno forno de uso laboratorial é internamente aquecido com resistências elétricas instaladas nas suas paredes verticais. Sabendo que a temperatura ambiente é igual a  $20^{\circ}\text{C}$ , que o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície externa do forno e o ar ambiente é igual a  $12 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  e que a temperatura média da sua superfície externa é igual a  $50^{\circ}\text{C}$ , pede-se para determinar o fluxo de calor por convecção entre o forno e o meio ambiente. Se a área externa do forno exposta ao ar for igual a  $4 \text{ m}^2$ , qual será a taxa de transferência de calor por convecção para o meio ambiente?  
Resp.:  $360 \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $1440 \text{ W}$ .

**Ep1.12** Uma placa plana com espessura de  $20 \text{ mm}$  e com condutividade térmica igual a  $0,1 \text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$  tem uma das suas faces a  $50^{\circ}\text{C}$  e a outra em uma temperatura mais elevada. Sua superfície fria pode ser considerada cinza difusa com absortividade igual a  $0,80$  e está exposta ao meio ambiente a  $25^{\circ}\text{C}$ , e o coeficiente de transferência de calor por convecção entre essa superfície e o ar ambiente é igual a  $25 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ . Pede-se para calcular o fluxo de calor por condução através da parede, os fluxos de calor por convecção e por radiação na sua superfície fria e a temperatura da parede quente.  
Resp.:  $761 \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $625 \text{ W}/\text{m}^2$ ;  $136 \text{ W}$ ;  $202^{\circ}\text{C}$ .

**Ep1.13** Uma esfera com diâmetro igual a  $200 \text{ mm}$  é continuamente aquecida internamente por uma resistência elétrica cuja potência é igual a  $50 \text{ W}$ . A esfera rejeita calor por convecção em regime permanente para o ar ambiente, que

está a  $20^{\circ}\text{C}$ . Avalie o coeficiente de transferência de calor por convecção se a diferença de temperatura entre a superfície da esfera e o meio ambiente for igual a  $50^{\circ}\text{C}$ . Em sua opinião, a transferência de calor estaria se dando por convecção natural ou forçada? Justifique.  
Resp.:  $7,96 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ ; possivelmente natural, porque  $h$  é bastante baixo!

**Ep1.14** Em um dia ensolarado observamos a incidência de sol sobre uma vidraça. Ao colocar a mão sobre o vidro, notamos que ele está em temperatura maior do que a ambiente. Explique o motivo. Faça um esquema indicando todos os processos de transferência de calor entre o vidro e sua vizinhança.

**Ep1.15** Uma placa metálica delgada é isolada em sua superfície posterior e exposta ao sol na superfície anterior. A superfície anterior absorve o fluxo de radiação solar de  $800 \text{ W}/\text{m}^2$  e a transfere por convecção livre para o ar ambiente a  $20^{\circ}\text{C}$ . Se o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a placa e o ar for igual a  $20 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$ , qual será a temperatura da superfície da placa exposta ao sol?  
Resp.:  $60^{\circ}\text{C}$ .

**Ep1.16** A temperatura média da superfície de um equipamento com área total de  $26,0 \text{ m}^2$  é igual  $40^{\circ}\text{C}$ . Sabendo que ela está exposta a um ambiente a  $20^{\circ}\text{C}$ , que o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície e o ambiente é igual a  $10,0 \text{ W}/(\text{m}^2\cdot\text{K})$  e que a emissividade da superfície é igual a  $0,6$ , pede-se para determinar as taxas de transferência de calor por convecção e por radia-

ção entre a superfície e o ambiente que a envolve.

Resp.: 5,2 kW; 1,97 kW.

- Ep1.17** Uma placa metálica delgada é isolada em sua superfície posterior e exposta ao sol na superfície anterior. A superfície anterior absorve o fluxo de radiação solar de  $800 \text{ W/m}^2$  e a transfere por convecção livre para o ar ambiente a  $20^\circ\text{C}$ . Se o coeficiente convectivo observado entre a placa e o ar for igual a  $20 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , e se a emissividade da superfície for igual a 0,8, qual deverá ser a temperatura da superfície da placa exposta ao sol?

Resp.:  $51,5^\circ\text{C}$ .

- Ep1.18** Uma esfera com diâmetro igual a 250 mm é continuamente aquecida internamente por uma resistência elétrica cuja potência é igual a 100 W. A esfera rejeita calor por convecção em regime permanente para o ar ambiente, que está a  $20^\circ\text{C}$ . Supondo que a temperatura média da superfície da esfera é igual a  $80^\circ\text{C}$  e que a sua emissividade é igual a 0,8, pede-se para avaliar as taxas de calor por radiação e por convecção entre a esfera e o meio ambiente e o coeficiente de transferência de calor por convecção.

Resp.: 72,8 W; 27,3 W;  
2,13  $\text{W/(m}^2\cdot\text{K)}$ .

- Ep1.19** Um pequeno forno de uso laboratorial é internamente aquecido com resistências elétricas instaladas nas suas paredes verticais. Sabendo que a temperatura ambiente é igual a  $20^\circ\text{C}$ , que o coeficiente de transferência de calor por convecção entre a superfície externa do forno e o ar ambiente é igual a  $12 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , que a temperatura média da sua super-

fície externa é igual a  $50^\circ\text{C}$  e que a sua emissividade é igual a 0,8, pede-se para determinar o fluxo de calor por convecção e o fluxo por radiação entre o forno e o meio ambiente. Se a área externa do forno exposta ao ar for igual a  $4 \text{ m}^2$ , qual será a taxa de calor para o meio ambiente?

Resp.:  $360 \text{ W/m}^2$ ;  $160 \text{ W/m}^2$ ;  
2,08 kW.

- Ep1.20** Uma lâmpada de filamento de 100 W tem eficiência de cerca de 50%, ou seja: 50% da potência transferida ao filamento é convertida em energia luminosa e o restante é transferido ao meio ambiente por calor. Considerando que a área da sua superfície externa é equivalente à de uma esfera com raio igual a 3 cm, que o ambiente está a  $20^\circ\text{C}$ , que o coeficiente médio de transferência de calor por convecção entre a lâmpada e o meio ambiente é igual a  $12 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$  e que a transferência de energia para o meio por radiação térmica pode ser desprezada, estime a temperatura média da superfície da lâmpada.

Resp.:  $388^\circ\text{C}$ .

- Ep1.21** Um tubo metálico com diâmetro externo igual a 60 mm que conduz um óleo aquecido é recoberto com uma espessura de 25 mm de isolante térmico com condutibilidade térmica igual a  $0,05 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$ . Sabendo que o coeficiente convectivo observado entre o material isolante e o meio ambiente é igual a  $10 \text{ W/(m}^2\cdot\text{K)}$ , a emissividade da superfície externa desse material é igual a 0,4, o ar ambiente está a  $20^\circ\text{C}$  e que a temperatura da superfície externa do isolante é igual a  $40^\circ\text{C}$ , pede-se para calcular a taxa de transferência de calor por con-