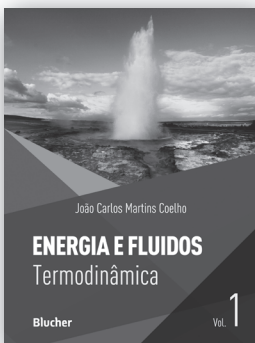


# **ENERGIA E FLUIDOS**

---

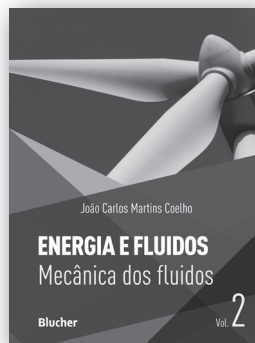
**Volume 1 - Termodinâmica**

# Coleção Energia e Fluidos



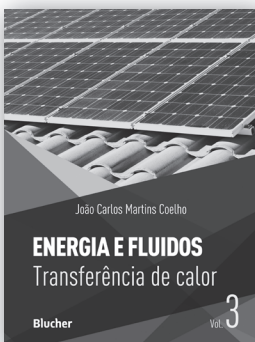
Volume 1  
**Coleção Energia e Fluidos:  
Termodinâmica**

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 1 - Termodinâmica**

Energia e Fluidos – volume 1: Termodinâmica

© 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 1 : termodinâmica / João  
Carlos Martins Coelho. — São Paulo : Blucher, 2016.  
330 p. : il.

Bibliografia  
ISBN 978-85-212-0945-4

1. Engenharia mecânica 2. Engenharia térmica  
3. Termodinâmica I. Título

15-0856

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

transporte 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

<b>Lista dos principais símbolos .....</b>	<b>11</b>
<b>Introdução .....</b>	<b>13</b>
<b>Capítulo 1 – Primeiros conceitos .....</b>	<b>17</b>
1.1 Caracterização das substâncias .....	17
1.2 As primeiras propriedades.....	18
1.3 Processos e ciclos .....	21
1.4 Exercícios resolvidos.....	22
1.5 Exercícios propostos .....	24
<b>Capítulo 2 – Determinando as primeiras propriedades .....</b>	<b>27</b>
2.1 A mudança de fase líquido-vapor.....	27
2.2 Uma nova propriedade: o título .....	29
2.3 A determinação das propriedades .....	30
2.4 Gases ideais .....	30
2.5 Exercícios resolvidos.....	31
2.6 Exercícios propostos .....	38
<b>Capítulo 3 – Trabalho, potência e calor .....</b>	<b>45</b>
3.1 Trabalho realizado em um processo isobárico.....	46
3.2 Trabalho realizado em um processo politrópico.....	46
3.3 Potência .....	47
3.4 Comentários sobre o trabalho.....	47
3.5 Calor .....	48
3.6 Exercícios resolvidos.....	50
3.7 Exercícios propostos .....	58

**Capítulo 4 – Primeira lei da termodinâmica ..... 67**

4.1 A primeira lei da termodinâmica para um sistema percorrendo um processo.....	67
4.2 A propriedade entalpia.....	68
4.3 Calores específicos .....	69
4.4 Determinação da energia interna e da entalpia.....	69
4.5 Determinação da energia interna e da entalpia de um gás ideal.....	69
4.6 Determinação da energia interna e da entalpia de um sólido ou líquido.....	71
4.7 A primeira lei da termodinâmica para um sistema percorrendo um ciclo .....	71
4.8 Exercícios resolvidos .....	72
4.9 Exercícios propostos .....	88

**Capítulo 5 – Segunda lei da termodinâmica..... 103**

5.1 Enunciados da segunda lei .....	104
5.2 Máquinas térmicas.....	105
5.3 Processos reversíveis e irreversíveis.....	108
5.4 O ciclo de Carnot.....	108
5.5 Teoremas de Carnot.....	110
5.6 Escalas de temperatura.....	110
5.7 Eficiência de uma máquina de Carnot.....	111
5.8 Exercícios resolvidos .....	111
5.9 Exercícios propostos .....	113

**Capítulo 6 – Entropia ..... 119**

6.1 A desigualdade de Clausius .....	119
6.2 Definindo a entropia .....	120
6.3 Avaliando a entropia de uma substância pura .....	120
6.4 O diagrama $T_x s$ .....	121
6.5 As equações de Gibbs.....	121
6.6 A determinação da entropia de gases ideais.....	122
6.7 Variação de entropia de sólidos e líquidos.....	123
6.8 Variação de entropia em processos reversíveis.....	123
6.9 O princípio do aumento de entropia .....	124
6.10 Exercícios resolvidos .....	126
6.11 Exercícios propostos .....	130

**Capítulo 7 – Conservação da massa em volumes de controle.... 141**

7.1 Velocidade e vazões.....	141
7.2 Conservação da massa em um volume de controle.....	143
7.3 Simplificação para um número finito de entradas e de saídas .....	144
7.4 Usando o conceito de escoamento uniforme.....	145



7.5 O processo em regime permanente.....	145
7.6 Exercícios resolvidos.....	146
7.7 Exercícios propostos.....	151

## **Capítulo 8 – Primeira lei da termodinâmica – volumes de controle..... 159**

8.1 A primeira lei da termodinâmica para volumes de controle.....	159
8.2 A equação da energia para regime permanente.....	161
8.3 Análise térmica de equipamentos.....	161
8.4 Exercícios resolvidos.....	162
8.5 Exercícios propostos.....	171

## **Capítulo 9 – Segunda lei da termodinâmica – volumes de controle..... 185**

9.1 A segunda lei para volumes de controle.....	185
9.2 A segunda lei para processo em regime permanente.....	186
9.3 Determinando a potência desenvolvida por um volume de controle.....	187
9.4 Eficiência de equipamentos.....	189
9.6 Exercícios resolvidos.....	190
9.7 Exercícios propostos.....	207

## **Capítulo 10 – Sistemas de potência – centrais térmicas a vapor 225**

10.1 O ciclo Rankine.....	226
10.2 O ciclo com reaquecimento.....	229
10.3 Aumentando o rendimento térmico: o ciclo regenerativo.....	229
10.4 Eficiências dos equipamentos.....	231
10.5 Exercícios resolvidos.....	231
10.6 Exercícios propostos.....	238

## **Capítulo 11 – Sistemas de potência – turbinas a gás..... 247**

11.1 O rendimento térmico do ciclo Brayton.....	248
11.2 Utilizando um regenerador.....	249
11.3 Exercícios resolvidos.....	250
11.4 Exercícios propostos.....	255

## **Capítulo 12 – Sistemas de potência – motores de combustão interna..... 265**

12.1 Comentários preliminares.....	265
12.2 Funcionamento de um motor a centelha.....	266
12.3 O ciclo-padrão a ar Otto.....	267
12.4 Determinação do rendimento térmico do ciclo Otto.....	268

12.5 Funcionamento de um motor Diesel.....	269
12.6 O ciclo-padrão a ar Diesel.....	269
12.7 Determinação do rendimento térmico do ciclo Diesel .....	270
12.8 Comentários sobre os motores Otto e Diesel.....	271
12.9 Exercícios resolvidos.....	271
12.10 Exercícios propostos .....	277
<b>Capítulo 13 – Sistemas de refrigeração e bombas de calor .....</b>	<b>283</b>
13.1 Refrigeração por compressão de vapor .....	283
13.2 Bombas de calor.....	285
13.3 Ciclo de refrigeração a ar .....	285
13.4 Exercícios resolvidos.....	286
13.5 Exercícios propostos .....	289
<b>Capítulo 14 – Psicrometria.....</b>	<b>297</b>
14.1 O modelo de Dalton .....	297
14.2 Modelando o ar úmido .....	299
14.3 Propriedades do ar úmido e a primeira lei .....	301
14.4 O processo de saturação adiabática .....	301
14.5 Exercícios resolvidos.....	302
14.7 Exercícios propostos .....	307
<b>Apêndice A – Algumas propriedades .....</b>	<b>309</b>
A.1 Propriedades de alguns gases .....	309
A.2 Calores específicos à pressão constante de alguns gases.....	310
<b>Apêndice B – Propriedades termodinâmicas .....</b>	<b>311</b>
B.1 Propriedades termodinâmicas da água saturada.....	311
B.2 Propriedades termodinâmicas da água – vapor superaquecido.....	314
B.3 Propriedades termodinâmicas da água – líquido comprimido .....	316
B.4 Propriedades termodinâmicas da amônia saturada .....	317
B.5 Propriedades termodinâmicas da amônia superaquecida.....	319
B.6 Propriedades termodinâmicas do R-134a saturado .....	321
B.7 Propriedades termodinâmicas do R-134a superaquecido .....	324
B.8 Propriedades termodinâmicas do ar seco a 100 kPa .....	326
<b>Referências bibliográficas .....</b>	<b>329</b>

# 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 (= 8314,5)	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
$\dot{\nabla}$	Vazão volumétrica	m <sup>3</sup> /s
$V$	Velocidade	m/s
$W$	Trabalho	kJ
$w$	Trabalho específico ou por unidade de massa	kJ/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	kJ/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

Faz parte da nossa vida um imenso conjunto de atividades tais como: tomar sol na praia, assar um bolo, fazer um churrasco, beber algo gelado e assim por diante. Observando-as, notamos que elas envolvem algo que denominamos, no nosso dia a dia, *energia*. À medida que ampliamos as nossas observações, notamos que a energia está praticamente correlacionada com todas as nossas atividades e que esta relação da energia com as nossas vidas e com as nossas necessidades é, a cada dia, mais profunda. Esta correlação entre o nosso viver e a energia pode aguçá-la nossa curiosidade, despertar a nossa atenção e nos conduzir a elaborar questões como: O que é uma central termoelétrica? Como funciona o motor de um automóvel? Como o ar é resfriado em um aparelho de ar condicionado? Como opera a turbina de um avião a jato? Quanto combustível é necessário queimar para aquecer um determinado forno? Como funciona um compressor de ar? Qual é a quantidade de ar que devo injetar no pneu do meu automóvel para que eu possa utilizá-lo com segurança?

Para responder a esse tipo de questão, necessitamos adquirir conhecimentos sobre como e por que alguns fenômenos ocorrem, quais são os seus efeitos, como quantificá-los, como reproduzi-los, e assim por diante. Para preparar profissionais para responder a essas questões, torna-se necessário o estudo das ciências térmicas, considerado de fundamental importância na engenharia e, em particular, no estudo da Termodinâmica, ao qual este livro se dedica.

Complementarmente, notamos que termos tais como *efeito estufa* e *desenvolvimento sustentável* também fazem parte do nosso dia a dia. O que tem causado o efeito estufa? O que é necessário para viver em condição de desenvolvimento sustentável? As respostas que devem ser dadas a essas questões estão atreladas ao estudo das ciências térmicas, em particular, à energia, termo já conhecido do estudante e que será cuidadosamente explorado neste livro.

Com propósito essencialmente pedagógico, optou-se pela organização dos assuntos aqui tratados seguindo-se a sequência

tradicional na qual se aborda o conjunto de conhecimentos fundamentais que constituem a Termodinâmica. O estudo conjunto desses conhecimentos tem o propósito de permitir, por exemplo, o entendimento de vários fenômenos de interesse em engenharia que ocorrem em máquinas e equipamentos que precisam ser compreendidos e avaliados.

Para realizarmos os nossos estudos, é fundamental trabalhar bem com unidades de medida, lembrando sempre de que erros de cálculo gerados pelo desconhecimento

de unidades são dispendiosos e não podem, de forma alguma, ser cometidos por engenheiros. Não podemos esquecer que existem diversos sistemas de unidades que podem ser utilizados e que, no Brasil, o sistema legalmente recomendado é o Sistema Internacional de Unidades (SI). Este será o único utilizado ao longo deste texto.

Na Tabela 1.1 apresentamos algumas unidades de interesse imediato, mesmo que associadas a grandezas que ainda serão definidas ao longo do texto.

**Tabela 1.1** 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 escritos 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 1.2 apresentamos prefixos das unidades. Note que o prefixo quilo, k, sempre se escreve com letra minúscula.

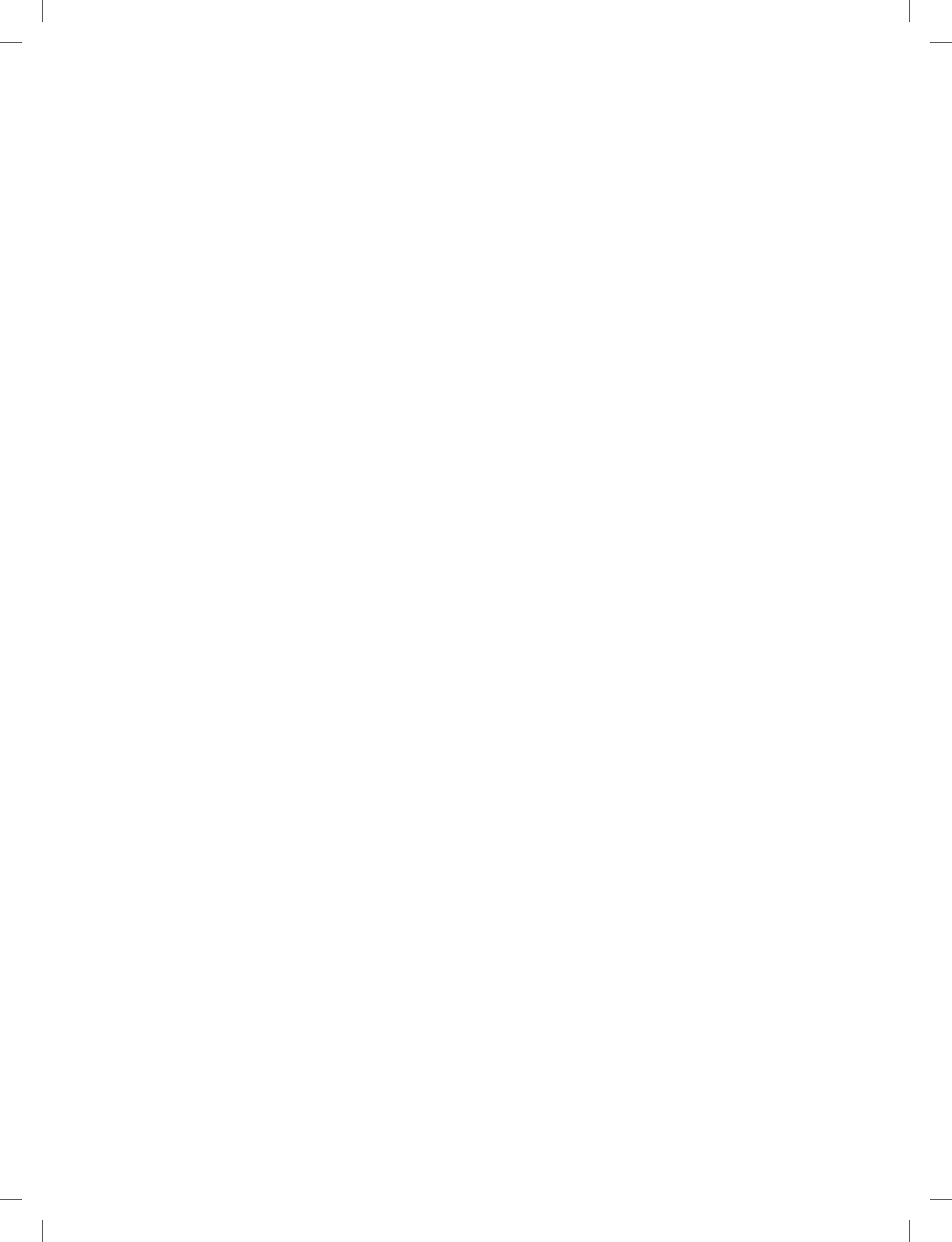
**Tabela 1.2** Prefixos

Prefixo	Símbolo	Fator multiplicativo	Prefixo	Símbolo	Fator multiplicativo
tera	T	10 <sup>12</sup>	mili	m	10 <sup>-3</sup>
giga	G	10 <sup>9</sup>	micro	μ	10 <sup>-6</sup>
mega	M	10 <sup>6</sup>	nano	n	10 <sup>-9</sup>
quilo	k	10 <sup>3</sup>	pico	p	10 <sup>-12</sup>

Uma das necessidades de uma série voltada ao estudo das Ciências Térmicas e, em particular, de um livro voltado ao estudo dos fundamentos da termodinâmica é dispor de um conteúdo razoável de informações sobre substâncias diversas. Para suprir essa necessidade, optou-se pelo uso de um programa computacional para desenvolver as tabelas de propriedades termodinâmicas e de transporte contidas em seus apêndices.

No estudo das ciências térmicas nos deparamos com uma grande quantidade

de variáveis, e um problema usual no estudo de qualquer assunto é o uso do mesmo símbolo para diversas variáveis. Buscando contornar da melhor forma possível esse problema, pelo menos parcialmente. Mesmo sem ainda ter definido algumas grandezas, observamos que optamos por utilizar a letra  $V$  (“vê” maiúscula) para simbolizar a *velocidade* e a letra  $\forall$  (“vê” maiúscula cortada) para simbolizar a grandeza *volume*. Em decorrência, o símbolo a ser utilizado para a vazão será  $\forall$ , reservando-se a letra  $Q$  para simbolizar a grandeza *calor*.





## PRIMEIROS CONCEITOS

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 darão nesse espaço. Neste 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 será separada do meio

que a circunda por uma superfície denominada *fronteira* do sistema, a qual poderá 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.

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 poderá estar em movimento em relação a um sistema de coordenadas e que, normalmente, através da superfície de controle ocorre transferência de massa.

### 1.1 CARACTERIZAÇÃO DAS SUBSTÂNCIAS

Ao analisar os fenômenos que podem ocorrer em um sistema, nos deparamos com a necessidade de poder caracterizá-los quantitativamente. Isso somente é possível se formos capazes de caracterizar

de forma quantitativa a substância em estudo. A nossa experiência mostra que, na natureza, as substâncias podem se apresentar em diversas condições. A água, por exemplo, pode se apresentar como um líquido, sólido ou vapor. Cada quantidade totalmente homogênea de uma substância será chamada *fase*. Assim, o primeiro nível de caracterização de uma substância é o de estabelecer em que fase ela se encontra. No entanto, nota-se que uma substância pode existir em uma determinada fase em diversas condições. Por exemplo: a água na fase líquida pode existir em diversas temperaturas.

Cada condição em que uma substância se apresenta é denominada *estado*, e o estado é caracterizado pelas propriedades da substância, por exemplo: pressão e temperatura. Desta forma, tem-se que o estado é definido pelas propriedades, e o conhecimento das propriedades de uma substância nos diz em qual estado ela se encontra.

Podemos também considerar que, do ponto de vista das ciências térmicas, a matéria se apresenta como sólido ou como *fluido*. O que diferencia um do outro é o fato de que os sólidos e os fluidos apresentam diferentes comportamentos quando submetidos a tensões de cisalhamento. Um sólido tem a capacidade de resistir a elas deformando-se estaticamente, enquanto que um fluido não tem a capacidade de resistir a essas tensões da mesma maneira que um sólido, já que suas partículas se deformam e se movimentam de forma relativamente fácil ao serem submetidas a tensões de cisalhamento. Assim, podemos dizer que líquidos, gases e vapores são fluidos.

## 1.2 AS PRIMEIRAS PROPRIEDADES

Ao trabalhar com propriedades, verificamos que podemos abordar a matéria constituinte de um sistema do ponto de vista macroscópico ou microscópico. A abor-

dagem microscópica leva a um tratamento estatístico que não é o propósito deste texto, mas que pode se tornar importante quando se pretende analisar, por exemplo, escoamentos de gases rarefeitos. Por outro lado, estamos diretamente interessados no comportamento global do conjunto de partículas que compõe 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.

### 1.2.1 Volume específico e massa específica

A *massa específica* de uma substância,  $\rho$ , é definida como:

$$\rho = \lim_{V \rightarrow V_0} \frac{m}{V} \quad (1.1)$$

onde o volume  $V_0$  é o menor volume para o qual a substância pode ser tratada como um meio contínuo. Sua unidade no Sistema Internacional de Unidades é  $\text{kg/m}^3$ .

O *volume específico* de uma substância,  $v$ , é uma propriedade intensiva definida como sendo o inverso da massa específica, ou seja:

$$v = \frac{1}{\rho} \quad (1.2)$$

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

### 1.2.2 Pressão

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

$$p = \lim_{A \rightarrow A_0} \frac{F_n}{A} \quad (1.3)$$

onde  $F_n$  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 tomado como 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 ( $1 \text{ atm} = 101325 \text{ Pa}$ ).

O meio mais comum de medição resulta na determinação da diferença entre duas pressões e, neste 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:

$$p = p_m + p_{atm} \quad (1.4)$$

onde  $p_m$  é a pressão manométrica,  $p$  é a pressão absoluta, e  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica local. A Figura 1.1 esquematiza o relacionamento entre as pressões definido por meio da Equação (1.4).

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. Observamos que os manômetros e o seu uso para a medição da pressão são analisados no volume destinado ao estudo da mecânica dos fluidos.

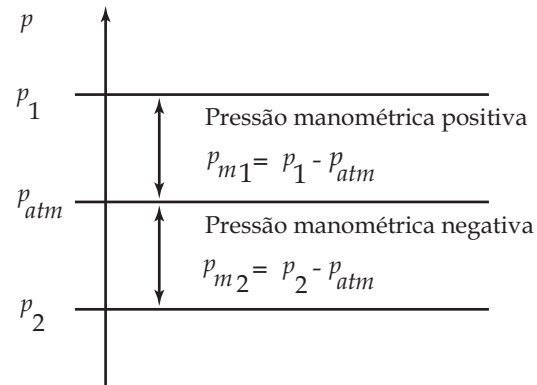


Figura 1.1 Pressão absoluta e manométrica

### 1.2.3 Densidade

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

Para líquidos, esta propriedade é definida como sendo a razão entre a massa específica do fluido 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:

$$d_r \text{ líquidos} = \frac{\rho}{\rho_{\text{água a } 4^\circ\text{C e } 1 \text{ bar}}} \quad (1.5)$$

Embora pouco utilizada, esta propriedade é definida para gases ou vapores como a razão entre a massa específica do fluido e a do ar. Similarmente, opta-se pela adoção do valor de referência igual à massa específica do ar a  $21^\circ\text{C}$  e  $1 \text{ bar}$ , igual a  $1,2 \text{ kg/m}^3$ . Ou seja:

$$d_r \text{ gases} = \frac{\rho}{\rho_{ar} \text{ a } 21^\circ\text{C e } 1 \text{ bar}} \quad (1.6)$$

### 1.2.4 Temperatura e a Lei Zero da termodinâmica

Esta é uma propriedade que não pode ser definida sem o conhecimento das leis da termodinâmica. Por esse motivo, opta-se por aceitar, por hora, o seu conceito popular, que é o de ser uma propriedade que indica quão quente ou frio está um corpo. O grande problema dessa conceituação reside no fato de que as palavras *quente* e *frio* têm significado subjetivo. Por outro lado, a Lei Zero da Termodinâmica estabelece que *se dois corpos estão em equilíbrio térmico com um terceiro corpo, então estão em equilíbrio térmico entre si*. Essa lei permite a criação de um instrumento de medida de temperatura, conhecido por todos, denominado *termômetro*. A utilização desse instrumento de medida elimina a subjetividade, e não dizemos mais que um corpo está quente ou frio, mas que o corpo está em uma determinada temperatura.

Os termômetros, para poderem operar, são calibrados em escalas de temperatura. A mais utilizada no Brasil é a escala Celsius, que foi originalmente concebida atribuindo-se o valor *zero* à temperatura do gelo fundente e o valor *cem* à temperatura da vaporização da água, ambos à pressão de 1 atm. A unidade de medida de temperatura nessa escala é o grau Celsius, °C. A ela, associa-se uma escala absoluta denominada Kelvin, na qual a unidade de medida de temperatura é o kelvin, K. As escalas Celsius e Kelvin se correlacionam por intermédio da seguinte expressão:

$$K = ^\circ\text{C} + 273,15 \quad (1.7)$$

### 1.2.5 Energia

No início de um curso sobre energia e fluidos, não é possível definir precisamente

o que é energia. Entretanto, de maneira geral, o aluno tem um conceito intuitivo do que seja essa grandeza física conhecendo suas manifestações nas formas de energia cinética e de energia potencial.

A energia cinética de um sistema com massa  $m$  que esteja se movimentando com velocidade  $V$  é dada por:

$$E_c = m \frac{V^2}{2} \quad (1.8)$$

Esse mesmo sistema posicionado em uma cota  $z$  terá sua energia potencial dada por:

$$E_p = mgz \quad (1.9)$$

O aluno deve observar que essa energia potencial é manifestada pelo fato de o sistema ocupar uma posição em um campo gravitacional. Poderíamos, portanto, supor a existência de outros campos e tecer considerações similares; entretanto, ao longo deste texto será sempre estabelecido como hipótese que a matéria está sujeita apenas e tão somente ao campo gravitacional.

Tanto a energia cinética quanto a potencial permitem descrever parcialmente o estado energético de um sistema quando observado do ponto de vista macroscópico. Entretanto, devemos ser capazes de perceber que elas podem se manifestar também microscopicamente. Por exemplo, por meio da agitação molecular. Se nos propusermos a visualizar a matéria do ponto de vista microscópico, perceberemos que a energia se apresentará também de outras formas, e sua variação promoverá alterações que poderão ser evidenciadas macroscopicamente. Por exemplo, pela mudança da sua temperatura, pela alteração da sua cor, pela ocorrência de mudança de fase ou de estado de agregação.

O estado energético da matéria em nível microscópico será, neste texto, descrito pela

sua *energia interna*, de forma que a energia total de um sistema será a qualquer instante sempre igual à soma das suas energias interna, cinética e potencial. A energia interna será simbolizada pela letra  $U$ , e, tendo optado pelo uso do Sistema Internacional de Unidades, sua unidade será o joule ( $1 \text{ J} = 1 \text{ N.m}$ ). Dessa forma, a energia total de um sistema, em um dado instante, será igual a:

$$E = U + E_c + E_p = U + m \frac{V^2}{2} + mgz \quad (1.10)$$

A energia também pode ser quantificada por unidade de massa  $e$ , assim, tratada como uma propriedade intensiva, utilizando-se como símbolos letras minúsculas. Assim, a energia específica total de um sistema em um dado instante será:

$$e = u + e_c + e_p = u + \frac{V^2}{2} + gz \quad (1.11)$$

### 1.3 PROCESSOS E CICLOS

Diz-se que uma substância está em equilíbrio termodinâmico se ela estiver, simultaneamente, em equilíbrio mecânico, químico, de fases e térmico.

Quando os valores de propriedades de um sistema mudam, entende-se que há uma mudança do estado. Ao se observar essa mudança de estado, nota-se que o sistema passa por uma série infinita de estados intermediários. Esse conjunto infinito de estados descreve um caminho percorrido pelo sistema, o qual é denominado *processo*.

Naturalmente, um processo real somente ocorre em condição de não equilíbrio termodinâmico. Entretanto, um modelo bastante simplificado é aquele no qual se pode supor que, durante o desenvolvimento de um determinado processo, os desvios do equilíbrio são mínimos e, por esse motivo, qualquer estado intermediário entre seus estados inicial e final pode ser considerado em equilíbrio. Esse processo é denominado processo de *quase equilíbrio*.

Para exemplificar, pode-se considerar a massa de ar contida no conjunto cilindro-pistão esquematizado na Figura 1.2. Considere-se que em um instante o ar esteja no estado inicial, e que a seguir o pistão comece a se mover de modo que tanto o volume quanto a temperatura do ar sejam alterados até que seja atingido um estado final. O conjunto dos infinitos estados descritos pelos pares pressão-volume registrados no diagrama  $p \times V$  representa o processo ao qual o ar contido no conjunto cilindro-pistão foi submetido.

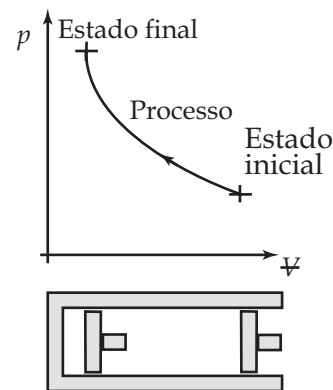


Figura 1.2 Processo termodinâmico

Considere, agora, que um sistema seja submetido continuamente a um conjunto de processos subsequentes, de forma que ao final do último processo o sistema retorne ao seu estado inicial. Neste caso dizemos que o sistema percorreu um *ciclo termodinâmico*. Na Figura 1.3, apresenta-se um diagrama  $p \times V$  no qual está representado um ciclo termodinâmico constituído por dois processos que ocorrem a pressão constante, e por dois processos que ocorrem a volume constante.

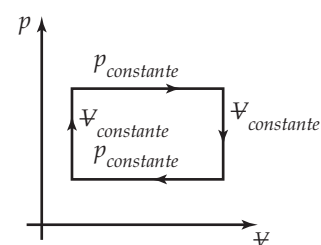


Figura 1.3 Ciclo termodinâmico

## 1.4 EXERCÍCIOS RESOLVIDOS

**Er1.1** No conjunto cilindro-pistão da Figura Er1.1, tem-se 0,1 kg de ar. O diâmetro do pistão é igual a 0,1 m, a sua massa é igual a 20 kg e a pressão atmosférica,  $p_{atm}$ , é igual a 101,3 kPa. Determine a pressão do ar.

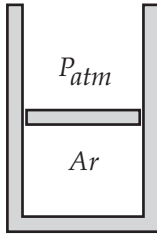


Figura Er1.1

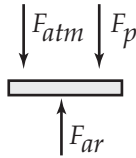


Figura Er1.1-a

### Solução

- a) Dados e considerações
- Fluido: ar.
  - Massa:  $m = 0,1$  kg.
  - Diâmetro do pistão:  $d = 0,1$  m.
  - Massa do pistão:  $m_p = 20$  kg.
  - $p_{atm} = 101,3$  kPa.
  - Aceleração da gravidade:  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>.
  - Sistema adotado: pistão.

- b) Análise e cálculos

O conjunto das forças que agem no pistão encontra-se indicado na Figura Er1.1-a. Tais forças são:

$F_p$  = módulo da força peso do pistão.

$F_{ar}$  = módulo da força aplicada ao pistão devida à pressão absoluta do ar presente no interior do conjunto cilindro-pistão.

$F_{atm}$  = módulo da força, devida a  $p_{atm}$ , aplicada ao pistão.

Como o pistão encontra-se em equilíbrio, vem:

$$F_{ar} = F_p + F_{atm}$$

$$F_{ar} = p_{ar} \frac{\pi d^2}{4}, F_{atm} = 795,6 \text{ N e } F_p =$$

$$m_p g = 196,2 \text{ N}$$

$$F_{ar} = p_{ar} \frac{\pi d^2}{4}$$

Substituindo-se os valores calculados na equação de equilíbrio de forças, tem-se:

$$F_{ar} = 196,2 + 795,6 = 991,8 \text{ N}$$

A pressão do ar será:  $p_{ar} = 126,3$  kPa

**Er1.2** No conjunto cilindro-pistão da Figura Er1.2, tem-se 0,1 kg de ar. O diâmetro do pistão é igual a 0,05 m, a sua massa é igual a 80 kg e a pressão atmosférica é igual 100 kPa. Qual deve ser a pressão do ar que fará com que o pistão comece a se mover?

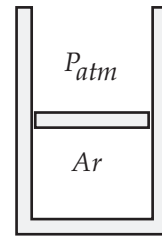


Figura Er1.2

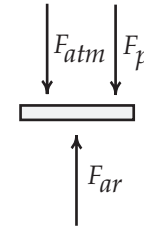


Figura Er1.2-a

### Solução

- a) Dados e considerações
- Fluido: ar.
  - Massa:  $m = 0,1$  kg.
  - Diâmetro do pistão:  $d = 0,05$  m.
  - Massa do pistão =  $m_p = 80$  kg.
  - $p_{atm} = 100$  kPa;
  - Aceleração da gravidade:  $g = 9,81$  m/s<sup>2</sup>.
  - Sistema adotado: pistão.

- b) Análise e cálculos

O conjunto das forças que agem no pistão encontra-se indicado na Figura Er1.2-a. Tais forças são:

$F_p$  = módulo da força peso do pistão.

$F_{ar}$  = módulo da força aplicada ao pistão devida a  $p_{ar}$ , pressão absoluta

do ar presente no interior do conjunto cilindro-pistão.

$F_{atm}$  = módulo da força devida a  $p_{atm}$  aplicada ao pistão.

Como o pistão encontra-se em equilíbrio, vem:

$$F_{ar} = F_p + F_{atm}$$

$$F_{atm} = p_{atm} \frac{\pi d^2}{4} = 196,4 \text{ N e}$$

$$F_p = m_p g = 784,5 \text{ N}$$

$$F_{ar} = p_{ar} \frac{\pi d^2}{4}$$

Substituindo-se os valores calculados na equação de equilíbrio de forças, tem-se:

$$p_{ar} \frac{\pi d^2}{4} = 196,4 + 784,5$$

A pressão do ar será:  $p_{ar} = 499,6 \text{ kPa}$

**Er1.3** Considere o conjunto cilindro-pistão mostrado na Figura Er1.3. A massa do pistão é igual a 5 kg, a sua área é igual a 0,05 m<sup>2</sup>, e a pressão atmosférica local é igual a 100 kPa. Determine a pressão absoluta do ar contido no conjunto.

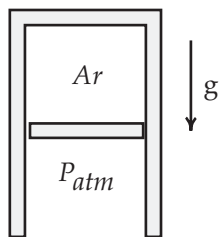


Figura Er1.3

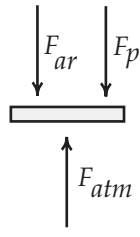


Figura Er1.3-a

**Solução**

a) Dados e considerações

- Fluido: ar.
- Área do pistão:  $A = 0,05 \text{ m}^2$ .
- Massa do pistão:  $m_p = 5 \text{ kg}$ .
- $p_{atm} = 100 \text{ kPa}$ ,  $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ .

• Sistema adotado: pistão.

b) Análise e cálculos

O conjunto das forças que agem no pistão encontra-se indicado na Figura Er1.3-a. Tais forças são:

$F_p$  = módulo da força peso do pistão.

$F_{ar}$  = módulo da força aplicada ao pistão devida a  $p_{ar}$ , pressão absoluta do ar presente no interior do conjunto cilindro-pistão.

$F_{atm}$  = módulo da força devida a  $p_{atm}$  aplicada ao pistão.

Como o pistão encontra-se em equilíbrio, vem:

$$F_{ar} + F_p = F_{atm}$$

$$F_{atm} = 0,05 p_{atm} = 0,05 \cdot 100000 = 5000 \text{ N}$$

$$F_p = m_p g = 49,0 \text{ N}$$

$$F_{ar} = p_{ar} A$$

onde  $p_{ar}$  é a pressão do ar presente no interior do conjunto cilindro-pistão.

$$F_{ar} = 0,05 p_{ar}$$

Substituindo os valores na equação inicial, tem-se que a pressão do ar será:

$$p_{ar} = 99,02 \text{ kPa}$$

**Er1.4** Um conjunto cilindro-pistão é dotado de uma mola, conforme mostrado na Figura Er1.4. Quando o volume interno desse conjunto é nulo, a mola toca o pistão, mas não exerce nenhuma força sobre ele. Injeta-se ar nesse conjunto até que o seu volume atinja o valor de 0,001 m<sup>3</sup>. Considerando que a área do pistão é igual a 0,01 m<sup>2</sup>, que a pressão atmosférica é igual a 100 kPa, que o peso do pistão é igual a 500 N, e que a constante elástica da mola é igual a 10000 N/m, pede-se para calcular a pressão final do ar.

## Solução

- a) Dados e considerações
- Fluido: ar. Volume final:  $0,001 \text{ m}^3$ .
  - Área do pistão:  $A = 0,01 \text{ m}^2$ . Peso do pistão:  $F_p = 500 \text{ N}$ .
  - Constante da mola:  $k = 10000 \text{ N/m}$ ;  $p_{atm} = 100 \text{ kPa}$ .
  - Sistema adotado: pistão.

- b) Análise e cálculos
- Análise de forças agindo no pistão
- O conjunto das forças que agem no pistão encontra-se indicado na Figura Er1.4-a. Tais forças são:

$F_m$  = módulo da força aplicada no pistão pela mola.

$F_p$  = módulo da força peso do pistão.

$F_{ar}$  = módulo da força aplicada ao pistão devida a  $p_{ar}$ , pressão absoluta do ar presente no interior do conjunto cilindro-pistão.

$F_{atm}$  = módulo da força, devida a  $p_{atm}$ , aplicada ao pistão.

Como o pistão encontra-se em equilíbrio, vem:  $F_{ar} = F_{atm} + F_p + F_m$

- Determinação de  $F_{atm}$ :  $F_{atm} = A_p p_{atm}$  onde  $A_p$  é a área do pistão e  $p_{atm}$  é a pressão atmosférica.

$$F_{atm} = 0,01 \cdot 100000 = 1000 \text{ N}$$

- Determinação de  $F_p$ : Do enunciado, vem:  $F_p = 500 \text{ N}$

- Determinação da  $F_{ar}$ :  $F_{ar} = A_p p_{ar}$ ;  $F_{ar} = 0,01 p_{ar}$

- Determinação de  $F_m$ :  $F_m = kx$  onde  $k$  é a constante de elasticidade da mola e  $x$  é o deslocamento da extremidade da mola medido segundo a orientação do eixo  $x$  indicado na Figura Er1.4.

Para determinar o valor de  $F_m$ , é necessário conhecer o valor de  $x$ . O enunciado nos informa que o volume inicial é nulo e que o volume final do ar é igual a  $0,001 \text{ m}^3$ . Como, quando o volume é nulo, a mola toca, mas não exerce nenhuma força sobre o pistão, temos:

$$x = \frac{V}{A_p} \Rightarrow x = 0,1 \text{ m}$$

$$\text{Então: } F_m = 10000 \cdot 0,1 = 1000 \text{ N}$$

- c) Cálculo da pressão do ar  
Voltando ao equilíbrio de forças:

$$F_{ar} = F_{atm} + F_p + F_m$$

Substituindo os valores calculados nesta equação, tem-se que a pressão do ar será:

$$0,01 p_{ar} = 1000 + 500 + 1000 \Rightarrow$$

$$\Rightarrow p_{ar} = 250000 \text{ Pa} = 250 \text{ kPa}$$

## 1.5 EXERCÍCIOS PROPOSTOS

- Ep1.1 Um pistão pneumático pode ser movimentado com ar comprimido à pressão manométrica máxima de 18 bar. Se o diâmetro interno do pistão é igual a 50 mm, qual deverá ser a força máxima aplicável pelo pistão?  
Resp.: 3,53 kN.

- Ep1.2 Um macaco hidráulico é esquematizado na Figura Ep1.2. O diâmetro do êmbolo menor é igual a 1 cm e o diâmetro do êmbolo que suporta a carga a ser elevada é igual a 10 cm. Ao se aplicar uma força no êmbolo menor igual a 50 N, qual deverá ser a força aplicada ao êmbolo que suporta a carga?

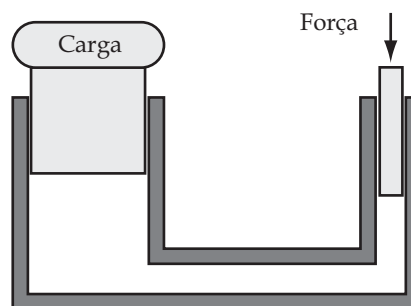


Figura Ep1.2

Resp.: 5 kN



**Ep1.3** Uma caixa-d'água com diâmetro de 3 m e altura interna igual a 5 m está repleta com água a 20°C, cuja massa específica é igual a 998,2 kg/m<sup>3</sup>. Determine o peso específico da água armazenada e o seu peso total.

Resp.: 9792 N/m<sup>3</sup>; 346,1 kN.

**Ep1.4** Um gás encontra-se aprisionado no dispositivo esquematizado na Figura Ep1.4. Considerando que a área do êmbolo é igual a 0,01 m<sup>2</sup> e que a sua massa é igual a 100 kg, pergunta-se: qual é a pressão do gás? Considere a pressão atmosférica local igual a 100 kPa.

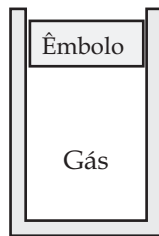


Figura Ep1.4

Resp.: 198,1 kPa.

**Ep1.5** No interior de um recipiente que contém ar com pressão absoluta igual a 150 kPa, foi colocado um copo contendo 64 g de óleo, que ocupa um volume de 80 cm<sup>3</sup>, e 100 g de água, que ocupa o volume de 100 cm<sup>3</sup>. Estime a massa específica, o volume específico e a densidade relativa do óleo e da água. Sabendo que a aceleração da gravidade local é igual a 9,81 m/s<sup>2</sup>, o copo é cilíndrico, a pressão atmosférica local é igual a 100 kPa e que a área do seu fundo igual a 16 cm<sup>2</sup>, determine a pressão manométrica exercida pela água sobre ele.

Resp.: 800 kg/m<sup>3</sup>; 0,00125 m<sup>3</sup>/kg; 0,8; 1000 kg/m<sup>3</sup>; 0,001 m<sup>3</sup>/kg; 1; 51 kPa.

**Ep1.6** Um conjunto cilindro-êmbolo é dotado de uma mola interna que se encontra tracionada conforme esquematizado

na Figura Ep1.6. Esse conjunto aprisiona em seu interior vapor d'água. A força aplicada pela mola ao êmbolo é igual a 1000 N, a área do êmbolo é igual a 0,01 m<sup>2</sup>, e seu peso é igual a 2000 N. Qual é o valor da pressão absoluta do vapor? Considere a pressão atmosférica local igual a 100 kPa.

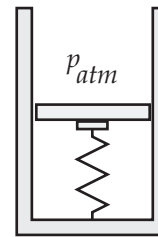


Figura Ep1.6

Resp.: 400 kPa.

**Ep1.7** Um conjunto cilindro-êmbolo é dotado de uma mola interna que se encontra tracionada conforme esquematizado na Figura Ep1.7. Esse conjunto aprisiona em seu interior oxigênio, e sobre o êmbolo há acumulados 50 litros de um líquido com peso específico igual a 14 kN/m<sup>3</sup>. A força aplicada pela mola ao êmbolo é igual a 800 N, a área do êmbolo é igual a 0,01 m<sup>2</sup> e o seu peso é igual a 2500 N. Qual é o valor da pressão absoluta do oxigênio? Considere a pressão atmosférica local igual a 100 kPa.

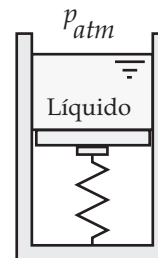


Figura Ep1.7

Resp.: 500 kPa.

**Ep1.8** Um conjunto cilindro-êmbolo é dotado de uma mola que se encontra comprimida conforme esquematiza-

do na Figura Ep1.8. Este conjunto tem dois êmbolos que aprisionam em seu interior 0,2 kg de ar e 0,3 kg de metano. A força aplicada pela mola ao êmbolo superior é igual a 3000 N, a área dos êmbolos é igual a 0,01 m<sup>2</sup>, a massa do êmbolo superior é igual a 200 kg e a do inferior é igual a 300 kg. Qual é o valor da pressão absoluta do ar e do metano? Considere a pressão atmosférica local igual a 100 kPa e a aceleração da gravidade local igual a 9,81 m/s<sup>2</sup>.

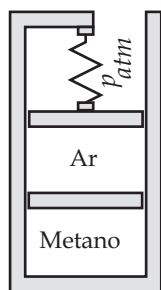


Figura Ep1.8

Resp.: 596,2 kPa; 890,7 kPa.

**Ep1.9** Observe o conjunto cilindro-êmbolo suspenso por uma mola ilustrado na Figura Ep1.9, no qual o êmbolo pode deslizar sem atrito. A massa do êmbolo é igual a 5 kg e a massa do cilindro é igual a 15 kg. No espaço interno delimitado pelo conjunto tem-se armazenado nitrogênio. Sabendo que a área do êmbolo é igual a 0,05 m<sup>2</sup>, que a pressão atmosférica é igual a 100 kPa e considerando que a massa do nitrogênio é, para efeito de cálculo, desprezível, determine a força aplicada pela mola ao êmbolo e a pressão manométrica do nitrogênio.

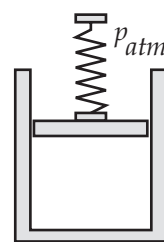


Figura Ep1.9

Resp.: 196,2 N; -2,94 kPa.

**Ep1.10** Um recipiente vertical com área da sua seção transversal constante e igual a 1,2 m<sup>2</sup> contém um fluido que consiste em uma suspensão de um mineral finamente moído em água. A concentração desse mineral varia segundo a vertical, de sorte que a densidade relativa da suspensão pode ser expressa pela relação  $d_r = 1,1(1 + z^2)$ , onde  $z$  é a ordenada vertical medida em metros, conforme indicado na Figura Ep1.10. Se o volume de suspensão armazenado é igual a 2,4 m<sup>3</sup>, pergunta-se: qual é a massa total de material armazenado?

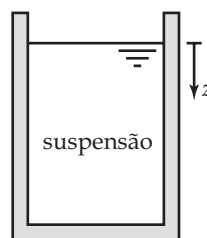


Figura Ep1.10

Resp.: 3907 kg.

**Ep1.11** Resolva o exercício Ep1.7 supondo que a mola está comprimida.

Resp.: 340 kPa.