

# 3

## Avaliando Propriedades

### ▶ RESULTADOS DE APRENDIZAGEM

*Quando você completar o estudo deste capítulo estará apto a...*

- ▶ demonstrar conhecimento dos conceitos fundamentais... incluindo fase e substância pura, princípios dos estados equivalentes para sistemas simples compressíveis, superfície  $p$ - $v$ - $T$ , temperatura de saturação e pressão de saturação, mistura bifásica líquido-vapor, título, entalpia e calores específicos.
- ▶ aplicar, com dados de propriedades, o balanço de energia para um sistema fechado.
- ▶ esboçar os diagramas  $T$ - $v$ ,  $p$ - $v$  e o diagrama de fases, e localizar os estados principais nesses diagramas.
- ▶ obter dados de propriedades a partir das Tabelas A-1 a A-23.
- ▶ aplicar o modelo de gás ideal para análise termodinâmica, incluindo a determinação de quando a utilização deste modelo é apropriada.

### 3.1 Conceitos Introdutórios

Nesta seção serão apresentados conceitos que apoiam nosso estudo de relações de propriedades, incluindo fase, substância pura e o princípio dos estados equivalentes para sistemas simples.

#### 3.1.1 Fase e Substância Pura

##### fase

O termo fase refere-se a uma quantidade de matéria que é homogênea como um todo, tanto em composição química como em estrutura física. Homogeneidade em estrutura física significa que a matéria é toda *sólida*, toda *líquida* ou toda *vapor* (ou, de forma equivalente, toda *gás*). Um sistema pode conter uma ou mais fases.

Fase\_Substância\_Pura  
A.12 – Abas a & b



► POR EXEMPLO um sistema de água líquida e vapor d'água (vapor) contém *duas* fases. Um sistema de água líquida e gelo, incluindo o caso de neve derretida, também contém *duas* fases. Gases como o oxigênio e o nitrogênio podem estar misturados em qualquer proporção para formar uma *única* fase gasosa. Certos líquidos, como álcool e água, podem ser misturados formando uma *única* fase líquida. Mas líquidos como óleo e água, que não são miscíveis, formam *duas* fases líquidas. ◀◀◀◀◀

Duas fases coexistem durante processos de *mudanças de fase*, como *vaporização*,  *fusão* e *sublimação*.

### substância pura

Uma substância pura é aquela cuja composição química é uniforme e invariável. Uma substância pura pode existir em mais de uma fase, mas sua composição química deve ser a mesma em cada fase.

► POR EXEMPLO se água líquida e vapor d'água formam um sistema com duas fases, esse sistema pode ser visto como uma substância pura porque cada fase tem a mesma composição. Uma mistura uniforme de gases pode ser vista como uma substância pura desde que ela se mantenha como um gás e não reaja quimicamente. O ar pode ser considerado como uma substância pura, desde que permaneça como uma mistura de gases; mas se uma fase líquida fosse formada por resfriamento o líquido teria uma composição diferente da fase gasosa, e o sistema não poderia mais ser considerado uma substância pura. ◀◀◀◀◀

As mudanças de composição devidas a reações químicas serão consideradas no Cap. 13.

### TOME NOTA...

A temperatura  $T$ , a pressão  $p$ , o volume específico  $v$ , a energia interna específica  $u$ , e a entalpia específica  $h$  são propriedades intensivas. Veja as Seções 1.3.3, 1.5 a 1.7 e 3.6.1.

## 3.1.2 Definindo o Estado

### princípio dos estados equivalentes

O estado *intensivo* de um sistema fechado *em equilíbrio* é sua condição descrita por valores de suas propriedades termodinâmicas intensivas. A partir da observação de muitos sistemas termodinâmicos sabe-se que nem todas as propriedades são independentes entre si, e que o estado pode ser unicamente determinado pelo estabelecimento dos valores de um subconjunto das propriedades intensivas *independentes*. Os valores de todas as outras propriedades termodinâmicas intensivas são determinados a partir desse subconjunto de propriedades independentes especificado. Uma regra geral conhecida como princípio dos estados equivalentes foi desenvolvida como um guia na determinação do número de propriedades independentes necessárias para se determinar o estado de um sistema.

### sistemas compressíveis simples

Para as aplicações consideradas neste livro estamos interessados no que o princípio dos estados equivalentes afirma sobre o estado intensivo de sistemas de substâncias puras comumente encontradas, como a água e misturas de gases não reativos. Esses sistemas são denominados sistemas compressíveis simples. A experiência mostra que os sistemas compressíveis simples ocorrem em uma vasta gama de aplicações da engenharia. Para esses sistemas, o princípio dos estados equivalentes indica que a especificação dos valores de *duas* propriedades termodinâmicas intensivas *independentes quaisquer* fixará os valores de todas as outras propriedades termodinâmicas intensivas.

► POR EXEMPLO no caso de um gás, a temperatura e outra propriedade intensiva, como o volume específico, podem ser selecionadas como as duas propriedades independentes. O princípio dos estados equivalentes então estabelece que pressão, energia interna específica e todas as demais propriedades *intensivas* pertinentes são funções de  $T$  e  $v$ :  $p = p(T, v)$ ,  $u = u(T, v)$ , e assim por diante. As relações funcionais seriam determinadas utilizando os dados experimentais e dependeriam explicitamente da identidade química particular das substâncias que compõem o sistema. O desenvolvimento dessas funções é discutido no Cap. 11. ◀◀◀◀◀

## TOME NOTA...

Para um sistema compressível simples, a especificação dos valores de duas propriedades termodinâmicas intensivas independentes quaisquer fixará os valores de todas as outras propriedades termodinâmicas intensivas.

Propriedades intensivas, como velocidade e elevação, que têm valores determinados em relação a referenciais *externos* ao sistema, são excluídas das presentes considerações. Além disso, como o próprio nome sugere, alterações de volume podem ter uma influência significativa na energia de *sistemas simples compressíveis*. O único modo de transferência de energia através de trabalho que pode ocorrer à medida que um sistema simples compressível é submetido a processos *quase estáticos* (Seção 2.2.5) está associado a mudanças de volume, e é dado por  $\int p \, dV$ . Para mais informações sobre sistemas simples e o princípio dos estados equivalentes, veja o boxe.

### Princípio dos Estados Equivalentes para Sistemas Simples

Com base em evidências empíricas pode-se concluir que existe uma propriedade independente para cada forma pela qual a energia de um sistema pode ser variada independentemente. Vimos no Cap. 2 que a energia de um sistema fechado pode ser alterada independentemente por calor ou por trabalho. Em consequência, uma propriedade independente pode ser associada à quantidade de calor transferida como forma de variação da energia de um sistema, assim como outras propriedades independentes podem ser consideradas para cada forma relevante de alteração da energia do sistema resultante do trabalho. Portanto, com base em evidência experimental, o *princípio dos estados equivalentes* determina que o número de propriedades independentes é igual a um mais o número de interações *relevantes* do sistema devido a trabalho. Na determinação do número de interações relevantes resultantes do trabalho é suficiente considerar somente aquelas que seriam significantes em processos *quase estáticos* do sistema.

O termo *sistema simples* é aplicado quando existe somente *uma* forma pela qual a energia do sistema pode ser alterada de modo significativo por trabalho à medida que o sistema é submetido a um processo quase estático. Portanto, considerando uma propriedade independente para a transferência de calor e outra para a única interação via trabalho, chega-se a um total de duas propriedades necessárias para a determinação do estado de um sistema simples. *Esse é o princípio dos estados equivalentes para sistemas simples*. Embora nenhum sistema seja sempre realmente simples, muitos sistemas podem ser modelados como sistemas simples para fins de análise termodinâmica. O mais importante desses modelos para as aplicações consideradas neste livro é o *sistema simples compressível*. Outros tipos de sistemas simples são os sistemas *elásticos* simples e os sistemas *magnéticos* simples.

## Avaliando Propriedades: Considerações Gerais

A primeira parte deste capítulo está, de maneira geral, relacionada com propriedades termodinâmicas de sistemas simples compressíveis compostos de substâncias *puras*. Uma substância pura é aquela de composição química uniforme e invariável. Na segunda parte do presente capítulo consideramos a avaliação da propriedade de um caso especial: o *modelo de gás ideal*. Relações de propriedades para sistemas nos quais a composição se altera devido à reação química são apresentadas no Cap. 13.

### 3.2 Relação $p-v-T$

#### superfície $p-v-T$

Iniciamos nosso estudo das propriedades de substâncias puras simples compressíveis e das relações entre essas propriedades com a pressão, o volume específico e a temperatura. A partir de conhecimento experimental sabe-se que a temperatura e o volume específico podem ser considerados independentes e a pressão determinada como função desses dois:  $p = p(T, v)$ . O gráfico dessa função é uma *superfície*; a superfície  $p-v-T$ .

#### 3.2.1 Superfície $p-v-T$

A Fig. 3.1 ilustra a superfície  $p-v-T$  de uma substância como a água, que se expande durante a solidificação. A Fig. 3.2 corresponde a uma substância que se contrai durante a solidificação, sendo que a maioria das substâncias exibe esse comportamento. As coordenadas de um ponto na superfície  $p-v-T$  representam os valores que a pressão, o volume específico e a temperatura assumem quando a substância se encontra em equilíbrio.

### regiões bifásicas

#### linha tripla

As Figs. 3.1 e 3.2 apresentam regiões nas superfícies  $p-v-T$  denominadas *sólida*, *líquida* e *vapor*. No interior dessas regiões *monofásicas*, o estado é determinado por *quaisquer* duas das seguintes propriedades: pressão, volume específico e temperatura, uma vez que todas são independentes quando há uma única fase presente. Localizadas entre as regiões monofásicas estão as seguintes regiões bifásicas, onde duas fases coexistem em equilíbrio: líquido-vapor, sólido-líquido e sólido-vapor. Duas fases podem coexistir durante processos de mudanças de fase, como vaporização, fusão e sublimação. No interior dessas regiões bifásicas, pressão e temperatura não são independentes; ou seja, uma não pode ser modificada sem a alteração da outra. No interior dessas regiões, o estado não pode ser determinado somente por temperatura e pressão. Entretanto, o estado pode ser estabelecido pelo volume específico e uma outra propriedade: a pressão ou a temperatura. Três fases podem coexistir em equilíbrio ao longo da linha denominada linha tripla.

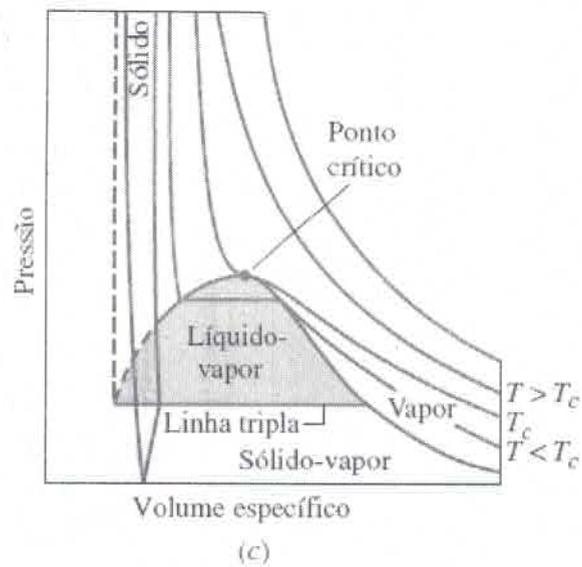
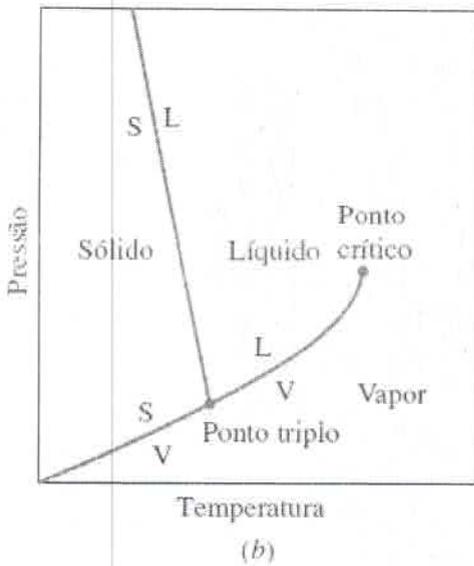
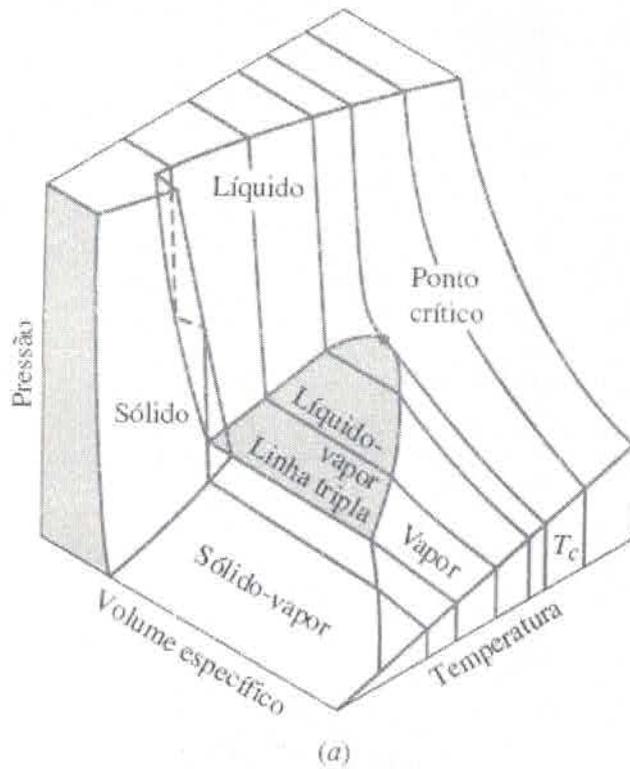
#### estado de saturação

#### domo de vapor

#### ponto crítico

O estado no qual uma mudança de fase começa ou termina é denominado estado de saturação. A região em formato de sino composta pelos estados bifásicos líquido-vapor é chamada de domo de vapor. As linhas que definem o contorno do domo de vapor são denominadas linhas de líquido saturado e de vapor saturado. O topo do domo, onde as linhas de líquido e de vapor saturados se encontram, é denominado ponto crítico. A *temperatura crítica*  $T_c$  de uma substância pura corresponde à temperatura máxima na qual as fases líquida e de vapor podem coexistir em equilíbrio. A pressão no ponto crítico é denominada *pressão crítica*,  $p_c$ . O volume específico nesse estado é denominado *volume específico crítico*. Valores das propriedades no ponto crítico para diversas substâncias são apresentados nas Tabelas A-1 localizadas no Apêndice.

A superfície tridimensional  $p-v-T$  é útil para se obter as relações gerais entre as três fases da matéria que são geralmente consideradas. Entretanto, em geral é mais conveniente trabalhar com projeções bidimensionais dessa superfície. Essas projeções são consideradas a seguir.



**Fig. 3.1** Superfície  $p-v-T$  e projeções para uma substância que se expande durante a solidificação. (a) Vista tridimensional. (b) Diagrama de fases. (c) Diagrama  $p-v$ .

### 3.2.2 Projeções da Superfície $p-v-T$

#### O Diagrama de Fases

##### diagrama de fases

Se a superfície  $p-v-T$  é projetada sobre o plano pressão-temperatura, um diagrama de propriedades conhecido como diagrama de fases é obtido. Como ilustrado nas *Figs. 3.1b* e *3.2b*, quando a superfície é projetada desse modo as regiões bifásicas se reduzem a linhas. Um ponto em qualquer dessas linhas representa todas as misturas bifásicas na temperatura e na pressão especificadas.

## temperatura de saturação

## pressão de saturação

O termo temperatura de saturação indica a temperatura na qual uma mudança de fase ocorre para uma dada pressão, que é denominada pressão de saturação para a dada temperatura. Os diagramas de fase mostram que para cada pressão de saturação há uma única temperatura de saturação, e vice-versa.

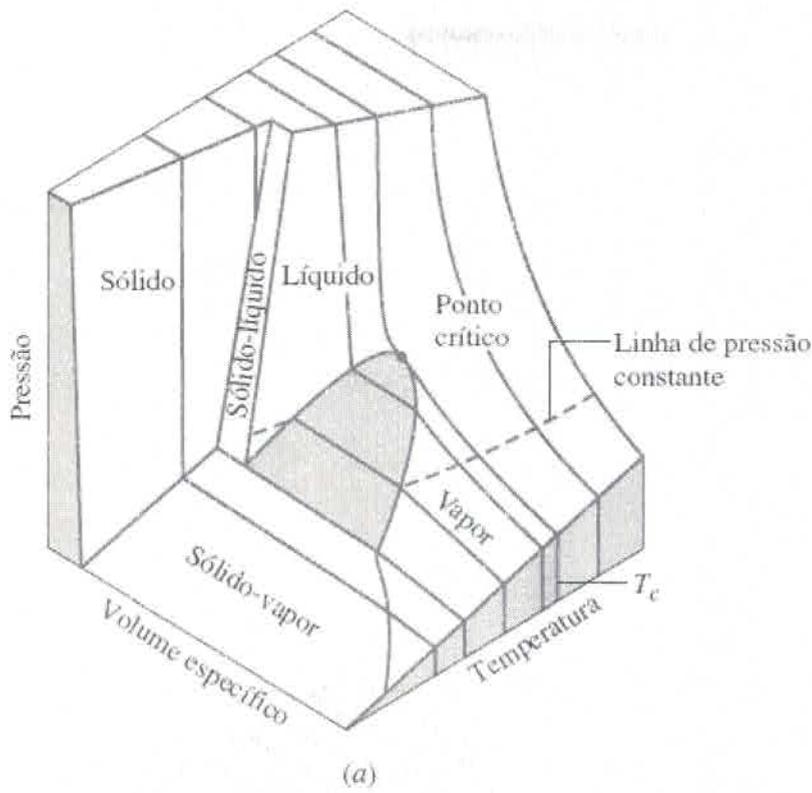
## ponto triplo

A linha *tripla* da superfície  $p-v-T$  tridimensional é projetada em um único *ponto* no diagrama de fases. Esse ponto é denominado ponto triplo. Vale recordar que o ponto triplo da água é usado como referência na definição de escalas de temperatura (Seção 1.7.3). Por convenção, a temperatura *associada* ao ponto triplo da água é de 273,16 K (491,69°R). A pressão *medida* no ponto triplo da água é de 0,6113 kPa (0,00602 atm).

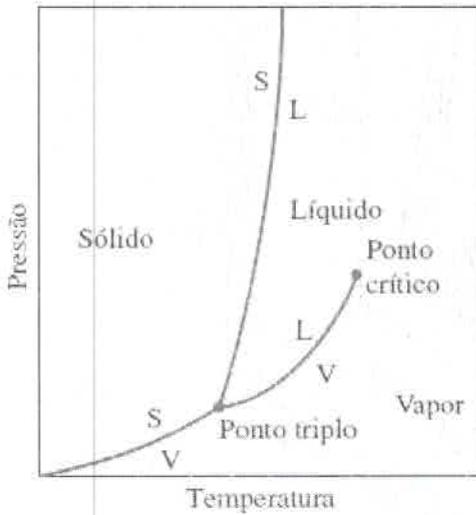
A linha que representa a região bifásica sólido-líquido no diagrama de fases se inclina para a esquerda para substâncias que se expandem durante a solidificação e para a direita para aquelas que se contraem. Embora uma única fase sólida seja mostrada nos diagramas de fase das [Figs. 3.1](#) e [3.2](#), sólidos podem existir em diferentes fases sólidas. Por exemplo, sete diferentes formas cristalinas foram identificadas para a água na fase sólida (gelo).

## Fases Sólidas

Adicionalmente às fases *sólida*, *líquida* e *vapor*, algumas substâncias possuem distintas fases sólidas ou líquidas. Um desses exemplos vem da metalurgia, na qual diferentes estruturas *cristalinas* são determinadas para metais, dependendo de como eles foram obtidos e tratados. *Alótropos* são estruturas cristalinas diferentes baseadas no mesmo átomo, sendo o exemplo mais conhecido o carbono, com suas estruturas diamante e grafite. O ferro e suas ligas podem existir em diferentes estruturas cristalinas, que são manufaturadas para alcançar propriedades como força, maleabilidade e módulo elástico características para determinada aplicação. Mesmo a água na forma de gelo, uma substância molecular simples, apresenta 17 diferentes estruturas cristalinas. Embora a termodinâmica de sólidos não seja o foco deste livro, ela constitui atualmente uma das áreas de estudo e pesquisa mais importantes em Engenharia.



(a)



(b)



(c)

**Fig. 3.2** Superfície  $p-v-T$  e projeções para uma substância que se contrai durante a solidificação. (a) Vista tridimensional. (b) Diagrama de fases. (c) Diagrama  $p-v$ .

### Diagrama $p-v$

#### diagrama $p-v$

Projetar a superfície  $p-v-T$  sobre o plano pressão-volume específico resulta no diagrama  $p-v$ , como ilustrado nas Figs. 3.1c e 3.2c. Essas figuras apresentam termos já discutidos anteriormente.

Durante a resolução de problemas, um esboço do diagrama  $p-v$  é, em geral, conveniente. Para facilitar o uso desse esboço observe o comportamento das linhas de temperatura constante (isotermas). Observando-se as Figs. 3.1c e

3.2c, pode-se ver que, para qualquer temperatura especificada inferior à temperatura crítica, a pressão se mantém constante ao longo de uma transformação líquido-vapor. Entretanto, para as regiões monofásicas de líquido e de vapor, a pressão diminui, para uma dada temperatura, à medida que o volume específico aumenta. Para temperaturas superiores ou iguais à temperatura crítica, a pressão se reduz continuamente, para uma dada temperatura, à medida que o volume específico aumenta. Não há passagem pela região bifásica líquido-vapor. A isoterma crítica passa por um ponto de inflexão com inclinação nula no ponto crítico.

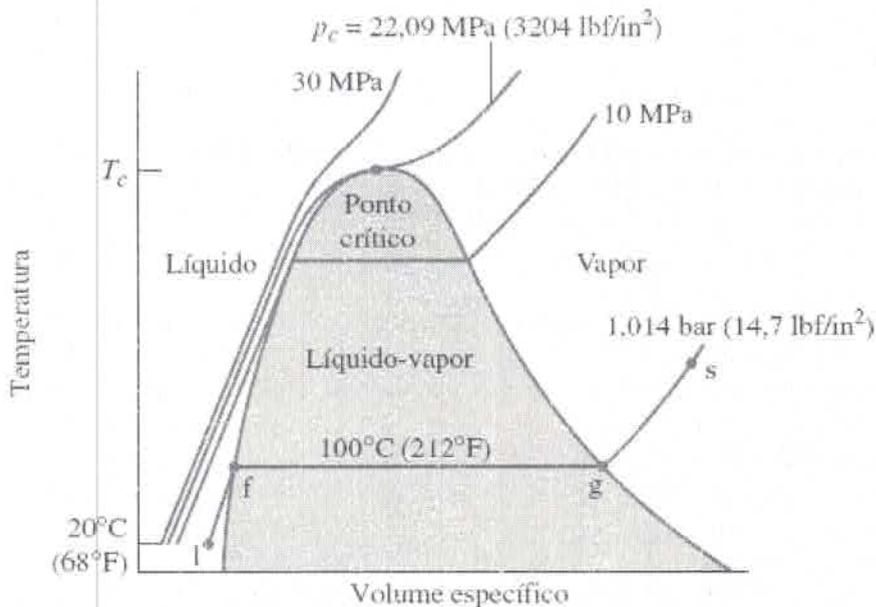
## Diagrama $T-v$

### diagrama $T-v$

Projetando as regiões de líquido, bifásica líquido-vapor e de vapor da superfície  $p-v-T$  sobre o plano temperatura-volume específico obtém-se um diagrama  $T-v$  como ilustrado na Fig. 3.3. Uma vez que características semelhantes são apresentadas para o comportamento  $p-v-T$  de todas as substâncias puras, o diagrama  $T-v$  para a água mostrado na Fig. 3.3 pode ser considerado representativo.

Como para o diagrama  $p-v$ , um esboço do diagrama  $T-v$  é frequentemente conveniente para a resolução de problemas. Para facilitar o uso desse esboço observe a forma das linhas de pressão constante (isobáricas). Para pressões inferiores à pressão crítica, como a isobárica de 10 MPa da Fig. 3.3, a pressão se mantém constante em relação à temperatura à medida que a região bifásica é percorrida. No interior das regiões monofásicas de líquido e de vapor a temperatura aumenta, para uma dada pressão, à medida que o volume específico aumenta. Para pressões superiores ou iguais à pressão crítica, como a de 30 MPa na Fig. 3.3, a temperatura aumenta continuamente com o volume específico para uma dada pressão. Não há passagem pela região bifásica líquido-vapor.

As projeções da superfície  $p-v-T$  utilizadas neste livro para ilustrar os processos em geral não são desenhadas em escala. O mesmo comentário se aplica a outros diagramas de propriedades que serão apresentados depois.



**Fig. 3.3** Esboço de um diagrama temperatura-volume específico para a água mostrando as regiões de líquido, bifásica líquido-vapor e de vapor (fora de escala).

## 3.3 Estudando Mudança de Fase

O estudo dos eventos que ocorrem quando uma substância pura passa por uma mudança de fase é instrutivo. Para começar, considere um sistema fechado de massa unitária (1 kg ou 1 lb) de água líquida a 20°C (68°F) contida no

interior de um conjunto cilindro-pistão, como ilustrado na [Fig. 3.4a](#). Esse estado é representado pelo ponto 1 na [Fig. 3.3](#). Suponha que a água é aquecida lentamente enquanto sua pressão é mantida constante e uniforme no interior do sistema a 1,014 bar (14,7 lbf/in<sup>2</sup>).

## Estados de Líquido

### líquido subresfriado

### líquido comprimido

À medida que o sistema é aquecido a uma pressão constante a temperatura aumenta consideravelmente, enquanto o volume específico apresenta uma elevação menos significativa. Por fim, o sistema atinge o estado representado por f na [Fig. 3.3](#). Esse é o estado de líquido saturado correspondente à pressão especificada. Para água a 1,014 bar (14,7 lbf/in<sup>2</sup>), a temperatura de saturação é de 100°C (212°F). Os estados de líquido ao longo do segmento l-f da [Fig. 3.3](#) são, algumas vezes, denominados estados de líquido sub-resfriado, uma vez que a temperatura nesses estados é inferior à temperatura de saturação na pressão especificada. Eles são também denominados estados de líquido comprimido, uma vez que a pressão em cada estado é superior à pressão de saturação correspondente à temperatura no estado. As denominações *líquido*, *líquido sub-resfriado* e *líquido comprimido* são utilizadas de modo equivalente.

## Mistura Bifásica Líquido-Vapor

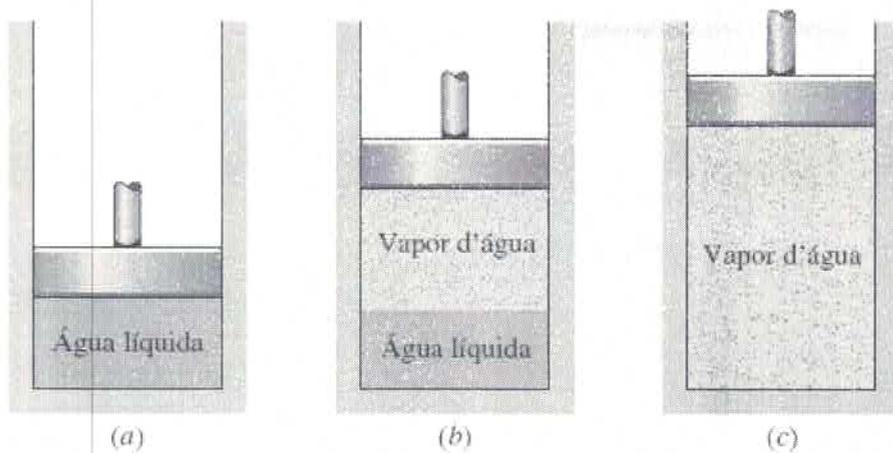
### mistura bifásica líquido-vapor

Quando o sistema se encontra no estado de líquido saturado (estado f da [Fig. 3.3](#)) uma transferência de calor adicional à pressão constante resulta na formação de vapor sem nenhuma mudança de temperatura, mas com um considerável aumento de volume específico. Conforme ilustrado na [Fig. 3.4b](#), o sistema seria composto de uma mistura bifásica líquido-vapor. Quando uma mistura de líquido e vapor existe em equilíbrio, a fase líquida é um líquido saturado e a fase vapor é um vapor saturado. Se o sistema continua a ser aquecido até que a última porção de líquido tenha sido vaporizada, ele é levado ao ponto g da [Fig. 3.3](#), o estado de vapor saturado. As misturas bifásicas líquido-vapor intermediárias podem ser distinguidas entre si pelo *título*, uma propriedade intensiva.

### título

Para uma mistura bifásica líquido-vapor, a razão entre a massa de vapor presente e a massa total da mistura é seu título,  $x$ . Em forma matemática, temos

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}} \quad (3.1)$$



**Fig. 3.4** Ilustração de uma transformação líquido-vapor para a água a pressão constante.

O valor do título varia de zero até a unidade: para estados de líquido saturado,  $x = 0$ , e para estados de vapor saturado,  $x = 1,0$ . Embora definido como uma razão, o título é geralmente expresso como porcentagem. Exemplos ilustrando a utilização do título são apresentados na Seção 3.5. Parâmetros semelhantes podem ser definidos para misturas bifásicas sólido-vapor e sólido-líquido.

## Estados de Vapor

### vapor superaquecido

Voltemos a considerar as Figs. 3.3 e 3.4. Quando o sistema se encontra no estado de vapor saturado (estado g na Fig. 3.3), o aquecimento suplementar à pressão constante resulta nos aumentos de temperatura e de volume específico. A condição do sistema seria agora representada pela Fig. 3.4c. O estado indicado por s na Fig. 3.3 é representativo dos estados que seriam alcançados continuando o aquecimento, à medida que a pressão é mantida constante. Um estado como s é normalmente chamado de estado de vapor superaquecido, uma vez que o sistema estaria a uma temperatura superior à temperatura de saturação correspondente para a pressão dada.

Considere, a seguir, o mesmo raciocínio realizado para as outras pressões constantes indicadas na Fig. 3.3, 10 MPa (1450 lbf/in<sup>2</sup>), 22,09 MPa (3204 lbf/in<sup>2</sup>) e 30 MPa (4351 lbf/in<sup>2</sup>). A primeira dessas pressões é inferior à pressão crítica da água, a segunda é a pressão crítica e a terceira é superior à pressão crítica. Como antes, considere o sistema contendo inicialmente líquido a 20°C (68°F). Primeiro, consideremos o sistema caso este fosse aquecido lentamente a 10 MPa (1450 lbf/in<sup>2</sup>). A essa pressão seria formado vapor a uma temperatura superior à observada no exemplo anterior, uma vez que a pressão de saturação é superior (consulte a Fig. 3.3). Além disso, o aumento de volume específico do líquido saturado até vapor saturado seria um pouco menor, como mostrado pelo estreitamento da região de saturação. A despeito disso, o comportamento global seria o mesmo de antes.

A seguir, considere o comportamento de um sistema que seja aquecido à pressão crítica, ou superior a esta. Como se verificou ao se seguir a isobárica crítica da Fig. 3.3, não ocorreria a mudança de fase de líquido para vapor. Para todos os estados existiria somente uma fase. Conforme mostra a linha a-b-c do diagrama de fases da Fig. 3.5, a vaporização (e o processo inverso de condensação) pode ocorrer somente quando a pressão é inferior à pressão crítica. Então, para estados em que a pressão é maior que a pressão crítica os termos líquido e vapor tendem a perder seus significados. Ainda de modo a facilitar a referência a esses estados, usamos o termo líquido quando a temperatura é inferior à temperatura crítica, e vapor quando a temperatura é maior que a temperatura crítica. Essa convenção está indicada na Fig. 3.5.

Enquanto a condensação do vapor d'água para líquido e o resfriamento adicional a uma temperatura inferior à do líquido são facilmente imaginadas e até mesmo fazem parte de nosso cotidiano, gases liquefeitos diferentes do vapor d'água podem não ser tão familiares. Contudo, há aplicações importantes envolvendo os mesmos. Veja o boxe

próximo para aplicações do nitrogênio nas formas líquida e gasosa.

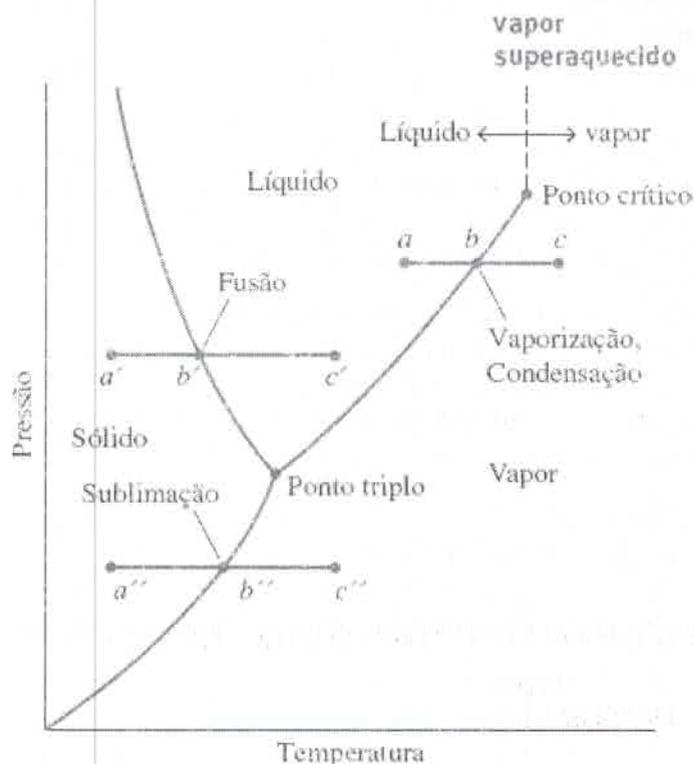


Fig. 3.5 Diagrama de fases para a água (fora de escala).

Líquido\_para\_Vapor  
A.13 – Abas a & b



Vapor\_para\_Líquido  
A.14 – Abas a & b

### Nitrogênio, um Herói Anônimo

O nitrogênio é obtido usando a tecnologia comercial de separação do ar, que extrai oxigênio e nitrogênio do ar. Enquanto as aplicações para o oxigênio são amplamente reconhecidas, o uso do nitrogênio tende a ser menos alardeado, mas ainda assim abrange situações com as quais as pessoas lidam todos os dias.

O nitrogênio líquido é usado para o congelamento rápido de alimentos. Os túneis de congelamento empregam uma esteira transportadora de alimentos para submeter o alimento a um processo de pulverização de nitrogênio líquido, enquanto grupos de freezers possibilitam que os alimentos fiquem imersos em um banho de nitrogênio líquido. Cada tipo de freezer opera com temperaturas menores do que  $-185^{\circ}\text{C}$  ( $-300^{\circ}\text{F}$ ). O nitrogênio líquido também é usado para preservar amostras empregadas em pesquisas médicas e por dermatologistas para remover lesões (veja BIOCONEXÕES no box a seguir).

Como um gás, o nitrogênio, com outros gases, é inserido nas embalagens de alimentos para substituir o oxigênio, prolongando assim o prazo de validade do produto – os exemplos incluem o gás inflado em sacos de batata, salada verde e queijo ralado. Para melhorar o desempenho de pneus, o nitrogênio é utilizado para inflar os pneus de carros de corrida e de aviões. O nitrogênio está entre as várias alternativas de substâncias injetadas em formações rochosas subterrâneas para estimular o fluxo de óleo preso e gás natural para a superfície – procedimento conhecido como

fraturamento hidráulico. Indústrias químicas e refinarias utilizam o gás nitrogênio como agente de inertização para evitar explosões. Máquinas de corte a laser também usam o nitrogênio e outros gases especiais.

## Fusão e Sublimação

Embora as mudanças de fase de líquido para vapor (vaporização) e de vapor para líquido (condensação) sejam as de principal interesse neste livro, é também importante considerar as mudanças de fase de sólido para líquido (fusão) e de sólido para vapor (sublimação). Para estudar essas transições, considere um sistema que consiste em uma massa unitária de gelo a uma temperatura inferior à do ponto triplo. Iniciemos com o caso em que o sistema se encontra no estado  $a'$  da Fig. 3.5, no qual a pressão é superior à pressão do ponto crítico. Admita que o sistema é aquecido lentamente enquanto sua pressão é mantida constante e uniforme no interior do sistema. A temperatura aumenta com o aquecimento até que o ponto  $b'$  da Fig. 3.5 seja alcançado. Nesse estado, o gelo é um sólido saturado. A transferência de calor adicional à pressão constante leva à formação de líquido sem nenhuma alteração de temperatura. Conforme o aquecimento do sistema prossegue, o gelo continua a se fundir até que, ao final, a última parcela se transforma, e o sistema passa a conter somente líquido saturado. Durante o processo de fusão a pressão e a temperatura se mantêm constantes. Para a maioria das substâncias o volume específico aumenta durante a fusão, mas, para a água, o volume específico do líquido é inferior ao volume específico do sólido. A continuidade do processo de aquecimento à pressão constante leva a um aumento de temperatura à medida que o sistema é levado ao ponto  $c'$  da Fig. 3.5. A seguir, considere o caso em que o sistema se encontra inicialmente no estado  $a''$  da Fig. 3.5., no qual a pressão é inferior à pressão do ponto triplo. Nesse caso, se o sistema for aquecido a pressão constante ele passará pela região bifásica sólido-vapor, sendo levado para a região de vapor ao longo da linha  $a''-b''-c''$  mostrada na Fig. 3.5. Isto é, ocorre a sublimação.



## BIOCONEXÕES

Conforme discutido no box destinado ao nitrogênio nesta seção, o nitrogênio é utilizado em muitas aplicações, incluindo aplicações médicas. Uma delas corresponde à prática da *criocirurgia*, utilizada pelos dermatologistas, que consiste no congelamento localizado do tecido da pele para a remoção de lesões indesejáveis, inclusive lesões pré-cancerosas. Para esse tipo de cirurgia aplica-se nitrogênio líquido a partir de um *spray* ou uma sonda. A criocirurgia é rapidamente realizada, em geral sem o uso de anestesia. Os dermatologistas armazenam o nitrogênio líquido necessário para muitos meses em recipientes chamados frascos *Dewar*, similares às garrafas a vácuo.

## 3.4 Obtendo Propriedades Termodinâmicas

Dados de propriedades termodinâmicas podem ser obtidos de várias formas, incluindo tabelas, gráficos, equações e programas de computador. As Seções 3.5 e 3.6 dão ênfase à utilização de *tabelas* de propriedades termodinâmicas que estão normalmente disponíveis para as substâncias puras simples compressíveis de interesse em engenharia. O uso dessas tabelas constitui uma importante habilidade. A capacidade de localizar estados em um diagrama de propriedades constitui uma importante habilidade associada. O programa de computador *Interactive Thermodynamics: IT* é apresentado na Seção 3.7 e utilizado seletivamente em exemplos e problemas no final deste capítulo. No entanto, convém ressaltar que outros programas similares podem ser utilizados para a solução dos problemas apresentados. O uso apropriado de tabelas e diagramas de propriedades é um pré-requisito para a efetiva utilização do programa computacional na obtenção de dados de propriedades termodinâmicas.

### tabelas de vapor

Uma vez que tabelas para diferentes substâncias são, com frequência, colocadas no mesmo formato, a presente discussão será centrada principalmente nas Tabelas A-2 a A-6, que fornecem propriedades para a água; essas tabelas são comumente denominadas tabelas de vapor. As Tabelas A-7 a A-9 para o Refrigerante 22, as Tabelas A-10 a A-12 para o Refrigerante 134a, as Tabelas A-13 a A-15 para a amônia e as Tabelas A-16 a A-18 para o propano são

utilizadas de modo similar, da mesma maneira que tabelas para outras substâncias encontradas na literatura de engenharia. As tabelas estão disponíveis nos Apêndices em unidades SI e inglesas. As tabelas em unidades inglesas estão designadas pela letra E. Por exemplo, as tabelas de vapor em unidades inglesas são as Tabelas A-2E a A-6E.

As substâncias com os dados tabelados apresentados neste livro foram selecionadas em virtude de sua importância prática. Contudo, elas são meramente representativas, considerando a vasta gama de substâncias importantes na indústria. Para satisfazer às mudanças de requisitos e lidar com as necessidades especiais, frequentemente são introduzidas substâncias novas, enquanto outras se tornam obsoletas.



## ENERGIA & MEIO AMBIENTE

O desenvolvimento de refrigerantes contendo cloro, no século XX, como o Refrigerante 12, ajudou a abrir caminho para os refrigeradores e condicionadores de ar desfrutados hoje. Entretanto, em virtude da preocupação relativa aos efeitos do cloro sobre a camada de ozônio que protege a Terra, acordos internacionais têm sido feitos para abolir de modo gradual o uso desses refrigerantes. Substitutos para eles também passaram por críticas por serem nocivos para o ambiente. Assim, a busca por alternativas e os *refrigerantes naturais* estão recebendo um olhar mais atento. Os refrigerantes naturais incluem amônia, alguns hidrocarbonetos – propano, por exemplo dióxido de carbono, água e ar.

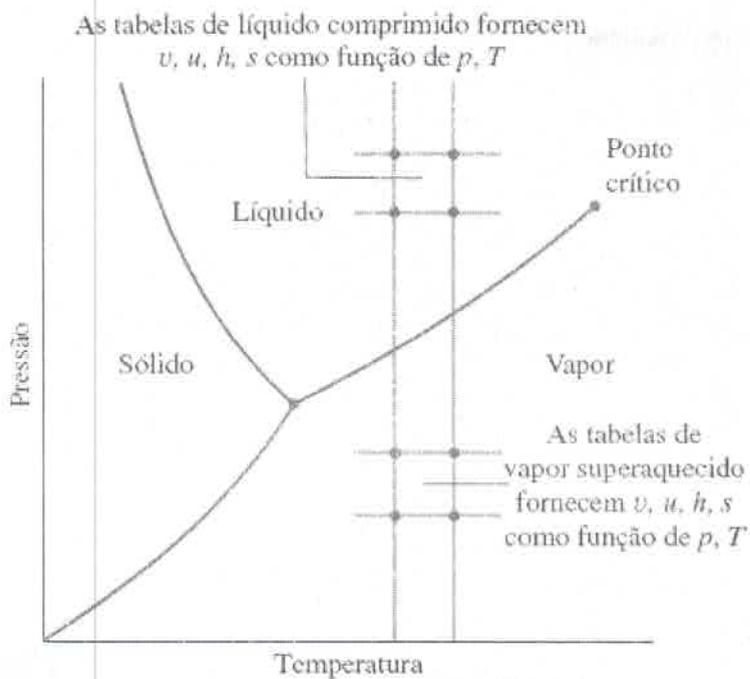
A amônia, outrora amplamente utilizada como um refrigerante para aplicações domésticas, porém suspensa por ser tóxica, está recebendo interesse renovado pelo fato de ser um refrigerante eficaz e não conter cloro. Refrigeradores utilizando propano estão disponíveis no mercado global, apesar da persistente preocupação em virtude de o propano ser inflamável. O dióxido de carbono é perfeitamente adequado para sistemas pequenos e leves, como os automotivos e as unidades portáteis de condicionadores de ar. Embora o CO<sub>2</sub> liberado para o ambiente contribua para o aquecimento global, apenas uma minúscula quantidade está presente em uma unidade típica, e até mesmo esse caso estaria sujeito a uma manutenção adequada e aos protocolos disponíveis para unidades de refrigeração.

### 3.5 Avaliando Pressão, Volume Específico e Temperatura

#### 3.5.1 Tabelas de Líquido e de Vapor

As propriedades do vapor d'água estão listadas nas Tabelas A-4 e as de água líquida nas Tabelas A-5. Estas são geralmente denominadas tabelas de vapor *superaquecido* e tabelas de líquido *comprimido*, respectivamente. O esboço do diagrama de fases mostrado na Fig. 3.6 apresenta a estrutura dessas tabelas. Como a pressão e a temperatura são propriedades independentes nas regiões monofásicas de líquido e de vapor, elas podem ser utilizadas para a determinação de um estado em uma dessas regiões. Em consequência, as Tabelas A-4 e A-5 estão montadas de modo a fornecer valores de várias propriedades em função de valores da pressão e da temperatura. A primeira propriedade listada é o volume específico. As demais propriedades serão discutidas nas seções subsequentes.

Para cada pressão listada, os valores dados na tabela de vapor superaquecido (Tabela A-4) *começam* com o estado de vapor saturado e então prosseguem para temperaturas superiores. Os dados da tabela de líquido comprimido (Tabela A-5) *terminam* com os estados de líquido saturado. Isto é, para uma dada pressão os valores das propriedades são dados para temperaturas crescentes até o estado de saturação. Para essas tabelas os valores mostrados entre parênteses após a pressão no topo da tabela correspondem à temperatura de saturação.



**Fig. 3.6** Esboço do diagrama de fases para a água utilizado para a discussão da estrutura das tabelas de vapor superaquecido e de líquido comprimido (fora de escala).

▶ POR EXEMPLO nas Tabelas A-4 e A-5, para uma pressão de 10,0 MPa, a temperatura de saturação é listada como 311,06°C. Nas Tabelas A-4E e A-5E, na pressão de 500 lbf/in<sup>2</sup>, a temperatura de saturação é listada como 467,1°F.

▶ POR EXEMPLO para adquirir maior experiência com as Tabelas A-4 e A-5, verifique o seguinte: a Tabela A-4 fornece o volume específico do vapor d'água a 10,0 MPa e 600°C como 0,03837 m<sup>3</sup>/kg. A 10,0 MPa e 100°C a Tabela A-5 fornece o volume específico da água líquida como 1,0385 × 10<sup>-3</sup> m<sup>3</sup>/kg. A Tabela A-4E fornece o volume específico do vapor d'água a 500 lbf/in<sup>2</sup> e 600°F como 1,158 ft<sup>3</sup>/lb. A 500 lbf/in<sup>2</sup> e 100°F a Tabela A-5E fornece o volume específico da água líquida como 0,016106 ft<sup>3</sup>/lb.

### interpolação linear

Os estados envolvidos na resolução de problemas geralmente não estão contidos no conjunto de valores fornecidos pelas tabelas de propriedades. A *interpolação* entre valores adjacentes das tabelas se torna, dessa maneira, necessária. Sempre deve-se ter muito cuidado durante a interpolação dos valores da tabela. As tabelas disponíveis no Apêndice foram extraídas de tabelas mais completas que são construídas de modo que a interpolação linear, ilustrada no exemplo a seguir, pode ser utilizada com precisão aceitável. Considera-se que a interpolação linear permanece válida quando aplicada a tabelas menos refinadas, como as disponíveis neste livro, para exemplos resolvidos e problemas de final de capítulo.

▶ POR EXEMPLO determinemos o volume específico do vapor d'água para um estado no qual  $p = 10$  bar e  $T = 215^\circ\text{C}$ . A Fig. 3.7 mostra um conjunto de dados extraído da Tabela A-4. Para a pressão de 10 bar a temperatura especificada de 215°C se encontra entre os valores tabelados de 200°C e 240°C, que são mostrados em negrito. Os valores de volume específico correspondentes são também mostrados em negrito. Para determinar o volume específico  $v$  correspondente a 215°C podemos pensar na *inclinação* de uma linha reta que une os estados adjacentes da tabela, como se segue

$$\text{inclinação} = \frac{(0,2275 - 0,2060) \text{ m}^3/\text{kg}}{(240 - 200)^\circ\text{C}} = \frac{(v - 0,2060) \text{ m}^3/\text{kg}}{(215 - 200)^\circ\text{C}}$$

Resolvendo para  $v$ , o resultado é  $v = 0,2141 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

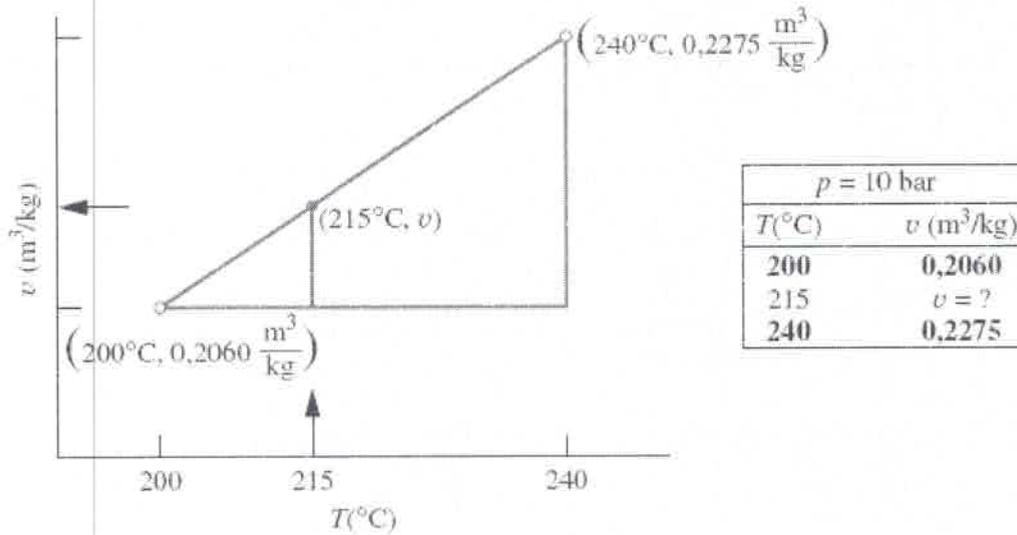


Fig. 3.7 Ilustração da interpolação linear.

Os exemplos a seguir abordam o uso de esboços de diagramas  $p-v$  e  $T-v$  juntamente com dados tabelados de maneira a estabelecer os estados inicial e final de um processo. De acordo com o princípio dos estados equivalentes, duas propriedades intensivas independentes devem ser conhecidas para que sejam estabelecidos os estados do sistema aqui considerado.

### ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 3.1 ▶

#### Aquecendo Amônia a Pressão Constante

Um conjunto cilindro-pistão vertical contendo 0,1 lb (0,04 kg) de amônia, inicialmente como vapor saturado, é colocado sobre uma placa aquecida. Devido ao peso do pistão e da pressão atmosférica local a pressão da amônia é de  $20 \text{ lbf/in}^2$  ( $137,9 \text{ kPa}$ ). O aquecimento ocorre lentamente, e a amônia se expande a pressão constante até a temperatura final de  $77^{\circ}\text{F}$  ( $25^{\circ}\text{C}$ ). Mostre os estados inicial e final em diagramas  $T-v$  e  $p-v$ , e determine

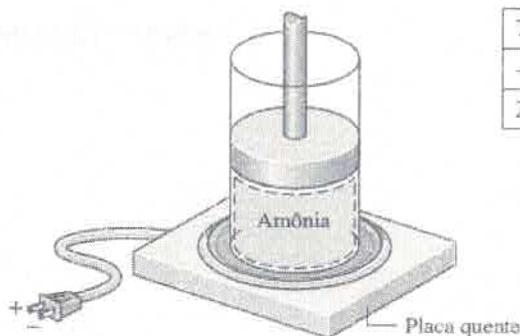
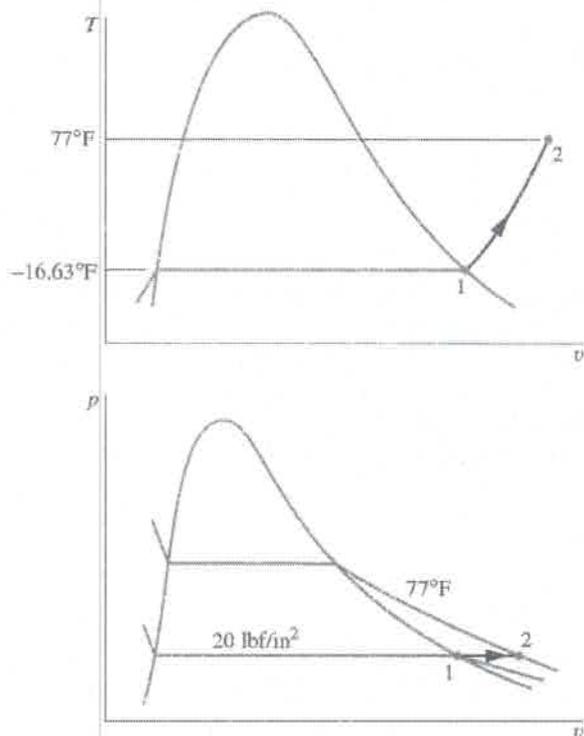
- (a) o volume ocupado pela amônia em cada estado, em  $\text{ft}^3$ .
- (b) o trabalho realizado durante o processo, em Btu.

#### SOLUÇÃO

**Dado:** amônia é aquecida a uma pressão constante em um conjunto cilindro-pistão a partir do estado de vapor saturado até uma temperatura final conhecida.

**Pede-se:** mostre os estados inicial e final em diagramas  $T-v$  e  $p-v$  e determine o volume em cada estado e o trabalho realizado durante o processo.

#### Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



$77^{\circ}\text{F} = 25^{\circ}\text{C}$
$-16,63^{\circ}\text{F} = -27^{\circ}\text{C}$
$20 \text{ lbf/in}^2 = 137,9 \text{ kPa}$

#### Modelo de Engenharia:

1. A amônia constitui um sistema fechado.
2. Os estados 1 e 2 são estados de equilíbrio.
3. O processo ocorre a uma pressão constante.
4. O trabalho relacionado ao movimento do pistão é o único modo de trabalho presente.

Fig. E3.1

**Análise:** o estado inicial é de vapor saturado a  $20 \text{ lbf/in}^2$ . Como o processo ocorre a uma pressão constante, o estado final se encontra na região de vapor superaquecido e é determinado por  $p_2 = 20 \text{ lbf/in}^2$  e  $T_2 = 77^{\circ}\text{F}$ . Os estados inicial e final são mostrados nos diagramas  $T-v$  e  $p-v$  da Fig. E3.1.

(a) Os volumes ocupados pela amônia nos estados 1 e 2 são obtidos utilizando a massa dada e os respectivos volumes específicos. A partir da Tabela A-15E para  $p_1 = 20 \text{ lbf/in}^2$  e da temperatura de saturação correspondente, obtemos  $v_1 = v_g = 13,497 \text{ ft}^3/\text{lb}$ . Então

$$V_1 = mv_1 = (0,1 \text{ lb})(13,497 \text{ ft}^3/\text{lb}) = 1,35 \text{ ft}^3$$

#### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- esboçar os diagramas  $T-v$  e  $p-v$  e localizar estados nesses diagramas.
- calcular o trabalho usando a Eq. 2.17.
- obter dados de propriedades da amônia para estados de vapor.

Interpolando na Tabela A-15E para  $p_2 = 20 \text{ lbf/in}^2$  e  $T_2 = 77^{\circ}\text{F}$ , obtemos  $v_2 = 16,7 \text{ ft}^3/\text{lb}$ . Então

$$V_2 = mv_2 = (0,1 \text{ lb})(16,7 \text{ ft}^3/\text{lb}) = 1,67 \text{ ft}^3$$

(b) Para este caso, o trabalho pode ser calculado utilizando a Eq. 2.17. Considerando que a pressão é constante

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p \, dV = p(V_2 - V_1)$$

Substituindo os valores

$$\begin{aligned} W &= (20 \text{ lbf/in}^2)(1,67 - 1,35)\text{ft}^3 \left| \frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}} \right| \\ &= 1,18 \text{ Btu} \end{aligned}$$

1 Observe a utilização de fatores de conversão no cálculo.

### Teste-Relâmpago

Considerando que o aquecimento continua a  $20 \text{ lbf/in}^2$  ( $137,9 \text{ kPa}$ ) de  $T_2 = 77^\circ\text{F}$  ( $25^\circ\text{C}$ ) a  $T_3 = 90^\circ\text{F}$  ( $32,2^\circ\text{C}$ ), determine o trabalho realizado durante o Processo 2-3 em Btu. **Resposta:** 0,15 Btu.

### 3.5.2 Tabelas de Saturação

As tabelas de saturação, Tabelas A-2, A-3 e A-6, fornecem dados de propriedades para a água nos estados de líquido saturado, de vapor saturado e de sólido saturado. As Tabelas A-2 e A-3 são o foco da presente discussão. Cada uma dessas tabelas fornece dados de líquido saturado e de vapor saturado. Os valores de propriedades para esses estados são denotados pelos subscritos f e g, respectivamente. A Tabela A-2 é chamada de *tabela de temperatura*, uma vez que temperaturas são listadas na primeira coluna, em incrementos convenientes. A segunda coluna fornece os valores de pressão de saturação correspondentes. As duas colunas subsequentes fornecem, respectivamente, o volume específico do líquido saturado,  $v_f$ , e o volume específico do vapor saturado,  $v_g$ . A Tabela A-3 é chamada de *tabela de pressão*, já que as pressões são listadas, em incrementos convenientes, em sua primeira coluna. Os valores de temperatura de saturação correspondentes são fornecidos na segunda coluna. As duas colunas subsequentes fornecem  $v_f$  e  $v_g$ , respectivamente.

O volume específico de uma mistura bifásica líquido-vapor pode ser determinado pela utilização das tabelas de saturação e pela definição de título dada pela Eq. 3.1 descrita a seguir. O volume total da mistura é a soma dos volumes das fases líquida e de vapor

$$V = V_{\text{liq}} + V_{\text{vap}}$$

Dividindo pela massa total da mistura,  $m$ , é obtido um volume específico *médio* para a mistura

$$v = \frac{V}{m} = \frac{V_{\text{liq}}}{m} + \frac{V_{\text{vap}}}{m}$$

Uma vez que a fase líquida é composta por líquido saturado e que a fase vapor é composta por vapor saturado,  $V_{\text{liq}} = m_{\text{liq}}v_f$  e  $V_{\text{vap}} = m_{\text{vap}}v_g$ , então

$$v = \left( \frac{m_{\text{liq}}}{m} \right) v_f + \left( \frac{m_{\text{vap}}}{m} \right) v_g$$

Utilizando a definição de título,  $x = m_{\text{vap}}/m$ , e notando que  $m_{\text{liq}}/m = 1 - x$ , a expressão anterior se torna

$$v = (1 - x)v_f + xv_g = v_f + x(v_g - v_f) \quad (3.2)$$

O aumento de volume específico durante a vaporização ( $v_g - v_f$ ) é também representado por  $v_{fg}$ .

► **POR EXEMPLO** considere um sistema que consiste em uma mistura bifásica líquido-vapor de água a  $100^\circ\text{C}$  e título de 0,9. Da Tabela A-2 a  $100^\circ\text{C}$ ,  $v_f = 1,0435 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$  e  $v_g = 1,673 \text{ m}^3/\text{kg}$ . O volume específico da mistura é

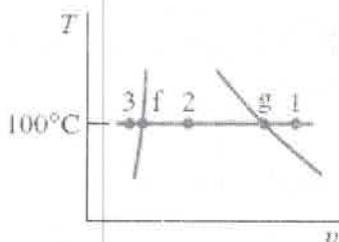
$$v = v_f + x(v_g - v_f) = 1,0435 \times 10^{-3} + (0,9)(1,673 - 1,0435 \times 10^{-3}) = 1,506 \text{ m}^3/\text{kg}$$

De maneira semelhante, o volume específico de uma mistura bifásica líquido-vapor a  $212^\circ\text{F}$  e um título de 0,9 é

$$v = v_f + x(v_g - v_f) = 0,01672 + (0,9)(26,80 - 0,01672) = 24,12 \text{ ft}^3/\text{lb}$$

em que os valores de  $v_f$  e  $v_g$  são obtidos da Tabela A-2E. ◀ ◀ ◀ ◀ ◀

Para facilitar a localização de estados nas tabelas em geral é conveniente o uso de valores das tabelas de saturação juntamente com um esboço de um diagrama  $T-v$  ou  $p-v$ . Por exemplo, se o volume específico  $v$  e a temperatura  $T$  são conhecidos, utilize a tabela de temperatura apropriada, Tabela A-2 ou A-2E, e determine os valores de  $v_f$  e  $v_g$ . Um diagrama  $T-v$  mostrando esses dados é apresentado na Fig. 3.8. Se o volume específico dado se encontra entre  $v_f$  e  $v_g$ , o sistema consiste em uma mistura bifásica líquido-vapor, e a pressão é a pressão de saturação correspondente à temperatura dada. O título pode ser encontrado pela resolução da Eq. 3.2. Se o volume específico é maior do que  $v_g$ , o estado se encontra na região de vapor superaquecido. Portanto, por interpolação na Tabela A-4 ou A-4E, a pressão e outras propriedades listadas podem ser determinadas. Se o valor dado de volume específico é inferior a  $v_f$ , a Tabela A-5 ou A-5E pode ser utilizada para determinar a pressão e outras propriedades.



► **POR EXEMPLO** determinemos a pressão da água em cada um de três estados definidos pela temperatura de  $100^\circ\text{C}$  e volumes específicos de, respectivamente,  $v_1 = 2,434 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v_2 = 1,0 \text{ m}^3/\text{kg}$  e  $v_3 = 1,0423 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Utilizando a temperatura conhecida, a Tabela A-2 fornece os valores de  $v_f$  e de  $v_g$ :  $v_f = 1,0435 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $v_g = 1,673 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Uma vez que  $v_1$  é superior a  $v_g$ , o estado 1 se encontra na região de vapor. A Tabela A-4 determina a pressão como 0,70 bar. A seguir, já que  $v_2$  se encontra entre  $v_f$  e  $v_g$ , a pressão é a pressão de saturação correspondente a  $100^\circ\text{C}$ , que é de 1,014 bar. Por fim, como  $v_3$  é inferior a  $v_f$ , o estado 3 se encontra na região de líquido. A Tabela A-5 indica que a pressão é de 25 bar. ◀ ◀ ◀ ◀ ◀

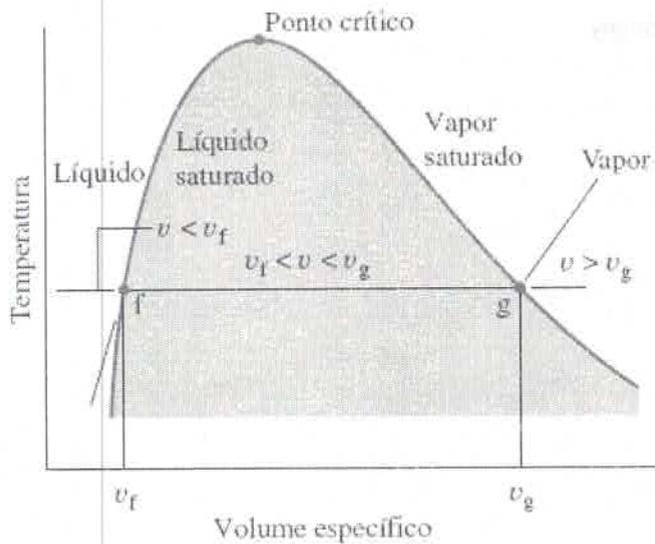
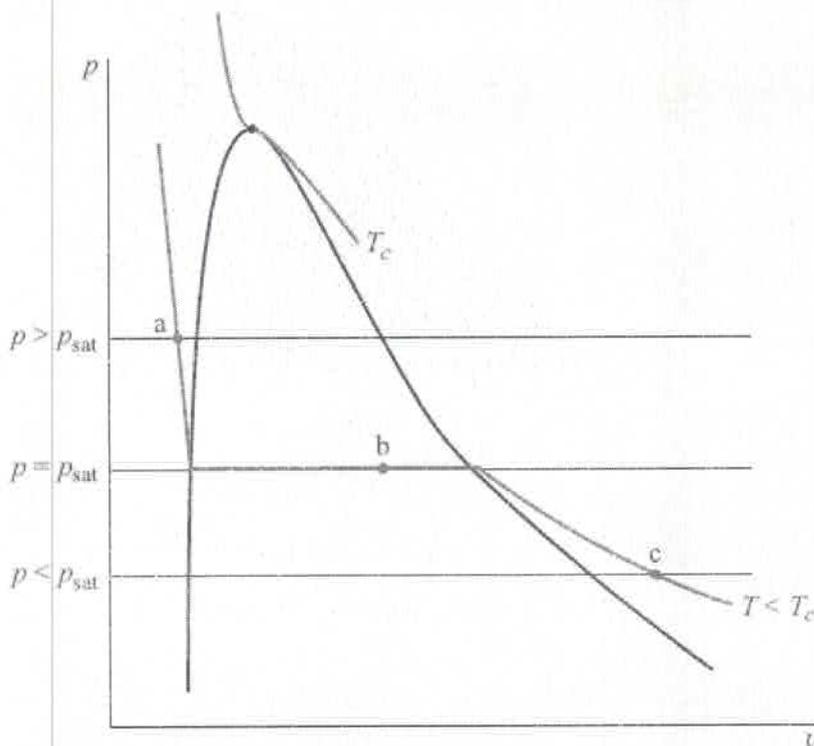


Fig. 3.8 Esboço de um diagrama  $T-v$  para a água utilizado para discutir a localização de estados nas tabelas.

### Determinando Estados a Partir das Tabelas de Vapor: Visão Geral Empregando o Diagrama $p-v$



Propriedades dadas

$p$  e  $T < T_c$

Teste para determinar a região

Verifique  $T$  na Tabela A-2/2E:

a. Se  $p > p_{sat}$  líquido comprimido

b. Se  $p = p_{sat}$  mistura bifásica

Onde/como obter as propriedades

a. Tabela A-5/5E ou Tabela A-2/2E (aproximar como líquido saturado a  $T$ )

b.  $T$  e  $p$  não são independentes; é necessário conhecer outra propriedade

líquido-vapor

intensiva

c. Se  $p < p_{\text{sat}}$ , vapor superaquecido

c. Tabela A-4/4E

$p$  e  $T > T_c$

Vapor superaquecido

Tabela A-4/4E

O exemplo a seguir aborda o uso de um esboço do diagrama  $T-v$  juntamente com dados tabelados de modo a estabelecer os estados inicial e final de um processo. De acordo com o princípio dos estados equivalentes, duas propriedades intensivas independentes devem ser conhecidas para se definir os estados do sistema aqui considerado.

### ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 3.2 ▶

#### Aquecimento de Água a Volume Constante

Um reservatório rígido e fechado de  $0,5 \text{ m}^3$  de volume é colocado sobre uma placa aquecida. Inicialmente o reservatório contém uma mistura bifásica de água líquida saturada e de vapor d'água saturado a  $p_1 = 1 \text{ bar}$  com título de 0,5. Após o aquecimento a pressão do reservatório é de  $p_2 = 1,5 \text{ bar}$ . Indique os estados inicial e final em um diagrama  $T-v$  e determine

(a) a temperatura, em  $^{\circ}\text{C}$ , nos estados 1 e 2.

(b) a massa de vapor presente nos estados 1 e 2, em kg.

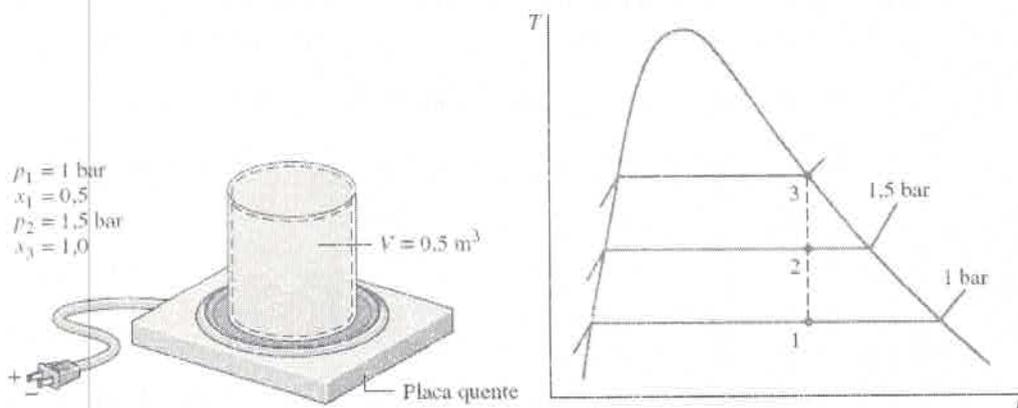
(c) considerando que o aquecimento continua, determine a pressão, em bar, na qual o reservatório contém somente vapor saturado.

#### SOLUÇÃO

**Dado:** uma mistura bifásica líquido-vapor de água em um reservatório rígido e fechado é aquecida sobre uma placa quente. A pressão e o título iniciais e a pressão final são conhecidos.

**Pede-se:** indique os estados inicial e final em um diagrama  $T-v$  e determine em cada estado a temperatura e a massa de vapor d'água presente. Prosseguindo o processo de aquecimento, determine, ainda, a pressão na qual o reservatório contém somente vapor saturado.

#### Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



#### Modelo de Engenharia:

1. A água no reservatório se constitui em um sistema fechado.
2. Os estados 1, 2 e 3 são estados de equilíbrio.
3. O volume do reservatório permanece constante.

Fig. E3.2

**Análise:** duas propriedades independentes são necessárias para determinar os estados 1 e 2. No estado inicial a pressão e o título são conhecidos. Como estes são independentes, o estado está determinado. O estado 1 é mostrado no diagrama  $T$ - $v$  no interior da região bifásica. O volume específico no estado 1 é determinado utilizando o título dado e a Eq. 3.2. Logo,

$$v_1 = v_{f1} + x(v_{g1} - v_{f1})$$

Da Tabela A-3 para  $p_1 = 1$  bar,  $v_{f1} = 1,0432 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$  e  $v_{g1} = 1,694 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Logo,

$$v_1 = 1,0432 \times 10^{-3} + 0,5(1,694 - 1,0432 \times 10^{-3}) = 0,8475 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Para o estado 2 a pressão é conhecida. A outra propriedade necessária para a determinação do estado é o volume específico  $v_2$ . O volume e a massa são ambos constantes, e então  $v_2 = v_1 = 0,8475 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Para  $p_2 = 1,5$  bar, a Tabela A-3 fornece  $v_{f2} = 1,0582 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$  e  $v_{g2} = 1,59 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Uma vez que

$$\textcircled{1} \quad v_f < v_2 < v_{g2}$$

$\textcircled{2}$  o estado 2 deve se encontrar da mesma maneira na região bifásica. O estado 2 é também mostrado no diagrama  $T$ - $v$  dado.

(a) Uma vez que os estados 1 e 2 se encontram na região bifásica líquido-vapor, as temperaturas correspondem às temperaturas de saturação nas pressões dadas. A Tabela A-3 fornece

$$T_1 = 99,63^\circ\text{C} \quad \text{e} \quad T_2 = 111,4^\circ\text{C}$$

(b) Para achar a massa de vapor d'água presente, utilizamos inicialmente o volume e o volume específico para determinar a massa *total*,  $m$ . Assim,

$$m = \frac{V}{v} = \frac{0,5 \text{ m}^3}{0,8475 \text{ m}^3/\text{kg}} = 0,59 \text{ kg}$$

Desse modo, a partir da Eq. 3.1 e do título dado, a massa de vapor no estado 1 é

$$m_{g1} = x_1 m = 0,5(0,59 \text{ kg}) = 0,295 \text{ kg}$$

A massa de vapor no estado 2 é encontrada de modo similar utilizando o título  $x_2$ . Para determinar  $x_2$ , resolvemos a Eq. 3.2 para o título e utilizamos dados de volume específico da Tabela A-3 para a pressão de 1,5 bar, juntamente com os valores dados de  $v$ , como a seguir

$$\begin{aligned} x_2 &= \frac{v - v_{f2}}{v_{g2} - v_{f2}} \\ &= \frac{0,8475 - 1,0528 \times 10^{-3}}{1,159 - 1,0528 \times 10^{-3}} = 0,731 \end{aligned}$$

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.

esboçar os diagramas  $T-v$  e localizar estados nesses diagramas.

obter dados de propriedades da água para estados líquido-vapor, utilizando o título.

Então, com a Eq. 3.1

$$m_{g2} = 0,731(0,59 \text{ kg}) = 0,431 \text{ kg}$$

(c) Prosseguindo o processo de aquecimento o estado 3 estaria na linha de vapor saturado, como ilustrado no diagrama  $T-v$  da Fig. E3.2. Desse modo, a pressão seria a pressão de saturação correspondente. Interpolando na Tabela A-3 para  $v_g = 0,8475 \text{ m}^3/\text{kg}$ , obtemos  $p_3 = 2,11 \text{ bar}$ .

① O procedimento para a determinação do estado 2 é o mesmo apresentado na discussão da Fig. 3.8.

② Uma vez que o processo ocorre a volume específico constante, os estados se encontram ao longo de uma linha vertical.

### Teste-Relâmpago

Prosseguindo o aquecimento com volume específico constante a partir do estado 3 até um estado em que a pressão é de 3 bar, determine a temperatura nesse estado, em °C. **Resposta:** 282°C.

## 3.6 Avaliando a Energia Interna Específica e a Entalpia

### 3.6.1 Apresentando a Entalpia

#### entalpia

Em diversas análises termodinâmicas a soma da energia interna  $U$  com o produto da pressão  $p$  pelo volume  $V$  se faz presente. Uma vez que a soma  $U + pV$  vai aparecer tão frequentemente em discussões futuras, é conveniente dar a essa combinação um nome, entalpia, e um símbolo específico,  $H$ . Por definição

$$H = U + pV \quad (3-3)$$

Como  $U$ ,  $p$  e  $V$  são todas propriedades, essa combinação é também uma propriedade. A entalpia pode ser expressa em base mássica

$$h = u + pv \quad (3-4)$$

e em base molar

$$\bar{h} = \bar{u} + p\bar{v} \quad (3-5)$$

As unidades de entalpia são as mesmas utilizadas para a energia interna.

### 3.6.2 Obtendo os Valores de $u$ e $h$

As tabelas de propriedades apresentadas na Seção 3.5 fornecem valores de pressão, volume específico e temperatura e também valores de energia interna específica  $u$ , entalpia  $h$  e entropia  $s$ . A utilização dessas tabelas para avaliar  $u$  e  $h$  é descrita na presente seção; a consideração da entropia é postergada até sua apresentação no Cap. 6.

Os dados para energia interna específica  $u$  e a entalpia  $h$  são obtidos a partir das tabelas de propriedades, da mesma maneira que o volume específico. Para estados de saturação os valores de  $u_f$  e  $u_g$ , assim como de  $h_f$  e  $h_g$ , são tabelados em função da pressão de saturação e da temperatura de saturação. A energia interna específica para uma mistura bifásica líquido-vapor é calculada para um dado título da mesma maneira que o volume específico é calculado

$$u = (1 - x)u_f + xu_g = u_f + x(u_g - u_f) \quad (3.6)$$

O aumento de energia interna específica durante a vaporização ( $u_g - u_f$ ) é geralmente representado por  $u_{fg}$ . De modo similar, a entalpia específica de uma mistura bifásica líquido-vapor é dada em termos do título por

$$h = (1 - x)h_f + xh_g = h_f + x(h_g - h_f) \quad (3.7)$$

O aumento de entalpia durante a vaporização ( $h_g - h_f$ ) é normalmente tabelado por conveniência sob o símbolo  $h_{fg}$ .

► POR EXEMPLO para ilustrar o uso das Eqs. 3.6 e 3.7, determinamos a entalpia específica do Refrigerante 22 quando sua temperatura é 12°C e sua energia interna específica é 144,58 kJ/kg. De acordo com a Tabela A-7, os valores dados de energia interna se encontram entre  $u_f$  e  $u_g$  a 12°C; dessa maneira, o estado se encontra na região bifásica líquido-vapor. O título da mistura é encontrado utilizando-se a Eq. 3.6 e os dados da Tabela A-7, como se segue:

$$x = \frac{u - u_f}{u_g - u_f} = \frac{144,58 - 58,77}{230,38 - 58,77} = 0,5$$

Assim, com os valores da Tabela A-7, a Eq. 3.7 fornece

$$\begin{aligned} h &= (1 - x)h_f + xh_g \\ &= (1 - 0,5)(59,35) + 0,5(253,99) = 156,67 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Nas tabelas de vapor superaquecido  $u$  e  $h$  são tabelados juntamente com  $v$  como função da temperatura e pressão.

► POR EXEMPLO avaliemos  $T$ ,  $v$  e  $h$  para água a 0,10 MPa e uma energia interna específica de 2537,3 kJ/kg. Voltando à Tabela A-3, note que o valor dado de  $u$  é superior a  $u_g$  a 0,1 MPa ( $u_g = 2506,1$  kJ/kg). Esse fato sugere que o estado se encontra na região de vapor superaquecido. A partir da Tabela A-4 obtemos  $T = 120^\circ\text{C}$ ,  $v = 1,793$  m<sup>3</sup>/kg e  $h = 2716,6$  kJ/kg. De maneira alternativa, a definição de  $h$  relaciona  $h$  e  $u$

$$\begin{aligned} h &= u + pv \\ &= 2537,3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} + \left( 10^5 \frac{\text{N}}{\text{m}^2} \right) \left( 1,793 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \\ &= 2537,3 + 179,3 = 2716,6 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

Como outro exemplo, considere água em um dado estado definido por uma pressão igual a 14,7 lbf/in<sup>2</sup> e uma temperatura de 250°F. Da Tabela A-4E,  $v = 28,42$  ft<sup>3</sup>/lb,  $u = 1091,5$  Btu/lb e  $h = 1168,8$  Btu/lb. Como já descrito anteriormente,

$$h = u + pv$$

$$= 1091,5 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} + \left( 14,7 \frac{\text{lbf}}{\text{in}^2} \right) \left( 28,42 \frac{\text{ft}^3}{\text{lb}} \right) \left| \frac{144 \text{ in}^2}{1 \text{ ft}^2} \right| \left| \frac{1 \text{ Btu}}{778 \text{ ft} \cdot \text{lbf}} \right|$$

$$= 1091,5 + 77,3 = 1168,8 \text{ Btu/lb} \lll \lll \lll \lll$$

Dados de energia interna e de entalpia específicos para estados de líquido da água são apresentados na Tabela A-5. O formato dessas tabelas é o mesmo das de vapor superaquecido consideradas anteriormente. Desse modo, valores de propriedades para estado de líquido são obtidos da mesma maneira que para estados de vapor.

Para a água, as Tabelas A-6 fornecem as propriedades de equilíbrio de sólidos saturados e de vapor saturado. A primeira coluna lista a temperatura e a segunda fornece a pressão de saturação correspondente. Esses estados estão em pressões e temperaturas *inferiores* às do ponto triplo. As duas colunas que se seguem fornecem o volume específico do sólido saturado,  $v_s$ , e do vapor saturado,  $v_g$ , respectivamente. A tabela também fornece valores de energia interna específica, entalpia e entropia para o sólido saturado e para o vapor saturado em cada uma das temperaturas listadas.

### 3.6.3 Estados de Referência e Valores de Referência

#### estados de referência

#### valores de referência

Os valores de  $u$ ,  $h$  e  $s$  fornecidos pelas tabelas de propriedades não são obtidos a partir de medidas diretas, mas são calculados a partir de outros dados mais facilmente determinados de maneira experimental. Os procedimentos de cálculo requerem o uso da segunda lei da termodinâmica, assim a consideração desses procedimentos é adiada para o Cap. 11, após a segunda lei ter sido apresentada. Entretanto, uma vez que  $u$ ,  $h$  e  $s$  são calculados, a questão de estados de referência e de valores de referência se torna importante e será discutida de maneira breve nos parágrafos que se seguem.

Quando balanços de energia são aplicados, as *diferenças* de energia interna, cinética e potencial entre dois estados é que são importantes, e *não* os valores dessas quantidades de energia em cada um desses dois estados.

► **POR EXEMPLO** considere o caso da energia potencial. O valor numérico da energia potencial medida em relação à superfície da Terra é diferente do valor relativo ao topo de um edifício no mesmo local. Entretanto, a diferença de energia potencial entre duas elevações diferentes é exatamente a mesma a despeito do referencial utilizado, uma vez que o valor do referencial é cancelado durante o cálculo.  $\lll \lll \lll \lll$

Do mesmo modo, podem-se atribuir valores à energia interna específica e à entalpia em relação a valores de referência arbitrários em estados de referência arbitrários. Como para o caso da energia potencial considerado antes, a utilização de valores de uma propriedade particular determinados em relação a uma referência arbitrária é única, desde que os cálculos feitos envolvam somente diferenças dessa propriedade para as quais o valor de referência se cancela. Entretanto, quando reações químicas acontecem entre as substâncias consideradas, deve-se dar atenção especial para a questão dos estados e valores de referência. Uma discussão de como valores de propriedades são atribuídos no momento da análise de sistemas reativos é apresentada no Cap. 13.

Os valores tabelados de  $u$  e  $h$  para a água, a amônia, o propano e os Refrigerantes 22 e 134a fornecidos no Apêndice são relativos aos estados e valores de referência comentados a seguir. Para a água, o estado de referência é o de líquido saturado a  $0,01^\circ\text{C}$  ( $32,02^\circ\text{F}$ ). Nesse estado a energia interna específica é considerada zero. Valores da entalpia específica são calculados a partir de  $h = u + pv$ , utilizando os valores tabelados de  $p$ ,  $v$  e  $u$ . Para a amônia, o propano e os refrigerantes, o estado de referência é o de líquido saturado a  $-40^\circ\text{C}$  ( $-40^\circ\text{F}$  para as tabelas em unidades inglesas). Para esse estado de referência a entalpia específica é considerada zero. Valores de energia interna específica são calculados a partir de  $u = h - pv$  utilizando os valores tabelados de  $p$ ,  $v$  e  $h$ . Deve-se notar, na Tabela

A-7, que isso leva a um valor negativo para a energia interna no estado de referência, o que enfatiza que o importante não são os valores numéricos atribuídos a  $u$  e  $h$  em um dado estado, mas sim as *diferenças* dessas propriedades entre estados. Os valores atribuídos a um estado são modificados se o estado de referência ou o valor de referência se altera, mas sua diferença permanece a mesma.

### 3.7 Avaliando Propriedades Utilizando Programas de Computador

A utilização de programas de computador para a avaliação de propriedades termodinâmicas está se tornando prática comum na engenharia. Os programas de computador podem ser definidos em duas categorias: aqueles que fornecem dados somente para estados individuais e aqueles que fornecem dados de propriedades como parte de um pacote de simulação mais geral. A ferramenta *Interactive Thermodynamics: IT* pode ser utilizada não somente para a solução de problemas comuns, fornecendo dados em estados específicos, mas também para simulação e análise. Outros programas, além do *IT*, também podem ser utilizados com esses propósitos. Veja o boxe para uma análise do *software* usado em termodinâmica.

#### Utilizando Programas de Computador em Termodinâmica

Programas de computador, como o *Interactive Thermodynamics: IT* ou similares, podem ser utilizados como ferramentas de auxílio para o aprendizado da termodinâmica aplicada à engenharia e para a solução de problemas de engenharia. O *IT* é construído em torno de um programa que atua na solução de equações e é aprimorado com dados de propriedades termodinâmicas e outras características valiosas. A partir do *IT* pode-se obter uma solução numérica singular ou variar parâmetros para investigar seus efeitos. Pode-se obter também uma saída gráfica e utilizar qualquer processador de texto do Windows ou planilhas eletrônicas para gerar relatórios. Além disso, funções do *IT* podem ser chamadas a partir do *Excel*, permitindo o uso dessas funções termodinâmicas enquanto se trabalha com o *Excel*. Outras características do *IT* incluem:

- ▶ uma série de telas de ajuda guiada e diversos exemplos resolvidos para ajudar a aprender como usar o programa.
- ▶ dados que podem ser arrastados (*drag-and-drop*) em muitos tipos de problemas-padrões, incluindo uma lista de hipóteses que você pode personalizar para o problema.
- ▶ cenários predeterminados para usinas e outras aplicações importantes.
- ▶ dados de propriedades termodinâmicas para a água, os Refrigerantes 22 e 134a, a amônia, misturas água-vapor d'água e um número de gases ideais.\*
- ▶ a capacidade de entrar com dados do usuário.
- ▶ a capacidade de utilizar rotinas do usuário.

Muitas características do *IT* são encontradas no conhecido *Engineering Equation Solver (EES)*. Leitores habituados com o *EES* podem preferir utilizá-lo na solução dos problemas deste livro.

A utilização de programas de computador em análises de engenharia é uma poderosa ferramenta. Entretanto, algumas regras devem ser observadas:

- ▶ Programas de computador *complementam* e *ampliam* análises cuidadosas, mas não as substituem.
- ▶ Valores obtidos a partir de programas de computador devem ser verificados seletivamente com outros valores calculados manualmente ou, ainda, de modo alternativo, determinados de maneira independente.
- ▶ Gráficos gerados por computador devem ser analisados a fim de verificar se as curvas parecem razoáveis e se exibem as tendências esperadas.

\* Na versão mais recente do *IT*, algumas propriedades são calculadas usando o *Mini REFPROP* com permissão do Instituto Nacional de Padrões e Tecnologia dos Estados Unidos (National Institute of Standards and Technology — NIST).

O *IT* fornece dados para as substâncias que constam das tabelas do Apêndice. Em geral, os dados são obtidos a partir de declarações simples que são inseridas no espaço de trabalho do programa.

► POR EXEMPLO considere a mistura bifásica líquido-vapor no estado 1 do Exemplo 3.2 para o qual  $p = 1$  bar,  $v = 0,8475$  m<sup>3</sup>/kg. A seguir, uma descrição de como os dados para temperatura de saturação, título e energia interna específica são obtidos utilizando-se o *IT*. As funções para  $T$ ,  $v$  e  $u$  são obtidas pela escolha da opção Água/Vapor d'água (Water/Steam) do menu de propriedades (**Properties**). Escolhendo unidades SI do menu de Unidades (**Units**), com  $p$  em bar,  $T$  em °C e a quantidade da substância em kg, o programa *IT* se torna

$$p = 1/\text{bar}$$

$$v = 0,8475/\text{m}^3/\text{kg}$$

$$T = \text{Tsatsat\_P}(\text{"Water/Steam"}, p)$$

$$v = \text{vsat\_Px}(\text{"Water/Steam"}, p, x)$$

$$u = \text{usat\_Px}(\text{"Water/Steam"}, p, x)$$

Pressionando o botão de Resolver (**Solve**), o programa fornece os valores de  $T = 99,63^\circ\text{C}$ ,  $x = 0,5$  e  $u = 1462$  kJ/kg. Esses valores podem ser verificados utilizando-se dados da Tabela A-3. Note que o texto inserido entre o símbolo // e o final da linha é considerado como comentário. ◀ ◀ ◀ ◀ ◀

O exemplo anterior ilustra uma importante característica do *IT*. Embora o título,  $x$ , esteja implícito na lista de argumentos na expressão para o volume específico, não há necessidade de resolver a expressão algebricamente para  $x$ . Em lugar dessa resolução algébrica o programa pode calcular  $x$  enquanto o número de equações for igual ao número de incógnitas.

O *IT* também fornece valores de propriedades na região de vapor superaquecido.

► POR EXEMPLO considere o vapor superaquecido de amônia no estado 2 do Exemplo 3.1, para o qual  $p = 20$  lbf/in<sup>2</sup> e  $T = 77^\circ\text{F}$ . Selecionando amônia (*Ammonia*) do menu de Propriedades (**Properties**) e escolhendo unidades inglesas no menu de Unidades (**Units**), valores de volume específico, energia interna e entalpia são obtidos a partir do *IT* como se segue:

$$p = 20/\text{lbf}/\text{in}^2$$

$$T = 77/^\circ\text{F}$$

$$v = v\_PT(\text{"Ammonia"}, p, T)$$

$$u = u\_PT(\text{"Ammonia"}, p, T)$$

$$h = h\_PT(\text{"Ammonia"}, p, T)$$

Pressionando o botão de Resolver (**Solve**), o programa fornece os valores de  $v = 16,67$  ft<sup>3</sup>/lb,  $u = 593,7$  Btu/lb e  $h = 655,3$  Btu/lb, respectivamente. Esses valores estão de acordo com os valores correspondentes obtidos através de interpolação da Tabela A-15E. ◀ ◀ ◀ ◀ ◀

### 3.8 Aplicando o Balanço de Energia Usando Propriedades Tabeladas e Programas de Computador

O balanço de energia para sistemas fechados foi apresentado na Seção 2.5. Expressões alternativas foram dadas pelas Eqs. 2.35a e 2.35b, que são equações aplicáveis aos processos entre os estados indicados por 1 e 2, e pela Eq. 2.37, que corresponde a uma formulação em termos da taxa temporal. Nas aplicações em que as variações das energias cinética e potencial gravitacional entre os estados inicial e final podem ser ignoradas, a Eq. 2.35b fica reduzida a

$$U_2 - U_1 = Q - W \quad (\text{a})$$

em que  $Q$  e  $W$  representam, respectivamente, a transferência de energia por calor e por trabalho entre o sistema e sua vizinhança durante o processo. O termo  $U_2 - U_1$  representa a variação da energia interna entre os estados inicial e final.

Tomando a água como exemplo, para simplificar, vamos considerar como o termo de energia interna é avaliado em três casos representativos de sistemas envolvendo uma *única* substância.

**Caso 1:** Considere um sistema que consiste, em seus estados inicial e final, em uma única fase da água, vapor ou líquido. Assim, a Eq. (a) toma a forma

$$m(u_2 - u_1) = Q - W \quad (\text{b})$$

em que  $m$  é a massa do sistema e  $u_1$  e  $u_2$  indicam, respectivamente, a energia interna específica inicial e a energia interna específica final. Quando as temperaturas inicial e final  $T_1$ ,  $T_2$  e as pressões  $p_1$ ,  $p_2$  são conhecidas, por exemplo, as energias internas  $u_1$  e  $u_2$  podem ser facilmente obtidas a partir das *tabelas de vapor* ou utilizando programas de computador.

**Caso 2:** Considere um sistema que consiste, em seu estado inicial, em vapor d'água, e, em seu estado final, de uma mistura bifásica de água líquida e de vapor d'água. Como no caso 1, escrevemos  $U_1 = mu_1$  na Eq. (a), mas agora

$$\begin{aligned} U_2 &= (U_{\text{liq}} + U_{\text{vap}}) \\ &= m_{\text{liq}}u_f + m_{\text{vap}}u_g \end{aligned} \quad (\text{c})$$

em que  $m_{\text{liq}}$  e  $m_{\text{vap}}$  representam, respectivamente, as massas de líquido saturado e de vapor saturado presentes no estado final,  $u_f$  e  $u_g$  são as energias internas específicas correspondentes determinadas pela temperatura final  $T_2$  (ou pela pressão final  $p_2$ ).

Se o título  $x_2$  é conhecido, a Eq. 3.6 pode ser usada para determinar a energia interna específica,  $u_2$ , da mistura bifásica líquido-vapor. Logo,  $U_2 = mu_2$ , preservando assim a equação do balanço de energia expressa pela Eq. (b).

**Caso 3:** Considere um sistema que consiste inicialmente em duas massas separadas de vapor d'água que se misturam para formar uma massa total de vapor d'água. Neste caso

$$U_1 = m'u(T', p') + m''u(T'', p'') \quad (\text{d})$$

$$\begin{aligned} U_2 &= (m' + m'')u(T_2, p_2) \\ &= mu(T_2, p_2) \end{aligned} \quad (\text{e})$$

em que  $m'$  e  $m''$  são as massas de vapor d'água, inicialmente separadas em  $T'$ ,  $p'$  e  $T''$ ,  $p''$ , respectivamente, que se misturam para formar uma massa total,  $m = m' + m''$ , em um estado final em que a temperatura é  $T_2$  e a pressão é  $p_2$ . Quando as temperaturas e pressões nos respectivos estados são conhecidas, por exemplo, as energias internas específicas das Eqs. (d) e (e) podem ser facilmente obtidas a partir das *tabelas de vapor* ou usando um programa de computador.

Esses casos mostram que quando o balanço de energia é aplicado, é importante considerar se o sistema tem uma ou

duas fases. Uma aplicação pertinente é a de *armazenamento de energia térmica*, considerada no boxe a seguir.

### Armazenamento de Energia Térmica

Em geral, a energia está disponível uma única vez, porém pode ser usada em outros momentos. Por exemplo, a energia solar é coletada durante o dia, mas muitas vezes é necessária em outros momentos – para aquecer os edifícios durante a noite. Essas considerações lembram a necessidade de armazenar energia por meio dos métodos apresentados na Seção 2.7 e pelos discutidos aqui. Assim, *sistemas de armazenamento de energia térmica* têm sido desenvolvidos para atender as necessidades de armazenamento de energia solar e de outras formas de energia similares. O termo *energia térmica* utilizado deve ser entendido como *energia interna*.

Os vários meios usados em sistemas de armazenamento de energia térmica sofrem alteração de temperatura e/ou fase. Alguns sistemas de armazenamento simplesmente armazenam energia através do aquecimento de água, de óleo mineral, ou de outras substâncias mantidas em um tanque de armazenamento, em geral pressurizado, até que a energia armazenada seja necessária. Sólidos como o concreto também podem ser o meio. Sistemas em *mudança de fase* armazenam energia por meio da fusão ou da solidificação de uma substância, geralmente a água ou um *sal fundido (eutético)*. A escolha do meio de armazenamento é determinada pelas exigências de temperatura da aplicação do armazenamento em questão, junto com os custos operacionais e de capital relacionados com o sistema de armazenamento. Quando substâncias mudam de fase, bastante energia é armazenada a uma temperatura quase constante. Isso dá aos sistemas em mudança de fase uma vantagem sobre sistemas que armazenam energia apenas por meio da mudança de temperatura porque a alta capacidade de armazenamento de energia por unidade tende a fazer os sistemas em mudança de fase menores e com melhor custo-benefício.

A disponibilidade de eletricidade relativamente barata gerada em períodos de baixa demanda, em geral durante a noite ou durante finais de semana, leva a estratégias de armazenamento. Por exemplo, eletricidade a baixo custo é fornecida a um sistema de refrigeração que resfria água e/ou produz gelo durante as horas mais frias da noite, quando menos energia do refrigerador é necessária. A água gelada e/ou o gelo podem ser utilizados para satisfazer as necessidades de refrigeração de edifícios, durante a parte mais quente dos dias de verão, quando a eletricidade é mais cara.

### TOME NOTA...

Nos diagramas de propriedades, as linhas sólidas são reservadas para processos que passam por estados de equilíbrio: processos de quase equilíbrio (Seção 2.2.5). Uma linha tracejada nesses diagramas indica apenas que um processo ocorreu entre os estados inicial e final de equilíbrio, não definindo portanto a trajetória do processo.

#### 3.8.1 Utilizando Tabelas de Propriedades

Nos Exemplos 3.3 e 3.4, sistemas fechados submetidos a processos são analisados utilizando o balanço de energia. Em cada caso, esboços dos diagramas  $p-v$  e/ou  $T-v$  são utilizados em conjunto com as tabelas apropriadas para obter os dados de propriedades necessários. A utilização de diagramas de propriedades e tabelas introduz um nível adicional de complexidade quando comparado com problemas similares do Cap. 2.

#### ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 3.3 ▶

##### Agitando Água a Volume Constante

Um tanque isolado e rígido com um volume de  $10 \text{ ft}^3$  ( $0,28 \text{ m}^3$ ) contém vapor d'água saturado a  $212^\circ\text{F}$  ( $100^\circ\text{C}$ ). A água é rapidamente misturada até uma pressão de  $20 \text{ lbf/in}^2$  ( $1,37,9 \text{ kPa}$ ). Determine a temperatura no estado final, em  $^\circ\text{F}$ , e o trabalho realizado durante o processo, em Btu.

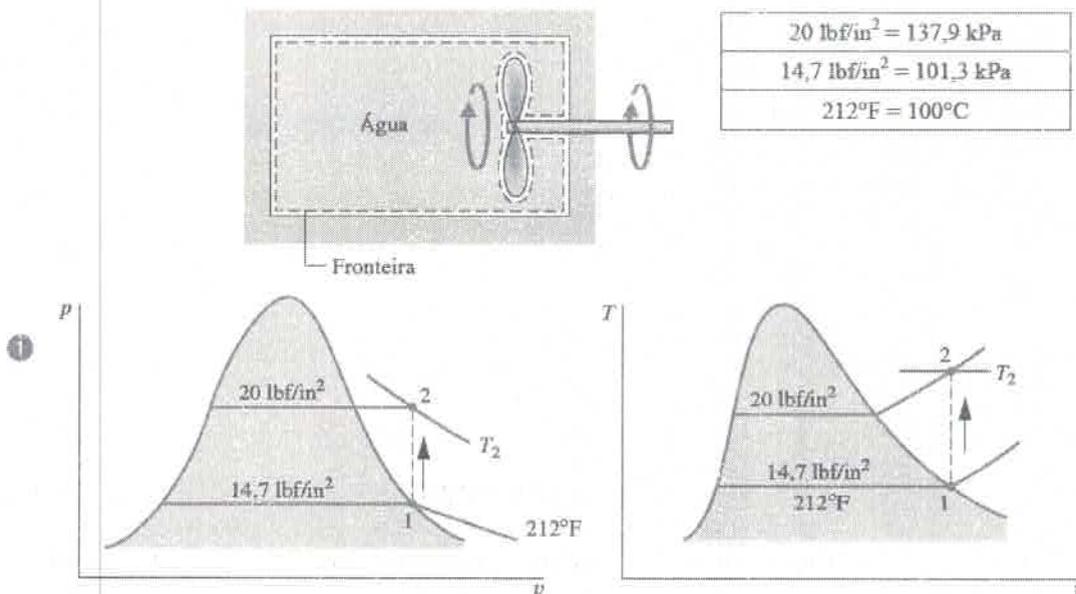
##### SOLUÇÃO

**Dado:** através de agitação rápida, vapor d'água em um tanque isolado e rígido é levado de um estado de vapor

saturado a 212°F a uma pressão de 20 lbf/in<sup>2</sup>.

**Pede-se:** determine a temperatura no estado final e o trabalho realizado.

**Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:**



**Modelo de Engenharia:**

1. A água constitui um sistema fechado.
2. Os estados inicial e final são estados de equilíbrio. Não ocorrem variações das energias cinética e potencial.
3. Não ocorre transferência de calor para a vizinhança.
4. O volume do tanque permanece constante.

**Fig. E3.3**

**Análise:** para determinar o estado final de equilíbrio são necessários os valores de duas propriedades intensivas independentes. Uma delas é a pressão,  $p_2 = 20 \text{ lbf/in}^2$ , e a outra é o volume específico:  $v_2 = v_1$ . Os volumes específicos inicial e final são iguais, uma vez que a massa total e o volume total permanecem inalterados durante o processo. Os estados final e inicial estão representados nos diagramas  $T-v$  e  $p-v$  correspondentes.

Da Tabela A-2E,  $v_1 = v_g(212^\circ\text{F}) = 26,80 \text{ ft}^3/\text{lb}$ ,  $u_1 = u_g(212^\circ\text{F}) = 1077,6 \text{ Btu/lb}$ . Utilizando  $v_2 = v_1$  e interpolando na Tabela A-4E para  $p_2 = 20 \text{ lbf/in}^2$ .

$$T_2 = 445^\circ\text{F}, \quad u_2 = 1161,6 \text{ Btu/lb}$$

A seguir, com as hipóteses 2 e 3 o balanço de energia para o sistema se reduz a

$$\Delta U + \Delta EC^0 + \Delta EP^0 = Q^0 - W$$

Reescrevendo

$$W = -(U_2 - U_1) = -m(u_2 - u_1)$$

Para avaliar  $W$  é necessário avaliar a massa do sistema. Esta pode ser determinada a partir do volume e do volume específico

$$m = \frac{V}{v_1} = \left( \frac{10 \text{ ft}^3}{26,8 \text{ ft}^3/\text{lb}} \right) = 0,373 \text{ lb}$$

**Habilidades Desenvolvidas**

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- aplicar o balanço de energia com dados das tabelas de vapor.
- esboçar os diagramas  $T-u$  e  $p-u$  e localizar estados nesses diagramas.

Finalmente, substituindo os valores na expressão para  $W$

$$W = -(0,373 \text{ lb})(1161,6 - 1077,6) \text{ Btu/lb} = -31,3 \text{ Btu}$$

em que o sinal negativo significa que a transferência de energia através de trabalho é realizada para o sistema.

**1** Embora os estados inicial e final sejam de equilíbrio, os estados intermediários não o são. Para enfatizar este aspecto o processo foi indicado nos diagramas  $T-u$  e  $p-u$  por linhas tracejadas. Linhas cheias em diagramas de propriedades são reservadas a processos que passam somente por estados de equilíbrio (processos de quase equilíbrio). A análise mostra a importância de se esboçar cuidadosamente os diagramas de propriedades como ferramenta auxiliar na resolução de problemas.

### Teste-Relâmpago

Determine a transferência de calor, em Btu, se o isolamento fosse removido do tanque e a água resfriada a volume constante de  $T_2 = 445^\circ\text{F}$  ( $229,4^\circ\text{C}$ ) a  $T_3 = 300^\circ\text{F}$  ( $148,9^\circ\text{C}$ ). **Resposta:**  $-19,5$  Btu.

### ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 3.4 ▶

#### Analisando Dois Processos em Série

Água contida em um conjunto cilindro-pistão é submetida a dois processos em série a partir de um estado inicial, no qual a pressão é de 10 bar e a temperatura é  $400^\circ\text{C}$ .

**Processo 1-2:** a água é resfriada à medida que é comprimida a uma pressão constante a partir de 10 bar até alcançar o estado de vapor saturado.

**Processo 2-3:** a água é resfriada a volume constante até  $150^\circ\text{C}$ .

- (a) Esboce ambos os processos em diagramas  $T-u$  e  $p-u$ .
- (b) Determine o trabalho para o processo global, em kJ/kg.
- (c) Determine a quantidade de calor transferida para o processo global, em kJ/kg.

### SOLUÇÃO

**Dado:** água contida em um conjunto cilindro-pistão é submetida a dois processos: é resfriada e comprimida enquanto a pressão é mantida constante, e posteriormente é resfriada a volume constante.

**Pede-se:** esboce os processos em diagramas  $T-u$  e  $p-u$ . Determine o trabalho líquido e a quantidade de calor líquida transferida para o processo global por unidade de massa contida no conjunto cilindro-pistão.

### Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:

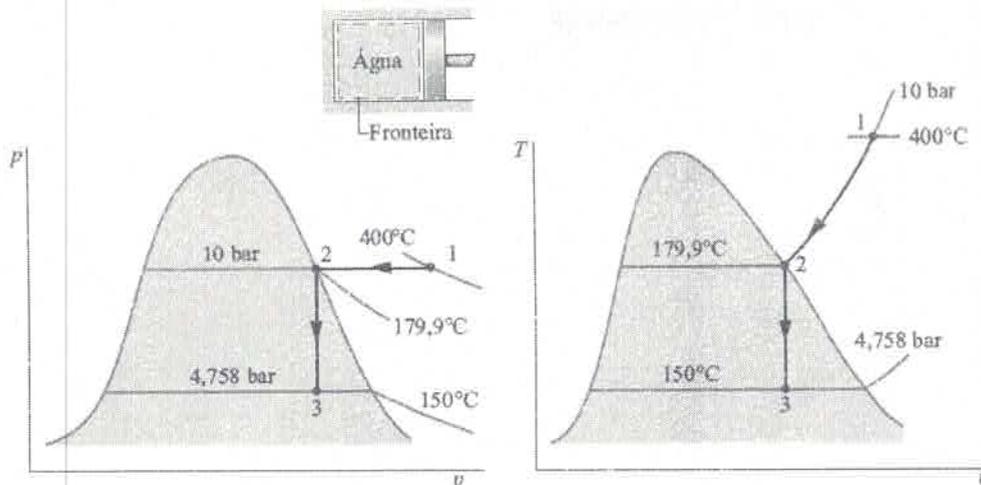


Fig. E3.4

**Análise:**

(a) Os diagramas  $T-v$  e  $p-v$  correspondentes mostram os dois processos. Uma vez que a temperatura no estado 1,  $T_1 = 400^\circ\text{C}$ , é superior à temperatura de saturação correspondente a  $p_1 = 10$  bar:  $179,9^\circ\text{C}$ , o estado 1 se encontra na região de vapor superaquecido.

(b) Uma vez que o trabalho relacionado com o movimento do pistão é o único presente

$$W = \int_1^3 p dV = \int_1^2 p dV + \int_2^3 p dV$$

A segunda integral se anula, já que o volume é constante durante o Processo 2-3. Dividindo pela massa e utilizando o fato de que a pressão é constante no Processo 1-2

$$\frac{W}{m} = p(v_2 - v_1)$$

O volume específico no estado 1 é obtido da Tabela A-4 utilizando  $p_1 = 10$  bar e  $T_1 = 400^\circ\text{C}$ :  $v_1 = 0,3066 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Além disso,  $u_1 = 2957,3 \text{ kJ/kg}$ . O volume específico no estado 2 tem o valor de vapor saturado a 10 bar:  $v_2 = 0,1944 \text{ m}^3/\text{kg}$ , a partir da Tabela A-3. Então

$$\begin{aligned} \frac{W}{m} &= (10 \text{ bar})(0,1944 - 0,3066) \left( \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right) \left| \frac{10^5 \text{ N/m}^2}{1 \text{ bar}} \right| \left| \frac{1 \text{ kJ}}{10^3 \text{ N} \cdot \text{m}} \right| \\ &= -112,2 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

O sinal negativo indica que o trabalho é realizado sobre o vapor d'água pelo pistão.

(c) O balanço de energia para o processo global se reduz a

$$m(u_3 - u_1) = Q - W$$

Rearranjando

**Modelo de Engenharia:**

1. A água constitui um sistema fechado.
2. O trabalho relacionado com o movimento do pistão é o único modo de trabalho presente.
3. Não ocorrem variações da energia cinética ou potencial.

Para o sistema do Exemplo 3.2, represente graficamente a quantidade de calor transferida, em kJ, e a massa de vapor saturado presente, em kg, como função da pressão no estado 2 que varia de 1 a 2 bar. Discuta os resultados.

## SOLUÇÃO

**Dado:** uma mistura bifásica líquido-vapor de água em um reservatório rígido e fechado é aquecida sobre uma placa aquecida. A pressão e o título iniciais e a pressão final são conhecidos. A pressão no estado final varia de 1 a 2 bar.

**Pede-se:** represente graficamente a quantidade de calor transferida e a massa de vapor saturado presente, ambos em função da pressão no estado final. Discuta.

**Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:** veja a Fig. E3.2.

**Modelo de Engenharia:**

1. Não há trabalho realizado.
2. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis.
3. Veja o Exemplo 3.2 para outras hipóteses.

**Análise:** A quantidade de calor transferida é obtida a partir do balanço de energia. Com as hipóteses 1 e 2, o balanço de energia se reduz a

$$\Delta U + \Delta E_C^0 + \Delta E_P^0 = Q - W^0$$

ou

$$Q = m(u_2 - u_1)$$

Selecionando Água/Vapor d'água no menu de Propriedades (**Properties**) e selecionando unidades SI no menu de Unidades (**Units**), o programa *IT* para o cálculo dos dados necessários e a construção dos gráficos fica

```
// Given data—State 1
```

```
p1 = 1//bar
```

```
x1 = 0.5
```

```
V = 0.5//m3
```

```
// Evaluate property data—State 1
```

```
v1 = vsat_Px("Water/Steam", p1,x1)
```

```
u1 = usat_Px("Water/Steam", p1,x1)
```

```
// Calculate the mass
```

```
m = V/v1
```

```
// Fix state 2
```

```
v2 = v1
```

```

p2 = 1.5//bar
// Evaluate property data—State 2
v2 = vsat_Px ("Water/Steam", p2,x2)
u2 = usat_Px("Water/Steam", p2,x2)
// Calculate the mass of saturated vapor present
mg2 = x2 * m
// Determine the pressure for which the quality is unity
v3 = v1
❶
v3 = vsat_Px("Water/Steam",p3,1)
// Energy balance to determine the heat transfer
m * (u2 - u1) = Q - W
W = 0

```

Pressione o botão de Resolver (**Solve**) para obter a solução para  $p_2 = 1,5$  bar. O programa fornece os valores de  $v_1 = 0,8475 \text{ m}^3/\text{kg}$  e  $m = 0,59$  kg. Além disso, a  $p_2 = 1,5$  bar, o programa fornece  $m_{g2} = 0,4311$  kg. Esses valores estão de acordo com aqueles obtidos no Exemplo 3.2.

Uma vez que o código computacional foi verificado, utilize o botão de Exploração (**Explore**) para variar a pressão de 1 a 2 bar em intervalos de 0,1 bar. Em seguida, utilize o botão de Exibir (**Graph**) para construir os gráficos pedidos. Os resultados podem ser vistos na Fig. E3.5:

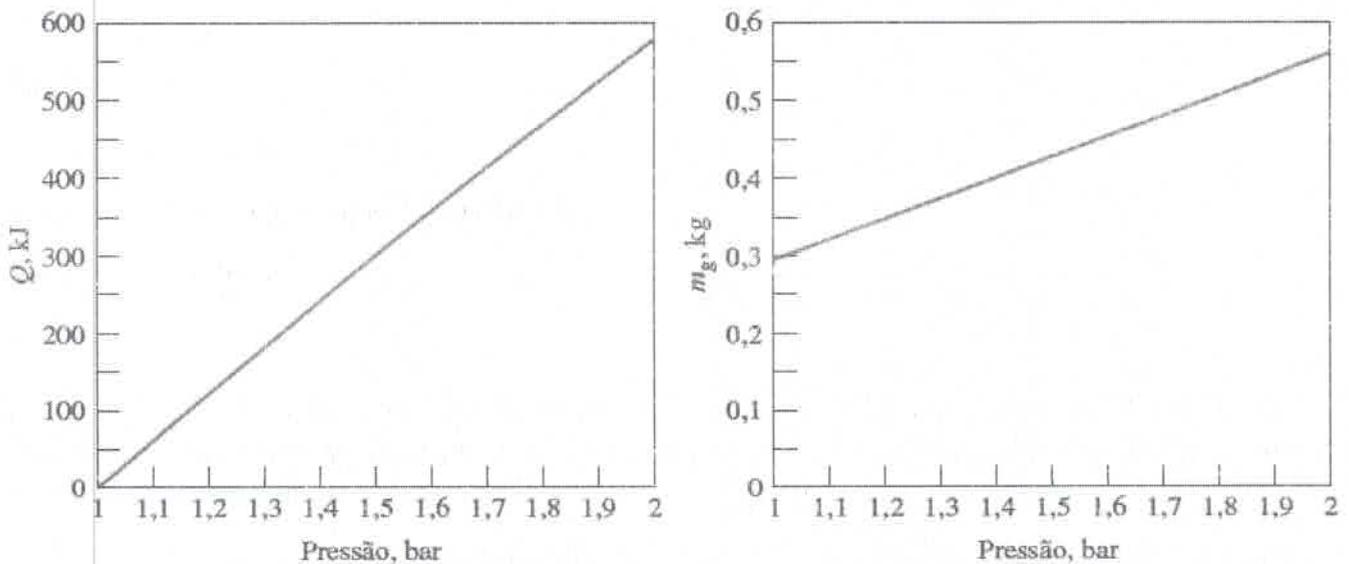


Fig. E3.5

Podemos concluir do primeiro desses gráficos que a quantidade de calor transferida para a água varia diretamente

com a pressão. O gráfico de  $m_g$  mostra que a massa de vapor d'água saturado presente também aumenta à medida que a pressão aumenta. Esses resultados estão de acordo com os resultados esperados para o processo.

① Utilizando o botão de Navegar (**Browse**), a solução computacional indica que a pressão para a qual o título se torna unitário é 2,096 bar. Assim, para pressões variando de 1 a 2 bar todos os estados estão na região bifásica líquido-vapor.

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- aplicar o balanço de energia para um sistema fechado.
- utilizar o *IT* ou um programa similar para obter dados de propriedades da água e representá-los graficamente.

### Teste-Relâmpago

Prosseguindo o aquecimento com volume específico constante até um estado em que a pressão é 3 bar, modifique o programa *IT* para obter a temperatura nesse estado, em °C.

**Resposta:**  $v_4 = v_1$   
 $p_4 = 3 \text{ bar}$   
 $v_4 = v_{PT}(\text{"Water/Steam"}, p_4, T_4)$   
 $T_4 = 282,4 \text{ °C}$



### BIOCONEXÕES

O que as tripulações de voos militares, os personagens fantasiados em parques temáticos e os atletas têm em comum? Eles compartilham uma necessidade de evitar sobrecarga térmica enquanto executam seu dever, trabalho ou passatempo. Para satisfazer a essa necessidade foram desenvolvidas *vestimentas com sistemas de refrigeração*, como coletes e colarinhos térmicos. As vestimentas com sistemas de refrigeração podem se caracterizar por bolsas de gelo inseridas, canais pelos quais um líquido refrigerante circula, *materiais de mudança de fase* encapsulados ou uma combinação desses itens. Um exemplo familiar de um material de mudança de fase, conhecido também por PCM (*phase-change material*), é o gelo, o qual na fusão a 0°C absorve cerca de 334 kJ/kg de energia.

A vestimenta com PCM encapsulado, quando utilizada próxima ao corpo, absorve a energia da pessoa que está trabalhando ou se exercitando em um ambiente quente enquanto a mantém fresca. Na especificação de um PCM para uma vestimenta com sistemas de refrigeração o material deve mudar de fase na temperatura operacional de resfriamento desejada. Hidrocarbonetos conhecidos como *parafinas* são frequentemente utilizados para essa finalidade. Muitos sistemas de refrigeração disponíveis atualmente empregam contatos de PCM com diâmetros pequenos, até de 0,5 mm, encapsuladas em uma estrutura feita de um polímero resistente. Materiais de mudança de fase encapsulados também podem ser encontrados em outros produtos.

## 3.9 Apresentando os Calores Específicos $c_v$ e $c_p$

calores específicos

Diversas propriedades relacionadas com a energia interna são importantes em termodinâmica. Uma dessas propriedades é a entalpia, apresentada na Seção 3.6.1. Duas outras, conhecidas como calores específicos, são consideradas nesta seção. Os calores específicos, indicados por  $c_v$  e  $c_p$ , são particularmente úteis para cálculos termodinâmicos que envolvam o *modelo de gás ideal* a ser apresentado na Seção 3.12.

As propriedades intensivas  $c_v$  e  $c_p$  são definidas para substâncias simples compressíveis puras em termos de derivadas parciais das funções  $u(T, v)$  e  $h(T, p)$ , respectivamente, como

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \quad (3.8)$$

$$c_p = \left( \frac{\partial h}{\partial T} \right)_p \quad (3.9)$$

em que os subscritos  $v$  e  $p$  representam, respectivamente, as variáveis mantidas fixas durante a diferenciação. Valores de  $c_v$  e  $c_p$  podem ser obtidos através de mecânica estatística utilizando medições em *espectrômetros*. Eles também podem ser determinados macroscopicamente através de medidas precisas de propriedades. Uma vez que  $u$  e  $h$  podem ser expressos em base mássica ou em base molar, os valores de calores específicos podem ser expressos de modo semelhante. Em unidades SI tem-se  $\text{kJ/kg} \cdot \text{K}$  ou  $\text{kJ/kmol} \cdot \text{K}$ . Em unidades inglesas tem-se  $\text{Btu/lb} \cdot \text{°R}$  ou  $\text{Btu/lbmol} \cdot \text{°R}$ .

A propriedade  $k$ , denominada *razão de calores específicos*, é simplesmente a razão

$$k = \frac{c_p}{c_v} \quad (3.10)$$

As propriedades  $c_v$  e  $c_p$  são denominadas *calores específicos* (ou capacidades térmicas) uma vez que, sob certas *condições especiais*, relacionam a variação de temperatura de um sistema com a quantidade de calor adicionado por transferência de calor. Entretanto, geralmente é preferível pensar em  $c_v$  e  $c_p$  em termos de suas definições, Eqs. 3.8 e 3.9, e não em termos da limitada interpretação que envolve a transferência de calor.

Em geral,  $c_v$  é uma função de  $v$  e  $T$  (ou  $p$  e  $T$ ) e  $c_p$  é uma função de  $p$  e  $T$  (ou  $v$  e  $T$ ). A Fig. 3.9 apresenta como  $c_p$  para vapor d'água varia em função da temperatura e da pressão. As fases de vapor de outras substâncias exibem um comportamento semelhante. Note que a figura fornece a variação de  $c_p$  com a temperatura no limite de pressão tendendo a zero. Ao longo desse limite  $c_p$  aumenta à medida que a temperatura aumenta, o que é uma característica também apresentada por outros gases. Esses valores de *pressão zero* para  $c_v$  e  $c_p$  serão mencionados de novo na Seção 3.13.2.

Dados de calores específicos estão disponíveis para gases, líquidos e sólidos de uso comum. Dados para gases são apresentados na Seção 3.13.2 como parte da discussão sobre o modelo de gás ideal. Valores de calor específico para alguns líquidos e sólidos de uso comum são apresentados na Seção 3.10.2 como parte da discussão sobre o modelo de substância incompressível.

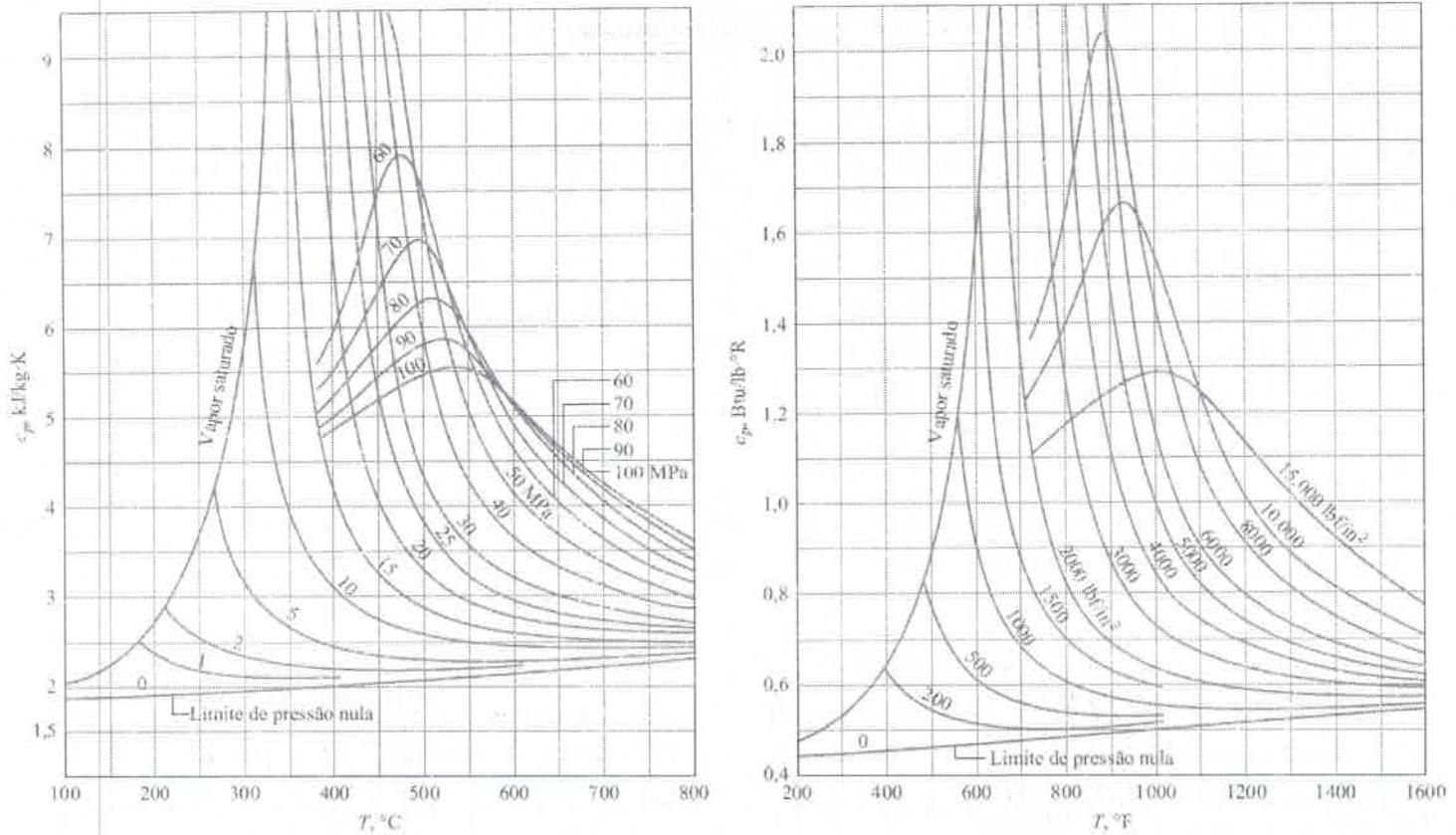


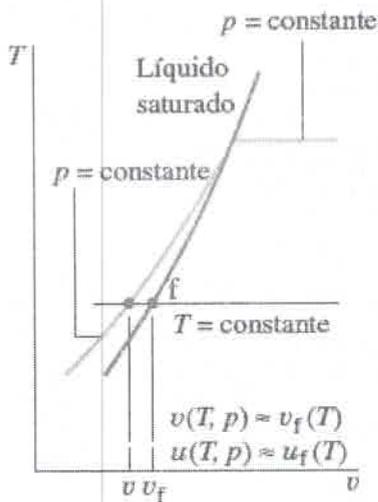
Fig. 3.9  $c_p$  do vapor d'água em função da temperatura e da pressão.

### 3.10 Avaliando Propriedades de Líquidos e Sólidos

Métodos especiais frequentemente podem ser utilizados para avaliar propriedades de líquidos e sólidos. Esses métodos fornecem aproximações simples, embora precisas, que não requerem levantamentos exatos como as das tabelas de líquido comprimido para a água, Tabelas A-5. Dois desses métodos são apresentados a seguir: aproximações utilizando dados de líquido saturado e o modelo de substância incompressível.

#### 3.10.1 Aproximações para Líquidos Utilizando Dados de Líquido Saturado

Valores aproximados para  $v$ ,  $u$  e  $h$  para estados líquidos podem ser obtidos utilizando dados de líquido saturado. Para ilustrar, utilizemos as tabelas de líquido comprimido, Tabelas A-5. Essas tabelas mostram que o volume específico e a energia interna específica variam muito pouco com a pressão para uma temperatura fixa. Como os valores de  $v$  e  $u$  variam apenas levemente à medida que a pressão se altera para uma temperatura fixa, as aproximações a seguir são razoáveis para muitos cálculos de engenharia:



$$v(T, p) \approx v_f(T) \quad (3.11)$$

$$u(T, p) \approx u_f(T) \quad (3.12)$$

Isto é, para líquidos  $v$  e  $u$  podem ser avaliados no estado de líquido saturado correspondente à temperatura no dado estado.

Um valor aproximado de  $h$  para estados de líquido pode ser obtido utilizando as Eqs. 3.11 e 3.12 na definição  $h = u + pv$ ; então

$$h(T, p) \approx u_f(T) + pv_f(T)$$

Essa relação pode ser expressa alternativamente por

$$h(T, p) \approx h_f(T) + \underline{v_f(T)[p - p_{\text{sat}}(T)]} \quad (3.13)$$

em que  $p_{\text{sat}}$  representa a pressão de saturação a uma dada temperatura. O desenvolvimento da expressão é deixado como exercício. Quando a contribuição do termo sublinhado da Eq. 3.13 é pequena, a entalpia específica pode ser aproximada pelo valor do líquido saturado, da mesma forma que para  $v$  e  $u$ . Isto é,

$$h(T, p) \approx h_f(T) \quad (3.14)$$

Embora as aproximações dadas tenham sido apresentadas em relação à água líquida, elas também fornecem aproximações apropriadas para outras substâncias *quando os únicos dados de líquido disponíveis são para estados de líquido saturado*. No presente texto, dados para líquido comprimido são apresentados somente para água (Tabelas A-5). Note ainda que o *Interactive Thermodynamics: IT* não fornece dados de líquido comprimido para *qualquer* substância, mas utiliza as Eqs. 3.11, 3.12 e 3.14 para avaliar, respectivamente, os valores de  $v$ ,  $u$  e  $h$ . Quando uma precisão maior que a fornecida pelas aproximações for necessária, outras fontes de dados devem ser consultadas para a obtenção de conjuntos mais completos de propriedades da substância considerada.

### 3.10.2 Modelo de Substância Incompressível

#### modelo de substância incompressível

Conforme foi abordado antes, existem regiões nas quais o volume específico da água líquida pouco varia e que a

energia interna específica varia principalmente com a temperatura. O mesmo comportamento geral é apresentado pelas fases líquidas de outras substâncias e por sólidos. As aproximações das Eqs. 3.11 a 3.14 se baseiam nessas observações, assim como o modelo de substância incompressível aqui considerado.

Para simplificar os cálculos envolvendo líquidos e sólidos geralmente assume-se que o volume específico (massa específica) seja constante e que a energia interna específica varie somente com a temperatura. Uma substância idealizada sob essas hipóteses é denominada *incompressível*.

### TOME NOTA...

Para uma substância modelada como incompressível,  $v = \text{constante}$  e  $u = u(T)$

Uma vez que a energia interna específica de uma substância modelada como incompressível depende somente da temperatura, o calor específico  $c_v$  é também uma função exclusiva da temperatura:

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad (\text{incompressível}) \quad (3.15)$$

Esta expressão utiliza uma derivada ordinária, já que  $u$  depende somente de  $T$ .

Embora o volume específico seja constante e a energia interna dependa somente da temperatura, a entalpia varia com a pressão e com a temperatura de acordo com

$$h(T, p) = u(T) + pv \quad (\text{incompressível}) \quad (3.16)$$

Para uma substância modelada como incompressível os calores específicos  $c_v$  e  $c_p$  são iguais. Isso é observado pela derivação da Eq. 3.16 com relação à temperatura, enquanto a pressão é mantida constante para obter

$$\left(\frac{\partial h}{\partial T}\right)_p = \frac{du}{dT}$$

O lado esquerdo desta expressão corresponde a  $c_p$  por definição (Eq. 3.9) e, utilizando a Eq. 3.15 no lado direito, temos

$$c_p = c_v \quad (\text{incompressível}) \quad (3.17)$$

Então, para uma substância incompressível não é necessária a distinção entre  $c_p$  e  $c_v$ , e ambos podem ser representados pelo mesmo símbolo,  $c$ . Os calores específicos de alguns líquidos e sólidos de uso comum são fornecidos, em função da temperatura, nas Tabelas A-19. Ao longo de intervalos limitados de temperatura a variação de  $c$  com a temperatura pode ser pequena. Nesses casos, o calor específico  $c$  pode ser tratado como constante sem significativa perda de precisão.

Utilizando as Eqs. 3.15 e 3.16 as variações da energia interna específica e da entalpia específica entre dois estados são dadas, respectivamente, por

$$u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT \quad (\text{incompressível}) \quad (3.18)$$

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= u_2 - u_1 + v(p_2 - p_1) \\ &= \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT + v(p_2 - p_1) \quad (\text{incompressível}) \end{aligned} \quad (3.19)$$

Se o calor específico  $c$  for tomado como constante, as Eqs. 3.18 e 3.19 se tornam, respectivamente,

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1) \quad (\text{incompressível, com } c \text{ constante}) \quad (3.20a)$$

$$h_2 - h_1 = c(T_2 - T_1) + \underline{v(p_2 - p_1)} \quad (3.20b)$$

Na Eq. 3.20b o termo sublinhado é geralmente pequeno com relação ao primeiro termo do lado direito, e pode ser desprezado.

O próximo exemplo ilustra o uso do modelo de substância incompressível em uma aplicação envolvendo o calorímetro a volume constante considerado no boxe do item BIOCONEXÕES, na Seção 2.5.

### ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 3.6 ▶

#### Medindo o Valor Calórico do Óleo de Cozinha

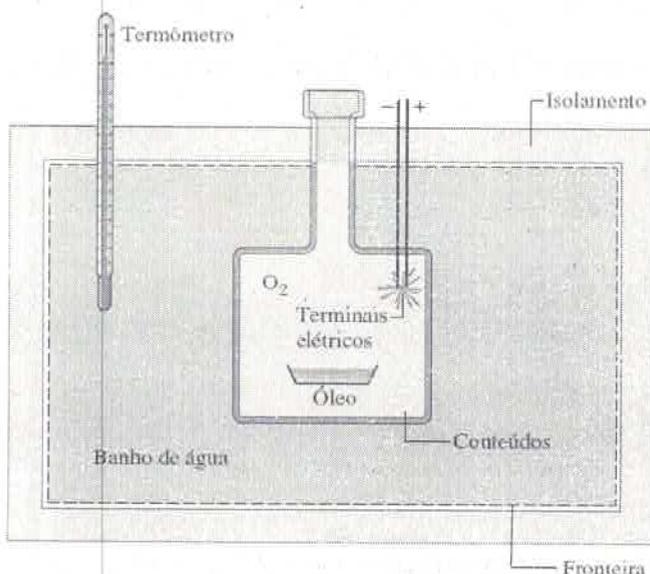
Um décimo de mililitro de óleo de cozinha é colocado na câmara de um calorímetro a volume constante com oxigênio suficiente para que o óleo seja completamente queimado. A câmara se encontra imersa em um banho de água, cuja massa é de 2,15 kg. Para atingir o objetivo desta análise as partes de metal do aparato são modeladas como equivalentes a um adicional de 0,5 kg de água. O calorímetro é perfeitamente isolado, e inicialmente está a 25°C. O óleo é inflamado eletricamente. Quando o equilíbrio é alcançado de novo, a temperatura é de 25,3°C. Determine a variação da energia interna dos conteúdos da câmara em kcal por ml de óleo de cozinha e em kcal por colher de sopa de óleo de cozinha.

#### SOLUÇÃO

**Dado:** são fornecidos os dados relativos a um calorímetro a volume constante que testa óleo de cozinha para obter seu valor calórico.

**Pede-se:** determine a variação da energia interna dos conteúdos da câmara do calorímetro.

#### Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



#### Modelo de Engenharia:

1. O sistema fechado está ilustrado pela linha pontilhada na figura correspondente.
2. O volume total permanece constante, inclusive a câmara, o banho e a quantidade de água utilizada como modelo para as partes metálicas.
3. A água é modelada como fluido incompressível com calor específico constante  $c$ .
4. A transferência de calor relativa à vizinhança é desprezível, e não há variações com relação à energia cinética ou potencial.

Fig. E3.6

**Análise:** com as hipóteses listadas, o balanço de energia do sistema fechado fica

$$\Delta U + \Delta EC^0 + \Delta EP^0 = Q^0 - W^0$$

ou

$$(\Delta U)_{\text{conteúdos}} + (\Delta U)_{\text{água}} = 0$$

desse modo

$$(\Delta U)_{\text{conteúdos}} = -(\Delta U)_{\text{água}} \quad (\text{a})$$

A variação da energia interna dos conteúdos é igual e oposta à variação da energia interna da água.

Como a água é modelada como incompressível, a Eq. 3.20a é utilizada para analisar o lado direito da Eq. (a), fornecendo

$$\textcircled{1} \textcircled{2} \quad (\Delta U)_{\text{conteúdos}} = -m_a c_a (T_2 - T_1) \quad (\text{b})$$

Com  $m_a = 2,15 \text{ kg} + 0,5 \text{ kg} = 2,65 \text{ kg}$ ,  $(T_2 - T_1) = 0,3 \text{ K}$ , e  $c_a = 4,18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$  da Tabela A-19, a Eq. (b) fornece

$$(\Delta U)_{\text{conteúdos}} = -(2,65 \text{ kg})(4,18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(0,3 \text{ K}) = -3,32 \text{ kJ}$$

Convertendo para kcal e expressando o resultado por milímetro de óleo utilizando o volume de óleo, de 0,1 mL, obtemos

$$\begin{aligned} \frac{(\Delta U)_{\text{conteúdos}}}{V_{\text{óleo}}} &= \frac{-3,32 \text{ kJ}}{0,1 \text{ mL}} \left| \frac{1 \text{ kcal}}{4,1868 \text{ kJ}} \right| \\ &= -7,9 \text{ kcal/mL} \end{aligned}$$

O valor da caloria do óleo de cozinha é da magnitude de 7,9 kcal/mL. Os rótulos dos recipientes com óleo de cozinha usualmente fornecem o valor da caloria considerando o tamanho de uma colher de sopa (15 mL). Utilizando o valor calculado, obtemos 119 kcal por colher de sopa.

① A variação da energia interna da água pode ser obtida de maneira alternativa utilizando a Eq. 3.12, junto com os dados relativos à energia interna para um líquido saturado obtidos da Tabela A-2.

② A variação da energia interna dos conteúdos da câmara não pode ser avaliada utilizando calor específico, porque os calores específicos são definidos (Seção 3.9) apenas para substâncias puras — ou seja, substâncias que têm composição invariável.

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em seu interior e em sua fronteira.
- aplicar o balanço de energia utilizando o modelo de substância incompressível.

### Teste-Relâmpago

Utilizando a Eq. 3.12 junto com os dados relativos à energia interna para um líquido saturado obtidos da Tabela A-2,

obtenha a variação da energia interna da água, em kJ, e compare com os valores obtidos admitindo que a água é incompressível. **Resposta:** 3,32 kJ



## BIOCONEXÕES

Sua alimentação é ruim para o meio ambiente? Pode ser. As frutas, os legumes e os produtos de origem animal encontrados nos supermercados exigem uma grande quantidade de combustíveis fósseis para estarem lá. Enquanto o estudo da ligação da alimentação humana ao meio ambiente ainda está dando os primeiros passos, já existem algumas conclusões preliminares interessantes a respeito.

Um estudo dos padrões alimentares dos Estados Unidos analisou a quantidade de combustível fóssil – e implicitamente, o nível da produção de gás de efeito estufa – necessário para suportar diversas dietas diferentes. Dietas ricas em carnes e peixes necessitam de mais combustíveis fósseis, devido aos recursos energéticos significativos necessários para produzir esses produtos e trazê-los para o mercado. Porém, para aqueles que desfrutaram de carne e peixe, a notícia não é de todo ruim. Apenas uma fração do combustível fóssil necessário para providenciar o alimento para as lojas é usada para cultivá-lo; a maior parte é gasta no processamento e na distribuição. Desse modo, comer seus alimentos prediletos produzidos perto de casa pode ser ambientalmente uma boa escolha.

Ainda assim, a conexão entre o alimento que nós comemos, o uso dos recursos energéticos e o impacto ambiental correspondente requer estudos mais aprofundados, incluindo a grande quantidade de terras agrícolas necessárias, a enorme necessidade de água, as emissões relacionadas com a produção e o uso de fertilizantes, o metano emitido a partir dos resíduos produzidos por bilhões de animais criados anualmente para alimentação, e o combustível para o transporte dos alimentos para o mercado.

### 3.11 Diagrama de Compressibilidade Generalizada

O objetivo da presente seção é o de obter uma melhor compreensão das relações entre pressão, volume específico e temperatura para gases. Isso é importante não somente como uma base para análises envolvendo gases, mas também para discussões da segunda parte deste capítulo, quando o *modelo de gás ideal* é apresentado. A presente discussão é conduzida em termos do *fator de compressibilidade*, e começa pela introdução da *constante universal dos gases*.

#### 3.11.1 Constante Universal dos Gases, $R$

Considere um gás confinado em um cilindro por um pistão e o conjunto mantido a uma temperatura constante. O pistão pode ser movimentado para diversas posições, de maneira que uma série de estados de equilíbrio pode ser visitada a uma temperatura constante. Suponha que a pressão e o volume específico sejam medidos em cada estado e o valor da razão  $p\bar{v}/T$  ( $\bar{v}$  é o volume por mol) seja determinado. Essas razões podem ser colocadas em uma forma gráfica em função da pressão para uma temperatura constante. Os resultados para diversas temperaturas são esboçados na [Fig. 3.10](#). Quando as razões são extrapoladas para o valor de pressão nula *exatamente o mesmo valor-limite é obtido* para cada curva. Isto é,

$$\lim_{p \rightarrow 0} \frac{p\bar{v}}{T} = \bar{R} \quad (3.21)$$

#### constante universal dos gases

em que  $R$  representa o limite comum para todas as temperaturas. Se esse procedimento fosse repetido para outros gases veríamos em todos os casos que o limite da razão  $p\bar{v}/T$  à medida que  $p$  tende a zero para uma temperatura fixa, é o mesmo e é denominado  $R$ . Como o mesmo valor-limite é apresentado para todos os gases,  $R$  é denominada

constante universal dos gases. O seu valor obtido experimentalmente é

$$\bar{R} = \begin{cases} 8,314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} \\ 1,986 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{°R} \\ 1545 \text{ ft} \cdot \text{lb}_f/\text{lbmol} \cdot \text{°R} \end{cases} \quad (3.22)$$

Tendo apresentado a constante universal dos gases, analisa-se a seguir o fator de compressibilidade.

### 3.11.2 Fator de Compressibilidade, $Z$

#### fator de compressibilidade

A razão adimensional  $p\bar{v}/RT$  é denominada fator de compressibilidade, e é representada por  $Z$ . Isto é,

$$Z = \frac{p\bar{v}}{RT} \quad (3.23)$$

Como mostrado em cálculos a serem apresentados, quando valores de  $p$ ,  $\bar{v}$ ,  $R$  e  $T$  são utilizados em unidades consistentes  $Z$  é adimensional.

Com  $\bar{v} = Mv$  (Eq. 1.9), em que  $M$  representa o peso atômico ou molecular, o fator de compressibilidade pode ser expresso de modo alternativo como

$$Z = \frac{pv}{RT} \quad (3.24)$$

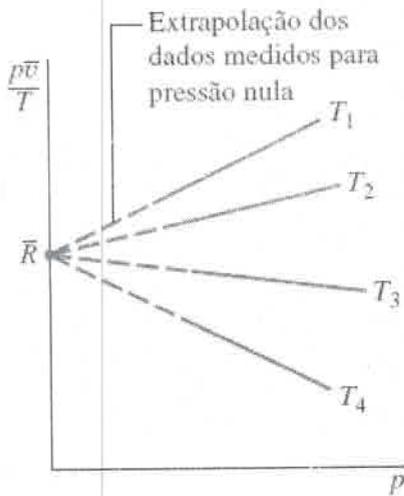
em que

$$R = \frac{\bar{R}}{M} \quad (3.25)$$

$R$  é uma constante para um gás particular cujo peso molecular é  $M$ . Alternativamente, as unidades para  $R$  são kJ/kg · K, Btu/lb · °R e ft · lb<sub>f</sub>/lb · °R. A Tabela 3.1 fornece uma amostra de valores da constante  $R$  para alguns gases, calculada a partir da Eq. 3.25.

A Eq. 3.21 pode ser expressa em termos do fator de compressibilidade como

$$\lim_{p \rightarrow 0} Z = 1 \quad (3.26)$$



**Fig. 3.10** Esboço de  $p\bar{v}/T$  em função da pressão para um gás considerando diferentes valores de temperatura.

Isto é, o fator de compressibilidade  $Z$  tende a ser unitário à medida que a pressão tende a zero para uma temperatura fixa. Isso pode ser ilustrado observando-se a [Fig. 3.11](#), que mostra  $Z$  para o hidrogênio como função da pressão para diferentes temperaturas. Em geral, nos estados de um gás em que a pressão é pequena com relação à pressão crítica  $Z$  é aproximadamente 1.

**TABELA 3.1**

**Valores da Constante  $R$  do Gás para Elementos e Compostos Selecionados**

Substância	Fórmula Química	$R$ (kJ/kg · K)	$R$ (Btu/lb · °R)
Ar	—	0,2870	0,06855
Amônia	NH <sub>3</sub>	0,4882	0,11662
Argônio	Ar	0,2082	0,04972
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	0,1889	0,04513
Monóxido de carbono	CO	0,2968	0,07090
Hélio	He	2,0769	0,49613
Hidrogênio	H <sub>2</sub>	4,1240	0,98512
Metano	CH <sub>4</sub>	0,5183	0,12382

Nitrogênio	N <sub>2</sub>	0,2968	0,07090
Oxigênio	O <sub>2</sub>	0,2598	0,06206
Água	H <sub>2</sub> O	0,4614	0,11021

Fonte: Os valores de  $R$  são calculados em termos da constante universal dos gases  $R = 8,314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K} = 1,986 \text{ Btu/lbmol} \cdot \text{°R}$  e do peso molecular  $M$  obtido da Tabela A-1 utilizando  $R = R/M$  (Eq. 3.25).

### 3.11.3 Dados de Compressibilidade Generalizada, Diagrama Z

#### pressão e temperatura reduzidas

A Fig. 3.11 apresenta o fator de compressibilidade para o hidrogênio em função da pressão para um dado valor de temperatura. Diagramas semelhantes podem ser construídos para outros gases. Quando esses diagramas são estudados observa-se uma semelhança *qualitativa* entre eles. Um estudo mais profundo mostra que quando as coordenadas são apropriadamente modificadas, curvas para diferentes gases quase coincidem quando representadas graficamente nos mesmos eixos coordenados em conjunto. Assim, uma semelhança *quantitativa* pode ser alcançada. Esse fato é denominado *princípio de estados correspondentes*. Nesse tipo de abordagem o fator de compressibilidade  $Z$  é representado graficamente como função da pressão reduzida  $p_R$  e da temperatura reduzida  $T_R$ , adimensionais definidas como

$$p_R = p/p_c \quad (3.27)$$

$$T_R = T/T_c \quad (3.28)$$

#### diagrama de compressibilidade generalizada

em que  $p_c$  e  $T_c$  representam a pressão e a temperatura crítica, respectivamente. Isso resulta em um diagrama de compressibilidade generalizada da forma  $Z = f(p_R, T_R)$ . A Fig. 3.12 mostra dados experimentais para 10 diferentes gases em um diagrama desse tipo. As linhas cheias, que correspondem a isotermas reduzidas, representam as melhores curvas ajustadas aos dados. Observe que as Tabelas A-1 fornecem a temperatura crítica e a pressão crítica para um conjunto de substâncias.

Um diagrama generalizado mais apropriado que o da Fig. 3.12 para a resolução de problemas é apresentado no Apêndice como as Figs. A-1, A-2 e A-3. Na Fig. A-1  $p_R$  varia de 0 a 1,0; na Fig. A-2  $p_R$  varia de 0 a 10,0; e na Fig. A-3  $p_R$  varia de 10,0 a 40,0. Para qualquer temperatura o desvio entre os dados medidos e aqueles do diagrama generalizado aumenta com a pressão. Entretanto, para os 30 gases utilizados no desenvolvimento do diagrama o desvio é *no máximo* da ordem de 5%, e para a maioria dos intervalos muito é inferior a este valor.<sup>1</sup>

#### volume específico pseudorreduzido

Valores de volume específico são incluídos no diagrama generalizado de compressibilidade através da variável denominada volume específico pseudorreduzido e definida por

$$\frac{Q}{m} = (u_3 - u_1) + \frac{W}{m}$$

O cálculo da quantidade de calor transferida requer que se saiba o valor de  $u_3$ , a energia interna específica no estado 3. Como  $T_3$  é dada e  $v_3 = v_2$ , duas propriedades intensivas independentes são conhecidas e, em conjunto, determinam o estado 3. Para achar  $u_3$ , primeiro resolvemos para o título

$$x_3 = \frac{v_3 - v_{f3}}{v_{g3} - v_{f3}} = \frac{0,1944 - 1,0905 \times 10^{-3}}{0,3928 - 1,0905 \times 10^{-3}} = 0,494$$

em que  $v_{f3}$  e  $v_{g3}$  são obtidos da Tabela A-2 a 150°C. Então

$$u_3 = u_{f3} + x_3(u_{g3} - u_{f3}) = 631,68 + 0,494(2559,5 - 631,68) = 1584,0 \text{ kJ/kg}$$

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- analisar o trabalho utilizando a Eq. 2.17.
- aplicar o balanço de energia com dados das tabelas de vapor.
- esboçar os diagramas  $T$ - $v$  e  $p$ - $v$  e localizar estados nesses diagramas.

em que  $u_{f3}$  e  $u_{g3}$  são obtidos da Tabela A-2 a 150°C.

Substituindo os valores no balanço de energia

$$\frac{Q}{m} = 1584,0 - 2957,3 + (-112,2) = -1485,5 \text{ kJ/kg}$$

O sinal negativo indica que energia é transferida *para fora* do sistema devido à transferência de calor.

### Teste-Relâmpago

Considerando que após os dois processos especificados ocorre o Processo 3-4, durante o qual a água passa por um processo de expansão à temperatura constante de 150°C até o estado de vapor saturado, determine o trabalho, em kJ/kg, para o processo *global* de 1 a 4. **Resposta:**  $W/m = -17,8 \text{ kJ/kg}$ .

### 3.8.2 Utilizando um Programa de Computador

O Exemplo 3.5 apresenta a utilização do *Interactive Thermodynamics: IT* para a solução de problemas. Nesse caso, o programa avalia os dados de propriedade, calcula os resultados e os apresenta graficamente. Outros programas similares podem ser usados para a obtenção da solução apresentada.

#### ▶ ▶ ▶ EXEMPLO 3.5 ▶

### Representando Graficamente Dados Termodinâmicos Utilizando um Programa de Computador

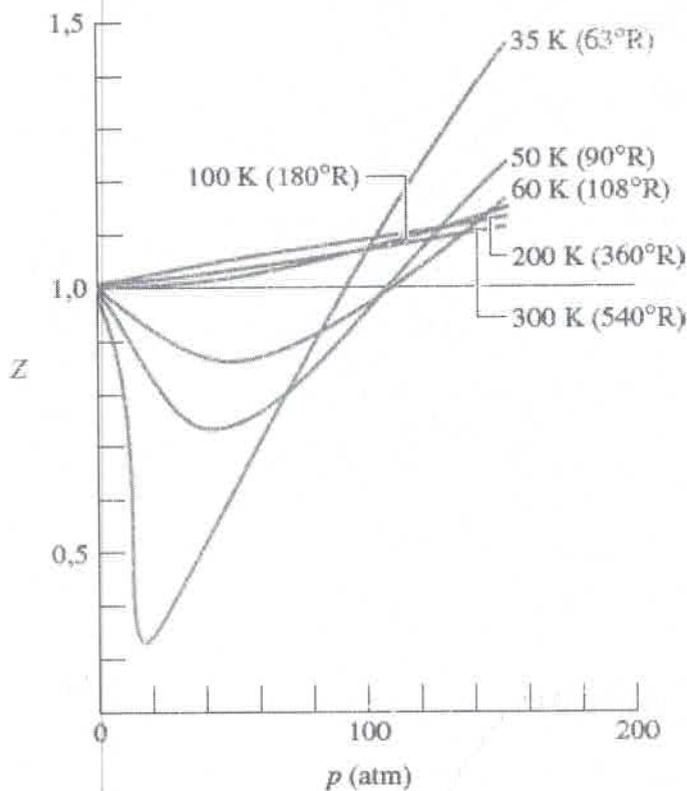


Fig. 3.11 Variação do fator de compressibilidade com a pressão a temperatura constante para o hidrogênio.

$$v'_R = \frac{\bar{v}}{RT_c/p_c} \quad (3.29)$$

O volume específico pseudorreduzido fornece uma melhor correlação de dados do que o volume específico *reduzido*  $v_R = v/v_c$  em que  $v_c$  é o volume específico crítico.

### TOME NOTA...

O estudo da Fig. A-2 mostra que o valor de  $Z$  tende para a unidade à medida que a pressão reduzida  $p_R$  tende a zero para uma temperatura fixa reduzida  $T_R$ . Isto é,  $Z \rightarrow 1$  conforme  $p_R \rightarrow 0$  para  $T_R$  fixa.

A Fig. A-2 mostra também que  $Z$  tende a unidade para uma pressão fixa reduzida, conforme o valor da temperatura reduzida torna-se maior.

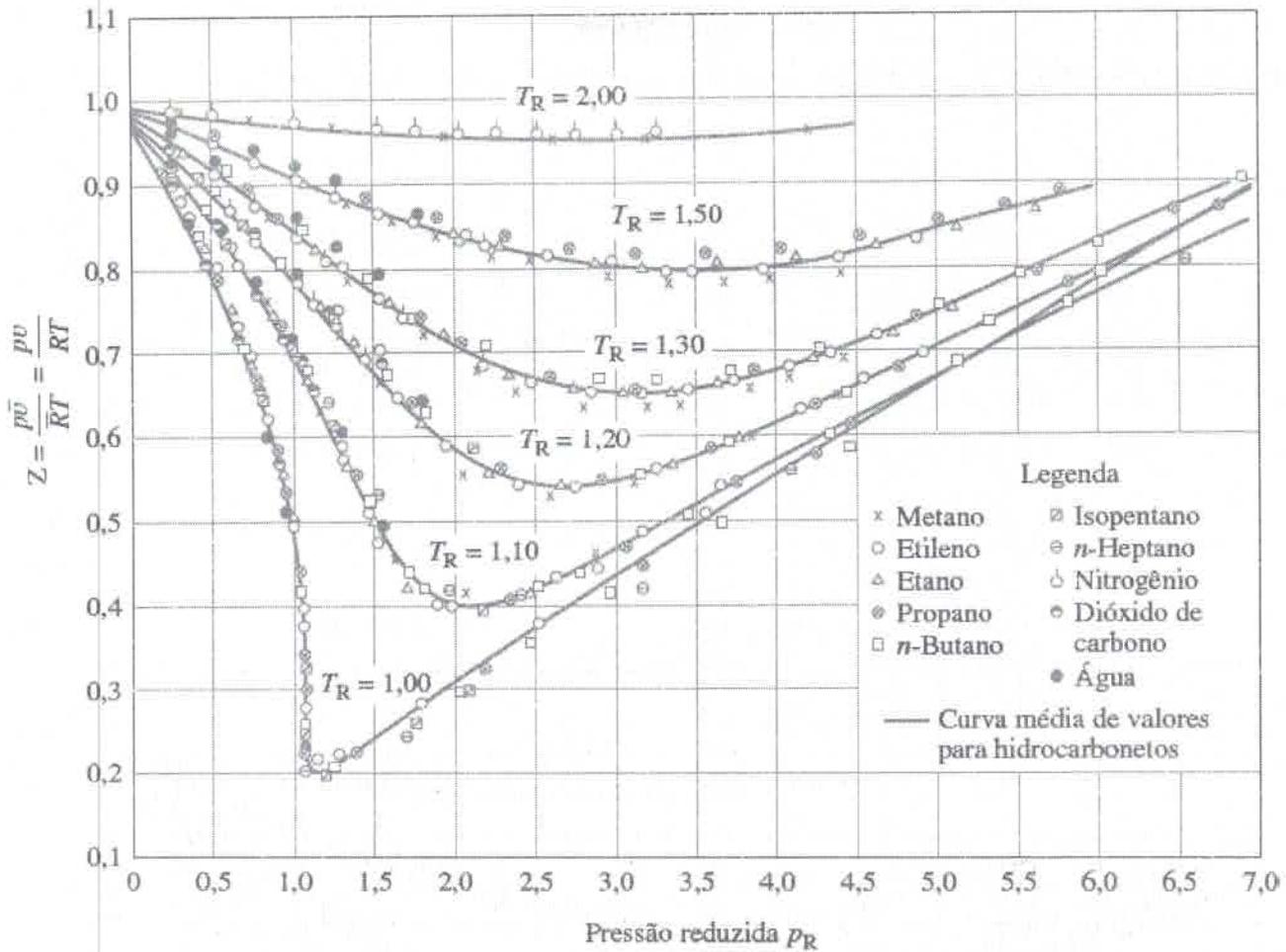


Fig. 3.12 Diagrama de compressibilidade generalizada para vários gases.

A partir da pressão e da temperatura críticas de uma substância de interesse, o diagrama generalizado pode ser utilizado com diversos pares das variáveis  $T_R$ ,  $p_R$  e  $v'_R$ :  $(T_R, p_R)$ ,  $(p_R, v'_R)$  ou  $(T_R, v'_R)$ . O mérito do diagrama generalizado para relacionar  $p$ ,  $v$  e  $T$  para gases está relacionado com a simplicidade em conjunto com a precisão. Entretanto, o diagrama generalizado de compressibilidade não deve ser utilizado como um substituto para os dados  $p$ - $v$ - $T$  de uma substância fornecidos por uma tabela ou programa de computador. O diagrama é útil principalmente para a obtenção de estimativas razoáveis na ausência de dados mais precisos.

O exemplo a seguir fornece uma ilustração do uso do diagrama generalizado de compressibilidade.

Gás\_Ideal  
A.15 - Aba a



### ▶▶▶ EXEMPLO 3.7 ▶

#### Utilizando o Diagrama de Compressibilidade Generalizada

Um tanque rígido e fechado, repleto de vapor d'água, inicialmente a 20 MPa, 520°C, é resfriado até que sua temperatura atinja 400°C. Utilizando o diagrama de compressibilidade, determine

(a) o volume específico do vapor d'água em  $\text{m}^3/\text{kg}$  no estado inicial.

(b) a pressão em MPa no estado final.

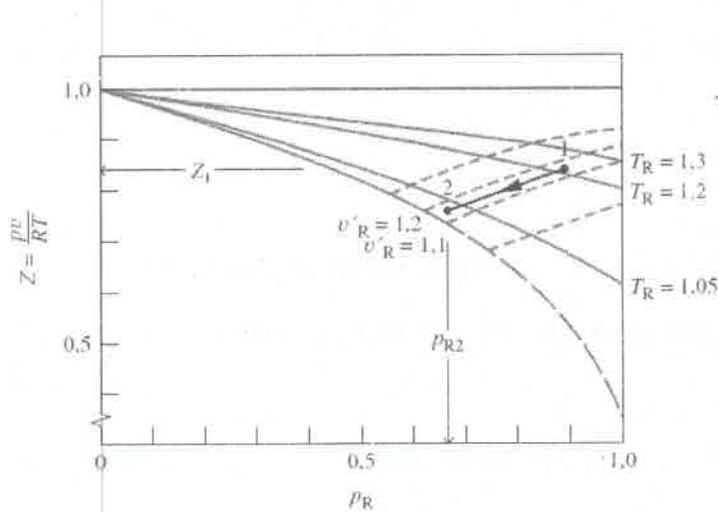
Compare os resultados dos itens (a) e (b) com os valores obtidos das tabelas de vapor superaquecido, Tabela A-4.

## SOLUÇÃO

**Dado:** vapor d'água é resfriado a volume constante de 20 MPa, 520°C a 400°C.

**Pede-se:** utilize o diagrama de compressibilidade e as tabelas de vapor superaquecido para determinar o volume específico e a pressão final e compare os resultados.

**Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:**



**Modelo de Engenharia:**

1. O vapor d'água constitui um sistema fechado.
2. Os estados inicial e final estão em equilíbrio.
3. O volume é constante.

Fig. E3.7

**Análise:**

(a) Da Tabela A-1,  $T_c = 647,3 \text{ K}$  e  $p_c = 22,09 \text{ MPa}$  para a água. Então,

$$\textcircled{1} \quad T_{R1} = \frac{793}{647,3} = 1,23, \quad p_{R1} = \frac{20}{22,09} = 0,91$$

Com esses valores para a temperatura reduzida e a pressão reduzida o valor de  $Z$  obtido da Fig. A-1 é aproximadamente 0,83. Um vez que  $Z = p v / RT$ , o volume específico no estado 1 pode ser determinado do seguinte modo:

$$\textcircled{2} \quad v_1 = Z_1 \frac{RT_1}{p_1} = 0,83 \frac{\bar{R}T_1}{M p_1} = 0,83 \left( \frac{8314 \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}}{18,02 \frac{\text{kg}}{\text{kmol}}} \right) \left( \frac{793 \text{ K}}{20 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}} \right) = 0,0152 \text{ m}^3/\text{kg}$$

O peso molecular da água é obtido da Tabela A-1.

De acordo com a Tabela A-4, o volume específico no estado inicial é  $0,01551 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Esse valor concorda com o

valor obtido com o diagrama de compressibilidade, como esperado.

(b) Uma vez que a massa e o volume permanecem constantes, o vapor d'água é resfriado a volume específico constante e, assim, a constante  $v'_R$ . Utilizando o valor de volume específico determinado no item (a), o valor constante de  $v'_R$  é

$$v'_R = \frac{vp_c}{RT_c} = \frac{\left(0,0152 \frac{\text{m}^3}{\text{kg}}\right) \left(22,09 \times 10^6 \frac{\text{N}}{\text{m}^2}\right)}{\left(\frac{8314 \text{ N} \cdot \text{m}}{18,02 \text{ kg} \cdot \text{K}}\right) (647,3 \text{ K})} = 1,12$$

No estado 2

$$T_{R2} = \frac{673}{647,3} = 1,04$$

Localizando o ponto no diagrama de compressibilidade em que  $v'_R = 1,12$  e  $T_R = 1,04$ , o valor correspondente de  $p_R$  se encontra em torno de 0,69. Assim

$$p_2 = p_c(p_{R2}) = (22,09 \text{ MPa})(0,69) = 15,24 \text{ MPa}$$

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

utilizar o diagrama generalizado de compressibilidade para relacionar dados  $p$ - $v$ - $T$ .

utilizar as tabelas de vapor para relacionar dados  $p$ - $v$ - $T$

Interpolando nas tabelas de vapor superaquecido obtém-se  $p_2 = 15,16 \text{ MPa}$ . Como antes, o valor obtido a partir do diagrama de compressibilidade se encontra em boa concordância com o valor tabelado.

① A temperatura *absoluta* e a pressão *absoluta* devem ser utilizadas na determinação do fator de compressibilidade  $Z$ , da temperatura reduzida  $T_R$  e da pressão reduzida  $p_R$ .

② Uma vez que  $Z$  é adimensional, valores de  $p$ ,  $v$ ,  $R$  e  $T$  devem ser utilizados em unidades compatíveis.

### Teste-Relâmpago

Utilizando o diagrama de compressibilidade, determine o volume específico, em  $\text{m}^3/\text{kg}$ , para o vapor d'água a 14 MPa, 440°C. Compare com o valor da tabela de vapor. **Resposta:** 0,0195  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

### 3.11.4 Equações de Estado

Considerando as curvas das Figs. 3.11 e 3.12, é razoável pensar que a variação do fator de compressibilidade com a pressão e a temperatura para gases pode ser expressa como uma equação, pelo menos para alguns intervalos de  $p$  e  $T$ . Duas expressões que contemplam uma base teórica podem ser escritas. Uma fornece o fator de compressibilidade

como uma expansão em série infinita em termos da pressão:

$$Z = 1 + \hat{B}(T)p + \hat{C}(T)p^2 + \hat{D}(T)p^3 + \dots \quad (3.30)$$

em que os coeficientes  $\hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, \dots$  dependem somente da temperatura. As reticências na Eq. 3.30 representam termos de ordem superior. A outra expressão é uma série análoga à Eq. 3.30, mas expressa em termos de  $1/v$  em vez de  $p$

$$Z = 1 + \frac{B(T)}{v} + \frac{C(T)}{v^2} + \frac{D(T)}{v^3} + \dots \quad (3.31)$$

### equações viriais de estado

As Eqs. 3.30 e 3.31 são conhecidas como equações viriais de estado, e os coeficientes  $\hat{B}, \hat{C}, \hat{D}, \dots$  e  $B, C, D, \dots$  são denominados *coeficientes viriais*. A palavra *virial* origina-se da palavra latina para força. No presente uso está relacionada com interações de força entre moléculas.

As expansões viriais podem ser derivadas por métodos da mecânica estatística, e pode-se atribuir sentido físico aos coeficientes:  $B/v$  está relacionado com interações entre duas moléculas,  $C/v^2$  está relacionado com interações entre três moléculas etc. Em princípio, os coeficientes viriais podem ser calculados pelo uso de expressões da mecânica estatística derivada da consideração dos campos de forças ao redor das moléculas de um gás. Os coeficientes viriais também podem ser determinados a partir de dados  $p-v-T$  experimentais. As expansões viriais são utilizadas na Seção 11.1 como ponto de partida para a continuação dos estudos de representações analíticas das relações  $p-v-T$  de gases conhecidas genericamente como *equações de estado*.

As expansões viriais e o significado físico atribuído aos termos que compõem as expansões podem ser utilizados para explicar a natureza do comportamento-limite de um gás à medida que a pressão tende a zero para uma dada temperatura. Da Eq. 3.30 pode ser visto que se a pressão decresce a uma temperatura constante os termos  $\hat{B}p, \hat{C}p^2$  etc. que consideram as diversas interações moleculares tendem a ser reduzidos, sugerindo que as forças de interação se tornam mais fracas sob essas circunstâncias. No limite da pressão tendendo a zero esses termos se anulam, e a equação se reduz a  $Z = 1$ , o que se encontra de acordo com a Eq. 3.26. De modo semelhante, como o volume específico aumenta à medida que a pressão diminui para uma temperatura fixa os termos  $B/v, C/v^2$  etc. da Eq. 3.31 também se anulam no limite, levando a  $Z = 1$  quando as forças de interação entre as moléculas não são mais significativas.

## Avaliando Propriedades com o Uso do Modelo de Gás Ideal

### 3.12 Apresentando o Modelo de Gás Ideal

Nesta seção é apresentado o modelo de gás ideal. Esse modelo tem muitas aplicações na prática de engenharia, e é frequentemente utilizado nas seções que se seguem após este texto.

#### 3.12.1 A Equação de Estado de Gás Ideal

Conforme observado na Seção 3.11.3, o estudo do diagrama generalizado de compressibilidade, representado na Fig. A-2, mostra que para os estados nos quais a pressão  $p$  é pequena em relação à pressão crítica  $p_c$  (baixa  $p_R$ ) e/ou a temperatura  $T$  é elevada em relação à temperatura crítica  $T_c$  (elevada  $T_R$ ), o fator de compressibilidade  $Z = pv/RT$ , é próximo de 1. Nesses estados, podemos admitir com uma precisão aceitável que  $Z = 1$ , ou

$$pv = RT \quad (3.32)$$

## equação de estado de gás ideal

A segunda parte deste capítulo, fundamentada no modelo de gás ideal, está vinculada à Eq. 3.32, que é conhecida como a equação de estado de gás ideal.

Formas alternativas da mesma relação básica entre pressão, volume específico e temperatura são obtidas como se segue. Com  $v = V/m$ , a Eq. 3.32 pode ser expressa como

$$pV = mRT \quad (3.33)$$

Além disso, uma vez que  $v = v/M$  e  $R = R/M$ , Eqs. 1.9 e 3.25, respectivamente, em que  $M$  é o peso molecular, a Eq. 3.32 pode ser expressa como

$$p\bar{v} = \bar{R}T \quad (3.34)$$

ou, com  $v = V/n$ , como

$$pV = n\bar{R}T \quad (3.35)$$

Gás\_Ideal  
A.15 -Aba b



### 3.12.2 Modelo de Gás Ideal

#### modelo de gás ideal

Para qualquer gás cuja equação de estado seja dada *exatamente* por  $pv = RT$  a energia interna específica depende *somente* da temperatura. Essa conclusão é demonstrada formalmente na Seção 11.4. Observações experimentais também suportam essa conclusão, iniciando com o trabalho de Joule, que mostrou, em 1843, que a energia interna do ar com baixa massa específica (volume específico elevado) depende basicamente da temperatura. Uma motivação adicional, a partir de um ponto de vista microscópico, será fornecida em breve. A entalpia específica de um gás descrito por  $pv = RT$  também depende somente da temperatura, como pode ser mostrado pela combinação da definição de entalpia,  $h = u + pv$ , com  $u = u(T)$ , e a equação de estado de gás ideal para obter  $h = u(T) + RT$ . Tomadas em conjunto, essas especificações constituem o modelo de gás ideal, que é resumido a seguir:

#### TOME NOTA...

Para o desenvolvimento das soluções de muitos exemplos a seguir e problemas de final de capítulo envolvendo ar, oxigênio ( $O_2$ ), nitrogênio ( $N_2$ ), dióxido de carbono ( $CO_2$ ), monóxido de carbono ( $CO$ ), hidrogênio ( $H_2$ ) e outros gases comuns é indicado no enunciado do problema que o modelo de gás ideal deve ser utilizado. Se essa informação não estiver explicitamente indicada, a aplicabilidade do modelo de gás ideal deve ser verificada utilizando o diagrama Z ou outros dados.

$$pv = RT \quad (3.32)$$

$$u = u(T) \quad (3.36)$$

$$h = h(T) = u(T) + RT \quad (3.37)$$

A energia interna específica e a entalpia de gases em geral dependem de duas propriedades independentes e não somente da temperatura, como estabelecido pelo modelo de gás ideal. Além disso, a equação de estados dos gases

perfeitos não fornece uma aproximação aceitável para todos os estados. Em consequência, a utilização do modelo de gás ideal depende do erro aceitável para um dado cálculo. Não obstante, gases geralmente se *aproximam* do comportamento de gás ideal, e uma descrição particularmente simplificada é obtida com o modelo de gás ideal.

Para verificar se um gás pode ser modelado como um gás ideal, estados de interesse podem ser localizados em um diagrama de compressibilidade de maneira a determinar o desvio em relação à condição de  $Z = 1$ . Como mostrado em discussões posteriores, outros dados de propriedades em forma de gráficos ou tabelas podem também ser utilizados na determinação da aplicabilidade do modelo de gás ideal.

O próximo exemplo ilustra a utilização da equação de estado de gás ideal e reforça o uso dos diagramas de propriedades para localizar os principais estados durante processos.

### ► ► ► EXEMPLO 3.8 ►

#### **Analisando o Ar como um Gás Ideal Submetido a um Ciclo Termodinâmico**

Uma libra (0,45 kg) de ar em um conjunto cilindro-pistão é submetida a um ciclo termodinâmico que consiste em três processos.

**Processo 1-2:** volume específico constante

**Processo 2-3:** expansão à temperatura constante

**Processo 3-1:** compressão à pressão constante

No estado 1 a temperatura é de  $540^{\circ}\text{R}$  ( $26,8^{\circ}\text{C}$ ) e a pressão é 1 atm. No estado 2, a pressão é de 2 atm. Empregando a equação de estado de gás ideal,

- (a) esboce o ciclo em coordenadas  $p$ - $v$ .
- (b) determine a temperatura no estado 2, em  $^{\circ}\text{R}$ .
- (c) determine o volume específico no estado 3, em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .

#### **SOLUÇÃO**

**Dado:** ar é submetido a um ciclo termodinâmico composto por três processos: Processo 1-2,  $v = \text{constante}$ ; Processo 2-3,  $T = \text{constante}$ ; Processo 3-1,  $p = \text{constante}$ . São fornecidos valores para  $T_1$ ,  $p_1$  e  $p_2$ .

**Pede-se:** esboce o ciclo em coordenadas  $p$ - $v$  e determine  $T_2$  e  $v_3$ .

**Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:**

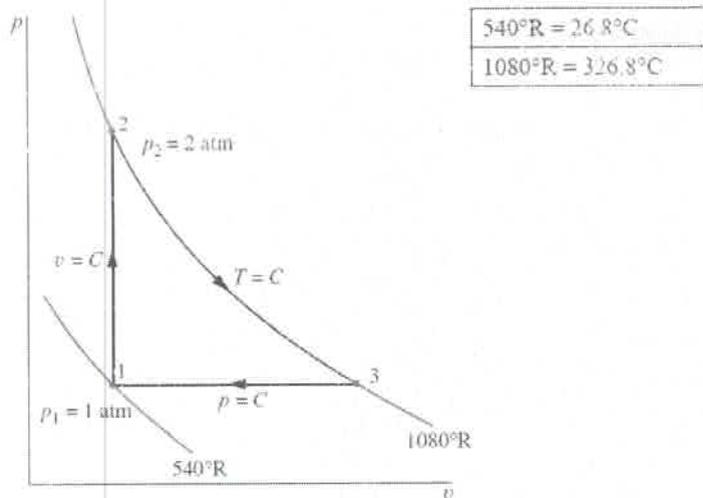


Fig. E3.8

**Análise:**

(a) O ciclo é ilustrado em coordenadas  $p-v$  na figura correspondente. Observe que como  $p = RT/v$  e a temperatura é constante, a variação de  $p$  com  $v$  para o processo de 2 para 3 é não linear.

(b) Utilizando  $pv = RT$ , a temperatura no estado 2 é

$$T_2 = p_2 v_2 / R$$

Para obter o volume específico  $v_2$  necessário nesta relação, note que  $v_2 = v_1$ , assim

$$v_2 = RT_1 / p_1$$

Combinando esses dois resultados, temos

$$T_2 = \frac{p_2}{p_1} T_1 = \left( \frac{2 \text{ atm}}{1 \text{ atm}} \right) (540^{\circ}\text{R}) = 1080^{\circ}\text{R}$$

(c) Uma vez que  $pv = RT$ , o volume específico no estado 3 é

$$v_3 = RT_3 / p_3$$

Observando que  $T_3 = T_2$ ,  $p_3 = p_1$  e  $R = R/M$

$$\begin{aligned}
 v_3 &= \frac{\overline{RT}_2}{Mp_1} \\
 &= \left( \frac{1545 \frac{\text{ft} \cdot \text{lbf}}{\text{lbmol} \cdot ^{\circ}\text{R}}}{28,97 \frac{\text{lb}}{\text{lbmol}}} \right) \frac{(1080^{\circ}\text{R})}{(14,7 \text{ lbf}/\text{in}^2)} \left| \frac{1 \text{ ft}^2}{144 \text{ in}^2} \right| \\
 &= 27,2 \text{ ft}^3/\text{lb}
 \end{aligned}$$

**Modelo de Engenharia:**

1. O ar constitui um sistema fechado.
2. O ar se comporta como um gás ideal.
3. O trabalho relacionado com o movimento do pistão é o único modo de trabalho presente.

em que o peso molecular do ar é obtido da Tabela A-1E.

- 1 A Tabela A-1E fornece  $p_c = 37,2$  atm,  $T_c = 239^\circ\text{R}$  para o ar. Então,  $p_{R2} = 0,054$ ,  $T_{R2} = 4,52$ . De acordo com a Fig. A-1, o valor do fator de compressibilidade para esse estado é  $Z \approx 1$ . A mesma conclusão resulta quando os estados 1 e 3 são verificados. Assim,  $p\nu = RT$  descreve de modo adequado a relação  $p$ - $\nu$ - $T$  do ar para esses estados.
- 2 Note cuidadosamente que a equação de estado  $p\nu = RT$  requer a utilização da temperatura *absoluta*  $T$  e da pressão *absoluta*  $p$ .

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- analisar dados  $p$ - $\nu$ - $T$  utilizando a equação de estado de gás ideal.
- esboçar processos em um diagrama  $p$ - $\nu$ .

### Teste-Relâmpago

O ciclo ilustrado na Fig. E3.8 é um ciclo de potência ou um ciclo de refrigeração? Explique. **Resposta:** Um ciclo de potência. O trabalho líquido é positivo, conforme representado pela área 1-2-3-1.

### 3.12.3 Interpretação Microscópica

Uma ideia da dependência da energia interna dos gases com respeito à temperatura para baixos valores de massa específica (valores elevados de volume específico) pode ser obtida a partir da discussão sobre as equações viriais: Eqs. 3.30 e 3.31. À medida que  $p \rightarrow 0$  ( $\nu \rightarrow \infty$ ), as forças de interação entre as moléculas de um gás se tornam mais fracas e as expansões viriais se aproximam, no limite, de  $Z = 1$ . O estudo de gases sob o ponto de vista microscópico mostra que a dependência da energia interna do gás em relação à pressão, ou volume específico, para uma dada temperatura aparece basicamente devido a interações moleculares. Consequentemente, à medida que a massa específica de um gás diminui (o volume específico aumenta) à temperatura constante, atinge-se uma situação em que os efeitos das forças intermoleculares se tornam mínimos. A energia interna é então determinada principalmente pela temperatura.

Do ponto de vista microscópico o modelo de gás ideal é constituído de várias idealizações: o gás é composto de moléculas que se encontram em movimento randômico e obedecem às leis da mecânica; o número total de moléculas é elevado, entretanto o volume de moléculas corresponde a uma fração desprezível do volume ocupado pelo gás; e não existem forças apreciáveis agindo nas moléculas, exceto durante colisões. Uma discussão adicional sobre o gás ideal com abordagem microscópica é apresentada na Seção 3.13.2.

## 3.13 Energia Interna, Entalpia e Calores Específicos de Gases Ideais

### 3.13.1 Relações $\Delta u$ , $\Delta h$ , $\Delta c_v$ e $c_p$

Para um gás que obedeça ao modelo de gás ideal, a energia interna específica depende somente da temperatura. Assim, o calor específico  $c_v$ , definido pela Eq. 3.8, é também uma função somente da temperatura. Isto é,

$$c_v(T) = \frac{du}{dT} \quad (\text{gás ideal}) \quad (3.38)$$

Essa expressão apresenta uma derivada ordinária, já que  $u$  depende apenas de  $T$ .

Separando variáveis na Eq. 3.38

$$du = c_v(T) dT \quad (3.39)$$

Através de integração, a variação da energia interna específica fica

$$u(T_2) - u(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT \quad (\text{gás ideal}) \quad (3.40)$$

De maneira similar, para um gás que se comporta de acordo com o modelo de gás ideal a entalpia específica depende apenas da temperatura, e então o calor específico  $c_p$ , definido pela Eq. 3.9, é também uma função exclusiva da temperatura. Isto é

$$c_p(T) = \frac{dh}{dT} \quad (\text{gás ideal}) \quad (3.41)$$

Separando variáveis na Eq. 3.41

$$dh = c_p(T) dT \quad (3.42)$$

Através de integração, a variação da entalpia específica fica

$$h(T_2) - h(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \quad (\text{gás ideal}) \quad (3.43)$$

Uma relação importante entre os calores específicos de um gás ideal pode ser desenvolvida pela diferenciação da Eq. 3.37 em relação à temperatura

$$\frac{dh}{dT} = \frac{du}{dT} + R$$

e, introduzindo as Eqs. 3.38 e 3.41, obtemos

$$c_p(T) = c_v(T) + R \quad (\text{gás ideal}) \quad (3.44)$$

Em base molar, essa relação pode ser escrita como

$$\bar{c}_p(T) = \bar{c}_v(T) + \bar{R} \quad (\text{gás ideal}) \quad (3.45)$$

Embora cada um dos dois calores específicos de um gás ideal seja função da temperatura, as Eqs. 3.44 e 3.45 mostram que esses calores específicos diferem somente por uma constante: a constante do gás. O conhecimento de qualquer um dos calores específicos de um gás particular permite que o outro seja calculado utilizando-se apenas a constante do gás. As equações citadas também mostram que  $c_p > c_v$  e  $\bar{c}_p > \bar{c}_v$ , respectivamente.

Para um gás ideal, a razão de calores específicos,  $k$ , é também uma função somente da temperatura

$$k = \frac{c_p(T)}{c_v(T)} \quad (\text{gás ideal}) \quad (3.46)$$

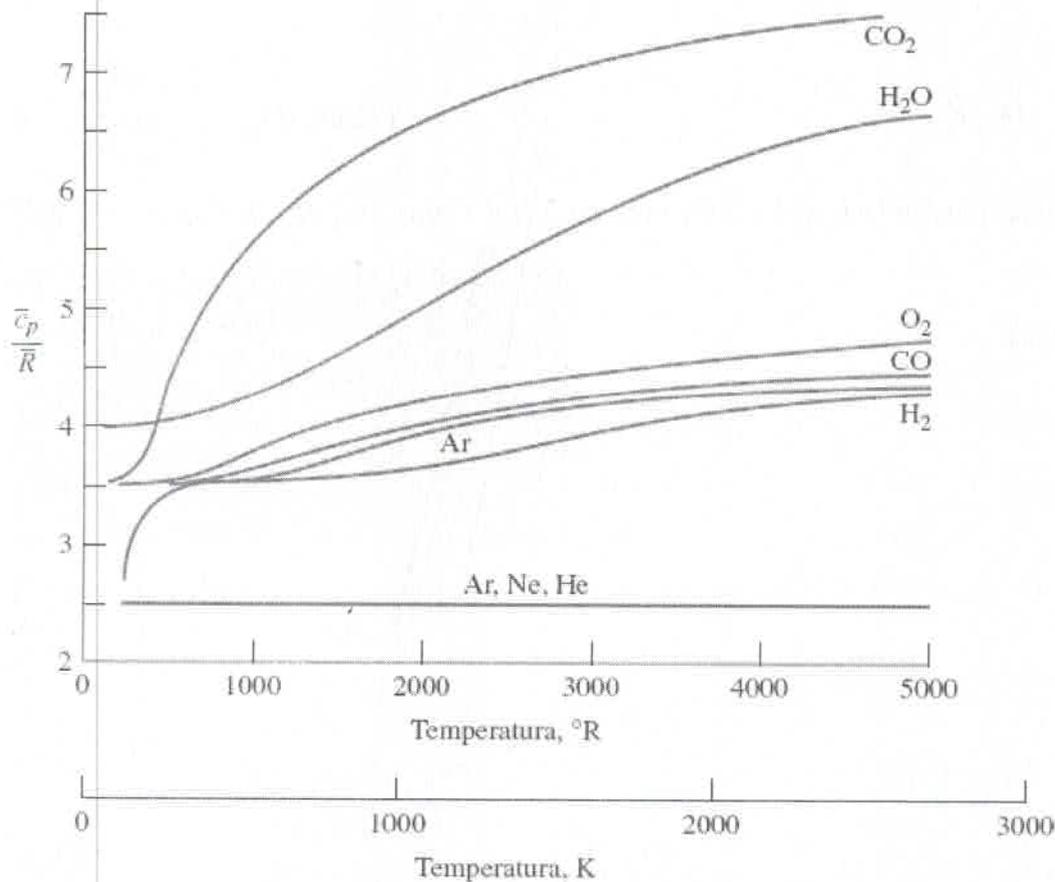
Uma vez que  $c_p > c_v$ , conclui-se que  $k > 1$ . A combinação das Eqs. 3.44 e 3.46 resulta em

$$c_p(T) = \frac{kR}{k-1} \quad (3.47a)$$

(gás ideal)

$$c_v(T) = \frac{R}{k-1} \quad (3.47b)$$

Expressões similares podem ser escritas para os calores específicos em uma base molar, com  $R$  sendo substituído por  $R$ .



**Fig. 3.13** Variação de  $c_p/R$  com a temperatura para alguns gases utilizando o modelo de gás ideal.

### 3.13.2 Utilizando Funções Relativas ao Calor Específico

As expressões precedentes requerem que os calores específicos dos gases ideais sejam funções da temperatura. Essas funções estão disponíveis para gases de interesse prático, em diversas formas, como gráficos, tabelas e equações. A Fig. 3.13 apresenta a variação de  $c_p$  (base molar) com a temperatura para alguns gases de uso comum. Para o intervalo de temperatura mostrado,  $c_p$  aumenta com a temperatura para todos os gases, com exceção dos gases

monoatômicos Ar, Ne e He. Para esses,  $c_p$  é constante e igual ao valor previsto pela teoria cinética dos gases:

$\bar{c}_p = \frac{5}{2}\bar{R}$  Dados tabelados de calores específicos para alguns gases selecionados são apresentados como função da temperatura nas Tabelas A-20. Calores específicos também estão disponíveis em forma de equação. Diversas formas alternativas dessas equações podem ser encontradas na literatura da engenharia. Uma equação que é de integração relativamente fácil é a de forma polinomial dada por

$$\frac{\bar{c}_p}{\bar{R}} = \alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \varepsilon T^4 \quad (3.48)$$

Valores das constantes  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$  e  $\varepsilon$  são listados na Tabela A-21 para vários gases considerando o intervalo de temperatura de 300 a 1000 K (540 a 1800°R).

► POR EXEMPLO para ilustrar o uso da Eq. 3.48, avaliemos a variação da entalpia específica, em kJ/kg, do ar, modelado como gás ideal, a partir de um estado em que  $T_1 = 400$  K a um estado no qual  $T_2 = 900$  K. Substituindo a expressão para  $c_p(T)$  dada pela Eq. 3.48 na Eq. 3.43 e integrando em relação à temperatura, temos

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= \frac{\bar{R}}{M} \int_{T_1}^{T_2} (\alpha + \beta T + \gamma T^2 + \delta T^3 + \varepsilon T^4) dT \\ &= \frac{\bar{R}}{M} \left[ \alpha(T_2 - T_1) + \frac{\beta}{2}(T_2^2 - T_1^2) + \frac{\gamma}{3}(T_2^3 - T_1^3) + \frac{\delta}{4}(T_2^4 - T_1^4) + \frac{\varepsilon}{5}(T_2^5 - T_1^5) \right] \end{aligned}$$

em que o peso molecular  $M$  foi utilizado de modo a obter o resultado em uma base mássica unitária. Com os valores das constantes da Tabela A-21

$$\begin{aligned} h_2 - h_1 &= \frac{8,314}{28,97} \left\{ 3,653(900 - 400) - \frac{1,337}{2(10)^3} [(900)^2 - (400)^2] \right. \\ &\quad + \frac{3,294}{3(10)^6} [(900)^3 - (400)^3] - \frac{1,913}{4(10)^9} [(900)^4 - (400)^4] \\ &\quad \left. + \frac{0,2763}{5(10)^{12}} [(900)^5 - (400)^5] \right\} = 531,69 \text{ kJ/kg} \end{aligned}$$

As funções dos calores específicos  $c_v(T)$  e  $c_p(T)$  também estão disponíveis no *IT: Interactive Thermodynamics*, no menu de Propriedades (**Properties**). Essas funções podem ser integradas utilizando a função integral do programa para calcular  $\Delta u$  e  $\Delta h$ , respectivamente.

► POR EXEMPLO Refaremos o exemplo anterior utilizando o *IT*. Para o ar, o código *IT* é

```
cp = cp_T ("Air", T)
```

```
delh = Integral(cp, T)
```

Pressionando o botão de Resolver (**Solve**) e variando  $T$  de 400 K a 900 K, a variação da entalpia específica é  $\Delta h = \text{delh} = 531,7$  kJ/kg, o que concorda de maneira precisa com o valor obtido através da integração da função do calor específico da Tabela A-21, conforme ilustrado antes.

A fonte de dados de calores específicos de gases ideais é experimental. Os calores específicos podem ser determinados macroscopicamente a partir de cuidadosas medidas de propriedades. No limite, à medida que a pressão

tende a zero as propriedades de um gás tendem a coincidir com as de seu modelo de gás ideal. Então, calores específicos determinados macroscopicamente de um gás quando extrapolados para baixas pressões podem ser chamados tanto de calores específicos à *pressão zero* quanto de calores específicos de *gás ideal*. Embora calores específicos à pressão zero possam ser obtidos pela extrapolação de dados experimentais macroscopicamente determinados, esse procedimento hoje em dia é raramente efetuado. Isso se deve ao fato de que os calores específicos de gases perfeitos podem ser calculados de imediato com expressões da mecânica estatística utilizando dados *espectrais*, que podem ser obtidos de modo experimental com precisão. A determinação de calores específicos de gases perfeitos é uma das importantes áreas em que a *abordagem microscópica* contribui significativamente para as aplicações da termodinâmica.

### 3.14 Aplicando o Balanço de Energia Utilizando Tabelas de Gás Ideal, Calores Específicos Constantes e Programas de Computador

Embora variações da entalpia específica e da energia interna específica possam ser determinadas pela integração das expressões de calores específicos, como já foi mostrado na Seção 3.13.2, esses cálculos são mais facilmente conduzidos utilizando-se as tabelas de gás ideal, a hipótese de calores específicos constantes e programas de computador, todos apresentados na presente seção. Esses procedimentos também são ilustrados nesta seção através de exemplos resolvidos a partir de um balanço de energia para um sistema fechado.

#### 3.14.1 Utilizando Tabelas de Gás Ideal

Para alguns gases comumente encontrados o cálculo das variações da energia interna e da entalpia específicas é facilitado pelo uso das *tabelas de gás ideal*, Tabelas A-22 e A-23, que fornecem  $u$  e  $h$  (ou  $u$  e  $h$ ) em função da temperatura.

Para obter entalpia em função da temperatura escrevemos a Eq. 3.43 como

$$h(T) = \int_{T_{\text{ref}}}^T c_p(T) dT + h(T_{\text{ref}})$$

em que  $T_{\text{ref}}$  corresponde a uma temperatura de referência arbitrária e  $h(T_{\text{ref}})$  a um valor arbitrário de entalpia para a temperatura de referência. As Tabelas A-22 e A-23 são baseadas na escolha de  $h = 0$  em  $T_{\text{ref}} = 0$  K. Dessa forma, a tabela de valores de entalpia em função da temperatura é desenvolvida através da integral<sup>2</sup>

$$h(T) = \int_0^T c_p(T) dT \quad (3.49)$$

Os valores tabelados de energia interna em função da temperatura são obtidos dos valores tabelados de entalpia através de  $u = h - RT$ .

Para o ar considerado como gás ideal  $h$  e  $u$  são dados pela Tabela A-22, com unidades de kJ/kg, e pela Tabela A-22E em unidades de Btu/lb. Valores de entalpia  $h$  e energia interna  $u$  específicas molares para diversos gases comumente encontrados, assumidos como gases ideais, são dados na Tabela A-23 em unidades de kJ/kmol ou Btu/lbmol. Outras propriedades, que não a energia interna e a entalpia específicas, presentes nessas tabelas são apresentadas no [Cap. 6](#) e devem ser ignoradas no momento. As Tabelas A-22 e A-23 são convenientes para cálculos envolvendo gases ideais não apenas pelo fato de a variação dos calores específicos com a temperatura ser considerada automaticamente, mas também porque as tabelas são de fácil utilização.

O próximo exemplo ilustra o uso das tabelas de gás ideal, juntamente com o balanço de energia para um sistema fechado.

▶ ▶ ▶ EXEMPLO 3.9 ▶

**Utilizando o Balanço de Energia e as Tabelas de Gás Ideal**

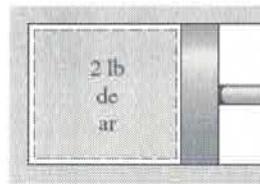
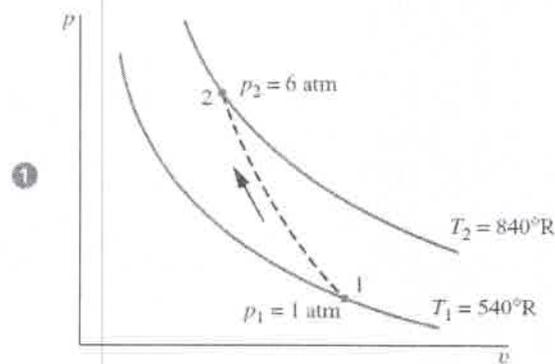
Um conjunto cilindro-pistão contém 2 lb (0,91 kg) de ar a uma temperatura de 540°R (26,8°C) e a uma pressão de 1 atm. O ar é comprimido até um estado no qual a temperatura é 840°R (193,5°C) e a pressão é 6 atm. Durante a compressão uma quantidade de calor igual a 20 Btu (21,1 kJ) é transferida do ar para a vizinhança. Utilizando o modelo de gás ideal para o ar, determine o trabalho realizado durante o processo, em Btu.

**SOLUÇÃO**

**Dado:** duas libras de ar são comprimidas entre dois estados especificados enquanto uma determinada quantidade de calor é transferida do ar.

**Pede-se:** determine o trabalho, em Btu.

**Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:**



**Modelo de Engenharia:**

1. O ar constitui um sistema fechado.
2. Os estados inicial e final são estados de equilíbrio. Não ocorrem variações da energia cinética ou potencial.
3. O ar se comporta como um gás ideal.
4. O trabalho relacionado com o movimento do pistão é o único modo de trabalho presente.

Fig. E3.9

**Análise:** um balanço de energia para o sistema fechado é

$$\Delta E_C^0 + \Delta E_P^0 + \Delta U = Q - W$$

em que os termos de energia cinética e potencial se anulam de acordo com a hipótese 2. Resolvendo para  $W$

$$W = Q - \Delta U = Q - m(u_2 - u_1)$$

A partir do enunciado do problema,  $Q = -20$  Btu. Além disso, da Tabela A-22E a  $T_1 = 540^\circ\text{R}$ ,  $u_1 = 92,04$  Btu/lb e a  $T_2 = 840^\circ\text{R}$ ,  $u_2 = 143,98$  Btu/lb. Desse modo

$$W = -20 \text{ Btu} - (2 \text{ lb})(143,98 - 92,04) \text{ Btu/lb} = -123,9 \text{ Btu}$$

O sinal negativo indica que o trabalho é realizado sobre o sistema nesse processo.

1 Embora os estados inicial e final sejam considerados como estados de equilíbrio, os estados intermediários não são necessariamente estados de equilíbrio, de maneira que o processo foi representado no diagrama  $p-v$  por uma linha tracejada. Essa linha tracejada não define uma “trajetória” para o processo.

2 A Tabela A-1E fornece  $p_c = 37,2$  atm,  $T_c = 239^\circ\text{R}$  para o ar. Desse modo, no estado 1  $p_{R1} = 0,03$ ,  $T_{R1} = 2,26$  e,

no estado 2,  $p_{R2} = 0,16$ ,  $T_{R2} = 3,51$ . Consultando a Fig. A-1 pode-se concluir que para esses estados  $Z \approx 1$ , como admitido para a solução.

3 Em princípio, o trabalho poderia ser calculado através de  $\int p dV$ , mas por se desconhecer a variação de pressão na face do pistão com o volume a integração não pode ser realizada sem mais informações.

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- aplicar o balanço de energia utilizando o modelo de gás ideal.

### Teste-Relâmpago

Substituindo o ar por dióxido de carbono, porém mantendo inalterados todos os outros dados do problema, calcule o trabalho, em Btu. **Resposta:**  $-125,1$  Btu.

### 3.14.2 Utilizando Calores Específicos Constantes

Quando calores específicos são tomados como constantes, as Eqs. 3.40 e 3.43 são reduzidas, respectivamente, a

$$u(T_2) - u(T_1) = c_v(T_2 - T_1) \quad (3.50)$$

$$h(T_2) - h(T_1) = c_p(T_2 - T_1) \quad (3.51)$$

As Eqs. 3.50 e 3.51 são geralmente utilizadas em análises termodinâmicas envolvendo gases ideais, uma vez que permitem o desenvolvimento de equações simples e fechadas para vários processos.

Os valores constantes de  $c_v$  e  $c_p$  nas Eqs. 3.50 e 3.51 são, estritamente falando, valores médios calculados como

$$c_v = \frac{\int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT}{T_2 - T_1}, \quad c_p = \frac{\int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT}{T_2 - T_1}$$

Entretanto, quando a variação de  $c_v$  ou  $c_p$  ao longo de um dado intervalo de temperatura não é significativa é pequeno o erro cometido ao se tomar o calor específico requerido pela Eq. 3.50 ou 3.51 como a média aritmética dos valores de calor específico avaliados nas temperaturas-limite. Alternativamente, o calor específico avaliado na temperatura média do intervalo pode ser utilizado. Esses métodos são particularmente convenientes quando dados tabelados de calor específico estão disponíveis, como nas Tabelas A-20, e, assim, o calor específico *constante* pode ser geralmente determinado por inspeção.

► POR EXEMPLO admitindo que o calor específico  $c_v$  é uma constante e utilizando a Eq. 3.50, a expressão para o trabalho na solução do Exemplo 3.9 é dada por

$$W = Q - mc_v(T_2 - T_1)$$

Determinando  $c_v$  na temperatura média,  $690^\circ\text{R}$  ( $230^\circ\text{F}$ ), a Tabela A-20E fornece  $c_v = 0,173$  Btu/lb  $\cdot$   $^\circ\text{R}$ . Inserindo

esse valor para  $c_v$  junto com outros dados do Exemplo 3.9, tem-se

$$W = -20 \text{ Btu} - (2 \text{ lb}) \left( 0,173 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}} \right) (840 - 540) ^\circ\text{R}$$

$$= -123,8 \text{ Btu}$$

o que está de acordo com a resposta obtida no Exemplo 3.9, utilizando os dados da Tabela A-22E. ◀◀◀◀◀

O exemplo a seguir ilustra a utilização de balanços de energia em sistemas fechados, em conjunto com o modelo de gás ideal e a hipótese de calores específicos constantes.

### ▶▶▶▶ EXEMPLO 3.10 ▶

#### Utilizando o Balanço de Energia e Calores Específicos Constantes

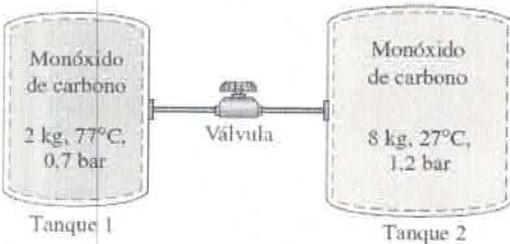
Dois tanques são conectados por uma válvula. Um tanque contém 2 kg de monóxido de carbono gasoso a 77°C e 0,7 bar. O outro tanque contém 8 kg do mesmo gás a 27°C e 1,2 bar. A válvula é aberta, permitindo a mistura dos gases enquanto energia sob a forma de calor é absorvida a partir da vizinhança. A temperatura final de equilíbrio é 42°C. Utilizando o modelo de gás ideal com  $c_v$  constante, determine (a) a pressão final de equilíbrio, em bar; (b) a quantidade de calor trocado durante o processo, em kJ.

#### SOLUÇÃO

**Dado:** dois tanques contendo diferentes quantidades de monóxido de carbono gasoso, inicialmente em diferentes estados, estão conectados por uma válvula. A válvula é aberta, permitindo a mistura do gás enquanto energia é absorvida por transferência de calor. A temperatura final de equilíbrio é conhecida.

**Pede-se:** determine a pressão final e a quantidade de calor transferida durante o processo.

#### Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:



#### Modelo de Engenharia:

1. A totalidade do monóxido de carbono gasoso constitui um sistema fechado.
2. O gás é modelado como um gás ideal com  $c_v$  constante.
3. O gás inicialmente em cada tanque está em equilíbrio. O estado final é um estado de equilíbrio.
4. Não ocorre transferência de energia para ou do gás por trabalho.
5. Não ocorrem variações da energia cinética ou potencial.

Fig. E3.10

#### Análise:

(a) A pressão final de equilíbrio  $p_f$  pode ser determinada a partir da equação de estado de gás ideal

$$p_f = \frac{mRT_f}{V}$$

em que  $m$  é a soma das quantidades iniciais presentes no interior dos dois tanques,  $V$  é o volume total dos dois tanques e  $T_f$  é a temperatura final de equilíbrio. Então

$$p_f = \frac{(m_1 + m_2)RT_f}{V_1 + V_2}$$

Representando a temperatura e a pressão iniciais do tanque 1 como  $T_1$  e  $p_1$ , respectivamente,  $V_1 = m_1RT_1/p_1$ . De modo similar, se a temperatura e a pressão iniciais no tanque 2 são representadas por  $T_2$  e  $p_2$ ,  $V_2 = m_2RT_2/p_2$ . Então, a pressão final é

$$p_f = \frac{(m_1 + m_2)RT_f}{\left(\frac{m_1RT_1}{p_1}\right) + \left(\frac{m_2RT_2}{p_2}\right)} = \frac{(m_1 + m_2)T_f}{\left(\frac{m_1T_1}{p_1}\right) + \left(\frac{m_2T_2}{p_2}\right)}$$

Substituindo os valores

$$p_f = \frac{(10 \text{ kg})(315 \text{ K})}{\frac{(2 \text{ kg})(350 \text{ K})}{0,7 \text{ bar}} + \frac{(8 \text{ kg})(300 \text{ K})}{1,2 \text{ bar}}} = 1,05 \text{ bar}$$

(b) A quantidade de calor trocado pode ser encontrada a partir do balanço de energia, que com as hipóteses 4 e 5 se reduz a

$$\Delta U = Q - W^0$$

ou

$$Q = U_f - U_i$$

$U_i$  é a energia interna inicial, dada por

$$U_i = m_1u(T_1) + m_2u(T_2)$$

em que  $T_1$  e  $T_2$  são as temperaturas iniciais do CO nos tanques 1 e 2, respectivamente. A energia interna final é  $U_f$

$$U_f = (m_1 + m_2)u(T_f)$$

Introduzindo essas expressões para a energia interna, o balanço de energia se torna

$$Q = m_1[u(T_f) - u(T_1)] + m_2[u(T_f) - u(T_2)]$$

Uma vez que o calor específico  $c_v$  é constante (hipótese 2)

$$Q = m_1c_v(T_f - T_1) + m_2c_v(T_f - T_2)$$

Avaliando  $c_v$  como a média dos valores listados na Tabela A-20 para 300 K e 350 K,  $c_v = 0,745 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ . Então

$$\begin{aligned} Q &= (2 \text{ kg})\left(0,745 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)(315 \text{ K} - 350 \text{ K}) + (8 \text{ kg})\left(0,745 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot \text{K}}\right)(315 \text{ K} - 300 \text{ K}) \\ &= +37,25 \text{ kJ} \end{aligned}$$

**Habilidades Desenvolvidas**

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- aplicar o balanço de energia utilizando o modelo de gás ideal quando o calor específico  $c_v$  for constante.

O sinal positivo indica que a transferência de calor ocorre para o sistema.

① Utilizando o diagrama de compressibilidade generalizada pode-se verificar que a equação de estado de gás ideal é apropriada para o CO nesse intervalo de temperatura e pressão. Como o calor específico  $c_v$  do CO varia pouco no intervalo de temperatura de 300 K a 350 K (Tabela A-20), ele pode ser tratado como constante com uma precisão aceitável.

### Teste-Relâmpago

Avalie  $Q$  utilizando valores de energia interna específica obtidos da Tabela A-23 para o CO. Compare com o resultado utilizando  $c_v$  constante. **Resposta:** 36,99 kJ.

### 3.14.3 Utilizando Programas de Computador

O *Interactive Thermodynamics: IT* também fornece valores de entalpia e de energia interna específicas para uma vasta gama de gases modelados como gases ideais. Consideremos o uso do *IT* inicialmente para o ar e, em seguida, para outros gases.

**AR.** Para o ar, o *IT* utiliza o mesmo estado e o mesmo valor de referência que a Tabela A-22, e os valores fornecidos pelo *IT* apresentam uma boa concordância com os dados tabelados.

► POR EXEMPLO consideremos o uso do *IT* para avaliar a variação da entalpia específica do ar de um estado em que  $T_1 = 400$  K para um estado em que  $T_2 = 900$  K. Selecionando Ar (*Air*) no menu de Propriedades (**Properties**), o código a seguir seria utilizado pelo *IT* para determinar  $\Delta h$  (delh), em kJ/kg

$$h_1 = h\_T(\text{"Air"}, T_1)$$

$$h_2 = h\_T(\text{"Air"}, T_2)$$

$$T_1 = 400//K$$

$$T_2 = 900//K$$

$$\text{delh} = h_2 - h_1$$

Escolhendo-se K como unidade de temperatura e kg para a massa no menu de Unidades (**Units**), os resultados fornecidos pelo *IT* são  $h_1 = 400,8$ ,  $h_2 = 932,5$  e  $\Delta h = 531,7$  kJ/kg, respectivamente. Esses valores apresentam uma boa concordância com os obtidos pela Tabela A-22:  $h_1 = 400,98$ ,  $h_2 = 932,93$  e  $\Delta h = 531,95$  kJ/kg. ◀◀◀◀◀

**OUTROS GASES.** O *IT* também fornece valores para cada um dos gases presentes na Tabela A-23. Para esses gases os valores de energia interna  $u$  e  $h$  entalpia específicas fornecidos pelo *IT* são determinados em relação a um estado de referência-padrão que difere do empregado na Tabela A-23. Isso habilita o *IT* para o uso em aplicações envolvendo combustão; veja a Seção 13.2.1 para uma discussão adicional. Em consequência, os valores de  $u$  e  $h$  fornecidos pelo *IT* para os gases da Tabela A-23 são diferentes dos obtidos diretamente da tabela. Entretanto, a variação de propriedades entre dois estados permanece a mesma, uma vez que os valores de referência se cancelam

quando a variação é calculada.

► POR EXEMPLO utilizemos o *IT* para avaliar a variação da entalpia específica, em kJ/kmol, para o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) considerado como gás ideal de um estado em que  $T_1 = 300$  K para um estado em que  $T_2 = 500$  K. Selecionando CO<sub>2</sub> no menu de Propriedades (**Properties**), o código a seguir seria empregado pelo *IT* :

$$h_1 = h\_T(\text{"CO2"}, T_1)$$

$$h_2 = h\_T(\text{"CO2"}, T_2)$$

$$T_1 = 300//K$$

$$T_2 = 500//K$$

$$\Delta h = h_2 - h_1$$

Escolhendo-se K como unidade de temperatura e mol no menu de Unidades (**Units**), os resultados fornecidos pelo *IT* são  $h_1 = 3,935 \times 10^5$ ,  $h_2 = 3,852 \times 10^5$  e  $\Delta h = 8238$  kJ/mol, respectivamente. Os elevados valores negativos para  $h_1$  e  $h_2$  são consequência dos estados e valores de referência utilizados pelo *IT* para o CO<sub>2</sub>. Embora esses valores de entalpia específica nos estados 1 e 2 sejam diferentes dos valores correspondentes que constam na Tabela A-23:  $h_1 = 9431$  e  $h_2 = 17.678$ , que fornece  $\Delta h = 8247$  kJ/kmol, a *variação* da entalpia específica avaliada a partir de ambos os conjuntos de dados apresenta uma boa concordância. ◀◀◀◀◀

O exemplo a seguir ilustra o uso de programas de computador para a resolução de problemas utilizando o modelo de gás ideal. Os resultados obtidos são comparados com outros, determinados a partir da hipótese de que o calor específico  $c_v$  é constante.

### ► ► ► EXEMPLO 3.11 ►

#### Utilizando o Balanço de Energia e Código Computacional

Um kmol de dióxido de carbono gasoso (CO<sub>2</sub>) contido em um conjunto cilindro-pistão é submetido a um processo a pressão constante de 1 bar a partir de  $T_1 = 300$  K a  $T_2$ . Represente graficamente a transferência de calor para o gás, em kJ, em função de  $T_2$  quando este varia de 300 K a 1500 K. Admita o modelo de gás ideal e determine a variação da energia interna específica do gás utilizando

(a)  $u$  obtido a partir do *IT*.

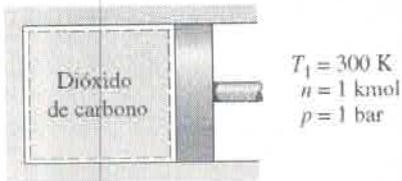
(b)  $c_v$  constante avaliado em  $T_1$  obtido a partir do *IT*.

#### SOLUÇÃO

**Dado:** um kmol de CO<sub>2</sub> é submetido a um processo a pressão constante em um conjunto cilindro-pistão. A temperatura inicial,  $T_1$ , e a pressão são conhecidas.

**Pede-se:** represente graficamente a quantidade de calor trocado como função da temperatura final,  $T_2$ . Utilize o modelo de gás ideal e avalie utilizando (a) dados de  $u$  a partir do *IT*, (b) constante avaliado a  $T_1$  obtido a partir do *IT*.

**Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:**



### Modelo de Engenharia:

1. O dióxido de carbono constitui um sistema fechado.
2. O trabalho relacionado com o movimento do pistão é o único modo de trabalho presente e o processo ocorre a pressão constante.
3. O dióxido de carbono se comporta como um gás ideal.
4. Os efeitos das energias cinética ou potencial são desprezíveis.

Fig. E3.11a

**Análise:** o calor trocado é calculado utilizando o balanço de energia para um sistema fechado, que se reduz a

$$U_2 - U_1 = Q - W$$

Utilizando a Eq. 2.17 para pressão constante (hipótese 2)

$$W = p(V_2 - V_1) = pn(\bar{v}_2 - \bar{v}_1)$$

Então, com  $\Delta U = n(u_2 - u_1)$ , o balanço de energia se torna

$$n(\bar{u}_2 - \bar{u}_1) = Q - pn(\bar{v}_2 - \bar{v}_1)$$

Resolvendo para Q

①

$$Q = n[(\bar{u}_2 - \bar{u}_1) + p(\bar{v}_2 - \bar{v}_1)]$$

Com  $p\bar{v} = RT$ , obtém-se

$$Q = n[(\bar{u}_2 - \bar{u}_1) + \bar{R}(T_2 - T_1)]$$

O objetivo é o de representar graficamente Q em função de  $T_2$  para cada um dos seguintes casos: **(a)** valores de  $u_1$  e  $u_2$  a  $T_1$  e  $T_2$ , respectivamente, como fornecido pelo IT, **(b)** Eq. 3.50 utilizada em uma base molar, na forma

$$\bar{u}_2 - \bar{u}_1 = \bar{c}_v(T_2 - T_1)$$

em que o valor de  $c_v$  é calculado a  $T_1$  utilizando o IT.

O código IT é apresentado a seguir, em que Rbar representa R, cvb representa  $c_v$  e ubar1 e ubar2 representam  $u_1$  e  $u_2$ , respectivamente.

```
//Using the Units menu, select "mole" for the substance amount.
```

```
//Given Data
```

```
T1 = 300//K
```

```
T2 = 1500//K
```

```
n = 1//kmol
```

```
Rbar = 8.314//kJ/kmol · K
```

```
//(a) Obtain molar specific internal energy data using IT.
```

```
ubar1 = u_T("CO2", T1)
```

$$u_{bar1} = u_T("CO_2", T_2)$$

$$Q_a = n*(u_{bar2} - u_{bar1}) + n*R_{bar}*(T_2 - T_1)$$

//(b) Use Eq. 3.50 with  $c_v$  evaluated at  $T_1$ .

$$c_{vb} = c_{v_T}("CO_2", T_1)$$

$$Q_b = n*c_{vb}*(T_2 - T_1) + n*R_{bar}*(T_2 - T_1)$$

Utilize o botão de Resolver (**Solve**) para obter a solução para o caso-exemplo de  $T_2 = 1500$  K. Para o item (a), o programa fornece  $Q_a = 6,163 \cdot 10^4$  kJ. A solução pode ser verificada utilizando os dados para  $CO_2$  da Tabela A-23, como se segue:

$$\begin{aligned} Q_a &= n[(\bar{u}_2 - \bar{u}_1) + \bar{R}(T_2 - T_1)] \\ &= (1 \text{ kmol})[(58.606 - 6939) \text{ kJ/kmol} + (8,314 \text{ kJ/kmol} \cdot \text{K})(1500 - 300) \text{ K}] \\ &= 61.644 \text{ kJ} \end{aligned}$$

Então, o resultado obtido utilizando os dados para  $CO_2$  da Tabela A-23 apresenta boa concordância com a solução obtida utilizando o código computacional para o caso-exemplo. Para o item (b), o *IT* fornece  $c_v = 28,95$  kJ/kmol  $\cdot$  K a  $T_1$ , fornecendo  $Q_b = 4,4723 \cdot 10^4$  kJ quando  $T_2 = 1500$  K. Esse valor está de acordo com o resultado obtido utilizando o calor específico  $c_v$  a 300 K da Tabela A-20, como pode ser verificado.

Uma vez que o código computacional tenha sido verificado, utilize o botão de Exploração (**Explore**) para fazer variar  $T_2$  de 300 K a 1500 K em intervalos de 10. Construa o gráfico a seguir utilizando o botão de Exibir (**Graph**):

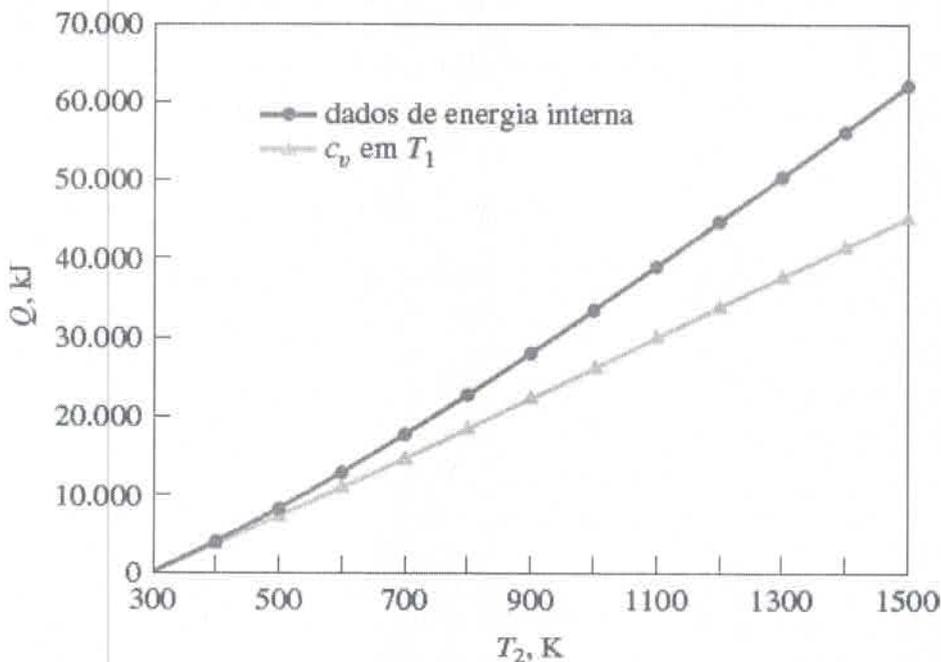


Fig. E3.11b

Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- definir um sistema fechado e identificar as interações que ocorrem em sua fronteira.
- aplicar o balanço de energia utilizando o modelo de gás ideal.
- utilizar o IT ou um programa similar para obter dados de propriedades do CO<sub>2</sub> considerado como um gás ideal e representar graficamente os resultados obtidos.

Como esperado, observa-se que a transferência de calor cresce à medida que a temperatura final aumenta. A partir dos gráficos observamos também que a utilização de valores constantes de  $c_v$  avaliados a  $T_1$  para cálculo de  $\Delta \bar{u}$  e, em consequência, de  $Q$  pode conduzir a um erro considerável quando comparado com a utilização de dados de  $\bar{u}$ . A comparação das duas soluções é favorável até aproximadamente 500 K, mas elas apresentam uma diferença de 27% quando o aquecimento leva a temperaturas de 1500 K.

1 Alternativamente, essa expressão para  $Q$  pode ser escrita como

$$Q = n[(\bar{u}_2 + p\bar{v}_2) - (\bar{u}_1 + p\bar{v}_1)]$$

Utilizando  $h = \bar{u} + p\bar{v}$ , a expressão para  $Q$  se torna

$$Q = n(h_2 - h_1)$$

### Teste-Relâmpago

Repita o item (b) utilizando  $c_v$  avaliado em  $T_{\text{méd}} = (T_1 + T_2)/2$ . Que abordagem concorda melhor com os resultados do item (a): a análise com  $c_v$  a  $T_1$  ou a  $T_{\text{méd}}$ ? **Resposta:** A análise com a  $T_{\text{méd}}$ .

## 3.15 Relações de Processos Politrópicos

Um *processo politrópico* é um processo de quase equilíbrio (Seção 2.2.5) descrito por

$$pV^n = \text{constante} \quad (3.52)$$

ou, em termos de volume específico, por  $pv^n = \text{constante}$ . Nessas expressões  $n$  é uma constante.

Para um processo politrópico entre dois estados

$$p_1 V_1^n = p_2 V_2^n$$

ou

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^n \quad (3.53)$$

O expoente  $n$  pode assumir qualquer valor de  $-\infty$  a  $+\infty$ , dependendo do processo particular. Quando  $n = 0$ , o processo é denominado isobárico (pressão constante), e quando  $n = \pm\infty$ , o processo é denominado isométrico (volume constante).

Para um processo politrópico

$$\int_1^2 p \, dV = \frac{p_2 V_2 - p_1 V_1}{1 - n} \quad (n \neq 1) \quad (3.54)$$

para qualquer valor do expoente  $n$  com exceção de  $n = 1$ . Para  $n = 1$ ,

$$\int_1^2 p \, dV = p_1 V_1 \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (n = 1) \quad (3.55)$$

O Exemplo 2.1 fornece detalhes dessas integrações.

As Eqs. 3.52 a 3.55 se aplicam a *qualquer* gás (ou líquido) que sofre um processo politrópico. Quando a idealização *adicional* de comportamento de gás ideal é apropriada outras relações podem ser obtidas. Assim, quando a equação de estado de gás ideal é introduzida nas Eqs. 3.53, 3.54 e 3.55 as expressões a seguir são, respectivamente, obtidas:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{p_2}{p_1}\right)^{(n-1)/n} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^{n-1} \quad (\text{gás ideal}) \quad (3.56)$$

$$\int_1^2 p \, dV = \frac{mR(T_2 - T_1)}{1 - n} \quad (\text{gás ideal, } n \neq 1) \quad (3.57)$$

$$\int_1^2 p \, dV = mRT \ln \frac{V_2}{V_1} \quad (\text{gás ideal, } n = 1) \quad (3.58)$$

Para um gás ideal o caso de  $n = 1$  corresponde a um processo isotérmico (temperatura constante), como pode ser prontamente verificado.

O Exemplo 3.12 ilustra o uso de balanço de energia para um sistema fechado que consiste em um gás ideal que é submetido a um processo politrópico.

### ► ► ► EXEMPLO 3.12 ►

Analisando Processos Politrópicos do Ar Considerado como um Gás Ideal

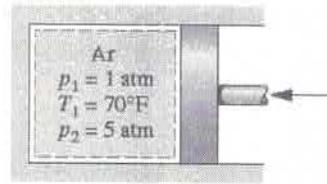
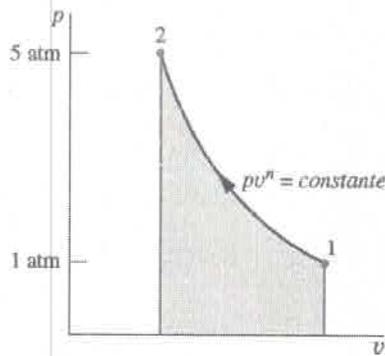
Ar é submetido a uma compressão politrópica em um conjunto cilindro-pistão de  $p_1 = 1 \text{ atm}$ ,  $T_1 = 70^\circ\text{F}$  ( $21,1^\circ\text{C}$ ) até  $p_2 = 5 \text{ atm}$ . Empregando o modelo de gás ideal com a razão  $k$  de calores específicos constante, determine o trabalho e o calor transferido por unidade de massa, em Btu/lb, se (a)  $n = 1,3$ , (b)  $n = k$ . Calcule  $k$  a  $T_1$ .

### SOLUÇÃO

**Dado:** ar é submetido a um processo de compressão politrópica a partir de um estado inicial dado até uma pressão final especificada.

**Pede-se:** determine o trabalho e a quantidade de calor transferido, ambos em Btu/lb.

**Diagrama Esquemático e Dados Fornecidos:**



#### Modelo de Engenharia:

1. O ar é um sistema fechado.
2. O ar se comporta como um gás ideal com a razão  $k$  de calores específicos constante calculada na temperatura inicial.
3. A compressão é politrópica e o trabalho relacionado com o movimento do pistão é o único modo de trabalho presente.
4. Não há variações da energia cinética ou potencial.

Fig. E3.12

**Análise:** o trabalho pode ser calculado para esse caso a partir da expressão

$$W = \int_1^2 p dV$$

Com a Eq. 3.57

$$\frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - n} \quad (a)$$

O calor trocado pode ser calculado do balanço de energia. Assim

$$\frac{Q}{m} = \frac{W}{m} + (u_2 - u_1)$$

Verificando a Eq. 3.47b, observa-se que quando a razão  $k$  de calores específicos é constante  $c_v$  é constante. Então

$$\frac{Q}{m} = \frac{W}{m} + c_v(T_2 - T_1) \quad (b)$$

(a) Para  $n = 1,3$ , a temperatura no estado final,  $T_2$ , pode ser avaliada da Eq. 3.56 como a seguir

$$T_2 = T_1 \left( \frac{p_2}{p_1} \right)^{(n-1)/n} = 530^\circ\text{R} \left( \frac{5}{1} \right)^{(1,3-1)/1,3} = 768^\circ\text{R} (308^\circ\text{F})$$

Utilizando a Eq. (a), o trabalho é então

$$\frac{W}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - n} = \left( \frac{1,986 \text{ Btu}}{28,97 \text{ lb} \cdot ^\circ\text{R}} \right) \left( \frac{768^\circ\text{R} - 530^\circ\text{R}}{1 - 1,3} \right) = -54,39 \text{ Btu/lb}$$

A  $70^\circ\text{F}$  a Tabela A-20E fornece  $k = 1,401$  e  $c_v = 0,171 \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{R}$ . Alternativamente,  $c_v$  pode ser obtido usando a Eq. 3.47b, como a seguir:

$$c_v = \frac{R}{k - 1} = \frac{(1,986/28,97) \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{R}}{(1,401 - 1)} = 0,171 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}} \quad (\text{c})$$

Substituindo os valores na Eq. (b), obtemos

$$\begin{aligned} \frac{Q}{m} &= -54,39 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} + \left( 0,171 \frac{\text{Btu}}{\text{lb} \cdot ^\circ\text{R}} \right) (768^\circ\text{R} - 530^\circ\text{R}) \\ &= -13,69 \frac{\text{Btu}}{\text{lb}} \end{aligned}$$

(b) Para  $n = k$ , substituindo as Eqs. (a) e (c) na Eq. (b), obtém-se

$$\frac{Q}{m} = \frac{R(T_2 - T_1)}{1 - k} + \frac{R(T_2 - T_1)}{k - 1} = 0$$

Isto é, não há transferência de calor no processo politrópico de um gás ideal para o qual  $n = k$ .

### Habilidades Desenvolvidas

Habilidades para...

- analisar o trabalho utilizando a Eq. 2.17.
- aplicar o balanço de energia utilizando o modelo de gás ideal.
- aplicar o conceito de processo politrópico.
- ① Os estados visitados durante o processo de compressão politrópica são mostrados pela curva que acompanha o diagrama  $p$ - $v$ . A magnitude do trabalho por unidade de massa é representada pela área sombreada *sob* a curva.

### Teste-Relâmpago

Para  $n = k$ , calcule a temperatura no final do estado, em  $^\circ\text{R}$  e  $^\circ\text{F}$ . **Resposta:**  $840^\circ\text{R}$  ( $380^\circ\text{F}$ ).

### ► RESUMO DO CAPÍTULO E GUIA DE ESTUDOS

Neste capítulo consideramos as relações de propriedades de uma vasta gama de substâncias em formas de tabela, gráfico e de equação. Foi principalmente enfatizada a utilização de dados tabelados. No entanto, a obtenção de dados de propriedades por computador também foi considerada.

Um aspecto-chave da análise termodinâmica é o de estabelecer estados. Isso é regulado pelo princípio dos estados para sistemas simples compressíveis compostos de substâncias puras, que indica que o estado é determinado pelo valor de *duas* propriedades intensivas independentes.

Outro aspecto importante da análise termodinâmica é o de localizar os principais estados de processos em diagramas

apropriados:  $p-v$ ,  $T-v$  e  $p-T$ . A capacidade de determinar estados e utilizar diagramas de propriedades é particularmente importante na resolução de problemas envolvendo o balanço de energia.

O modelo de gás ideal é apresentado na segunda parte do presente capítulo, utilizando o fator de compressibilidade como ponto de partida. Essa abordagem enfatiza as limitações do modelo de gás ideal. Quando a utilização do modelo de gás ideal é apropriada é salientado que os calores específicos geralmente variam com a temperatura, e a utilização das tabelas de gás ideal é discutida para a resolução de problemas.

Os itens a seguir fornecem um guia de estudo para este capítulo. Ao término do estudo do texto e dos exercícios dispostos no final do capítulo você estará apto a

- ▶ descrever o significado dos termos dispostos em negrito ao longo do capítulo e entender cada um dos conceitos relacionados. O conjunto de conceitos fundamentais listados mais adiante é particularmente importante para os capítulos subsequentes.
  - ▶ obter dados de propriedades a partir das Tabelas A-1 a A-23, utilizando o princípio dos estados para determinar um estado e interpolação linear quando necessário.
  - ▶ esboçar os diagramas  $T-v$ ,  $p-v$  e  $p-T$  e localizar os estados principais nesses diagramas.
  - ▶ aplicar, com dados de propriedades, o balanço de energia para um sistema fechado.
  - ▶ avaliar as propriedades de misturas bifásicas líquido-vapor utilizando as Eqs. 3.1, 3.2, 3.6 e 3.7.
  - ▶ estimar as propriedades de líquidos utilizando as Eqs. 3.11-3.14.
  - ▶ aplicar o modelo de substância incompressível.
  - ▶ utilizar o diagrama de compressibilidade generalizada para relacionar dados  $p-v-T$  de gases.
  - ▶ aplicar o modelo de gás ideal para análise termodinâmica, incluindo a determinação de quando a utilização do modelo de gás ideal é apropriada, e utilizar corretamente os dados das tabelas de gás ideal ou os dados de calores específicos constantes para determinar  $\Delta\bar{u}$  e  $\Delta h$ .
  - ▶ aplicar relações de processos politrópicos.
- ▶ **CONCEITOS FUNDAMENTAIS NA ENGENHARIA**

**calores específicos**

**constante universal dos gases**

**diagrama de fases**

**diagrama  $p-v$**

**diagrama  $T-v$**

**entalpia**

**fase**

**fator de compressibilidade**

**líquido comprimido**

mistura bifásica líquido-vapor

modelo de gás ideal

modelo de substância incompressível

pressão de saturação

princípio dos estados equivalentes

sistema compressível simples

substância pura

superfície  $p$ - $v$ - $T$

temperatura de saturação

título

vapor superaquecido

► EQUAÇÕES PRINCIPAIS

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}} \quad (3.1)$$

Título,  $x$ , de uma mistura bifásica líquido-vapor.

$$v = (1 - x)v_f + xv_g = v_f + x(v_g - v_f) \quad (3.2)$$

$$u = (1 - x)u_f + xu_g = u_f + x(u_g - u_f) \quad (3.6)$$

Volume específico, energia interna e entalpia de uma mistura bifásica líquido-vapor.

$$u = (1 - x)u_f + xu_g = u_f + x(u_g - u_f) \quad (3.7)$$

$$v(T,p) \approx v_f(T) \quad (3.11)$$

$$u(T,p) \approx u_f(T) \quad (3.12)$$

Volume específico, energia interna e entalpia de líquidos aproximados por valores para líquido saturado.

$$h(T,p) \approx h_f(T) \quad (3.14)$$

Relações para o Modelo de Gás Ideal

$$pv = RT \quad (3.32)$$

$$u = u(T) \quad (3.36) \quad \text{Modelo de gás Ideal.}$$

$$h = h(T) = u(T) + RT \quad (3.37)$$

$$u(T_2) - u(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT \quad (3.40) \quad \text{Variação da energia interna específica.}$$

$$u(T_2) - u(T_1) = c_v (T_2 - T_1) \quad (3.50) \quad \text{Para } c_v \text{ constante.}$$

$$h(T_2) - h(T_1) = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT \quad (3.43) \quad \text{Variação da entalpia específica.}$$

$$h(T_2) - h(T_1) = c_p (T_2 - T_1) \quad (3.51) \quad \text{Para } c_p \text{ constante.}$$

### ► EXERCÍCIOS: PONTOS DE REFLEXÃO PARA OS ENGENHEIROS

1. Por que a pipoca *estoura*?
2. Um jarro plástico de leite quando cheio de água e colocado em um congelador sofre uma ruptura. Por quê?
3. Você percebe que um bloco de gelo seco parece desaparecer com o tempo. O que acontece com ele? Por que ele não funde?
4. O que é a composição *padrão* do ar atmosférico?
5. Qual é o preço da água da torneira, por litro, onde você mora e como isso se compara ao preço médio da água da torneira no seu país?
6. Quando a Tabela A-5 deve ser usada para obter os valores de  $y$ ,  $\bar{u}$  e  $h$  para água líquida? Quando as Eqs. 3.11 a 3.14 devem ser usadas?
7. Depois de permanecer sem cobertura durante a noite, as janelas do seu carro amanhecem cobertas de geada, mesmo que a temperatura mínima no período seja 41°F (5°F). Por que o gelo se forma?
8. Como uma panela de pressão funciona para cozinhar alimentos mais rapidamente que um recipiente comum?
9. Na tampa do radiador de um automóvel está indicado: "Nunca abra quando quente." Por que não?
10. Por que os pneus de aviões e de carros de corrida são inflados com nitrogênio em vez de ar?
11. O volume específico e a energia interna específica definem o estado de um sistema compressível simples? Caso definam, como você pode usar as *tabelas de vapor* para encontrar H<sub>2</sub>O?

12. O que é um *sal fundido*?

13. Quantos minutos você deve se exercitar para *queimar* as calorias da sua sobremesa favorita?

► VERIFICAÇÃO DE APRENDIZADO

1. O título de uma mistura líquido-vapor contendo somente água a 40°C com uma massa específica de 10 m<sup>3</sup>/kg é

a) 0

b) 0,486

c) 0,512

d) 1

2. O título de uma mistura líquido-vapor contendo somente propano a 20 bar com energia interna de 300 kJ/kg é

a) 0,166

b) 0,214

c) 0,575

d) 0,627

3. O título de uma mistura líquido-vapor do gás refrigerante 134a a 90 lbf/in<sup>2</sup> com entalpia específica de 90 Btu/lb é

a) 0,387

b) 0,718

c) 0,575

d) 0,627

4. O título de uma mistura líquido-vapor contendo somente amônia a -20°F com volume específico de 11 ft<sup>3</sup>/lb é

a) 0

b) 0,251

c) 0,537

d) 0,749

5. Um sistema contém uma mistura líquido-vapor em equilíbrio. O que significa dizer que a pressão e a temperatura não podem variar independentemente neste sistema?

6. Uma substância uniforme e invariável em sua composição química é uma substância \_\_\_\_\_.

7. Dois exemplos de mudanças de fase são \_\_\_\_\_ e \_\_\_\_\_.

8. A seguinte expressão para o trabalho em um processo politrópico é restrita a gases ideais? Explique.

$$W = \frac{(p_2V_2 - p_1V_1)}{1-n}$$

9. Se uma substância é submetida a um processo de expansão sob pressão constante a uma pressão maior que sua pressão crítica, pode ocorrer uma mudança de fase? Em caso afirmativo, quais fases estariam envolvidas?
10. Demonstre que a entalpia específica de um gás ideal é função somente da temperatura.
11. A razão térmica específica,  $k$ , pode ser maior que a unidade. Explique.
12. Estime o valor da capacidade calorífica  $c_p$  usando dados da Tabela A-4 e compare com o valor mostrado na Fig. 3.9.
13. Em geral,  $u = u(T, v)$  para uma substância simples compressível. Podem ser usados valores de  $T$  e  $v$  para encontrar estados na tabela de vapor superaquecido?
14. Dadas a temperatura e o volume específico de uma mistura líquido-vapor, como pode ser determinada sua energia interna específica?
15. A energia de sistemas compressíveis simples pode ser alterada por transferência de calor e por trabalho associados a \_\_\_\_\_.
16. O que é o *Princípio dos Estados Correspondentes* para sistemas simples?
17. O título de um vapor saturado é \_\_\_\_\_.
18. O título de um líquido saturado é \_\_\_\_\_.
19. O termo \_\_\_\_\_ se refere à quantidade de matéria que é homogênea volumetricamente tanto em composição quanto em estrutura física.
20. Indique no diagrama  $T$ - $v$  a seguir: líquido saturado, vapor saturado, ponto crítico, região de vapor superaquecido, região de líquido comprimido, linha isobárica.



21. Um sistema consiste em uma mistura líquido-vapor de 5 kg do gás Refrigerante 134a. 1 kg encontra-se na forma de líquido saturado. Qual é o título da mistura?
22. O estado de vapor superaquecido pode ser determinado fixando-se  $p$  e  $u$ ?
23. Para um sistema contendo água a 10 bar e 220°C, qual tabela deve ser utilizada para encontrar  $v$  e  $u$ ?

24. O que é o *Princípio dos Estados Correspondentes*?

25. Para um sistema formado por água a 20°C e 100 bar, determine o erro percentual na aproximação à Eq. 3.11:  $u(T, p) \approx u_f(T)$ .

26. Para um sistema formado por água a 70°F e 14,7 lbf/in<sup>2</sup>, compare o valor de  $h_f(T)$  com aquele obtido pela Eq. 3.13.

27. Liste três características que definem o modelo de gás ideal.

28. Uma forma generalizada para a equação de estado dos gases que pode ser obtida a partir de fundamentos da mecânica estatística é a \_\_\_\_\_.

29. Se um sistema é submetido a um processo politrópico, este sistema deve ser um gás ideal? Explique.

30. Por que um líquido subresfriado é chamado, alternativamente, de líquido comprimido?

31. Os dados nas tabelas de pressão e temperatura para misturas líquido-vapor são compatíveis?

32. Por que as tabelas A-6 e A-6E não incluem dados de líquido saturado?

33. O volume específico de água saturada a 0,01°C é  $v_f = 1,0002 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Para o sólido saturado a 0,01°C, o valor do volume específico é  $v_i = 1,0908 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Por que  $v_i > v_f$ ?

**Nos itens a seguir, determine se as afirmações são falsas ou verdadeiras e explique.**

34. Para um gás tratado como ideal,  $c_v = c_p + R$ , em que  $R$  é a constante dos gases para o gás.

35. O ar pode sempre ser tratado como uma substância pura.

36. O ar atmosférico é normalmente tratado como um gás ideal.

37. Para água líquida, a aproximação  $y(T, p) \approx u_f(T)$  é razoável para muitas aplicações em engenharia.

38. Se vapor de água superaquecido a 30 MPa é resfriado sob pressão constante, ele vai eventualmente passar para uma fase de vapor saturado e, com resfriamento suficiente, a condensação até uma fase de líquido saturado vai ocorrer.

39. Um processo politrópico com  $n = k$  é adiabático.

40. Para sistemas simples compressíveis, quaisquer duas propriedades intensivas podem ser utilizadas para fixar o estado termodinâmico.

41. A energia interna específica da amônia a 0,45 MPa e 50°C é 1564,32 kJ/kg.

42. Para gases tratados como ideais, a razão  $c_v/c_p$  deve ser maior que a unidade.

43. À medida que a pressão aumenta no sentido da pressão crítica, os valores de  $v_f$  e  $v_g$  se aproximam.

44. Uma mistura líquido-vapor com volumes iguais de líquido saturado e vapor saturado tem título 0,5.

45. As seguintes aproximações se aplicam a uma *substância incompressível*: O volume específico (e a densidade) é constante e a energia interna específica é uma função somente da temperatura.

46. Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a 320 K e 55 bar pode ser modelado como um gás ideal.
47. Quando um gás ideal é submetido a um processo politrópico com  $n = 1$ , a temperatura do gás permanece constante.
48. As pressões listadas nas tabelas termodinâmicas são pressões absolutas, e não manométricas.
49. Se um sistema fechado consistindo de uma substância simples compressível encontra-se em equilíbrio, apenas uma fase pode estar presente.
50. Uma mistura líquido-vapor é formada por 0,2 kg de vapor de água saturado e 0,6 kg de líquido saturado. O título é 0,25 (25%).
51. As propriedades *velocidade* e *elevação (altura)* não estão incluídas na especificação de um estado termodinâmico intensivo.
52. Um gás pode ser tratado como ideal com capacidades caloríficas constantes se  $Z \approx 1$ .

### ► PROBLEMAS: DESENVOLVENDO HABILIDADES PARA ENGENHARIA

#### Explorando Conceitos: Fase e Substância Pura

- 3.1 Um sistema é composto por água líquida e gelo passa por um processo. Ao final, o gelo derreteu e o sistema contém apenas água. O sistema pode ser considerado uma substância pura durante o processo? Explique.
- 3.2 Um sistema é composto por nitrogênio líquido em equilíbrio com vapor de nitrogênio. Quantas fases estão presentes? O sistema passa por um processo durante o qual todo o líquido é transformado em vapor d'água. O sistema pode ser considerado como uma substância pura durante o processo? Explique.
- 3.3 Um sistema consiste em água líquida em equilíbrio com uma mistura gasosa de ar e vapor d'água. Quantas fases estão presentes? O sistema pode ser considerado como uma substância pura durante o processo? Explique. Repita para um sistema formado por gelo e água líquida em equilíbrio com uma mistura gasosa de ar e vapor d'água.
- 3.4 Um recipiente aberto de etanol puro (álcool etílico) líquido é colocado sobre uma mesa em uma sala. Ocorre evaporação até esgotar todo o etanol. Para onde foi o etanol? Se o etanol e o ar da sala forem considerados um sistema fechado, ele pode ser considerado uma substância pura durante o processo? Quantas fases estão presentes no início e no final? Explique.

#### Utilizando Dados $p-v-T$

- 3.5 Determine a fase ou as fases de um sistema que consiste em  $\text{H}_2\text{O}$  nas seguintes condições e esboce os diagramas  $p-v$  e  $T-v$  mostrando a localização de cada estado.
- (a)  $p = 100 \text{ lbf/in}^2$  (689,5 kPa),  $T = 327,86^\circ\text{F}$  ( $164,37^\circ\text{C}$ ).
- (b)  $p = 100 \text{ lbf/in}^2$  (689,5 kPa),  $T = 240^\circ\text{F}$  ( $115,56^\circ\text{C}$ ).
- (c)  $T = 212^\circ\text{F}$  ( $100^\circ\text{C}$ ),  $p = 10 \text{ lbf/in}^2$  (68,95 kPa).
- (d)  $T = 70^\circ\text{F}$  ( $21,1^\circ$ ),  $p = 20 \text{ lbf/in}^2$  (137,9 kPa).
- (e)  $p = 14,7 \text{ lbf/in}^2$  (101,35 kPa),  $T = 20^\circ\text{F}$  ( $-6,67^\circ\text{C}$ ).
- 3.6 Determine a fase ou as fases de um sistema que consiste em  $\text{H}_2\text{O}$  nas seguintes condições e esboce os diagramas

$p$ - $v$  e  $T$ - $v$  mostrando a localização de cada estado.

(a)  $p = 10$  bar,  $T = 179,9^\circ\text{C}$ .

(b)  $p = 10$  bar,  $T = 150^\circ\text{C}$ .

(c)  $T = 100^\circ\text{C}$ ,  $p = 0,5$  bar.

(d)  $T = 20^\circ\text{C}$ ,  $p = 50$  bar.

(e)  $p = 1$  bar,  $T = -6^\circ\text{C}$ .

**3.7** A tabela a seguir lista as temperaturas e os volumes específicos do vapor d'água em duas pressões:

$p = 1,0$ MPa		$p = 1,5$ MPa	
$T(^{\circ}\text{C})$	$v(\text{m}^3/\text{kg})$	$T(^{\circ}\text{C})$	$v(\text{m}^3/\text{kg})$
200	0,2060	200	0,1325
240	0,2275	240	0,1483
280	0,2480	280	0,1627

Os dados encontrados durante a resolução de problemas frequentemente não coincidem com os valores fornecidos pelas tabelas de propriedades, sendo necessária uma *interpolação linear* entre as entradas adjacentes na tabela. Utilizando os dados fornecidos, estime

(a) o volume específico a  $T = 240^\circ\text{C}$ ,  $p = 1,25$  MPa, em  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

(b) a temperatura a  $p = 1,5$  MPa,  $v = 0,1555$   $\text{m}^3/\text{kg}$ , em  $^\circ\text{C}$ .

(c) o volume específico a  $T = 220^\circ\text{C}$ ,  $p = 1,4$  MPa, em  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

**3.8** A tabela a seguir lista as temperaturas e os volumes específicos da amônia em duas pressões:

$p = 50$ lbf/in <sup>2</sup>		$p = 60$ lbf/in <sup>2</sup>	
$T(^{\circ}\text{F})$	$v(\text{ft}^3/\text{lb})$	$T(^{\circ}\text{F})$	$v(\text{ft}^3/\text{lb})$
100	6,836	100	5,659
120	7,110	120	5,891

Os dados encontrados durante a resolução de problemas frequentemente não coincidem com os valores fornecidos pelas tabelas de propriedades, sendo necessária uma *interpolação linear* entre as entradas adjacentes na tabela. Utilizando os dados fornecidos, estime

(a) o volume específico a  $T = 120^\circ\text{F}$  ( $48,9^\circ\text{C}$ ),  $p = 54 \text{ lbf/in}^2$  ( $372,3 \text{ kPa}$ ), em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .

(b) a temperatura a  $p = 60 \text{ lbf/in}^2$  ( $413,7 \text{ kPa}$ ),  $v = 5,982 \text{ ft}^3/\text{lb}$  ( $0,37 \text{ m}^3/\text{kg}$ ), em  $^\circ\text{F}$ .

(c) o volume específico a  $T = 110^\circ\text{F}$  ( $43,3^\circ\text{C}$ ),  $p = 58 \text{ lbf/in}^2$  ( $399,9 \text{ kPa}$ ), em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .

**3.9** Determine a variação de volume, em  $\text{ft}^3$ , quando 1 lb ( $0,45 \text{ kg}$ ) de água, inicialmente como líquido saturado, é aquecida até o estado de vapor saturado enquanto a pressão permanece constante a 1,0; 14,7; 100; e 500, todos em  $\text{lbf/in}^2$  (6,9; 101,3; 689,5; 3447,4, todos em kPa). Comente.

**3.10** Para  $\text{H}_2\text{O}$ , determine a propriedade especificada no estado indicado. Localize o estado em um esboço do diagrama  $T-v$ .

(a)  $T = 140^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$ . Determine  $T$ , em  $^\circ\text{C}$ .

(b)  $p = 30 \text{ MPa}$ ,  $T = 100^\circ\text{C}$ . Determine  $y$ , em  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

(c)  $p = 10 \text{ MPa}$ ,  $T = 485^\circ\text{C}$ . Determine  $y$ , em  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

(d)  $T = 80^\circ\text{C}$ ,  $x = 0,75$ . Determine  $p$  em bar e  $y$ , em  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

**3.11** Para cada caso, determine o volume específico no estado indicado. Localize o estado em um esboço do diagrama  $T-v$ .

(a) Água a  $p = 1 \text{ bar}$ ,  $T = 20^\circ\text{C}$ . Determine  $v$  em  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

(b) Refrigerante 22 a  $p = 40 \text{ lbf/in}^2$  ( $275,8 \text{ kPa}$ ),  $x = 0,6$ . Determine  $v$  em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .

(c) Amônia a  $p = 200 \text{ lbf/in}^2$  ( $1378,95 \text{ kPa}$ ),  $T = 195^\circ\text{F}$  ( $90,56^\circ\text{C}$ ). Determine  $v$  em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .

**3.12** Para cada caso, determine a propriedade específica no estado indicado. Localize o estado em um esboço do diagrama  $T-v$ .

(a) Água a  $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$ ,  $p = 3 \text{ bar}$ . Determine  $T$ , em  $^\circ\text{C}$ .

(b) Amônia a  $p = 11 \text{ lbf/in}^2$  ( $75,8 \text{ kPa}$ ),  $T = -20^\circ\text{F}$  ( $-28,9^\circ\text{C}$ ). Determine  $y$ , em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .

(c) Propano a  $p = 1 \text{ MPa}$ ,  $T = 85^\circ\text{C}$ . Determine  $y$ , em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .

**3.13** Para  $\text{H}_2\text{O}$ , determine o volume específico nos estado indicados, em  $\text{m}^3/\text{kg}$ . Localize os estados em um esboço do diagrama  $T-v$ .

(a)  $T = 400^\circ\text{C}$ ,  $p = 20 \text{ MPa}$ .

(b)  $T = 40^\circ\text{C}$ ,  $p = 20 \text{ MPa}$ .

(c)  $T = 40^\circ\text{C}$ ,  $p = 2 \text{ MPa}$ .

**3.14** Para  $\text{H}_2\text{O}$ , localize cada um dos seguintes estados, em esboços dos diagramas  $p$ - $v$ ,  $T$ - $v$  e de fases.

(a)  $T = 120^\circ\text{C}$ ,  $p = 5 \text{ bar}$ .

(b)  $T = 120^\circ\text{C}$ ,  $v = 0,6 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

(c)  $T = 120^\circ\text{C}$ ,  $p = 1 \text{ bar}$ .

**3.15** Complete os exercícios a seguir. Em cada caso, localize o estado em esboços dos diagramas  $T$ - $v$  e  $p$ - $v$ .

(a) Um recipiente fechado de um  $1 \text{ m}^3$  de volume contém quatro quilogramas de água a  $100^\circ\text{C}$ . Para a água no estado de vapor, determine a pressão, em bar. Para uma mistura bifásica líquido-vapor de água, determine o título.

(b) Amônia a  $40 \text{ lbf/in}^2$  ( $275,8 \text{ kPa}$ ) de pressão tem  $308,75 \text{ Btu/lb}$  ( $718,15 \text{ kJ/kg}$ ) de energia interna específica. Determine o volume específica no estado, em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .

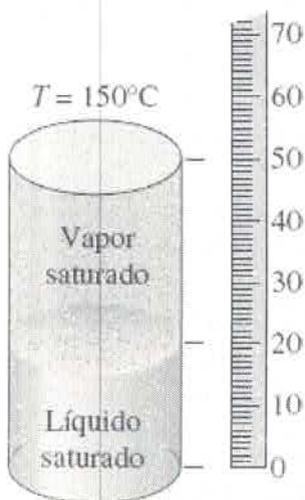
**3.16** Um tanque de  $1 \text{ m}^3$  contém uma mistura líquido-vapor de  $\text{CO}_2$  a  $-17^\circ\text{C}$ . O título da mistura é 0,7. Para o  $\text{CO}_2$  a  $-17^\circ\text{C}$ ,  $v_f = 0,98273 \cdot 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$  e  $v_g = 1,7563 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$ . Determine a massa de líquido saturado e vapor saturado presentes no sistema, em kg. Qual é a fração do volume total ocupada pelo líquido saturado?

**3.17** Determine o volume, em  $\text{ft}^3$ , de uma mistura líquido-vapor contendo 2 lb ( $0,91 \text{ kg}$ ) de Refrigerante 134a a  $40^\circ\text{F}$  ( $4,44^\circ\text{C}$ ) com um título de 20%. Qual é a pressão do sistema, em  $\text{lbf/in}^2$ ?

**3.18** Uma mistura bifásica líquido-vapor de amônia possui um volume específico de  $1,0 \text{ ft}^3/\text{lb}$  ( $0,06 \text{ m}^3/\text{kg}$ ). Determine o título para a temperatura de (a)  $100^\circ\text{F}$  ( $37,8^\circ\text{C}$ ), (b)  $0^\circ\text{F}$  ( $-17,8^\circ\text{C}$ ). Localize os estados em um esboço do diagrama  $T$ - $v$ .

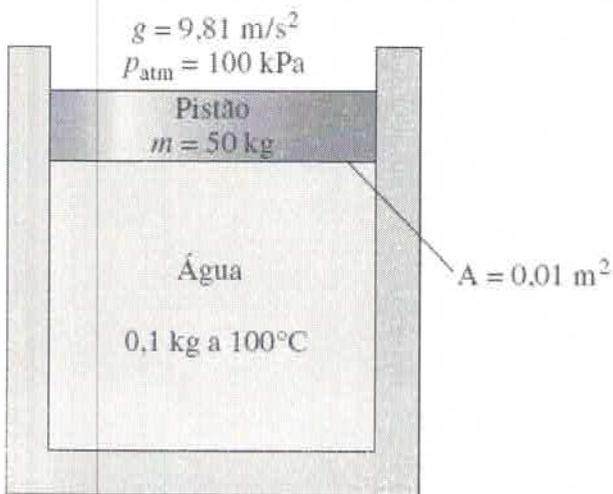
**3.19** Um tanque contém uma mistura líquido-vapor de Refrigerante 22 a 10 bar. A massa do líquido saturado no tanque é 25 kg e o título é 60 %. Determine o volume do tanque, em  $\text{m}^3$ , e a fração do volume total ocupado pelo vapor saturado.

**3.20** Conforme ilustrado na Fig. P3.21, um cilindro rígido hermético contém diferentes volumes de água líquida saturada e vapor d'água saturado na temperatura de  $150^\circ\text{C}$ . Determine o título da mistura, expresso em porcentagem.



**Fig. P3.20**

3.21 Conforme ilustrado na Fig. P3.21, um conjunto cilindro-pistão contém 0,1 kg de água a 100°C. O pistão está livre para mover-se suavemente no cilindro. A pressão atmosférica local e a aceleração da gravidade são de 100 kPa e 9,81 m/s<sup>2</sup>, respectivamente. Para a água, determine a pressão, em kPa, e o volume, em cm<sup>3</sup>.



**Fig. P3.21**

3.22 Amônia, inicialmente a 6 bar e 40°C, é submetida a um processo sob volume específico constante até uma pressão final de 3 bar. Determine, para o estado final, a temperatura em °C e o título. Localize estes estados em um diagrama esquemático  $T$ - $v$ .

3.23 Um tanque rígido fechado contém água inicialmente como vapor saturado a 200°C, sendo esta resfriada até 100°C. Determine as pressões inicial e final, ambas em bar. Localize os estados inicial e final em esboços dos diagramas  $p$ - $v$  e  $T$ - $v$ .

3.24 Um tanque rígido fechado, de 1,5 m<sup>3</sup> de volume, contém Refrigerante 134a, inicialmente como uma mistura bifásica líquido-vapor a 10°C. O refrigerante é aquecido até um estado final, em que a temperatura é de 50°C e o título é de 100%. Localize os estados inicial e final em um esboço do diagrama  $T$ - $v$ . Determine a massa de vapor presente nos estados inicial e final, ambas em kg.



3.25 Em cada um dos seguintes casos a amônia contida em um tanque rígido fechado é aquecida de um estado inicial de vapor saturado a temperatura  $T_1$  até um estado final a temperatura  $T_2$ :

(a)  $T_1 = 20^\circ\text{C}$ ,  $T_2 = 40^\circ\text{C}$ . Utilizando o *IT* ou um programa similar, determine a pressão final, em bar.

(b)  $T_1 = 70^\circ\text{F}$  ( $20,1^\circ\text{C}$ ),  $T_2 = 120^\circ\text{F}$  ( $48,9^\circ\text{C}$ ). Utilizando o *IT* ou um programa similar, determine a pressão final, em lbf/in<sup>2</sup>.

Compare os valores das pressões determinados usando o *IT* ou um programa similar com aqueles obtidos usando as tabelas do Apêndice apropriadas para amônia.

3.26 Um tanque fechado e rígido contém uma mistura líquido-vapor de Refrigerante 22 inicialmente a  $-20^\circ\text{C}$  com um título 50,36%. Energia é transferida para o tanque sob a forma de calor até que o sistema esteja sob 6 bar. Determine a temperatura final, em °C. Se o estado final está na região de vapor superaquecido, a qual temperatura, em °C, o tanque conteria somente vapor saturado?

3.27 Vapor d'água é resfriado em um tanque rígido fechado de 520°C e 100 bar até uma temperatura final de 270°C. Determine a pressão final, em bar, e esboce o processo em diagramas  $T-v$  e  $p-v$ .

3.28 Amônia, contida em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente como vapor saturado a 0°F, é submetida a um processo isotérmico durante o qual seu volume (a) dobra, (b) é reduzido a metade. Para cada caso, fixe o estado final fornecendo o título ou a pressão, em lbf/in<sup>2</sup>, conforme apropriado. Localize os estados inicial e final em esboços dos diagramas  $p-v$  e  $T-v$ .

3.29 Um quilograma de água se encontra inicialmente no ponto crítico.

(a) Se a água é resfriada a volume específico constante até a pressão de 30 bar, determine o título no final do estado.

(b) Se a água passa por uma expansão a temperatura constante até a pressão de 30 bar, determine o volume específico no final do estado, em m<sup>3</sup>/kg. Mostre cada processo em um diagrama  $T-v$ .

3.30 Conforme ilustrado na Fig. P3.30, um cilindro equipado com um pistão contém 600 lb (272,2 kg) de amônia líquida saturada a 45°F (7,2°C). A massa do pistão é de 1 tonelada, e ele possui 2,5 ft (0,76 m) de diâmetro. Qual o volume ocupado pela amônia, em ft<sup>3</sup>? Desprezando o atrito, será necessário fornecer fixadores mecânicos, como esbarros, para manter o pistão no lugar? Explique.

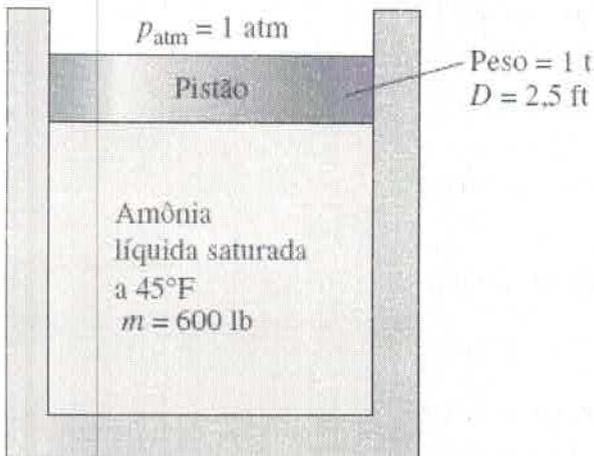


Fig. P3.30

3.31 Um sistema pistão-cilindro contém uma mistura líquido-vapor de água a 200 lbf/in<sup>2</sup> com um título 80%. A mistura é aquecida e expande sob pressão constante até uma temperatura final de 480°F (248,9°C). Determine o trabalho realizado durante o processo, em Btu/lb.

3.32 Sete libras (3,2 kg) de propano em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente a  $p_1 = 200 \text{ lbf/in}^2$  (1,4 MPa) e  $T_1 = 200^\circ\text{F}$  (93,3°C) são submetidas a um processo a pressão constante até um estado final. O trabalho relativo ao processo é de -88,84 Btu (293,7 kJ). No estado final, determine a temperatura, em °F, se superaquecido, ou o título, se saturado.

3.33 Um sistema contendo 2 kg de Refrigerante 134A é submetido a um processo politrópico em um arranjo pistão-cilindro desde um estado inicial de vapor saturado a 2 bar até um estado final sob 12 bar e 80°C. Determine o trabalho realizado durante o processo, em kJ.

3.34 De um estado inicial em que a pressão é  $p_1$ , a temperatura é  $T_1$ , e o volume é  $v_1$ , vapor d'água contido no interior de um conjunto cilindro-pistão passa por cada um dos seguintes processos:

**Processo 1-2:** temperatura constante de  $p_2 = 2 p_1$ .

**Processo 1-3:** volume constante de  $p_3 = 2 p_1$

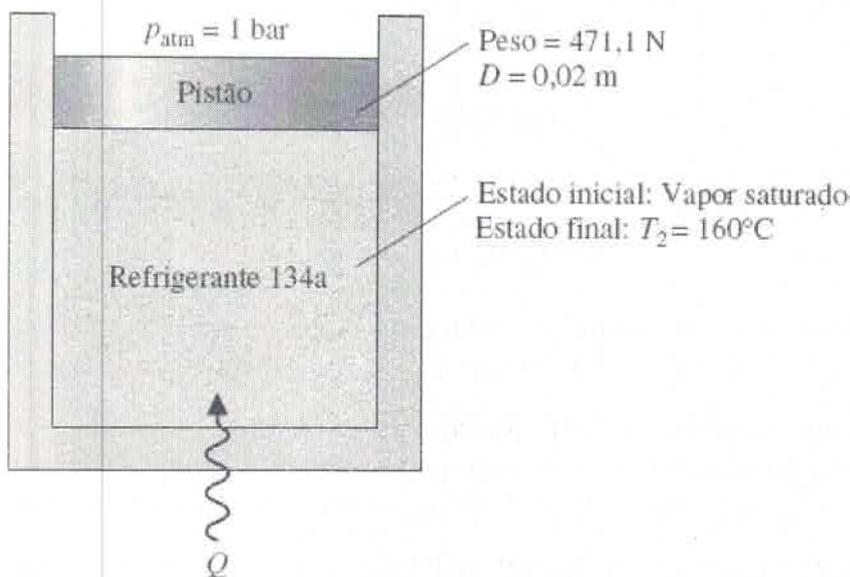
**Processo 1-4:** pressão constante de  $V_4 = 2V_1$

**Processo 1-5:** temperatura constante de  $V_5 = 2V_1$

Esboce cada processo em um diagrama  $p$ - $V$ , identifique o trabalho por meio da área no diagrama, e indique se o trabalho é realizado pelo ou sobre o vapor d'água.

**3.35** Três quilogramas de Refrigerante 22 são submetidos a um processo para o qual a relação pressão-volume específico é  $pv^{-0,8} = constante$ . O estado inicial do refrigerante é estabelecido por 12 bar e  $60^\circ\text{C}$ , e a pressão final é de 8 bar. Despreze os efeitos das energias cinética e potencial. Calcule o trabalho para o processo, em kJ.

**3.36** Conforme ilustrado na Fig. P3.36, Refrigerante 134a está contido em um conjunto cilindro-pistão inicialmente como vapor saturado. O refrigerante é aquecido lentamente até que sua temperatura seja  $160^\circ\text{C}$ . Durante o processo, o pistão se move suavemente no cilindro. Para o refrigerante, avalie o trabalho, em kJ/kg.



**Fig. P3.36**

**3.37** Um conjunto cilindro-pistão contém 0,1 lb (0,04 kg) de propano. O propano passa por um processo de expansão de um estado inicial em que  $p_1 = 60 \text{ lbf/in}^2$  (413,7 kPa) e  $T_1 = 30^\circ\text{F}$  ( $-1,1^\circ\text{C}$ ) a um estado final em que  $p_2 = 10 \text{ lbf/in}^2$  (68,9 kPa). Durante o processo a pressão e o volume específico estão relacionados por  $pv^2 = constante$ . Determine a energia transferida por trabalho, em Btu.

#### Utilizando Dados $u$ - $h$

**3.38** Para cada um dos itens, determine as propriedades especificadas e aponte os estados em um diagrama de fases  $T$ - $v$  esquemático.

(a) Para o refrigerante 22 sob  $p = 3 \text{ bar}$  e  $v = 0,05 \text{ m}^3/\text{kg}$ , determine  $T$  em  $^\circ\text{C}$  e  $\bar{u}$  em kJ/kg.

(b) Para água a  $T = 200^\circ\text{C}$  e  $v = 0,2429 \text{ m}^3/\text{kg}$ , determine  $p$  em bar e  $h$  em kJ/kg.

(c) Para amônia sob  $p = 5 \text{ bar}$  e  $\bar{u} = 1400 \text{ kJ/kg}$ , determine  $T$  em  $^\circ\text{C}$  e  $v$  em  $\text{m}^3/\text{kg}$ .

**3.39** Para cada um dos itens, determine as propriedades especificadas e aponte os estados em um diagrama de fases

$T$ - $v$  esquemático.

- (a) Para o Refrigerante 22 sob  $p = 60 \text{ lbf/in}^2$  (413,7 kPa) e  $\bar{u} = 50 \text{ Btu/lb}$  (116,3 kJ/kg), determine  $T$  em  $^{\circ}\text{F}$  e  $v$  em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .
- (b) Para o Refrigerante 134a a  $T = 120^{\circ}\text{F}$  (48,9 $^{\circ}\text{C}$ ) e  $\bar{u} = 114 \text{ Btu/lb}$  (265,164 kJ/kg), determine  $p$  em  $\text{lbf/in}^2$  e  $v$  em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .
- (c) Para vapor de água sob  $p = 100 \text{ lbf/in}^2$  (689,5 kPa) e  $h = 1240 \text{ Btu/lb}$  (2884,24 kJ/kg), determine  $T$  em  $^{\circ}\text{F}$ ,  $v$  em  $\text{ft}^3/\text{lb}$  e  $\bar{u}$  em  $\text{Btu/lb}$ .

**3.40** Utilizando o *IT* ou um programa similar, determine os dados das propriedades especificadas nos estados indicados. Compare os resultados com os dados da tabela apropriada.

(a) Casos (a), (b) e (c) do Problema 3.38.

(b) Casos (a), (b) e (c) do Problema 3.39.



**3.41** Utilizando as tabelas para a água, determine os dados das propriedades especificadas nos estados indicados. Para cada caso, localize o estado manualmente a partir de esboços de diagramas  $p$ - $v$  e  $T$ - $v$ .

- (a) A  $p = 2 \text{ MPa}$ ,  $T = 300^{\circ}\text{C}$ , determine  $\bar{u}$  em  $\text{kJ/kg}$ .
- (b) A  $p = 2,5 \text{ MPa}$ ,  $T = 200^{\circ}\text{C}$ , determine  $\bar{u}$  em  $\text{kJ/kg}$ .
- (c) A  $T = 170^{\circ}\text{F}$ ,  $x = 50\%$ , determine  $\bar{u}$  em  $\text{Btu/lb}$ .
- (d) A  $p = 100 \text{ lbf/in}^2$  (689,5 kPa),  $T = 300^{\circ}\text{F}$  (148,9 $^{\circ}\text{C}$ ), determine  $h$  em  $\text{Btu/lb}$ .
- (e) A  $p = 1,5 \text{ MPa}$ ,  $v = 0,2095 \text{ m}^3/\text{kg}$ , determine  $h$  em  $\text{kJ/kg}$ .

**3.42** Para cada caso, determine o valor da propriedade especificada e localize o estado manualmente a partir de esboços de diagramas  $p$ - $v$  e  $T$ - $v$ .

- (a) Para o Refrigerante 134a a  $T = 160^{\circ}\text{F}$  (71,1 $^{\circ}\text{C}$ ),  $h = 127,7 \text{ Btu/lb}$  (297,0 kJ/kg). Avalie  $v$  em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ .
- (b) Para o Refrigerante 134a a  $T = 90^{\circ}\text{F}$  (32,2 $^{\circ}\text{C}$ ),  $\bar{u} = 72,71 \text{ Btu/lb}$  (169,12 kJ/kg). Avalie  $h$  em  $\text{Btu/lb}$ .
- (c) Para a amônia a  $T = 160^{\circ}\text{F}$ ,  $p = 60 \text{ lbf/in}^2$  (413,7 MPa). Avalie  $\bar{u}$  em  $\text{Btu/lb}$ .
- (d) Para a amônia a  $T = 0^{\circ}\text{F}$  (-17,8 $^{\circ}\text{C}$ ),  $p = 35 \text{ lbf/in}^2$  (241,3 kPa). Avalie  $\bar{u}$  em  $\text{Btu/lb}$ .
- (e) Para o Refrigerante 22 a  $p = 350 \text{ lbf/in}^2$  (2,4 MPa),  $T = 350^{\circ}\text{F}$  (176,7 $^{\circ}\text{C}$ ). Avalie  $\bar{u}$  em  $\text{Btu/lb}$ .

**3.43** Utilizando as tabelas para a água, determine os dados das propriedades especificadas nos estados indicados. Para cada caso, localize o estado manualmente a partir de esboços de diagramas  $p$ - $v$  e  $T$ - $v$ .

- (a) A  $p = 3 \text{ bar}$ ,  $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$ , avalie  $T$  em  $^{\circ}\text{C}$  e  $u$  em  $\text{kJ/kg}$ .
- (b) A  $T = 320^{\circ}\text{C}$ ,  $v = 0,03 \text{ m}^3/\text{kg}$ , avalie  $p$  em  $\text{MPa}$  e  $u$  em  $\text{kJ/kg}$ .

(c) A  $p = 28 \text{ MPa}$ ,  $T = 520^\circ\text{C}$ , avalie  $v$  em  $\text{m}^3/\text{kg}$  e  $h$  em  $\text{kJ}/\text{kg}$ .

(d) A  $T = 10^\circ\text{C}$ ,  $v = 100 \text{ m}^3/\text{kg}$ , avalie  $p$  em  $\text{kPa}$  e  $h$  em  $\text{kJ}/\text{kg}$ .

(e) A  $p = 4 \text{ MPa}$ ,  $T = 160^\circ\text{C}$ , avalie  $v$  em  $\text{m}^3/\text{kg}$  e  $u$  em  $\text{kJ}/\text{kg}$ .

**3.44** Utilizando as tabelas para a água, determine os dados das propriedades especificadas nos estados indicados. Para cada caso, localize o estado manualmente a partir de esboços de diagramas  $p-v$  e  $T-v$ .

(a) A  $p = 20 \text{ lbf}/\text{in}^2$  (137,9 kPa),  $v = 16 \text{ ft}^3/\text{lb}$  (1,0  $\text{m}^3/\text{kg}$ ), avalie  $T$  em  $^\circ\text{F}$  e  $u$  em  $\text{Btu}/\text{lb}$ .

(b) A  $T = 900^\circ\text{F}$  (482,2 $^\circ\text{C}$ ),  $p = 170 \text{ lbf}/\text{in}^2$  (1,2 MPa), avalie  $v$  em  $\text{ft}^3/\text{lb}$  e  $h$  em  $\text{Btu}/\text{lb}$ .

(c) A  $T = 600^\circ\text{F}$  (315,6 $^\circ\text{C}$ ),  $v = 0,6 \text{ ft}^3/\text{lb}$  (0,04  $\text{m}^3/\text{kg}$ ), avalie  $p$  em  $\text{lbf}/\text{in}^2$  e  $u$  em  $\text{Btu}/\text{lb}$ .

(d) A  $T = 40^\circ\text{F}$  (4,4 $^\circ\text{C}$ ),  $v = 1950 \text{ ft}^3/\text{lb}$  (121,7  $\text{m}^3/\text{kg}$ ), avalie  $p$  em  $\text{lbf}/\text{in}^2$  e  $h$  em  $\text{Btu}/\text{lb}$ .

(e) A  $p = 600 \text{ lbf}/\text{in}^2$  (4,1 MPa),  $T = 320^\circ\text{F}$  (160 $^\circ\text{C}$ ), avalie  $v$  em  $\text{ft}^3/\text{lb}$  e  $u$  em  $\text{Btu}/\text{lb}$ .

**3.45** Para cada caso, determine o valor da propriedade especificada e localize o estado manualmente a partir de esboços de diagramas  $T-v$ .

(a) Para a água a  $400^\circ\text{F}$  (204,4 $^\circ\text{C}$ ) e uma pressão de  $3000 \text{ lbf}/\text{in}^2$  (20,7 MPa), avalie o volume específico, em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ , e a entalpia específica, em  $\text{Btu}/\text{lb}$ .

(b) Para o Refrigerante 134a a  $95^\circ\text{F}$  (35,0 $^\circ\text{C}$ ) e  $150 \text{ lbf}/\text{in}^2$  (1,0 MPa), avalie o volume específico, em  $\text{ft}^3/\text{lb}$ , e a entalpia específica, em  $\text{Btu}/\text{lb}$ .

(c) Para a amônia a  $20^\circ\text{C}$  e 1,0 MPa, avalie o volume específico, em  $\text{m}^3/\text{kg}$ , e a entalpia específica, em  $\text{kJ}/\text{kg}$ .

(d) Para o propano a  $800 \text{ kPa}$  e  $0^\circ\text{C}$ , avalie o volume específico, em  $\text{m}^3/\text{kg}$ , e a entalpia específica, em  $\text{kJ}/\text{kg}$ .

### Aplicando o Balanço de Energia

**3.46** Água, inicialmente como vapor saturado a 4 bar, está contida em um recipiente rígido fechado. A água é aquecida até que sua temperatura atinja  $400^\circ\text{C}$ . Para a água, determine o calor transferido durante o processo, em  $\text{kJ}/\text{kg}$ . Despreze os efeitos das energias cinética e potencial.

**3.47** Um tanque rígido fechado contém Refrigerante 134a, inicialmente a  $100^\circ\text{C}$ . O refrigerante é resfriado até que se torne vapor saturado a  $20^\circ\text{C}$ . Determine as pressões inicial e final para o refrigerante, em bar, e o calor transferido, em  $\text{kJ}/\text{kg}$ . Despreze os efeitos das energias cinética e potencial.

**3.48** Um tanque rígido fechado está cheio de água. Inicialmente, o tanque possui  $9,9 \text{ ft}^3$  (0,28  $\text{m}^3$ ) de vapor saturado e  $0,1 \text{ ft}^3$  de líquido saturado, ambos a  $212^\circ\text{F}$  (100 $^\circ\text{C}$ ). A água é aquecida até que o tanque contenha apenas vapor saturado. Determine para a água, (a) o título no estado inicial, (b) a temperatura no estado final, em  $^\circ\text{F}$ , e (c) a transferência de calor, em Btu. Despreze os efeitos das energias cinética e potencial.

**3.49** Um tanque rígido fechado está cheio de água, que se encontra inicialmente no ponto crítico. A água é resfriada até que atinja a temperatura de  $400^\circ\text{F}$  (204,4 $^\circ\text{C}$ ). Para a água, mostre o processo em um esboço do diagrama  $T-v$  e determine o calor transferido, em  $\text{Btu}/\text{lb}$ .

**3.50** O gás Refrigerante 22 é submetido a um processo isobárico em um sistema pistão-cilindro desde vapor saturado a 4 bar até uma temperatura final de  $30^\circ\text{C}$ . Desconsidere as contribuições de energia cinética e potencial. Represente

o processo em um diagrama  $p-v$ . Calcule o trabalho e a transferência de calor, em kJ/kg.

3.51 Para o sistema do problema 3.26, determine a quantidade de energia transferida por calor, em kJ/kg.

3.52 Para o sistema do problema 3.31, determine a quantidade de energia transferida por calor, em Btu, se a massa for 2 lb (0,91 kg). Desconsidere a energia cinética e potencial.

3.53 Para o sistema do problema 3.33, determine a quantidade de energia transferida por calor, em kJ. Desconsidere a energia cinética e potencial.

3.54 Vapor de amônia em um conjunto cilindro-pistão é submetido a um processo a pressão constante a partir de vapor saturado a 10 bar. O trabalho é de +16,5 kJ/kg. Variações das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine (a) a temperatura final da amônia, em °C, e (b) determine a quantidade de calor transferida, em kJ/kg.

3.55 Água em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente à temperatura de 99,63°C e um título de 65%, é aquecida a pressão constante até a temperatura de 200°C. Se o trabalho durante o processo for de +300 kJ, determine (a) a massa da água, em kg, e (b) a quantidade de calor transferida, em kJ. Variações das energias cinética e potencial são desprezíveis.

3.56 Um conjunto cilindro-pistão contendo, inicialmente, água líquida a 50°F (10°C) passa por um processo a uma pressão constante de 20 lbf/in<sup>2</sup> (137,9 kPa) até um estado final em que a água é um vapor a 300°F (148,9°C). Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine o trabalho e o calor transferido, em Btu por libra, para cada uma das três partes do processo global: (a) do estado inicial líquido até o estado de líquido saturado, (b) do estado de líquido saturado até o estado de vapor saturado e (c) do estado de vapor saturado até o estado final de vapor, todos a 20 lbf/in<sup>2</sup>.

3.57 Conforme ilustrado na Fig. P3.57, um conjunto cilindro-pistão contém 0,1 kg de propano a uma pressão constante de 0,2 MPa. A transferência de energia por calor ocorre lentamente para o propano, e o volume do propano aumenta de 0,0277 m<sup>3</sup> até 0,0307 m<sup>3</sup>. O atrito entre o pistão e o cilindro é desprezível. A pressão atmosférica local e a aceleração da gravidade são de 100 kPa e 9,81 m/s<sup>2</sup>, respectivamente. Os efeitos das energias cinética e potencial relativos ao propano são desprezíveis. Para o propano, determine (a) as temperaturas inicial e final, em °C, (b) o trabalho, em kJ, e (c) a quantidade de calor transferida, em kJ.

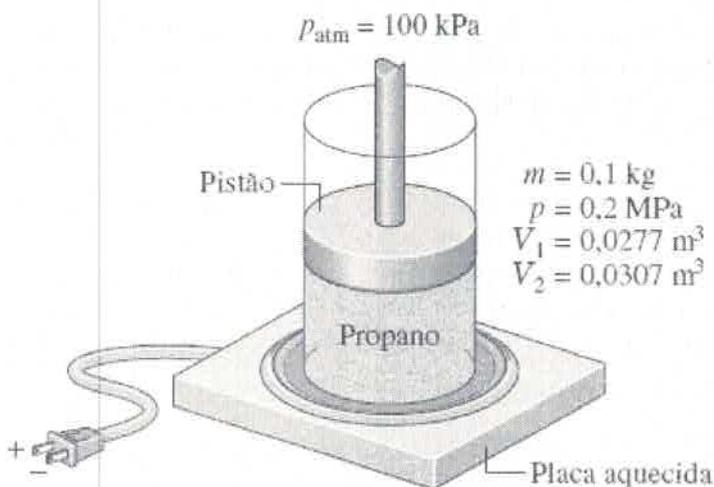


Fig. P3.57

3.58 Um conjunto cilindro-pistão contém água, inicialmente como líquido saturado a 150°C. A água é aquecida a temperatura constante até o estado de vapor saturado.

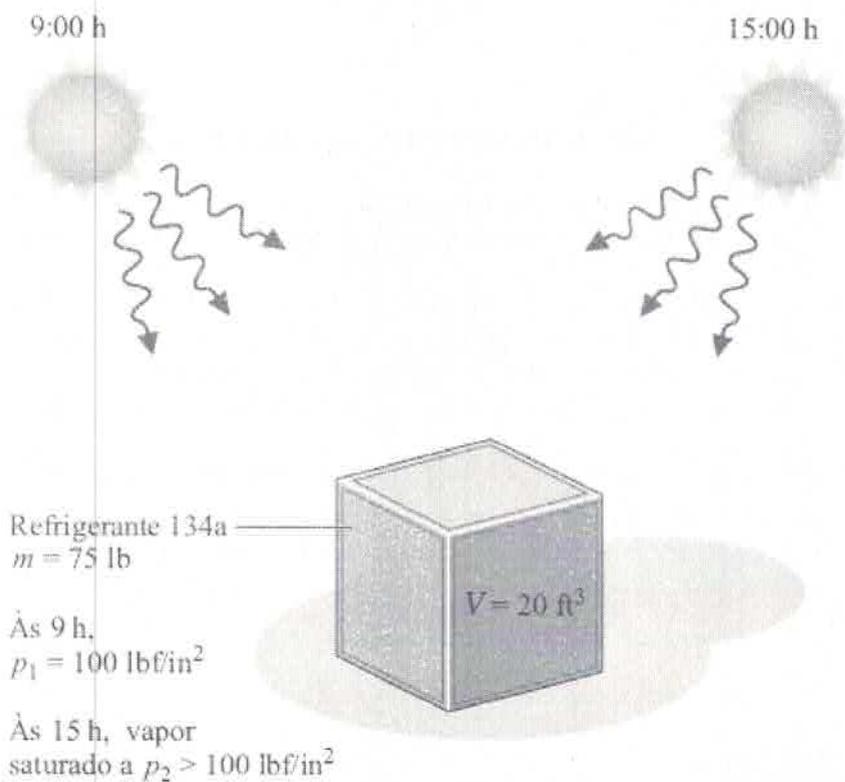
(a) Considerando que a energia é transferida por calor para a água a uma taxa de 2,28 kW, determine a taxa na qual o

trabalho é realizado pela água sobre o pistão, em kW.

(b) Se em adição a taxa de energia transferida por calor no item (a), a massa total de água for de 0,1 kg, determine o tempo, em segundos, necessário para executar o processo.

**3.59** Um tanque rígido e isolado contém 1,5 kg de Refrigerante 134a inicialmente sob a forma de uma mistura líquido-vapor com título de 60 % e a  $0^{\circ}\text{C}$ . Uma resistência elétrica transfere energia para o sistema a uma taxa de 2 kW até que o tanque contenha somente vapor saturado. Localize em um diagrama  $T-v$  os estados inicial e final e determine o tempo decorrido durante o processo.

**3.60** Conforme ilustrado na Fig. P3.60, um tanque rígido fechado com  $20\text{ ft}^3$  ( $0,57\text{ m}^3$ ) de volume contém 75 lb (34 kg) de Refrigerante 134a e está exposto ao sol. Às 9h da manhã o refrigerante está a uma pressão de  $100\text{ lbf/in}^2$  ( $689,5\text{ kPa}$ ). Às 15h, devido à radiação solar, o refrigerante se encontra como um vapor saturado a uma pressão maior do que  $100\text{ lbf/in}^2$ . Para o refrigerante, determine (a) a temperatura inicial, em  $^{\circ}\text{F}$ , (b) a pressão final, em  $\text{lbf/in}^2$ , e (c) a transferência de calor, em Btu.



**Fig. P3.60**

**3.61** Um tanque rígido e isolado equipado com um agitador contém água, inicialmente como uma mistura bifásica líquido-vapor a  $20\text{ lbf/in}^2$  ( $137,9\text{ kPa}$ ). Essa mistura consiste em 0,07 lb (0,03 kg) de água líquida saturada e 0,07 lb de vapor d'água saturado. Um agitador movimenta a mistura até que toda a água se torne vapor saturado a uma pressão maior do que  $20\text{ lbf/in}^2$ . Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Para a água, determine

(a) o volume ocupado, em  $\text{ft}^3$ .

(b) a temperatura inicial, em  $^{\circ}\text{F}$ .

(c) a pressão final, em  $\text{lbf/in}^2$ .

(d) o trabalho, em Btu.

3.62 Se a placa aquecida do Exemplo 3.2 transferisse energia a uma taxa de 0,1 kW para uma mistura bifásica, determine o tempo necessário, em horas, para levar a mistura do (a) estado 1 até o estado 2, (b) do estado 1 até o estado 3.

3.63 Um tanque rígido fechado contém água inicialmente a uma pressão de 20 bar, um título de 80%, e um volume de  $0,5 \text{ m}^3$ , sendo essa resfriada até a pressão de 4 bar. Mostre o processo da água em um esboço do diagrama  $T-v$  e calcule o calor transferido, em kJ.

3.64 Conforme ilustrado na Fig. P3.64, um tanque rígido equipado com uma resistência elétrica de massa desprezível contém Refrigerante 22, inicialmente a  $-10^\circ\text{C}$ , um título de 80% e  $0,01 \text{ m}^3$  de volume. Uma bateria de 12 V fornece uma corrente de 5 ampères para a resistência por 5 minutos. Considerando que a temperatura final do refrigerante é de  $40^\circ\text{C}$ , determine a transferência de calor, em kJ, a partir do refrigerante.

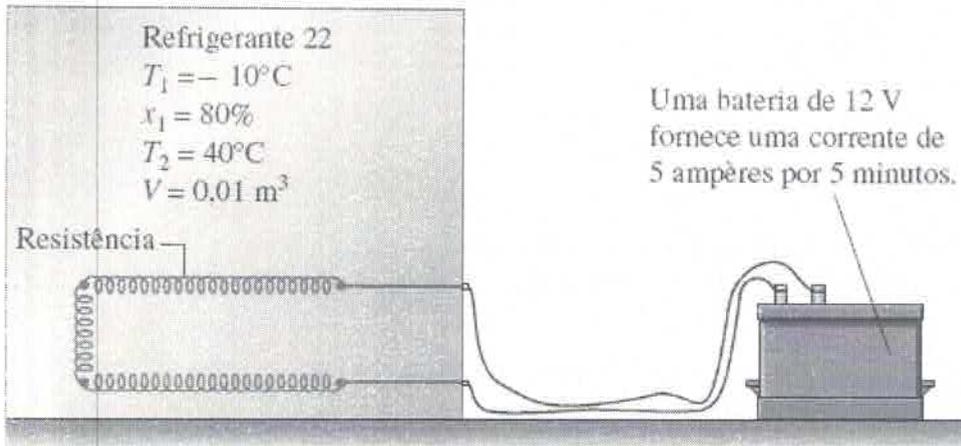


Fig. P3.64

3.65 Um tanque rígido contém 5 lb (2,27 kg) de propano a  $80 \text{ lbf/in}^2$  (551,6 kPa) e  $110^\circ\text{F}$  ( $43,3^\circ\text{C}$ ). O calor é transferido do sistema até que a temperatura seja  $0^\circ\text{F}$  ( $-17,8^\circ\text{C}$ ). Considerando desprezíveis a energia cinética e potencial, represente em um diagrama  $T-v$  os estados inicial e final, e determine a quantidade de calor trocada no processo, em Btu.



3.66 Um tanque rígido contém 0,02 lb (0,01 kg) de água, inicialmente a  $120^\circ\text{F}$  ( $48,9^\circ\text{C}$ ) e um título de 50%. A água recebe 8 Btu (8,4 kJ) por transferência de calor. Determine a temperatura, em  $^\circ\text{F}$ , a pressão final, em  $\text{lbf/in}^2$  e o título da água no estado final.

3.67 Amônia está contida em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente à temperatura de  $-20^\circ\text{C}$  e um título de 50%. A amônia é lentamente aquecida até o estado final em que a pressão é de 6 bar e a temperatura é de  $180^\circ\text{C}$ . Conforme a amônia é aquecida, sua pressão varia linearmente com o volume específico. Mostre o processo da amônia em um esboço do diagrama  $p-v$ . Para a amônia, determine o trabalho e a quantidade de calor transferida, ambos em kJ/kg.



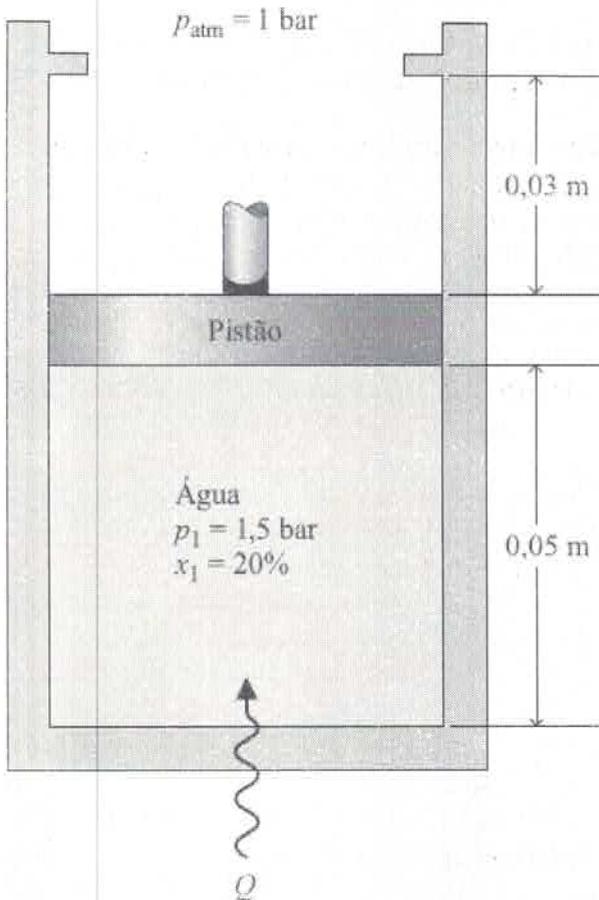
3.68 Um reservatório rígido e isolado com  $2 \text{ ft}^3$  ( $0,06 \text{ m}^3$ ) de volume contém 0,12 lb (0,05 kg) de amônia, inicialmente a pressão de  $20 \text{ lbf/in}^2$  (137,9 kPa). A amônia é misturada por um agitador, resultando em uma

transferência de energia para a amônia de 1 Btu (1,1 kJ) de magnitude. Determine as temperaturas inicial e final da amônia, ambas em °R, e a pressão final, em lbf/in<sup>2</sup>. Despreze os efeitos das energias cinética e potencial.

**3.69** Água contida em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente à temperatura de +300°F (148,9°C), um título de 90% e um volume de 6 ft<sup>3</sup> (0,17 m<sup>3</sup>), é aquecida a temperatura constante até o estado de vapor saturado. Considerando que a taxa de transferência de calor é de 0,3 Btu/s (0,32 kW), determine o tempo, em minutos, para que este processo da água ocorra. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis.

**3.70** Cinco quilogramas de água estão contidos em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente a 5 bar e 240°C. A água é lentamente aquecida a pressão constante até um estado final. Considerando que a transferência de calor para o processo é de 2960 kJ, determine a temperatura no estado final, em °C, e o trabalho, em kJ. Os efeitos das energias cinética e potencial não são significativos.

**3.71** Como ilustrado na Fig. P3.71, água contida em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente a 1,5 bar e 20% de título é aquecida a pressão constante até que o pistão atinge os esbarros. A transferência de calor continua até que a água atinja o estado de vapor saturado. Apresente os processos em série da água em um esboço do diagrama  $T-u$ . Para o processo global relativo à água, determine o trabalho e o calor transferido, ambos em kJ/kg. Os efeitos das energias cinética e potencial não são significativos.



**Fig. P3.71**

**3.72** Um conjunto cilindro-pistão contém 2 lb (0,91 kg) de água, inicialmente a 400°F e 100 lbf/in<sup>2</sup>. A água passa por dois processos em série: o primeiro a pressão constante seguido por um processo a volume constante. No final do processo a volume constante a temperatura é de 300°F e a água corresponde a uma mistura bifásica líquido-vapor com um título de 60%. Despreze os efeitos das energias cinética e potencial.

(a) Esboce os diagramas  $T-u$  e  $p-v$  indicando os estados principais e os processos.

(b) Determine o trabalho e a transferência de calor para cada um dos dois processos, ambos em Btu.

**3.73** Um sistema que consiste em 3 lb (1,4 kg) de vapor d'água em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente a 350°F (176,7°C) e ocupando um volume de 71,7 ft<sup>3</sup> (2,1 m<sup>3</sup>) se expande em um processo a pressão constante até um volume de 85,38 ft<sup>3</sup> (2,4 m<sup>3</sup>). O sistema é então comprimido isotermicamente até um volume final de 28,2 ft<sup>3</sup> (0,80 m<sup>3</sup>). Durante a compressão isotérmica ocorre transferência de energia por trabalho para o sistema em uma magnitude de 72 Btu (76,0 kJ). Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Determine a quantidade de calor trocada, em Btu, para cada processo.

**3.74** Amônia em um conjunto cilindro-pistão é submetida a dois processos em série. No estado inicial, a amônia se encontra no estado de vapor saturado a  $p_1 = 100 \text{ lbf/in}^2$  (689,5 kPa). O Processo 1-2 envolve resfriamento a pressão constante até  $x_2 = 75\%$ . O segundo processo, do estado 2 para o estado 3, envolve aquecimento a volume constante até  $x_3 = 100\%$ . Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Para 1,2 lb (0,5 kg) de amônia, determine (a) a quantidade de calor transferida e o trabalho para o Processo 1-2 e (b) a quantidade de calor transferida para o Processo 2-3, todos em Btu.

**3.75** Um conjunto cilindro-pistão contém 3 lb (1,4 kg) de água, inicialmente ocupando um volume  $V_1 = 30 \text{ ft}^3$  (0,85 m<sup>3</sup>) a  $T_1 = 300^\circ\text{F}$  (148,9°C). A água passa por dois processos em série:

**Processo 1-2:** compressão a temperatura constante até  $V_2 = 11,19 \text{ ft}^3$  (0,32 m<sup>3</sup>), durante a qual há uma transferência de energia por calor a partir da água de 1275 Btu (1,3 MJ).

**Processo 2-3:** aquecimento a volume constante até  $p_3 = 120 \text{ lbf/in}^2$  (827,4 kPa).

Esboce os dois processos em série em um diagrama  $T-v$ . Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine o trabalho no Processo 1-2 e o calor transferido no Processo 2-3, ambos em Btu.

**3.76** Conforme ilustrado na Fig. P3.76, um conjunto cilindro-pistão equipado com esbarros contém 0,1 kg de água, inicialmente a 1 MPa, 500°C. A água passa por dois processos em série:

**Processo 1-2:** resfriamento a pressão constante até que a face do pistão pare ao atingir os esbarros. O volume ocupado pela água é então metade do seu volume inicial.

**Processo 2-3:** com a face do pistão em repouso sobre os esbarros, a água é resfriada até 25°C.

Esboce os dois processos em série em um diagrama  $p-v$ . Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine para cada processo o trabalho e o calor transferido, ambos em kJ.

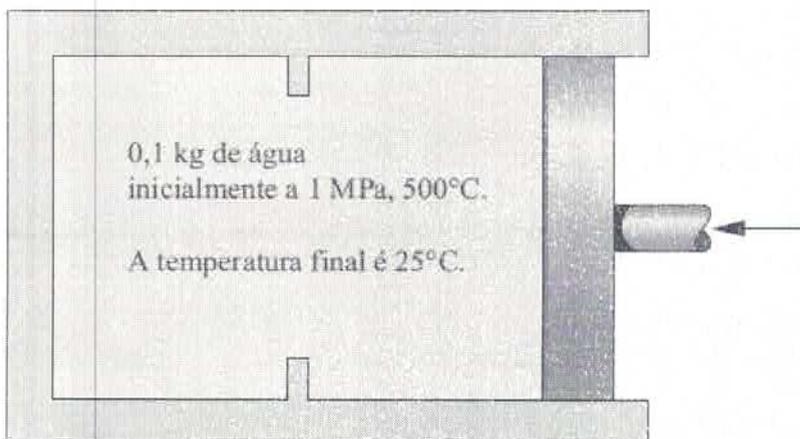


Fig. P3.76

3.77 Uma mistura bifásica líquido-vapor de  $H_2O$ , inicialmente com  $x = 30\%$  e uma pressão de 100 kPa, está contida em um conjunto cilindro-pistão, como ilustrado na Fig. P3.77. A massa do pistão é de 10 kg, e ele possui 15 cm de diâmetro. A pressão da vizinhança é de 100 kPa. À medida que a água é aquecida a pressão no interior do cilindro permanece constante até que o pistão atinge os esbarros. A transferência de calor para a água continua, a volume constante, até que a pressão atinja 150 kPa. O atrito entre o pistão e as paredes do cilindro e os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Para o processo global relativo à água, determine o trabalho e o calor transferido, ambos em kJ.

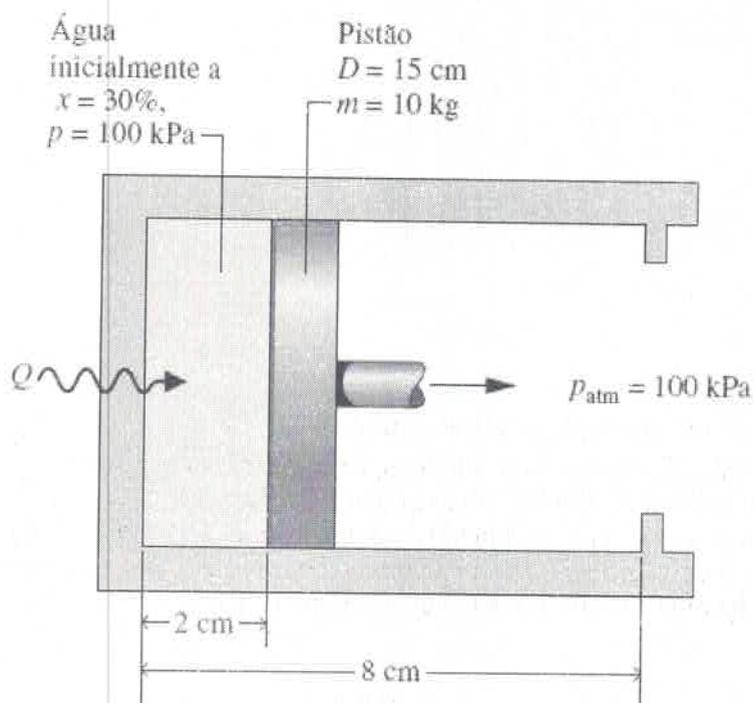


Fig. P3.77

3.78 Um sistema que consiste em 1 kg de  $H_2O$  é submetido a um ciclo de potência composto pelos seguintes processos:

**Processo 1-2:** aquecimento isocórico desde  $p_1 = 5$  bar e  $T_1 = 160^\circ\text{C}$  até  $p_2 = 10$  bar.

**Processo 2-3:** resfriamento isobárico até o estado de vapor saturado.

**Processo 3-4:** resfriamento isocórico até  $T_4 = 160^\circ\text{C}$ .

**Processo 4-1:** expansão isotérmica com  $Q_{41} = 815,8$  kJ.

Esboce o ciclo em diagramas  $p-v$  e  $T-v$ . Desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine a eficiência térmica.

3.79 Uma libra de ar contida em um conjunto cilindro-pistão é submetida ao ciclo de potência ilustrado na Fig. P3.79. Para cada um dos quatro processos, calcule o trabalho e o calor transferido, ambos em Btu. Determine a eficiência térmica do ciclo.

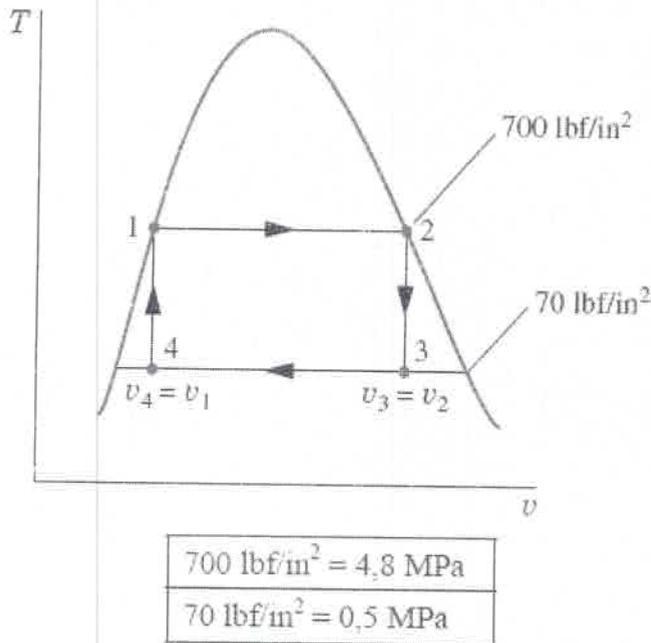


Fig. P3.79

**3.80** Um conjunto cilindro-pistão contém 0,5 kg de Refrigerante 22, inicialmente como vapor saturado a 5 bar. O refrigerante passa por um processo no qual a relação pressão-volume específico é dada por  $pv = \text{constante}$  até uma pressão final de 20 bar. Os efeitos das energias cinética e potencial podem ser desprezados. Determine o trabalho e a quantidade de calor trocada para o processo, ambos em kJ.

**3.81** Dez quilogramas de Refrigerante 22 contidos em um conjunto cilindro-pistão passam por um processo no qual a relação pressão-volume específico é dada por  $pv^n = \text{constante}$ . Os estados inicial e final do refrigerante são determinados por  $p_1 = 400 \text{ kPa}$ ,  $T_1 = -5^\circ\text{C}$ , e  $p_2 = 2000 \text{ kPa}$ ,  $T_2 = 70^\circ\text{C}$ , respectivamente. Determine o trabalho e a quantidade de calor transferida para o processo, ambos em kJ.

**3.82** Um conjunto cilindro-pistão contém amônia, inicialmente a 0,8 bar e  $-10^\circ\text{C}$ . A amônia é comprimida até uma pressão de 5,5 bar. Durante o processo, a pressão e o volume específico estão relacionados por  $pv = \text{constante}$ . Para 20 kg de amônia, determine o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ.

**3.83** Um conjunto cilindro-pistão contém propano, inicialmente a  $27^\circ\text{C}$ , 1 bar, e um volume de  $0,2 \text{ m}^3$ . O propano é submetido a um processo em que a pressão final é de 4 bar, para o qual a relação pressão-volume é  $pV^{1,1} = \text{constante}$ . Determine o trabalho e a transferência de calor para o propano, ambos em kJ. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis.

**3.84** A Fig. P3.84 mostra um conjunto cilindro-pistão no qual atua uma mola. O cilindro contém água, inicialmente a  $1000^\circ\text{F}$  ( $537,8^\circ\text{C}$ ), e a mola está no vácuo. A face do pistão, cuja área é de  $20 \text{ in}^2$  ( $0,01 \text{ m}^2$ ), se encontra inicialmente em  $x_1 = 20 \text{ in}$  ( $0,51 \text{ m}$ ). A água é resfriada até que a face do pistão atinja  $x_2 = 16 \text{ in}$  ( $0,41 \text{ m}$ ). A força exercida pela mola varia linearmente com  $x$  de acordo com a expressão  $F_{\text{mola}} = kx$ , em que  $k = 200 \text{ lbf/in}$  ( $35,0 \text{ kN/m}$ ). O atrito entre o pistão e o cilindro é desprezível. Para a água, determine

- (a) as pressões inicial e final, ambas em  $\text{lbf/in}^2$ .
- (b) a quantidade de água presente, em lb.
- (c) o trabalho, em Btu.
- (d) a transferência de calor, em Btu.

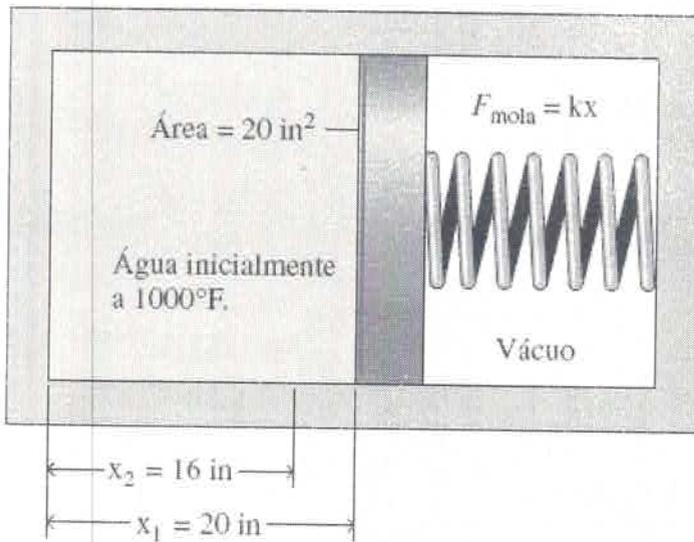


Fig. P3.84

3.85 Conforme ilustrado na Fig. P3.85, um conjunto cilindro-pistão contém 0,5 kg de amônia, inicialmente a  $T_1 = 20^\circ\text{C}$  e um título de 25%. Conforme a amônia é lentamente aquecida até o estado final, em que  $T_2 = 20^\circ\text{C}$  e  $p_2 = 0,6 \text{ MPa}$ , sua pressão varia linearmente com o volume específico. Os efeitos das energias cinética e potencial não são significativos. Para a amônia, (a) mostre o processo em um diagrama  $p$ - $v$  e (b) determine o trabalho e a quantidade de calor transferida, ambos em kJ.

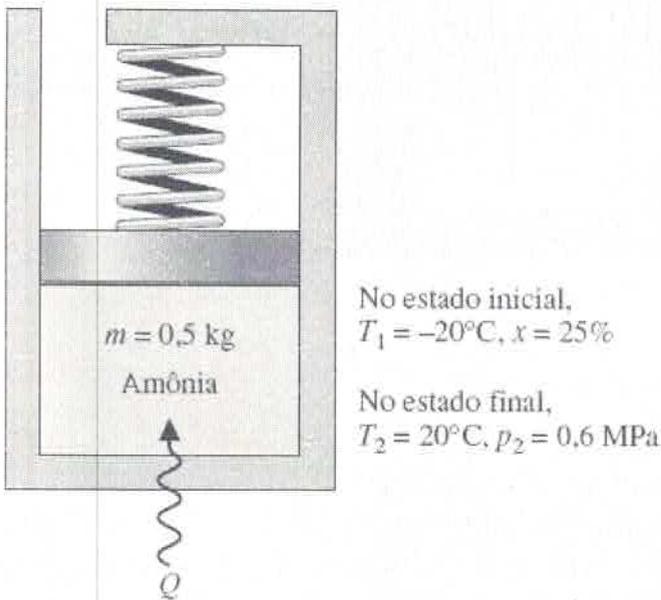
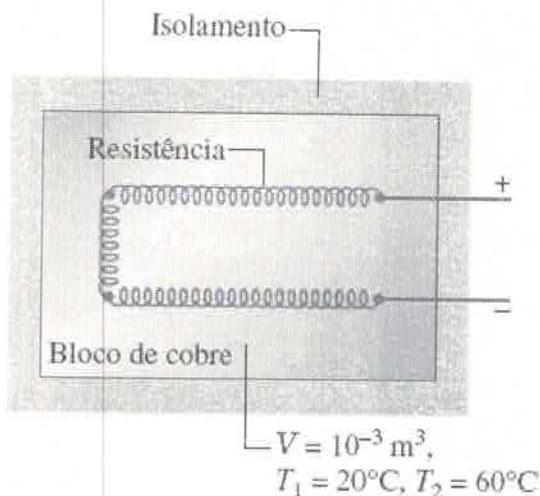


Fig. P3.85

3.86 Um galão de leite a  $68^\circ\text{F}$  ( $20^\circ\text{C}$ ) é colocado em um refrigerador. Se a energia for removida do leite por transferência de calor a uma taxa constante de  $0,08 \text{ Btu/s}$  ( $84,4 \text{ W}$ ) quanto tempo levaria, em minutos, para o leite ser resfriado até  $40^\circ\text{F}$  ( $4,4^\circ\text{C}$ )? O calor específico e a massa específica do leite são  $0,94 \text{ Btu/lb} \cdot ^\circ\text{R}$  ( $3,9 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$ ) e  $64 \text{ lb/ft}^3$  ( $1025,2 \text{ kg/m}^3$ ), respectivamente.

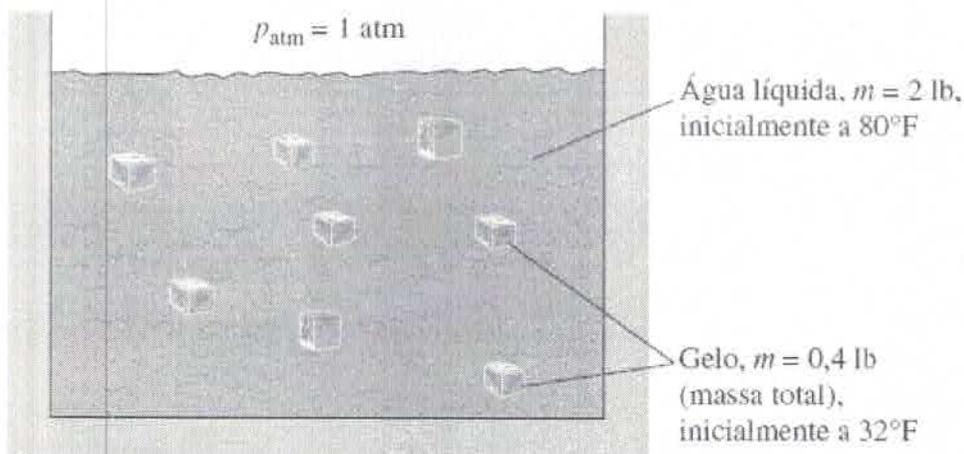
3.87 A Fig. P3.87 mostra um bloco de cobre isolado que recebe energia a uma taxa de  $100 \text{ W}$  de uma resistência embutida. Se o bloco possui um volume de  $10^{-3} \text{ m}^3$  e uma temperatura inicial de  $20^\circ\text{C}$ , quanto tempo levaria, em minutos, para a temperatura alcançar  $60^\circ\text{C}$ ? Os dados para o cobre são fornecidos na Tabela A-19.

**3.88** Em um processo de tratamento térmico denominado têmpera, uma peça de metal de 1 kg, inicialmente a 1075 K, é tratada em um tanque fechado contendo 100 kg de água, inicialmente a 295 K. A transferência de calor entre o conteúdo do tanque e sua vizinhança é desprezível. Modelando a peça de metal e a água como incompressível e com calores específicos constantes correspondentes a 0,5 kJ/kg · K e 4,4 kJ/kg · K, respectivamente, determine a temperatura final de equilíbrio, após a têmpera, em K.



**Fig. P3.87**

**3.89** Conforme ilustrado na Fig. P3.89, um tanque aberto para a atmosfera contém 2 lb (0,9 kg) de água líquida a 80°F (26,7°C) e 0,4 lb (0,2 kg) de gelo a 32°F (0°C). Todo o gelo se funde conforme o conteúdo do tanque atinge o equilíbrio. Considerando que a transferência de calor entre o conteúdo do tanque e sua vizinhança é desprezível, determine a temperatura final de equilíbrio, em °F. A variação da entalpia específica da água para a mudança de fase de sólido para líquido a 32°F e 1 atm é de 144 Btu/lb (334,9 kJ/kg).



**Fig. P3.89**

**3.90** Conforme ilustrado na Fig. P3.90, um sistema consiste em um tanque de cobre com massa de 13 kg, 4 kg de água líquida e uma resistência elétrica de massa desprezível. O sistema possui sua superfície externa isolada. Inicialmente a temperatura do cobre é 27°C e a temperatura da água é 50°C. A resistência elétrica transfere 100 kJ de energia para o sistema. Finalmente, o sistema atinge o equilíbrio. Determine a temperatura final de equilíbrio, em °C?

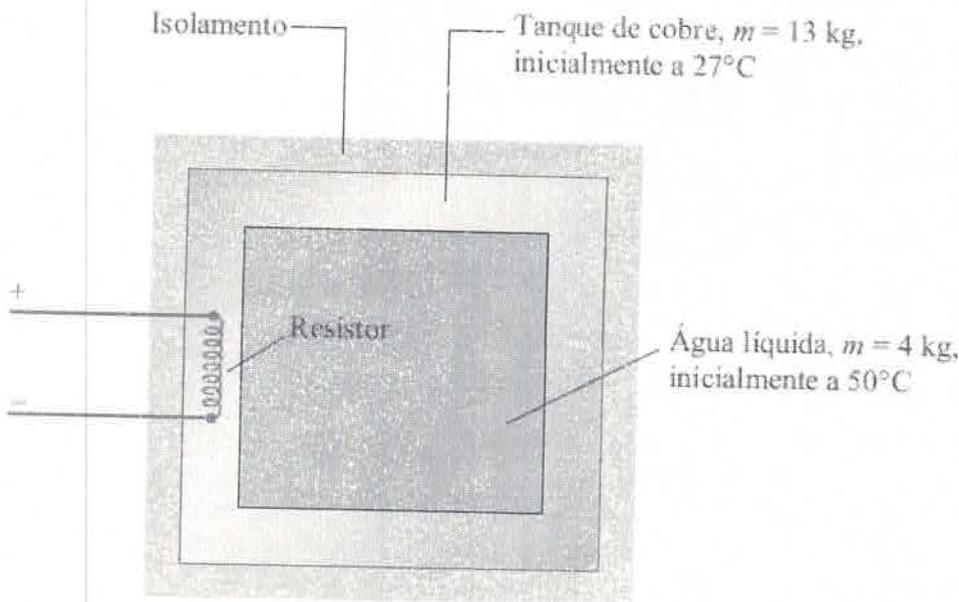


Fig. P3.90

3.91 Conforme ilustrado na Fig. P3.91, um tanque isolado fechado contém  $0,15 \text{ kg}$  de água líquida e possui uma base de  $0,25 \text{ kg}$  de cobre. As paredes finas do reservatório possuem massa desprezível. Inicialmente, o tanque e o seu conteúdo estão ambos a  $30^\circ\text{C}$ . Um elemento de aquecimento inserido na base de cobre é energizado com uma corrente elétrica de  $10 \text{ ampères}$  a uma voltagem de  $12 \text{ V}$  por  $100 \text{ segundos}$ . Determine a temperatura final do tanque e do seu conteúdo, em  $^\circ\text{C}$ . Os dados para o cobre e a água líquida são fornecidos na Tabela A-19.

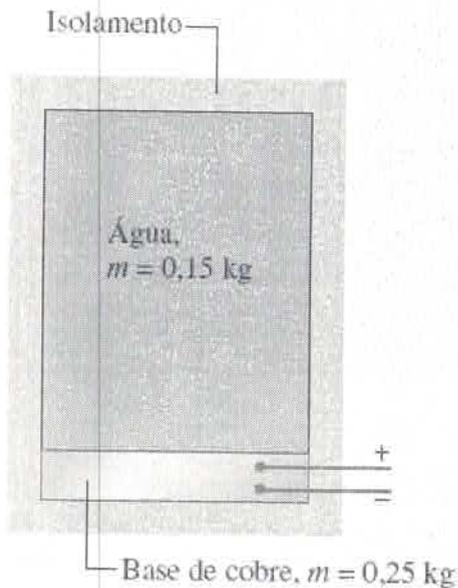


Fig. P3.91

### Utilizando Dados de Compressibilidade Generalizada

3.92 Determine o volume, em  $\text{m}^3$ , ocupado por  $2 \text{ kg}$  de  $\text{H}_2\text{O}$  a  $100 \text{ bar}$  e  $400^\circ\text{C}$ , utilizando:

- dados de compressibilidade generalizada (tabelas ou gráficos).
- dados das tabelas de vapor.

Compare os resultados e discuta.

**3.93** Um sistema fechado contendo 5 kmol de  $O_2$  é submetido a um processo entre  $p_1 = 50$  bar e  $T_1 = 170$  K até  $p_2 = 25$  bar e  $T_2 = 200$  K. Determine a variação de volume em  $m^3$ .

**3.94** Monóxido de carbono (CO) com 150 lb (68,0 kg) de massa ocupa um determinado volume a  $500^\circ R$  ( $4,6^\circ C$ ) e  $3500$  lbf/in<sup>2</sup> (24,1 MPa). Determine o volume, em ft<sup>3</sup>.

**3.95** Determine a temperatura, em  $^\circ F$ , do etano ( $C_2H_6$ ) a  $500$  lbf/in<sup>2</sup> (3,4 MPa) e um volume específico de  $0,4$  ft<sup>3</sup>/lb ( $0,02$  m<sup>3</sup>/kg).

**3.96** Um tanque contém  $2$  m<sup>3</sup> de ar a  $-93^\circ C$  e uma pressão manométrica de  $1,4$  MPa. Determine a massa do ar, em kg. A pressão atmosférica local é de  $1$  atm.

**3.97** Butano ( $C_4H_{10}$ ) em um conjunto cilindro-pistão é submetido a uma compressão isotérmica a  $173^\circ C$  de  $p_1 = 1,9$  MPa até  $p_2 = 2,5$  MPa. Determine o trabalho, em kJ/kg.

**3.98** Cinco quilogramas de butano ( $C_4H_{10}$ ) em um conjunto cilindro-pistão são submetidos a um processo de  $p_1 = 5$  MPa,  $T_1 = 500$  K para  $p_2 = 3$  MPa, durante o qual a relação entre a pressão e o volume específico é  $pv = \text{constante}$ . Determine o trabalho, em kJ.

**3.99** Para uma aplicação criogênica, monóxido de carbono (CO) é submetido a um processo isobárico a  $1000$  lbf/in<sup>2</sup> ( $6894,76$  kPa) em um conjunto pistão-cilindro entre  $T_1 = 100^\circ F$  ( $37,8^\circ C$ ) até  $T_2 = -30^\circ F$  ( $-34,5^\circ C$ ). Determine o trabalho realizado durante o processo, em Btu por lb de CO.

### Trabalhando com o Modelo de Gás Ideal

**3.100** Para que intervalos de pressão e temperatura o ar pode ser considerado um gás ideal? Explique sua resposta. Repita para  $H_2O$ .

**3.101** Um tanque contém  $0,5$  m<sup>3</sup> de nitrogênio ( $N_2$ ) a  $-71^\circ C$  e  $1356$  kPa. Determine a massa de nitrogênio, em kg, utilizando

(a) o modelo de gás ideal.

(b) dados do diagrama de compressibilidade.

Comente sobre a aplicabilidade do modelo de gás ideal para o nitrogênio nesse estado.

**3.102** Determine o erro percentual relacionado com a utilização do modelo de gás ideal na determinação do volume específico de

(a) vapor d'água a  $4000$  lbf/in<sup>2</sup> (27,6 MPa),  $1000^\circ F$  ( $537,8^\circ C$ ).

(b) vapor d'água a  $5$  lbf/in<sup>2</sup> (34,5 kPa),  $250^\circ F$  ( $121,1^\circ C$ ).

(c) amônia a  $40$  lbf/in<sup>2</sup> (275,8 kPa),  $60^\circ F$  ( $15,6^\circ C$ ).

(d) ar a  $1$  atm,  $560^\circ R$  ( $38,0^\circ C$ ).

(e) Refrigerante 134a a  $300$  lbf/in<sup>2</sup> (2,1 MPa),  $180^\circ F$  ( $82,2^\circ C$ ).

**3.103** Verifique a aplicabilidade do modelo de gás ideal

(a) para a água a  $800^{\circ}\text{F}$  ( $371,1^{\circ}\text{C}$ ) nas pressões de  $900\text{ lbf/in}^2$  e  $100\text{ lbf/in}^2$ .

(b) para o nitrogênio a  $-20^{\circ}\text{C}$  nas pressões de  $75\text{ bar}$  e  $1\text{ bar}$ .

**3.104** Determine o volume específico, em  $\text{m}^3/\text{kg}$ , do Refrigerante 134a a  $16\text{ bar}$ ,  $100^{\circ}\text{C}$ , usando

(a) a Tabela A-12.

(b) a Figura A-1.

(c) a equação de estado de gás ideal.

Compare os valores obtidos nos itens (b) e (c) com o obtido no item (a).

**3.105** Determine o volume específico, em  $\text{m}^3/\text{kg}$ , da amônia a  $50^{\circ}\text{C}$ ,  $10\text{ bar}$ , usando

(a) a Tabela A-15.

(b) a Figura A-1.

(c) a equação de estado de gás ideal.

Compare os valores obtidos nos itens (b) e (c) com o obtido no item (a).

**3.106** Um tanque rígido fechado contém um gás que se comporta como gás ideal, inicialmente a  $27^{\circ}\text{C}$  e com uma pressão manométrica de  $300\text{ kPa}$ . O gás é aquecido, e a pressão manométrica no estado final é  $367\text{ kPa}$ . Determine a temperatura final, em  $^{\circ}\text{C}$ . A pressão atmosférica local é de  $1\text{ atm}$ .

**3.107** O ar em um recinto medindo  $8\text{ ft} \times 9\text{ ft} \times 12\text{ ft}$  ( $2,4\text{ m} \times 2,7\text{ m} \times 3,7\text{ m}$ ) está a  $80^{\circ}\text{F}$  ( $26,7^{\circ}\text{C}$ ) e  $1\text{ atm}$ . Determine a massa de ar, em  $\text{lb}$ , e seu peso, em  $\text{lbf}$ , se  $g = 32,0\text{ ft/s}^2$  ( $9,7\text{ m/s}^2$ ).

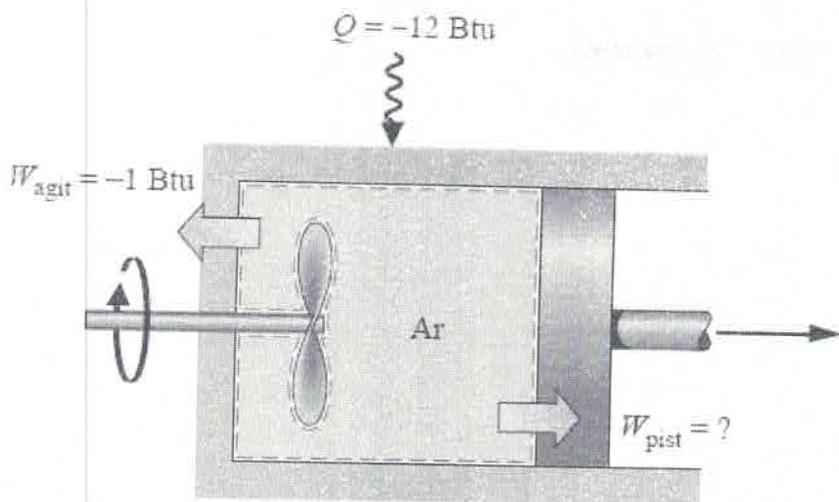
**3.108** Determine a massa total de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ), em  $\text{kg}$ , necessária para inflar os quatro pneus de um veículo, cada um com a pressão manométrica de  $180\text{ kPa}$  na temperatura de  $25^{\circ}\text{C}$ . O volume de cada pneu é de  $0,6\text{ m}^3$ , e a pressão atmosférica é de  $1\text{ atm}$ .

**3.109** Utilizando a Tabela A-18, determine a temperatura, em  $\text{K}$  e  $^{\circ}\text{C}$ , do propano em um estado em que a pressão é de  $2\text{ bar}$  e o volume específico é de  $0,307\text{ m}^3/\text{kg}$ . Compare com as temperaturas, em  $\text{K}$  e  $^{\circ}\text{C}$ , respectivamente, obtidas usando a Fig. A-1. Comente.

**3.110** Um balão com hélio em seu interior, inicialmente a  $27^{\circ}\text{C}$  e  $1\text{ bar}$ , é solto e sobe na atmosfera até que o hélio atinja  $17^{\circ}\text{C}$  e  $0,9\text{ bar}$ . Determine a variação percentual de volume do hélio partindo do seu volume inicial.

### Utilizando Conceitos de Energia e o Modelo de Gás Ideal

**3.111** Conforme ilustrado na Fig. P3.111, um conjunto cilindro-pistão equipado com um agitador contém ar, inicialmente a  $p_1 = 30\text{ lbf/in}^2$  ( $206,8\text{ kPa}$ ),  $T_1 = 540^{\circ}\text{F}$  ( $282,2^{\circ}\text{C}$ ) e  $V_1 = 4\text{ ft}^3$  ( $0,11\text{ m}^3$ ). O ar passa por um processo até um estado final em que  $p_2 = 20\text{ lbf/in}^2$  ( $137,9\text{ kPa}$ ) e  $V_2 = 4,5\text{ ft}^3$  ( $0,13\text{ m}^3$ ). Durante o processo, o agitador transfere energia para o ar por trabalho na quantidade de  $1\text{ Btu}$  ( $1,1\text{ kJ}$ ), enquanto o ar transfere energia por trabalho para o pistão na quantidade de  $12\text{ Btu}$ . Admitindo que o ar se comporta como um gás ideal, determine (a) a temperatura no estado 2, em  $^{\circ}\text{R}$ , e (b) a transferência de calor, do ar para o pistão, em  $\text{Btu}$ .



No estado inicial,  $p_1 = 30 \text{ lbf/in}^2$ ,  $T_1 = 540^\circ\text{F}$ ,  $V_1 = 4 \text{ ft}^3$ .

No estado final,  $p_2 = 20 \text{ lbf/in}^2$ ,  $V_2 = 4,5 \text{ ft}^3$ .

Fig. P3.111

3.112 Um conjunto cilindro-pistão contém ar, inicialmente a 2 bar, 300 K, e  $2 \text{ m}^3$  de volume. O ar passa por um processo a um estado em que a pressão é de 1 bar, durante o qual a relação pressão-volume é dada por  $pV = \text{constante}$ . Admitindo comportamento de gás ideal para o ar, determine a massa de ar, em kg, o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ.

3.113 Um conjunto cilindro-pistão contém ar, inicialmente a 2 bar, 200 K, e 1 litro de volume, passa por um processo a um estado final em que a pressão é de 8 bar e o volume é de 2 litros. Durante o processo, a relação pressão-volume é linear. Admitindo comportamento de gás ideal para o ar, determine o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ.

3.114 Dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) contido em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente a 6 bar e 400 K, passa por um processo de expansão a uma temperatura final de 298 K, durante o qual a relação pressão-volume é dada por  $pV^{1,2} = \text{constante}$ . Admitindo comportamento de gás ideal para o  $\text{CO}_2$ , determine a pressão final, em bar, o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ/kg.

3.115 Vapor d'água contido no interior de um conjunto cilindro-pistão passa por um processo isotérmico de expansão a  $240^\circ\text{C}$ , de uma pressão de 7 bar até uma pressão de 3 bar. Determine o trabalho, em kJ/kg. Resolva de dois modos: usando (a) o modelo de gás ideal, (b) o IT ou um programa similar com os dados da água/vapor d'água. Comente.

3.116 Um sistema pistão-cilindro contém 2 kg de oxigênio conforme ilustrado na Fig. P3.116. Não há atrito entre os componentes do sistema mecânico e a pressão externa é 1 atm. O volume inicial é  $2 \text{ m}^3$  e a pressão no interior do cilindro 1 atm. Ocorre transferência de calor até que o volume seja o dobro do inicial. Determine a quantidade de calor transferido ao sistema, em kJ, assumindo  $k = 1,35$  e ignorando efeitos de energia cinética e potencial.

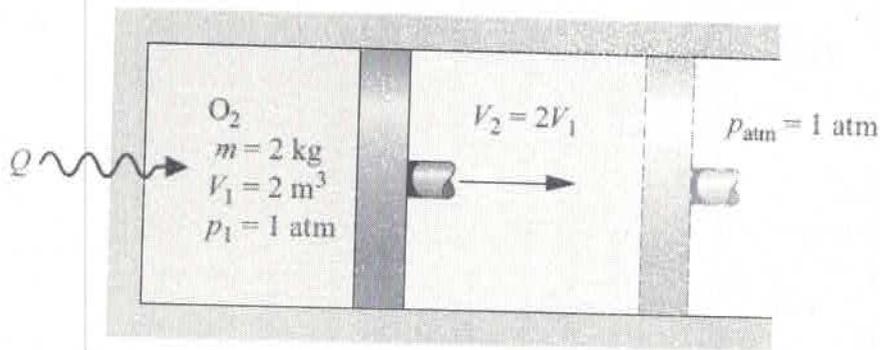


Fig. P3.116

3.117 Como mostrado na Fig. P3.117, um volume de  $20 \text{ ft}^3$  ( $0,57 \text{ m}^3$ ) de ar a  $T = 600^\circ\text{R}$  ( $60,18^\circ\text{C}$ ) e  $100 \text{ lbf/in}^2$  ( $68,95 \text{ kPa}$ ) é submetido a um processo politrópico de expansão até uma pressão final de  $51,4 \text{ lbf/in}^2$  ( $354,39 \text{ kPa}$ ). O processo segue a relação  $pV^{1,2} = \text{constante}$ . O trabalho envolvido é  $W = 194,34 \text{ Btu}$  ( $205,04 \text{ kJ}$ ). Assumindo um comportamento ideal para o ar e desprezando efeitos de energia cinética e potencial, determine:

(a) a massa do ar, em lb, e a temperatura final, em  $^\circ\text{R}$ .

(b) o calor transferido, em Btu.

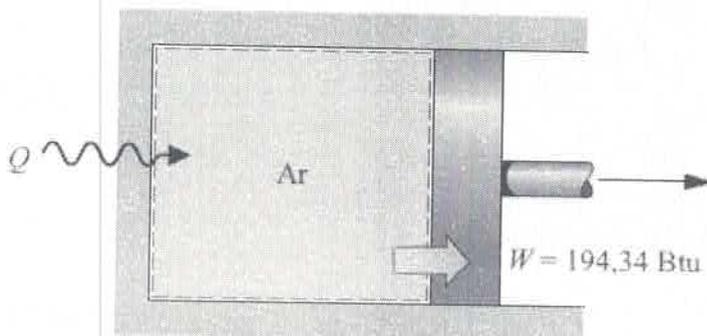
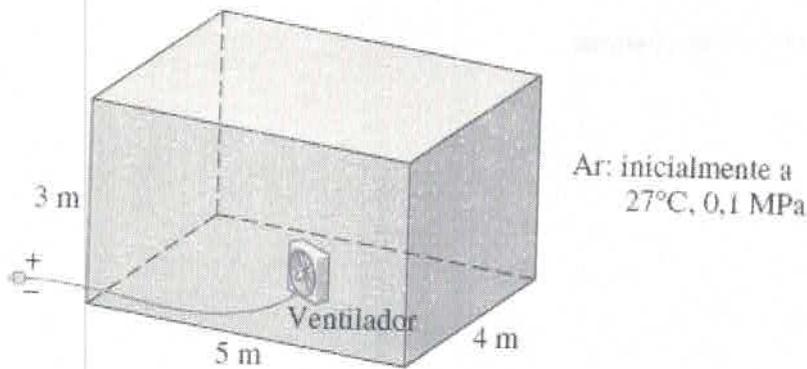


Fig. P3.117

3.118 Um conjunto cilindro-pistão contém ar a uma pressão de  $30 \text{ lbf/in}^2$  ( $206,8 \text{ kPa}$ ) e um volume de  $0,75 \text{ ft}^3$  ( $0,02 \text{ m}^3$ ). O ar é aquecido a pressão constante até que o seu volume seja duplicado. Admitindo o modelo de gás ideal para o ar, com a razão de calores específicos constante, dada por  $k = 1,4$ , determine o trabalho e a quantidade de calor transferida, ambos em Btu.

3.119 Conforme ilustrado na Fig. P3.119, um ventilador movido a eletricidade a uma taxa de  $1,5 \text{ kW}$  se encontra no interior de um recinto medindo  $3 \text{ m} \times 4 \text{ m} \times 5 \text{ m}$ . O recinto contém ar, inicialmente a  $27^\circ\text{C}$  e  $0,1 \text{ MPa}$ . O ventilador opera em regime permanente por 30 minutos. Admitindo o modelo de gás ideal, determine para o ar (a) a massa, em kg, (b) a temperatura final, em  $^\circ\text{C}$ , e (c) a pressão final, em MPa. Não há transferência de calor entre o recinto e a vizinhança. Ignore o volume ocupado pelo ventilador e admita que não há variação, em termos globais, da energia interna associada ao ventilador.



**Fig. P3.119**

- 3.120** Um tanque rígido fechado equipado com um agitador contém nitrogênio ( $N_2$ ), inicialmente a  $540^\circ R$  ( $26,8^\circ C$ ),  $20 \text{ lbf/in}^2$  ( $137,9 \text{ kPa}$ ) e um volume de  $2 \text{ ft}^3$  ( $0,06 \text{ m}^3$ ). O gás é agitado até que sua temperatura seja de  $760^\circ R$  ( $149,1^\circ C$ ). Durante esse processo ocorre uma transferência de calor de  $1,6 \text{ Btu}$  ( $1,7 \text{ kJ}$ ) de magnitude, do gás para sua vizinhança. Admitindo comportamento de gás ideal, determine para o nitrogênio a massa, em lb, e o trabalho, em Btu. Os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis.
- 3.121** Um tanque rígido fechado equipado com um agitador contém  $0,4 \text{ lb}$  de ar, inicialmente a  $540^\circ R$  ( $26,8^\circ C$ ). O ar é agitado até que sua temperatura seja de  $740^\circ R$  ( $138,0^\circ C$ ). O eixo do agitador gira por  $60$  segundos a  $100 \text{ rpm}$  com um torque aplicado de  $20 \text{ ft} \cdot \text{lbf}$  ( $27,1 \text{ N} \cdot \text{m}$ ). Admitindo que o ar se comporta como um gás ideal, determine o trabalho e a transferência de calor, ambos em Btu. Não ocorrem variações globais com relação as energias cinética e potencial.
- 3.122** Argônio contido em um tanque rígido fechado, inicialmente a  $50^\circ C$ ,  $2 \text{ bar}$  e um volume de  $2 \text{ m}^3$ , é aquecido até a pressão final de  $8 \text{ bar}$ . Admitindo para o argônio, o modelo de gás ideal com  $k = 1,67$ , determine a temperatura final, em  $^\circ C$ , e a transferência de calor, em kJ.
- 3.123** Dez quilogramas de hidrogênio ( $H_2$ ), inicialmente a  $20^\circ C$ , estão contidos em um tanque rígido fechado. Durante uma hora, ocorre uma transferência de calor para o hidrogênio a uma taxa de  $400 \text{ W}$ . Admitindo para o hidrogênio o modelo de gás ideal com  $k = 1,405$ , determine a temperatura final, em  $^\circ C$ .
- 3.124** Conforme ilustrado na Fig. P3.124, um conjunto cilindro-pistão, cujo pistão repousa sobre um conjunto de esbarros, contém  $0,5 \text{ kg}$  do gás hélio inicialmente a  $100 \text{ kPa}$  e  $25^\circ C$ . A massa do pistão e o efeito da pressão atmosférica que atua sobre o pistão são tais que a pressão do gás necessária para levá-lo é de  $500 \text{ kPa}$ . Que quantidade de energia deve ser transferida por calor para o hélio, em kJ, antes que o pistão comece a subir? Admita o comportamento de gás ideal para o hélio, com  $c_p = \frac{5}{2}R$ .

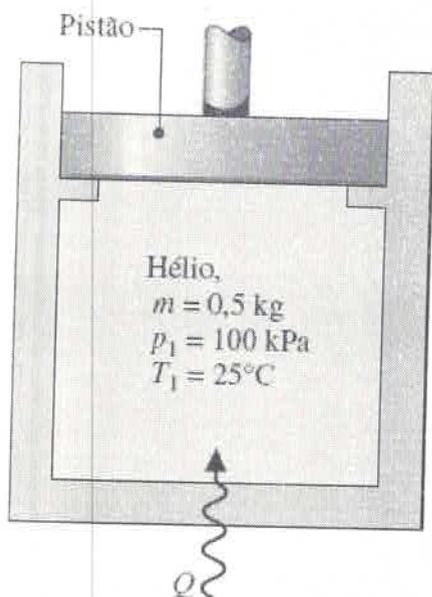


Fig. P3.124

3.125 Um conjunto cilindro-pistão equipado com um agitador girando devagar de modo constante contém 0,13 kg de ar, inicialmente a 300 K. O ar passa por um processo a pressão constante até uma temperatura final de 400 K. Durante o processo, a energia é gradualmente transferida para o ar por transferência de calor na quantidade de 12 kJ. Admitindo que o ar se comporta como um gás ideal com  $k = 1,4$  e que os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis, determine o trabalho realizado (a) pelo agitador sobre o ar e (b) para o ar deslocar o pistão, ambos em kJ.

3.126 Um conjunto cilindro-pistão contém ar. O ar passa por um processo a pressão constante, durante o qual a taxa de transferência de calor para o mesmo é de 0,7 kW. Admitindo para o ar, comportamento de gás ideal com  $k = 1,4$  e que os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis, determine a taxa na qual trabalho é realizado pelo ar sobre o pistão, em kW.

3.127 Conforme ilustrado na Fig. P3.127, um tanque equipado com uma resistência elétrica de massa desprezível mantém 2 kg de nitrogênio ( $N_2$ ) inicialmente a 300 K e 1 bar. Em um período de 10 minutos é fornecida eletricidade para a resistência a uma taxa a 120 volts e com corrente constante de 1 ampère. Considerando comportamento de gás ideal, determine a temperatura final do nitrogênio, em K, e a pressão final, em bar.

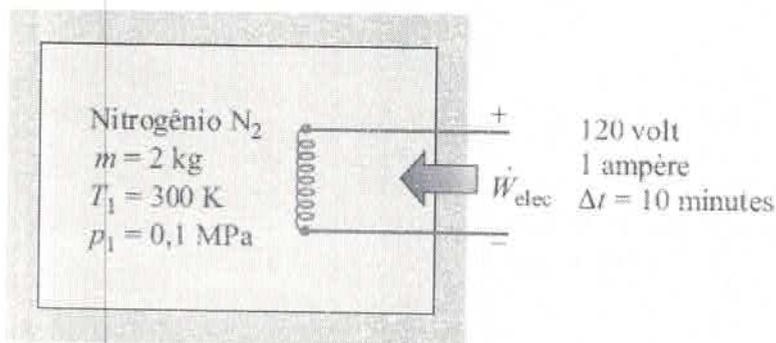
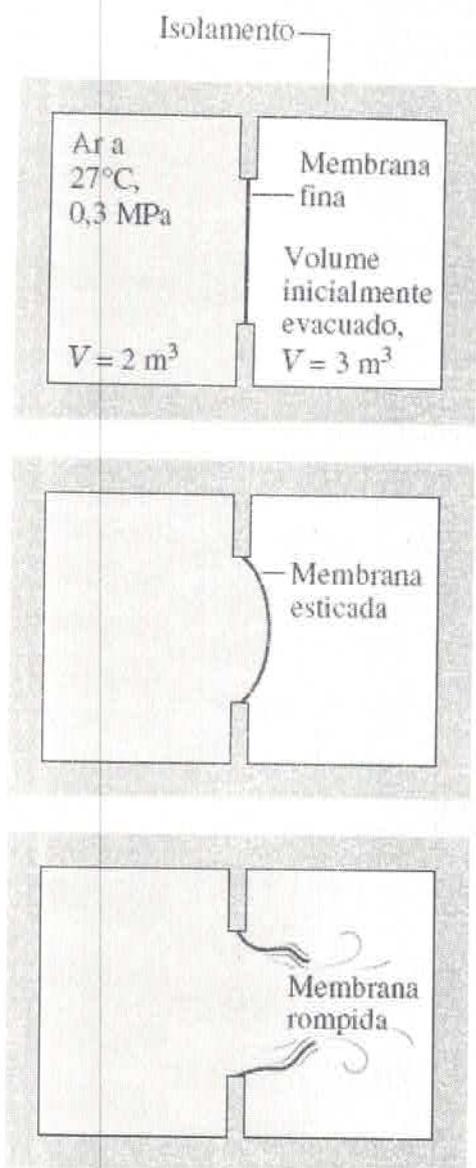


Fig. P3.127

3.128 Um tanque rígido fechado equipado com um agitador contém 0,1 kg de ar, inicialmente a 300 K e 0,1 MPa. O agitador movimentava o ar por 20 minutos, com a potência de acionamento variando em função do tempo de acordo com a expressão  $\dot{W} = -10t$ , em que  $\dot{W}$  está em watts e  $t$  é o tempo em minutos. A temperatura final do ar é de 1060 K. Admitindo comportamento de gás ideal e que não ocorrem variações relativas às energias cinética e potencial,

determine para o ar (a) a pressão final, em MPa, (b) o trabalho, em kJ, e (c) a transferência de calor, em kJ.

**3.129** Conforme ilustrado na Fig. P3.129, um dos lados de um reservatório rígido e isolado mantém  $2 \text{ m}^3$  de ar inicialmente a  $27^\circ\text{C}$  e  $0,3 \text{ MPa}$ . Uma fina membrana separa o ar de um espaço evacuado com  $3 \text{ m}^3$  de volume. Devido à pressão do ar a membrana estica e finalmente se rompe, permitindo que o ar ocupe todo o volume. Admitindo o modelo de gás ideal para o ar, determine (a) a massa do ar, em kg, (b) a temperatura final do ar, em K, e (c) a pressão final do ar, em MPa.



**Fig. P3.129**

**3.130** Ar está confinado por uma divisória em um dos lados de um reservatório rígido e isolado, como mostra a Fig. P3.130. O outro lado está inicialmente evacuado. O ar está inicialmente a:  $p_1 = 5 \text{ bar}$ ,  $T_1 = 500 \text{ K}$  e  $V_1 = 0,2 \text{ m}^3$ . Quando a divisória é retirada, o ar se expande de modo a preencher a totalidade do reservatório. Medidas mostram que  $V_2 = 2V_1$  e  $p_2 = p_1/4$ . Considerando que o ar se comporta como um gás ideal, determine (a) a temperatura final, em K, e (b) a transferência de calor, em kJ.

**3.131** Dois quilogramas de ar, inicialmente a  $5 \text{ bar}$ ,  $350 \text{ K}$ , e  $4 \text{ kg}$  de monóxido de carbono ( $\text{CO}$ ), inicialmente a  $2 \text{ bar}$  e  $450 \text{ K}$ , estão confinados em lados opostos de um reservatório rígido e perfeitamente isolado por meio de uma divisória, como ilustrado na Fig. P3.131. A divisória é livre para se mover e permite condução de um gás para o

outro sem o acúmulo de energia na própria divisória. O ar e o CO se comportam como gases ideais com a razão de calores específicos constante, dada por  $k = 1,395$ . Determine no equilíbrio, (a) a temperatura, em K, (b) a pressão, em bar, e (c) o volume ocupado por cada gás, em  $m^3$ .

**3.132** Conforme ilustrado na Fig. P3.132, 5 g de ar estão contidos em um conjunto cilindro-pistão, cujo pistão repousa sobre um conjunto de esbarros. O ar, inicialmente a 3 bar e 600 K é lentamente resfriado até que o pistão começa a se mover para baixo no cilindro. O ar se comporta como um gás ideal,  $g = 9,81 m/s^2$  e o atrito é desprezível. Esboce o processo do ar em um diagrama  $p$ - $V$  indicando os estados finais da temperatura e da pressão. Determine também a transferência de calor, em kJ, entre o ar e sua vizinhança.

**3.133** Um tanque rígido contém 2 kg de nitrogênio, cercado por um banho térmico de 10 kg de água, como mostrado na Fig. P3.133. Os dados para o estado inicial do nitrogênio e da água estão dispostos na figura. A unidade é isolada termicamente, e o nitrogênio e a água trocam calor até que o equilíbrio térmico seja atingido. A temperatura final medida é  $34,1^\circ C$ . A água pode ser modelada como uma substância incompressível, com  $c = 4,179 kJ/kg \cdot K$  e o nitrogênio como um gás ideal com  $c_v$  constante. A partir dos dados medidos, determine o valor da capacidade calorífica média,  $c_v$ , em  $kJ/kg \cdot K$ .

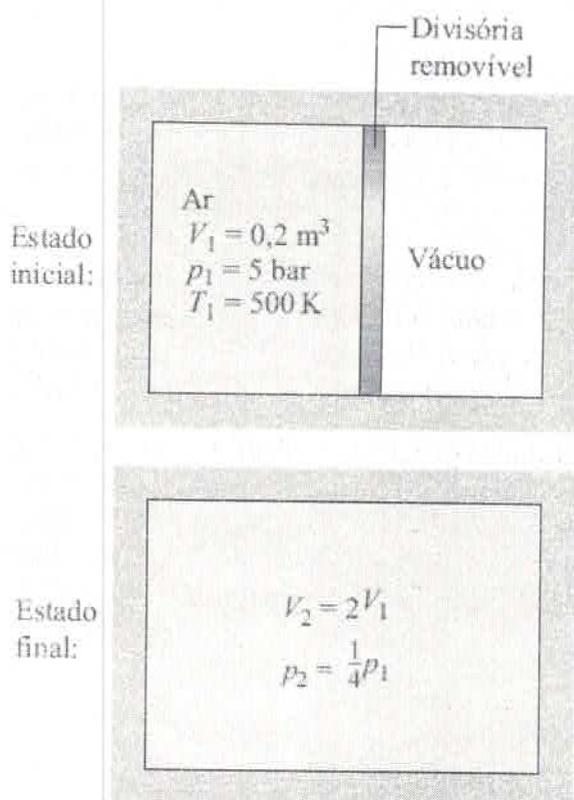


Fig. P3.130

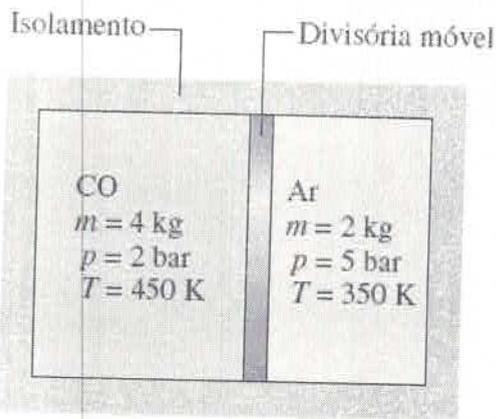


Fig. P3.131

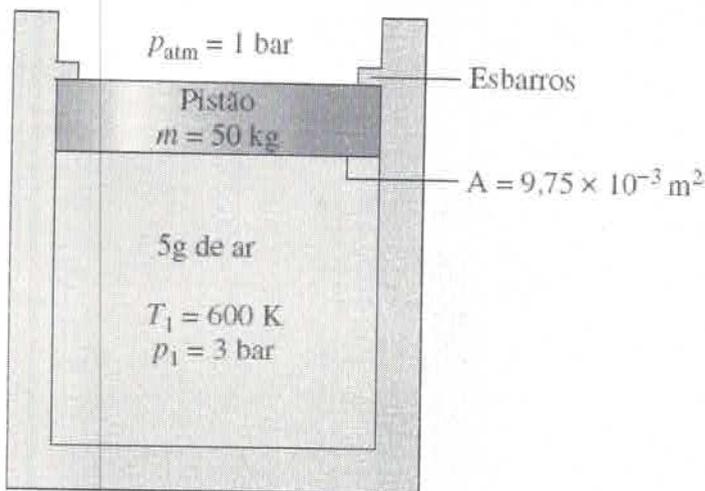


Fig. P3.132

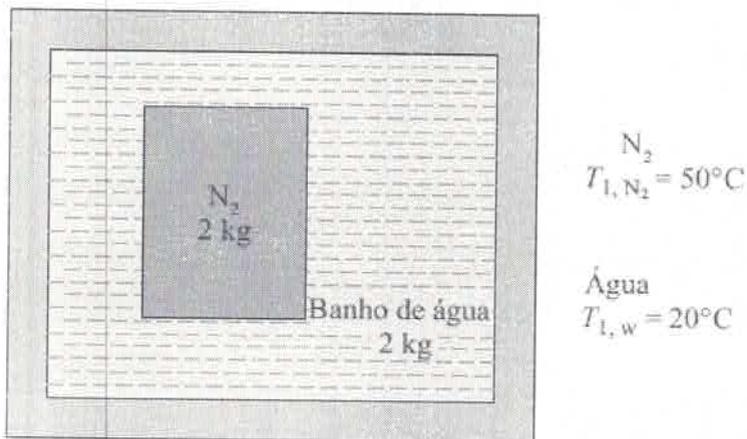


Fig. P3.133

3.134 Conforme ilustrado na Fig. P3.134, um tanque rígido contém inicialmente 3 kg de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) a 500 kPa. O tanque está conectado por uma válvula a um conjunto cilindro-pistão orientado verticalmente e contendo de início  $0,05 \text{ m}^3$  de  $\text{CO}_2$ . Embora a válvula esteja fechada, um pequeno vazamento faz com que o  $\text{CO}_2$  escoe para o interior do cilindro até que a pressão do tanque tenha sido reduzida a 200 kPa. O peso do pistão e a pressão atmosférica mantêm uma pressão constante de 200 kPa no cilindro. Devido à transferência de calor, a temperatura do  $\text{CO}_2$  permanece constante e igual a 290 K ao longo do tanque e do cilindro. Considerando o comportamento de gás

ideal, determine para o  $\text{CO}_2$  o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ.

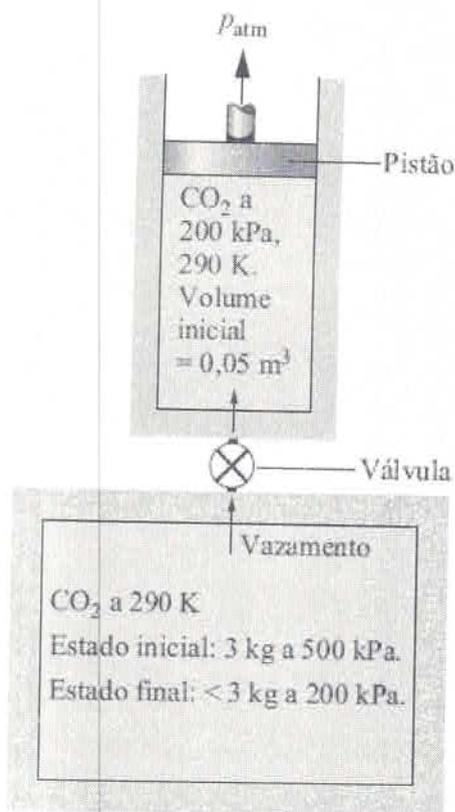


Fig. P3.134

**3.135** Um tanque rígido fechado equipado com um agitador contém 2 kg de ar, inicialmente a 300 K. Durante um intervalo de 5 minutos, o agitador transfere energia para o ar a uma taxa de 1 kW. Durante esse intervalo, o ar também recebe energia por transferência de calor a uma taxa de 0,5 kW. Esses são os únicos modos de transferência de energia. Admitindo comportamento de gás ideal para o ar e que não ocorrem variações relativas às energias cinética e potencial, determine a temperatura final do ar, em K.

**3.136** Conforme ilustrado na Fig. P3.136, um conjunto cilindro-pistão equipado com um agitador contém ar, inicialmente a  $560^\circ\text{R}$  ( $38,0^\circ\text{C}$ ),  $18 \text{ lbf/in}^2$  ( $124,1 \text{ kPa}$ ) e um volume de  $0,29 \text{ ft}^3$  ( $0,01 \text{ m}^3$ ). O agitador transfere energia para o ar na quantidade de 1,7 Btu ( $1,8 \text{ kJ}$ ). O pistão move-se suavemente no cilindro e a transferência de calor entre o ar e sua vizinhança pode ser desprezada. Admitindo que o ar se comporta como um gás ideal, determine sua temperatura final, em  $^\circ\text{R}$ .

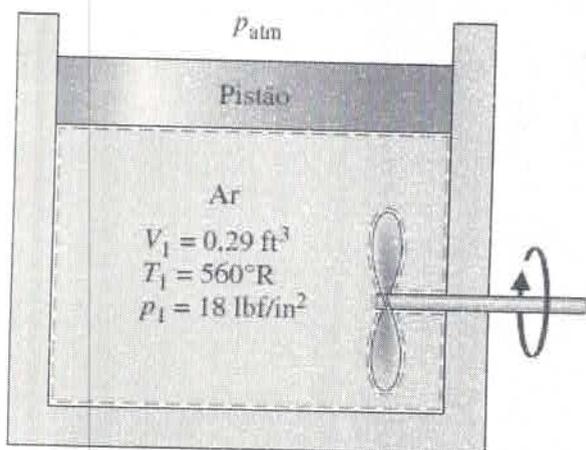


Fig. P3.136

3.137 O dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) é comprimido em um conjunto pistão- cilindro desde  $p_1 = 0,7 \text{ bar}$   $T_1 = 280 \text{ K}$  até  $p_2 = 11 \text{ bar}$ . O volume inicial é  $0,262 \text{ m}^3$ . O processo é descrito por  $pV^{1,25} = \text{constante}$ . Assumindo um comportamento de gás ideal e desprezando efeitos de energia cinética e potencial, determine o trabalho realizado e o calor trocado durante o processo, em kJ, utilizando (a) valores de calor específico a  $300 \text{ K}$  e (b) dados da Tabela A-23. Compare os resultados e discuta.

3.138 Um conjunto pistão-cilindro inicialmente sob  $40 \text{ lbf/in}^2$  ( $275,8 \text{ kPa}$ ) e  $600^\circ\text{R}$  ( $60,18^\circ\text{C}$ ) contém ar, que expande em um processo politrópico com  $n = k = 1,4$  até que o volume seja o dobro do inicial. Assumindo que o gás possa ser modelado como ideal, com capacidade calorífica constante, determine (a) a temperatura final do processo, em  $^\circ\text{R}$  e a pressão, em  $\text{lbf/in}^2$  e (b) o trabalho realizado e o calor trocado, em Btu por lb de ar.

3.139 Ar contido em um conjunto cilindro-pistão é submetido a dois processos em série, conforme ilustrado na Fig. P3.139. Assumindo o comportamento de gás ideal para o ar, determine o trabalho e a quantidade de energia transferida como calor para o processo global, ambos em kJ/kg.

3.140 Um conjunto cilindro-pistão que contém  $0,2 \text{ kmol}$  de nitrogênio ( $\text{N}_2$ ) passa por dois processos em série, como é descrito a seguir:

**Processo 1-2:** pressão constante a  $5 \text{ bar}$  de  $V_1 = 1,33 \text{ m}^3$  até  $V_2 = 1 \text{ m}^3$ .

**Processo 2-3:** volume constante até  $p_3 = 4 \text{ bar}$ .

Considerando comportamento de gás ideal e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, determine o trabalho e o calor transferido para cada processo, em kJ.

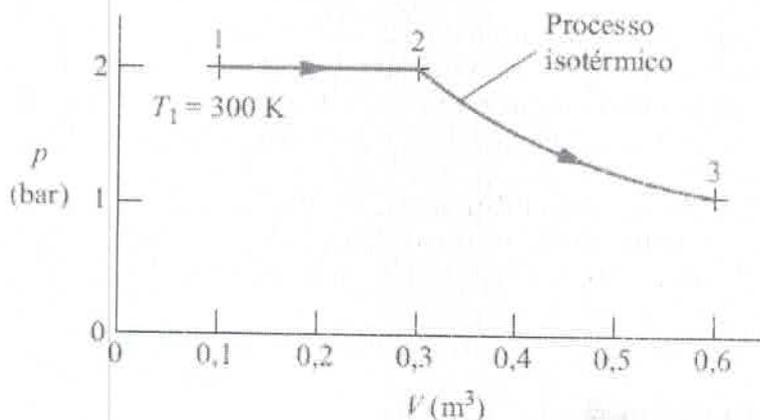


Fig. P3.139

3.141 Um quilograma de ar em um conjunto cilindro-pistão passa por dois processos em série a partir de um estado inicial em que  $p_1 = 0,5 \text{ MPa}$  e  $T_1 = 227^\circ\text{C}$ :

**Processo 1-2:** expansão a temperatura constante até que o volume seja duas vezes o volume inicial.

**Processo 2-3:** aquecimento a volume constante até que a pressão seja novamente  $0,5 \text{ MPa}$ .

Esboce os dois processos em série em um diagrama  $p-v$ . Considerando comportamento de gás ideal, determine (a) a pressão no estado 2, em MPa, (b) a temperatura no estado 3, em  $^\circ\text{C}$ , e para cada um dos processos, e (c) o trabalho e o calor transferido, ambos em kJ.

3.142 Ar contido em um conjunto cilindro-pistão passa pelo ciclo de potência ilustrado na Fig. P3.142. Considerando comportamento de gás ideal para o ar, determine a eficiência térmica do ciclo.

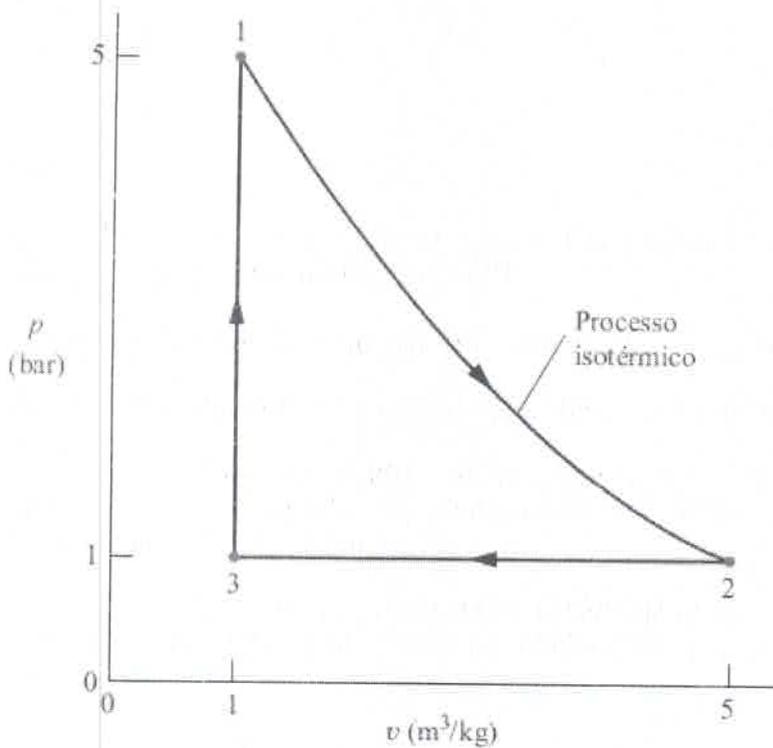


Fig. P3.142

3.143 Uma amostra de  $1 \text{ lb}$  de ar é submetida a um ciclo consistindo nos seguintes processos:

**Processo 1-2:** expansão sob pressão constante com  $p = 20 \text{ lbf/in}^2$  ( $137,9 \text{ kPa}$ ) de  $T_1 = 500^\circ\text{R}$  ( $4,63^\circ\text{C}$ ) até  $v_2 = 1,4 v_1$ .

**Processo 2-3:** compressão adiabática  $v_3 = v_1$  e  $T_3 = 820^\circ\text{R}$  ( $182,406^\circ\text{C}$ ).

**Processo 3-1:** processo sob volume constante.

Represente o ciclo detalhadamente em um diagrama  $p-v$ . Assumindo comportamento de gás ideal, determine a transferência de energia por calor e trabalho em cada processo, em Btu.

3.144 Um conjunto cilindro-pistão contém ar modelado como um gás ideal com razão de calores específicos constante e dada por  $k = 1,4$ . O ar passa por um ciclo de potência composto por quatro processos em série:

**Processo 1-2:** expansão a temperatura constante a 600 K de  $p_1 = 0,5$  MPa até  $p_2 = 0,4$  MPa.

**Processo 2-3:** expansão politrópica com  $n = k$  até  $p_3 = 0,3$  MPa.

**Processo 3-4:** compressão a pressão constante até  $v_4 = v_1$ .

**Processo 4-1:** aquecimento a volume constante.

Esboce o ciclo em um diagrama  $p-v$ . Determine (a) o trabalho e o calor transferido para cada processo, em kJ/kg, e (b) a eficiência térmica.

**3.145** Uma libra de oxigênio,  $O_2$ , é submetida a um ciclo de potência que consiste nos seguintes processos:

**Processo 1-2:** volume constante de  $p_1 = 20$  lbf/in<sup>2</sup> (137,9 kPa),  $T_1 = 500^\circ\text{R}$  ( $4,6^\circ\text{C}$ ) para  $T_2 = 820^\circ\text{R}$  ( $182,4^\circ\text{C}$ ).

**Processo 2-3:** expansão adiabática até  $v_3 = 1,432v_2$ .

**Processo 3-1:** compressão a pressão constante até o estado 1.

Esboce o ciclo em um diagrama  $p-v$ . Considerando comportamento de gás ideal, determine (a) a pressão no estado 2, em lbf/in<sup>2</sup>, (b) a temperatura no estado 3, em  $^\circ\text{R}$ , (c) a quantidade de calor transferido e o trabalho, ambos em Btu, para todos os processos, e (d) a eficiência térmica do ciclo.

**3.146** Um sistema consiste em 2 kg de dióxido de carbono gasoso inicialmente no estado 1, em que  $p_1 = 1$  bar e  $T_1 = 300$  K. O sistema é submetido a um ciclo de potência que consiste nos seguintes processos:

**Processo 1-2:** volume constante até  $p_2 = 4$  bar.

**Processo 2-3:** expansão com  $pv^{1,28} = \text{constante}$ .

**Processo 3-1:** compressão a pressão constante.

Utilizando o modelo de gás ideal e desprezando os efeitos das energias cinética e potencial, (a) esboce o ciclo em um diagrama  $p-v$  e calcule a eficiência térmica; e (b) represente graficamente a relação entre a eficiência térmica e a razão  $p_2/p_1$  para o intervalo de variação de 1,05 a 4.



**3.147** Ar é submetido a um processo politrópico em um conjunto cilindro-pistão de  $p_1 = 1$  bar e  $T_1 = 295$  K até  $p_2 = 7$  bar. O ar é modelado como um gás ideal e os efeitos das energias cinética e potencial são desprezíveis. Para um expoente politrópico de 1,6, determine o trabalho e a transferência de calor, ambos em kJ por kg de ar, (a) assumindo  $c_v$  constante avaliado em 300 K; (b) assumindo calores específicos variáveis.



Utilizando o *IT* ou um programa similar, represente graficamente o trabalho e o calor transferido por unidade de massa de ar, para o expoente politrópico variando de 1,0 a 1,6. Analise o erro introduzido na quantidade de calor transferida pela consideração de  $c_v$  constante.



**3.148** Vapor d'água, inicialmente sob  $700 \text{ lbf/in}^2$  ( $4826,3 \text{ kPa}$ ) e a  $550^\circ\text{F}$  ( $287,8^\circ\text{C}$ ), é submetido a um processo politrópico em um sistema pistão-cilindro até uma pressão final de  $3000 \text{ lbf/in}^2$  ( $20,68 \text{ Mpa}$ ). Considere desprezíveis os efeitos de energia cinética e potencial e determine a transferência de energia por calor, em Btu por lb de vapor d'água, se o expoente do processo politrópico for 1,6, (a) utilizando dados das tabelas de vapor e (b) assumindo comportamento de gás ideal. Utilizando o *IT* ou outro *software*, elabore um gráfico do calor transferido por unidade de massa do vapor para processos politrópicos com expoente variando entre 1,0 e 1,6. Avalie o erro na transferência de calor associado ao emprego do modelo de gás ideal.

### ► PROJETOS E PROBLEMAS EM ABERTO: EXPLORANDO A PRÁTICA DE ENGENHARIA

**3.1P** Cientistas verificaram que, resfriando o ar até a temperatura *criogênica* de  $204^\circ\text{R}$  ( $-159,8^\circ\text{R}$ ), ocorre condensação e o “ar líquido” pode ser estocado em unidades veiculares e utilizado como fonte de energia para o veículo ao evaporar. O líquido é injetado em cilindros e misturado a uma solução anticongelante. A expansão rápida gera uma variação de pressão que pode ser utilizada para deslocar os pistões em um sistema pistão-cilindro e, com isso, o ar frio é descartado do processo. Desenvolva um relatório de pesquisa que explique os princípios que regeriam esse sistema e discuta a viabilidade desta tecnologia para uma potencial comercialização e seus possíveis impactos ambientais. Inclua ao menos três referências.

**3.2P** A Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA – *Environmental Protection Agency*) desenvolveu um procedimento para o cálculo on-line das emissões de gases de efeito estufa que auxilia indivíduos e famílias a reduzir essas emissões. Use a calculadora desenvolvida pela EPA para estimar, em casa e na estrada, suas emissões pessoais de gases de efeito estufa ou as emissões de sua família. Use essa calculadora também para explorar medidas que você como um indivíduo ou sua família podem tomar para reduzir as emissões em pelo menos 20%. Resuma seus resultados em um memorando e apresente o seu planejamento para a redução das emissões.

**3.3P** A pressão a uma profundidade de 400 m em um oceano ou lago é de, aproximadamente 40 atm. Uma empresa canadense está estudando um sistema que visa submergir tanques de concreto vazios dentro dos quais a água sob pressão fluiria até preencher os tanques, passando por turbinas. Essas turbinas gerariam eletricidade que seria utilizada para operar compressores na superfície (do lago ou oceano), os quais atuariam comprimindo ar para geração de potência. As turbinas, então, seriam revertidas e utilizadas como bombas para esvaziar os tanques para que o ciclo pudesse ser repetido. Elabore um relatório técnico que resuma os conceitos por trás dessa tecnologia e seu potencial para aplicação prática.

**3.4P** O Refrigerante 22 se tornou o principal gás de refrigeração utilizado em residências, em bombas de calor e sistemas de ar condicionado, após o *Protocolo de Montreal* banir os refrigerantes CFC em 1987. O R-22 não contém cloro, que é considerado um dos principais agentes de depleção da camada de ozônio e que iniciou o processo de banimento dos CFCs mundialmente. Entretanto, o R-22 encontra-se em uma classe de substâncias denominadas hidrofluorcarbonos (HCFCs), os quais, acredita-se, contribuem para o aquecimento global e potencialmente na depleção da camada de ozônio. Como resultado, os HCFCs também foram banidos e estão em fase de substituição. Escreva um relatório detalhando a agenda americana de substituição do R-22 e liste os refrigerantes que estão sendo utilizados para substituí-lo em sistemas residenciais. Liste ao menos três referências.

**3.5P** Um artigo de jornal informa que no mesmo dia em que uma companhia aérea cancelou 11 voos que partiriam de Las Vegas porque a temperatura local estava próxima do limite operacional de  $117^\circ\text{F}$  ( $47,2^\circ\text{C}$ ) para seus jatos, uma outra cancelou sete voos que partiriam de Denver porque a temperatura local estava acima do nível operacional de  $104^\circ\text{F}$  ( $40^\circ\text{C}$ ) para seus aviões a hélice. Prepare uma apresentação de 30 min, adequada para uma aula de ciências do ensino médio, explicando as considerações técnicas relativas a esses cancelamentos.

**3.6P** O uso de fluidos refrigerantes naturais tem sido muito considerado para aplicações comerciais de refrigeração (veja o boxe da Seção 3.4), uma vez que estes não causam a degradação da camada de ozônio e possuem baixo potencial de aquecimento global. Investigue a viabilidade dos refrigerantes naturais em sistemas para melhorar o conforto humano e conservar alimentos. Considere os benefícios relativos ao desempenho, à segurança e ao custo. Com base em seu estudo, recomende refrigerantes naturais especialmente promissores e áreas de aplicação em que cada um é particularmente bem adaptado. Relate seu estudo em uma apresentação em PowerPoint.

**3.7P** De acordo com a New York City Transit Authority, os trens, quando estão em funcionamento, elevam as temperaturas do túnel e da estação de 14 a 20°F acima da temperatura ambiente. Entre os principais contribuintes para este aumento de temperatura estão a operação do motor do trem, a iluminação e a energia dos próprios passageiros. O desconforto do passageiro pode aumentar significativamente em épocas de estações mais quentes, se o ar condicionado não estiver disponível. Além disso, como as unidades de ar condicionado utilizadas descarregam energia por transferência de calor para a vizinhança, elas contribuem para o problema geral de gestão de energia do túnel e da estação. Investigue a aplicação de estratégias de refrigeração *alternativas* que proporcionem um resfriamento substancial com um mínimo requisito de energia, como o armazenamento térmico e a ventilação noturna, porém não se limite a apenas essas estratégias. Escreva um relatório com pelo menos três referências.

**3.8P** Algumas empresas de petróleo e gás utilizam o *fraturamento hidráulico* para acessar o óleo e o gás natural presos em formações rochosas profundas. Investigue o processo de fraturamento hidráulico, seus benefícios e impactos ambientais. Com base nisso, escreva um resumo de três páginas para ser submetido a um comitê do Congresso considerando se o fraturamento hidráulico deve continuar isento de regulamentação considerando o Ato de Proteção da Água Potável (SDWA – *Safe Drinking Water Act*). O resumo pode fornecer conhecimentos técnicos objetivos aos membros do comitê ou tomar uma posição a favor ou contra, apoiando a isenção.

**3.9P** A água é um dos nossos recursos mais importantes, mas também é um dos mais mal administrados – sendo muitas vezes desperdiçada e poluída. Investigue formas de tornar o uso da água mais eficiente para a sociedade, na indústria, nas empresas e nas residências. Registre o seu uso diário de água por pelo menos três dias e compare-o ao daqueles que vivem nas regiões mais pobres do mundo: cerca de um galão por dia. Escreva um relatório, com pelo menos três referências.

**3.10P** O aquecimento solar passivo poderá se tornar mais eficaz nos próximos anos através da incorporação de materiais de mudança de fase (PCMs – *phasechange materials*) em materiais de construção. Investigue a incorporação de materiais de mudança de fase em produtos usados pela indústria da construção para aumentar o aquecimento solar passivo. Para cada produto, determine o tipo de PCM, o ponto de fusão e a entalpia de mudança de fase correspondente. Discuta como o PCM afeta o desempenho do material de construção e como isto beneficia o aquecimento de ambientes. Prepare uma apresentação em *PowerPoint* de cerca de 25 minutos adequada para uma aula de química com base no seu estudo. Convide pelo menos duas outras pessoas para participar da sua apresentação a fim de enriquecê-la.

---

<sup>1</sup>Para determinar  $Z$  acima de  $T_R$  igual a 5 para o hidrogênio, o hélio e para o neon, a temperatura e a pressão reduzidas devem ser calculadas utilizando-se  $T_R = T/(T_c + 8)$  e  $p_R = p/(p_c + 8)$ , com as temperaturas em K e as pressões em atm.

<sup>2</sup>A expressão simples para a variação de calor específico dada pela Eq. 3.48 é válida apenas para um intervalo limitado de temperatura. Desse modo, valores tabelados de entalpia são calculados a partir da Eq. 3.49 utilizando expressões que permitam que a integral seja avaliada com precisão em intervalos mais amplos de temperatura.



*Bocais, considerados na Seção 4.6, desempenham um papel crucial no combate a incêndios. © shaun/iStockphoto*

**CONTEXTO DE ENGENHARIA** O **objetivo** deste capítulo é desenvolver e ilustrar o uso dos princípios de conservação de massa e de energia nas suas formulações de volume de controle. Os balanços de massa e de energia para volumes de controle são discutidos nas Seções 4.1 e 4.4, respectivamente. Esses balanços são aplicados nas Seções 4.5 a 4.11 para volumes de controle em regime permanente e na Seção 4.12 para aplicações dependentes do tempo (transientes).

Embora dispositivos que permitem fluxo de massa, como turbinas, bombas e compressores, possam em princípio ser analisados estudando-se uma certa quantidade de matéria (um sistema fechado) conforme ela escoar ao longo do dispositivo, é normalmente preferível pensar em uma região do espaço através da qual a massa escoar (um volume de controle). Da mesma maneira que em um sistema fechado, a transferência de energia ao longo da fronteira de um volume de controle pode ocorrer por meio de trabalho e de calor. Além disso, outro tipo de transferência de energia deve ser considerado – a energia que acompanha a massa quando esta entra ou sai.