

Professor: Valter Salles do Nascimento Jr
email: nascimento.valter@usp.br



4º e 5º Semana

- Propriedades de substância pura compressível / Princípio de estado, relação p-v-t / Energia int. específica e entalpia, calores específicos / Propriedades de líquidos e sólidos

Calendário

agosto

d	s	t	q	q	s	s
26	27	28	29	30	31	1
2	3	4	5	6	7	8
9	10	11	12	13	14	15
16	17	18	19	20	21	22
23	24	25	26	27	28	29
30	31	1	2	3	4	5

setembro

d	s	t	q	q	s	s
30	31	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10

outubro

d	s	t	q	q	s	s
27	28	29	30	1	2	3
4	5	6	7	8	9	10
11	12	13	14	15	16	17
18	19	20	21	22	23	24
25	26	27	28	29	30	31
1	2	3	4	5	6	7

novembro

d	s	t	q	q	s	s
1	2	3	4	5	6	7
8	9	10	11	12	13	14
15	16	17	18	19	20	21
22	23	24	25	26	27	28
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12

24 - Aniversário de São Carlos

dezembro

d	s	t	q	q	s	s
29	30	1	2	3	4	5
6	7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18	19
20	21	22	23	24	25	26
27	28	29	30	31	1	2
3	4	5	6	7	8	9

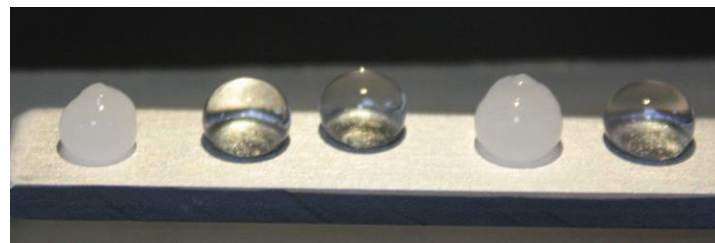
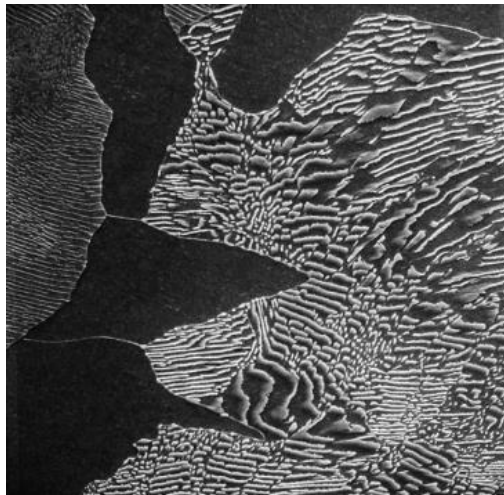
Definições – Fase e Substância Pura

- **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. 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.



Definições - Estado

"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 para avaliar o número de propriedades independentes necessárias para se determinar o estado de um sistema

Princípio dos Estados equivalentes

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 ao 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.**

Relações $p - v - T$

O estudo de propriedades será iniciado através das relações $p - v - T$ para substância pura compressível. A partir de trabalhos experimentais, observou-se que temperatura e volume específico podem ser considerados independentes, e a pressão pode ser determinada em função dessas duas variáveis: $p = (T, v)$

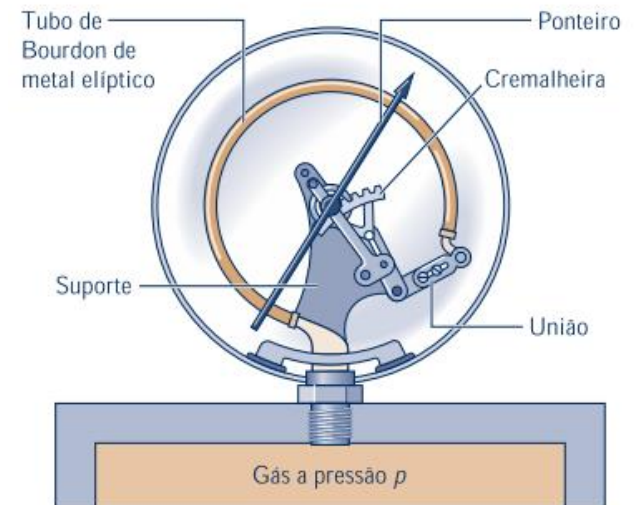
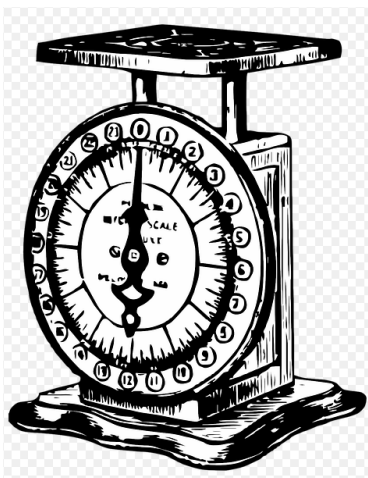
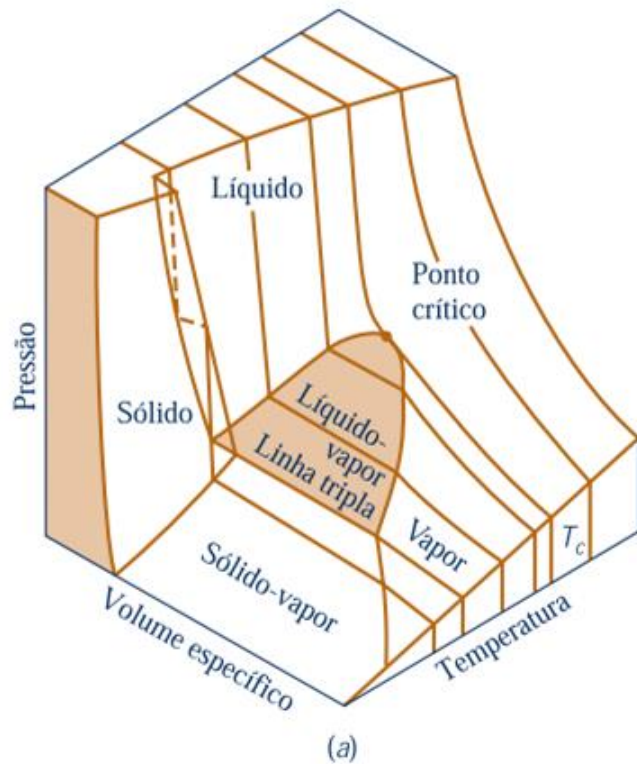
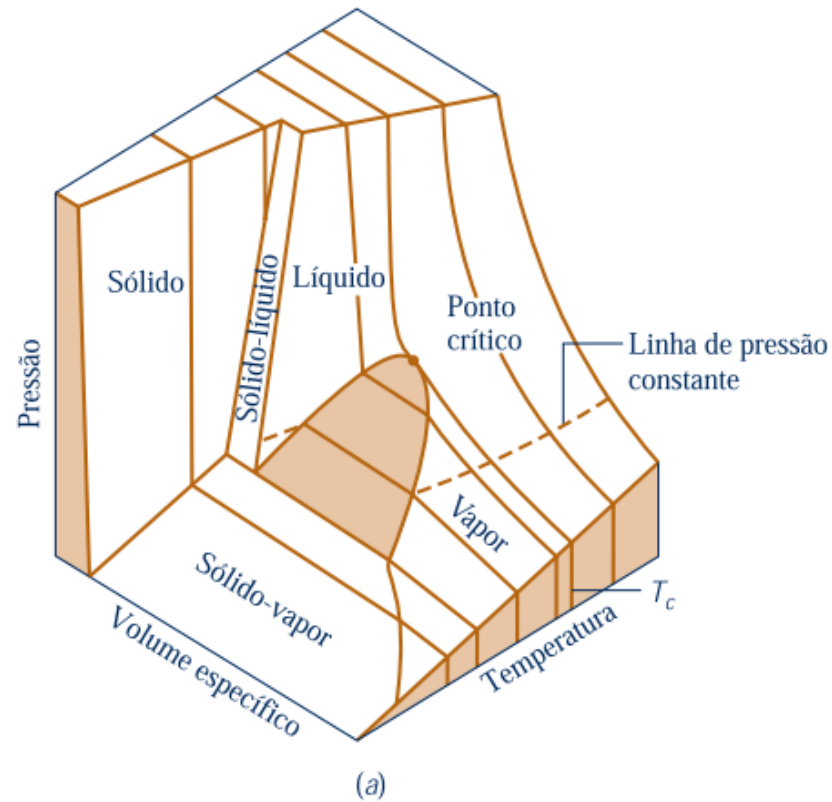


Fig. 1.9 Medição de pressão por um medidor do tipo tubo de Bourdon.

Diagrama de Fases



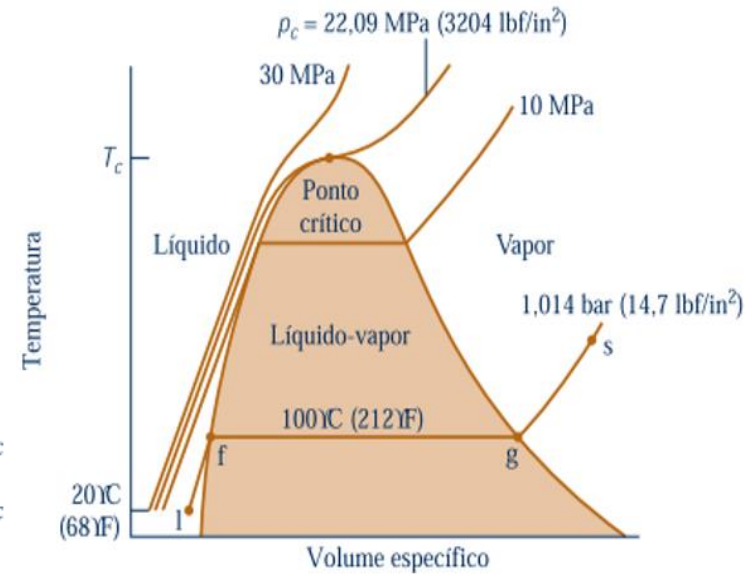
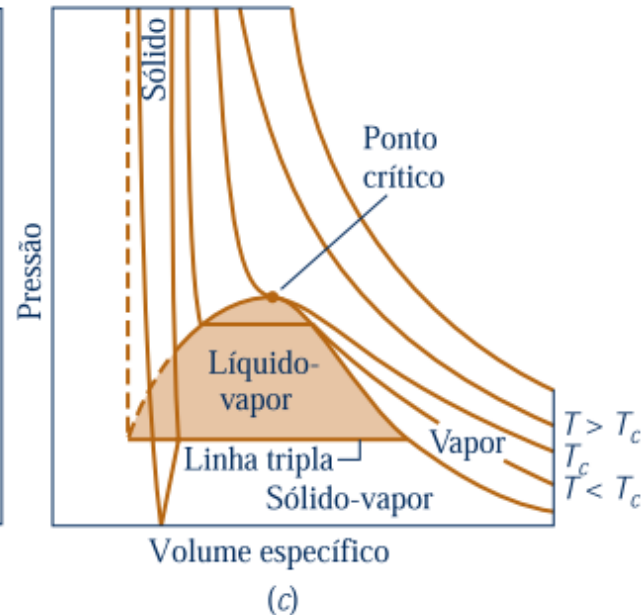
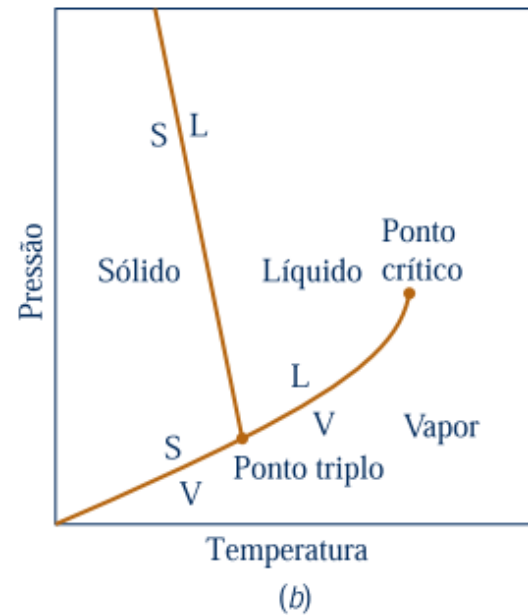
Substância que se expande durante solidificação (água)*



Substância que se contrai durante solidificação (metais)*

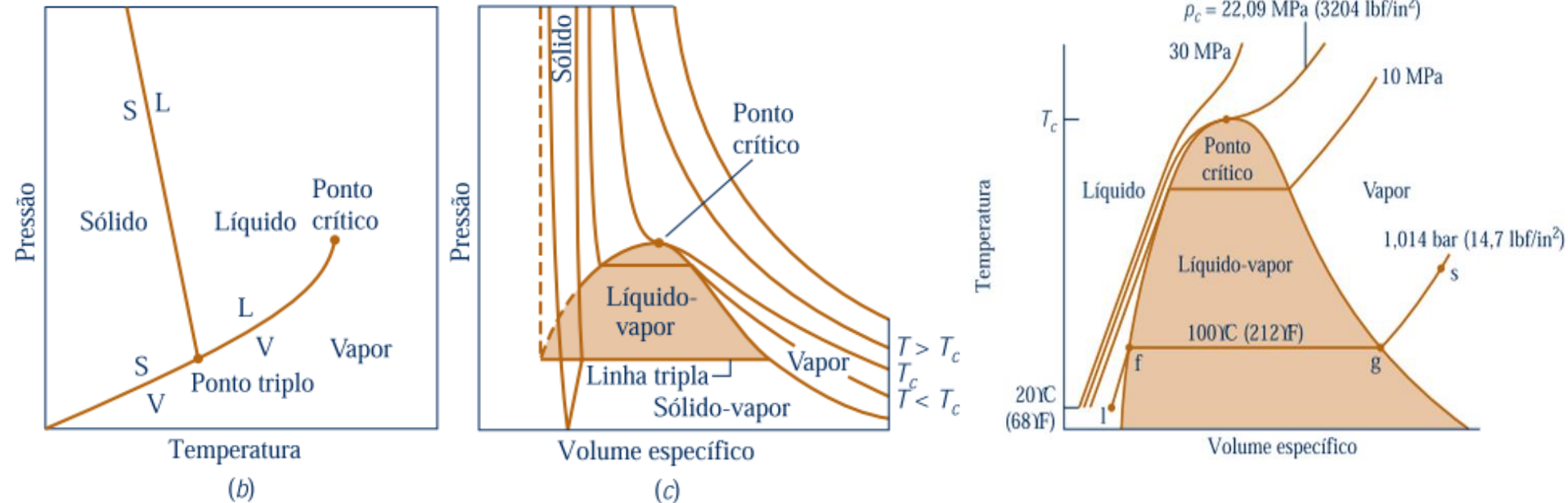
* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 7ª edição, editora LTC)

Diagrama de Fases



- No interior das regiões monofásicas o estado é determinado por quaisquer duas propriedades.
- Localizadas entre as regiões monofásicas estão as regiões bifásicas, onde duas fases coexistem em equilíbrio: líquido-vapor, sólido-líquido e sólido-vapor.

Diagrama de Fases



- No interior dessas regiões bifásicas, pressão e temperatura não são mais independentes; ou seja, uma não pode ser modificada sem a alteração da outra, é necessário mais uma propriedade para determinação do estado. Três fases podem coexistir em equilíbrio ao longo da linha denominada linha tripla.

Diagrama de Fases

- 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* , assim como o volume específico crítico.

Diagrama de Fases

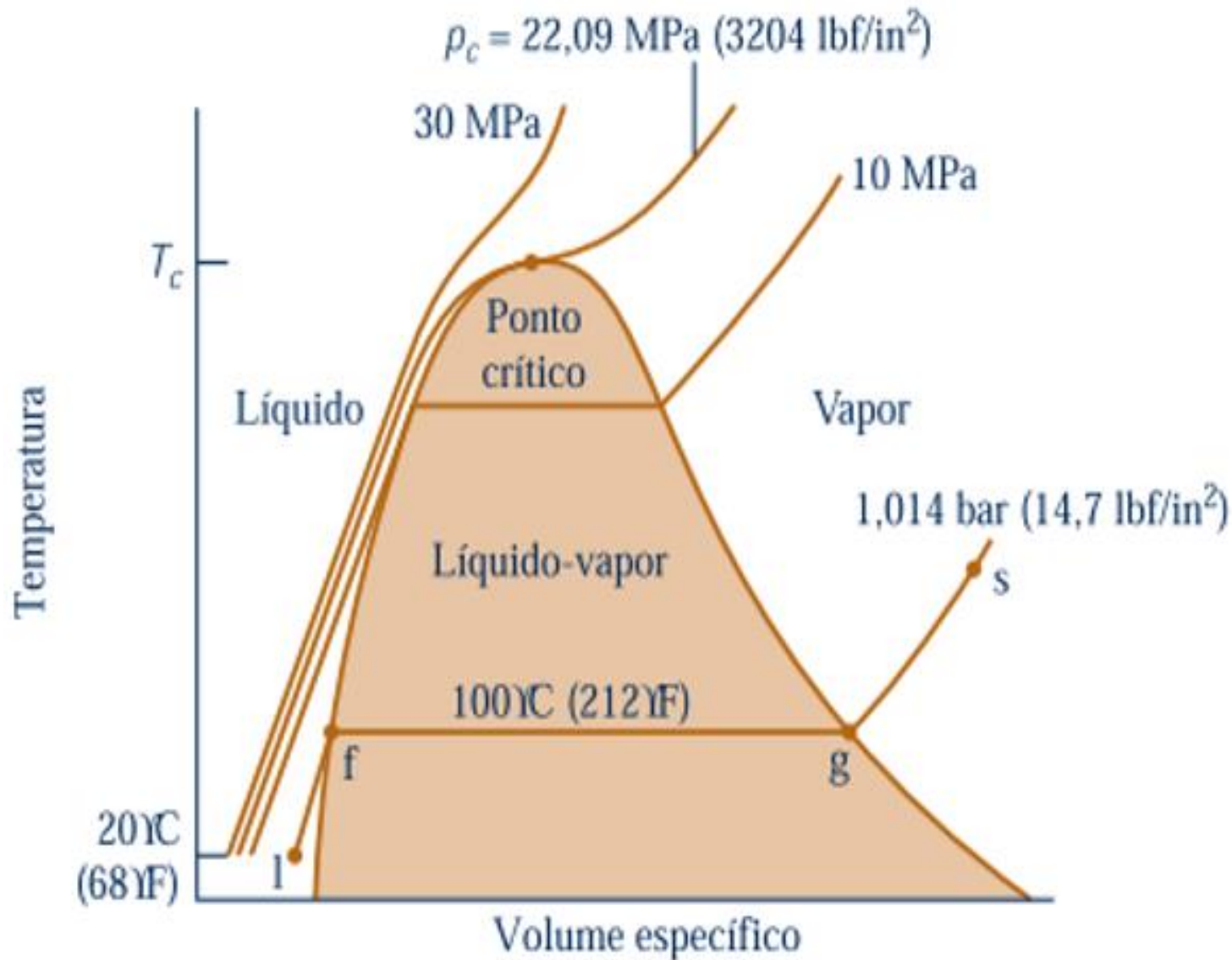
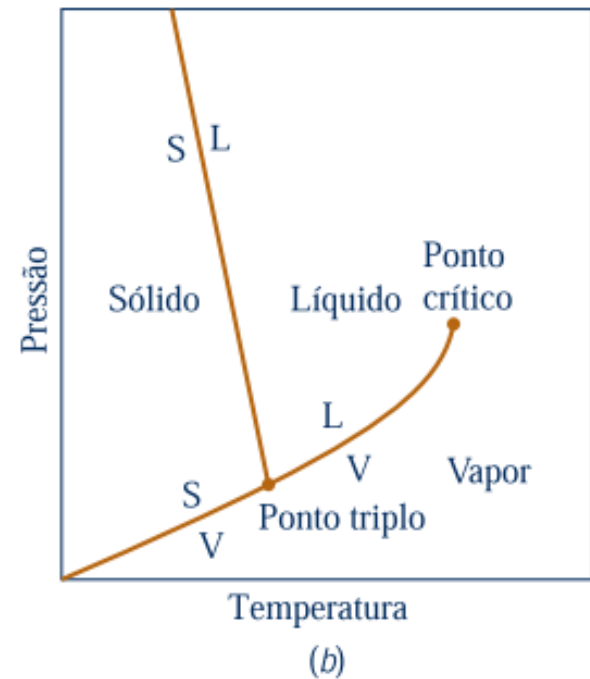
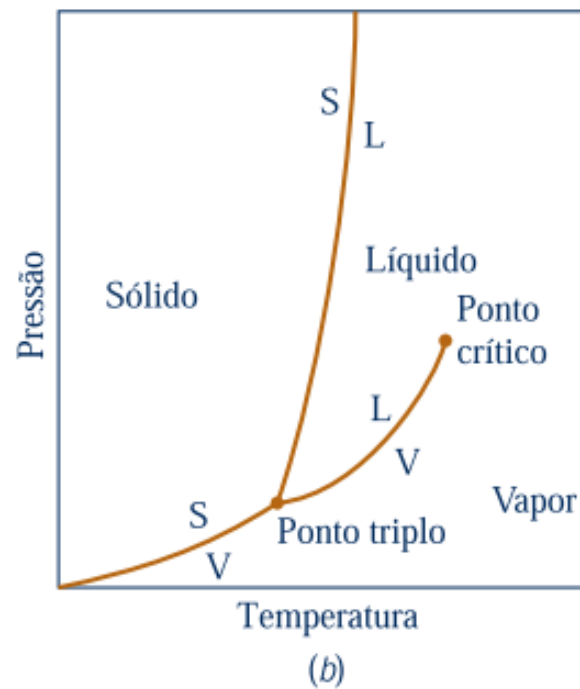


Diagrama $P - T$ (diagrama de fases)



Substância que se expande durante solidificação (água)*

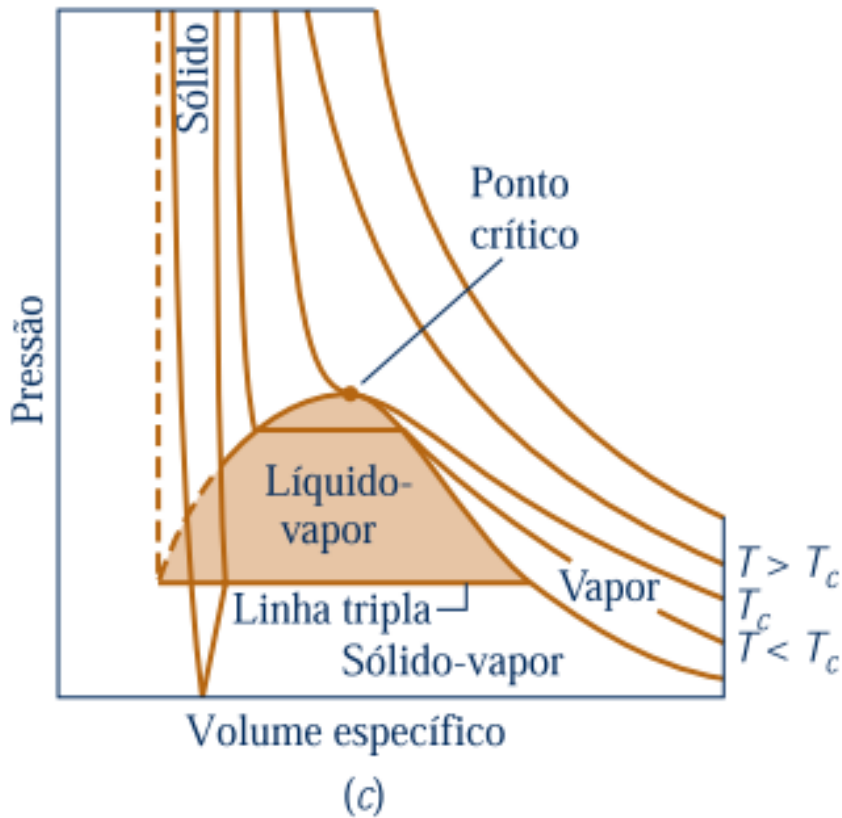


Substância que se contrai durante solidificação (metais)*

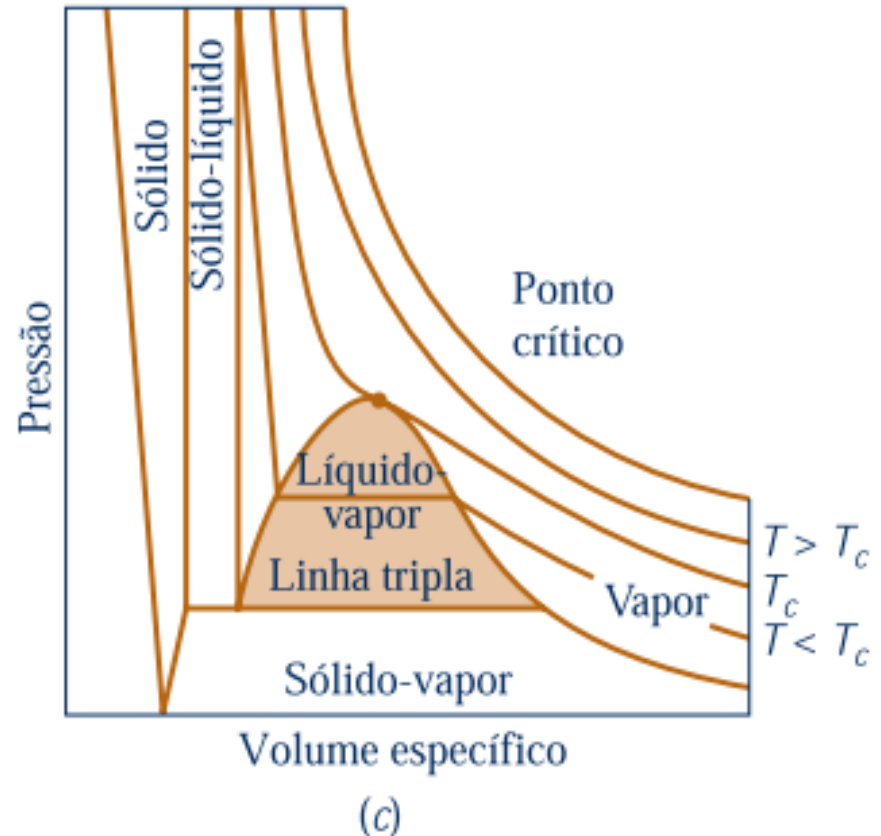
O termo *temperatura de saturação* indica a temperatura na qual uma mudança de fase ocorre para uma dada pressão, que é denominada *pressão de saturação* para a dada temperatura. Os diagramas de fase mostram que para cada pressão de saturação há uma única temperatura de saturação, e vice-versa.

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 7ª edição, editora LTC)

Diagrama $P - v$



Substância que se expande durante solidificação (água)*



Substância que se contrai durante solidificação (metais)*

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 7ª edição, editora LTC)

Diagrama $T - v$

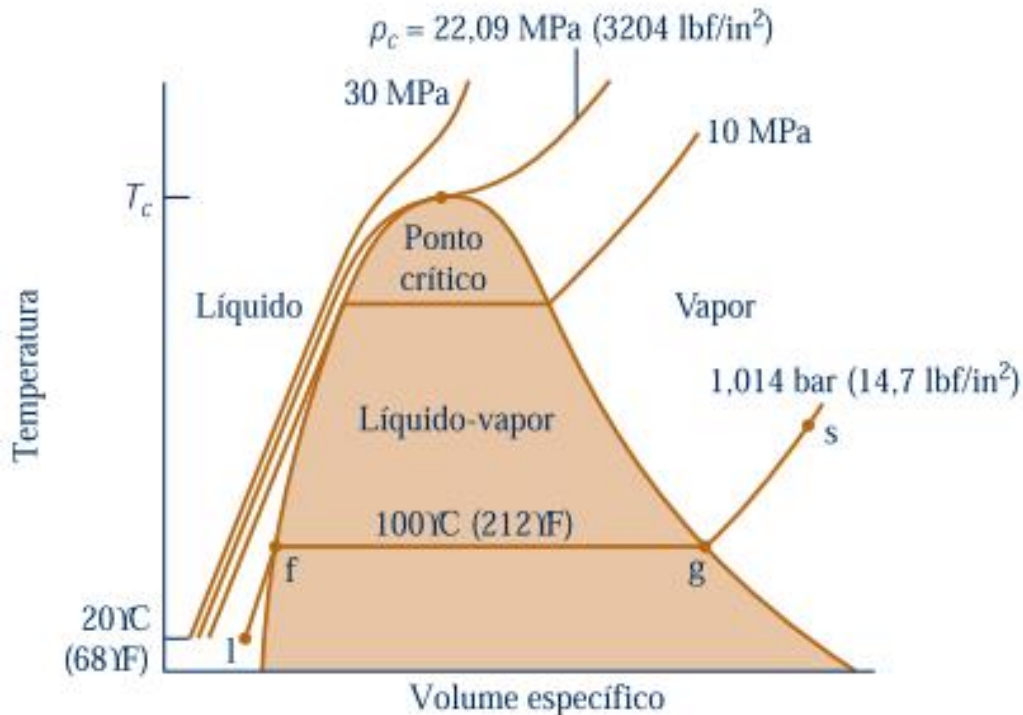


Fig. 3.3 Esboço de um diagrama temperatura-volume específico para a água mostrando as regiões de líquido, bifásica líquido-vapor e de vapor (fora de escala).

Diagrama $T - v$

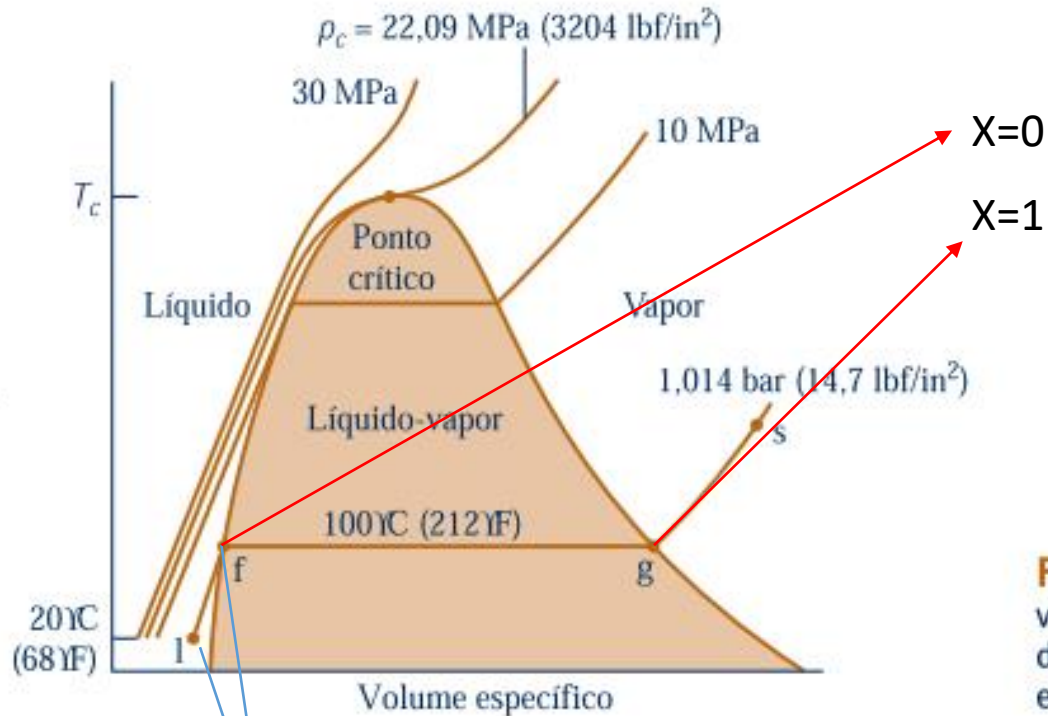


Fig. 3.3 Esboço de um diagrama temperatura-volume específico para a água mostrando as regiões de líquido, bifásica líquido-vapor e de vapor (fora de escala).*

Entre o ponto 1 e f: é denominado líquido sub-resfriado ou líquido comprimido

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}}$$

As misturas bifásicas líquido - vapor intermediárias podem ser distinguidas entre si pelo *titulo*, uma propriedade intensiva

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 7ª edição, editora LTC)

Diagrama $T - v$

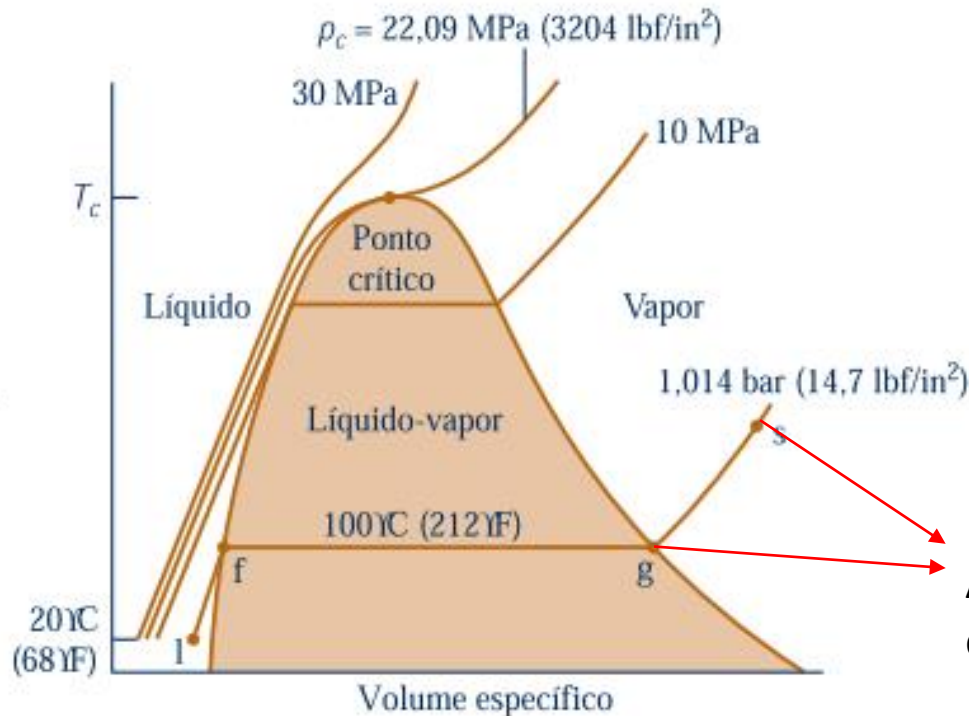


Fig. 3.3 Esboço de um diagrama temperatura-volume específico para a água mostrando as regiões de líquido, bifásica líquido-vapor e de vapor (fora de escala).

Acima da temperatura do ponto g, o estado é chamado de vapor superaquecido

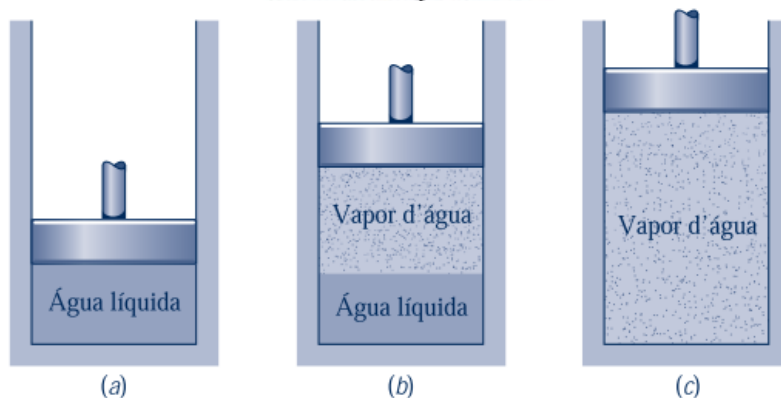


Fig. 3.4 Ilustração de uma transformação líquido-vapor para a água a pressão constante.

Diagrama $T - v$

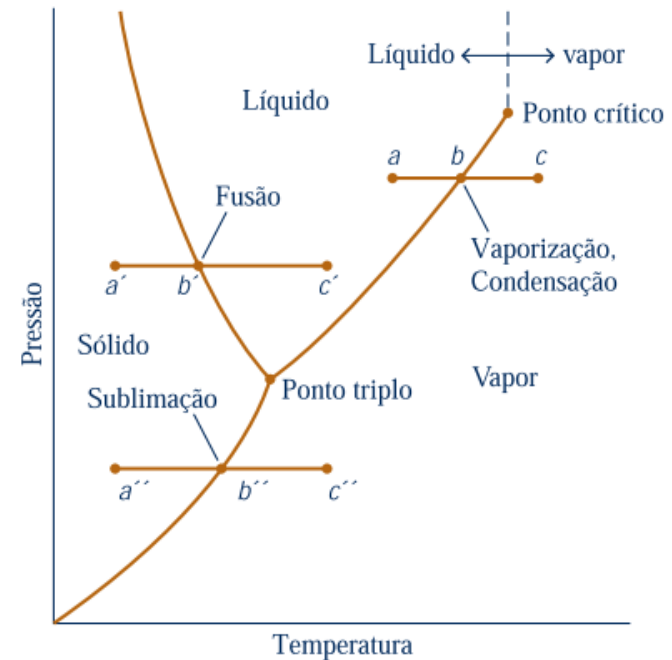
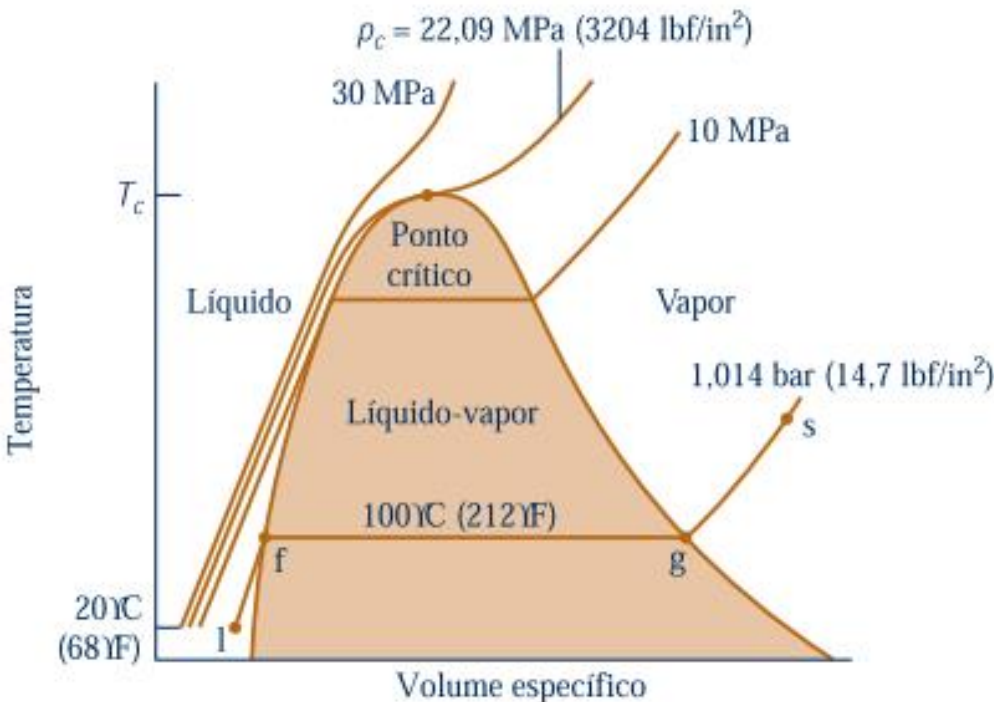
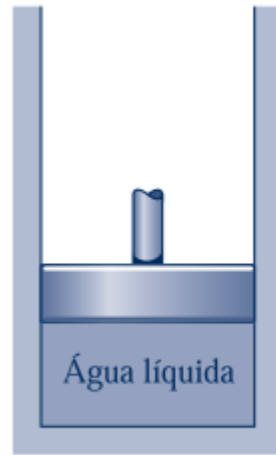


Fig. 3.5 Diagrama de fases para a água (fora de escala).

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).

Mudança de Fase

Líquido sub-resfriado
ou líquido comprimido



(a)

Líquido saturado



(b)

Bifásico - Título



(c)

Vapor saturado

Vapor
superaquecido



Temperatura constante

As misturas bifásicas líquido - vapor intermediárias podem ser distinguidas entre si pelo título, uma propriedade intensiva. Para uma mistura bifásica líquido - vapor, a razão entre a massa de vapor presente e a massa total da mistura é seu título, x .

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}}$$

Tabelas

No livro texto (Moran), as Tabelas A-2 a A-6, 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.

Tabela A-2	Propriedades da Água Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Temperatura
Tabela A-3	Propriedades da Água Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Pressão
Tabela A-4	Propriedades do Vapor d'Água Superaquecido
Tabela A-5	Propriedades da Água Líquida Comprimida
Tabela A-6	Propriedades da Água Saturada (Sólido-Vapor): Tabela de Temperatura

Tabelas

TABELA A-2

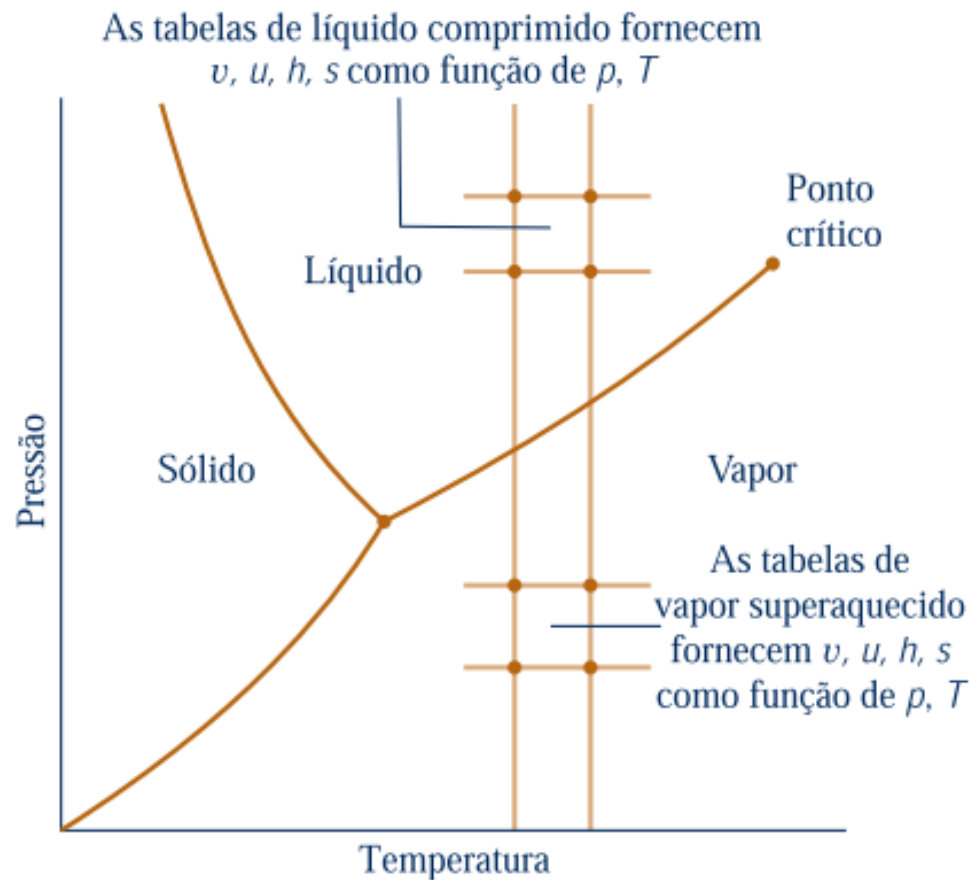
Propriedades da Água Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Temperatura

Conversões da Pressão:
1 bar = 0,1 MPa
= 10² kPa

Temp. °C	Press. bar	Volume Específico m ³ /kg		Energia Interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg · K		Temp. °C
		Líquido Sat. $v_f \times 10^3$	Vapor Sat. v_g	Líquido Sat. u_f	Vapor Sat. u_g	Líquido Sat. h_f	Evap. h_{fg}	Vapor Sat. h_g	Líquido Sat. s_f	Vapor Sat. s_g	
0,01	0,00611	1,0002	206,136	0,00	2375,3	0,01	2501,3	2501,4	0,0000	9,1562	0,01
4	0,00813	1,0001	157,232	16,77	2380,9	16,78	2491,9	2508,7	0,0610	9,0514	4
5	0,00872	1,0001	147,120	20,97	2382,3	20,98	2489,6	2510,6	0,0761	9,0257	5
6	0,00935	1,0001	137,734	25,19	2383,6	25,20	2487,2	2512,4	0,0912	9,0003	6
8	0,01072	1,0002	120,917	33,59	2386,4	33,60	2482,5	2516,1	0,1212	8,9501	8
10	0,01228	1,0004	106,379	42,00	2389,2	42,01	2477,7	2519,8	0,1510	8,9008	10
11	0,01312	1,0004	99,857	46,20	2390,5	46,20	2475,4	2521,6	0,1658	8,8765	11
12	0,01402	1,0005	93,784	50,41	2391,9	50,41	2473,0	2523,4	0,1806	8,8524	12
13	0,01497	1,0007	88,124	54,60	2393,3	54,60	2470,7	2525,3	0,1953	8,8285	13
14	0,01598	1,0008	82,848	58,79	2394,7	58,80	2468,3	2527,1	0,2099	8,8048	14
15	0,01705	1,0009	77,926	62,99	2396,1	62,99	2465,9	2528,9	0,2245	8,7814	15
16	0,01818	1,0011	73,333	67,18	2397,4	67,19	2463,6	2530,8	0,2390	8,7582	16
17	0,01938	1,0012	69,044	71,38	2398,8	71,38	2461,2	2532,6	0,2535	8,7351	17
18	0,02064	1,0014	65,038	75,57	2400,2	75,58	2458,8	2534,4	0,2679	8,7123	18
19	0,02198	1,0016	61,293	79,76	2401,6	79,77	2456,5	2536,2	0,2823	8,6897	19
20	0,02339	1,0018	57,791	83,95	2402,9	83,96	2454,1	2538,1	0,2966	8,6672	20

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 7ª edição, editora LTC)

Tabelas de líquido e vapor



Interpolação

► **POR EXEMPLO** determinemos o volume específico do vapor d'água para um estado no qual $p = 10 \text{ bar}$ 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 $v = 0,2141 \text{ m}^3/\text{kg}$. ◀◀◀◀◀

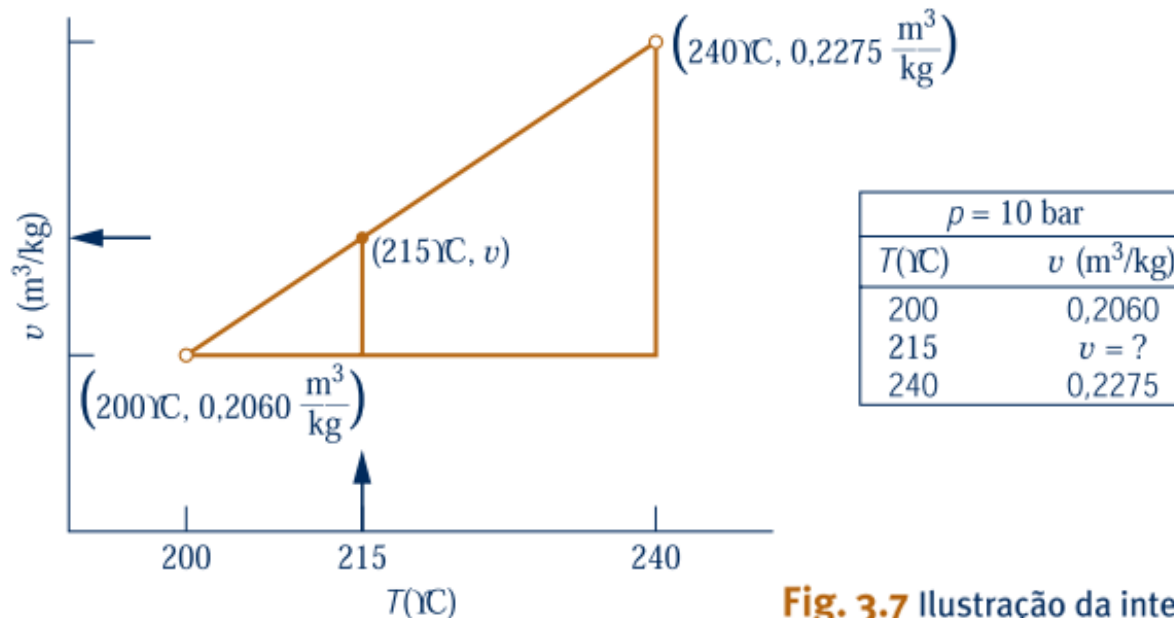
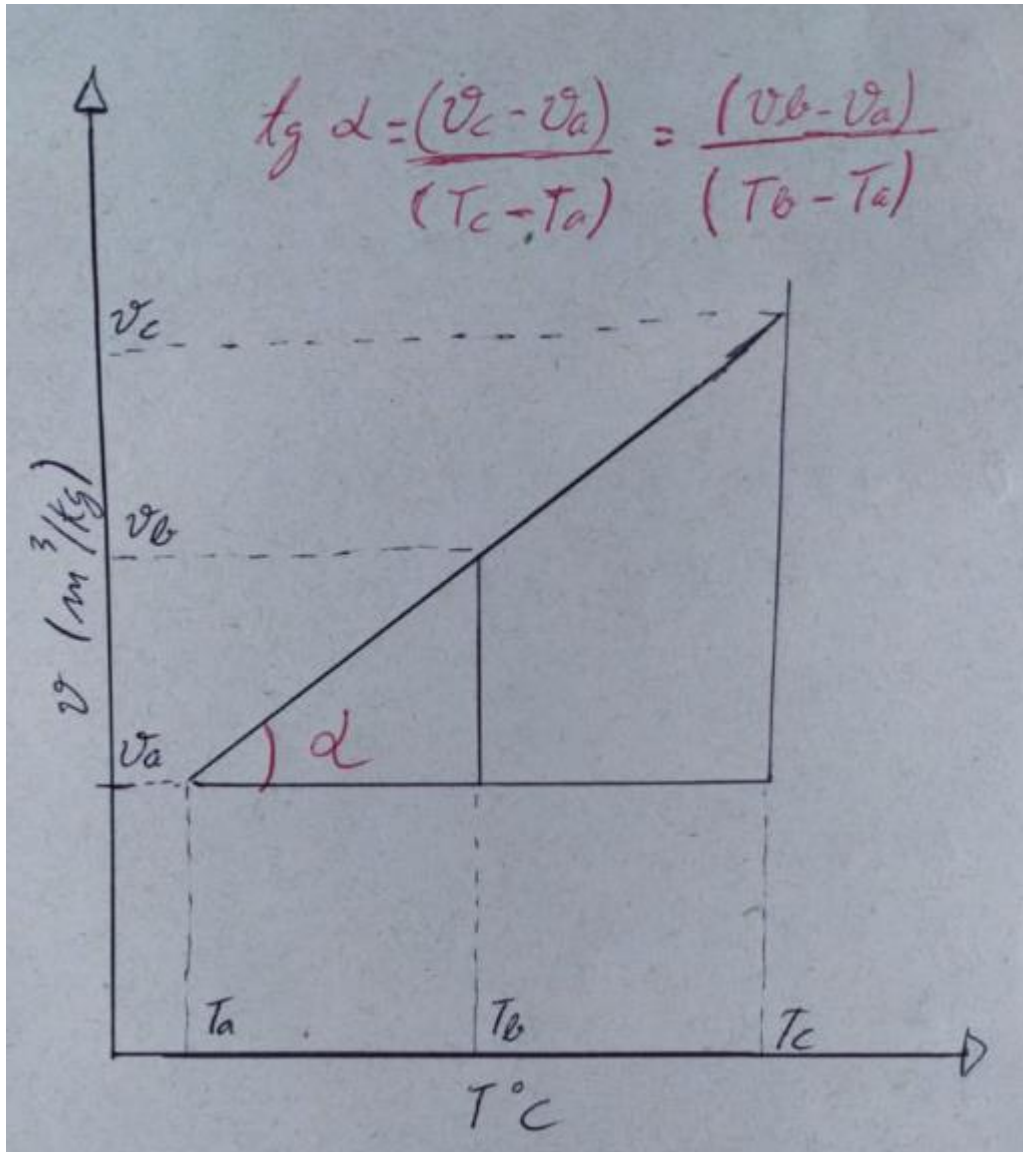


Fig. 3.7 Ilustração da interpolação linear.

Interpolação



1° Definir o estado a partir da tabela bifásica (T ou p)

2° Buscar a tabela referente ao estado adequado “no Ex: Tabela A-4”

$$a(T = 200^\circ\text{C}, p = 10\text{bar})$$

$$v_a = 0,2060(\text{m}^3/\text{kg})$$

$$T_a = 200^\circ\text{C}$$

$$c(T = 240^\circ\text{C}, p = 10\text{bar})$$

$$v_c = 0,2275(\text{m}^3/\text{kg})$$

$$T_c = 240^\circ\text{C}$$

$$b(T = 215^\circ\text{C}, p = 10\text{bar})$$

$$v_b = ? (\text{m}^3/\text{kg})$$

$$T_b = 215^\circ\text{C}$$

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. Cada uma dessas tabelas fornece dados de líquido saturado (subscritos f) e de vapor saturado (subscritos g). A Tabela A-2 é chamada de tabela de temperatura, a Tabela A-3 é chamada de tabela de pressão. O volume específico de uma mistura bifásica líquido-vapor pode ser determinado pela utilização das tabelas de saturação e pela definição de título. O volume total da mistura é a soma dos volumes das fases líquida e de vapor

$$V = V_{líq} + V_{vap}$$

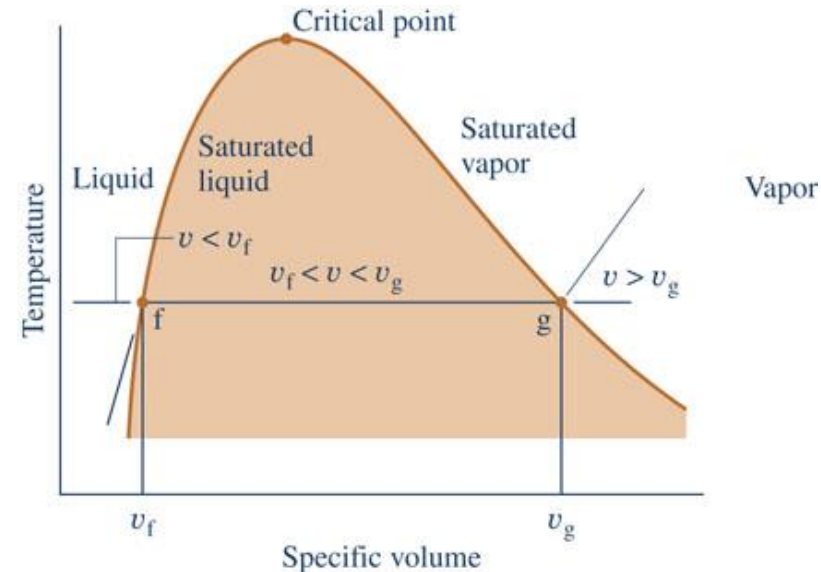
Dividindo pela massa total da mistura, m , é obtido um volume específico *médio* para a mistura

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

Tabelas de saturação

Sendo $V_{líq} = m_{líq} v_{líq}$ e $V_{vap} = m_{vap} v_{vap}$;

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



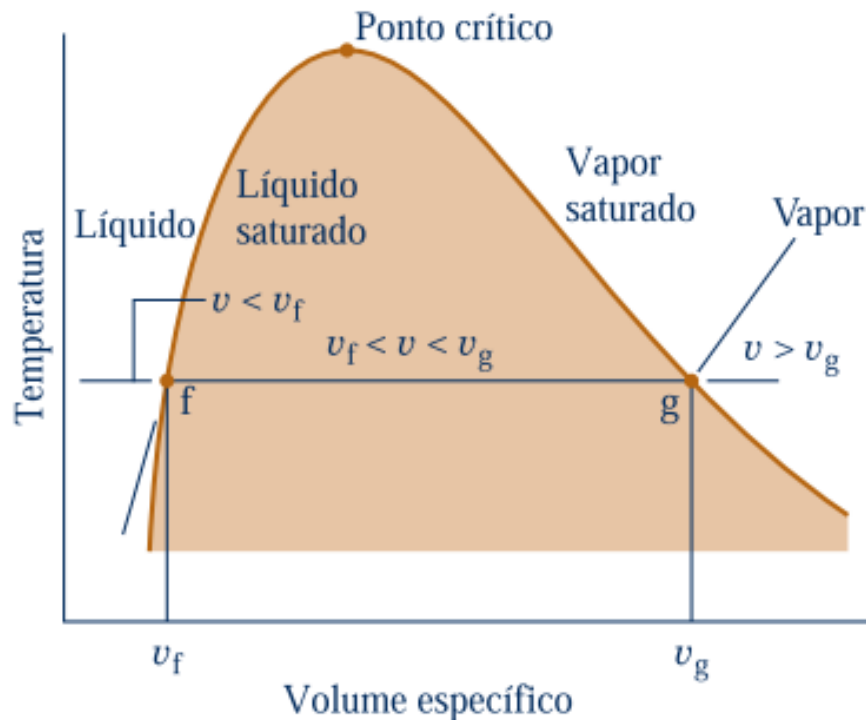
Utilizando a definição de título, $x = m_{vap}/m$, e desenvolvendo as relações de massa de líquido e vapor com título, $m_{líq}/m = 1 - x$

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

Tabelas de saturação

Exemplo: Considere um sistema que consiste em uma mistura bifásica líquido-vapor de água a 100°C e título de 0,9. Calcule o volume específico médio?

- Da Tabela A-2 a 100°C , $v_f = 1,0435 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ e $v_g = 1,673 \text{ m}^3/\text{kg}$.



Tabelas de saturação

Exemplo: Determinemos a pressão da água em cada um de três estados definidos pela temperatura de 100°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 $v_3 = 1,0423 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$.

TABELA A-2

(Continuação)

Temp. °C	Press. bar	Volume Específico m ³ /kg	
		Líquido Sat. $v_f \times 10^3$	Vapor Sat. v_g
50	0,1235	1,0121	12,032
55	0,1576	1,0146	9,568
60	0,1994	1,0172	7,671
65	0,2503	1,0199	6,197
70	0,3119	1,0228	5,042
75	0,3858	1,0259	4,131
80	0,4739	1,0291	3,407
85	0,5783	1,0325	2,828
90	0,7014	1,0360	2,361
95	0,8455	1,0397	1,982
100	1,014	1,0435	1,673

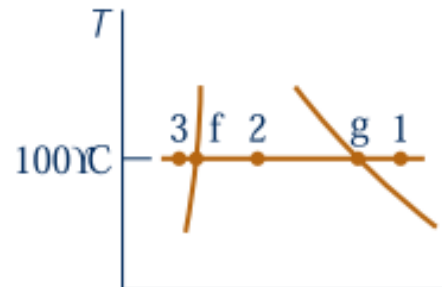
TABELA A-5

Propriedades da Água Líquida Comprimida

T °C	$v \times 10^3$ m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 25 \text{ bar} = 2,5 \text{ MPa}$ ($T_{\text{sat}} = 223,99^\circ\text{C}$)				
20	1,0006	83,80	86,30	0,2961
40	1,0067	167,25	169,77	0,05715
80	1,0280	334,29	336,86	1,0737
100	1,0423	418,24	420,85	1,3050

$p = 0,70 \text{ bar} = 0,07 \text{ MPa}$
($T_{\text{sat}} = 89,95^\circ\text{C}$)

Sat.	2,365	2494,5	2660,0	7,4797
100	2,434	2509,7	2680,0	7,5341
120	2,571	2539,7	2719,6	7,6375



* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 7ª edição, editora LTC)

Energia interna Específica

Energia Interna Específica “u”, é a energia que a matéria possui devido ao movimento e/ou forças intermoleculares. Esta forma de energia pode ser decomposta em duas partes:

- a) Energia cinética interna → relacionada à velocidade das moléculas;
- b) Energia potencial interna → relacionada às forças de atração entre as moléculas.

As mudanças na velocidade das moléculas são identificadas, macroscopicamente, pela alteração da temperatura da substância (sistema), enquanto que as variações na posição são identificadas pela mudança de fase da substância (sólido, líquido ou vapor). A energia interna específica para uma mistura líquido-vapor pode ser obtida em função do título, de maneira análoga ao volume específico

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

Entalpia Específica

Na análise térmica de alguns processos específicos, frequentemente são encontradas certas combinações de propriedades termodinâmicas.

Uma dessas combinações ocorre quando se tem um processo a pressão constante, resultando a combinação $u + pv$. Assim é conveniente definir uma nova propriedade termodinâmica chamada “*entalpia específica*”, a qual é representada pela letra h , enquanto a entalpia “propriedade extensiva” é representada pela letra H ; Matematicamente, tem-se:

$$h = u + pv$$

$$H = U + pV$$

Assim como volume específico e energia interna específica, entalpia específica pode ser relacionada com o título segundo a expressão;

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

Energia interna e Entalpia Específica

Lembrando **pressão e temperatura NÃO** são propriedades **independentes** na **região bi-fásica liquido-vapor**, elas sozinhas não podem ser usadas para definir o estado nessa região.

A propriedade, **título (x)**, é definida somente na região bi-fásica, **e para cada pressão e temperatura fixada ela pode ser usada para definir o estado.**

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

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

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

Energia interna Específica e entalpia

Exemplo: Determinar a entalpia específica do Refrigerante R-22 quando sua temperatura é 12°C e sua energia interna específica é $144,58 \text{ kJ/kg}$.

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.

Energia interna Específica e entalpia

TABELA A-7

Conversões da Pressão:
1 bar = 0,1 MPa
= 10² kPa

Propriedades do Refrigerante 22 Saturado (Líquido-Vapor): Tabela de Temperatura

Temp. °C	Press. bar	Volume Específico m ³ /kg		Energia Interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg · K		Temp. °C
		Líquido Sat. $v_f \times 10^3$	Vapor Sat. v_g	Líquido Sat. u_f	Vapor Sat. u_g	Líquido Sat. h_f	Evap. h_{fg}	Vapor Sat. h_g	Líquido Sat. s_f	Vapor Sat. s_g	
-60	0,3749	0,6833	0,5370	-21,57	203,67	-21,55	245,35	223,81	-0,0964	1,0547	-60
-50	0,6451	0,6966	0,3239	-10,89	207,70	-10,85	239,44	228,60	-0,0474	1,0256	-50
-45	0,8290	0,7037	0,2564	-5,50	209,70	-5,44	236,39	230,95	-0,0235	1,0126	-45
-40	1,0522	0,7109	0,2052	-0,07	211,68	0,00	233,27	233,27	0,0000	1,0005	-40
-36	1,2627	0,7169	0,1730	4,29	213,25	4,38	230,71	235,09	0,0186	0,9914	-36
-32	1,5049	0,7231	0,1468	8,68	214,80	8,79	228,10	236,89	0,0369	0,9828	-32
-30	1,6389	0,7262	0,1355	10,88	215,58	11,00	226,77	237,78	0,0460	0,9787	-30
-28	1,7819	0,7294	0,1252	13,09	216,34	13,22	225,43	238,66	0,0551	0,9746	-28
-26	1,9345	0,7327	0,1159	15,31	217,11	15,45	224,08	239,53	0,0641	0,9707	-26
-22	2,2698	0,7393	0,0997	19,76	218,62	19,92	221,32	241,24	0,0819	0,9631	-22
-20	2,4534	0,7427	0,0926	21,99	219,37	22,17	219,91	242,09	0,0908	0,9595	-20
6	6,0275	0,7930	0,0391	51,71	228,48	52,18	199,84	252,03	0,2025	0,9184	6
8	6,4105	0,7974	0,0368	54,05	229,13	54,56	198,14	252,70	0,2109	0,9157	8
10	6,8113	0,8020	0,0346	56,40	229,76	56,95	196,40	253,35	0,2193	0,9129	10
12	7,2307	0,8066	0,0326	58,77	230,38	59,35	194,64	253,99	0,2276	0,9102	12
16	8,1268	0,8162	0,0291	63,53	231,59	64,19	191,02	255,21	0,2442	0,9048	16
20	9,1030	0,8263	0,0259	68,33	232,76	69,09	187,28	256,37	0,2607	0,8996	20

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 7ª edição, editora LTC)

Energia interna Específica e entalpia

Exemplo: Avaliemos T , v e h para água a 0,10 MPa e uma energia interna específica de 2537,3 kJ/kg.

TABELA A-3

Propriedades da Água Saturada (Líquido-Vapor): Tabela de Pressão

Conversões da Pressão:
1 bar = 0,1 MPa
= 10^2 kPa

Press. bar	Temp. °C	Volume Específico m ³ /kg		Energia Interna kJ/kg		Entalpia kJ/kg			Entropia kJ/kg · K		Press. bar
		Líquido Sat. $v_f \times 10^3$	Vapor Sat. v_g	Líquido Sat. u_f	Vapor Sat. u_g	Líquido Sat. h_f	Evap. h_{fg}	Vapor Sat. h_g	Líquido Sat. s_f	Vapor Sat. s_g	
0,04	28,96	1,0040	34,800	121,45	2415,2	121,46	2432,9	2554,4	0,4226	8,4746	0,04
0,06	36,16	1,0064	23,739	151,53	2425,0	151,53	2415,9	2567,4	0,5210	8,3304	0,06
0,08	41,51	1,0084	18,103	173,87	2432,2	173,88	2403,1	2577,0	0,5926	8,2287	0,08
0,10	45,81	1,0102	14,674	191,82	2437,91	191,83	2392,8	2584,7	0,6493	8,1502	0,10
0,20	60,06	1,0172	7,649	251,38	2456,7	251,40	2358,3	2609,7	0,8320	7,9085	0,20
0,30	69,10	1,0223	5,229	289,20	2468,4	289,23	2336,1	2625,3	0,9439	7,7686	0,30
0,40	75,87	1,0265	3,993	317,53	2477,0	317,58	2319,2	2636,8	1,0259	7,6700	0,40
0,50	81,33	1,0300	3,240	340,44	2483,9	340,49	2305,4	2645,9	1,0910	7,5939	0,50
0,60	85,94	1,0331	2,732	359,79	2489,6	359,86	2293,6	2653,5	1,1453	7,5320	0,60
0,70	89,95	1,0360	2,365	376,63	2494,5	376,70	2283,3	2660,0	1,1919	7,4797	0,70
0,80	93,50	1,0380	2,087	391,58	2498,8	391,66	2274,1	2665,8	1,2329	7,4346	0,80
0,90	96,71	1,0410	1,869	405,06	2502,6	405,15	2265,7	2670,9	1,2695	7,3949	0,90
1,00	99,63	1,0432	1,694	417,36	2506,1	417,46	2258,0	2675,5	1,3026	7,3594	1,00

Energia interna Específica e entalpia

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 $T = 120^\circ\text{C}$, $v = 1,793$ m³/kg e $h = 2716,6$ kJ/kg.

TABELA A-4

Propriedades do Vapor d'Água Superaquecido

T °C	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K	v m ³ /kg	u kJ/kg	h kJ/kg	s kJ/kg · K
$p = 0,06$ bar = 0,006 MPa ($T_{\text{sat}} = 36,16^\circ\text{C}$)					$p = 0,35$ bar = 0,035 MPa ($T_{\text{sat}} = 72,69^\circ\text{C}$)			
$p = 1,0$ bar = 0,10 MPa ($T_{\text{sat}} = 99,63^\circ\text{C}$)								
Sat.	1,694	2506,1	2675,5	7,3594				
100	1,696	2506,7	2676,2	7,3614				
120	1,793	2537,3	2716,6	7,4668				
160	1,984	2597,8	2796,2	7,6597				
200	2,172	2658,1	2875,3	7,8343				
240	2,359	2718,5	2954,5	7,9949				
280	2,546	2779,6	3034,2	8,1445				
320	2,732	2841,5	3114,6	8,2849				
360	2,917	2904,2	3195,9	8,4175				
400	3,103	2967,9	3278,2	8,5435				
440	3,288	3032,6	3361,4	8,6636				
500	3,565	3131,6	3488,1	8,8242				

* (M. J. Moran e H. N. Shapiro. **Princípios de Termodinâmica para Engenharia**, 7ª edição, editora LTC)

Calores Específicos c_p e c_v

- Definição de capacidade térmica $C \equiv \frac{DQ}{dT}$
- Refere-se ao DQ de calor absorvido pelo sistema por uma variação dT de temperatura

Conhecer a dependência da capacidade calorífica de uma substância em função da temperatura traz informação de como ela “absorve” energia (mecanismo)

→ Dedução da capacidade específica a volume constante c_v :

Da 1ª Lei

$$dU = DQ - PdV$$

Derivando em relação a temperatura

$$\frac{dU}{dT} = \frac{DQ}{dT} + P \frac{dV}{dT}$$

Por definição o volume é constante

$$\frac{dV}{dT} = 0$$

$$\left(\frac{DQ}{dT} \right)_V = \left(\frac{dU}{dT} \right)_V = c_V$$

Calores Específicos c_p e c_v

➡ Dedução da capacidade específica a pressão constante c_p :

Do conceito de entalpia

$$H = U + PV$$

$$dH = dU + PdV + VdP$$

como

$$dU = DQ - PdV$$

$$dH = dQ + VdP$$

$$\frac{dH}{dT} = \frac{DQ}{dT} + V \frac{dP}{dT}$$

Por definição a pressão é constante

$$\frac{dP}{dT} = 0$$

$$\left(\frac{DQ}{dT} \right)_P = \left(\frac{dH}{dT} \right)_P = c_P$$

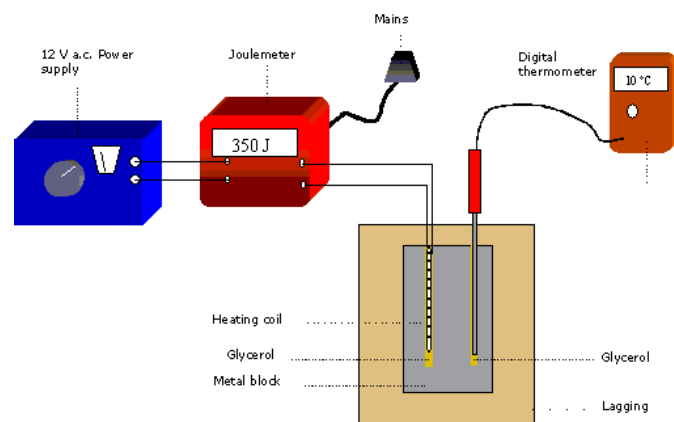
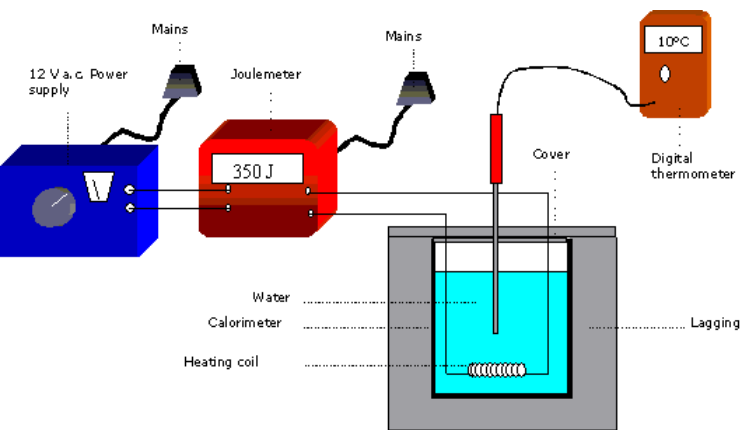
Calores Específicos c_p e c_v

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

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

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

K = Razão de calores específicos



Calores Específicos c_p e c_v

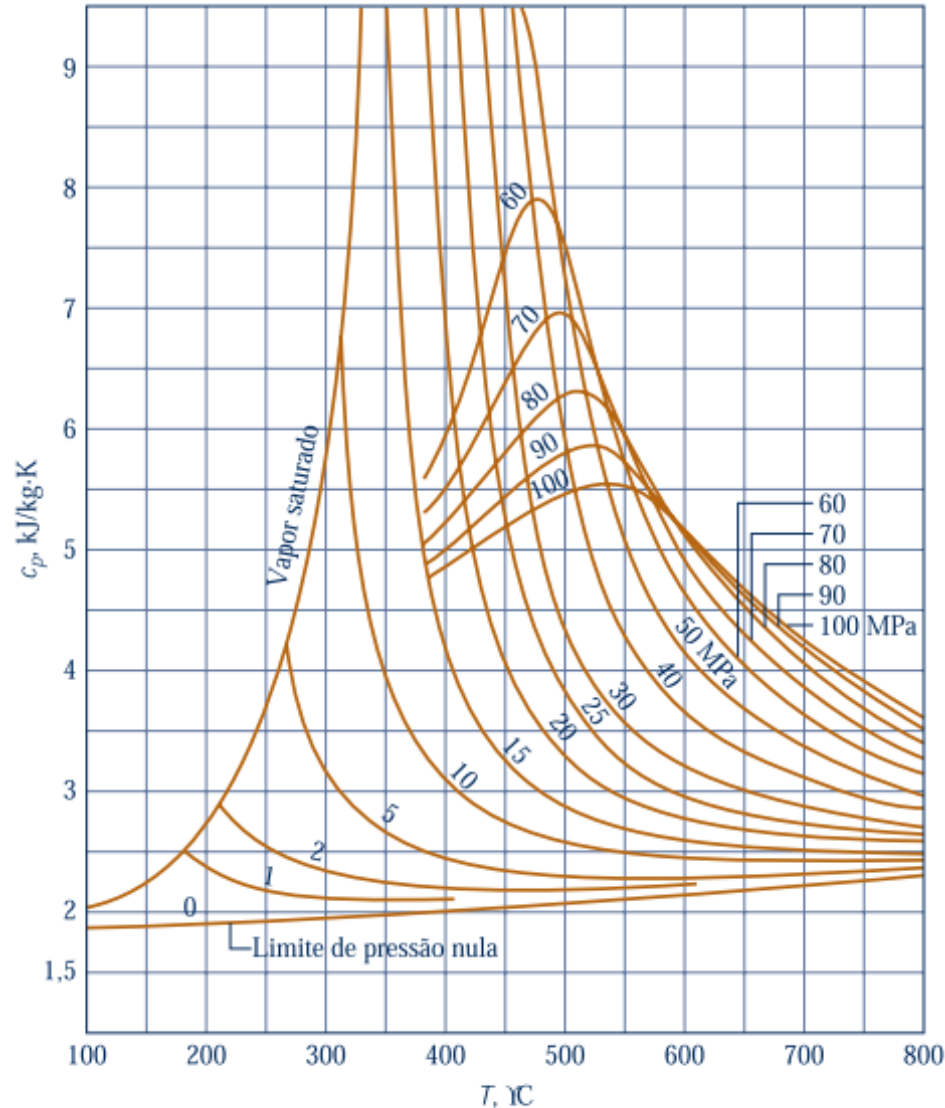


Fig. 3.9 c_p do vapor d'água como função da temperatura e da pressão.

Aproximação de propriedade para Líquidos

Aproximação para Líquidos Utilizando Dados de Líquido Saturado:

Podemos observar através da tabela A-5 (confira a Tabela A-5) para valores de líquido comprimido, que os valores de entalpia, volume específico, e energia interna são *aproximadamente* dependentes somente da temperatura, ou seja a pressão *não exerce muita influência* sobre esses valores.

Ou seja **na falta** de uma tabela para líquido comprimido, nós podemos estimar as propriedades (v, h, u) de *forma aproximada*; obtendo esses valores da tabela de saturação para a temperatura prescrita (independente da pressão)

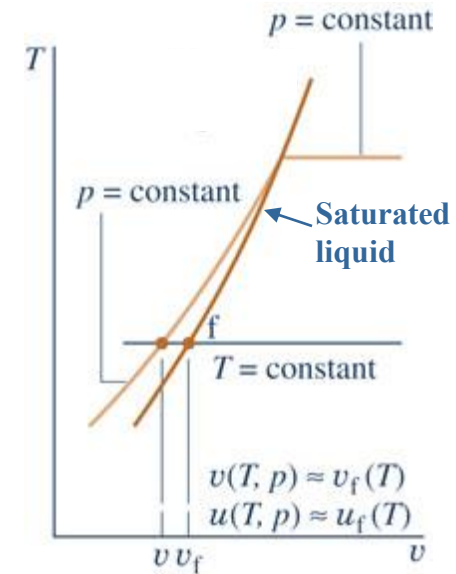
Aproximação de propriedade para Líquidos

Valores Aproximados para v , u , e h no estado líquido podem ser obtidos **de dados de líquido saturado**.

Desde que **valores de v e u para líquidos mude muito pouco com a pressão na *temperature fixada***, as equações abaixo podem ser usadas para estimar esse valor.

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

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



Um **valor aproximado** para h no estado líquido pode ser obtido da definição **$h = u + pv$** : $h(T, p) \approx u_f(T) + pv_f(T)$ ou de maneira alternativa:

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

onde p_{sat} é a pressão de saturação para a temperature dada

Quando o termo sublinhado na equação **acima** é pequeno

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

Modelo de substância incompressível

Para uma substância considerada *incompressível*

► $v = \text{constante}$

► $u = u(T)$

Para uma substância incompressível, $c_p = c_v$; o calor específico pode ser representado somente por c .

Quando o calor específico é constante c :

$$u_2 - u_1 = c(T_2 - T_1)$$

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

Na última equação, assim como no item anterior se a diferença de pressão é pequena, essa parcela pode ser ignorada.

OBS: Verificar exemplo no livro texto

Exercícios

3.10 Para H_2O , determine a propriedade especificada no estado indicado.

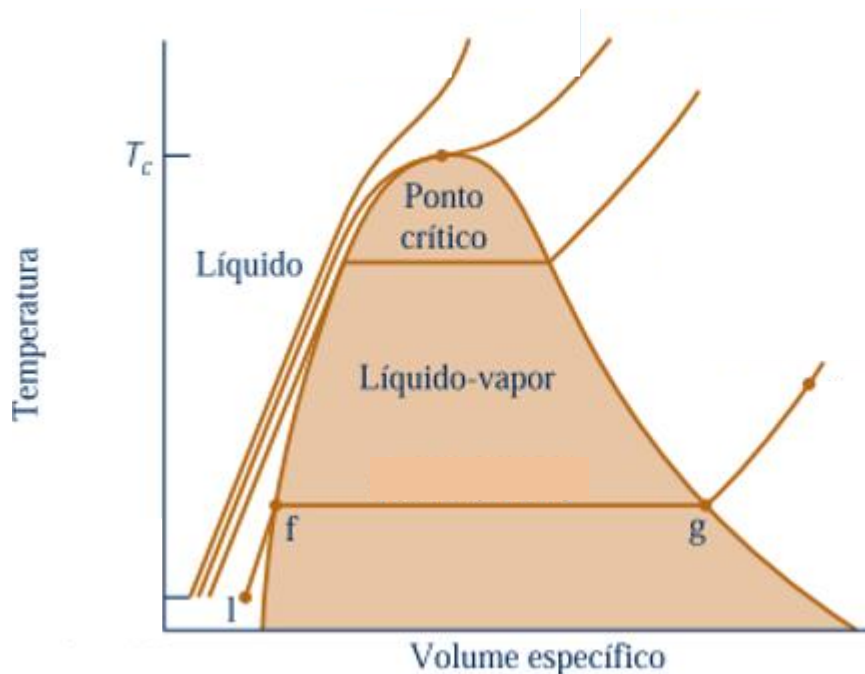
Localize o estado em um esboço do diagrama T - v .

(a) $p = 300 \text{ kPa}$, $v = 0,5 \text{ m}^3/\text{kg}$. Determine T , em $^\circ\text{C}$.

(b) $p = 28 \text{ MPa}$, $T = 200^\circ\text{C}$. Determine v , em m^3/kg .

(c) $p = 1 \text{ MPa}$, $T = 405^\circ\text{C}$. Determine v , em m^3/kg .

(d) $T = 100^\circ\text{C}$, $x = 60\%$. Determine v , em m^3/kg .



Exercícios

3.16 Dois quilogramas de uma mistura bifásica líquido-vapor de dióxido de carbono (CO_2) estão a -40°C em um tanque de $0,05 \text{ m}^3$. Determine o título da mistura se os valores do volume específico para o líquido saturado e para o vapor saturado do CO_2 a -40°C são $v_f = 0,896 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{kg}$ e $v_g = 3,824 \times 10^{-2} \text{ m}^3/\text{kg}$, respectivamente.

3.17 Cada um dos exercícios a seguir requer uma análise do título de uma mistura bifásica líquido-vapor:

(a) O título de uma mistura bifásica líquido-vapor de H_2O a 40°C com um volume específico de $10 \text{ m}^3/\text{kg}$ é (i) 0, (ii) 0,486, (iii) 0,512, (iv) 1.

(b) O título de uma mistura bifásica líquido-vapor de propano a 20 bar com uma energia interna específica de 300 kJ/kg é (i) 0,166, (ii) 0,214, (iii) 0,575, (iv) 0,627.

Exercícios

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 $p = 3$ bar, $v = 0,5$ m³/kg, avalie T em °C e u em kJ/kg.
- (b) A $T = 320^{\circ}\text{C}$, $v = 0,03$ m³/kg, avalie p em MPa e u em kJ/kg.
- (c) A $p = 28$ MPa, $T = 520^{\circ}\text{C}$, avalie v em m³/kg e h em kJ/kg.
- (d) A $T = 10^{\circ}\text{C}$, $v = 100$ m³/kg, avalie p em kPa e h em kJ/kg.
- (e) A $p = 4$ MPa, $T = 160^{\circ}\text{C}$, avalie v em m³/kg e u em kJ/kg.

3.54 Água em um conjunto cilindro-pistão, inicialmente à temperatura de $99,63^{\circ}\text{C}$ 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.

Exercícios

3.22 Conforme ilustrado na Fig. P3.22, 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/s², respectivamente. Para a água, determine a pressão, em kPa, e o volume, em cm³.

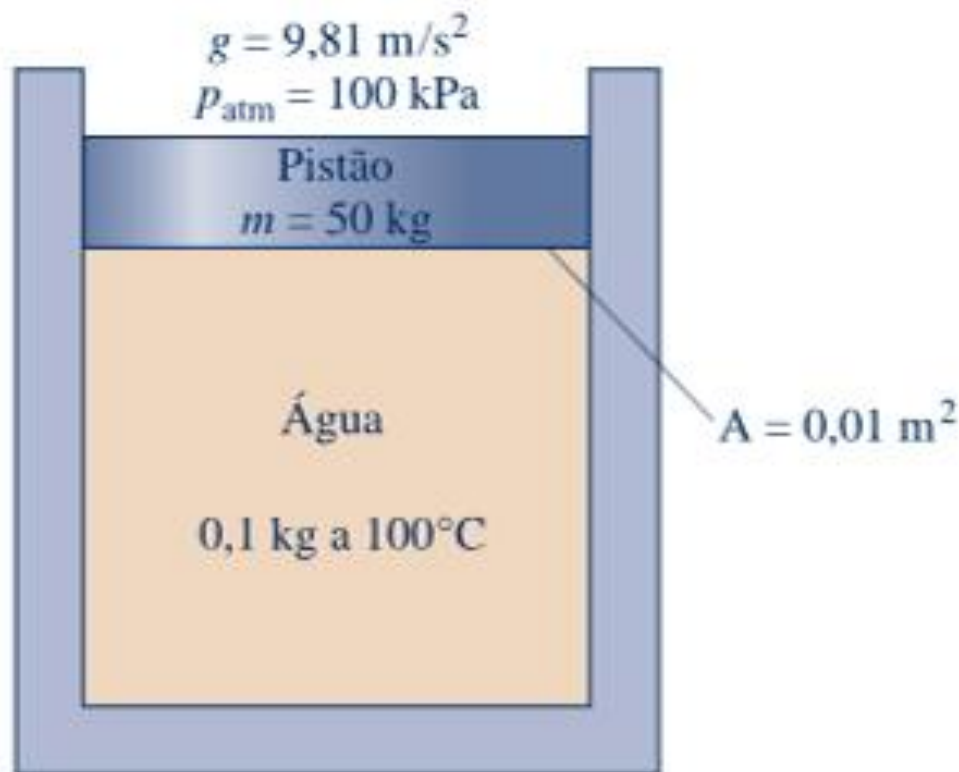


Fig. P3.22