

# **TDQ Aplicada 1**

## **Capítulo 2**

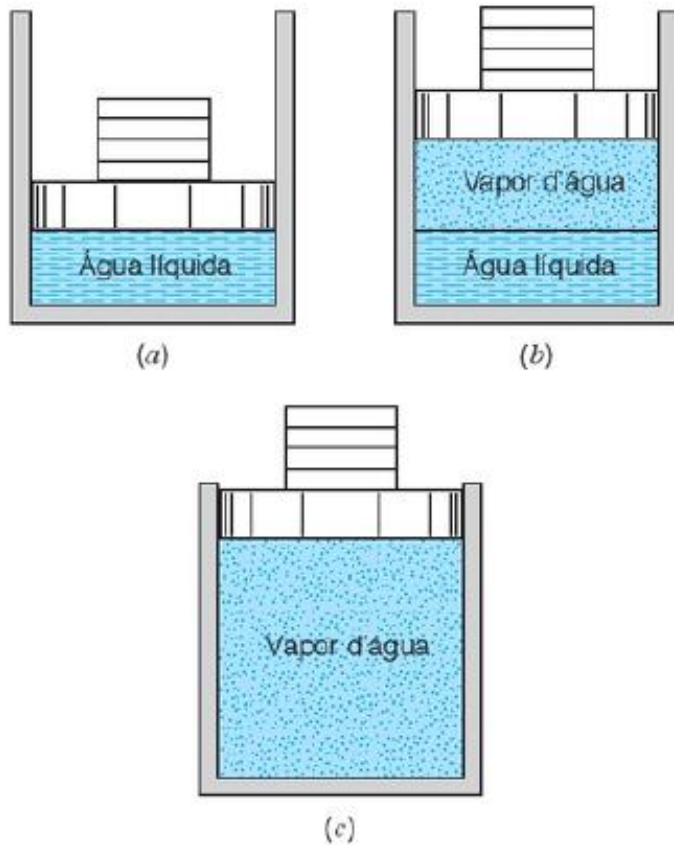
### **Propriedades de uma Substância Pura**

**Livro texto: Fundamentos da Termodinâmica**  
**SÉRIE EVAN WYLE: Richard E. SONNTAG e Claus BORGNAKKE**  
**Editora Edgard Blucher Ltda**

**Capítulo 2 – pág.53 a 75**

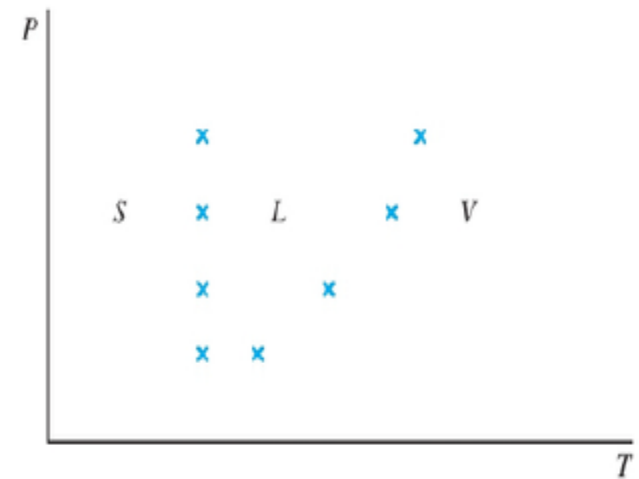
**(tradução do livro “Fundamentals of Thermodynamics, 8ª ed.)**

# As Fronteiras das Fases



**Figura 2.1**

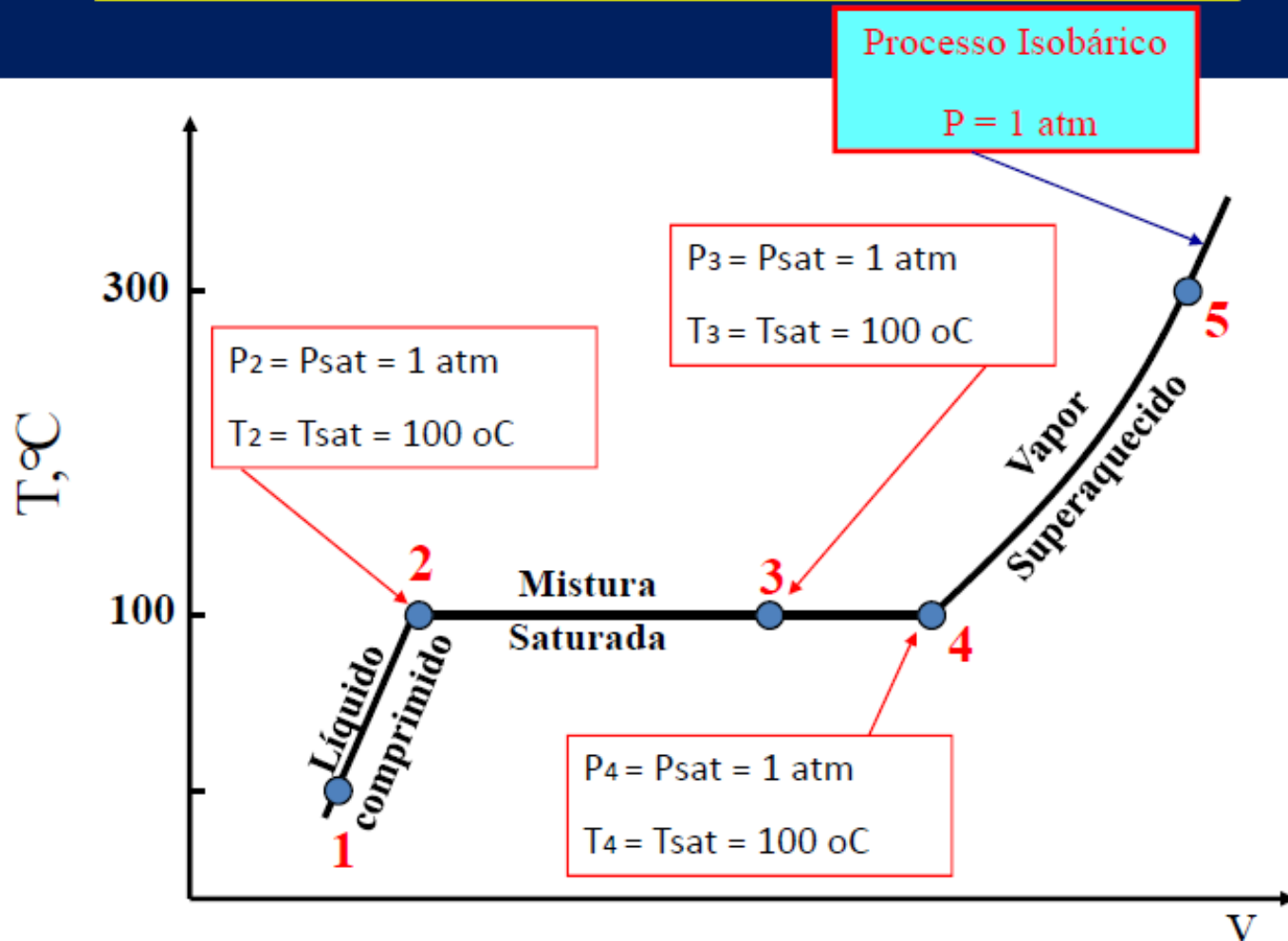
Mudança da fase líquida para vapor de uma substância pura a pressão constante.



**Figura 2.2**

A separação das fases de um diagrama de fases.

## II. Propriedades de Substâncias Puras



## II. Propriedades de Substâncias Puras

- Durante o processo de ebulição, as fases líquida e de vapor coexistem em equilíbrio.
  - A fase líquida é chamada de **líquido saturado**.
  - A fase vapor é chamada de **vapor saturado**.

**Calor Latente** é a quantidade de energia absorvida ou liberada durante a mudança de fase:

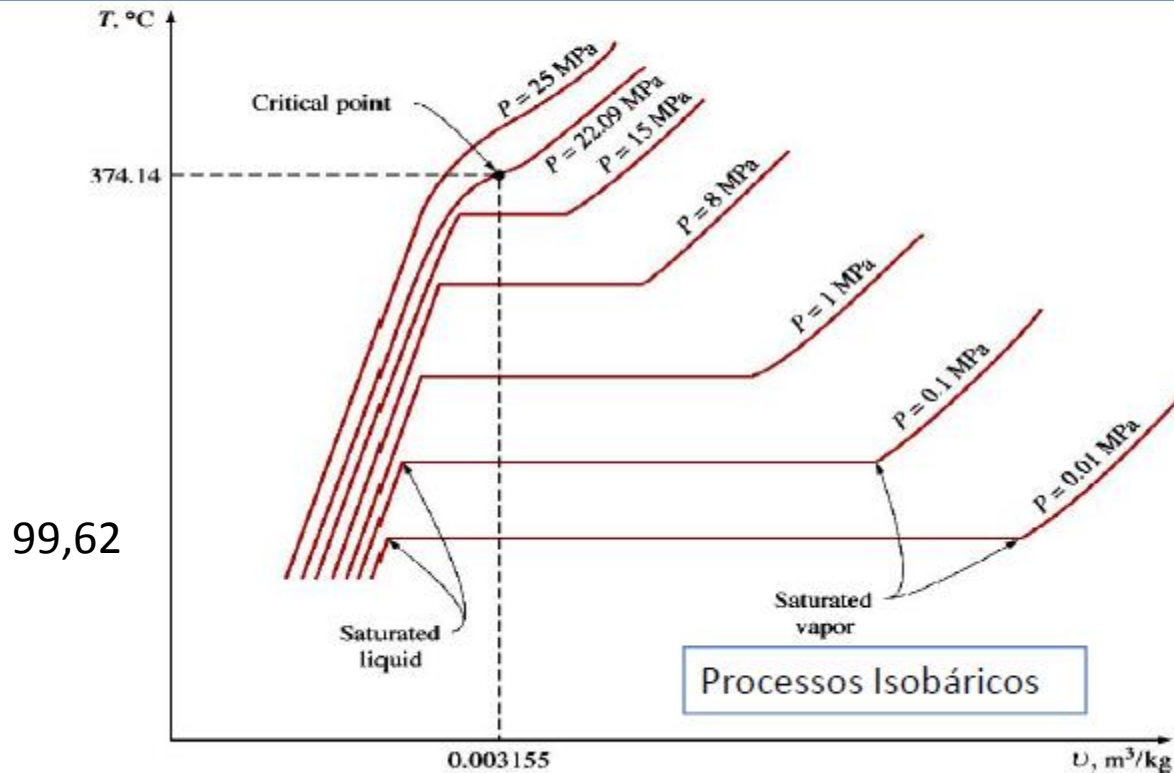
- Calor latente de fusão

solidificação/fusão = 333,7 kJ/kg H<sub>2</sub>O , P<sub>sat</sub> = 1 atm

- Calor latente de vaporização

ebulição/condensação = 2257,1 kJ/kg H<sub>2</sub>O , P<sub>sat</sub> = 1 atm

## II. Propriedades de Substâncias Puras



**Diagrama Tv (água) – Mudança de fase**

## II. Propriedades de Substâncias Puras

### **PONTO CRÍTICO**

- É o ponto onde o estado para o líquido e para o vapor saturado são idênticos.
- A pressão, temperatura e volume neste estado recebem a terminologia CRÍTICA.
- A curva de saturação apresentará uma inflexão com uma inclinação nula.
- A tabela a seguir mostra os valores críticos para algumas substâncias,

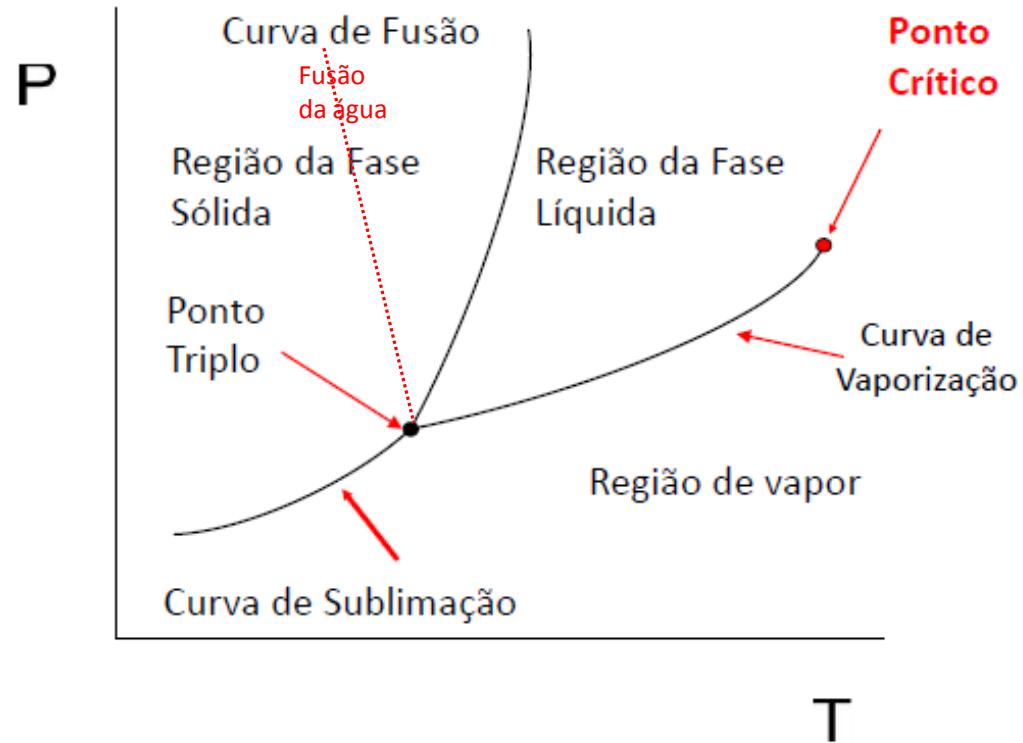
## II. Propriedades de Substâncias Puras

Tabela 2.2

Alguns dados do ponto crítico

	Temperatura crítica, °C	Pressão crítica, MPa	Volume crítico, m <sup>3</sup> /kg
Água	374,14	22,09	0,003 155
Dióxido de carbono	31,05	7,39	0,002 143
Oxigênio	-118,35	5,08	0,002 438
Hidrogênio	-239,85	1,30	0,032 192

## II. Propriedades de Substâncias Puras



**Diagrama de fases de uma substância pura**



## II. Propriedades de Substâncias Puras

### **PONTO TRIPLO**

- É definido como sendo o estado no qual as três fases podem estar presentes em equilíbrio,
- Cada substância tem um PONTO TRIPLO,
- A tabela a seguir mostra o ponto triplo para algumas substâncias,

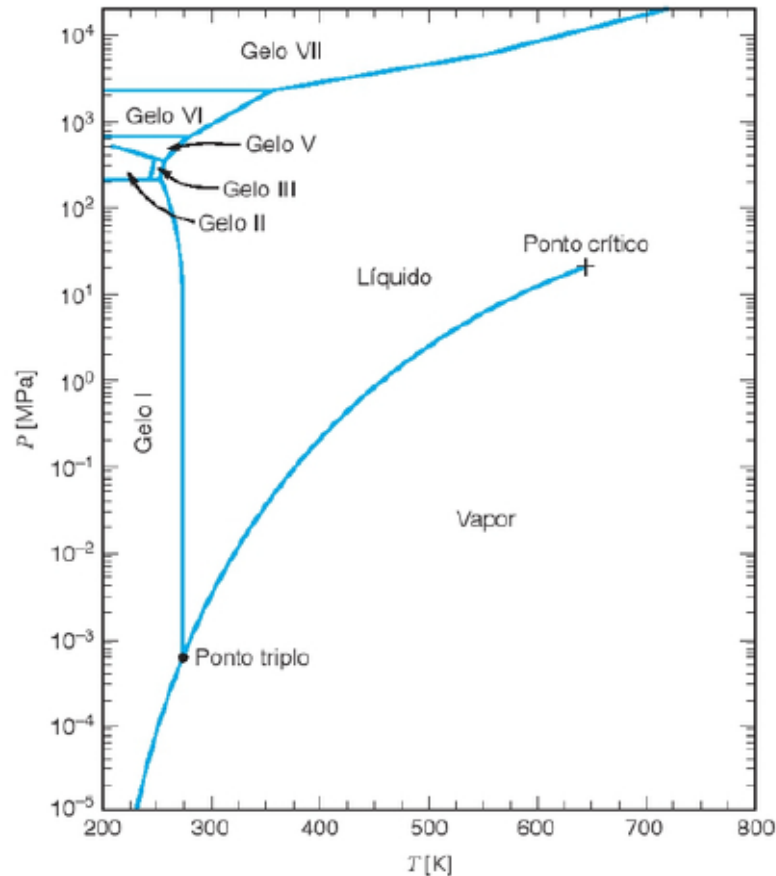
## II. Propriedades de Substâncias Puras

**Tabela 2.1**

Dados de alguns pontos triplos – sólido–líquido–vapor

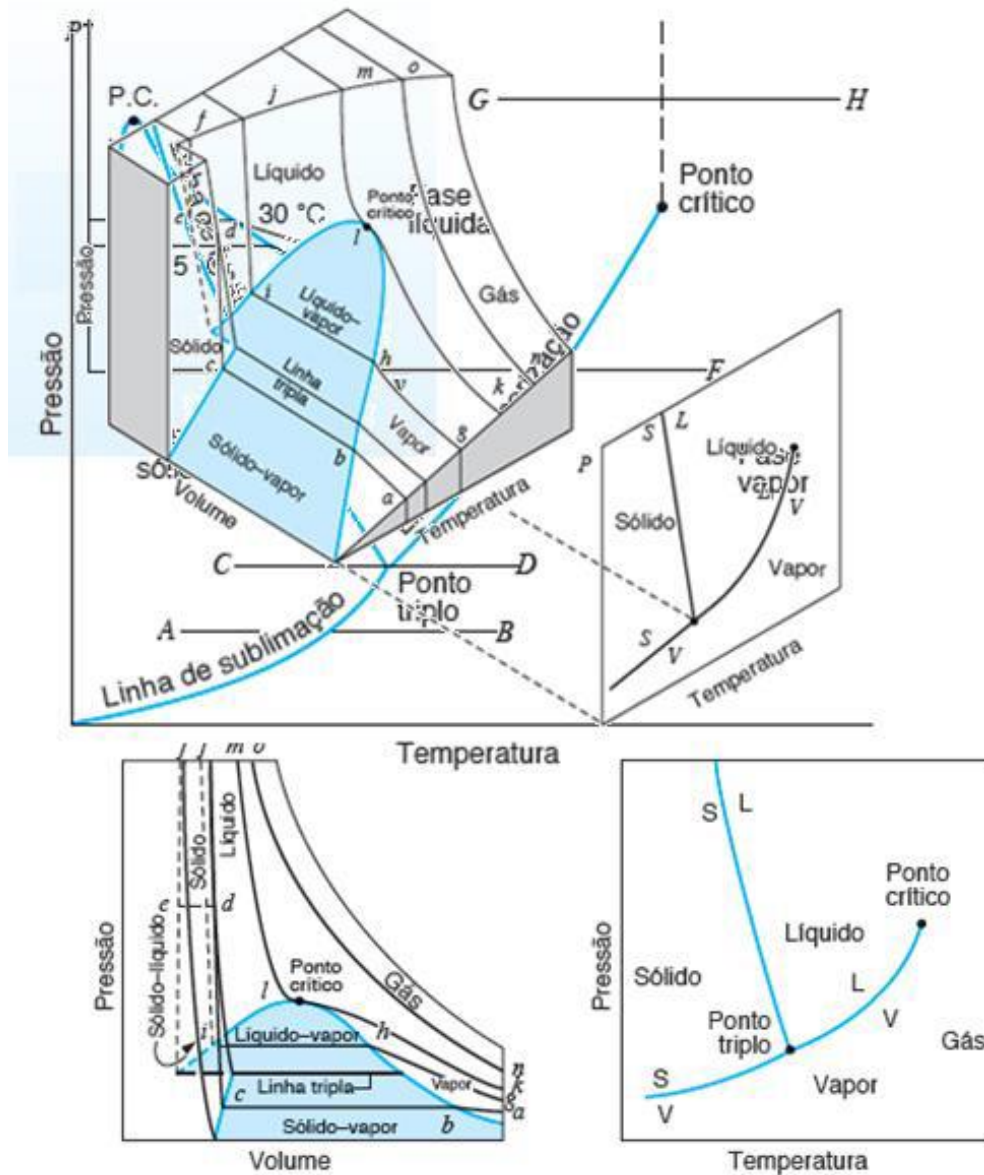
	Temperatura, °C	Pressão, kPa
Hidrogênio (normal)	-259	7,194
Oxigênio	-219	0,15
Nitrogênio	-210	12,53
Dióxido de carbono	-56,4	520,8
Mercúrio	-39	0,00 000 013
Água	0,01	0,6113
Zinco	419	5,066
Prata	961	0,01
Cobre	1 083	0,000 079

# Diagrama de Fases da água



**Figura 2.4**  
Diagrama de fases da água.

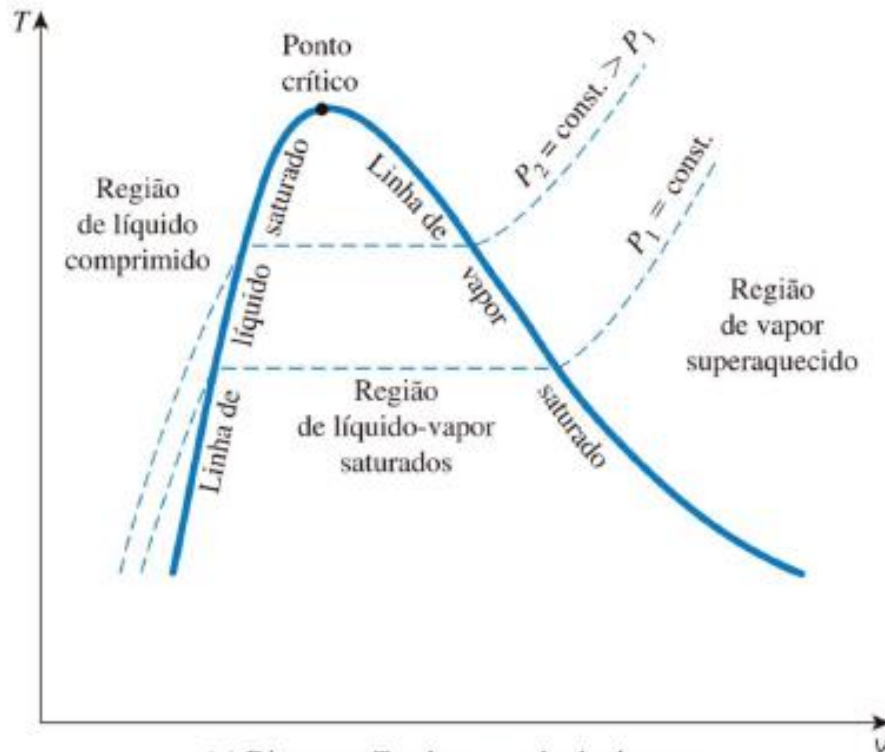
# A Superfície P-V-T



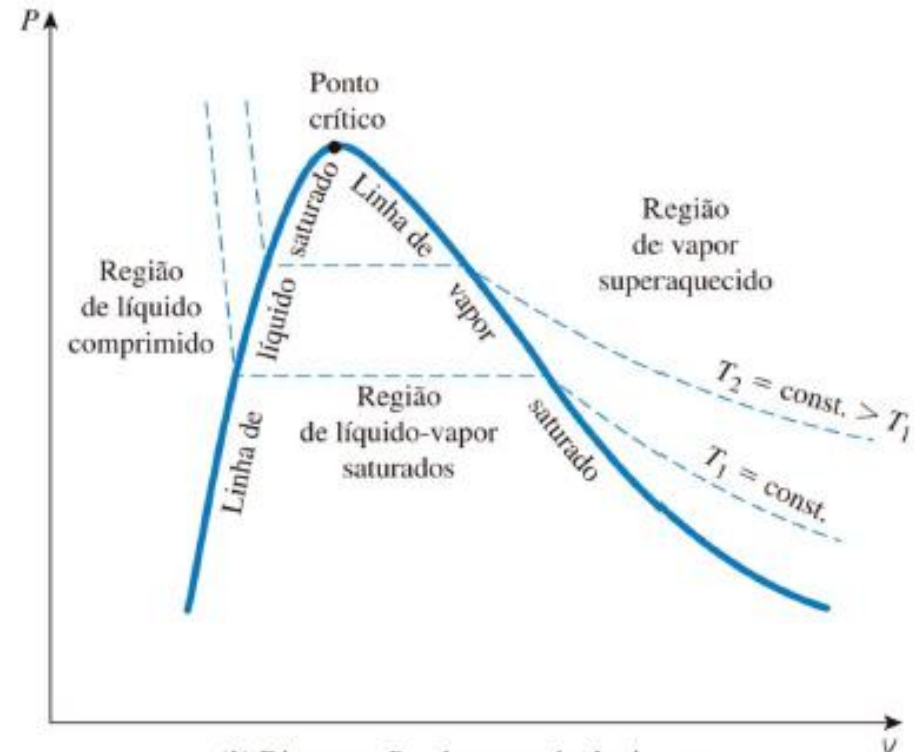
Quando  $v_s > v_l$ :  
A inclinação da  
reta de fusão  
tem coeficiente  
angular  
negativo!

Figura 2.7 – Superfície P-V-T para uma substância que expande a solidificação

# Diagramas $T \times v$ & $P \times v$



(a) Diagrama  $T-v$  de uma substância pura



(b) Diagrama  $P-v$  de uma substância pura

# TABELAS TERMODINÂMICAS

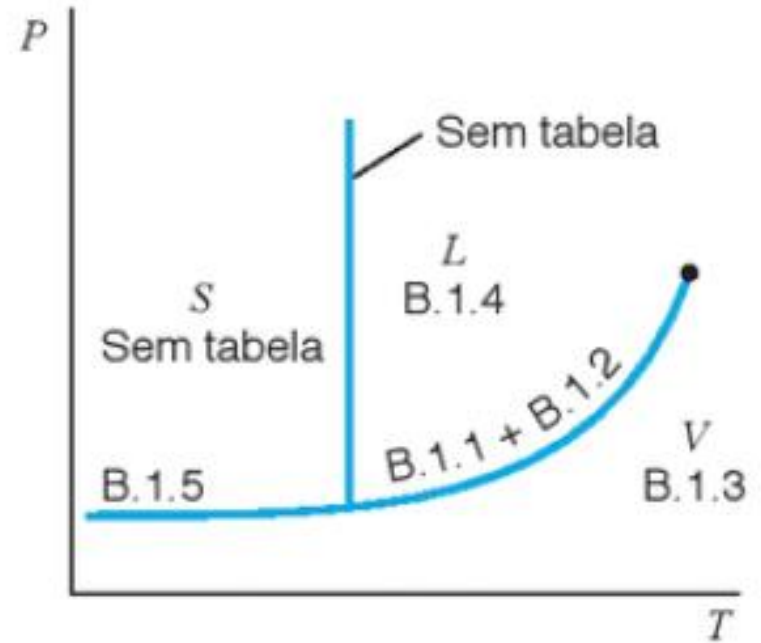
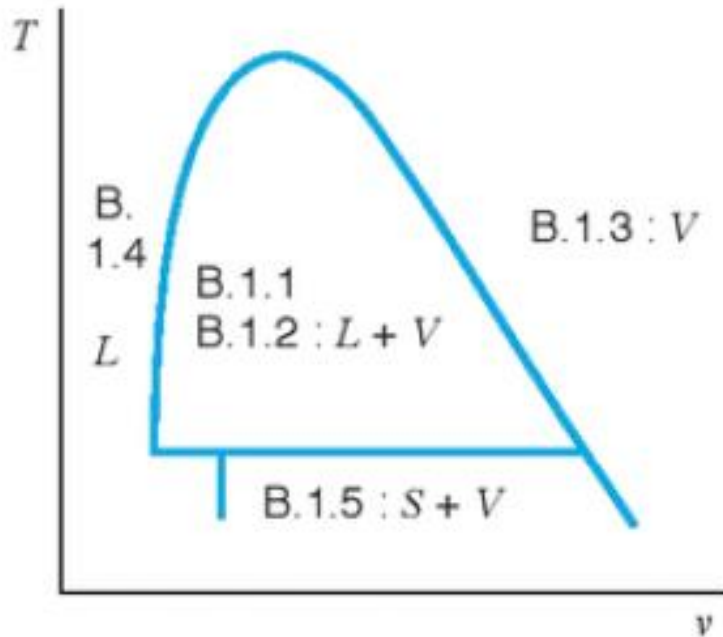


Figura 2.10

Regiões das tabelas de vapor.

# Tabelas de Propriedades

## Tabelas de Saturação Líquido-Vapor

- Entrada: T saturação ou P saturação

## Tabelas de Vapor Superaquecido

- Conjuntos de valores das propriedades em  $f(T,P)$

## Tabelas de Líquido Comprimido

## Tabelas de Saturação Sólido-Vapor

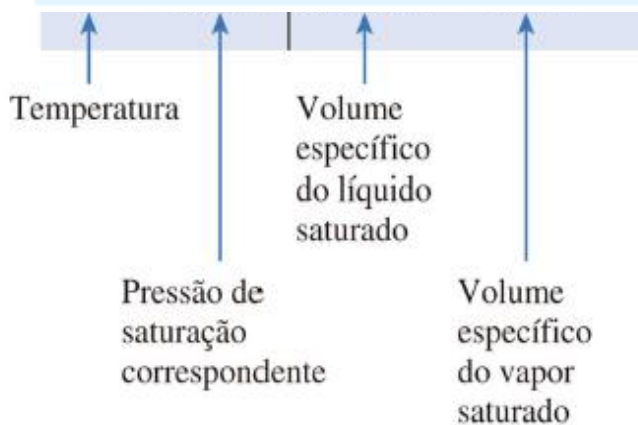
# Exemplo de uma tabela de saturação

Tabela B.1 — Propriedades termodinâmicas da água

Tabela B.1.1

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	$v_l$	$v_v$	$u_l$	$u_{lv}$	$u_v$	$h_l$	$h_{lv}$	$h_v$	$s_l$	$s_{lv}$	$s_v$
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,33	2375,33	0,00	2501,35	2501,35	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671





# Uso das Tabelas Termodinâmicas

## EXEMPLO 2.1 Para a água

Determine a fase de cada um dos estados fornecidos, utilizando as tabelas do Apêndice B, e indique a posição desses estados nos diagramas  $P$ - $v$ ,  $T$ - $v$ , e  $P$ - $T$ .

**a.** 120 °C e 500 kPa

**b.** 120 °C e 0,5 m<sup>3</sup>/kg

Tabela B.1.1

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	$v_f$	$v_g$	$u_f$	$u_{fg}$	$u_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_{fg}$	$s_g$
0,01	0,6113	0,001000	206,132	0,00	2375,33	2375,33	0,00	2501,35	2501,35	0,0000	9,1562	9,1562
5	0,8721	0,001000	147,118	20,97	2361,27	2382,24	20,98	2489,57	2510,54	0,0761	8,9496	9,0257
10	1,2276	0,001000	106,377	41,99	2347,16	2389,15	41,99	2477,75	2519,74	0,1510	8,7498	8,9007
15	1,705	0,001001	77,925	62,98	2333,06	2396,04	62,98	2465,93	2528,91	0,2245	8,5569	8,7813
20	2,339	0,001002	57,7897	83,94	2318,98	2402,91	83,94	2454,12	2538,06	0,2966	8,3706	8,6671
25	3,169	0,001003	43,3593	104,86	2304,90	2409,76	104,87	2442,30	2547,17	0,3673	8,1905	8,5579
30	4,246	0,001004	32,8922	125,77	2290,81	2416,58	125,77	2430,48	2556,25	0,4369	8,0164	8,4533
35	5,628	0,001006	25,2158	146,65	2276,71	2423,36	146,66	2418,62	2565,28	0,5052	7,8478	8,3530
40	7,384	0,001008	19,5229	167,53	2262,57	2430,11	167,54	2406,72	2574,26	0,5724	7,6845	8,2569
45	9,593	0,001010	15,2581	188,41	2248,40	2436,81	188,42	2394,77	2583,19	0,6386	7,5261	8,1647
50	12,350	0,001012	12,0318	209,30	2234,17	2443,47	209,31	2382,75	2592,06	0,7037	7,3725	8,0762
55	15,758	0,001015	9,56835	230,19	2219,89	2450,08	230,20	2370,66	2600,86	0,7679	7,2234	7,9912
60	19,941	0,001017	7,67071	251,09	2205,54	2456,63	251,11	2358,48	2609,59	0,8311	7,0784	7,9095
65	25,03	0,001020	6,19656	272,00	2191,12	2463,12	272,03	2346,21	2618,24	0,8934	6,9375	7,8309
70	31,19	0,001023	5,04217	292,93	2176,62	2469,55	292,96	2333,65	2626,80	0,9548	6,8004	7,7552
75	38,58	0,001026	4,13123	313,87	2162,03	2475,91	313,91	2321,37	2635,28	1,0154	6,6670	7,6824
80	47,39	0,001029	3,40715	334,84	2147,36	2482,19	334,88	2308,77	2643,66	1,0752	6,5369	7,6121
85	57,83	0,001032	2,82757	355,82	2132,58	2488,40	355,88	2296,05	2651,93	1,1342	6,4102	7,5444
90	70,14	0,001036	2,36056	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2866	7,4790
95	84,55	0,001040	1,98186	397,86	2102,70	2500,56	397,94	2270,19	2668,13	1,2500	6,1659	7,4158
100	101,3	0,001044	1,67290	418,91	2087,58	2506,50	419,02	2257,03	2676,05	1,3068	6,0480	7,3548
105	120,8	0,001047	1,41936	440,00	2072,34	2512,34	440,13	2243,70	2683,83	1,3629	5,9328	7,2958
110	143,3	0,001052	1,21014	461,12	2056,96	2518,09	461,27	2230,20	2691,47	1,4184	5,8202	7,2386
115	169,1	0,001056	1,03658	482,28	2041,44	2523,72	482,46	2216,50	2698,96	1,4733	5,7100	7,1832
120	198,5	0,001060	0,89186	503,48	2025,76	2529,24	503,69	2202,61	2706,30	1,5275	5,6020	7,1295

A)  $T = 120^\circ\text{C}$  e  $P = 500\text{ kPa}$

Tab. B.1.1 para  $T = 120^\circ\text{C}$  tem-se  $P_{\text{sat}} = 198,5\text{ kPa}$

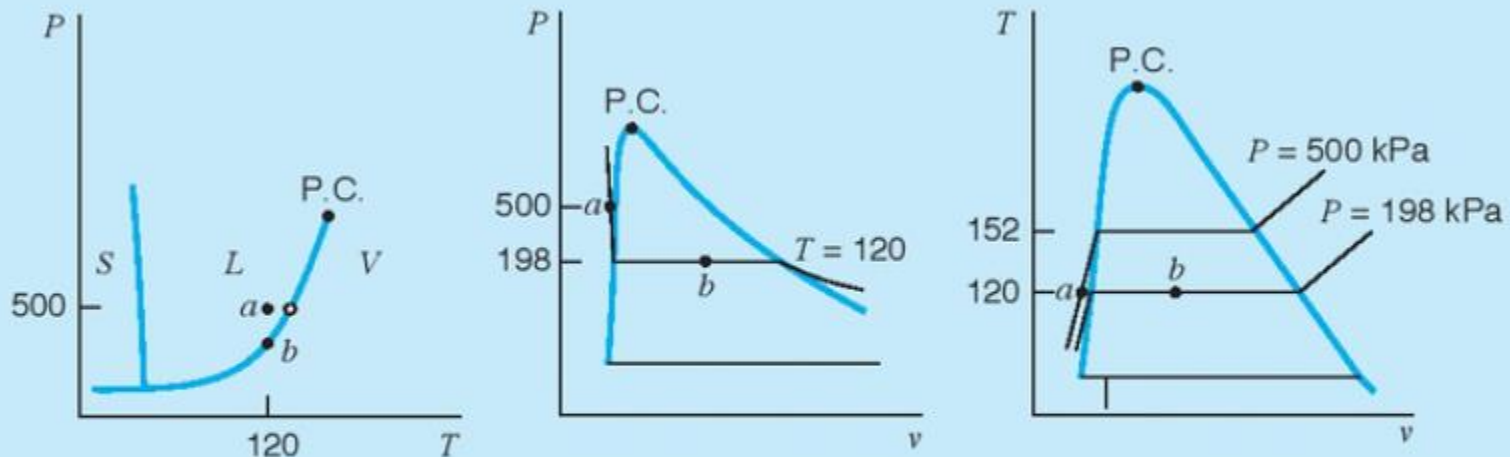
ver abaixo o diagrama  $P \times v$

➤ o estado termodinâmico “a” onde  $P > P_{\text{sat}}$  a  $120^\circ\text{C}$

B)  $T = 120^\circ\text{C}$  e  $v = 0,5\text{ m}^3/\text{kg}$

Tab. B.1.1 os valores de  $v_l = 0,001060\text{ m}^3/\text{kg} < v < v_v = 0,89186\text{ m}^3/\text{kg}$

➤ O estado termodinâmico “b” é de mistura de líquido saturado e vapor saturado (neste caso precisa calcular o título que é a razão da  $m_v/m_l + m_v$ )



**FIGURA 2.11**

Diagramas para o Exemplo 2.1

Na tabela de B.1.1 – Água saturada

Para uma  $T_{sat}$  obtém-se a  $P_{sat}$  e os valores de  $v_l$  e  $v_v$

onde:  $v_l = V_l/m_l$

$$v_v = V_v/m_v$$

**$v = \text{volume específico} = V/m$**

$v_l$  = volume específico da fase de líquido saturado ( $L_{sat}$ ),

$v_v$  = volume específico da fase de vapor saturado ( $V_{sat}$ ),

$m_l$  = massa de  $L_{sat}$

$m_v$  = massa de  $V_{sat}$

Quando tem-se **equilíbrio de líquido<sub>sat</sub> + vapor<sub>sat</sub>** = **ELV** existe

**Título:  $x = m_v/m_{total}$**

# Título (x)

É a razão entre a massa de vapor pela massa total de uma mistura saturada, varia de 0 a 1, sendo:

- Líquido saturado  $\Rightarrow x = 0$
- Vapor saturado  $\Rightarrow x = 1$

ATENÇÃO: as propriedades ( $v$ ,  $u$ ,  $h$ ,  $s$ ) de uma mistura saturada serão calculadas usando o valor do título. Sendo  $z$  a propriedade termodinâmica:

$$z = (1-x)z_l + x.z_v = z_l + x(z_v - z_l) = z_l + x.z_{lv}$$

Por exemplo:  $v = v_l + x.v_{lv}$

# Sistemas bifásicos de líquido saturado e vapor saturado

$$X = \text{título} = m_{\text{vapor}}/m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}}$$

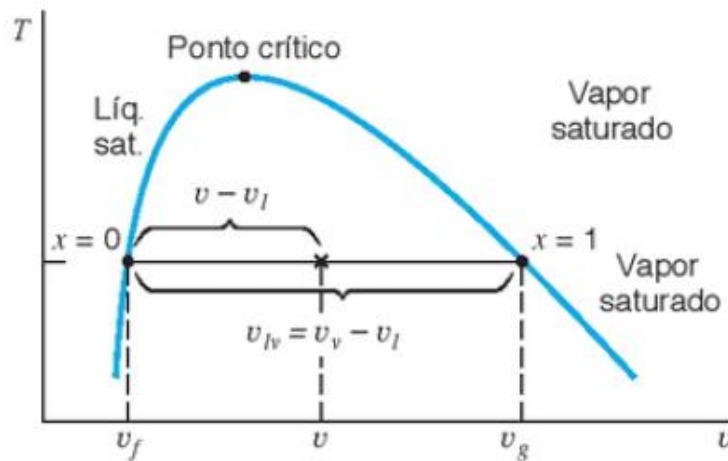


Figura 2.12

Diagrama  $T$ - $v$  para a região bifásica líquido-vapor.

O volume específico médio do sistema é dado por

$$v = \frac{V}{m} = \frac{m_{\text{líquido}}}{m} v_l + \frac{m_{\text{vapor}}}{m} v_v = (1 - x)v_l + xv_v \quad (2.1)$$

em que foi utilizada a definição de **título**, ou seja,  $x = m_{\text{vapor}}/m$ .

Utilizando a definição

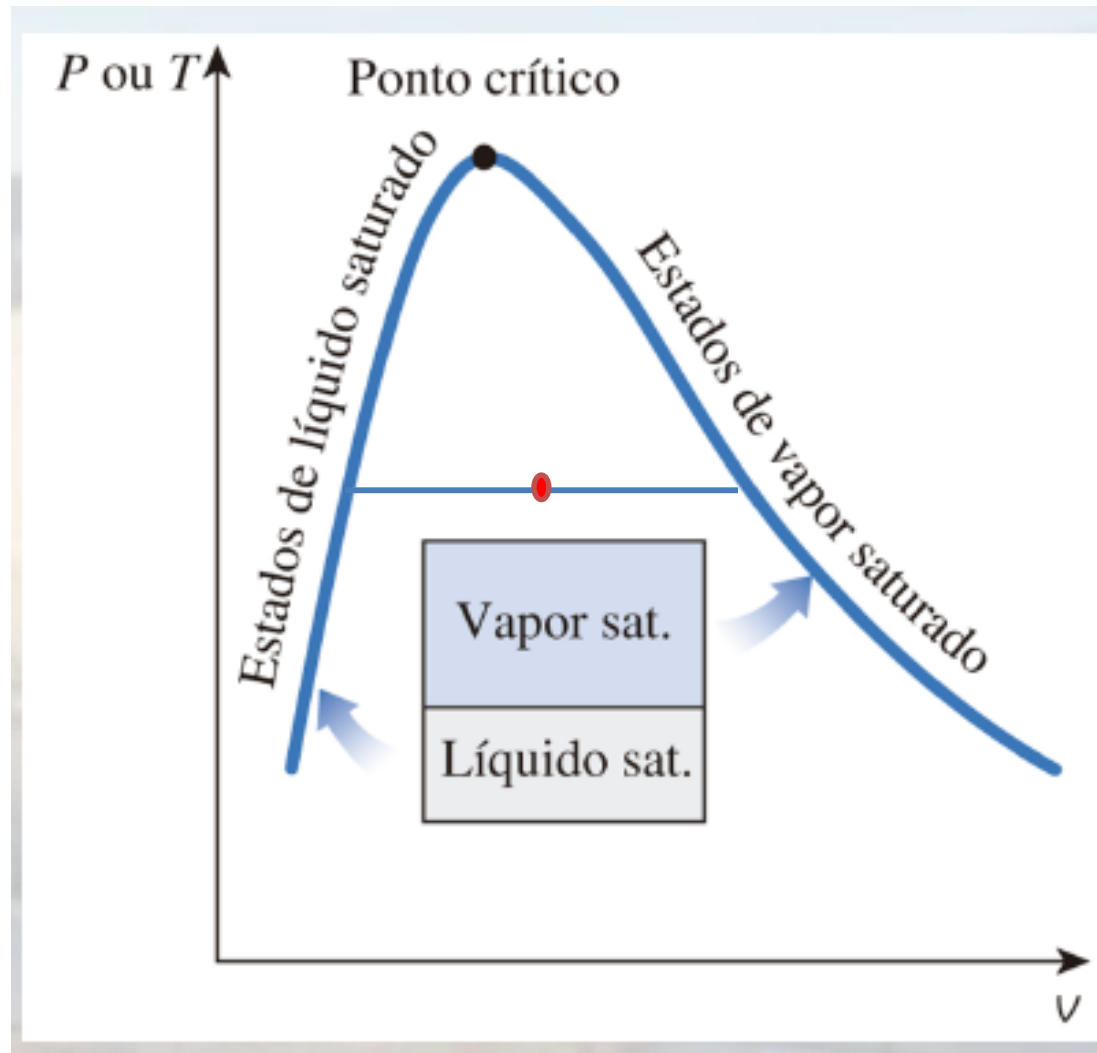
$$v_{lv} = v_v - v_l$$

pode-se reescrever a Equação 2.1 da seguinte forma:

$$v = v_l + xv_{lv} \quad (2.2)$$

O título pode ser interpretado como a fração  $(v - v_l)/v_{lv}$  da distância entre os estados de líquido e vapor saturado, como indicado na Figura 2.12.

# ELV = Mistura Saturada: $L_{sat} + V_{sat}$



# Tabela de Saturação (P)

Tabela B.1.2

Água saturada: tabela em função da pressão

Pressão kPa	Temp. °C	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
<i>P</i>	<i>T</i>	<i>v<sub>l</sub></i>	<i>v<sub>v</sub></i>	<i>u<sub>l</sub></i>	<i>u<sub>lv</sub></i>	<i>u<sub>v</sub></i>	<i>h<sub>l</sub></i>	<i>h<sub>lv</sub></i>	<i>h<sub>v</sub></i>	<i>s<sub>l</sub></i>	<i>s<sub>lv</sub></i>	<i>s<sub>v</sub></i>
0,6113	0,01	0,001000	206,132	0	2375,3	2375,3	0,00	2501,30	2501,30	0,0000	9,1562	9,1562
1	6,98	0,001000	129,20802	29,29	2355,69	2384,98	29,29	2484,89	2514,18	0,1059	8,8697	8,9756
1,5	13,03	0,001001	87,98013	54,70	2338,63	2393,32	54,70	2470,59	2525,30	0,1956	8,6322	8,8278
2	17,50	0,001001	67,00385	73,47	2326,02	2399,48	73,47	2460,02	2533,49	0,2607	8,4629	8,7236
2,5	21,08	0,001002	54,25385	88,47	2315,93	2404,40	88,47	2451,56	2540,03	0,3120	8,3311	8,6431
3	24,08	0,001003	45,66502	101,03	2307,48	2408,51	101,03	2444,47	2545,50	0,3545	8,2231	8,5775
4	28,96	0,001004	34,80015	121,44	2293,73	2415,17	121,44	2432,93	2554,37	0,4226	8,0520	8,4746
5	32,88	0,001005	28,19251	137,79	2282,70	2420,49	137,79	2423,66	2561,45	0,4763	7,9187	8,3950
7,5	40,29	0,001008	19,23775	168,76	2261,74	2430,50	168,77	2406,02	2574,79	0,5763	7,6751	8,2514
10	45,81	0,001010	14,67355	191,79	2246,10	2437,89	191,81	2392,82	2584,63	0,6492	7,5010	8,1501



## Lista 2 (pág. 77 livro texto) entrega até dia 31/08/23

- 2.26** Determine a fase para as seguintes substâncias utilizando as tabelas do Apêndice B:
- Água: 100 °C, 500 kPa
  - Amônia: -10 °C, 150 kPa
  - R-410a: 0 °C, 350 kPa
- 2.27** Determine as propriedades que faltam em  $P$ - $v$ - $T$  e  $x$  para água a:
- 10 MPa; 0,003 m<sup>3</sup>/kg
  - 1 MPa; 190 °C
  - 200 °C; 0,1 m<sup>3</sup>/kg
  - 10 kPa; 10 °C

Para resolver (e aprender) faça um diagrama de fases de cada substância, pode ser  $T$  x  $v$  ou  $P$  x  $v$  (coloque os dados críticos de  $P_c$ ,  $T_c$  e  $V_c$  para visualizar o estado termodinâmico).

Anote sempre qual foi a Tabela usada e os valores das propriedades.

# Tabela de Vapor Superaquecido

Tabela B.1.3

Vapor d'água superaquecido

$T$	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg K)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg K)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg K)
	$P = 10 \text{ kPa (45,81)}$				$P = 50 \text{ kPa (81,33)}$				$P = 100 \text{ kPa (99,62)}$			
Sat.	14,67355	2437,89	2584,63	8,1501	3,24034	2483,85	2645,87	7,5939	1,69400	2506,06	2675,46	7,3593
50	14,86920	2443,87	2592,56	8,1749	-	-	-	-	-	-	-	-
100	17,19561	2515,50	2687,46	8,4479	3,41833	2511,61	2682,52	7,6947	-	-	-	-
150	19,51251	2587,86	2782,99	8,6881	3,88937	2585,61	2780,08	7,9400	1,93636	2582,75	2776,38	7,6133
200	21,82507	2661,27	2879,52	8,9037	4,35595	2659,85	2877,64	8,1579	2,17226	2658,05	2875,27	7,8342
250	24,13559	2735,95	2977,31	9,1002	4,82045	2734,97	2975,99	8,3555	2,40604	2733,73	2974,33	8,0332
300	26,44508	2812,06	3076,51	9,2812	5,28391	2811,33	3075,52	8,5372	2,63876	2810,41	3074,28	8,2157
400	31,06252	2968,89	3279,51	9,6076	6,20929	2968,43	3278,89	8,8641	3,10263	2967,85	3278,11	8,5434
500	35,67896	3132,26	3489,05	9,8977	7,13364	3131,94	3488,62	9,1545	3,56547	3131,54	3488,09	8,8341
600	40,29488	3302,45	3705,40	10,1608	8,05748	3302,22	3705,10	9,4177	4,02781	3301,94	3704,72	9,0975
700	44,91052	3479,63	3928,73	10,4028	8,98104	3479,45	3928,51	9,6599	4,48986	3479,24	3928,23	9,3398
800	49,52599	3663,84	4159,10	10,6281	9,90444	3663,70	4158,92	9,8852	4,95174	3663,53	4158,71	9,5652
900	54,14137	3855,03	4396,44	10,8395	10,82773	3854,91	4396,30	10,0967	5,41353	3854,77	4396,12	9,7767
1000	58,75669	4053,01	4640,58	11,0392	11,75097	4052,91	4640,46	10,2964	5,87526	4052,78	4640,31	9,9764
1100	63,37198	4257,47	4891,19	11,2287	12,67418	4257,37	4891,08	10,4858	6,33696	4257,25	4890,95	10,1658
1200	67,98724	4467,91	5147,78	11,4090	13,59737	4467,82	5147,69	10,6662	6,79863	4467,70	5147,56	10,3462
1300	72,60250	4683,68	5409,70	14,5810	14,52054	4683,58	5409,61	10,8382	7,26030	4683,47	5409,49	10,5182
	$P = 200 \text{ kPa (120,23)}$				$P = 300 \text{ kPa (133,55)}$				$P = 400 \text{ kPa (143,63)}$			
Sat.	0,88573	2529,49	2706,63	7,1271	0,60582	2543,55	2725,30	6,9918	0,46246	2553,55	2738,53	6,8958
150	0,95964	2576,87	2768,80	7,2795	0,63388	2570,79	2760,95	7,0778	0,47084	2564,48	2752,82	6,9299
200	1,08034	2654,39	2870,46	7,5066	0,71629	2650,65	2865,54	7,3115	0,53422	2646,83	2860,51	7,1706
250	1,19880	2731,22	2970,98	7,7085	0,79636	2728,69	2967,59	7,5165	0,59512	2726,11	2964,16	7,3788
300	1,31616	2808,55	3071,79	7,8926	0,87529	2806,69	3069,28	7,7022	0,65484	2804,81	3066,75	7,5661
400	1,54930	2966,69	3276,55	8,2217	1,03151	2965,53	3274,98	8,0329	0,77262	2964,36	3273,41	7,8984
500	1,78139	3130,75	3487,03	8,5132	1,18669	3129,95	3485,96	8,3250	0,88934	3129,15	3484,89	8,1912
600	2,01297	3301,36	3703,96	8,7769	1,34136	3300,79	3703,20	8,5892	1,00555	3300,22	3702,44	8,4557
700	2,24426	3478,81	3927,66	9,0194	1,49573	3478,38	3927,10	8,8319	1,12147	3477,95	3926,53	8,6987
800	2,47539	3663,19	4158,27	9,2450	1,64994	3662,85	4157,83	9,0575	1,23722	3662,51	4157,40	8,9244
900	2,70643	3854,49	4395,77	9,4565	1,80406	3854,20	4395,42	9,2691	1,35288	3853,91	4395,06	9,1361
1000	2,93740	4052,53	4640,01	9,6563	1,95812	4052,27	4639,71	9,4689	1,46847	4052,02	4639,41	9,3360
1100	3,16834	4257,01	4890,68	9,8458	2,11214	4256,77	4890,41	9,6585	1,58404	4256,53	4890,15	9,5255
1200	3,39927	4467,46	5147,32	10,0262	2,26614	4467,23	5147,07	9,8389	1,69958	4466,99	5146,83	9,7059
1300	3,63018	4683,23	5409,26	10,1982	2,42013	4682,99	5409,03	10,0109	1,81511	4682,75	5408,80	9,8780

# Tabela Líquido Comprimido

Tabela B.1.4 (continuação)

Água líquida comprimida

$T$ °C	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg K)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg K)
$P = 30\,000\text{ kPa}$				$P = 50\,000\text{ kPa}$				
0	0,000986	0,25	29,82	0,0001	0,000977	0,20	9,03	-0,0014
20	0,000989	82,16	111,82	0,2898	0,000980	80,98	130,00	0,2847
40	0,000995	164,01	193,87	0,5606	0,000987	161,84	211,20	0,5526
60	0,001004	246,03	276,16	0,8153	0,000996	242,96	292,77	0,8051
80	0,001016	328,28	358,75	1,0561	0,001007	324,32	374,68	1,0439
100	0,001029	410,76	441,63	1,2844	0,001020	405,86	456,87	1,2703
120	0,001044	493,58	524,91	1,5017	0,001035	487,63	539,37	1,4857
140	0,001062	576,86	608,73	1,7097	0,001052	569,76	622,33	1,6915
160	0,001082	660,81	693,27	1,9095	0,001070	652,39	705,91	1,8890
180	0,001105	745,57	778,71	2,1024	0,001091	735,68	790,24	2,0793
200	0,001130	831,34	865,24	2,2892	0,001115	819,73	875,46	2,2634
220	0,001159	918,32	953,09	2,4710	0,001141	904,67	961,71	2,4419
240	0,001192	1006,84	1042,60	2,6489	0,001170	990,69	1049,20	2,6158
260	0,001230	1097,38	1134,29	2,8242	0,001203	1078,06	1138,23	2,7860
280	0,001275	1190,69	1228,96	2,9985	0,001242	1167,19	1229,26	2,9536
300	0,001330	1287,89	1327,80	3,1740	0,001286	1258,66	1322,95	3,1200
320	0,001400	1390,64	1432,63	3,3538	0,001339	1353,23	1420,17	3,2867
340	0,001492	1501,71	1546,47	3,5425	0,001403	1451,91	1522,07	3,4556
360	0,001627	1626,57	1675,36	3,7492	0,001484	1555,97	1630,16	3,6290
380	0,001869	1781,35	1837,43	4,0010	0,001588	1667,13	1746,54	3,8100

# Tabela Saturação Sólido-Vapor

Tabela B.1.5

Saturação sólido – vapor

Temp. $T$ °C	Pressão $p$ kPa	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Sólido sat. <sup>1</sup> $v_s \times 10^3$	Evap. $v_g$	Vapor sat. $v_v$	Sólido sat. $u_s$	Subl. $u_{sv}$	Vapor sat. $u_v$	Sólido sat. $h_s$	Subl. $h_{sv}$	Vapor sat. $h_v$	Sólido sat. $s_s$	Subl. $s_{sv}$	Vapor sat. $s_v$
0,01	0,6113	0,0010908	206,152	206,153	-333,40	2708,7	2375,3	-333,40	2834,7	2501,3	-1,2210	10,3772	9,1562
0	0,6108	0,0010908	206,314	206,315	-333,42	2708,7	2375,3	-333,42	2834,8	2501,3	-1,2211	10,3776	9,1565
-2	0,5177	0,0010905	241,662	241,663	-337,61	2710,2	2372,5	-337,61	2835,3	2497,6	-1,2369	10,4562	9,2193
-4	0,4376	0,0010901	283,798	283,799	-341,78	2711,5	2369,8	-341,78	2835,7	2494,0	-1,2526	10,5358	9,2832
-6	0,3689	0,0010898	334,138	334,139	-345,91	2712,9	2367,0	-345,91	2836,2	2490,3	-1,2683	10,6165	9,3482
-8	0,3102	0,0010894	394,413	394,414	-350,02	2714,2	2364,2	-350,02	2836,6	2486,6	-1,2839	10,6982	9,4143
-10	0,2601	0,0010891	466,756	466,757	-354,09	2715,5	2361,4	-354,09	2837,0	2482,9	-1,2995	10,7809	9,4815
-12	0,2176	0,0010888	553,802	553,803	-358,14	2716,8	2358,7	-358,14	2837,3	2479,2	-1,3150	10,8648	9,5498
-14	0,1815	0,0010884	658,824	658,824	-362,16	2718,0	2355,9	-362,16	2837,6	2475,5	-1,3306	10,9498	9,6192
-16	0,1510	0,0010881	785,906	785,907	-366,14	2719,2	2353,1	-366,14	2837,9	2471,8	-1,3461	11,0359	9,6898
-18	0,1252	0,0010878	940,182	940,183	-370,10	2720,4	2350,3	-370,10	2838,2	2468,1	-1,3617	11,1233	9,7616
-20	0,10355	0,0010874	1128,112	1128,113	-374,03	2721,6	2347,5	-374,03	2838,4	2464,3	-1,3772	11,2120	9,8348
-22	0,08535	0,0010871	1357,863	1357,864	-377,93	2722,7	2344,7	-377,93	2838,6	2460,6	-1,3928	11,3020	9,9093
-24	0,07012	0,0010868	1639,752	1639,753	-381,80	2723,7	2342,0	-381,80	2838,7	2456,9	-1,4083	11,3935	9,9852
-26	0,05741	0,0010864	1986,775	1986,776	-385,64	2724,8	2339,2	-385,64	2838,9	2453,2	-1,4239	11,4864	10,0625
-28	0,04684	0,0010861	2415,200	2415,201	-389,45	2725,8	2336,4	-389,45	2839,0	2449,5	-1,4394	11,5808	10,1413
-30	0,03810	0,0010858	2945,227	2945,228	-393,23	2726,8	2333,6	-393,23	2839,0	2445,8	-1,4550	11,6765	10,2215
-32	0,03090	0,0010854	3601,822	3601,823	-396,98	2727,8	2330,8	-396,98	2839,1	2442,1	-1,4705	11,7733	10,3028
-34	0,02499	0,0010851	4416,252	4416,253	-400,71	2728,7	2328,0	-400,71	2839,1	2438,4	-1,4860	11,8713	10,3853
-36	0,02016	0,0010848	5430,115	5430,116	-404,40	2729,6	2325,2	-404,40	2839,1	2434,7	-1,5014	11,9704	10,4690
-38	0,01618	0,0010844	6707,021	6707,022	-408,06	2730,5	2322,4	-408,06	2839,0	2431,0	-1,5168	12,0714	10,5546
-40	0,01286	0,0010841	8366,395	8366,396	-411,70	2731,3	2319,6	-411,70	2838,9	2427,2	-1,5321	12,1768	10,6447

N.T.: Os valores tabelados de  $v_g$  estão multiplicados por 1000. Por exemplo, a -6 °C:  $v_g \times 10^3 = 1,0898$ . Portanto,  $v_g = 0,0010898$  m<sup>3</sup>/kg.

Errado, o  $v_s$   
não está  
multiplicado  
por 1000

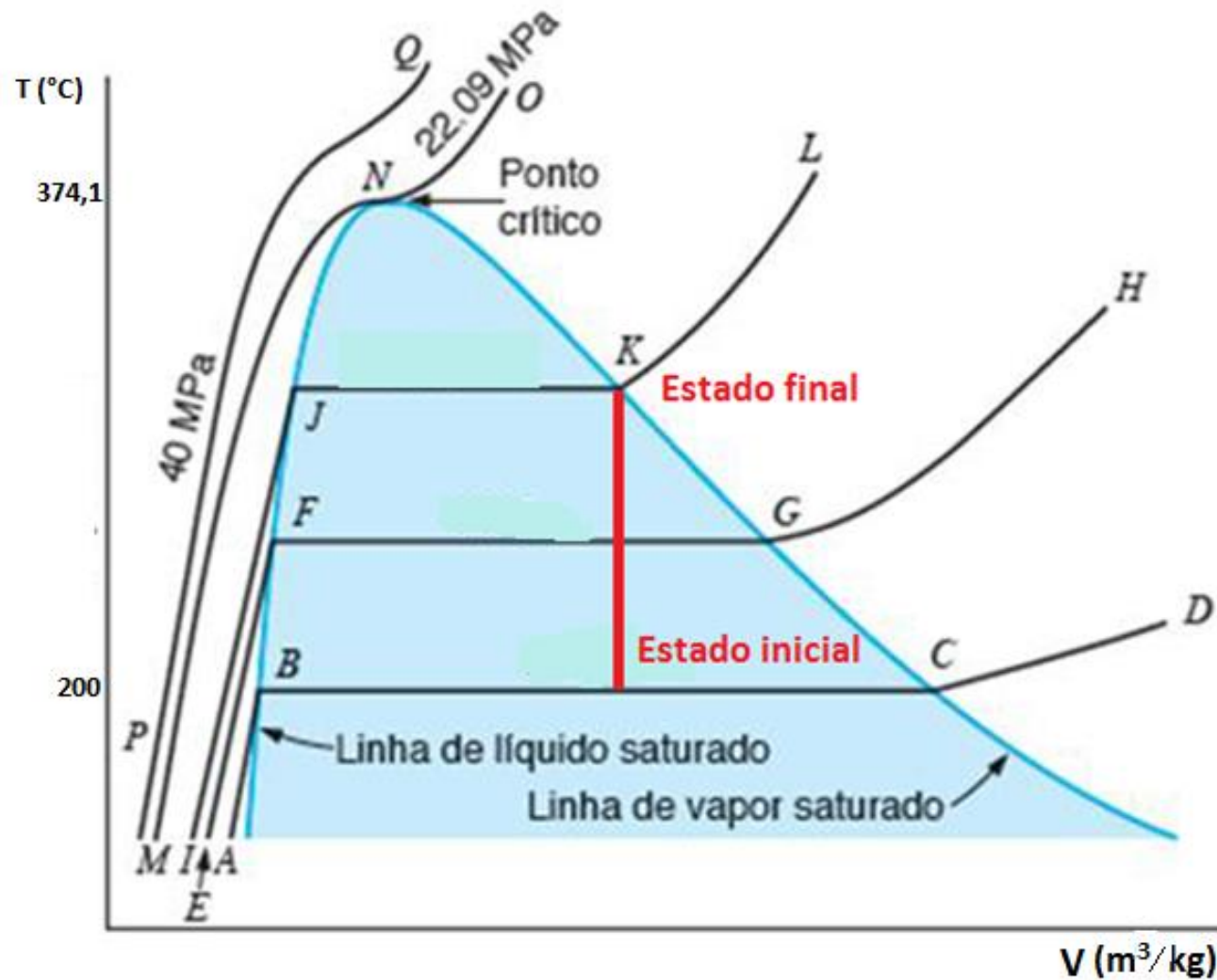


## EXEMPLO 2

Um tanque rígido contém inicialmente 1.4 kg de uma mistura saturada de água a 200°C. Nesse estado, 25% do volume são ocupados pelo líquido e o restante pelo vapor. Calor é adicionado a água até que o tanque contenha somente vapor saturado. Determine: (a) o volume do tanque, (b) a temperatura e pressão final.

## SOLUÇÃO

Dados: mistura saturada  $\xrightarrow{\Delta}$  vapor saturado  
 $T=200^\circ\text{C}$   
 $m = 1.4 \text{ kg}$   $x = 1.0$   
 $v_L=0.25V, v_V=0.75V$  (V : volume do tanque)



Em B:  $v_l$   
 Em C:  $v_v$

Diagrama de fases da água

Tabela B.1.1 (continuação)

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	$v_f$	$v_g$	$u_f$	$u_{fg}$	$u_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_{fg}$	$s_g$
185	1122,7	0,001134	0,17409	784,08	1802,90	2586,98	785,36	1997,07	2782,43	2,1878	4,3586	6,5464
190	1254,4	0,001141	0,15654	806,17	1783,84	2590,01	807,61	1978,76	2786,37	2,2358	4,2720	6,5078
195	1397,8	0,001149	0,14105	828,36	1764,43	2592,79	829,96	1959,99	2789,96	2,2835	4,1863	6,4697
200	1553,8	0,001156	0,12736	850,64	1744,66	2595,29	852,43	1940,75	2793,18	2,3308	4,1014	6,4322
205	1723,0	0,001164	0,11521	873,02	1724,49	2597,52	875,03	1921,00	2796,03	2,3779	4,0172	6,3951
210	1906,3	0,001173	0,10441	895,51	1703,93	2599,44	897,75	1900,73	2798,48	2,4247	3,9337	6,3584
215	2104,2	0,001181	0,09479	918,12	1682,94	2601,06	920,61	1879,91	2800,51	2,4713	3,8507	6,3221
220	2317,8	0,001190	0,08619	940,85	1661,49	2602,35	943,61	1858,51	2802,12	2,5177	3,7683	6,2860

(a) Da Tabela B.1.1 - Água saturada para  $T = 200 \text{ }^\circ\text{C}$  tem-se:

$$\nu_L = 0.001156 \text{ m}^3/\text{kg}, \quad \nu_V = 0.12736 \text{ m}^3/\text{kg}$$

Como há 1.4 kg de mistura saturada, podemos escrever que:

$$m_M = m_L + m_V$$

$$\nu_L = V_L/m_L \quad \nu_V = V_V/m_V$$

$V_L$  = volume fase líquida,

$V_V$  = volume fase vapor,

$m_L$  = massa da fase líquida

$m_V$  = massa da fase de vapor

$$m_M = \frac{V_L}{\nu_L} + \frac{V_V}{\nu_V}$$

$$1.4 \text{ kg} = \frac{0.25V \text{ m}^3}{0.001156 \text{ m}^3/\text{kg}} + \frac{0.75V \text{ m}^3}{0.12736 \text{ m}^3/\text{kg}}$$

$$V = 0.0063 \text{ m}^3$$



**(b)** Processo a volume constante

$$v = \frac{V}{m} = \frac{0.0063 \text{ m}^3}{1.4 \text{ kg}}$$

$$v = 0.0045 \text{ m}^3/\text{kg}$$

O sistema recebeu calor até que a mistura saturada se tornou apenas vapor saturado.

Assim tem-se que procurar na Tabela B.1.1 qual o valor de T e P que tem o volume específico de vapor saturado ( $v_v$ ) igual a  $0,0045 \text{ m}^3/\text{kg}$ .

Tabela B.1.1 (continuação)

Água saturada: tabela em função da temperatura

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)		Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido sat.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.	Líquido sat.	Evap.	Vapor sat.
T	P	v <sub>l</sub>	v <sub>v</sub>	u <sub>l</sub>	u <sub>lv</sub>	u <sub>v</sub>	h <sub>l</sub>	h <sub>lv</sub>	h <sub>v</sub>	s <sub>l</sub>	s <sub>lv</sub>	s <sub>v</sub>
185	1122,7	0,001134	0,17409	784,08	1802,90	2586,98	785,36	1997,07	2782,43	2,1878	4,3586	6,5464
190	1254,4	0,001141	0,15654	806,17	1783,84	2590,01	807,61	1978,76	2786,37	2,2358	4,2720	6,5078
...												
370	21028	0,002213	0,00493	1843,84	384,69	2228,53	1890,37	441,75	2332,12	4,1104	0,6868	4,7972
<b>T</b>	<b>P</b>	<b>0,0045</b>										
374,1	22089	0,003155	0,00315	2029,58	0,00	2029,58	2099,26	0,00	2099,26	4,4297	0,0000	4,4297

O valor exato 0,0045 m<sup>3</sup>/kg não foi encontrado na tabela, portanto para calcular a T e P final do processo de aquecimento do sistema tem-se que interpolar com os valores próximos de v:

$$\frac{T - 370}{374,1 - 370} = \frac{P - 21028}{22089 - 21028} = \frac{0,0045 - 0,00493}{0,00315 - 0,00493} = 0,24157$$

$$T = 370,99 \text{ °C}$$

$$P = 21284 \text{ kPa}$$

**Para complementar:**

**(c) qual a variação de entalpia e de energia interna e**

**(d) calcule o calor necessário para aquecer a mistura saturada do Exemplo 2?**

Na tabela B.1.1 tirar os valores das propriedades os estados 1 e 2:

Estado 1:  $h_l, h_{lv}, u_l, u_{lv}$  e calcular  $h_1 = h_l + x \cdot h_{lv}$  e  $u_1 = u_l + x \cdot u_{lv}$

Estado 2 (vapor saturado) na  $T_2 = 370,99 \text{ }^\circ\text{C}$ , calcular  $h_2$  e  $u_2$  por interpolação

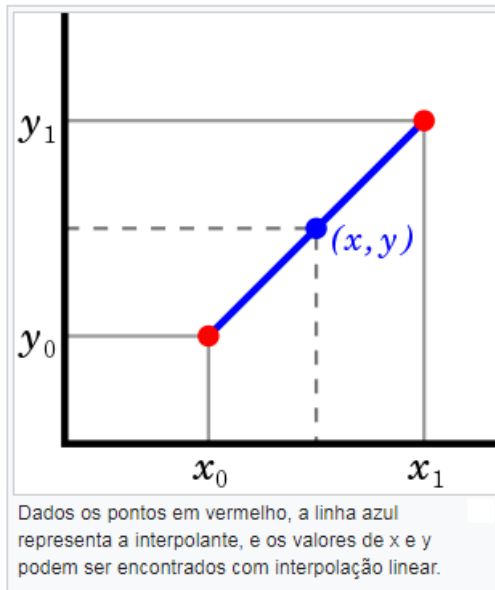
Obs. lembrando que  $h_2 = h_v$  e  $u_2 = u_v$

Sendo estes valores específicos tem-se:

$$\Delta U = m (u_2 - u_1) \text{ lembrar que tem que usar o valor da massa}$$

$$\Delta H = m (h_2 - h_1)$$

## Interpolação linear entre dois pontos:



Dados os pontos  $(x_0, y_0)$  e  $(x_1, y_1)$ , a **interpolante linear** é a linha entre os dois pontos. Para um valor  $x$  no intervalo  $(x_0, x_1)$ , o valor  $y$  é a linha entre os pontos. Estabelecendo a seguinte relação:

$$\frac{y - y_0}{y_1 - y_0} = \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

que pode ser derivado geometricamente da figura ao lado. Se trata de um caso especial de **interpolação polinomial** com  $n = 1$ .

Tal que resolvendo para  $y$  com  $x$  temos a relação geométrica:

$$y = y_0 + (y_1 - y_0) \frac{x - x_0}{x_1 - x_0}$$

cuja formula é a interpolação linear entre o intervalo  $(x_0, x_1)$ . Fora do intervalo denominamos de **extrapolação linear**.