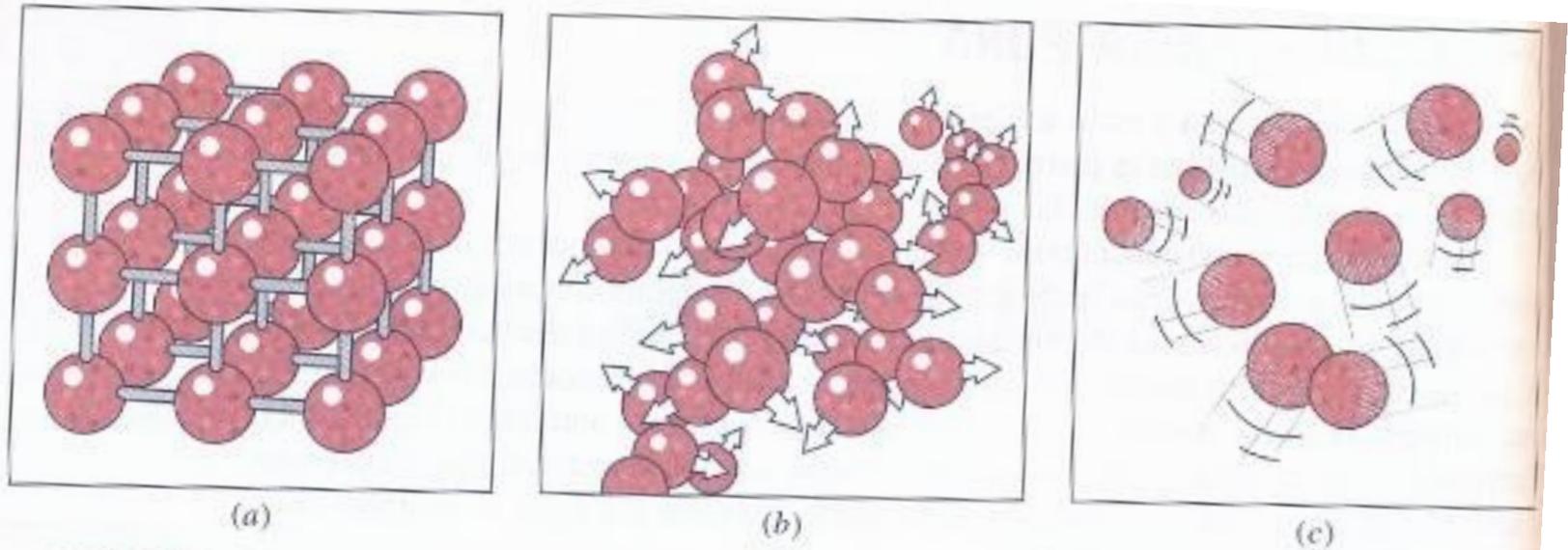


# Cap. 3: Propriedades Termodinâmicas

- *Fase*: Quantidade de matéria que é homogênea como um todo, tanto em composição química como em estrutura física (sólido, líquido ou vapor).
  - Gelo + água = 2 fases
  - Gases: Oxigênio + Nitrogênio = 1 fase
  - Água + Álcool = 1 fase (miscível)
  - Água + óleo = 2 fases (imiscível)
- *Substância Pura*: A composição química é uniforme e invariável, podendo existir em várias fases.
- *Princípio de estados equivalentes*: Número de propriedades independentes necessárias para definir um estado.

# Sólido, líquido e gasoso

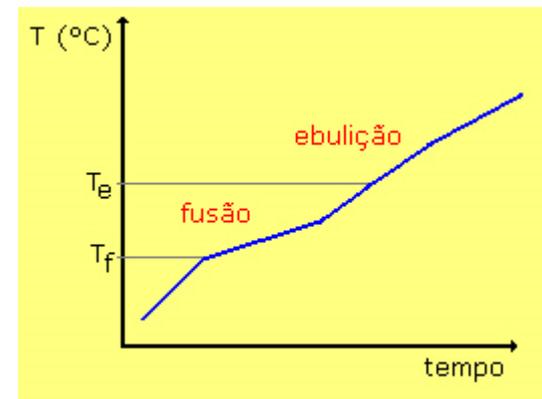
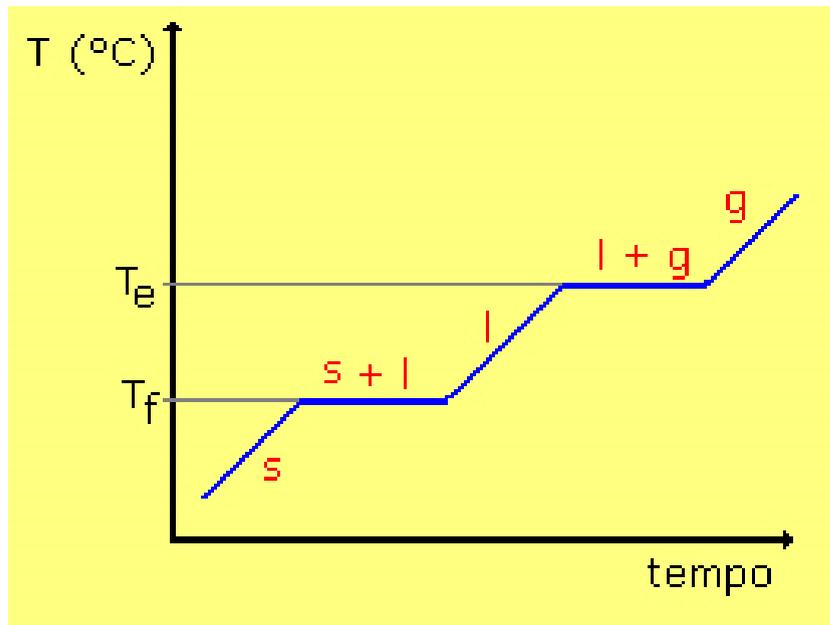
<https://www.youtube.com/watch?v=4LxJ8v8X6xs>



**FIGURA 3-5**

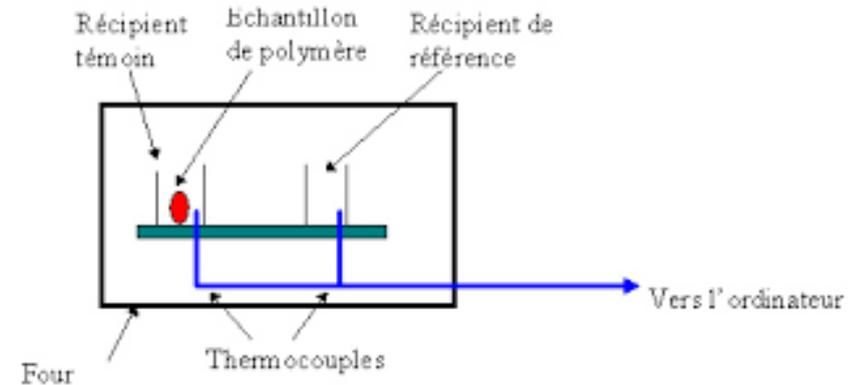
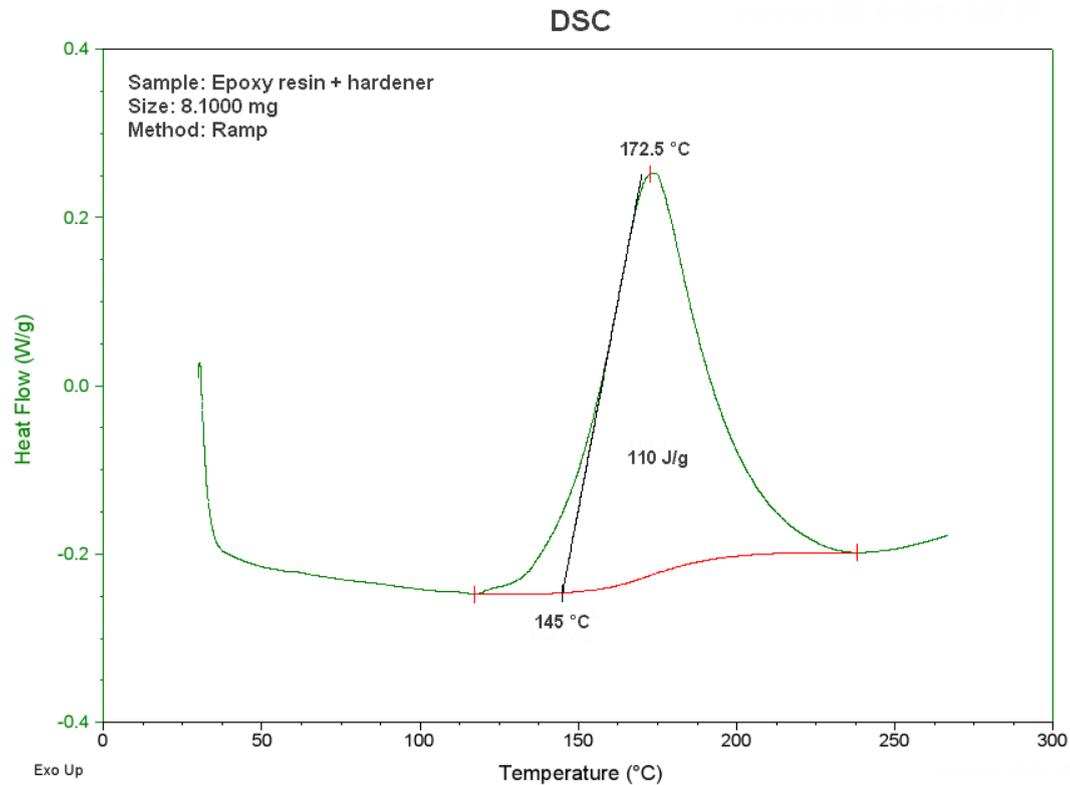
A organização dos átomos nas diferentes fases: (a) moléculas ocupam posições relativamente fixas em um sólido, (b) grupos de moléculas se movimentam com relação aos outros na fase líquida e (c) moléculas se movimentam de maneira aleatória na fase gasosa.

- Propriedades de substâncias puras

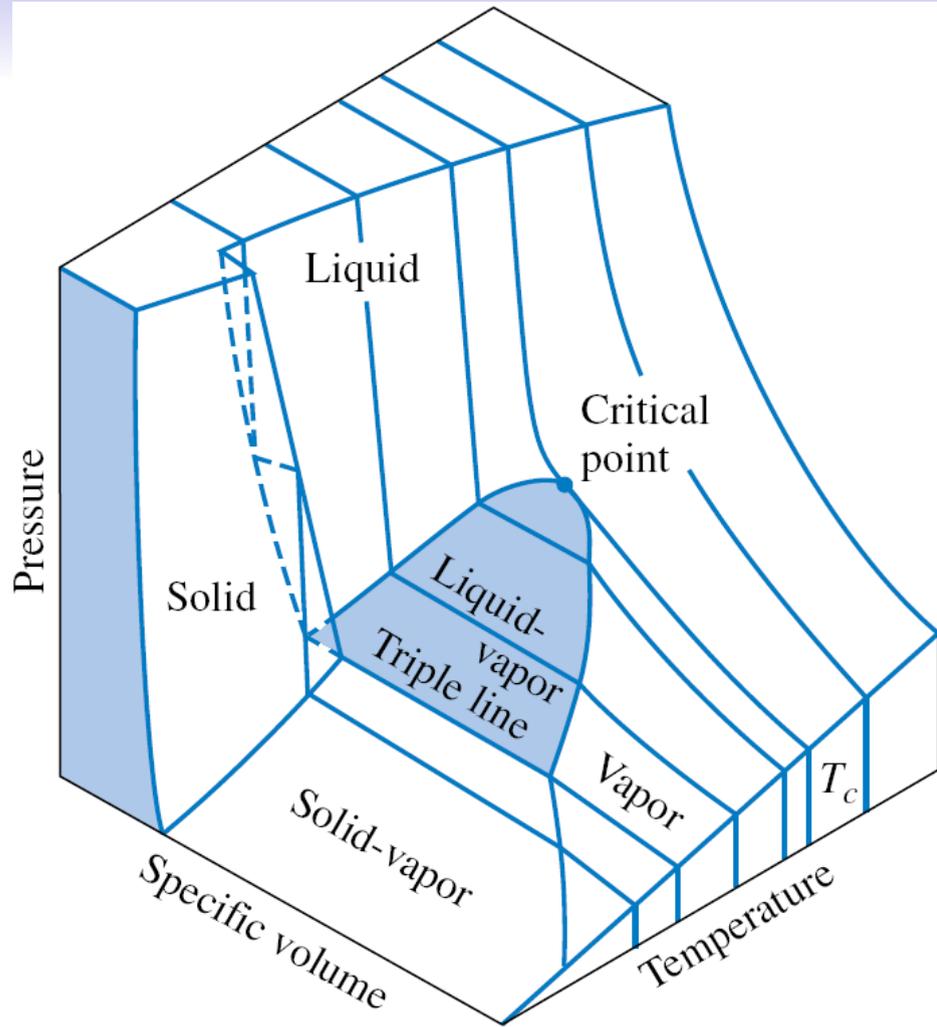


Substância impura

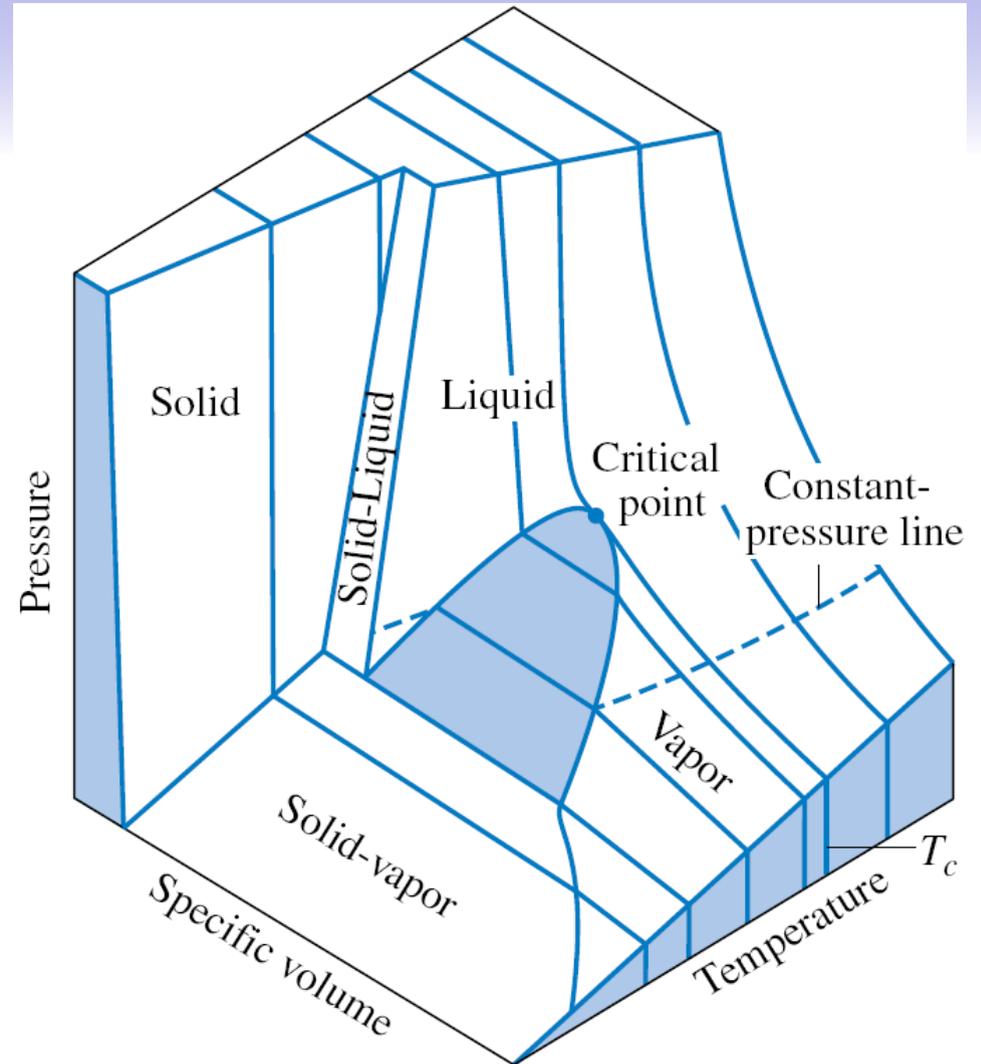
# Calorímetro diferencial DSC



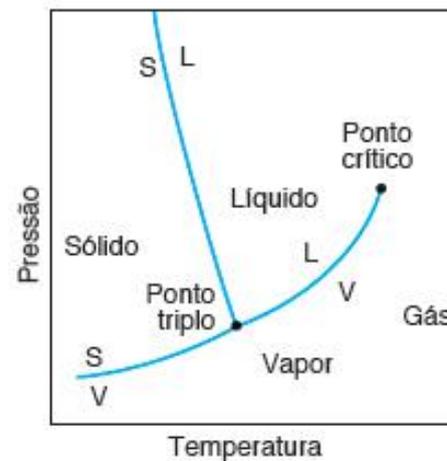
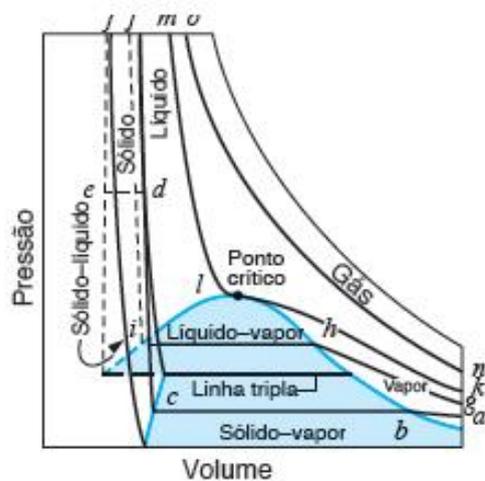
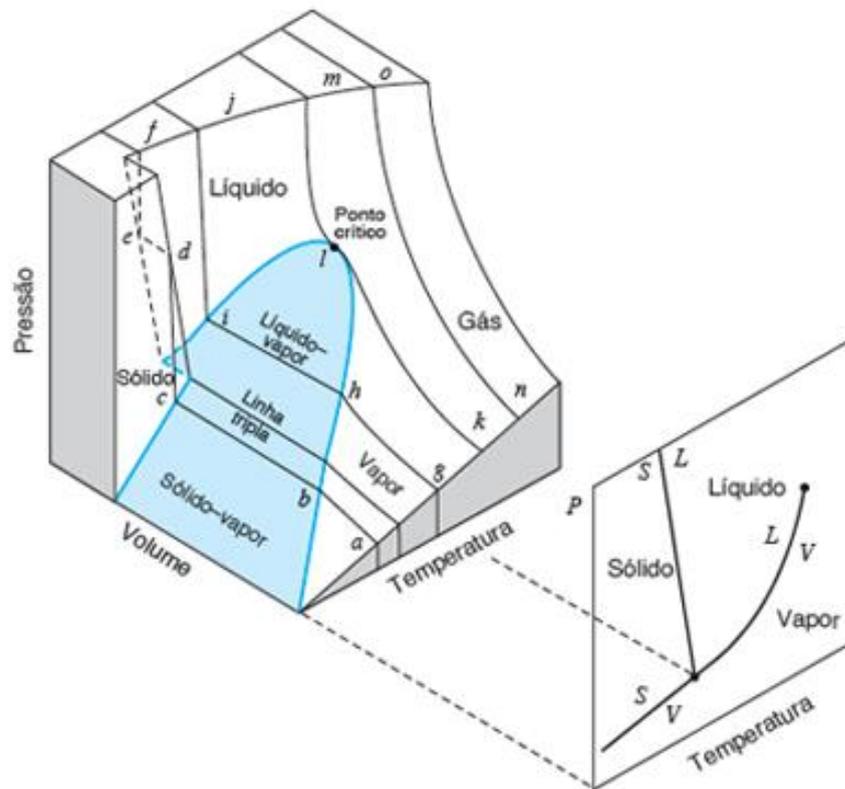
# A Superfície $p-v-T$



Subst. que expande quando solidifica  
(água)



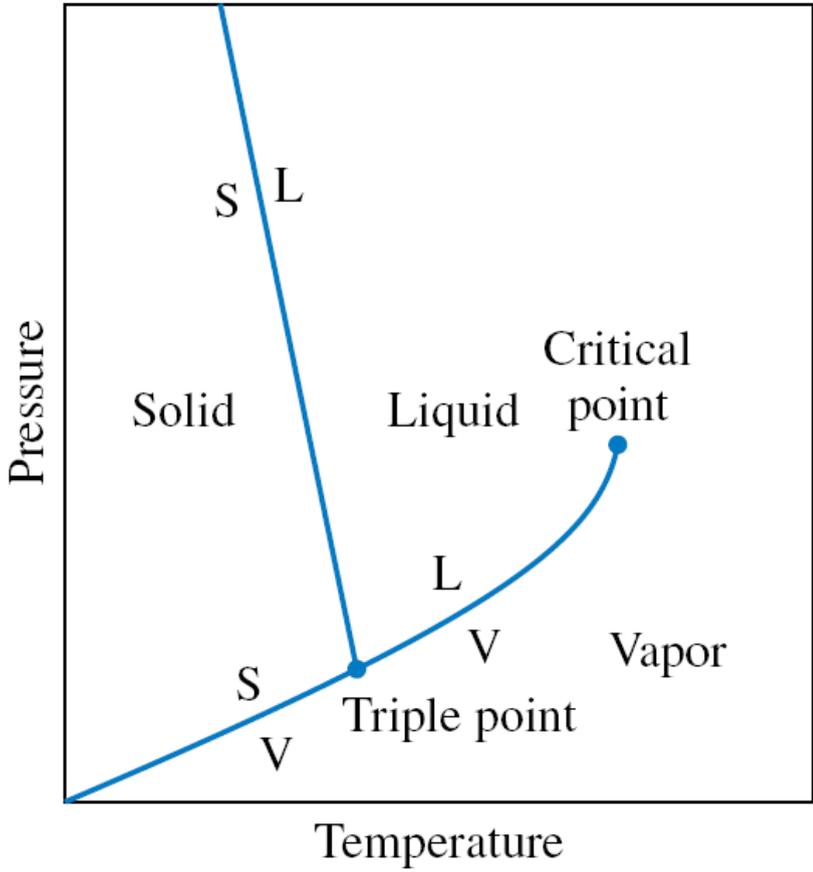
Subst. que contrai quando solidifica



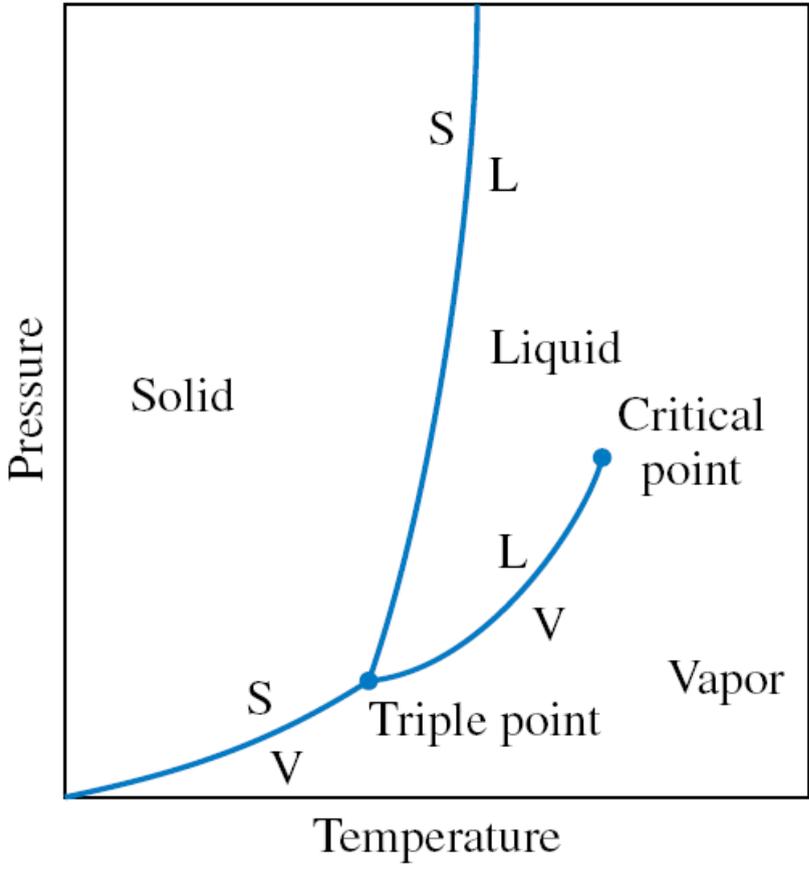
**Figura 3.18**

Superfície pressão–volume–temperatura para uma substância que expande na solidificação.

# Projeções da Superfície $p-v-T$

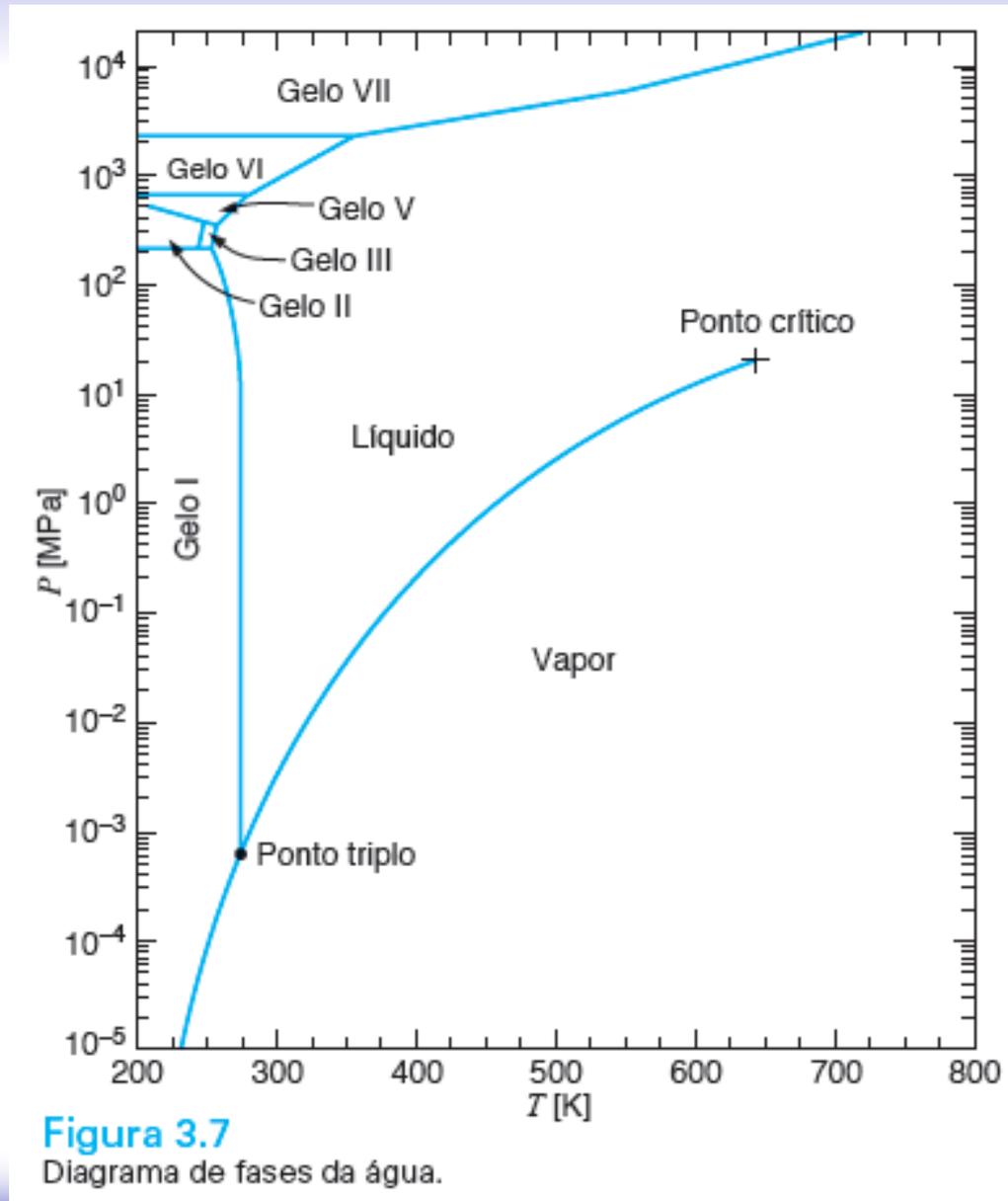


Subst. que expande quando solidifica  
(Água)



Subst. que contrai quando solidifica

# Diagrama de fases da água

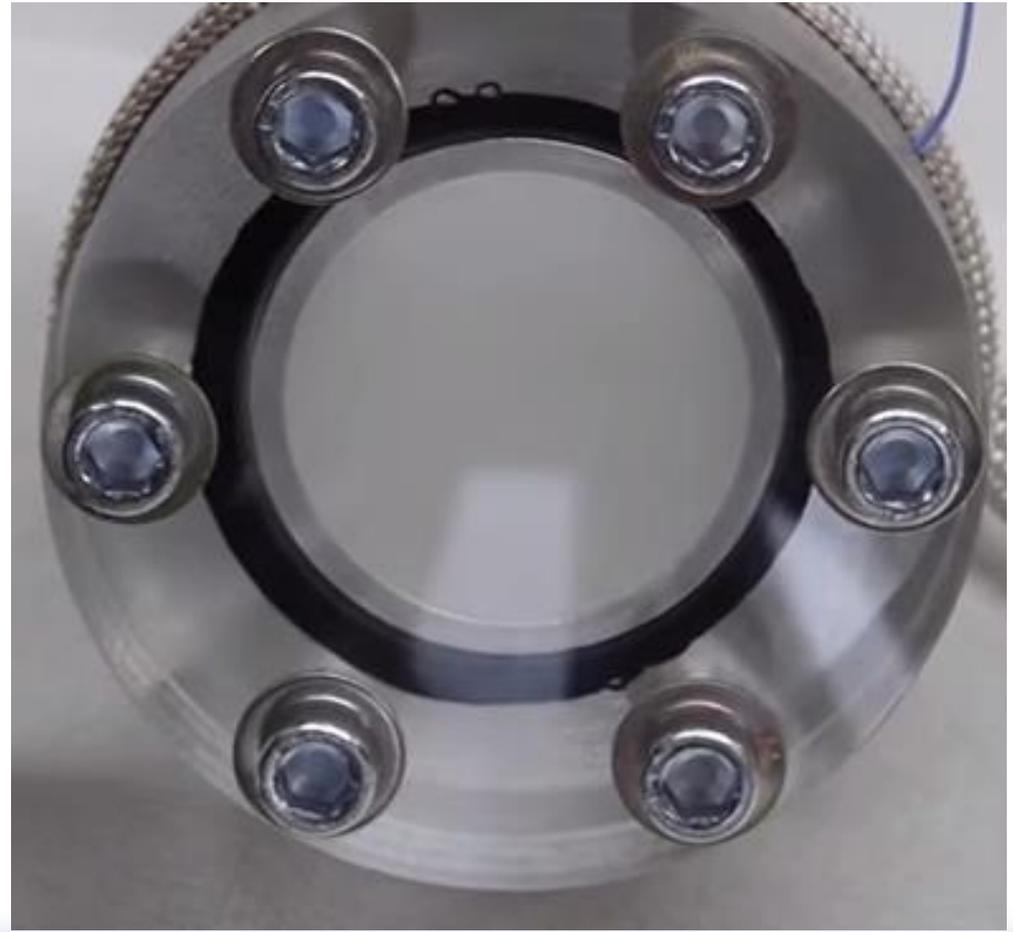
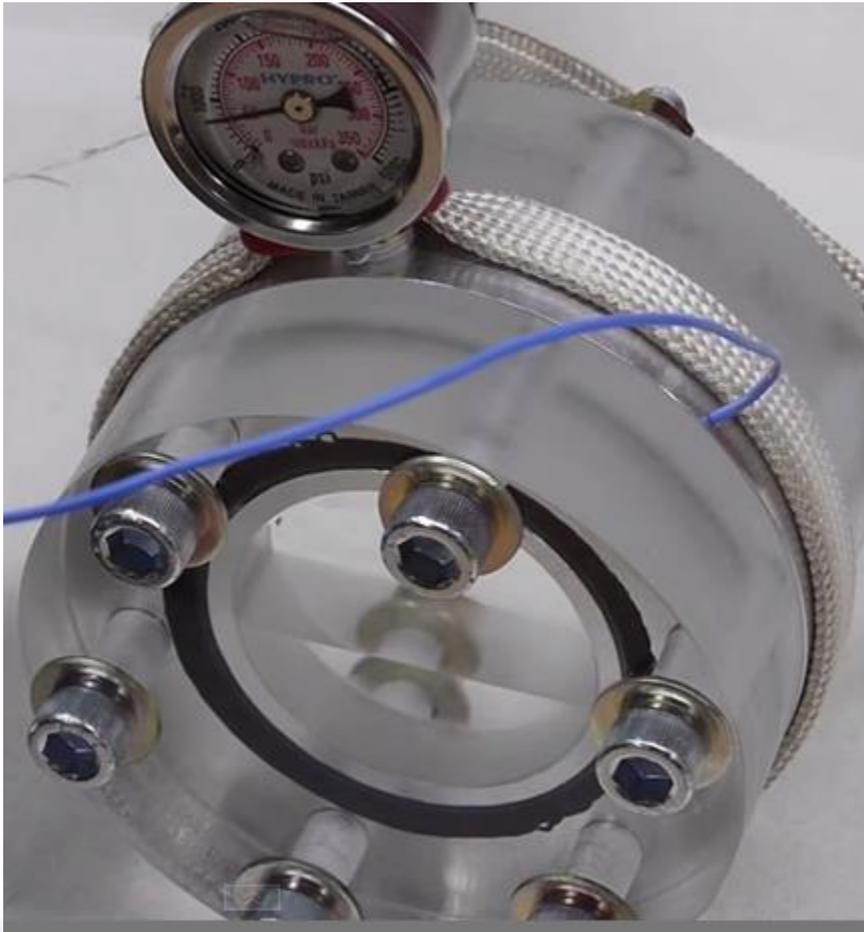


**Figura 3.7**  
Diagrama de fases da água.

# **Ponto Crítico**

## **Água: $P_c=220,9$ bar $T_c=374,14^\circ\text{C}$**

- <https://www.youtube.com/watch?v=-gCTKteN5Y4>



# *princípio da extração com fluido supercrítico*

- O poder de solubilização de um solvente é tanto maior quanto mais denso ele for. Acima e nas proximidades do ponto crítico, um pequeno aumento de pressão produz um grande aumento do poder de solubilização do solvente. É esta característica bastante peculiar do fluido supercrítico que se constitui no princípio fundamental do processo de extração supercrítica.
- No estado supercrítico, as propriedades físico-químicas de um fluido assumem valores intermediários àqueles dos estados líquido e gasoso. Propriedades relacionadas à capacidade de solubilização, como a densidade, de um fluido supercrítico aproximam-se daquelas típicas de um líquido, enquanto que propriedades relacionadas ao transporte de matéria, como a difusividade e a viscosidade, alcançam valores típicos de um gás. Sabe-se que os líquidos são excelentes solventes, mas de difusão lenta e alta viscosidade. Os gases, por sua vez, são péssimos solventes, mas se difundem com extrema facilidade e são pouco viscosos. Os solventes supercríticos, combinando características desejáveis tanto de líquidos quanto de gases, são ótimos solventes com alta difusividade e baixa viscosidade. Como consequência, a extração com fluido supercrítico torna-se um processo rápido e eficiente.

TABELA A.2

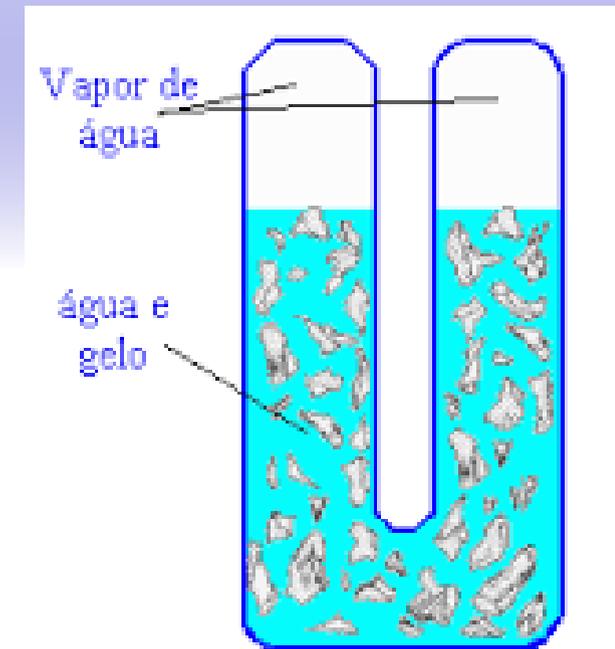
Constantes críticas

Substância	Fórmula	Peso molecular	Temperatura K	Pressão MPa	Volume m <sup>3</sup> /kg
Amônia	NH <sub>3</sub>	17,031	405,5	11,35	0,00426
Argônio	Ar	39,948	150,8	4,87	0,00188
Bromo	Br <sub>2</sub>	159,808	588	10,30	0,000796
Dióxido de carbono	CO <sub>2</sub>	44,01	304,1	7,38	0,00212
Monóxido de carbono	CO	28,01	132,9	3,50	0,00333
Cloro	Cl <sub>2</sub>	70,906	416,9	7,98	0,00175
Flúor	F <sub>2</sub>	37,997	144,3	5,22	0,00174
Hélio	He	4,003	5,19	0,227	0,0143
Hidrogênio (normal)	H <sub>2</sub>	2,016	33,2	1,30	0,0323
Criptônio	Kr	83,80	209,4	5,50	0,00109
Neônio	Ne	20,183	44,4	2,76	0,00206
Óxido nítrico	NO	30,006	180	6,48	0,00192
Nitrogênio	N <sub>2</sub>	28,013	126,2	3,39	0,0032
Dióxido de nitrogênio	NO <sub>2</sub>	46,006	431	10,1	0,00365
Óxido nitroso	N <sub>2</sub> O	44,013	309,6	7,24	0,00221
Oxigênio	O <sub>2</sub>	31,999	154,6	5,04	0,00229
Dióxido de enxofre	SO <sub>2</sub>	64,063	430,8	7,88	0,00191
Água	H <sub>2</sub> O	18,015	647,3	22,12	0,00317
Xenônio	Xe	131,30	289,7	5,84	0,000902
Acetileno	C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	26,038	308,3	6,14	0,00433
Benzeno	C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	78,114	562,2	4,89	0,00332
<i>n</i> -Butano	C <sub>4</sub> H <sub>10</sub>	58,124	425,2	3,80	0,00439
Difluorcloroetano <sup>a</sup> (142b)	CH <sub>3</sub> CCLF <sub>2</sub>	100,495	410,3	4,25	0,00230
Difluorclorometano (22)	CHCLF <sub>2</sub>	86,469	369,3	4,97	0,00191
Diclorofluoreto <sup>a</sup> (141)	CH <sub>3</sub> CCL <sub>2</sub> F	116,95	481,5	4,54	0,00215
Diclorotrifluoreto <sup>a</sup> (123)	CHCL <sub>2</sub> CF <sub>3</sub>	152,93	456,9	3,67	0,00182
Difluoreto <sup>a</sup> (152a)	CHF <sub>2</sub> CH <sub>3</sub>	66,05	386,4	4,52	0,00272
Difluormetano <sup>a</sup> (32)	CF <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	52,024	351,3	5,78	0,00236
Etano	C <sub>2</sub> H <sub>6</sub>	30,070	305,4	4,88	0,00493
Álcool etílico (etanol)	C <sub>2</sub> H <sub>5</sub> OH	46,069	513,9	6,14	0,00363
Etileno	C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	28,054	282,4	5,04	0,00465
<i>n</i> -Heptano	C <sub>7</sub> H <sub>16</sub>	100,205	540,3	2,74	0,00431
<i>n</i> -Hexano	C <sub>6</sub> H <sub>14</sub>	86,178	507,5	3,01	0,00429
Metano	CH <sub>4</sub>	16,043	190,4	4,60	0,00615
Álcool metílico (metanol)	CH <sub>3</sub> OH	32,042	512,6	8,09	0,00368
<i>n</i> -Octano	C <sub>8</sub> H <sub>18</sub>	114,232	568,8	2,49	0,00431

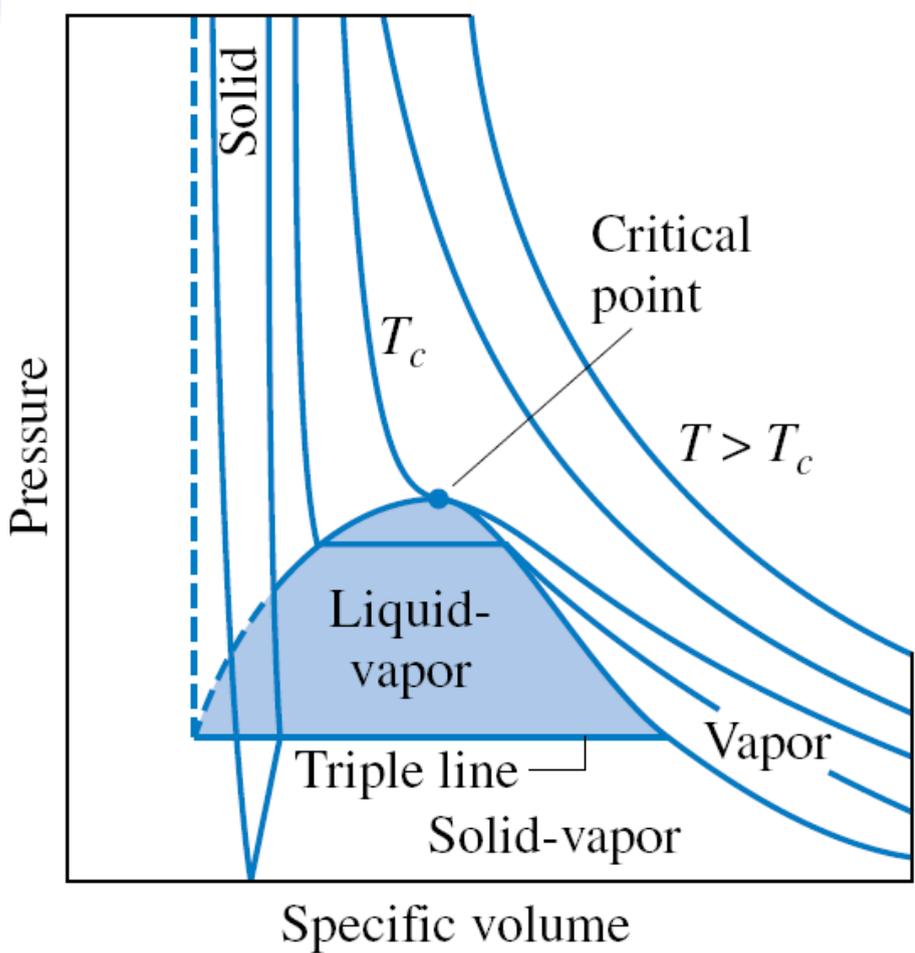
# Ponto Triplo

Água:  $P_c=0,6113\text{kPa}$   $T_c=0,01^\circ\text{C}$

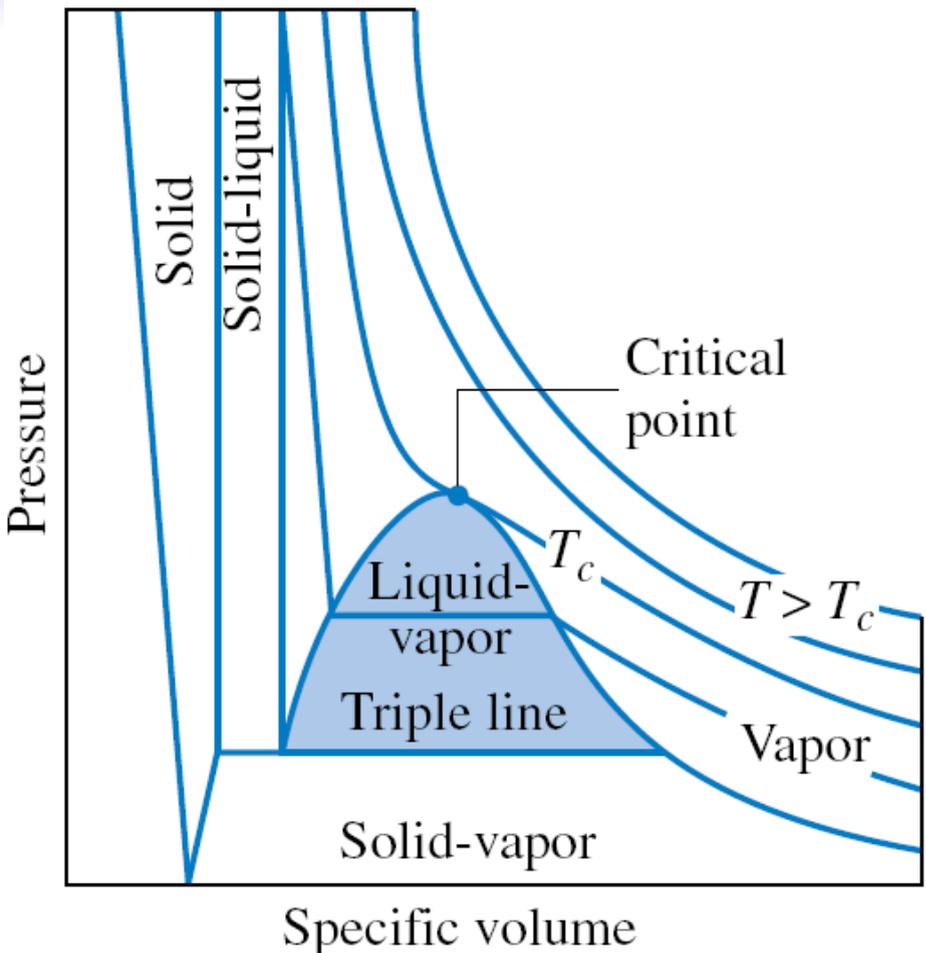
- <https://www.youtube.com/watch?v=EkFmrWsSzgA>



# Projeções da Superfície $p-v-T$

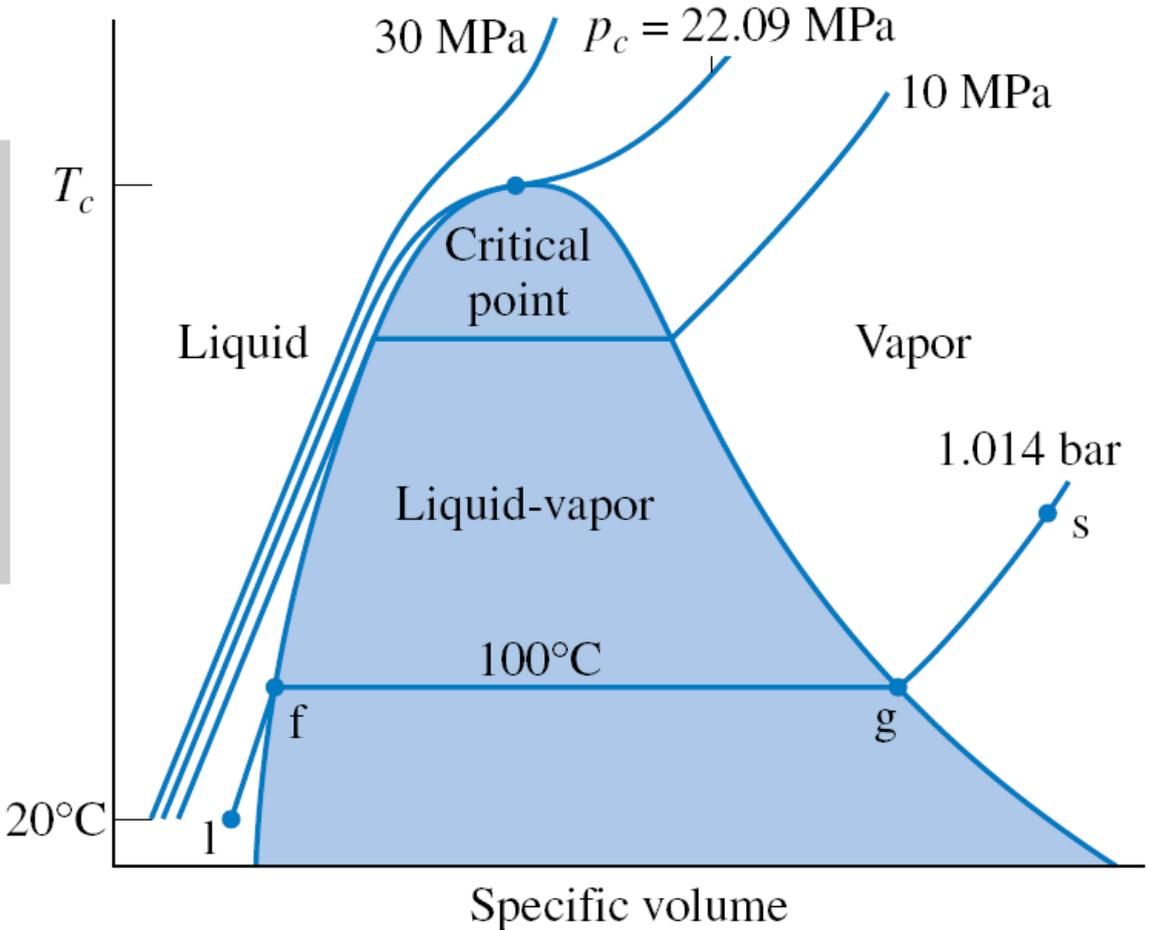
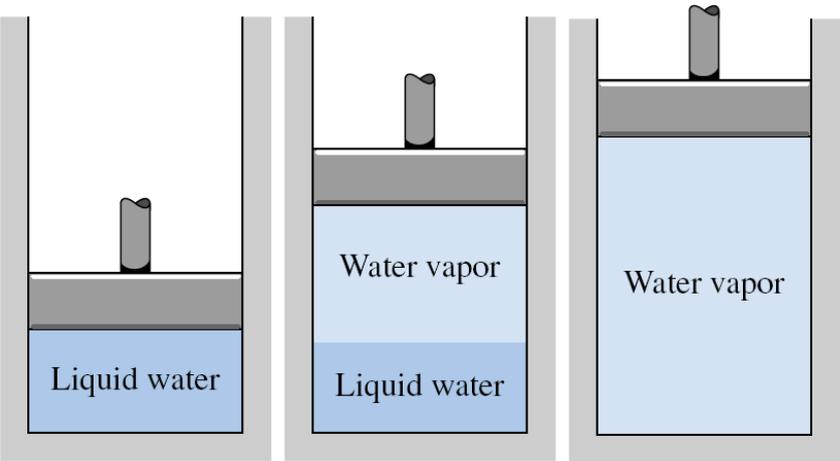


Subst. que expande quando solidifica

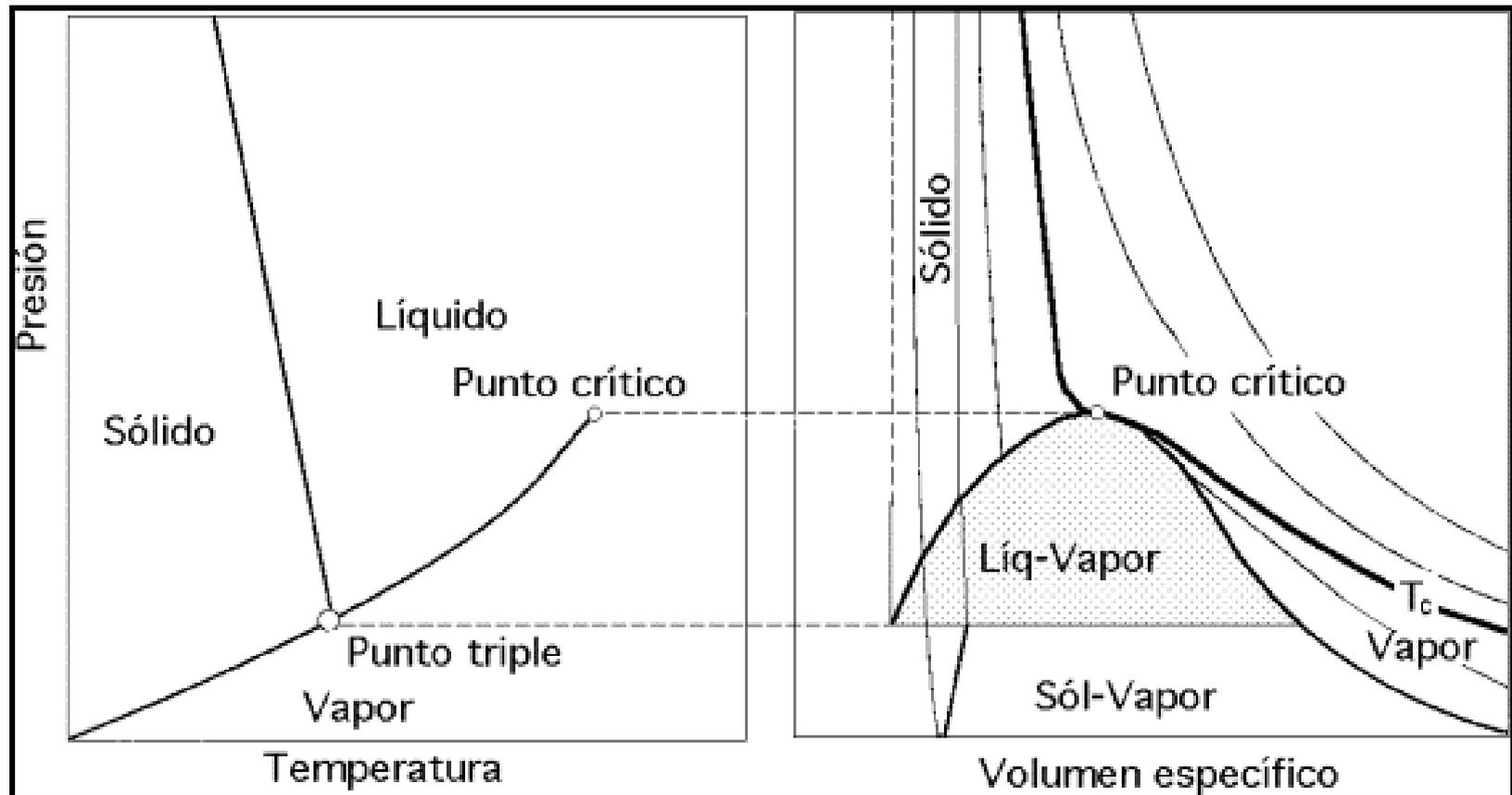


Subst. que contrai quando solidifica

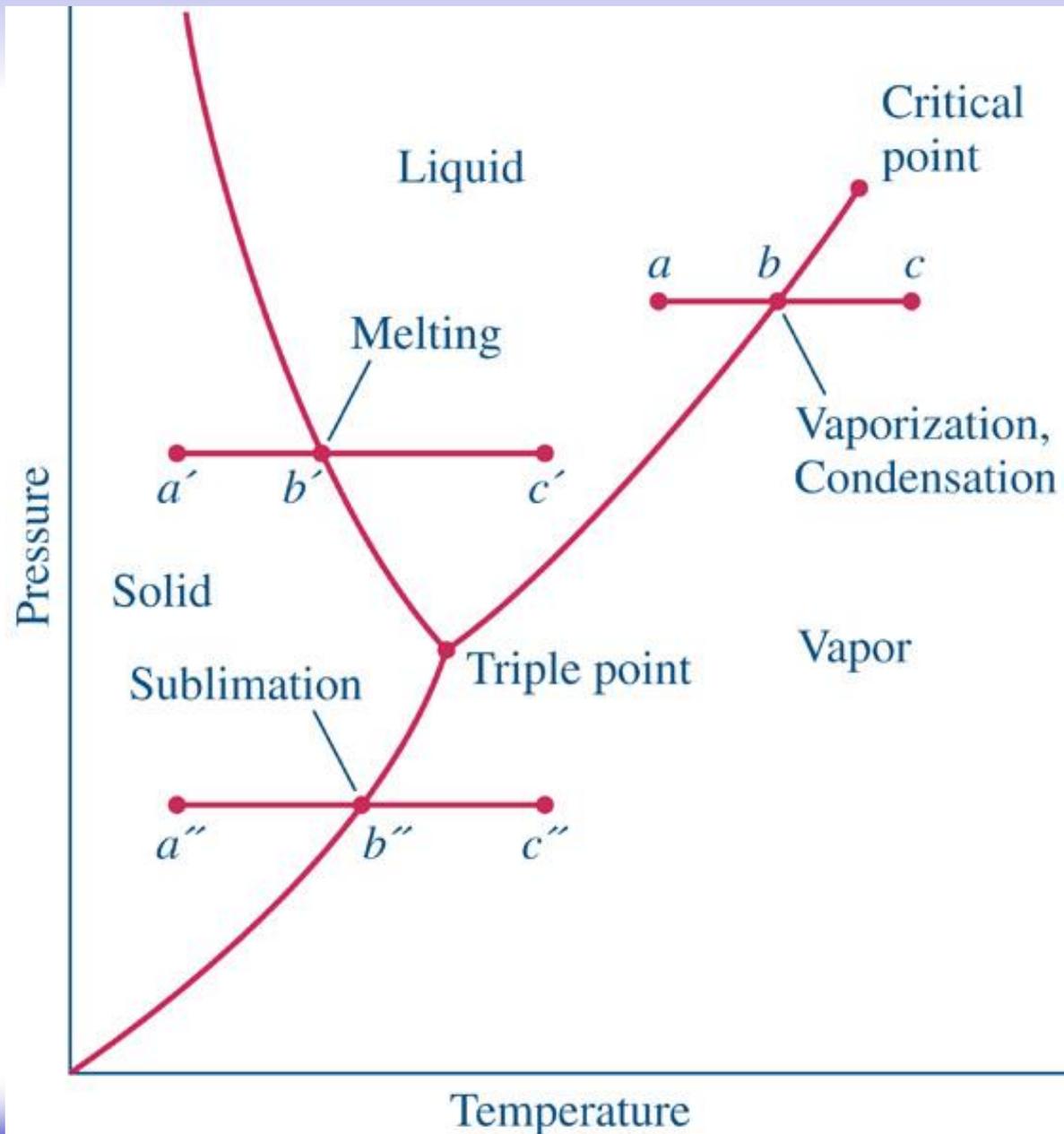
# Mudança de fase



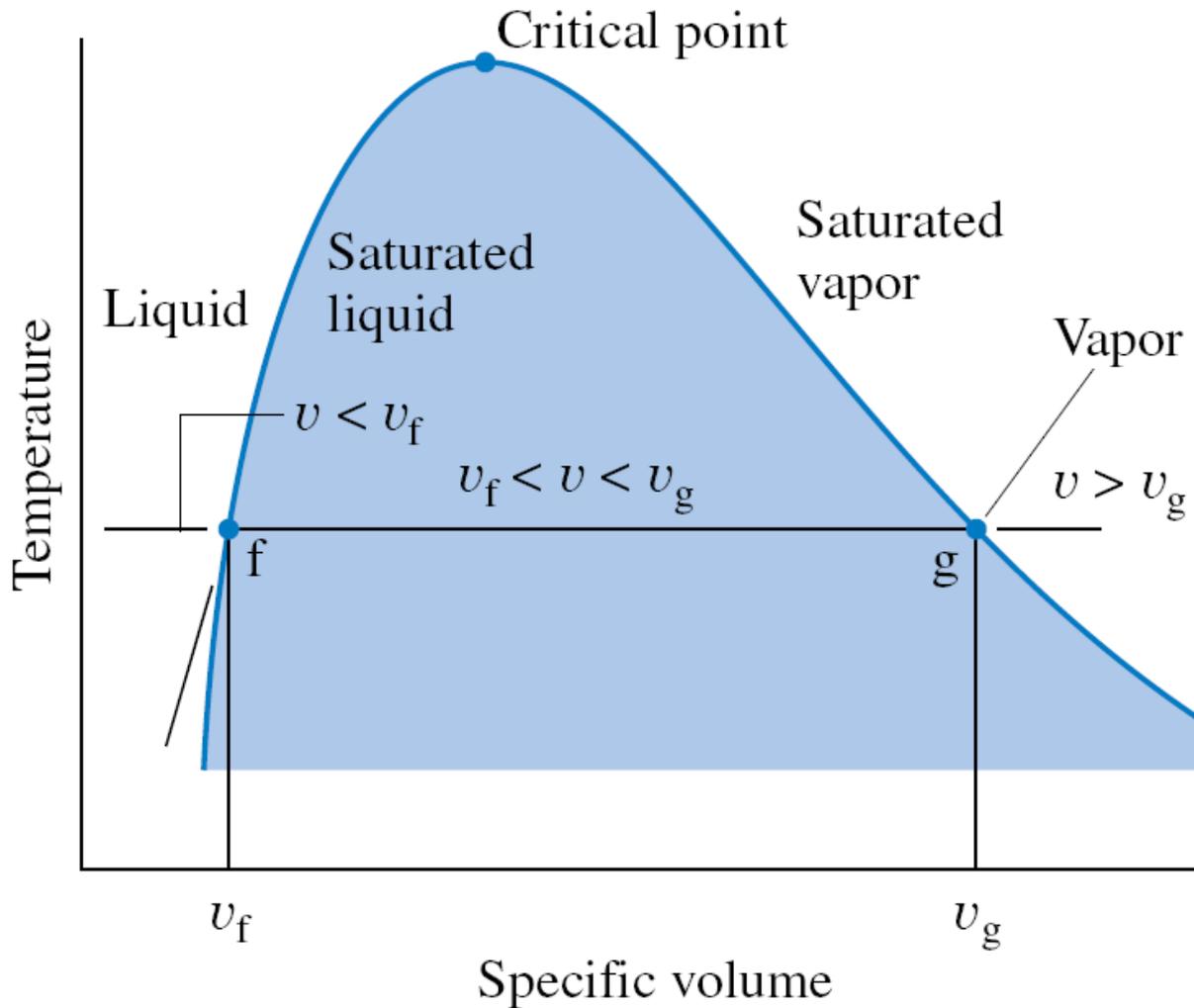
# P-v



# *P-T*



# A propriedade “título”



**Título (quality):**

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

# Tabelas Termodinâmicas

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 <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>
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	2333,85	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	2,36956	376,82	2117,70	2494,52	376,90	2283,19	2660,09	1,1924	6,2966	7,4790

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	$v_f$	$v_g$	$u_f$	$u_{fg}$	$u_g$	$h_f$	$h_{fg}$	$h_g$	$s_f$	$s_{fg}$	$s_g$
260	4688,6	0,001276	0,04220	1128,37	1470,64	2599,01	1134,35	1662,54	2796,89	2,8837	3,1181	6,0018
265	5081,3	0,001289	0,03877	1152,72	1443,87	2596,60	1159,27	1634,34	2793,61	2,9293	3,0368	5,9661
270	5498,7	0,001302	0,03564	1177,33	1416,33	2593,66	1184,49	1605,16	2789,65	2,9750	2,9551	5,9301
275	5941,8	0,001317	0,03279	1202,23	1387,94	2590,17	1210,05	1574,92	2784,97	3,0208	2,8730	5,8937
280	6411,7	0,001332	0,03017	1227,43	1358,66	2586,09	1235,97	1543,55	2779,53	3,0667	2,7903	5,8570
285	6909,4	0,001348	0,02777	1252,98	1328,41	2581,38	1262,29	1510,97	2773,27	3,1129	2,7069	5,8198
290	7436,0	0,001366	0,02557	1278,89	1297,11	2575,99	1289,04	1477,08	2766,13	3,1593	2,6227	5,7821
295	7992,8	0,001384	0,02354	1305,21	1264,67	2569,87	1316,27	1441,78	2758,05	3,2061	2,5375	5,7436
300	8581,0	0,001404	0,02167	1331,97	1230,99	2562,96	1344,01	1404,93	2748,94	3,2533	2,4511	5,7044
305	9201,8	0,001425	0,01995	1359,22	1195,94	2555,16	1372,33	1366,38	2738,72	3,3009	2,3633	5,6642
310	9856,6	0,001447	0,01835	1387,03	1159,37	2546,40	1401,29	1325,97	2727,27	3,3492	2,2737	5,6229
315	10547	0,001472	0,01687	1415,44	1121,11	2536,55	1430,97	1283,48	2714,44	3,3981	2,1821	5,5803
320	11274	0,001499	0,01549	1444,55	1080,93	2525,48	1461,45	1238,64	2700,08	3,4479	2,0882	5,5361
325	12040	0,001528	0,01420	1474,44	1038,57	2513,01	1492,84	1191,13	2683,97	3,4987	1,9913	5,4900
330	12845	0,001561	0,01300	1505,24	993,66	2498,91	1525,29	1140,56	2665,85	3,5506	1,8909	5,4416
335	13694	0,001597	0,01186	1537,11	945,77	2482,88	1558,98	1086,37	2645,35	3,6040	1,7863	5,3903
340	14586	0,001638	0,01080	1570,26	894,26	2464,53	1594,15	1027,86	2622,01	3,6593	1,6763	5,3356
345	15525	0,001685	0,00978	1605,01	838,29	2443,30	1631,17	964,02	2595,19	3,7169	1,5594	5,2763
350	16514	0,001740	0,00881	1641,81	776,58	2418,39	1670,54	893,38	2563,92	3,7776	1,4336	5,2111
355	17554	0,001807	0,00787	1681,41	707,11	2388,52	1713,13	813,59	2526,72	3,8427	1,2951	5,1378
360	18651	0,001892	0,00694	1725,19	626,29	2351,47	1760,48	720,52	2481,00	3,9146	1,1379	5,0525
365	19807	0,002011	0,00599	1776,13	526,54	2302,67	1815,96	605,44	2421,40	3,9983	0,9487	4,9470
370	21028	0,002213	0,00493	1843,84	384,69	2228,53	1890,37	441,75	2332,12	4,1104	0,6868	4,7972
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

Tabela B.1.3

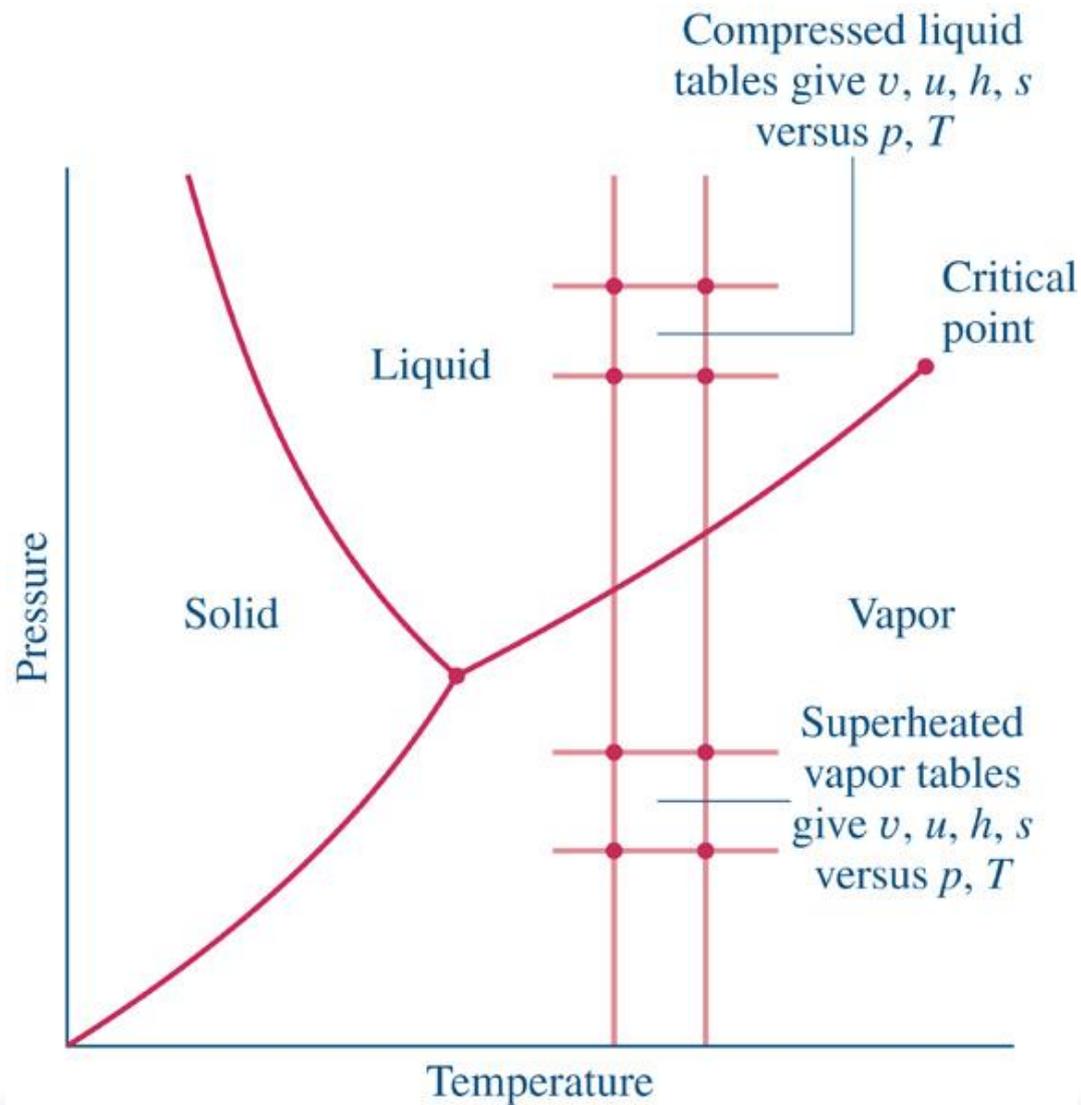
Vapor d'água superaquecido

$T$	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$	$v$	$u$	$h$	$s$
	(m <sup>3</sup> /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m <sup>3</sup> /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)	(m <sup>3</sup> /kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg)	(kJ/kg K)
<b><math>P = 10 \text{ kPa (45,81)}</math></b>				<b><math>P = 50 \text{ kPa (81,33)}</math></b>				<b><math>P = 100 \text{ kPa (99,62)}</math></b>				
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
<b><math>P = 200 \text{ kPa (120,23)}</math></b>				<b><math>P = 300 \text{ kPa (133,55)}</math></b>				<b><math>P = 400 \text{ kPa (143,63)}</math></b>				
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
<b><math>P = 500 \text{ kPa (151,86)}</math></b>				<b><math>P = 600 \text{ kPa (158,85)}</math></b>				<b><math>P = 800 \text{ kPa (170,43)}</math></b>				
Sat.	0,37489	2561,23	2748,67	6,8212	0,31567	2567,40	2756,80	6,7600	0,24043	2576,79	2769,13	6,6627
200	0,42492	2642,91	2855,37	7,0592	0,35202	2638,91	2850,12	6,9665	0,26080	2630,61	2839,25	6,8158
250	0,47436	2723,50	2960,68	7,2708	0,39383	2720,86	2957,16	7,1816	0,29314	2715,46	2949,97	7,0384
300	0,52256	2802,91	3064,20	7,4598	0,43437	2801,00	3061,63	7,3723	0,32411	2797,14	3056,43	7,2327

Tabela B.1.4

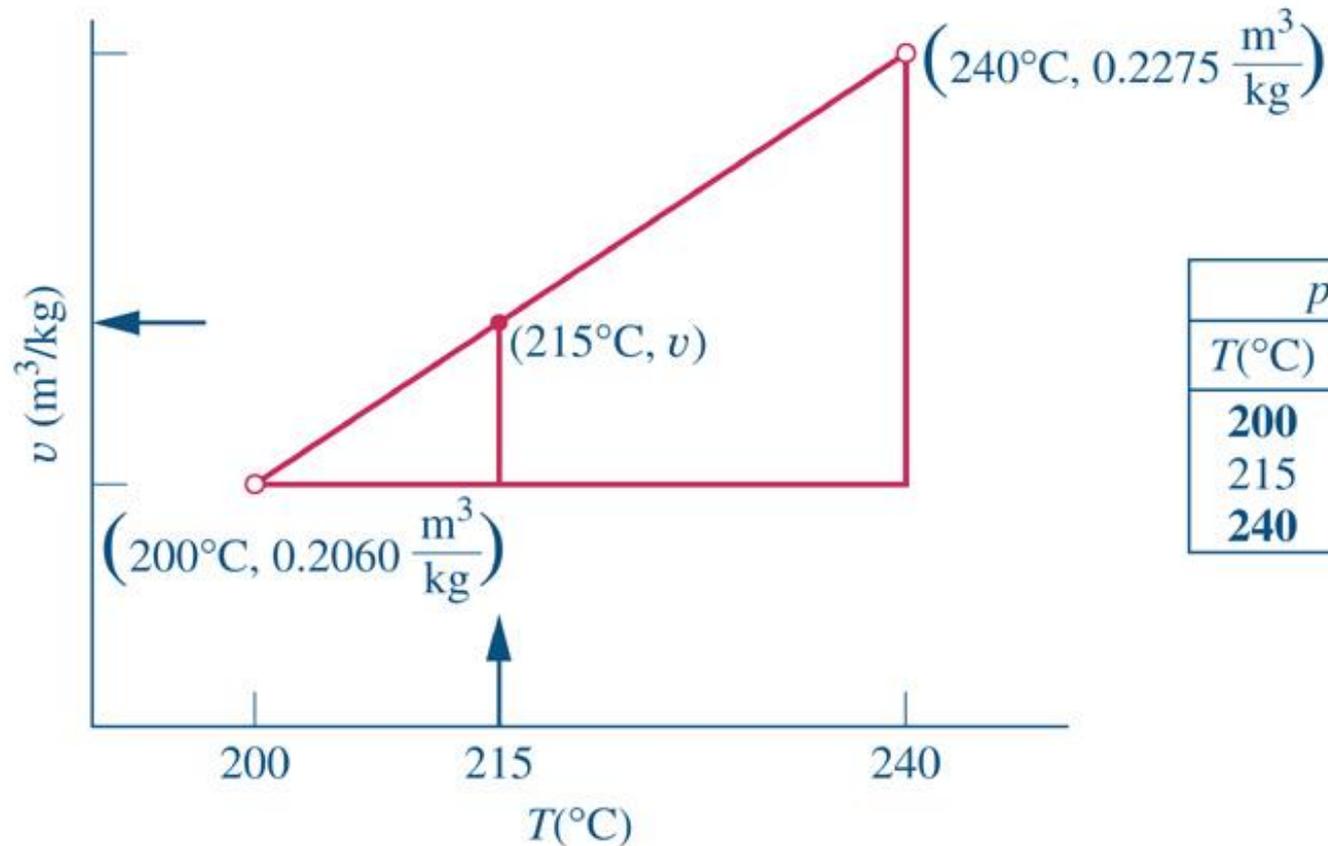
Água líquida comprimida

$T$ °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)	$v$ (m <sup>3</sup> /kg)	$u$ (kJ/kg)	$h$ (kJ/kg)	$s$ (kJ/kg K)
<b><math>P = 500</math> kPa (151,86)</b>				<b><math>P = 2000</math> kPa (212,42)</b>				<b><math>P = 5000</math> kPa (263,99)</b>				
Sat,	0,001093	639,66	640,21	1,8606	0,001177	906,42	908,77	2,4473	0,001286	1147,78	1154,21	2,9201
0	-	-	-	-	-	-	-	-	0,000998	0,03	5,02	0,0001
0,01	0,000999	0,01	0,51	0,0000	0,000999	0,03	2,03	0,0001	-	-	-	-
20	0,001002	83,91	84,41	0,2965	0,001001	83,82	85,82	0,2962	0,001000	83,64	88,64	0,2955
40	0,001008	167,47	167,98	0,5722	0,001007	167,29	169,30	0,5716	0,001006	166,93	171,95	0,5705
60	0,001017	251,00	251,51	0,8308	0,001016	250,73	252,77	0,8300	0,001015	250,21	255,28	0,8284
80	0,001029	334,73	335,24	1,0749	0,001028	334,38	336,44	1,0739	0,001027	333,69	338,83	1,0719
100	0,001043	418,80	419,32	1,3065	0,001043	418,36	420,45	1,3053	0,001041	417,50	422,71	1,3030
120	0,001060	503,37	503,90	1,5273	0,001059	502,84	504,96	1,5259	0,001058	501,79	507,07	1,5232
140	0,001080	588,66	589,20	1,7389	0,001079	588,02	590,18	1,7373	0,001077	586,74	592,13	1,7342
160	-	-	-	-	0,001101	674,14	676,34	1,9410	0,001099	672,61	678,10	1,9374
180	-	-	-	-	0,001127	761,46	763,71	2,1382	0,001124	759,62	765,24	2,1341
200	-	-	-	-	0,001156	850,30	852,61	2,3301	0,001153	848,08	853,85	2,3254
220	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001187	938,43	944,36	2,5128
240	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001226	1031,34	1037,47	2,6978
260	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001275	1127,92	1134,30	2,8829
<b><math>P = 10\ 000</math> kPa (311,06)</b>				<b><math>P = 15\ 000</math> kPa (342,24)</b>				<b><math>P = 20\ 000</math> kPa (365,81)</b>				
Sat,	0,001452	1393,00	1407,53	3,3595	0,001658	1585,58	1610,45	3,6847	0,002035	1785,47	1826,18	4,0137
0	0,000995	0,10	10,05	0,0003	0,000993	0,15	15,04	0,0004	0,000990	0,20	20,00	0,0004
20	0,000997	83,35	93,32	0,2945	0,000995	83,05	97,97	0,2934	0,000993	82,75	102,61	0,2922
40	0,001003	166,33	176,36	0,5685	0,001001	165,73	180,75	0,5665	0,000999	165,15	185,14	0,5646
60	0,001013	249,34	259,47	0,8258	0,001011	248,49	263,65	0,8231	0,001008	247,66	267,82	0,8205
80	0,001025	332,56	342,81	1,0687	0,001022	331,46	346,79	1,0655	0,001020	330,38	350,78	1,0623
100	0,001039	416,09	426,48	1,2992	0,001036	414,72	430,26	1,2954	0,001034	413,37	434,04	1,2917
120	0,001055	500,07	510,61	1,5188	0,001052	498,39	514,17	1,5144	0,001050	496,75	517,74	1,5101
140	0,001074	584,67	595,40	1,7291	0,001071	582,64	598,70	1,7241	0,001068	580,67	602,03	1,7192
160	0,001195	670,11	681,07	1,9316	0,001092	667,69	684,07	1,9259	0,001089	665,34	687,11	1,9203
180	0,001120	756,63	767,83	2,1274	0,001116	753,74	770,48	2,1209	0,001112	750,94	773,18	2,1146
200	0,001148	844,49	855,97	2,3178	0,001143	841,04	858,18	2,3103	0,001139	837,70	860,47	2,3031
220	0,001181	934,07	945,88	2,5038	0,001175	929,89	947,52	2,4952	0,001169	925,89	949,27	2,4869
240	0,001219	1025,94	1038,13	2,6872	0,001211	1020,82	1038,99	2,6770	0,001205	1015,94	1040,04	2,6673
260	0,001265	1121,03	1133,68	2,8698	0,001255	1114,59	1133,41	2,8575	0,001246	1108,53	1133,45	2,8459
280	0,001322	1220,90	1234,11	3,0547	0,001308	1212,47	1232,09	3,0392	0,001297	1204,69	1230,62	3,0248
300	0,001397	1328,34	1342,31	3,2468	0,001377	1316,58	1337,23	3,2259	0,001360	1306,10	1333,29	3,2071
320	-	-	-	-	0,001472	1431,05	1453,13	3,4246	0,001444	1415,66	1444,53	3,3978
340	-	-	-	-	0,001631	1567,42	1591,88	3,6545	0,001568	1539,64	1571,01	3,6074



# Exemplo: Interpolação linear de propriedades

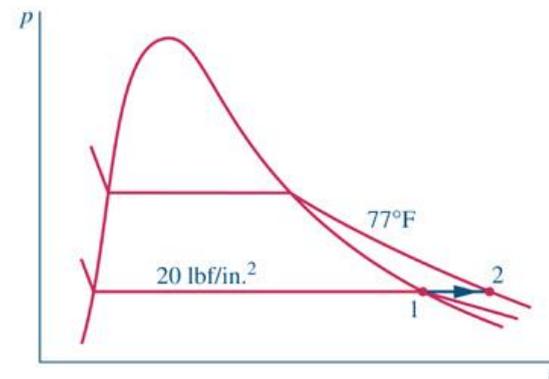
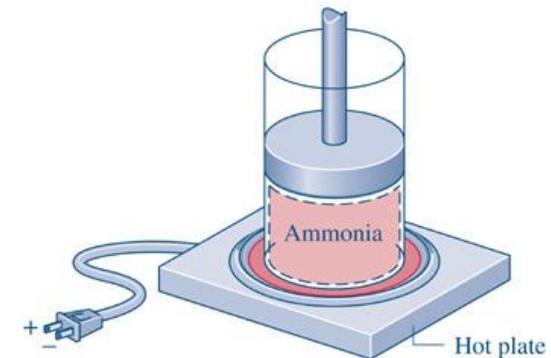
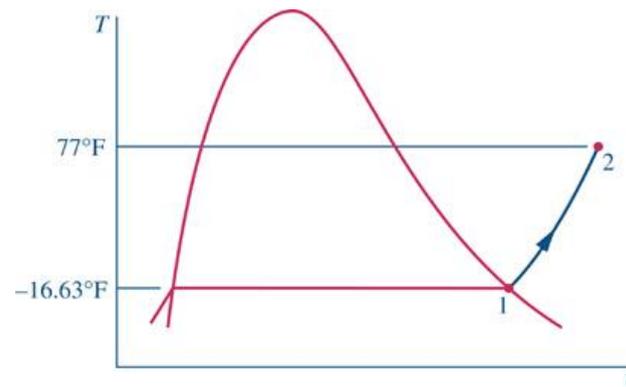
Determinar o volume específico do vapor d'água para o Estado  $p=10$  bar e  $T=215^\circ\text{C}$



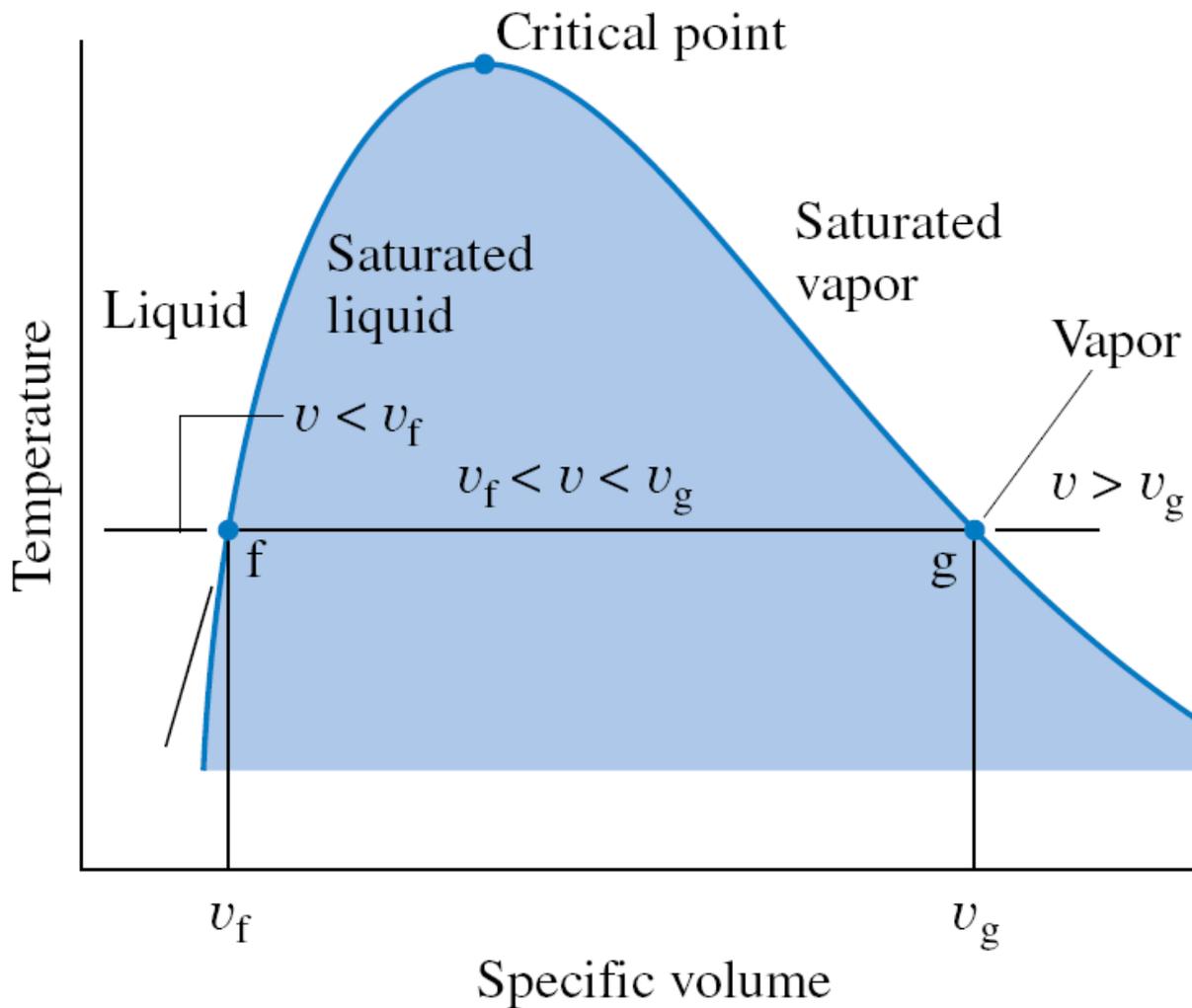
$p = 10$ bar	
$T(^\circ\text{C})$	$v$ ( $\text{m}^3/\text{kg}$ )
200	0.2060
215	$v = ?$
240	0.2275

## Ex.3.1: Aquecendo Amônia a pressão constante

- Um sistema com 0,04kg de amônia, inicialmente como vapor saturado ( $-16.63^{\circ}\text{C}$ ), é colocado em uma placa aquecida. No processo a pressão é mantida constante a  $137,9\text{kPa}$ . A amônia se expande até  $25^{\circ}\text{C}$ . Calcule o volume ocupado pela amônia em cada estado e o trabalho no processo.



# A propriedade “título”



**Título (quality):**

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

# A propriedade “título”

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

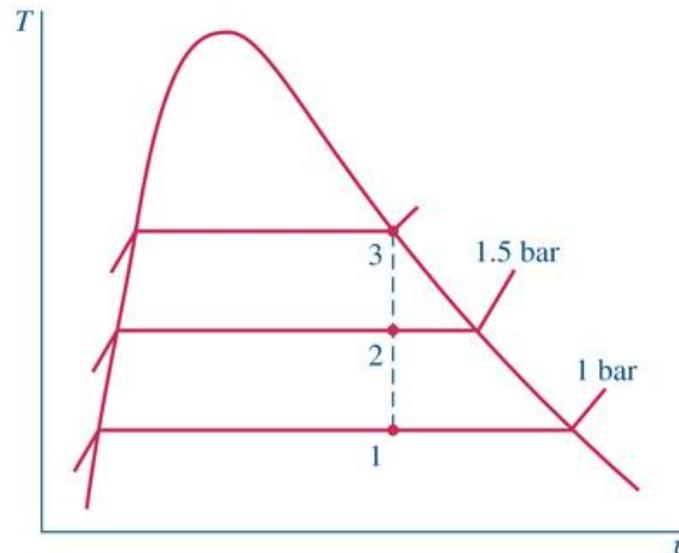
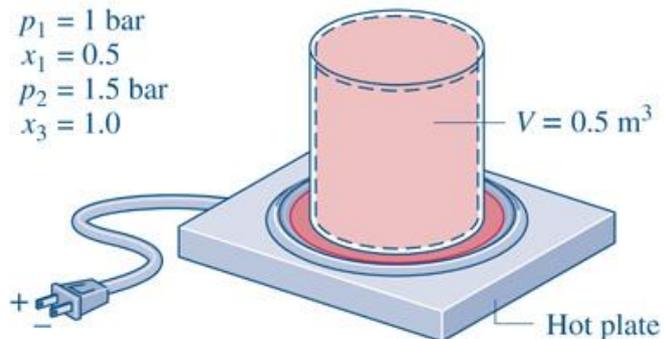
$$V = V_{liq} + V_{vap}$$

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

$$v = (1 - x)v_{liq} + xv_{vap} = v_{liq} + x(v_{vap} - v_{liq}) = v_f + x(v_g - v_f)$$

## Ex.3.2: Utilizando o título

- Um reservatório rígido e fechado de  $0,5 \text{ m}^3$  de água é colocado sobre uma placa aquecida. Inicialmente  $p_1=1 \text{ bar}$  e  $x=0,5$ . Após o aquecimento  $p_2=1,5 \text{ bar}$ . Determine as temperaturas nos dois estados; a massa de vapor presente nos dois estados e se o aquecimento continuar, qual será a pressão quando atingir vapor saturado?



# Outras propriedades

- Entalpia  $H = U + pV$  [J]
- Entalpia específica  $h = u + pv$  [J / kg]

# Outras propriedades

- Calores específicos,  $c_v$  e  $c_p$

$$\delta Q = dU + p dV$$

$$c_v = \left( \frac{\partial u}{\partial T} \right)_v \left[ \frac{J}{kg K} \right]$$

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

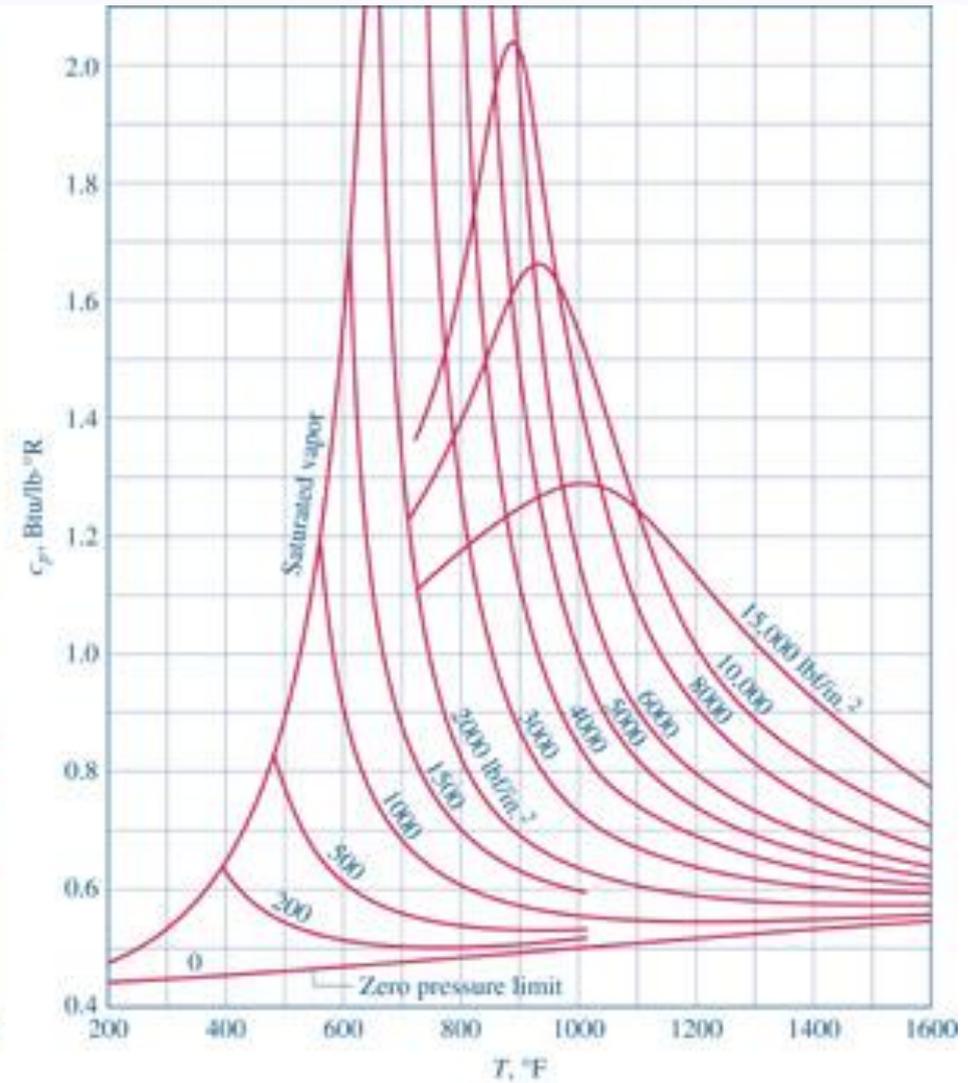
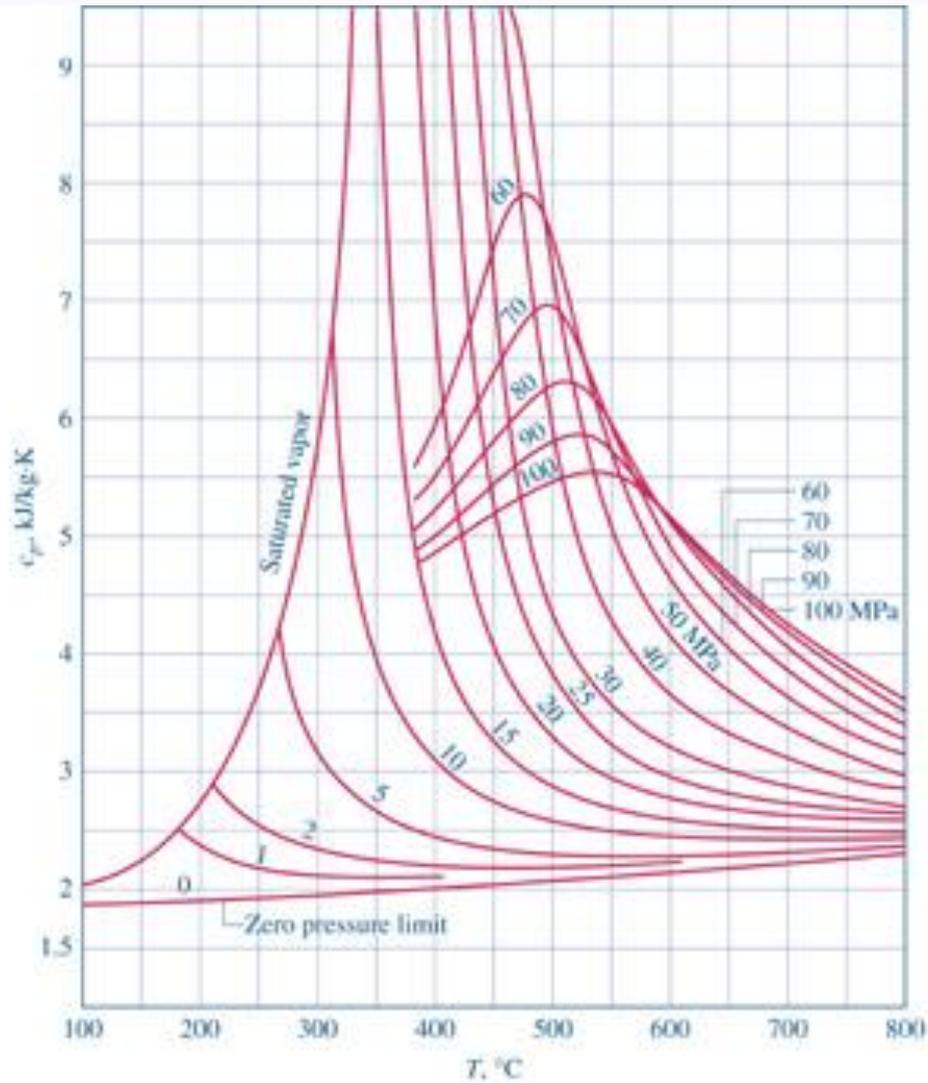
$$c_i = \frac{1}{m} \left( \frac{\delta Q}{\delta T} \right)_i$$

$$\bar{c}_v = \left( \frac{\partial \bar{u}}{\partial T} \right)_v \left[ \frac{J}{mol K} \right]$$

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

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

# *Cp do vapor d'água*



## **Energia Interna/Entalpia na região líquido+vapor**

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

$$H = H_{liq} + H_{vap}$$

$$U = U_{liq} + U_{vap}$$

$$h = (1 - x)h_{liq} + xh_{vap} = h_l + xh_{lv}$$

$$u = (1 - x)u_{liq} + xu_{vap} = u_l + xu_{lv}$$

# Estados de referência

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 <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>
0,01	0,113	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

Tabela B.2 — Propriedades termodinâmicas da amônia

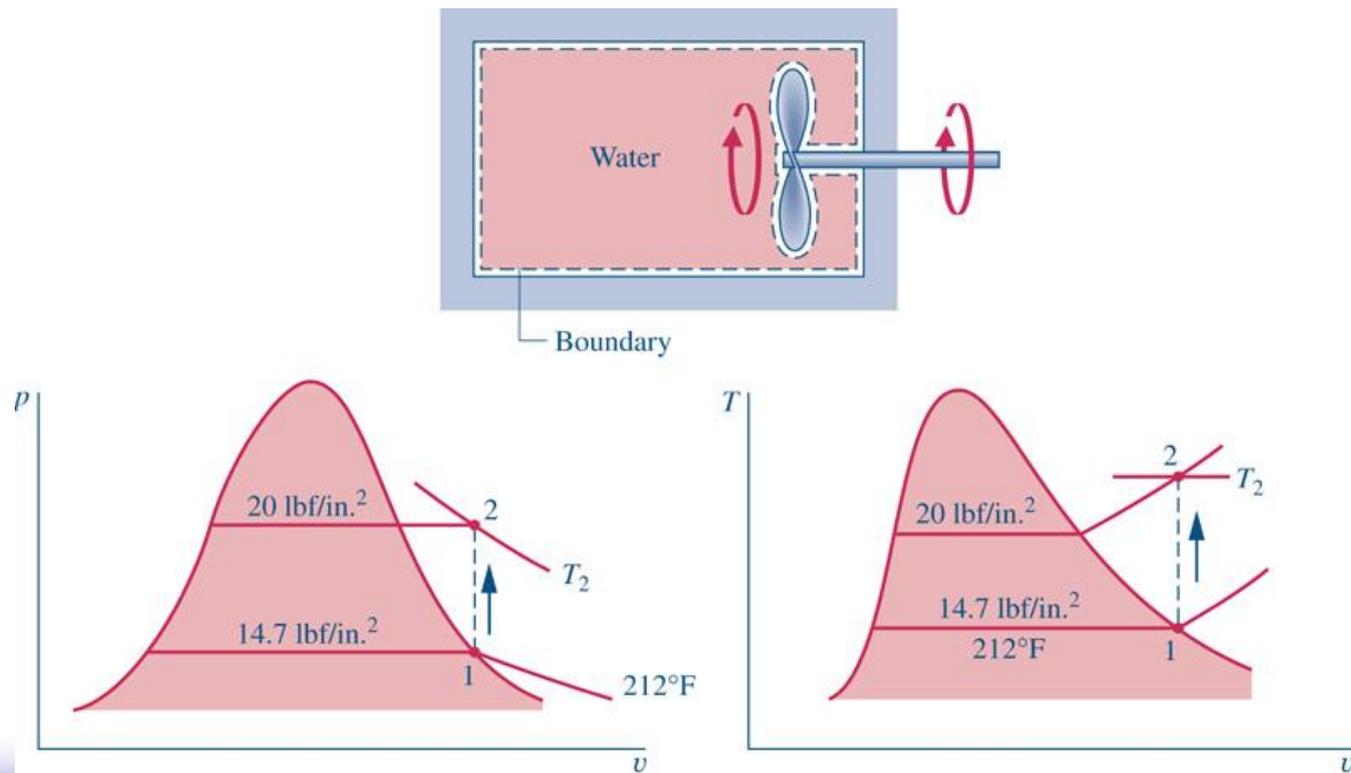
Tabela B.2.1

Amônia saturada

Temp. °C	Pressão kPa	Volume específico (m <sup>3</sup> /kg)			Energia interna (kJ/kg)			Entalpia (kJ/kg)			Entropia (kJ/kg K)		
		Líquido saturado	Evap.	Vapor saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor saturado	Líquido saturado	Evap.	Vapor saturado
		v <sub>l</sub>	v <sub>lv</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>
-50	40,9	0,001424	2,62557	2,62700	-43,82	1309,1	1265,2	-43,76	1416,3	1372,6	-0,1916	6,3470	6,1554
-45	54,5	0,001437	2,00489	2,00632	-22,01	1293,5	1271,4	-21,94	1402,8	1380,8	-0,0950	6,1484	6,0534
-40	71,7	0,001450	1,55111	1,55256	-0,10	1277,6	1277,4	0	1388,8	1388,8	0,0000	5,9567	5,9567
-35	93,2	0,001463	1,21466	1,21613	21,93	1261,3	1283,3	22,06	1374,5	1396,5	0,0935	5,7715	5,8650

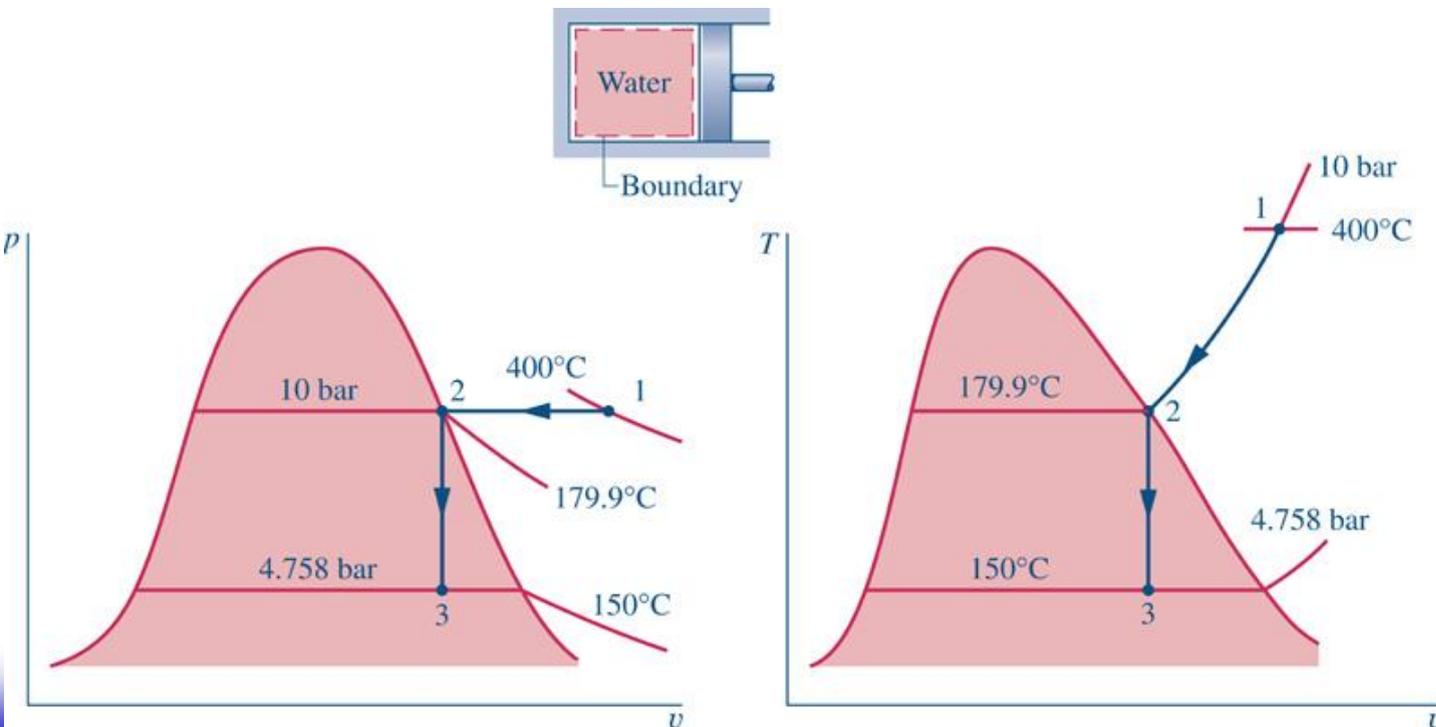
## Exemplo 3.3: Agitando água a volume constante

- Um tanque isolado e rígido com volume de  $0,28 \text{ m}^3$  contém vapor d'água saturado a  $100^\circ\text{C}$ . A água é misturada até a pressão de  $137,9 \text{ kPa}$ . Determine a temperatura final no estado 2 e o trabalho realizado.



## Exercício 3.4: Dois processos em série.

- Água contida em um conjunto cilindro-pistão é submetido a dois processos em série a partir de um estado inicial com pressão a 10 bar e temp. de 400°C.
  - Processo 1-2: Resfriamento a pressão constante até vapor saturado.
  - Processo 2-3: Resfriamento até 150°C a volume constante.
- Determine: O trabalho específico e a transferência de calor específica.



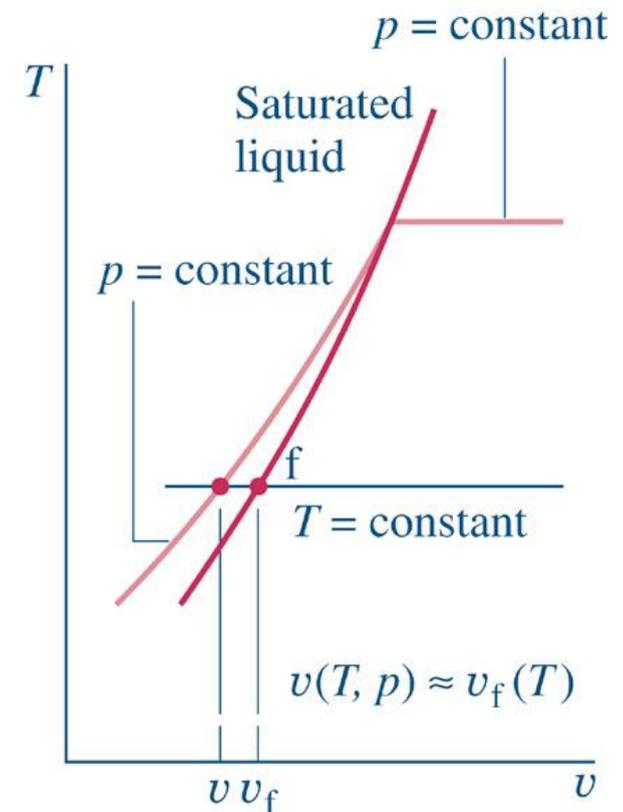
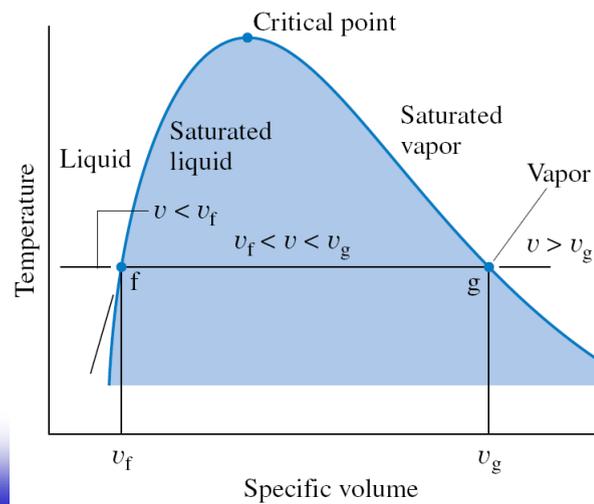
# Avaliando propriedades de líquidos e sólidos

- Aproximação para líquidos comprimidos utilizando a tabela de líquido saturado:

$$v(T, p) \approx v_{l,sat}(T)$$

$$u(T, p) \approx u_{l,sat}(T)$$

$$h(T, p) \approx u_{l,sat}(T) + pv_{l,sat}(T) \approx h_{l,sat}(T)$$



# Avaliando propriedades de líquidos e sólidos

- Para uma substância incompressível:

$$u(T, p) = u(T)$$

$$h(T, p) = u(T) + pv$$

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

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

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

# Avaliando propriedades de líquidos e sólidos

- Para uma substância incompressível:

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

$$h_2 - h_1 = u_2 - u_1 + v(p_2 - p_1)$$

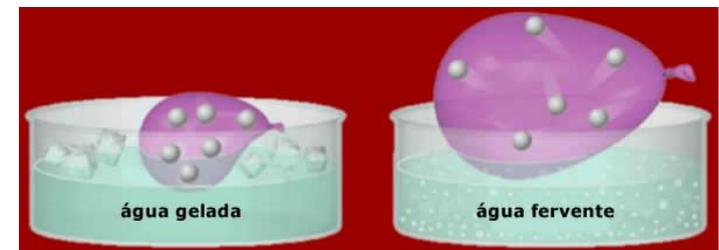
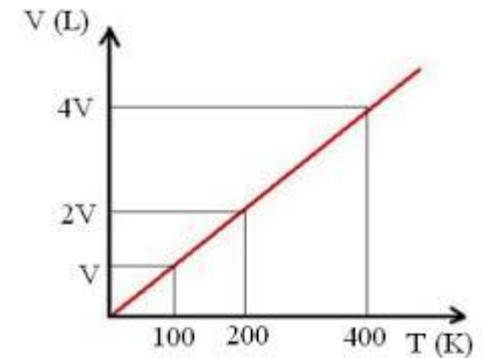
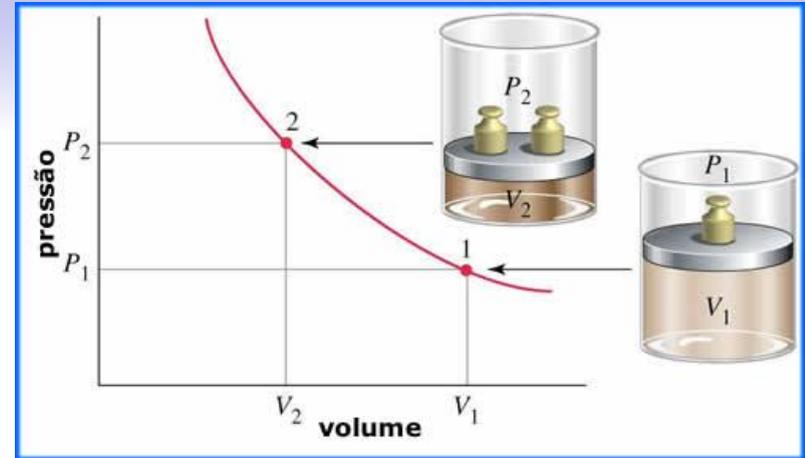
$$= \int_{T_1}^{T_2} c(T) dT + v(p_2 - p_1)$$

$$= c_{medio}(T_2 - T_1) + v(p_2 - p_1); \text{ onde geralmente}$$

$$c_{medio}(T_2 - T_1) \gg v(p_2 - p_1)$$

# *Gás ideal* $Pv = RT$

- Lei de Boyle  
processo isotérmico ( $T=\text{cte}$ )
- Lei de Charles  
processo isocórico ( $V=\text{cte}$ )
- 2º Lei de Charles  
processo isobárico ( $p=\text{cte}$ )



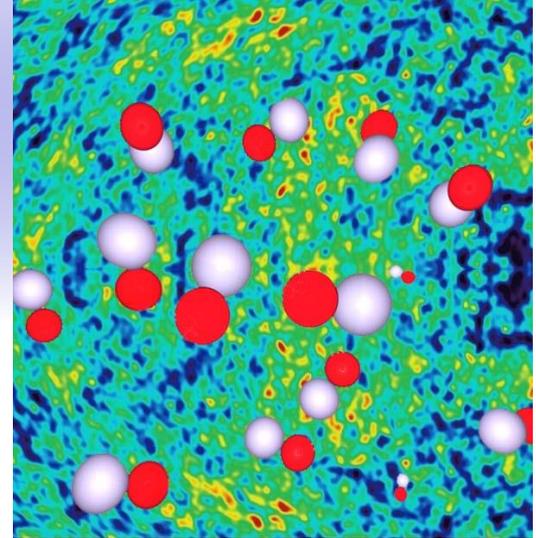
# MOL

- Mol: 1 mol possui a massa de uma substância equivalente ao seu peso molecular
- 1 mol = N° de moléculas / n° de Avogrado
- n° de Avogrado =  $6,02217 \times 10^{23}$

Hipótese de Avogadro :

"Volumes iguais de gases diferentes à mesma temperatura e pressão contêm o mesmo número de moléculas"

$$n_i = \frac{m_i}{M_{mol_i}}$$



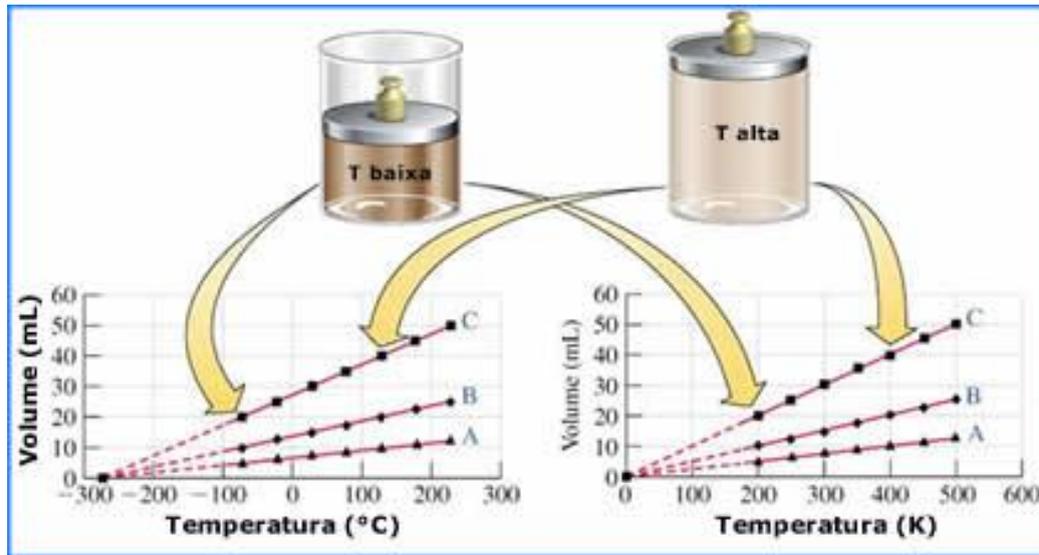
[aramis.obspm.fr/MOL05/index.php?body=proc.html](http://aramis.obspm.fr/MOL05/index.php?body=proc.html)



conde **Lorenzo Romano Amedeo Carlo Avogadro di Quaregua e Cerreto**  
(Turín, 9 de agosto de 1776 - 9 de julho de 1856),  
advogado e físico italiano

[pt.wikipedia.org/wiki/Amedeo\\_Avogadro](http://pt.wikipedia.org/wiki/Amedeo_Avogadro)

# Gás ideal



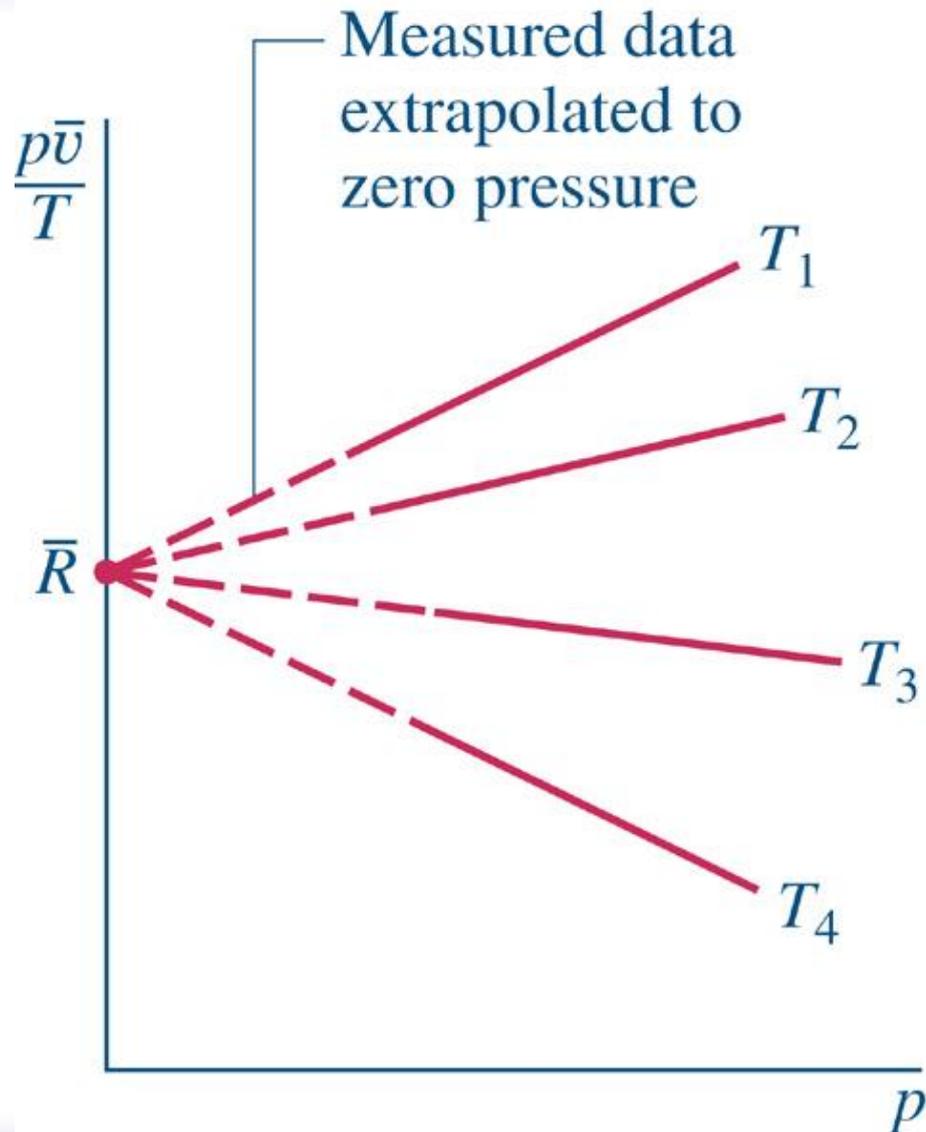
$$Pv = RT$$

$$PV = mRT$$

$$PV = n\bar{R}T$$

$$P\bar{v} = \bar{R}T$$

# Gás ideal



$$PV = n\bar{R}T$$

$$P\bar{v} = \bar{R}T$$

$$\bar{R} = 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol K}}$$

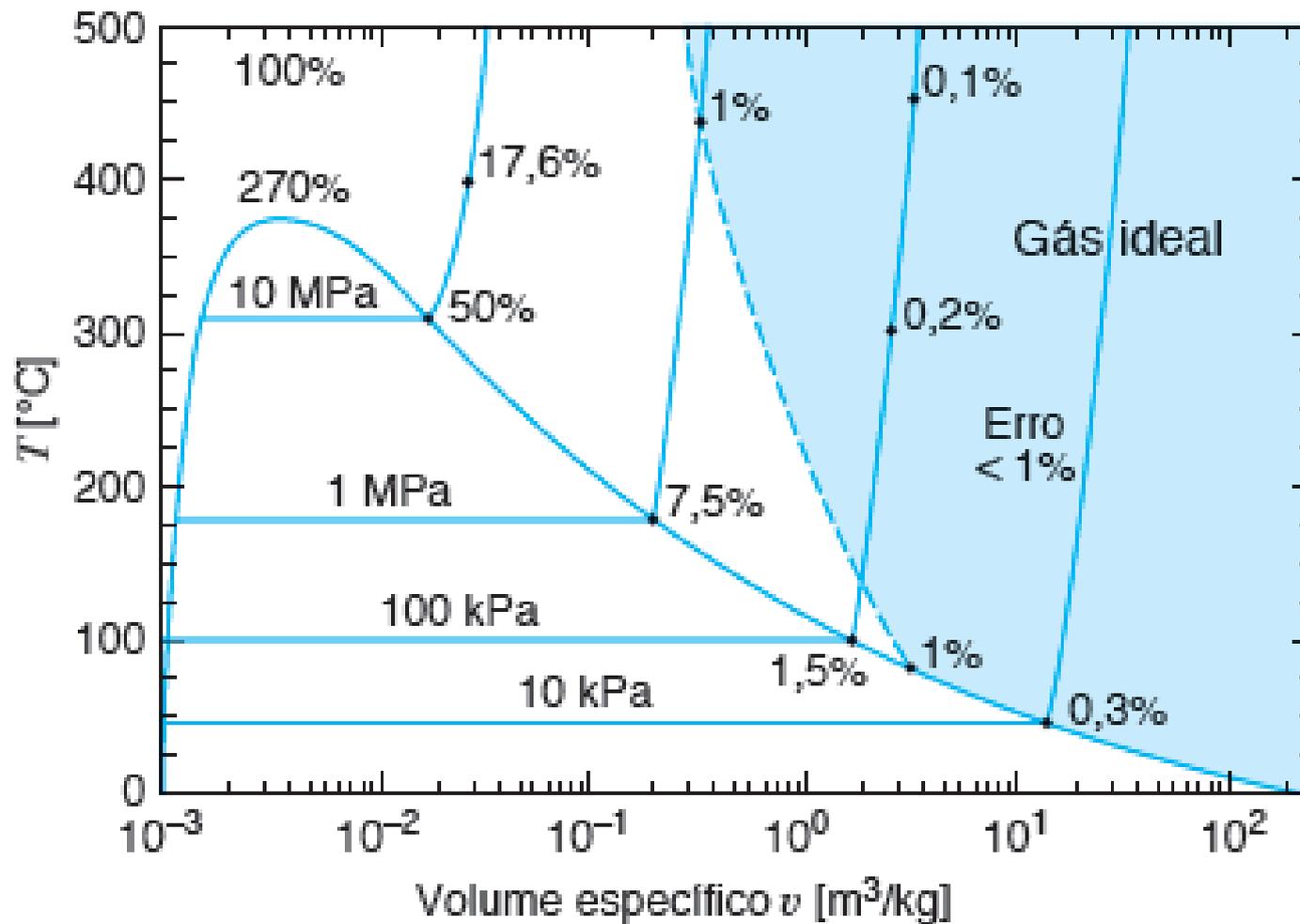
# Gás ideal

Values of the gas constant  $R$  of Selected Elements and Compounds

Substance	Chemical Formula	$R$ (kJ/kg · K)	$R$
Air	—	0.2870	
Ammonia	NH <sub>3</sub>	0.4882	
Argon	Ar	0.2082	
Carbon dioxide	CO <sub>2</sub>	0.1889	
Carbon monoxide	CO	0.2968	
Helium	He	2.0769	
Hydrogen	H <sub>2</sub>	4.1240	
Methane	CH <sub>4</sub>	0.5183	
Nitrogen	N <sub>2</sub>	0.2968	
Oxygen	O <sub>2</sub>	0.2598	
Water	H <sub>2</sub> O	0.4614	

Source:  $R$  values are calculated in terms of the universal gas constant  $\bar{R} = 8.314$  kJ/kmol · K lbmol · °R and the molecular weight  $M$  provided in Table A-1 using  $R = \bar{R}/M$  (Eq. 3.25).

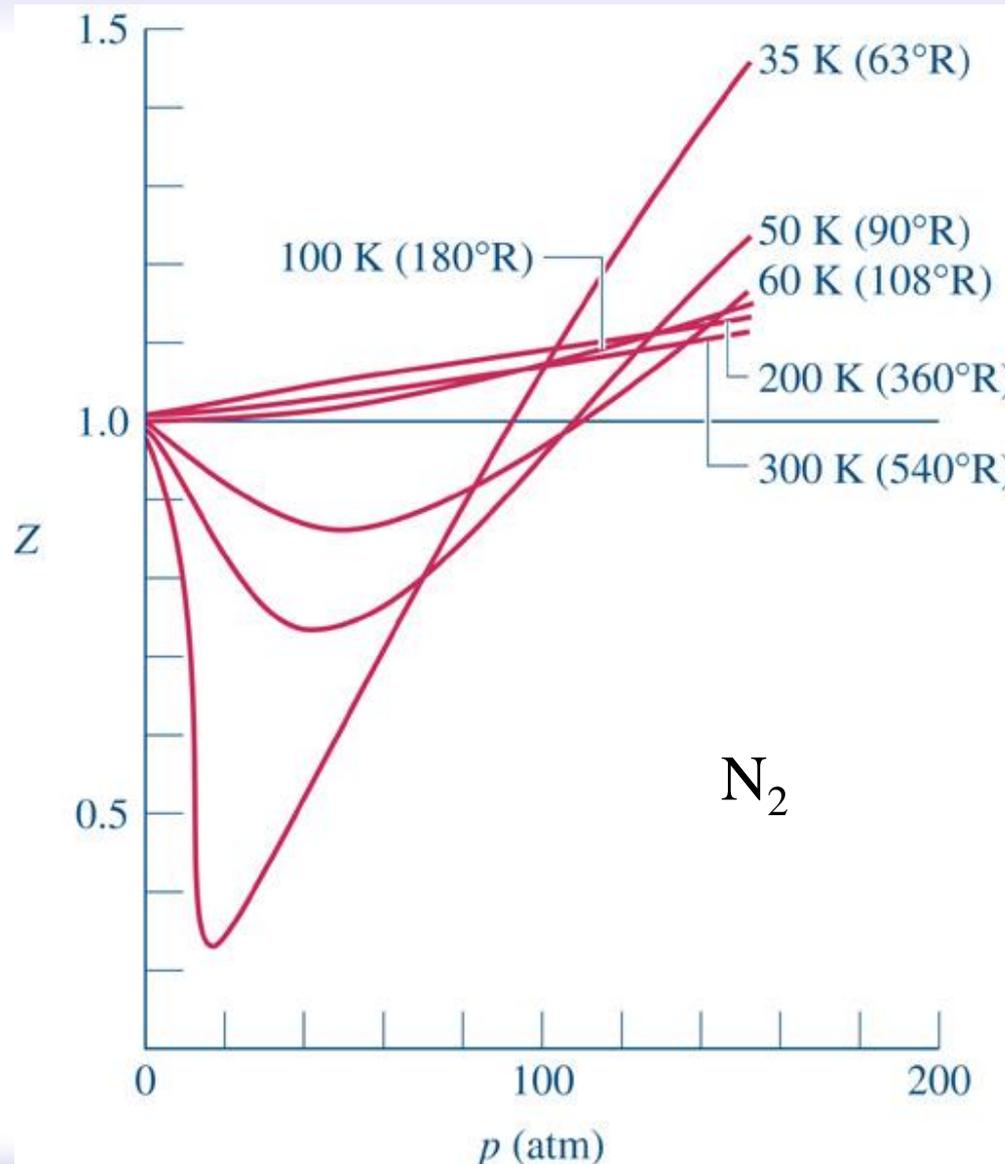
$$R = \frac{\bar{R}}{M}$$



**Figura 3.21**

Diagrama temperatura–volume específico para a água.

# “Gás” Real: Fator de compressibilidade, Diagrama Z



$$Pv = RT$$

- Fator de compressibilidade

$$Z = \frac{pv}{RT}$$

# *Fator de compressibilidade*

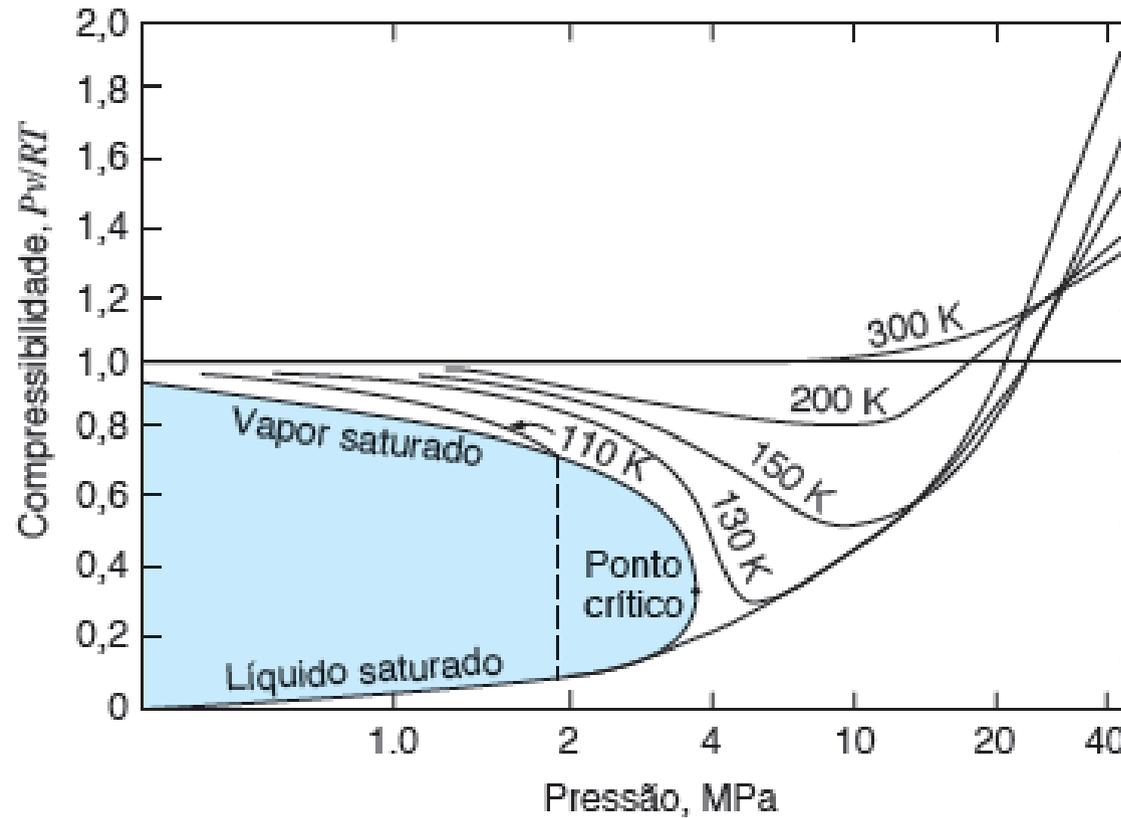
$$Z = \frac{pv}{RT}$$

$$p_r = \frac{p}{p_{cr}}$$

$$T_r = \frac{T}{T_{cr}}$$

$$v_r = \frac{v}{v_{cr}}$$

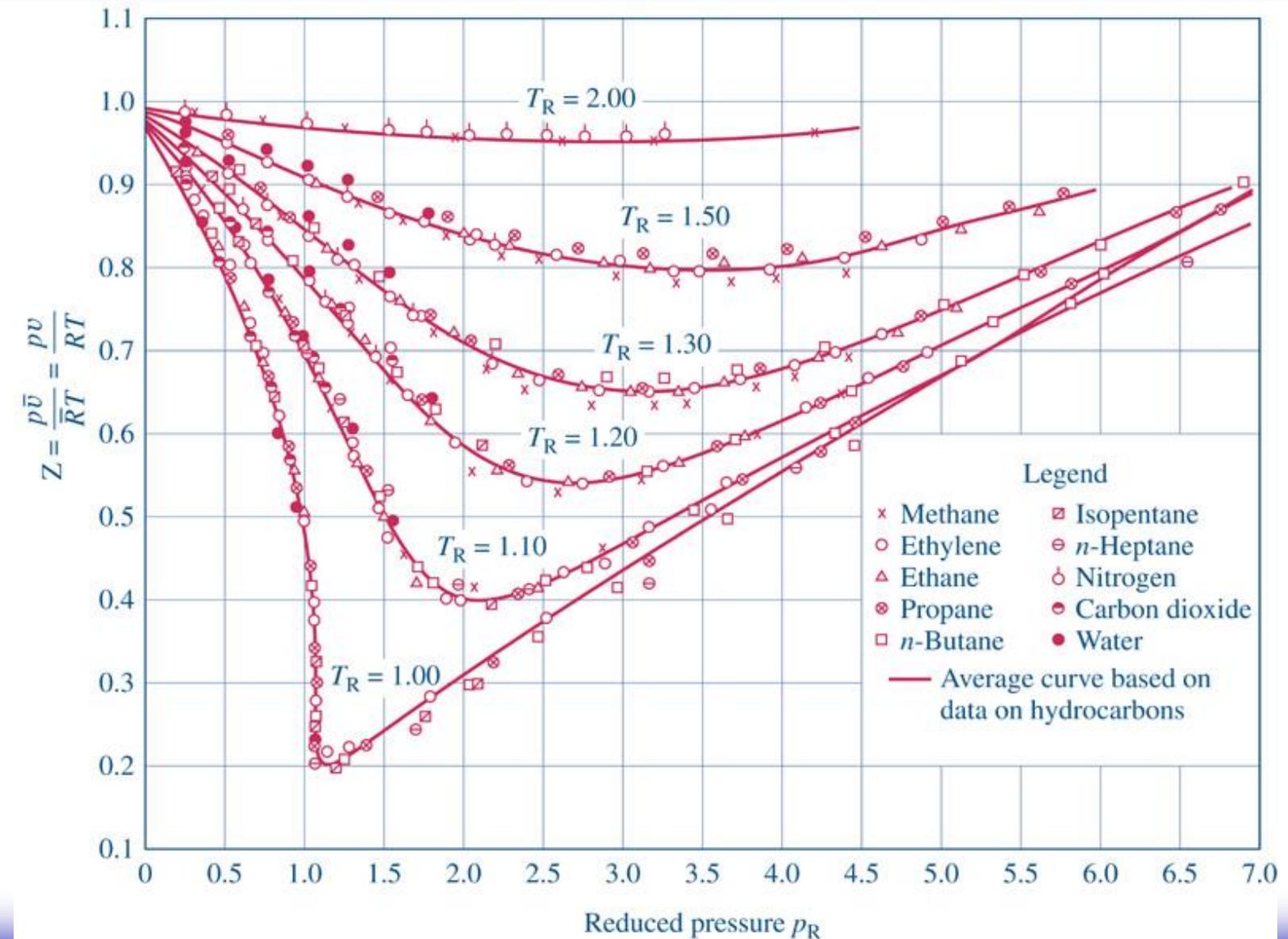
# Fator de compressibilidade



**Figura 3.22**

Compressibilidade do nitrogênio.

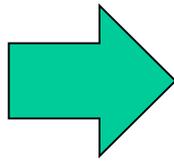
# O Diagrama Generalizado de Compressibilidade



# **Fator de compressibilidade**

## **Gás ideal: $Z \approx 1$**

$$Z = \frac{pv}{RT} \approx 1$$



Faixa de validade

$Tr > 2.0$

$Pr < 0.1$  ou  $0.01$

# Relações termodinâmicas para gás ideal

$$p\nu = RT$$

$$u = u(T); \quad u_2 - u_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_v(T) dT$$

$$h = h(T); \quad h_2 - h_1 = \int_{T_1}^{T_2} c_p(T) dT$$

$h(T) = u(T) + p\nu = u(T) + RT$ ; diferenciando

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

$$c_p(T) = c_v(T) + R$$

# *Relações termodinâmicas para gás ideal*

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

$$c_p(T) = c_v(T) + R$$

$$k = \frac{c_p(T)}{c_v(T)}$$

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

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

# Relações termodinâmicas para gás ideal

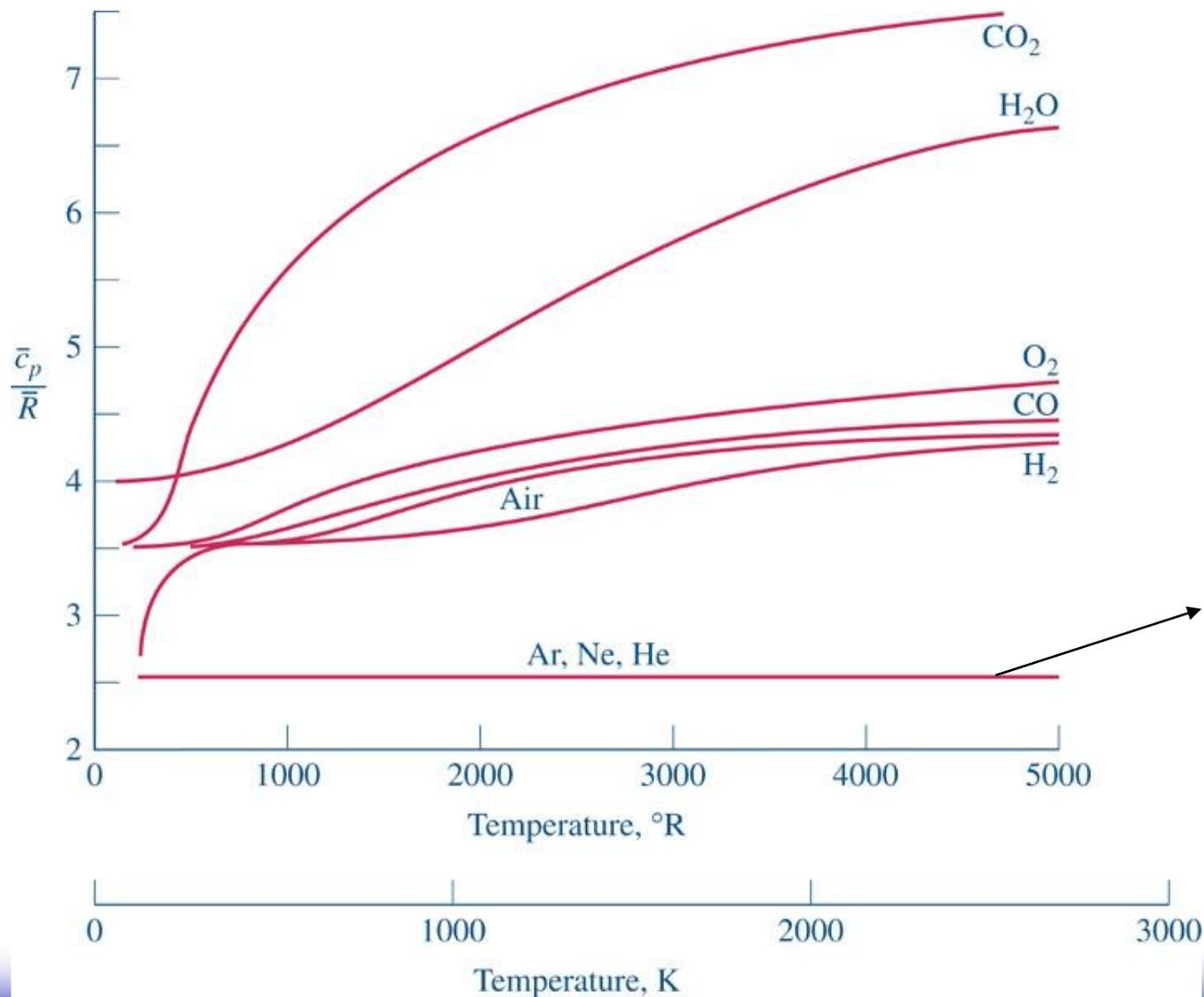
- Quando  $c_p$  e  $c_v$  são constantes, pode-se escrever:

$$u(T_2) - u(T_1) = c_v(T_2 - T_1)$$

$$h(T_2) - h(T_1) = c_p(T_2 - T_1)$$

- Estas expressões são constantemente utilizadas.
- Os valores de  $c_p$  e  $c_v$  são valores médios durante o processo. Ou alternativamente, calculadas a temperatura média do processo.

# $c_p$ e $c_v$ para gases ideais



# $c_p$ e $c_v$ para gases ideais

**TABLE A-20** Ideal Gas Specific Heats of Some Common Gases (kJ/kg · K)

Temp. K	$c_p$	$c_v$	$k$	$c_p$	$c_v$	$k$	$c_p$	$c_v$	$k$	Temp. K
	Air			Nitrogen, N <sub>2</sub>			Oxygen, O <sub>2</sub>			
250	1.003	0.716	1.401	1.039	0.742	1.400	0.913	0.653	1.398	250
300	1.005	0.718	1.400	1.039	0.743	1.400	0.918	0.658	1.395	300
350	1.008	0.721	1.398	1.041	0.744	1.399	0.928	0.668	1.389	350
400	1.013	0.726	1.395	1.044	0.747	1.397	0.941	0.681	1.382	400
450	1.020	0.733	1.391	1.049	0.752	1.395	0.956	0.696	1.373	450
500	1.029	0.742	1.387	1.056	0.759	1.391	0.972	0.712	1.365	500
550	1.040	0.753	1.381	1.065	0.768	1.387	0.988	0.728	1.358	550
600	1.051	0.764	1.376	1.075	0.778	1.382	1.003	0.743	1.350	600
650	1.063	0.776	1.370	1.086	0.789	1.376	1.017	0.758	1.343	650
700	1.075	0.788	1.364	1.098	0.801	1.371	1.031	0.771	1.337	700
750	1.087	0.800	1.359	1.110	0.813	1.365	1.043	0.783	1.332	750
800	1.099	0.812	1.354	1.121	0.825	1.360	1.054	0.794	1.327	800
900	1.121	0.834	1.344	1.145	0.849	1.349	1.074	0.814	1.319	900
1000	1.142	0.855	1.336	1.167	0.870	1.341	1.090	0.830	1.313	1000
Temp. K	Carbon Dioxide, CO <sub>2</sub>			Carbon Monoxide, CO			Hydrogen, H <sub>2</sub>			Temp. K
250	0.791	0.602	1.314	1.039	0.743	1.400	14.051	9.927	1.416	250
300	0.846	0.657	1.288	1.040	0.744	1.399	14.307	10.183	1.405	300
350	0.895	0.706	1.268	1.043	0.746	1.398	14.427	10.302	1.400	350
400	0.939	0.750	1.252	1.047	0.751	1.395	14.476	10.352	1.398	400

# $c_p$ e $c_v$ para gases ideais

**TABLE A-21** Variation of  $\bar{c}_p$  with Temperature for Selected Ideal Gases

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

$T$  is in K, equations valid from 300 to 1000 K

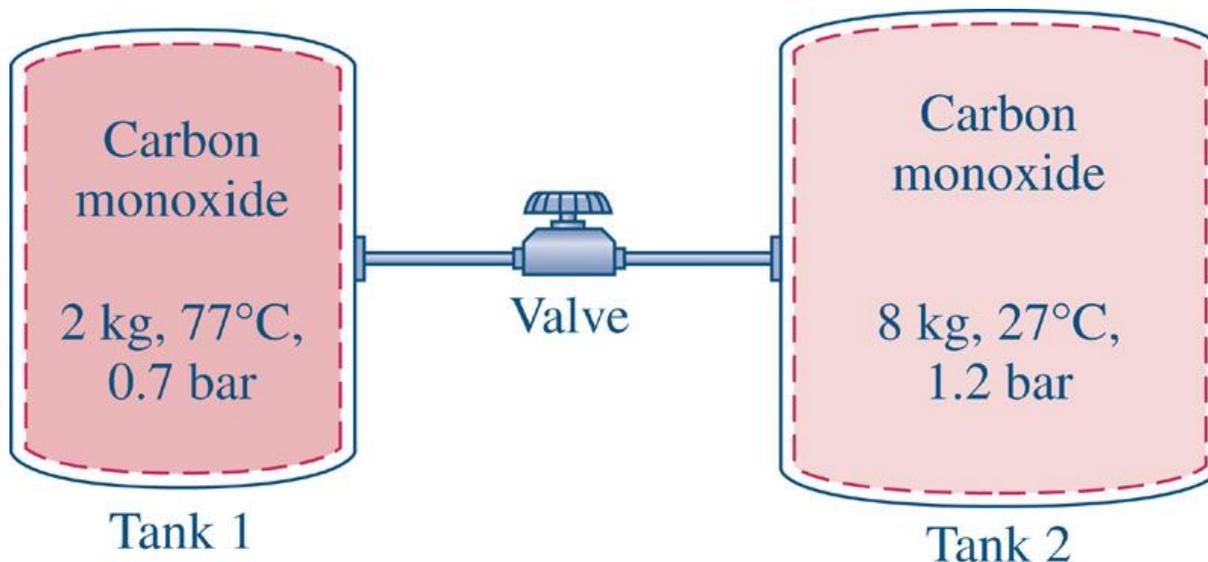
Gas	$\alpha$	$\beta \times 10^3$	$\gamma \times 10^6$	$\delta \times 10^9$	$\varepsilon \times 10^{12}$
CO	3.710	-1.619	3.692	-2.032	0.240
CO <sub>2</sub>	2.401	8.735	-6.607	2.002	0
H <sub>2</sub>	3.057	2.677	-5.810	5.521	-1.812
H <sub>2</sub> O	4.070	-1.108	4.152	-2.964	0.807
O <sub>2</sub>	3.626	-1.878	7.055	-6.764	2.156
N <sub>2</sub>	3.675	-1.208	2.324	-0.632	-0.226
Air	3.653	-1.337	3.294	-1.913	0.2763
SO <sub>2</sub>	3.267	5.324	0.684	-5.281	2.559
CH <sub>4</sub>	3.826	-3.979	24.558	-22.733	6.963
C <sub>2</sub> H <sub>2</sub>	1.410	19.057	-24.501	16.391	-4.135
C <sub>2</sub> H <sub>4</sub>	1.426	11.383	7.989	-16.254	6.749
Monatomic gases <sup>a</sup>	2.5	0	0	0	0

<sup>a</sup>For monatomic gases, such as He, Ne, and Ar,  $\bar{c}_p$  is constant over a wide temperature range and is very nearly equal to  $5/2 \bar{R}$ .

Source: Adapted from K. Wark, *Thermodynamics*, 4th ed., McGraw-Hill, New York, 1983, as based on NASA SP-273, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 1971.

## 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  $77^{\circ}\text{C}$  e 0,7 bar. O outro contém o mesmo gás a  $27^{\circ}\text{C}$  e 1,2 bar. A válvula é aberta permitindo a mistura dos gases e calor é transferido com a vizinhança. A temperatura ao final do processo é de  $42^{\circ}\text{C}$ . Utilizando o modelo de gás ideal com calores específicos constantes, determine: a) A pressão final de equilíbrio; b) A quantidade de calor trocada no processo.



# Exemplo 3.12: Processos Politrópicos. Ar como gás ideal

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

