

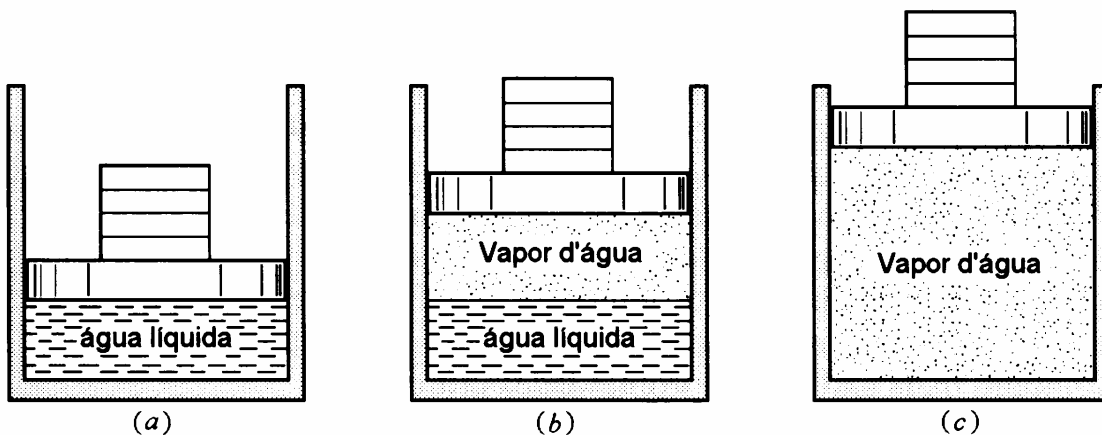


Propriedades de uma Substância Pura

A substância pura

Composição química invariável e homogênea. Pode existir em mais de uma fase, porém sua composição química é a mesma em todas as fases.

Equilíbrio Vapor-líquido-sólido em uma Substância Pura



- Temperatura de saturação: a temperatura na qual ocorre a vaporização a uma dada pressão, e esta pressão é chamada de pressão de saturação para uma dada temperatura.



Mudança de fase de uma substância pura:

- **Fusão:** mudança da fase sólida para a líquida;
- **Solidificação:** mudança da fase líquida para a sólida;
- **Vaporização:** mudança da fase líquida para a gasosa;
- **Condensação:** mudança da fase gasosa para a fase líquida;
- **Sublimação:** transformação direta da fase sólida para a fase gasosa sem que passe pela líquida.

Vapor, Gás e Gás Ideal;

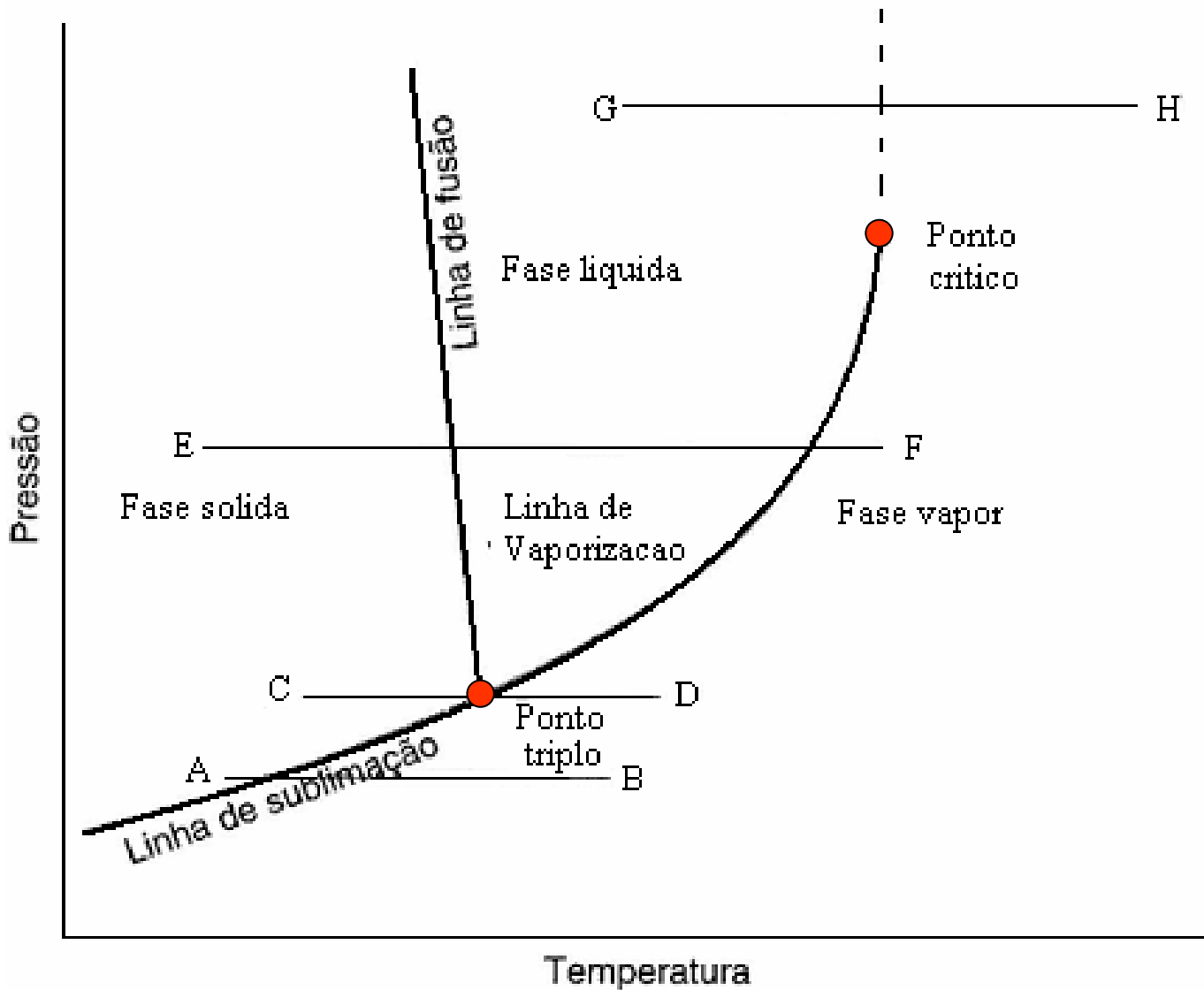
-**Vapor** é o nome que se dá a uma fase gasosa que está em contato com a fase líquida ou está na eminência de condensar-se. O vapor é um *gás imperfeito*.

-**Gás** é um vapor altamente superaquecido a baixas pressões e seu estado de equilíbrio está longe do estado de saturação.

- **Gás ideal**, suas moléculas não sofrem os efeitos de atração e repulsão molecular, por estarem muito longe umas das outras; é regido pela *equação de estado* tipo $f(p, v, T) = 0$.



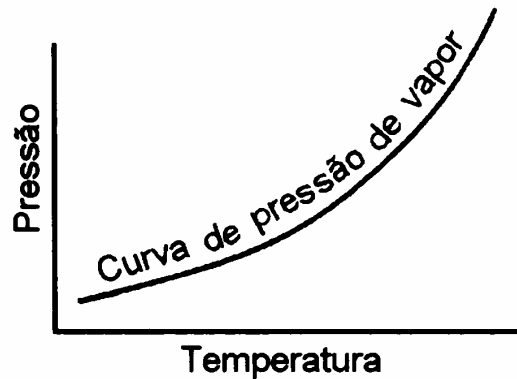
Diagrama Pressão-Temperatura para a água:



- **Ponto triplo:** o estado no qual as três fases estão presentes e em equilíbrio.
- **Ponto crítico:** temperatura, pressão e volume críticos; se $P > P_{\text{crítica}}$ nunca existirão duas fases ao mesmo tempo.



- Para uma substância pura, há uma relação definida entre a pressão de saturação e a temperatura de saturação:

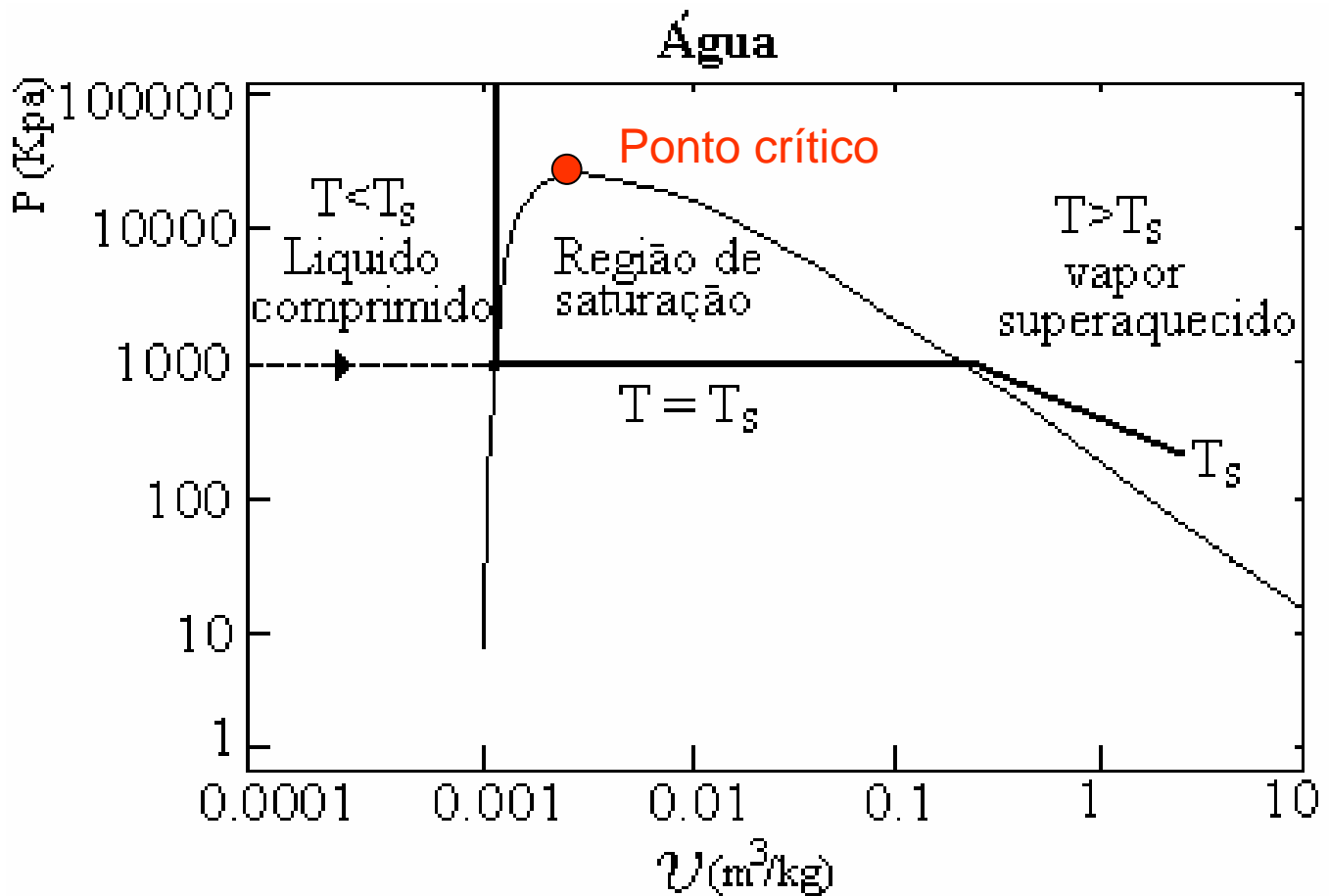


- À temperatura e pressão de saturação o líquido existente é chamado de **líquido saturado**.
- Se a temperatura do líquido é menor do que a temperatura de saturação, temos **líquido sub-resfriado** ou **líquido comprimido** (a pressão é maior do que àquela de saturação para a dada temperatura).
- Vapor na temperatura de saturação é chamado de **vapor saturado**.
- Vapor a uma temperatura maior do que a temperatura de saturação é chamado de **vapor superaquecido**.
- Na região bifásica, temos que:

$$\text{Título} = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{vapor}} + m_{\text{líquido}}} = x \text{ (no estado de saturação)}$$



Diagrama Pressão-Volume para a água:





Acima do estado crítico os processo de vaporização ou condensação não existem. O estado crítico caracterizado pelos valores de pressão (p_c), volume (v_c) e temperatura (T_c), que são bem conhecidos.

Propriedades críticas de algumas substâncias

Substância	Temperatura		Pressão	
	°K	°R	bar	Psia
Amoníaco (NH ₃)	405,5	724,8	112,8	1636
Dióxido de Carbono (CO ₂)	304,2	547,5	73,9	1071
Monóxido de Carbono(CO)	133	240	35,0	507
Hélio(He)	5,3	9,5	2,29	33,2
Hidrogênio (H ₂)	33,3	59,9	13,0	188,1
Nitrogênio (N ₂)	126,2	227,1	33,9	492
Àgua (H ₂ O)	647,3	1165,2	220,9	3204

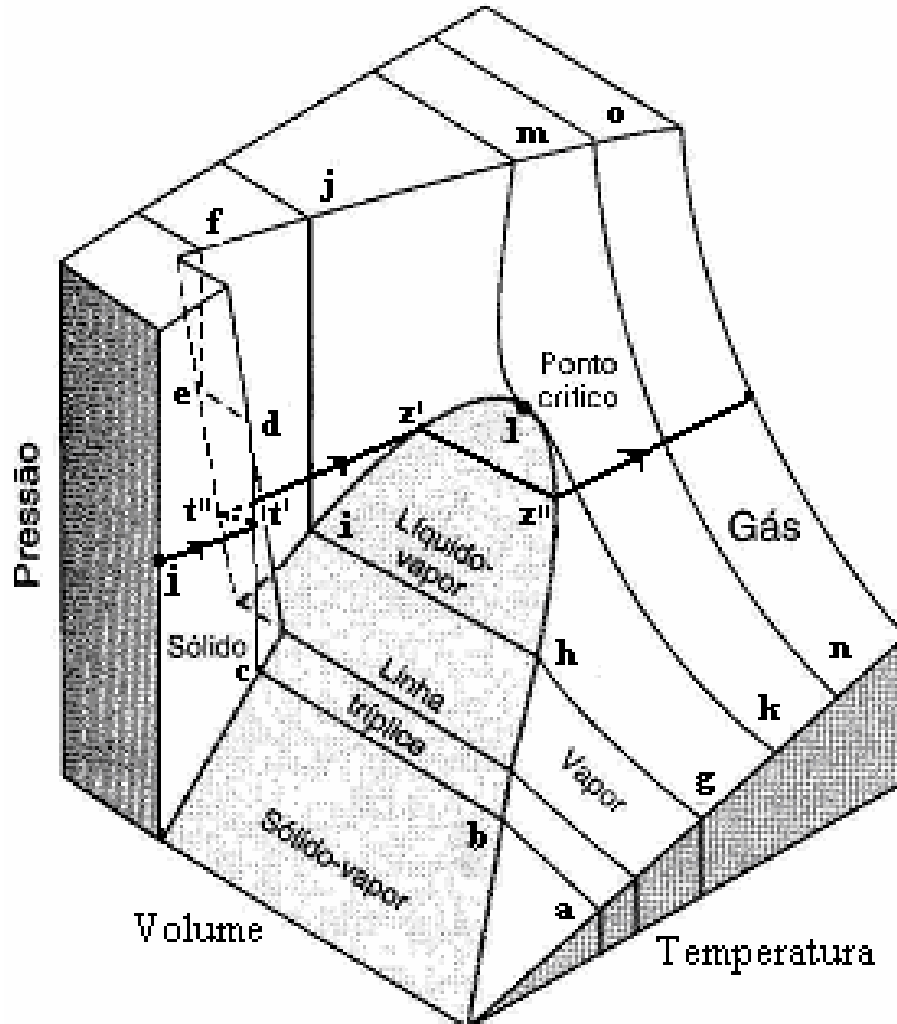
O ponto tríplice é caracterizado pelos valores de temperatura (T_t), volume (v_t) e pressão (p_t).

Dados de estado tríplice

Substância	T(K)	T(*C)	P(bar)
Hélio 4 (ponto)	2,17	-271,11	0,05066
Hidrogênio (H ₂)	13,84	-223,88	0,07092
Oxigênio (O ₂)	54,36	-218,88	0,001519
Nitrogênio (N ₂)	63,18	-210,00	0,12564
Amônia (NH ₃)	195,40	-77,77	0,06180
Dióxido de Carbono (CO ₂)	216,55	-56,66	5,16757
Àgua(H ₂ O)	273,16	0,00	0,00607



Superfícies Termodinâmicas, para uma substância que expande na solidificação (ex.: água)



Vamos seguir um processo isobárico:

1. do estado (i) até (t') (estado onde começa a fusão) o volume específico muda ligeiramente e a temperatura também muda;
2. o processo de fusão (t') - (t'') é uma linha de pressão e temperatura constantes (isobárica e isotérmica);
3. o processo (t'') - (z') é caracterizado, como o processo 1, pela independência das propriedades p, v e T (fase líquida).
4. quando começa o processo de vaporização (z') a pressão e temperatura são dependentes até o estado z'', onde a substância chega à fase de vapor.



Propriedades Independentes de uma Substância Pura

- Para uma substância pura simples compressível, normalmente duas propriedades independentes definem o estado (p e v ou T e v ou p e T).
- Obs.: no estado de saturação, temperatura e pressão não são independentes. Portanto, é necessário conhecer o título, x.

Considerando uma massa m com título x , o volume é dado por:

$$V = V_{líq} + V_{vap}$$

ou

$$m v = m_{líq} v_{líq} + m_{vap} v_{vap}$$

dividindo pela massa total:

$$v = (1 - x)v_{líq} + x v_{vap}$$

definindo:

$$v_{lv} = v_{vap} - v_{líq}$$

a Eq. (4) pode ser apresentada na forma:

$$v = v_{líq} + x v_{lv}$$



Tabelas de propriedades termodinâmicas

Em geral, as tabelas termodinâmicas apresentam as seguintes propriedades:

- T , temperatura
- p , pressão
- v , volume específico
- u , energia interna específica
- h , entalpia específica
- s , entropia específica

Quando a substância é a água, chamamos a tabela de Tabela de vapor.

O objetivo do uso das tabelas é a determinação das 4 propriedades restantes, considerando que qualquer estado termodinâmico pode ser especificado por 2 propriedades termodinâmicas independentes.



Tabelas de saturação

As propriedades intensivas de cada fase podem ser tabuladas em função seja da pressão ou temperatura de saturação. Portanto, uma terceira propriedade intensiva é necessária para definir o estado.

Propriedades de líquido e vapor saturado para a água

Temperatura T°C	Pressão P (bar)	Volume Específico V (cm ³ /Kg)		Entalpia h (KJ/Kg)		Entropia s (KJ/Kg.K)	
		Líqu. Saturado (v _l)	Vapor Saturado (v _g)	Líqu. Saturado (h _l)	Vapor Saturado (h _g)	Líqu. Saturado (s _l)	Vapor Saturado (s _g)
20	0,02339	1,0018	57791	83,96	2538,1	0,2966	8,6672
40	0,07384	1,0078	19523	167,57	2574,3	0,5725	8,2570
60	0,19940	1,0172	7671	251,13	2609,6	0,8312	7,9096

Tabela de líquido comprimido ou sub-resfriado

Duas propriedades intensivas são suficientes para definir o estado, por exemplo, pressão e temperatura. Note que os dados de líquido comprimido são mais dependentes da temperatura do que da pressão.

Propriedades da água na fase líquida vida (líquido comprimido)

p (bar)	v (cm(3)/g)	u (Kj/kg)	h (Kj/kg)	s (Kj/kg)
0,474(saturação)	1,0291	334,86	334,91	1,0753
50	1,0268	333,72	338,85	10720
100	1,0245	332,54	342,83	1,0688



Tabela de vapor superaquecido

Duas propriedades intensivas são necessárias para fixar os estados de equilíbrio. Os dados começam com estado de saturação (vapor saturado) e continuam mantendo a pressão constante e mudando a temperatura.

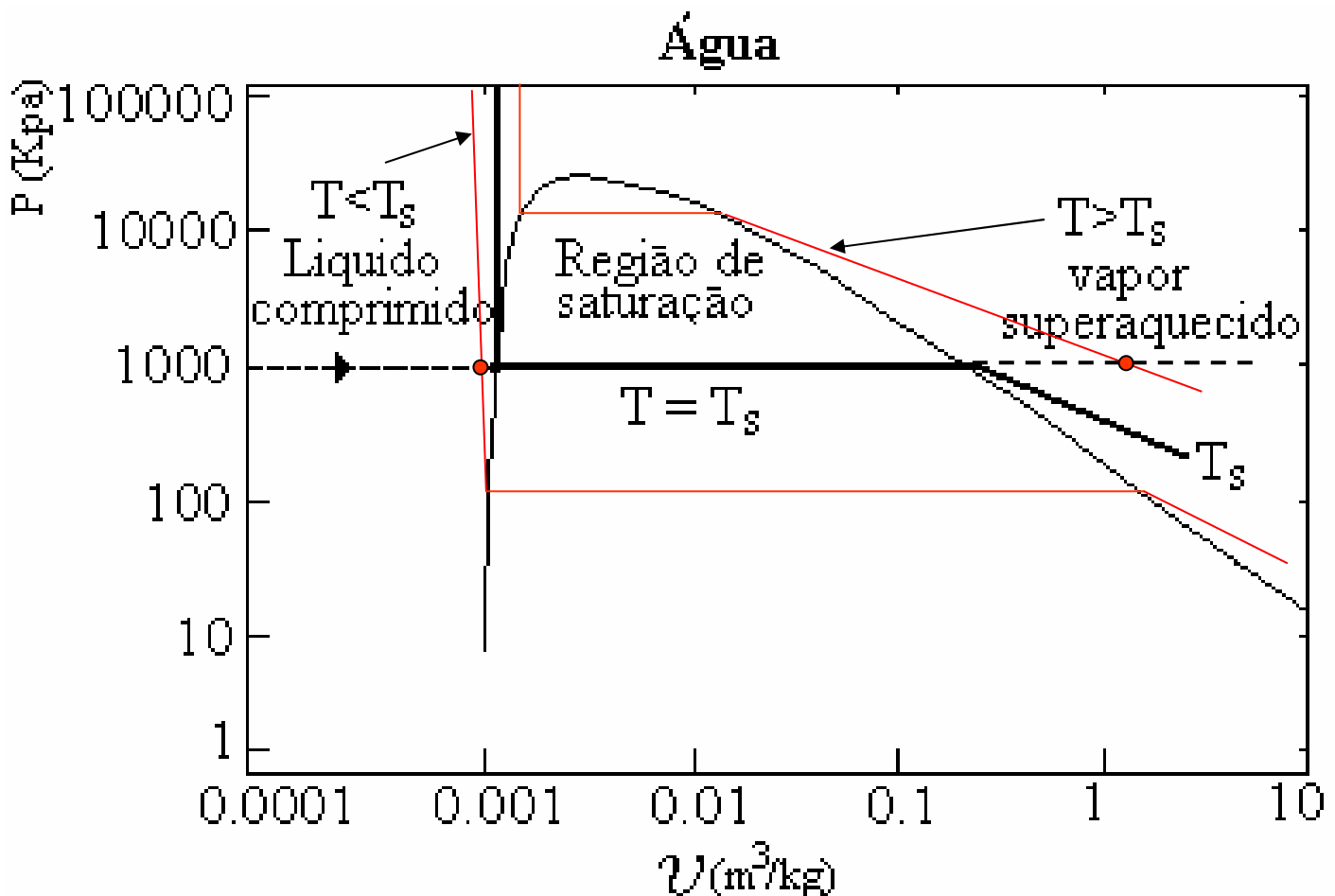
Propriedades de Vapor de água Superaquecida

Temperatura (*C)	v (cm ³ /Kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kgk)
1,0bar(99,63*C)				
sat	1694,0	2506,1	2675,5	7,3594
100	1696,0	2506,7	2676,2	7,3614
120	1793,0	2537,3	2716,6	7,4668
160	1984,0	2597,8	2796,2	7,6597
200	2172,0	2658,1	2875,3	7,8343
10 bar(179,91*)				
sat.	194,4	2583,6	2778,1	6,5865
200	206,0	2621,9	2827,9	6,6940
240	227,5	2692,9	2920,4	6,8817
280	248,0	2760,2	3008,2	7,0465
320	267,8	2826,1	3093,9	7,1962



O melhor método de encontrar a tabela apropriada a consultar é procurar primeiro a tabela de saturação.

Seja dada uma pressão $p = 1000$ kPa e uma temperatura T :



1. $T < T_s$: a substância está na região de líquido comprimido
2. $T > T_s$: a substância está na região de vapor superaquecido
3. $T = T_s$: a substância está no estado de saturação e devemos obter o título



Equações de estado para a fase vapor de uma substância compressível simples

$$p\bar{v} = \bar{R}T, \text{ onde } \bar{R} = 8.3144 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}$$

onde \bar{R} é a constante universal dos gases.

Dividindo os dois lados por M , o peso molecular do gás em estudo:

$$\frac{p\bar{v}}{M} = \frac{\bar{R}T}{M} \Rightarrow pv = RT \quad , \text{ onde: } R = \frac{\bar{R}}{M}$$

$$\text{onde: } \frac{\bar{v}}{M} = v = \frac{V}{m} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{kmol}} \cdot \frac{\text{kmol}}{\text{kg}} = \frac{\text{m}^3}{\text{kg}} \right]$$

ou:

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

$$PV = mRT$$

$$P = \rho RT$$

$$\frac{P_1 V_1}{T_1} = \frac{P_2 V_2}{T_2}$$



A equação de estado é chamada de equação dos gases perfeitos. Ela é aplicável para gases rarefeitos (baixa densidade).

- Em qual faixa de densidade a equação dos gases perfeitos simula o comportamento do gás real com uma boa precisão?
- Como estimar o desvio do comportamento de um gás real em relação ao de um gás ideal?

Fator de compressibilidade:

$$Z = \frac{p\bar{v}}{RT}$$

Para um gás perfeito $Z = 1$

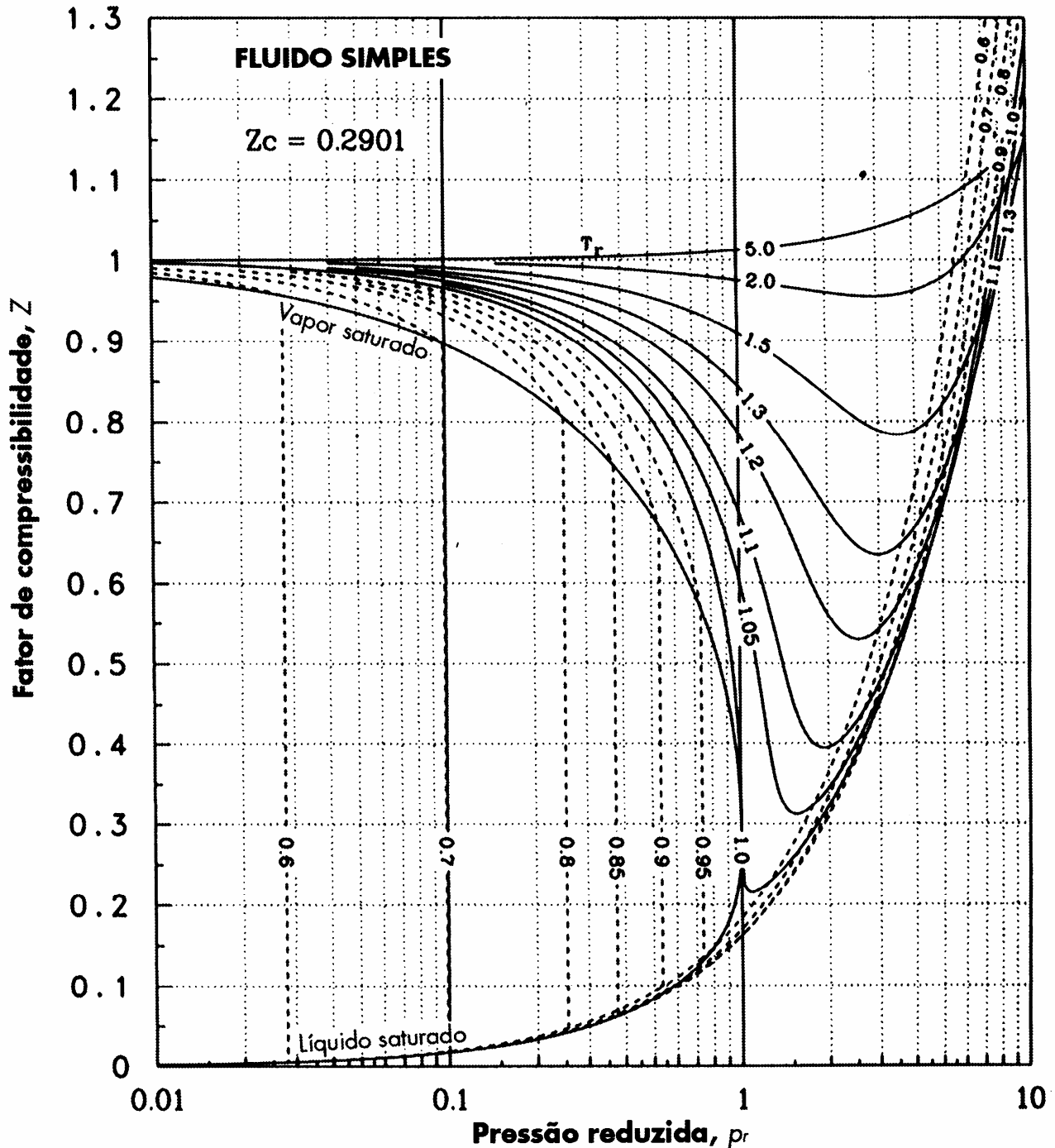
Para a construção de um diagrama de compressibilidade genérico, aplicável a várias substâncias, definem-se:

Pressão reduzida = $p_r = \frac{p}{p_c}$, onde p_c = pressão crítica

Temperatura reduzida = $T_r = \frac{T}{T_c}$, onde T_c = temperatura crítica



Diagrama generalizado para o fator de compressibilidade



A equação de estado do gás ideal deve ser utilizada quando:

1. A pressão $p \ll p_c$ (qq. Temperatura)
2. Temperaturas por volta de 2 vezes a T_c e pressões até $5p_c$



Exemplo 1: Um tanque com capacidade de 0.5 m^3 contém 10 kg de um gás perfeito que apresenta peso específico igual a 24. A temperatura é de $25 \text{ }^\circ\text{C}$. Qual é a pressão do gás?

Exemplo 2: Calcular o volume específico da mistura vapor e líquido de água a 145°C e que apresenta título igual a 60%.

Exemplo 3: Considere um cilindro com êmbolo. 1 kg de água está no estado líquido saturado a 100°C . (a) Qual é a pressão e o volume específico neste estado? (b) Suponha que a pressão seja elevada a 10 MPa, mantendo a temperatura constante por uma transferência de calor adequada. Qual é o novo volume específico? (c) Qual foi a variação do volume específico?

Exemplo 4: Determine o volume específico do fluido refrigerante R-134a a pressão de 3 MPa e a temperatura de 100°C utilizando: (a) as tabelas de R-134a (Tab. B5), (b) o modelo de gás perfeito e (c) o diagrama generalizado.

Exemplo 5: Um recipiente com capacidade de $0,4 \text{ m}^3$ contém 2,0 kg de uma mistura de água líquida e vapor em equilíbrio a uma pressão de 600 kPa. Calcule:

- (a) o volume e a massa do líquido.
- (b) o volume e a massa do vapor.