

Capítulo 2 – Propriedades de uma substância pura

Parte 2 – GASES REAIS

Prof^a Dr^a Marivone Nunho Sousa

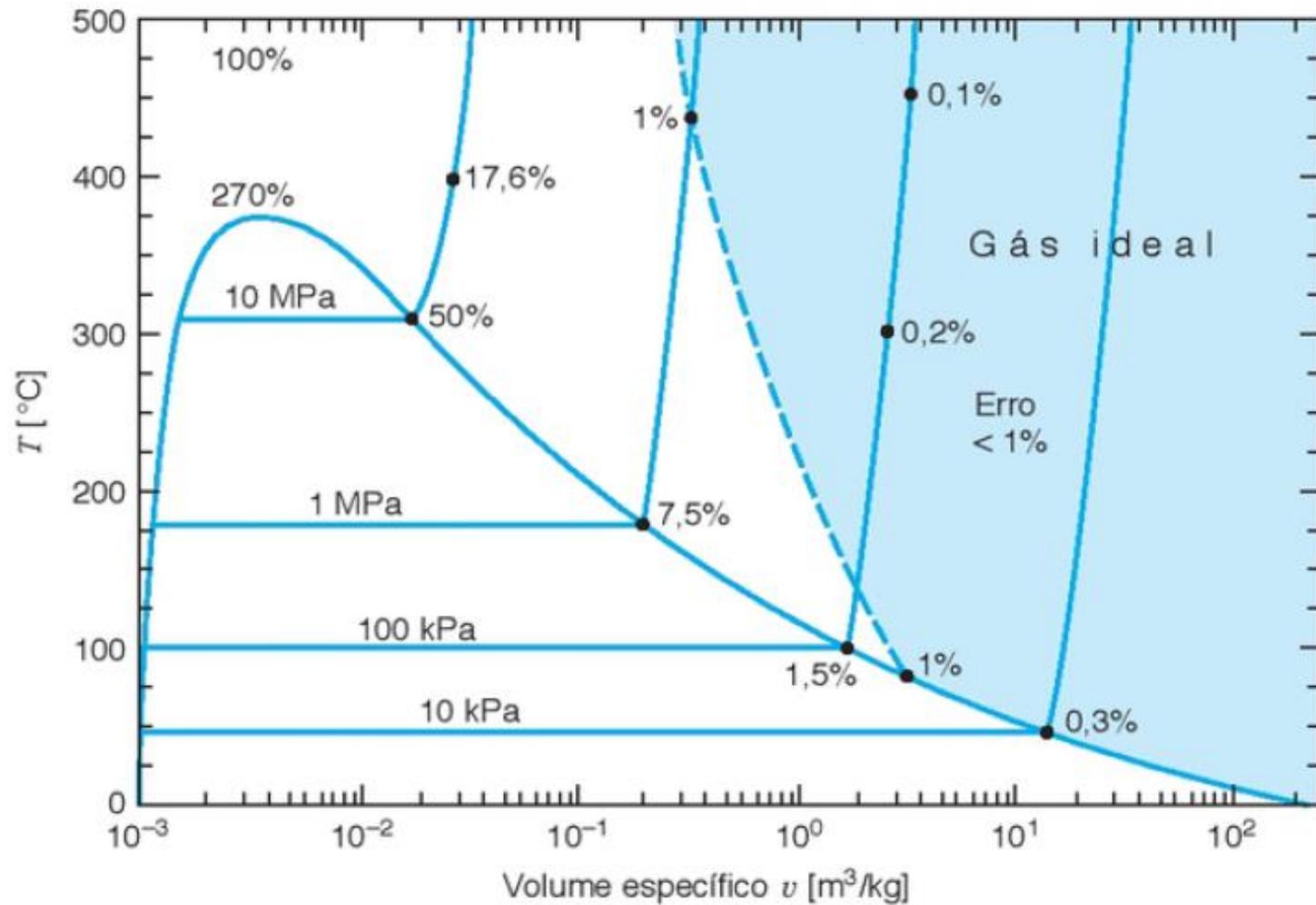


Figura 2.19

Diagrama temperatura-volume específico para a água.

Fator de compressibilidade

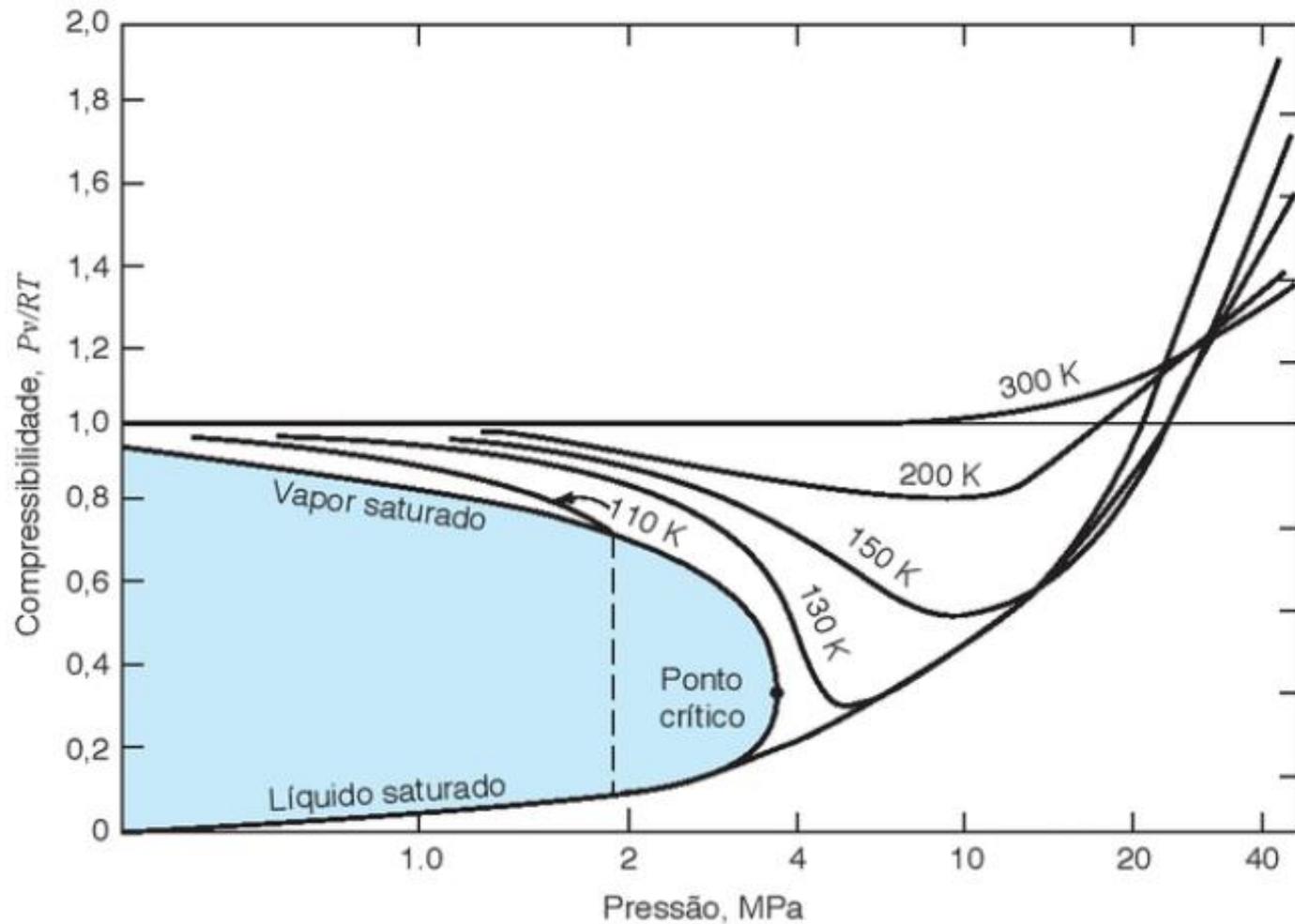


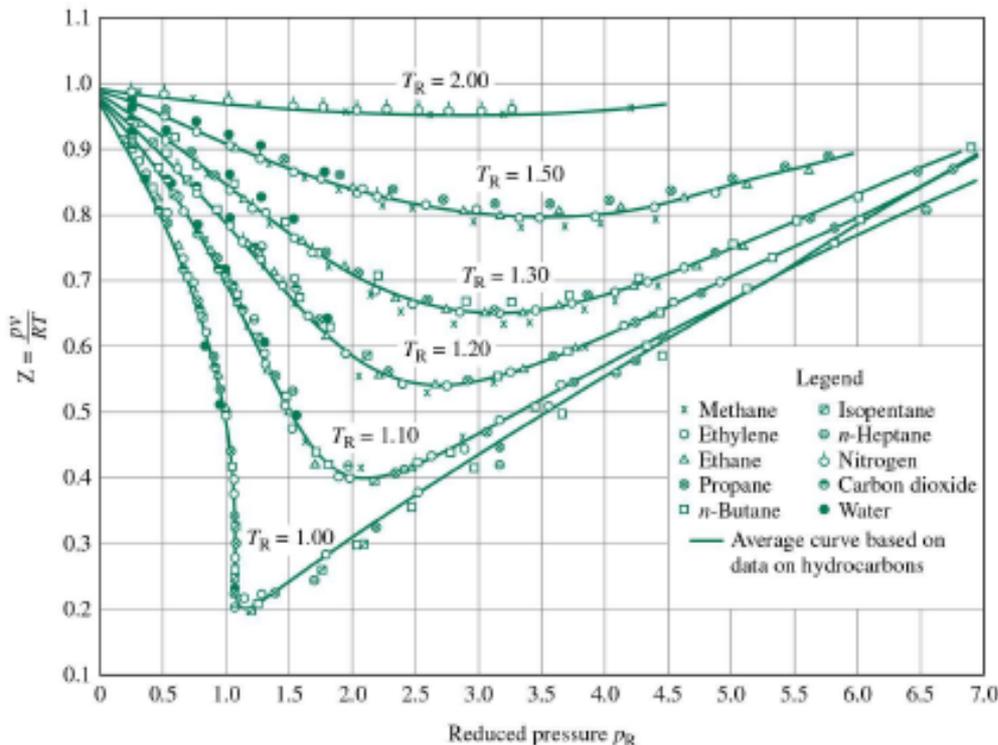
Figura 2.20

Compressibilidade do nitrogênio.

Fator de compressibilidade

Quando é válido o modelo de gás perfeito?

Para responder à pergunta precisamos definir o fator de compressibilidade (Z).



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

$$p_R = \frac{P}{P_c} = \text{pressão reduzida}$$

$$T_R = \frac{T}{T_c} = \text{temperatura reduzida}$$

- ◆ A baixas pressões o gás se comporta como perfeito independente da temperatura;
- ◆ A altas temperaturas ($T_R \geq 2$) o gás se comporta como perfeito, a menos quando $P_R \gg 1$;
- ◆ O desvio do comportamento de gás perfeito é maior próximo do ponto crítico.

Diagrama Generalizado de Compressibilidade - DGC

Fundamentos de Físico-Química -Castellan, pág. 48

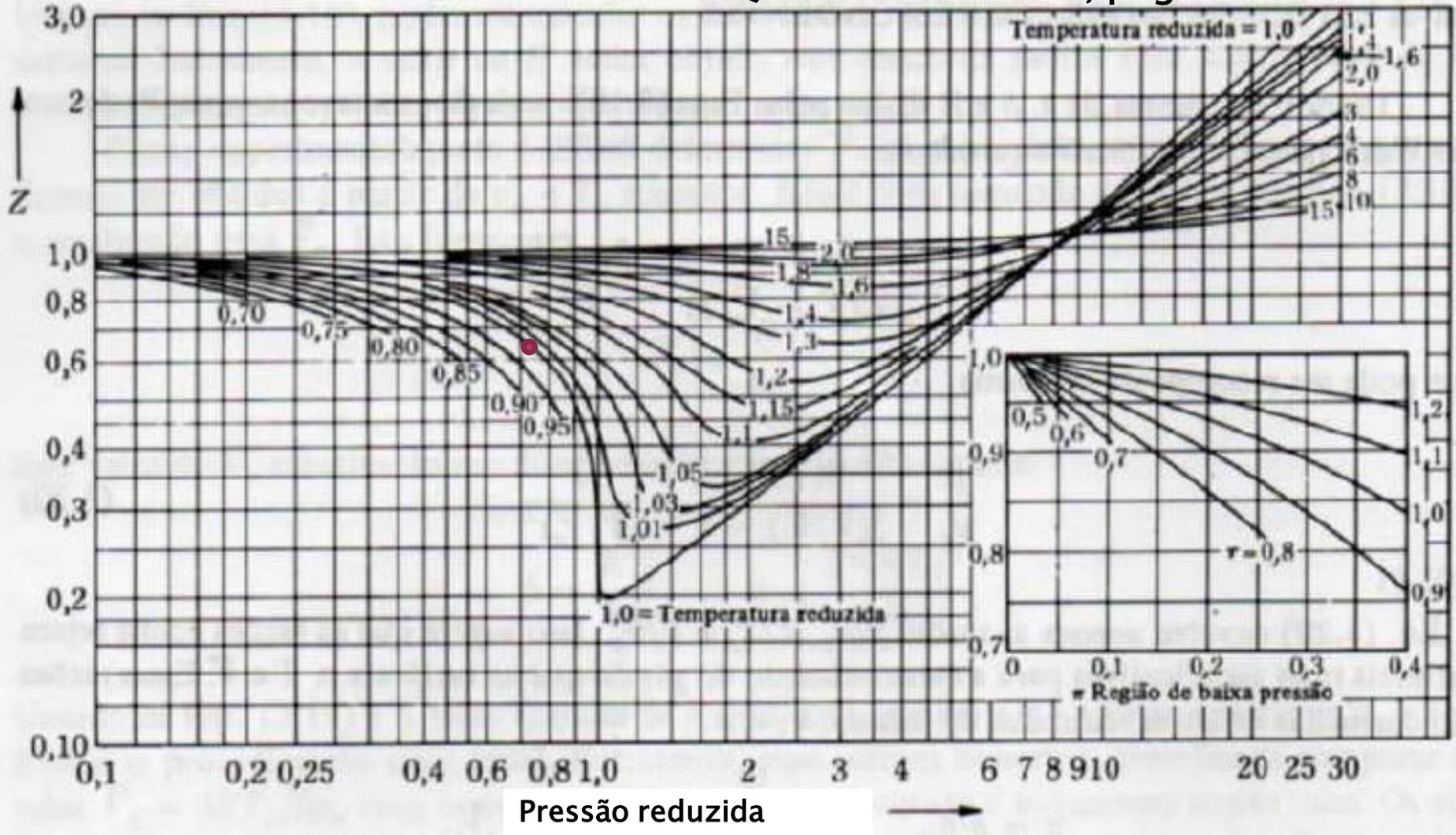


Fig. 3.8 O fator de compressibilidade em função da pressão reduzida e da temperatura reduzida. (O. A. Hougen e K. M. Watson, *Chemical Process Principles*, parte II. New York: John Wiley and Sons, 1947.)

Quando usar o Diagrama Generalizado de Compressibilidade (Z – fator de compressibilidade) ?

Nós utilizaremos frequentemente o diagrama generalizado de compressibilidade para verificar se é razoável modelar a substância analisada como um gás perfeito. Por exemplo, observamos no diagrama que o modelo de gás perfeito pode ser adotado com boa precisão, para qualquer temperatura, se a pressão é muito baixa (isto é, $\ll p_c$). Além disso, para temperaturas elevadas (isto é, maiores do que cerca de duas vezes a temperatura crítica), o modelo de gás perfeito pode ser adotado, com boa precisão, até pressões iguais a quatro ou cinco vezes a pressão crítica. Quando a temperatura for menor do que cerca de duas vezes a temperatura crítica e a pressão não for extremamente baixa, então estaremos numa região normalmente chamada de vapor superaquecido, na qual o desvio, relativamente ao comportamento do gás perfeito, pode ser apreciável. Nessa região é preferível usar as tabelas ou diagramas de propriedades termodinâmicas para a substância que está sendo analisada.

Exemplo 2,10

Tabela B.5.1 – R-134a

Dados críticos do R-134 a

$$T_c = 101,2 \text{ °C} = 374,2 \text{ K}$$

$$P_c = 4.0664 \text{ kPa} = 4,06 \text{ MPa}$$

EXEMPLO 2.10

Determine o volume específico do R-134a, a 100 °C e 3 MPa:

- Por meio das tabelas para o R-134a, Tabela B.5;
- Considerando gás ideal;
- Pelo diagrama generalizado, Figura D.1.

Solução:

- Da Tabela B.5.2 a 100 °C e 3 MPa $v = 0,006\ 65 \text{ m}^3/\text{kg}$ (valor mais preciso)
- Considerando o modelo de gás ideal,

Tabela A.5

$$R = \frac{\bar{R}}{M} = \frac{8,3145}{102,03} = 0,081\ 49 \frac{\text{kJ}}{\text{kg K}}$$
$$v = \frac{RT}{P} = \frac{0,081\ 49 \times 373,2}{3000} = 0,010\ 14 \text{ m}^3/\text{kg}$$

que é cerca de 50% maior.

c. A utilização do diagrama generalizado, Figura D.1, resulta em

$$T_r = \frac{373,2}{374,2} = 1,0, \quad P_r = \frac{3}{4,06} = 0,74, \quad Z = 0,67$$

$$v = Z \times \frac{RT}{P} = 0,67 \times 0,010\ 14 = 0,006\ 79 \text{ m}^3/\text{kg}$$

que é apenas 2% maior.

TABELA B.5.2 (continuação)

R-134a superaquecido

Temp. °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)	v (m ³ /kg)	u (kJ/kg)	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
1600 kPa (57,90 °C)				2000 kPa (67,48 °C)				3000 kPa (86,20 °C)				
Sat.	0,01215	407,11	426,54	1,7051	0,00930	410,15	428,75	1,6991	0,00528	411,83	427,67	1,6759
60	0,01239	409,49	429,32	1,7135	-	-	-	-	-	-	-	-
70	0,01345	420,37	441,89	1,7507	0,00958	413,37	432,53	1,7101	-	-	-	-
80	0,01438	430,72	453,72	1,7847	0,01055	425,20	446,30	1,7497	-	-	-	-
90	0,01522	440,79	465,15	1,8166	0,01137	436,20	458,95	1,7850	0,00575	418,93	436,19	1,6995
100	0,01601	450,71	476,33	1,8469	0,01211	446,78	471,00	1,8177	0,00665	433,77	453,73	1,7472
110	0,01676	460,57	487,39	1,8762	0,01279	457,12	482,69	1,8487	0,00734	446,48	468,50	1,7862

Diagrama de compressibilidade

Caso não haja dados experimentais P-v-T para uma substância em uma dada região, podemos usar o Diagrama Generalizado de Compressibilidade!

Os resultados assim obtidos são aproximados e particularmente aplicáveis a substâncias com moléculas simples.

$Z=0,67$

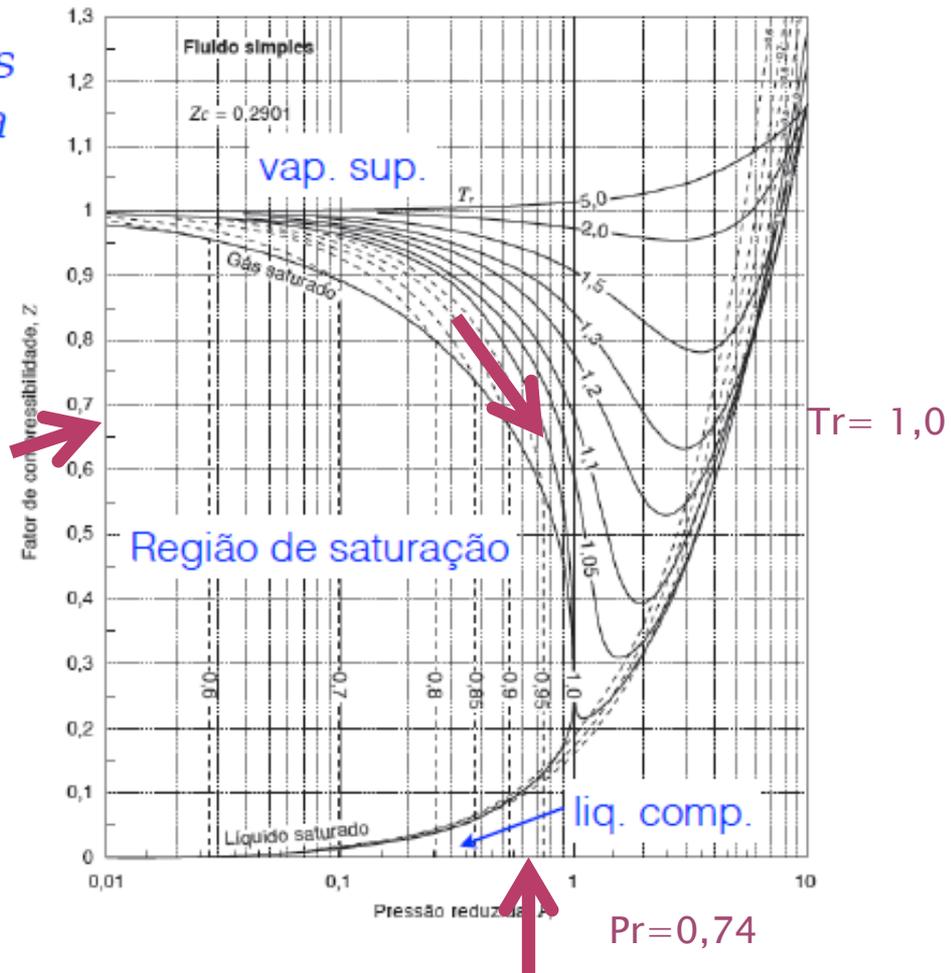


Figura D.1 - Fator de compressibilidade

EXEMPLO 2.11

Um recipiente de aço com volume interno igual a $0,1 \text{ m}^3$ contém propano a $15 \text{ }^\circ\text{C}$ e título 10%. Estime a massa total de propano armazenado e a pressão, utilizando o diagrama de compressibilidade generalizado.

Solução:

Precisamos conhecer a temperatura e a pressão reduzidas para que seja possível utilizar a Figura D.1. A Tabela A.2 indica que, para o propano, $P_c = 4\,250 \text{ kPa}$ e $T_c = 369,8 \text{ K}$. A temperatura reduzida pode ser calculada com a Equação 2.13

$$T_r = \frac{T}{T_c} = \frac{273,15 + 15}{369,8} = 0,7792 = 0,78$$

A Figura 2.21 mostra um esboço do diagrama da Figura D.1, indicando os estados saturados.

$$PV = mZRT$$

$$m = \frac{PV}{ZRT} = \frac{850 \times 0,1}{0,1145 \times 0,1886 \times 288,15} \frac{\text{kPa m}^3}{\text{kJ/kg}} = 13,66 \text{ kg}$$

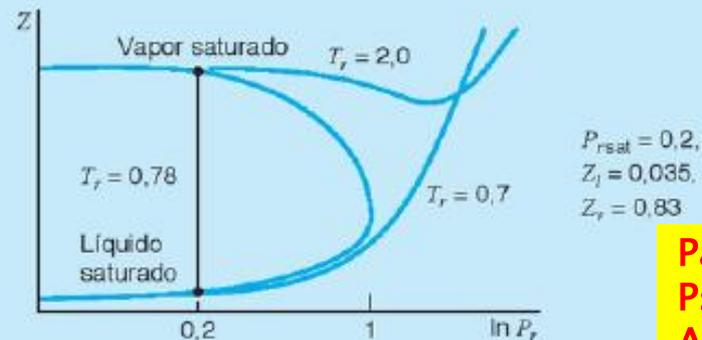


FIGURA 2.21

Diagrama para o Exemplo 2.11.

Para o estado bifásico, a pressão é igual à pressão de saturação:

$$P = P_{r \text{ sat}} \times P_c = 0,2 \times 4\,250 \text{ kPa} = 850 \text{ kPa}$$

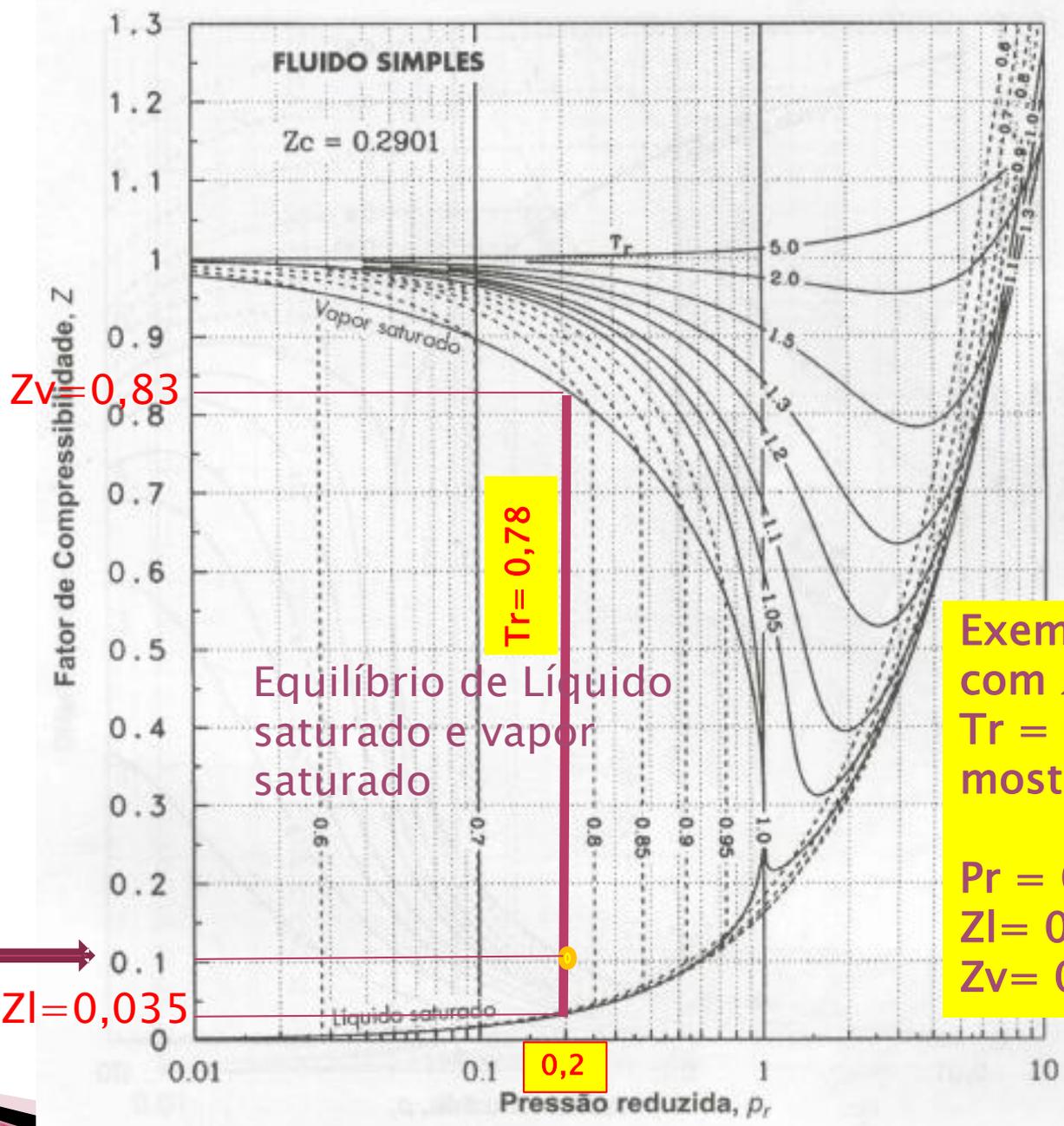
O fator de compressibilidade global pode ser calculado como na Equação 2.1 para v ,

$$Z = (1-x)Z_l + xZ_v = 0,9 \times 0,035 + 0,1 \times 0,83 = 0,1145$$

A constante dos gases, da Tabela A.5 é $R = 0,1886 \text{ kJ/kg.K}$, portanto, a lei dos gases é a Equação 2.12:

Para $T_{\text{sat}} = 15^\circ\text{C}$
 $P_{\text{sat}} = ?$
 A P_{sat} pode ser
 calculada pela P_r
 encontrada

Apêndice D



Equilíbrio de Líquido saturado e vapor saturado

Exemplo 2.11 com $x=0,1$ e $T_r = 0,78$ está mostrado, logo $P_r = 0,2$ e $Z_l = 0,035$ e $Z_v = 0,83$

Figura D.1 — Fator de compressibilidade para o fluido de Lee - Kesler simples

TABELA A.5

Propriedades de vários gases ideais a 25 °C e 100 kPa*

Gás	Fórmula química	Peso molecular	R kJ/kg K	ρ (kg/m ³)	C_{p0} kJ/kg K	C_{v0} kJ/kg K	$k = C_p / C_v$
Acetileno	C ₂ H ₂	26,038	0,3193	1,05	1,699	1,380	1,231
Água (vapor)	H ₂ O	18,015	0,4615	0,0231	1,872	1,410	1,327
Ar		28,97	0,287	1,169	1,004	0,717	1,400
Amônia	NH ₃	17,031	0,4882	0,694	2,130	1,642	1,297
Argônio	Ar	39,948	0,2081	1,613	0,520	0,312	1,667
Butano	C ₄ H ₁₀	58,124	0,1430	2,407	1,716	1,573	1,091
Dióxido de Carbono	CO ₂	44,01	0,1889	1,775	0,842	0,653	1,289
Monóxido de Carbono	CO	28,01	0,2968	1,13	1,041	0,744	1,400
Etano	C ₂ H ₆	30,07	0,2765	1,222	1,766	1,490	1,186
Etanol	C ₂ H ₅ OH	46,069	0,1805	1,883	1,427	1,246	1,145
Etileno	C ₂ H ₄	28,054	0,2964	1,138	1,548	1,252	1,237
Hélio	He	4,003	2,0771	0,1615	5,193	3,116	1,667
Hidrogênio	H ₂	2,016	4,1243	0,0813	14,209	10,085	1,409
Metano	CH ₄	16,043	0,5183	0,648	2,254	1,736	1,299
Metanol	CH ₃ OH	32,042	0,2595	1,31	1,405	1,146	1,227
Neônio	Ne	20,183	0,4120	0,814	1,03	0,618	1,667
Nitrogênio	N ₂	28,013	0,2968	1,13	1,042	0,745	1,400
Óxido nítrico	NO	30,006	0,2771	1,21	0,993	0,716	1,387
Óxido nitroso	N ₂ O	44,013	0,1889	1,775	0,879	0,690	1,274
n-Octano	C ₈ H ₁₈	114,23	0,0727	0,092	1,7113	1,638	1,044
Oxigênio	O ₂	31,999	0,2598	1,292	0,9216	0,662	1,393
Propano	C ₃ H ₈	44,094	0,1886	1,808	1,679	1,490	1,126

Para a próxima aula, resolva o Exemplo 2.9

EXEMPLO 2.9

É razoável admitir o comportamento de gás ideal em cada um dos seguintes estados?

- a.** Nitrogênio a 20 °C , $1,0\text{ MPa}$;
- b.** Dióxido de carbono a 20 °C , $1,0\text{ MPa}$ e
- c.** Amônia a 20 °C , $1,0\text{ MPa}$.

Use sempre estes diagramas para descobrir o estado termodinâmico da substância pura

