

Propriedades de Uma Substância Pura

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
DE/FEM/UNICAMP

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

1

Substância Pura

- Substância pura é a aquela que tem composição química invariável e homogênea;
- Pode existir em uma ou mais fases, mas com a mesma composição química em todas as fases;
- Uma mistura de diversos estados de água é considerada como sendo uma substância pura:
– líquido-gás, sólido-líquido e sólido-gás;
- Uma mistura de ar líquido e gasoso não pode ser considerada como pura;

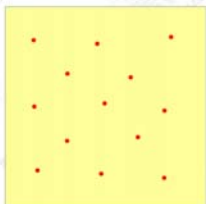
17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

2

In a crystalline solid, molecules vibrate around their mean positions.

- Solid
- Liquid
- Gas/Vapor
- Liq-Vapor



17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

3

Equilíbrio de Fases (Vapor-líquido-Sólido)

- Como ocorre a transformação de fase de uma Substância Pura?

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

4

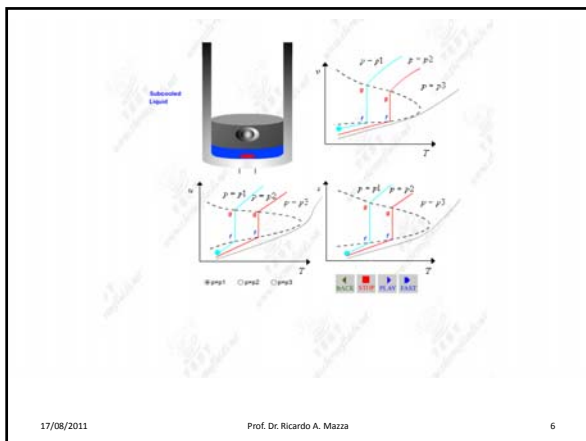
Processo de aquecimento de água:

- 1 Fase - Aquecimento da massa de líquido:
 - A temperatura sobe até o líquido começar a evaporar;
 - O volume específico aumenta ligeiramente;
- 2 Fase - Transformação de fase:
 - A temperatura permanece constante enquanto o líquido se transforma em vapor;
 - O volume aumenta significativamente;
- 3 Fase - Aquecimento de vapor:
 - Há o aumento da temperatura e do volume durante essa fase;

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

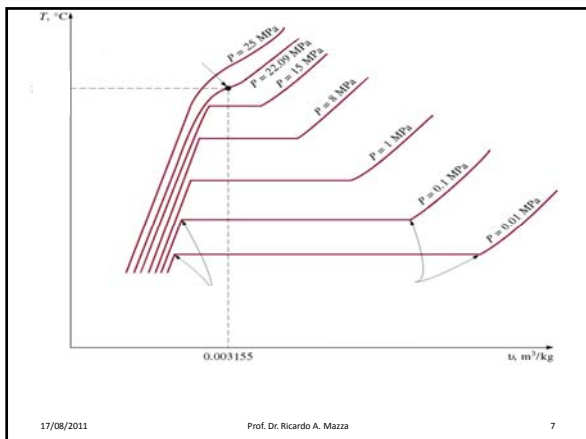
5



17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

6



17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

7

Terminologias

- Durante todos esses processos há terminologias específicas para cada parte do processo;
- Para cada terminologia há características importantes que as definem;

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

8

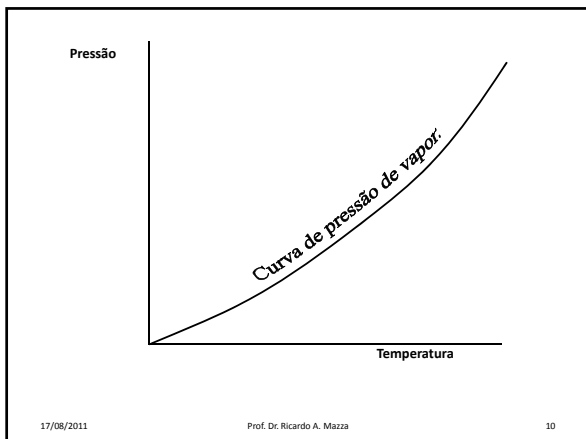
Pressão de vapor

- É definida pela relação entre a temperatura e a pressão de saturação;
- Define a condição em que o sistema começa a mudar da fase líquida para vapor;

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

9



Região de Saturação

- Nesta região há um mistura de líquido e vapor;
- As propriedades termodinâmicas são determinadas a partir das frações de líquido e vapor;
- Quem define esta fração é uma propriedade intensiva chamada título (x), que é definido por:

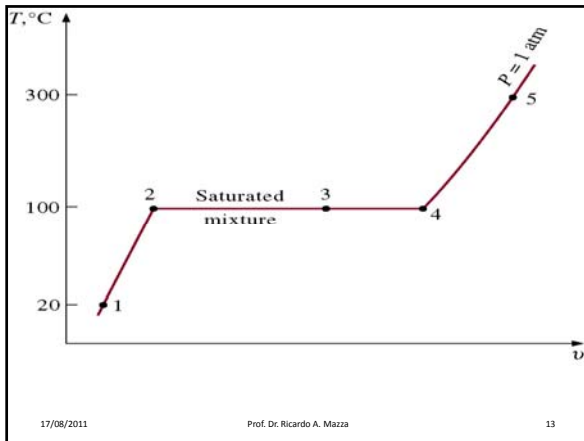
$$x = \frac{m_v}{m_t}$$

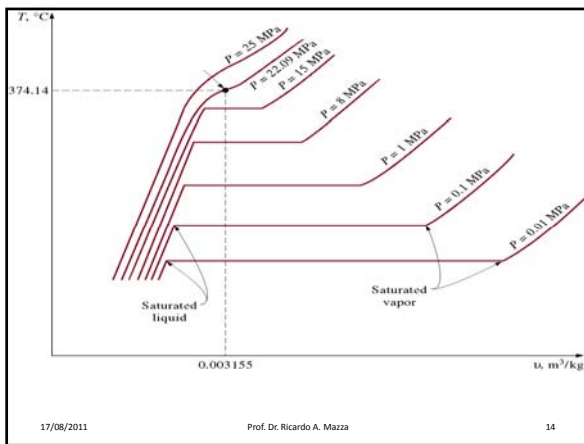
17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 11

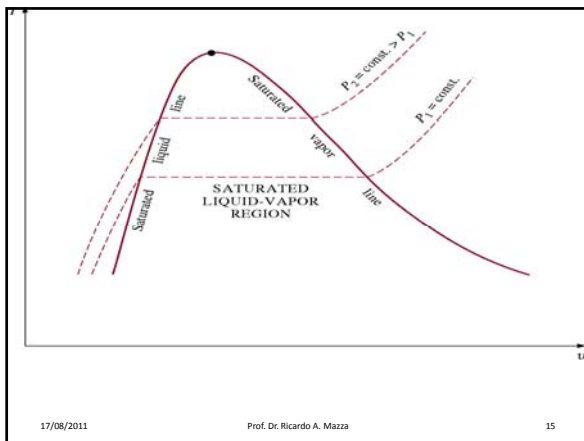
Nomenclatura da região de saturação

- É quando há uma mudança de fase da substância;
- Todas as propriedades nessa região são seguidas do termo saturação:
 - Temperatura de saturação, pressão de saturação, etc;
- Além da saturação líquido-gás, a outras como:
 - Sólido-líquido;
 - Sólido-gás;
- Na termodinâmica, trataremos mais da saturação líquido-gás;

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 12







Ponto Crítico

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

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

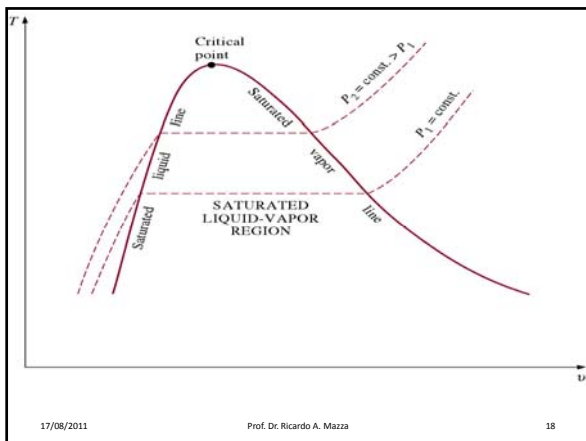
16

	Temperatura Crítica [°C]	Pressão Crítica [atm]	Volume Crítico [m ³ /kg]
Água	374	225.4	0.0032
Dióxido de Carbono	31	75.3	0.0022
Oxigênio	-118	51.7	0.0023
Hidrogênio	-240	13.2	0.0333

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

17



17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

18

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 19

Ponto Triplo

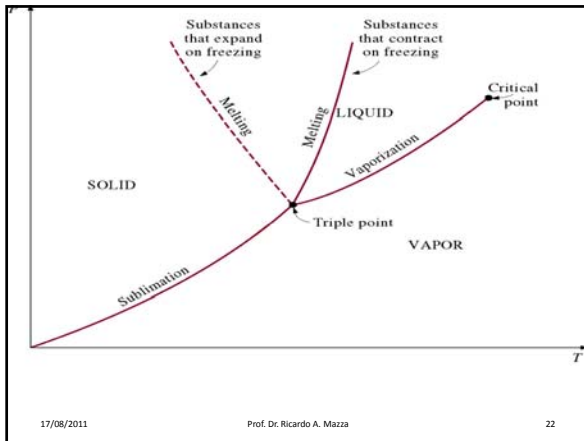
- É definido como sendo o estado no qual as três fases podem estar presentes em equilíbrio;
- Cada substância tem um ponto triplo;
- A tabela a seguir mostra o ponto triplo para algumas substâncias;

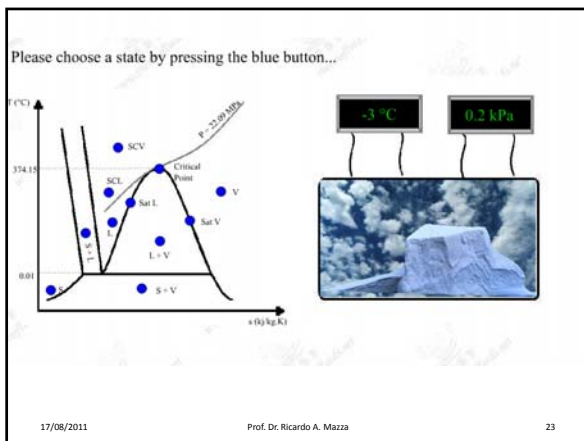
17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 20

Dados de alguns pontos triplos.

Substância	Temperatura [°C]	Pressão [atm]
Hidrogênio (normal)	-259	0.071
Nitrogênio	-210	0.1237
Oxigênio	-219	0.00150
Merúrio	-3.9	0.00000013
Água	0.01	0.00603
Zinco	419	0.05
Prata	960	0.0001
Cobre	1083	0.00000078

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 21

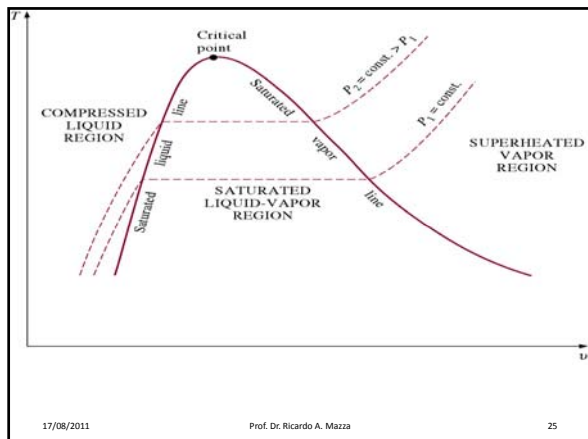




Propriedades de uma substância pura

- Para se saber o estado de uma substância pura sem movimento, ação da gravidade e efeitos de superfície, basta conhecer duas propriedades independentes;
 - Por exemplo, se a temperatura e o volume específico do vapor superaquecido for conhecido, o estado estará definido.
 - Na saturação, pressão e temperatura não são propriedades independentes;
 - Neste caso, pressão e volume específico ou pressão e título serão necessários para especificar o estado na saturação de uma substância pura.

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 24



Determinação da propriedades gases perfeitos

- A partir de observações experimentais foi estabelecido que as propriedades de um gás perfeito pode ser obtida como:

$$P \cdot v = R \cdot T$$

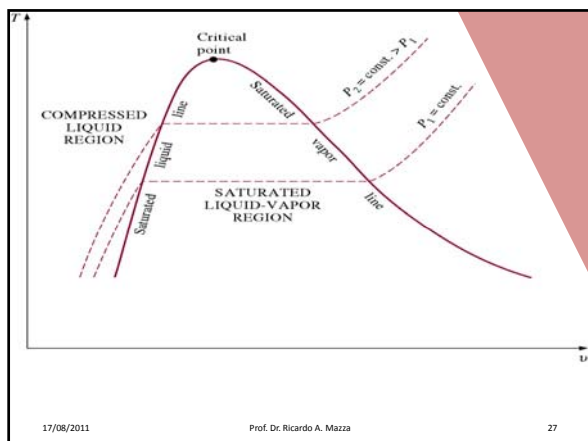
onde P , v , R e T é a pressão, volume específico, constante do gás em particular e temperatura (absoluta), respectivamente;

- Esta equação é conhecida como equação de estado para os gases perfeitos.

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

26



Experiment at Atmospheric Pressure

● Low Pressure ○ High Pressure

◀ BACK STOP ▶ PLAY FAST ▶

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 28

Calores específicos de gás ideal para diversos gases comuns
(a) A 300 K

Gás	Fórmula	Constante do gás, \bar{R} kJ/kg · K	c_p kJ/kg · K	c_v kJ/kg · K	γ
Ar	—	0,2870	1,005	0,718	1,400
Argônio	Ar	0,2081	0,5203	0,3122	1,667
Butano	C ₄ H ₁₀	0,1433	1,7164	1,5734	1,091
Dióxido de carbono	CO ₂	0,1889	0,846	0,657	1,289
Monóxido de carbono	CO	0,2968	1,040	0,744	1,400
Etano	C ₂ H ₆	0,2765	1,7662	1,4897	1,186
Etileno	C ₂ H ₄	0,2964	1,5482	1,2518	1,237
Hélio	He	2,0769	5,1926	3,1156	1,667
Hidrogênio	H ₂	4,1240	14,307	10,183	1,405
Metano	CH ₄	0,5182	2,2537	1,7354	1,299
Néon	Ne	0,4119	1,0299	0,6179	1,667
Nitrogênio	N ₂	0,2968	1,039	0,743	1,400
Octano	C ₈ H ₁₈	0,0729	1,7113	1,6385	1,044
Oxigênio	O ₂	0,2598	0,918	0,658	1,395
Propano	C ₃ H ₈	0,1885	1,6794	1,4909	1,126
Vapor d'água	H ₂ O	0,4615	1,8723	1,4108	1,327

Note: A unidade kJ/kg · K é equivalente a kJ/kg · °C.
Fonte: Kyle, B. G., Chemical and Process Thermodynamics 3/E by © 2000. Adaptado com a permissão de Pearson Education, Inc., Upper Saddle River, NJ.

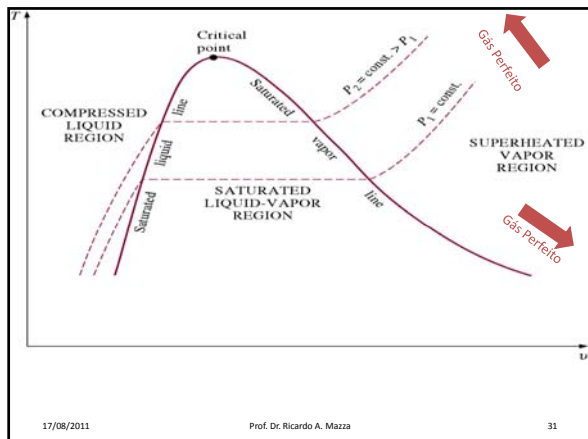
$$\bar{R} = 8,314 \frac{\text{kJ}}{\text{kmol} \cdot \text{K}}, \text{ onde } R = \frac{\bar{R}}{M}$$

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 29

Quando uma gás pode ser considerado perfeito?

- **Em densidades baixas, os gases ou vapores se comportam de maneira próxima a de gases perfeitos;**
 - *Densidades altas, o comportamento desvia-se da equação de gases perfeitos e outro procedimento deve ser usado;*
- **Na prática pode assumir gás perfeito quando:**
 - *A pressões é abaixo da atmosférica;*
 - *Quando a temperatura é superior ao dobro da temperatura crítica,*
 - **Limitado a pressões de até 69 atms;**

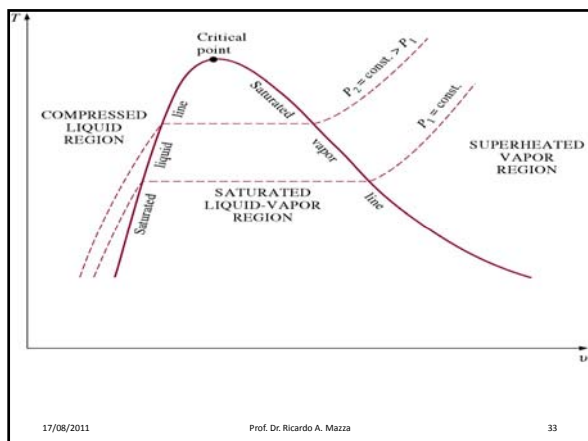
17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 30



Quando não é gás perfeito?

• Tabelas termodinâmicas

- *A grande maioria das tabelas termodinâmicas é apresentada no mesmo formato, sendo que há tabelas termodinâmicas para uma grande quantidade de substâncias;*
- *Várias versões diferentes de tabelas termodinâmicas já foram publicadas, sendo que a maioria dos livros de termodinâmica apresentando uma ou mais versões;*
- *Neste texto usaremos as tabelas para água devido à larga aplicação em processos industriais e, uma vez compreendida as tabelas de água, outras tabelas poderão ser usadas imediatamente.*

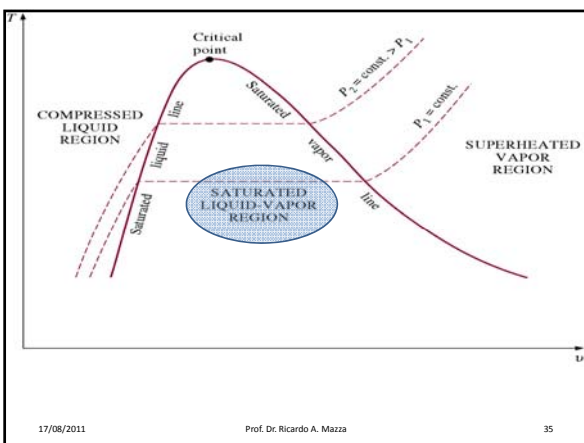


Região de Saturação

- As propriedades termodinâmicas são determinadas a partir das do líquido e do vapor saturado;
 - As propriedades para esses pontos são obtidos nas tabelas;
 - São representados pelo subscrito l e v, respectivamente;
 - O subscrito lv representa a diferença entre a propriedade para a saturação na fase líquida e de vapor;
- Além dessas propriedades é necessário conhecer o título da mistura (x);
- Com essas informações, pode-se calcular as propriedades como:

$$v = xv_v + (1-x)v_l \text{ ou } v = v_l + xv_{lv} \text{ ou } v = v_v - (1-x)v_{lv}$$

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 34



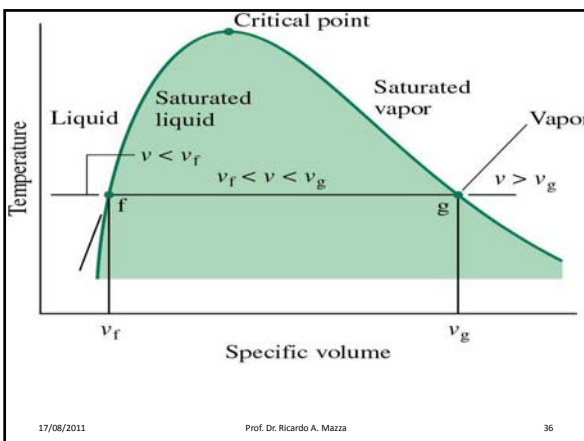


Tabela de propriedades termodinâmicas do vapor d'água – vapor saturado.

Temp. [°C]	Pressão [kPa]	Volume Específico [m³/kg]		Energia Interna [kJ/kg]				Entalpia [kJ/kg]		
		LS	VS	LS	EVAP.	VS	LS	EVAP.	VS	
		v_{li}	v_{lv}	u_{li}	u_{lv}	u_{lv}	h_{li}	h_{lv}	h_{lv}	
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.3	
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 37

Tabela de propriedades termodinâmicas do vapor d'água – vapor saturado.

Temp. [°C]	Pressão [kPa]	Volume Específico [m³/kg]		Energia Interna [kJ/kg]				Entalpia [kJ/kg]		
		LS	VS	LS	EVAP.	VS	LS	EVAP.	VS	
		v_{li}	v_{lv}	u_{li}	u_{lv}	u_{lv}	h_{li}	h_{lv}	h_{lv}	
0.01	0.6113	0.001000	206.14	0.00	2375.3	2375.3	0.01	2501.3	2501.3	
25	3.169	0.001003	43.36	104.88	2304.9	2409.8	104.89	2442.3	2547.2	
95	84.55	0.001040	1.982	397.88	2102.7	2500.6	397.96	2270.2	2668.1	

- As propriedades na região de saturação podem ser apresentadas na tabelas em função da temperatura e da pressão;
- A tabela anterior apresenta as propriedades em função da temperatura;

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 38

Não esqueçam!!!!

- A partir desta aula, as tabelas poderão ser necessárias;
- Por isso, vocês deverão trazer as tabelas todas as aulas – *Sem exceção*;
- Inclusive, as tabelas serão necessárias as provas.

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 39

FIM !

17/08/2011 40 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

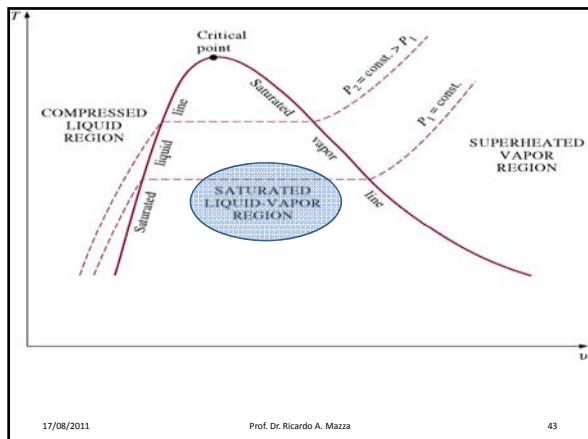
**Propriedades de Uma
Substância Pura**

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

17/08/2011 41 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

Região de Saturação

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 42

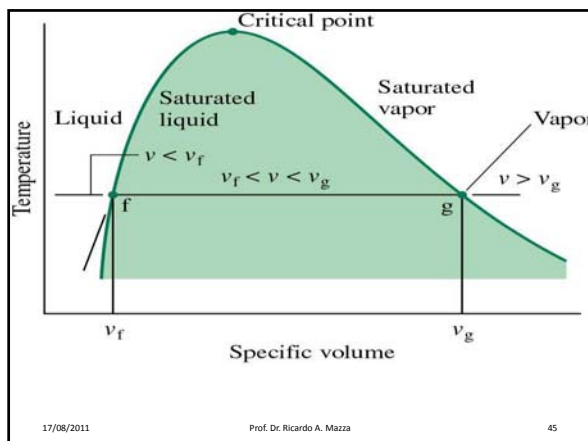


Região de Saturação

- As propriedades termodinâmicas são determinadas a partir das do líquido e do vapor saturado;
 - As propriedades para esses pontos são obtidos nas tabelas;
 - São representados pelo subscrito *l* e *v*, respectivamente;
 - O subscrito *lv* representa a diferença entre a propriedade para a saturação na fase líquida e de vapor;
- Além dessas propriedades é necessário conhecer o título da mistura (*x*);
- Com essas informações, pode-se calcular as propriedades como:

$$v = xv_v + (1-x)v_l \text{ ou } v = v_l + xv_{lv} \text{ ou } v = v_v - (1-x)v_{lv}$$

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 44



Desafio

- Um tanque rígido contém inicialmente 1,4 kg de uma mistura saturada de água a 200C. Nesse estado, 25% do volume são ocupados pelo líquido e o restante pelo vapor. Calor é adicionado à água até que o tanque contenha somente vapor saturado. Determine: a) o volume do tanque; b) a temperatura e a pressão final.

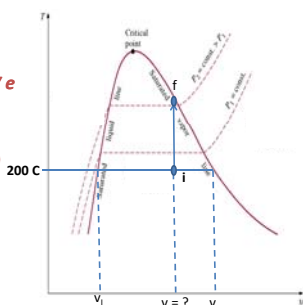
17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

49

Solução

- **Dados:**
 - $T = 200C$
 - Saturação ($V_l = 0,25 V$ e $V_v = 0,75 V$);
 - $m = 1,4 \text{ kg}$;
 - $x = 1$ (vapor saturado)



17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

50

Solução

- Da tabela de temperatura:
 - $v_l = 0,001156 \text{ m}^3/\text{kg}$ e $v_v = 0,12736 \text{ m}^3/\text{kg}$;
- Como há 1,4 kg de água, podemos escrever que:

$$m = m_l + m_v$$

e

$$m_l = \frac{V_l}{v_l} = \frac{0,25V}{v_l} \text{ e } m_v = \frac{V_v}{v_v} = \frac{0,75V}{v_v}$$

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

51

Solução

$$m = \left(\frac{0,25}{v_l} + \frac{0,75}{v_v} \right) V \Rightarrow V = \frac{m}{\left(\frac{0,25}{v_l} + \frac{0,75}{v_v} \right)}$$

$$V = \frac{1,4}{\frac{0,25}{0,001156} + \frac{0,75}{0,12736}} \Rightarrow V = 6,3 \times 10^{-3} \text{ m}^3$$

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 52

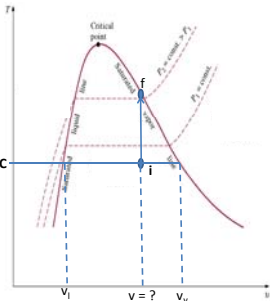
Solução

- **Processo a volume constante:**

$$v = \frac{V}{m} = \frac{6,3 \times 10^{-3}}{1,4}$$

$$V = 0,0045 \text{ m}^3/\text{kg}$$

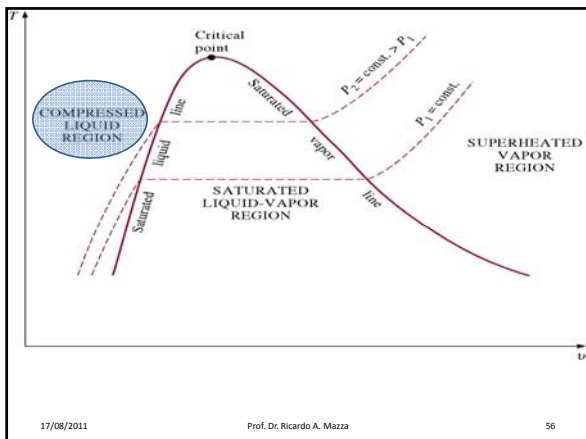
- **Na tabela de saturação obtém-se que:**
 - $T = 371,1 \text{ C}$
 - $P = 21,32 \text{ MPa}$



17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 53

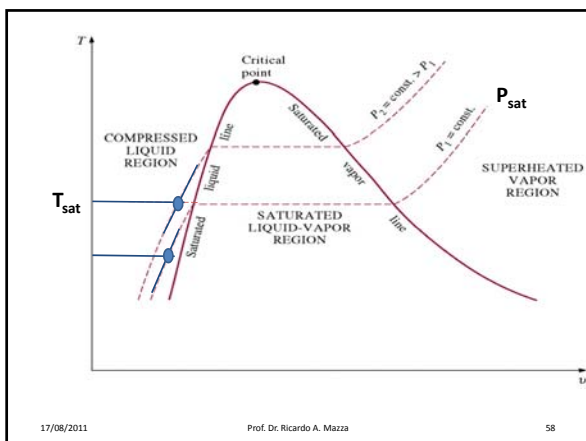
Líquido Comprimido

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 55



Região de Líquido Comprimido

- É caracterizada pelo temperatura ser menor que a temperatura de saturação para a pressão em que se encontra o sistema;
- É caracterizada pela pressão ser maior que a pressão de saturação para a temperatura em que se encontra o sistema;



Região de Líquido Comprimido

- Nem todas as substâncias têm tabelas para essa região;
 - *Nesses casos, deve-se usar os dados do líquido saturado à mesma temperatura;*
 - *Quando há tabelas para essa região, as propriedades são tabeladas em função da temperatura e da pressão;*
- Como nessa região toda substância se encontra na fase líquida, não há sentido falar em título;
 - *As propriedades são obtidas diretamente na tabela;*

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

59

Tabela de propriedades termodinâmicas do vapor d'água – líquido comprimido.

T [°C]	P = 5 MPa			P = 15 MPa			P = 30 MPa		
	v	u	h	v	u	h	v	u	h
Sat.	0.0012859	1147.8	1154.2	0.0016581	1585.6	1610.5			
60	0.0010149	250.23	255.30	0.0010105	248.51	263.67	0.0010042	246.06	276.19
220	0.0011866	938.4	944.4	0.0011748	929.9	947.5	0.0011590	918.3	953.1

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

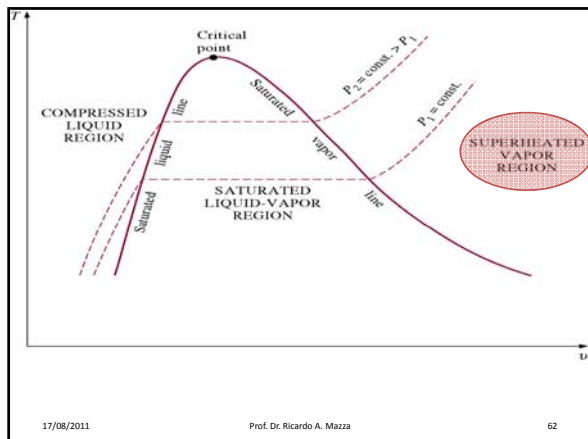
60

Vapor Superaquecido

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

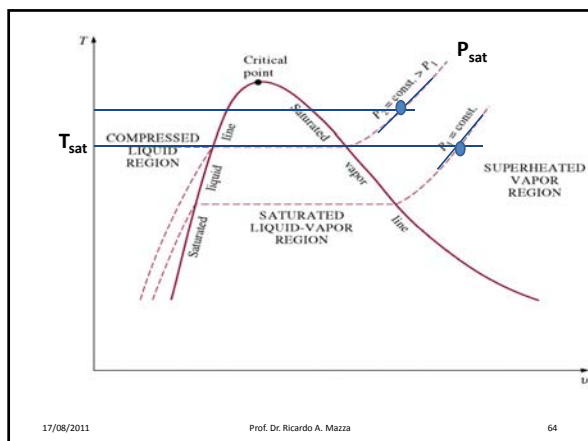
61



Vapor Superaquecido

- A temperatura em que o sistema se encontra é maior que a temperatura de saturação na pressão do sistema;
- A pressão em que o sistema se encontra é menor que a pressão de saturação para a temperatura do sistema;

17/08/2011 Prof. Dr. Ricardo A. Mazza 63



Vapor Superaquecido

- Toda a massa do sistema se encontra na forma de vapor;
 – Não tem sentido se falar em título;
- As propriedades da região são tabeladas em função da pressão e da temperatura;
- A temperatura tabelada começa na temperatura de saturação;

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

65

Tabela de propriedades termodinâmicas do vapor d'água – vapor superaquecido.

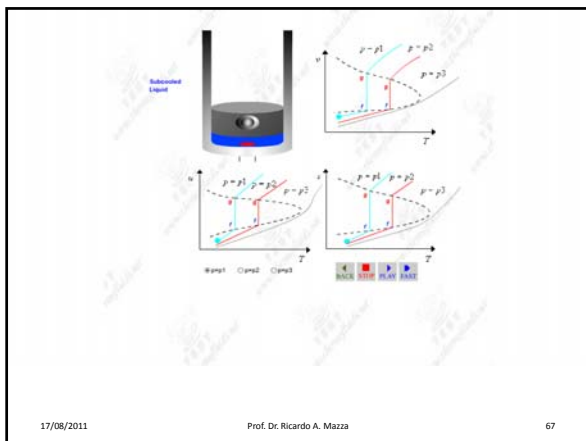
T [°C]	P = 0.010 MPa			P = 0.050 MPa			P = 0.20 MPa		
	v	u	h	v	u	h	v	u	h
Sat.	14.674	2437.4	2584.7	3.240	2483.9	2645.9	0.8857	2529.5	2706.7
50	14.869	2443.9	2592.6						
150	19.512	2587.9	2783.0	3.889	2585.6	2780.1	0.9596	2576.9	2768.8

T [°C]	P = 1.0 MPa			P = 5.0 MPa			P = 200 MPa		
	v	u	h	v	u	h	v	u	h
Sat.	0.19444	2583.6	2778.1	0.03944	2597.1	2794.3	0.005834	2293.0	2409.7
200	0.2060	2621.9	2827.9						
350	0.2825	2875.2	3157.7	0.05194	2808.7	3068.4			

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

66



17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

67

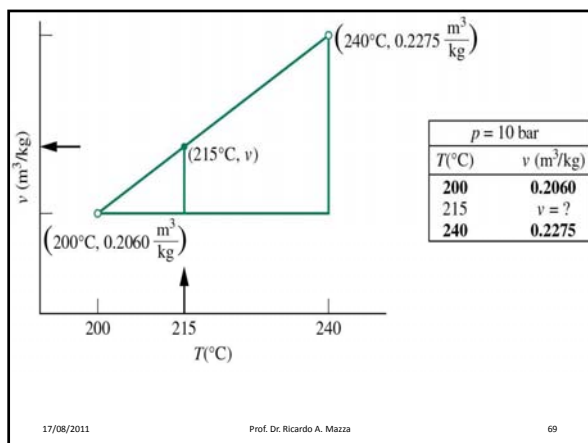
Interpolação

- Quando um dado estado termodinâmico não é dado na tabela, deve-se realizar uma interpolação para se obter as propriedades no estado desejado;
 - A interpolação nada mais é que fazer passar uma reta por dois estados da tabela para obter as propriedades em um estado intermediário;
- A maioria das calculadoras científicas fazem isso;

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

68



17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

69

Superfícies Termodinâmicas

- Sintetizam as tabelas termodinâmicas;
- Essas superfícies correlacionam uma propriedade em função da temperatura e do pressão;
- Para o caso específico do volume específico, podem ser de dois tipos:
 - Superfícies para substâncias que se **expandem** na solidificação (água);
 - Superfícies para substâncias que se **contraem** na solidificação (aço);

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

71

Projeções da Superfícies Termodinâmicas

- As projeções da superfície termodinâmicas no plano pressão-temperatura e **pressão-volume** já foi apresentado;
- Se representar a saturação sólido-líquido-vapor, também são diferentes para substâncias que se **expandem e se contraem**;

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

72

Considerações Finais

- A superfície termodinâmica tem a vantagem de permitir visualizar a evolução do processo, mas não permite obter dados precisos das propriedades;
- Nas tabelas ocorre o contrário;
- O ideal é usar as projeções para visualizar os processos e utilizar as tabelas para obter os valores das propriedades;
- As tabelas apresenta os dados na forma discreta;
 - *Se não houver os dados para um determinada estado, será necessário fazer uma interpolação;*

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

73

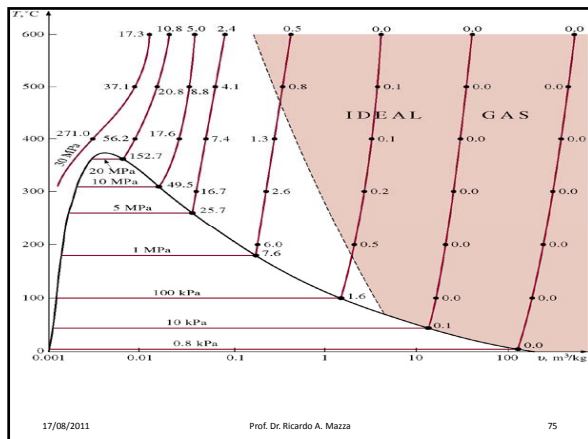
Tabela x Lei dos gases perfeitos

- Qual seria o erro se usasse a equação para gases perfeitos para calcular os valores para as propriedades para todas as substâncias pura?
 - *Depende da pressão e da temperatura do sistema;*
 - *Quanto maior a temperatura, menor o erro;*
 - *Quanto menor a pressão, menor o erro;*

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

74

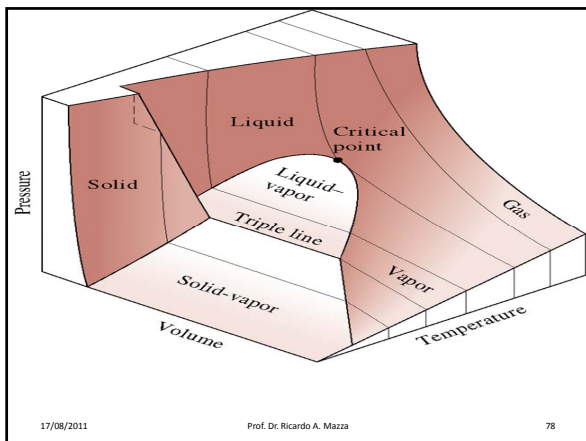


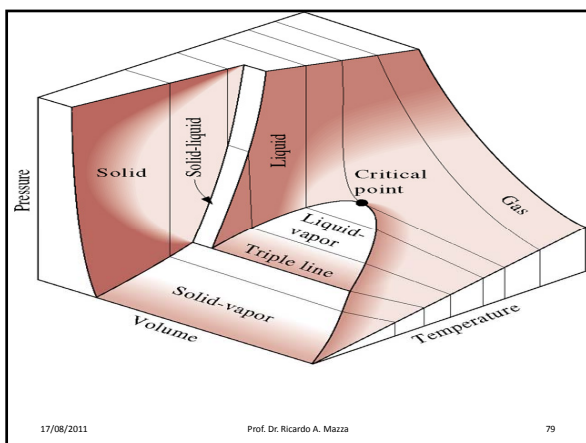
Fator de Compressibilidade

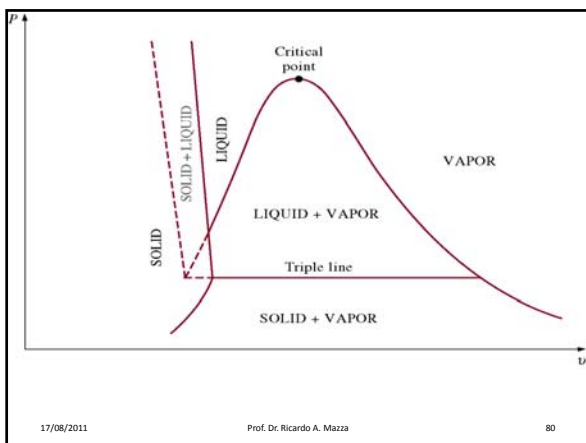
- Há uma outra forma de se determinar as propriedades de um gás, que é usar o fator de compressibilidade (Z);
- Esse fator é expresso na forma de gráfico para uma grande quantidade de gases;
 - *É necessário saber o as pressões e temperaturas reduzidas para se determinar Z*
- Com Z calcula-se as propriedades como:

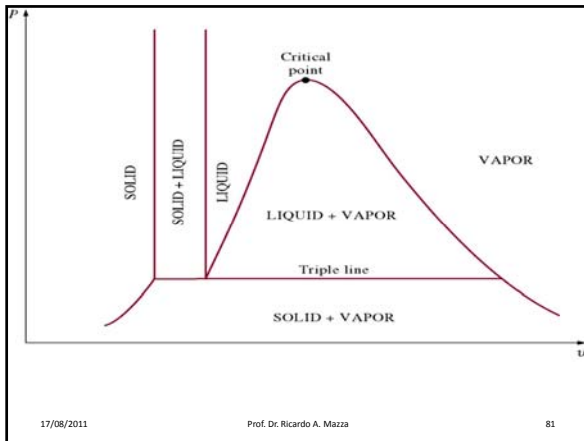
$$P.v = Z.R.T$$

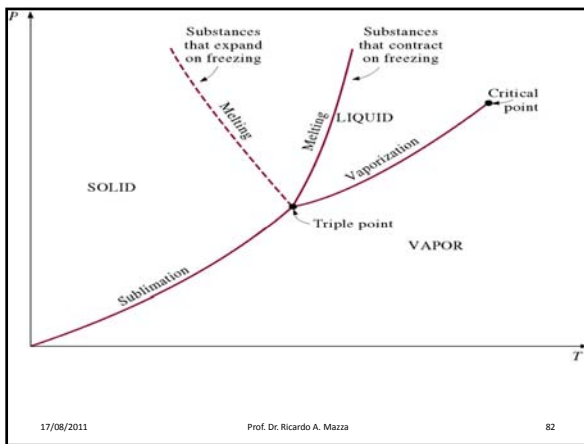
FIM !

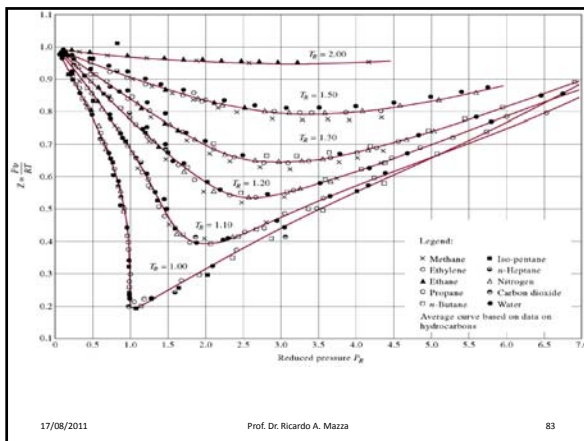












Temperatura e pressão reduzida

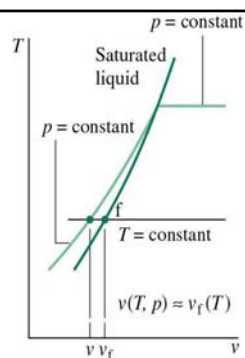
- Essas grandezas são obtidas com o auxílio da temperatura e pressão crítica;
- Podem ser determinadas como:

$$P_r = \frac{P}{P_{cr}} \quad e \quad T_r = \frac{T}{T_{cr}}$$

17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

84



17/08/2011

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

85

Propriedades de Uma Substância Pura

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza
2PFG/DE/FEM/UNICAMP

17/08/2011

86

Prof. Dr. Ricardo A. Mazza

