

TERMODINÂMICA APLICADA



CAPÍTULO 2

PROPRIEDADES DAS SUBSTÂNCIAS PURAS

SUMÁRIO



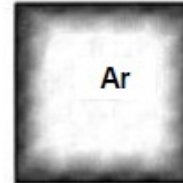
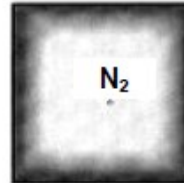
Neste capítulo o conceito de substância pura é introduzido e as várias fases, bem como as propriedades físicas dos processos de mudança da fase, serão discutidos.

As propriedades dos diagramas P-v-T de substâncias puras são ilustrados.

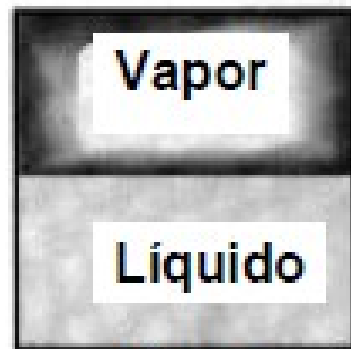
O uso das Tabelas é explicado e o conceito hipotético de "Gás ideal" e a equação de estado de gás ideal são discutidos.

Finalmente, algumas das equações de estado mais conhecidas são apresentadas.

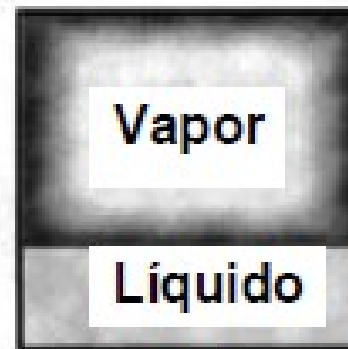
Substâncias Puras



O azoto e o ar no estado gasoso são substâncias puras



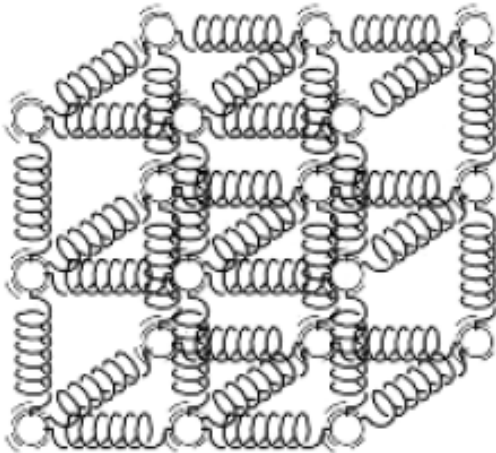
Água



Ar

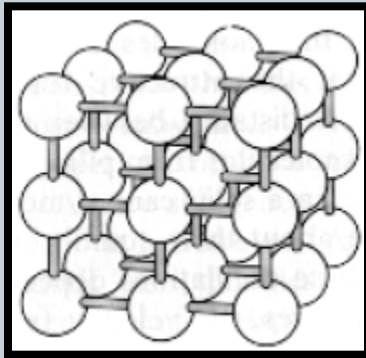
A mistura de água na fase líquida e gasosa é uma substância pura, no entanto, a mistura de ar na fase líquida e gasosa já não é uma substância pura pois não apresentam a mesma composição química

Fases de uma Substância Pura

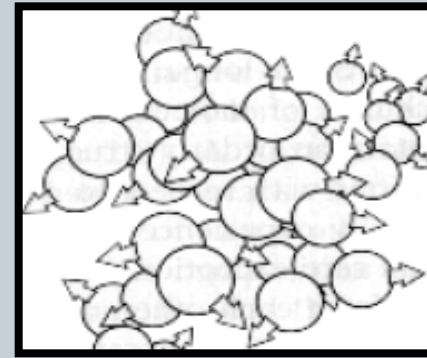


Num sólido as moléculas são mantidas nas suas posições devido à existência de forças intermoleculares. As forças repulsivas e atractivas entre as moléculas tendem a mante-las a uma distância constante

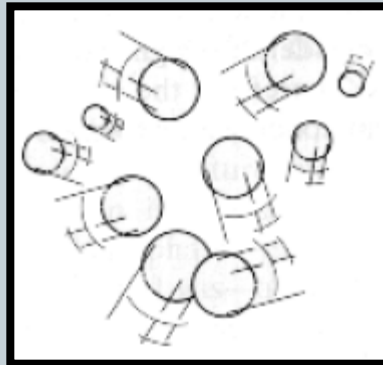
Distribuição dos átomos na diferentes fases



Sólidos



Líquidos



Gases

Mudança de fases de substâncias puras

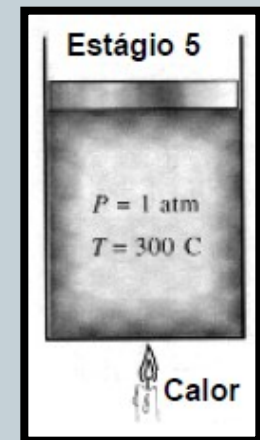
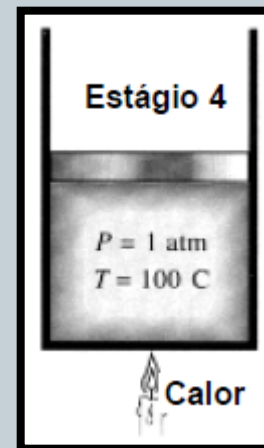
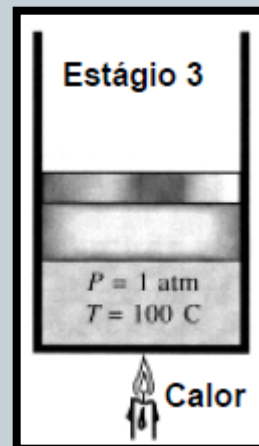
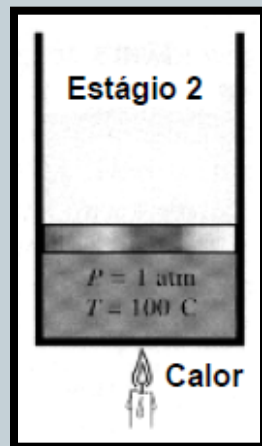
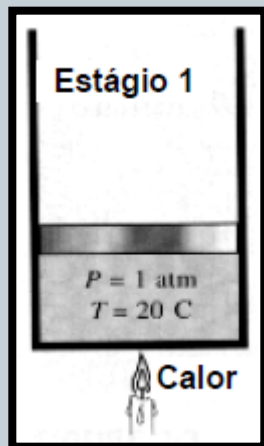
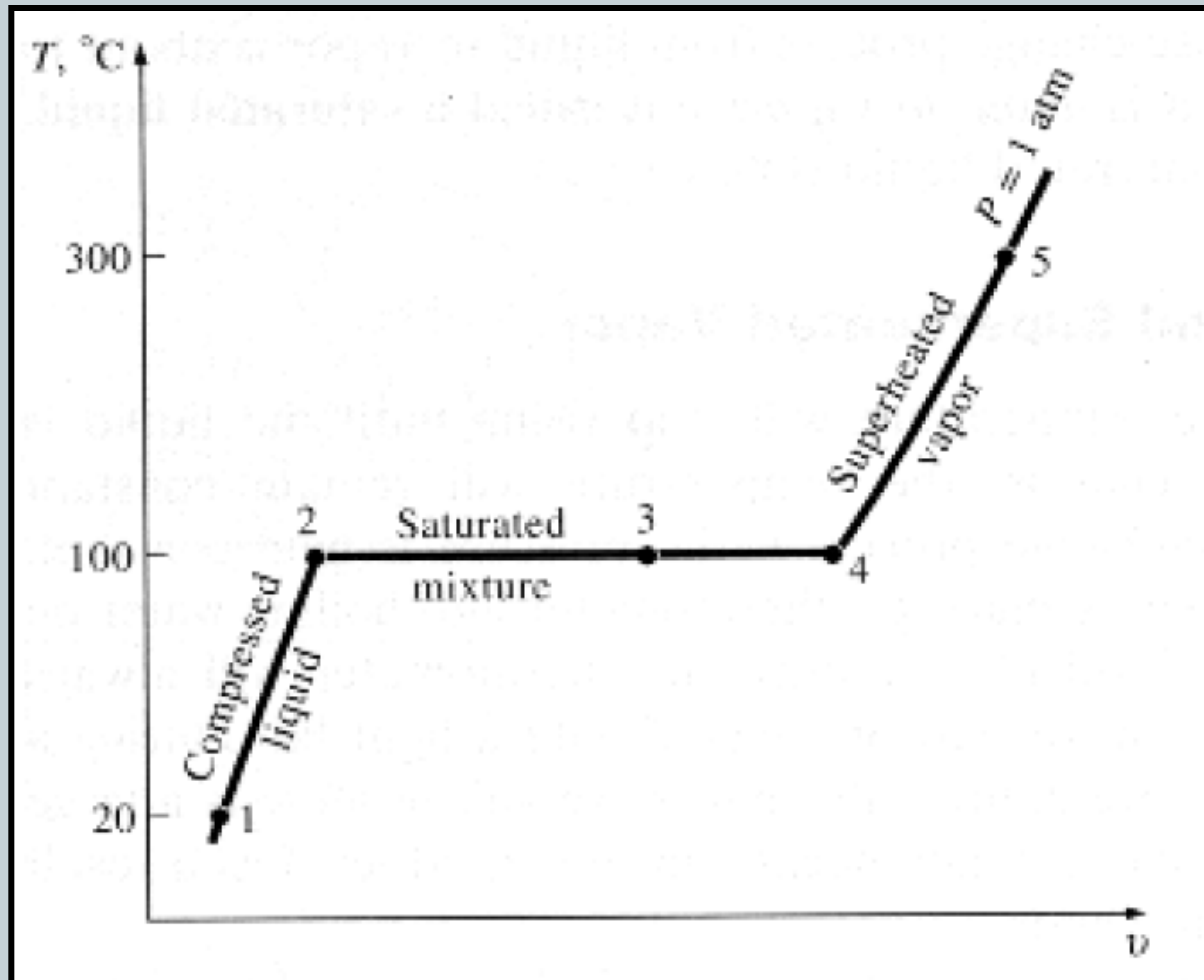
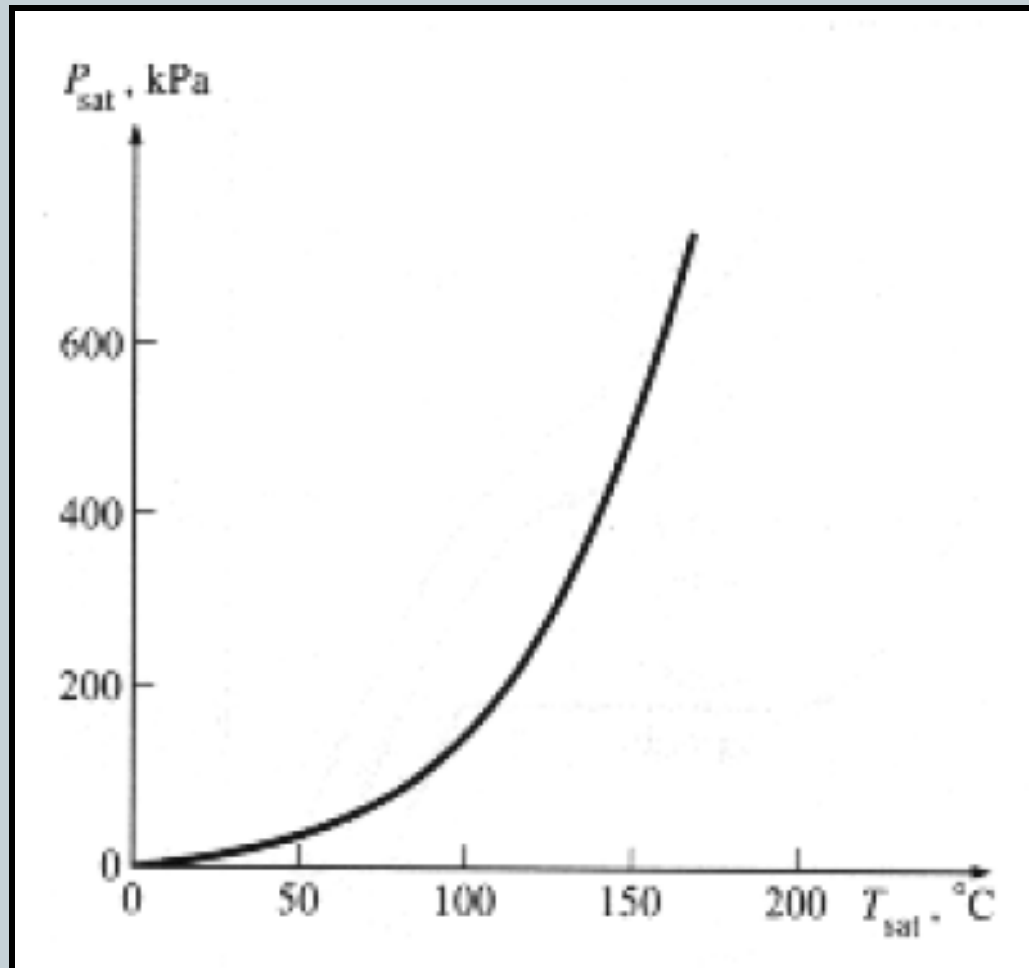


Diagrama T-v para o processo de aquecimento da água a pressão constante



Temperatura de Saturação e Pressão de Saturação

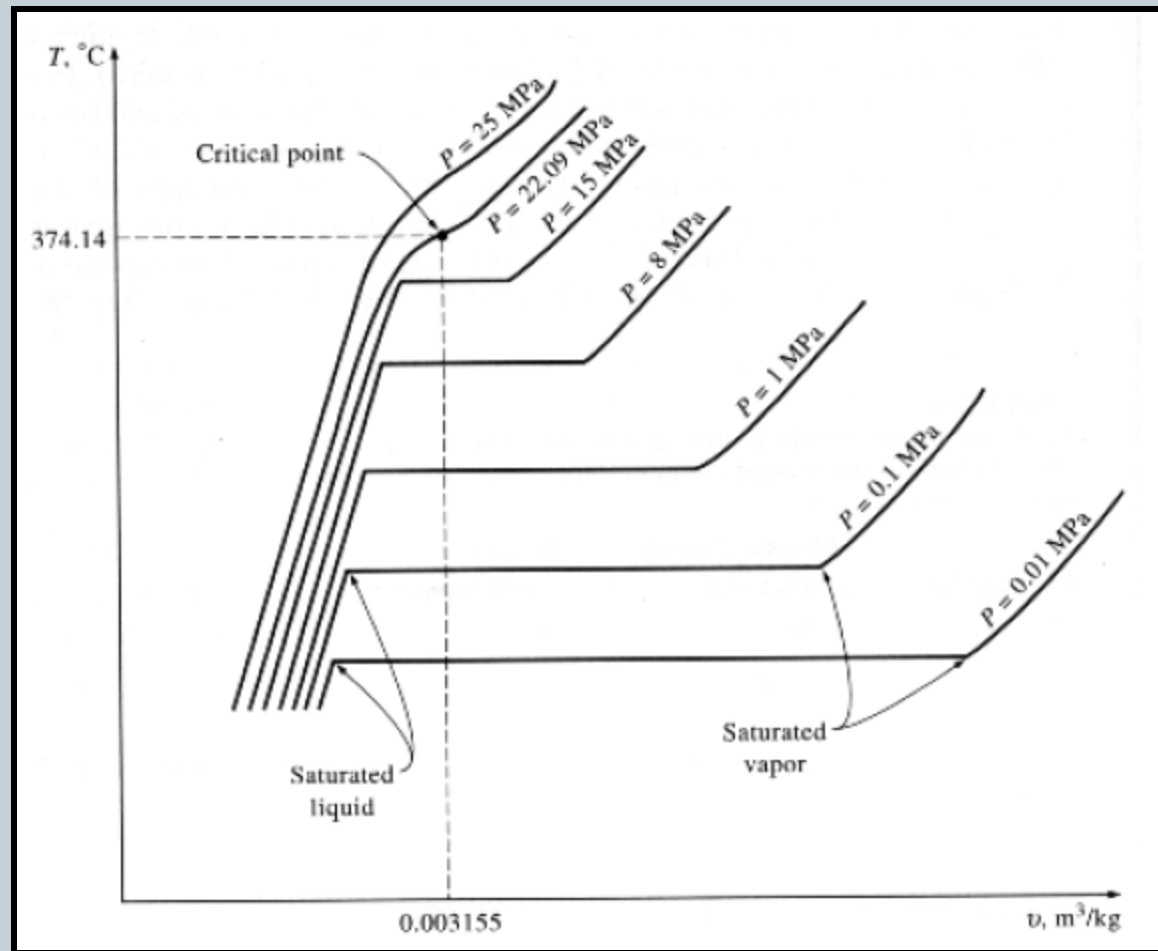


Relação
 $P_{\text{sat}}/T_{\text{sat}}$

Variação da Pressão Atmosférica e da Temperatura de Ebulição da Água com a Altitude

Altitude (m)	Pressão atmosférica (kPa)	Temperatura de ebulição (°C)
0	101,33	100,0
1.000	89,55	96,3
2.000	79,50	93,2
5.000	54,05	83,0
10.000	26,50	66,2
20.000	5,53	34,5

Diagrama T-v para a água (substância pura) a várias pressões



A pressões supercríticas ($P > P_{cr}$) não há uma fase distinta de mudança de fase

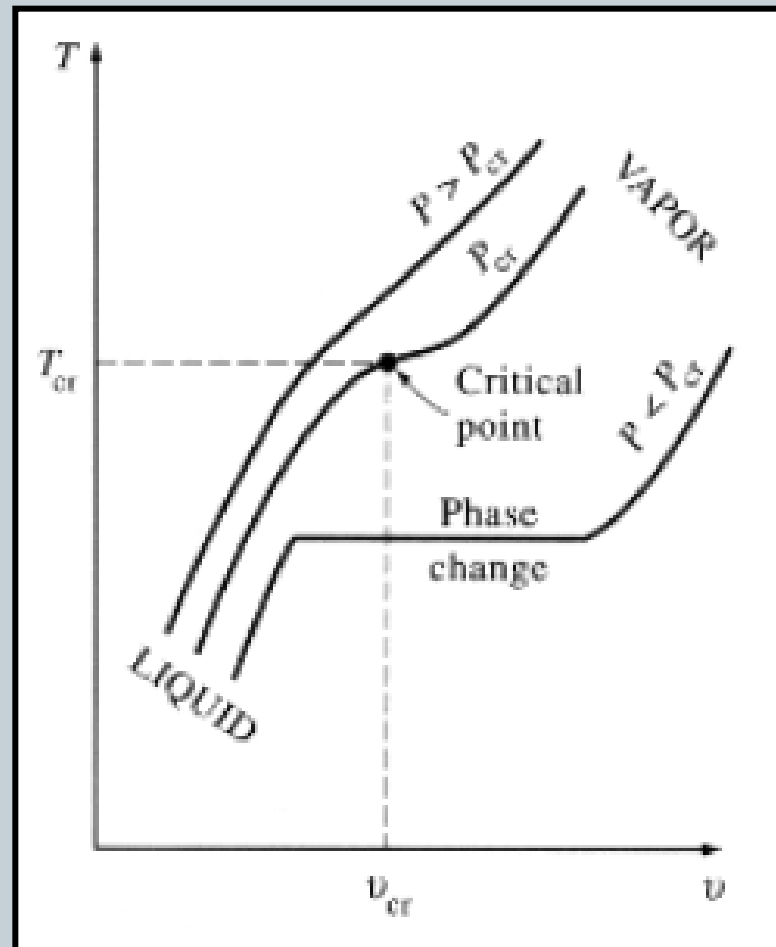


Diagrama T-v para uma substância pura

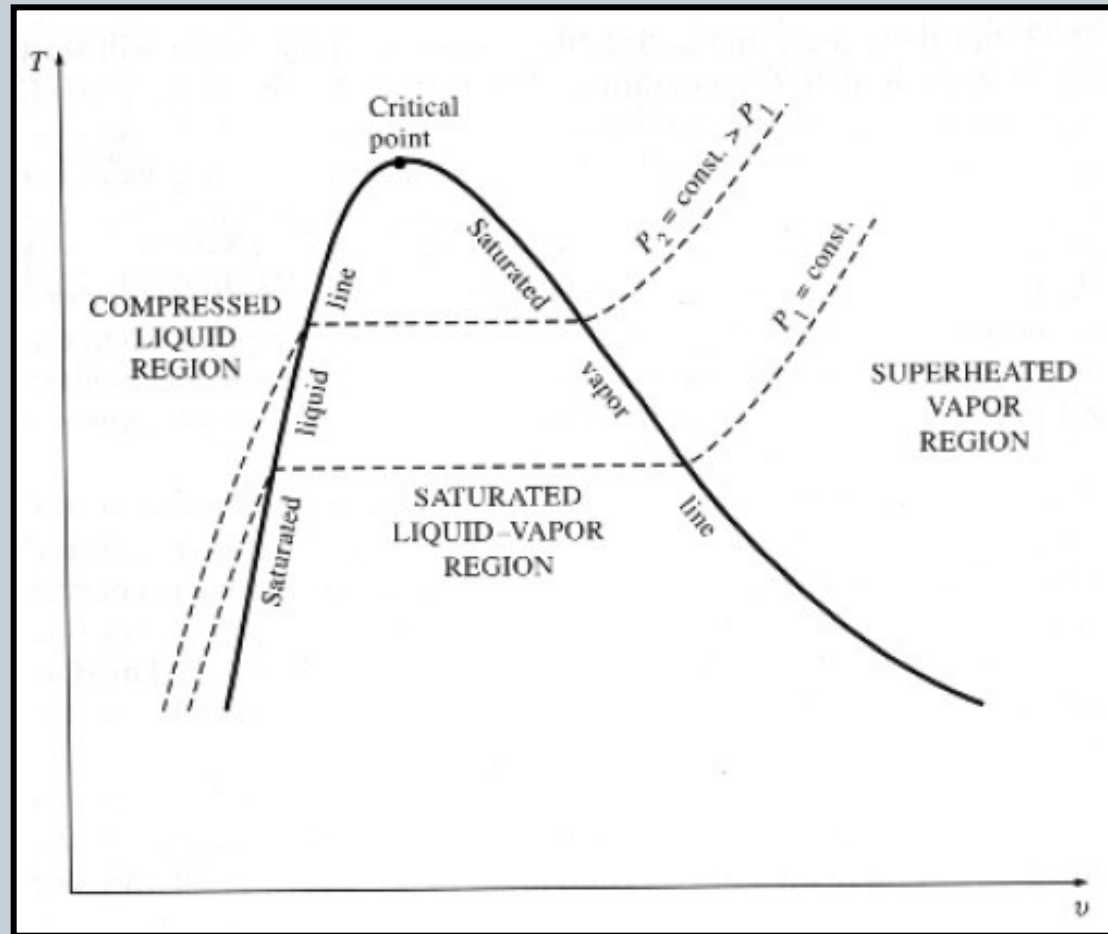


Diagrama P-v para uma substância pura

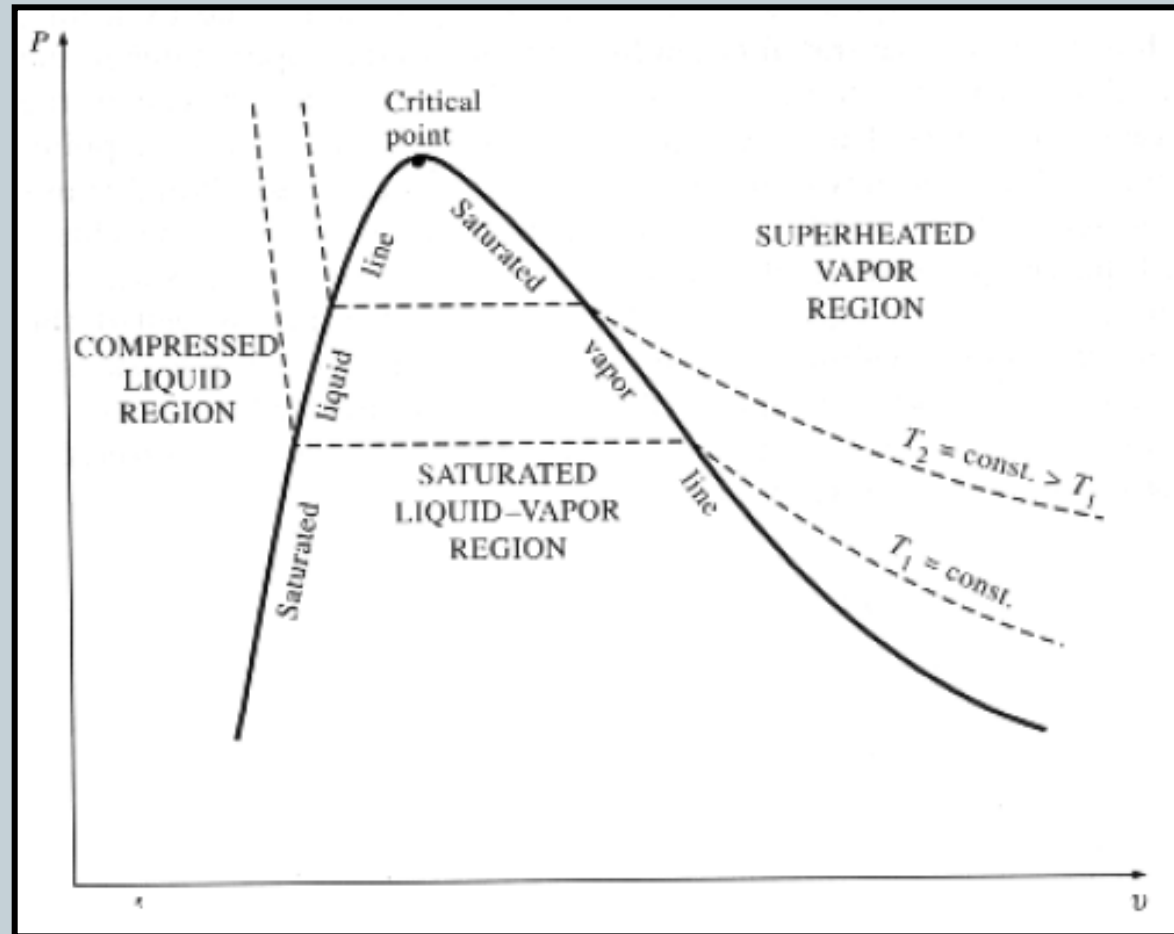


Diagrama P-v para uma substância que se contrai durante a congelção

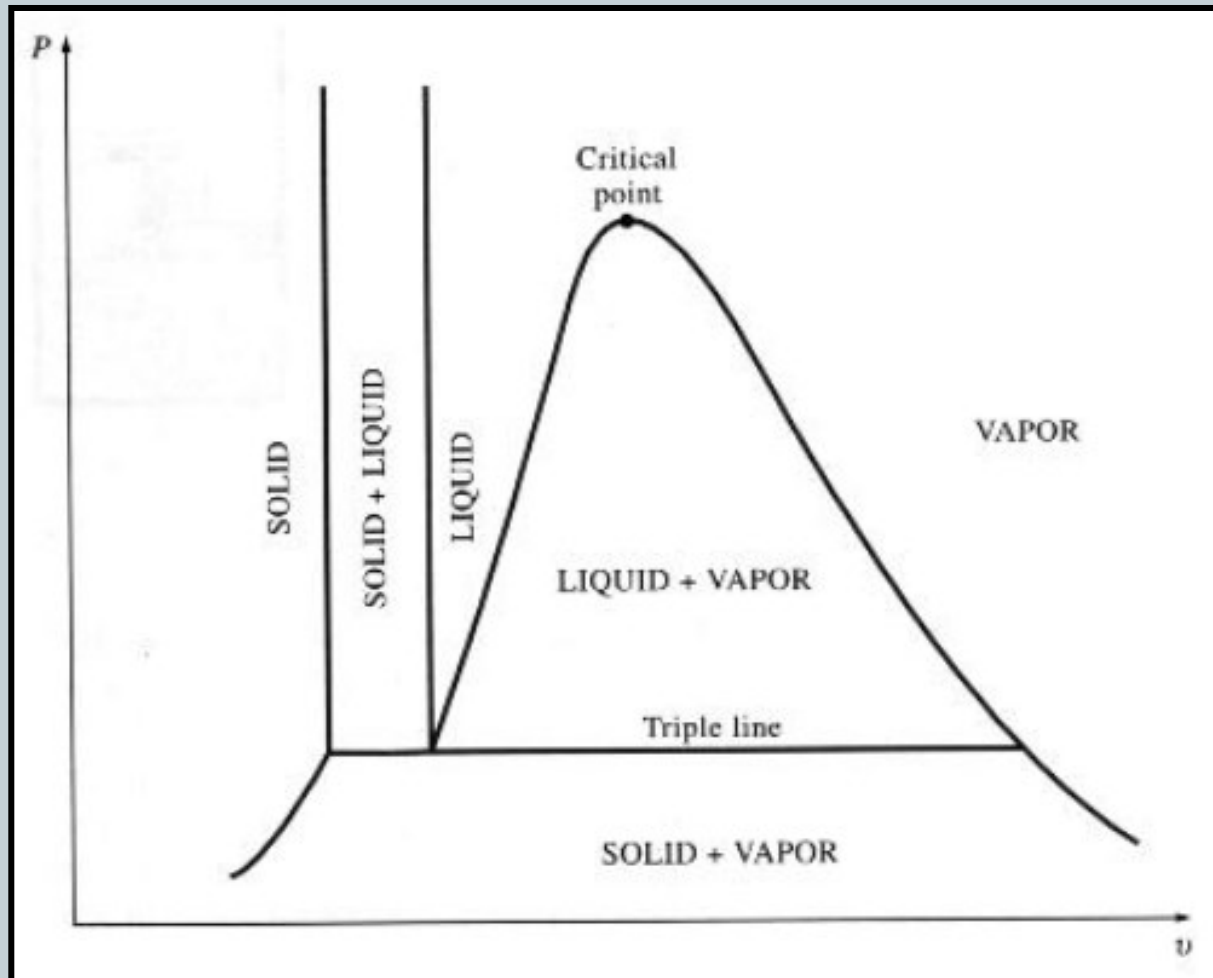
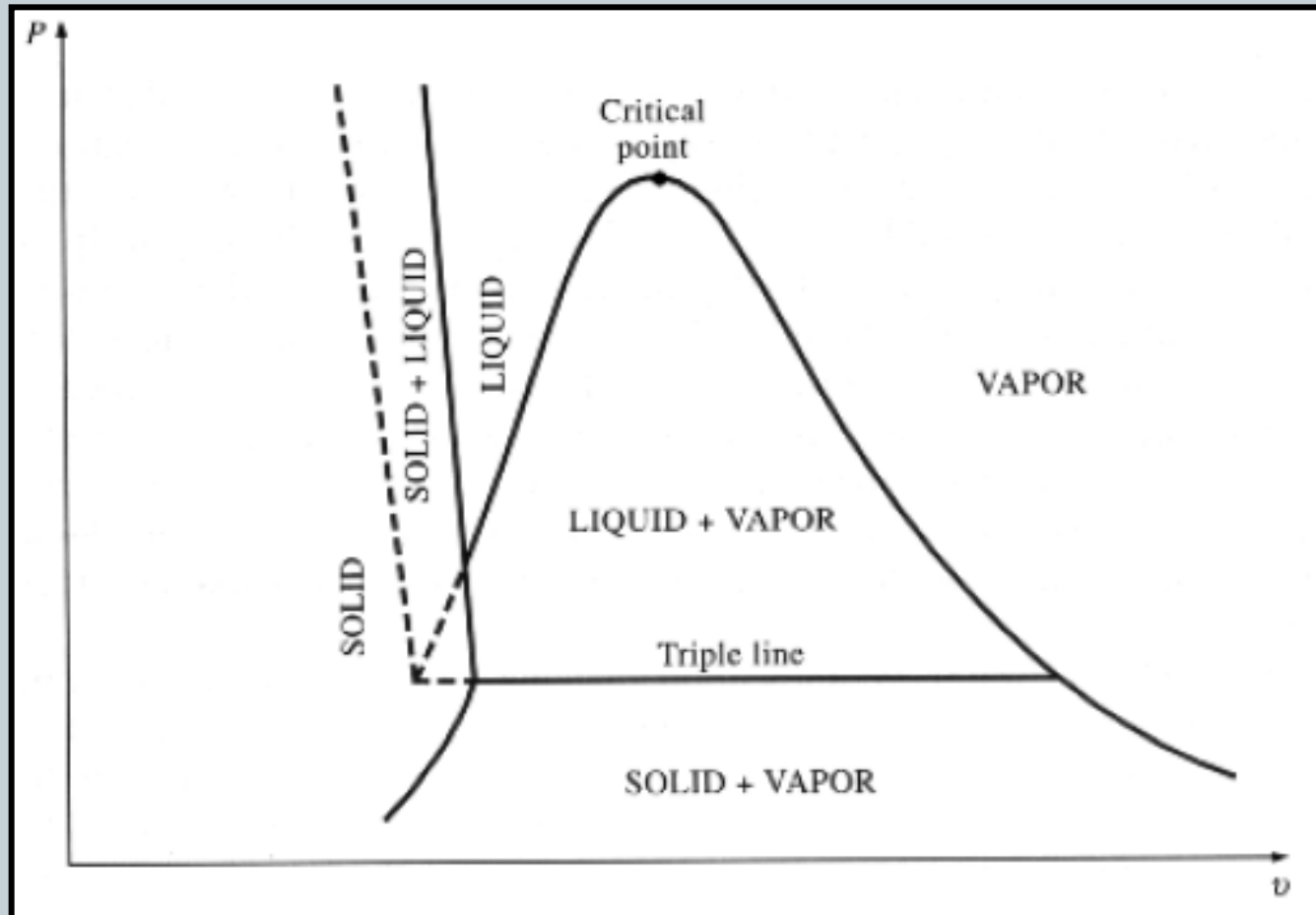
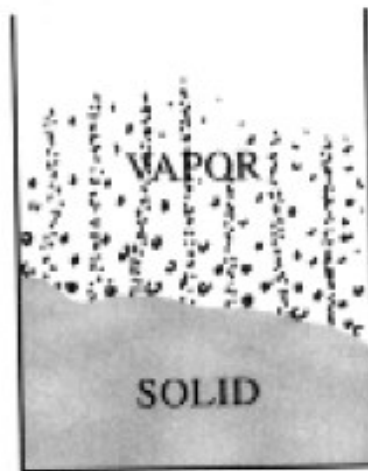


Diagrama P-v para uma substância que se expande durante a congelação



Comportamento de Substâncias Puras a baixas Pressões (inferiores ao Ponto Triplo)



A baixas pressões (abaixo do ponto triplo), os sólidos passam à fase gasosa sem passar pela fase líquida (sublimação)

Diagrama P-T para substâncias puras

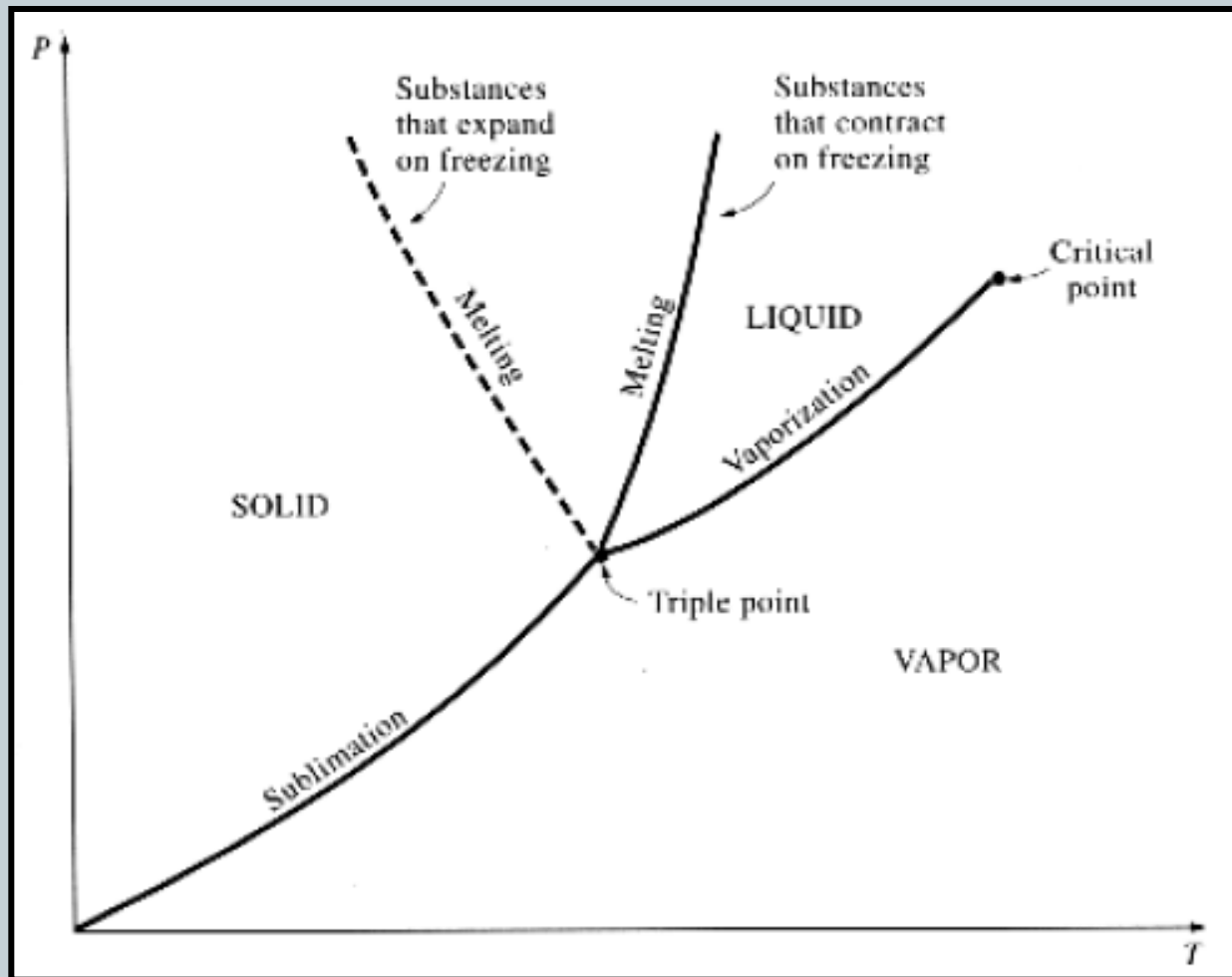


Diagrama P-v-T para uma substância que se contrai durante a congelção

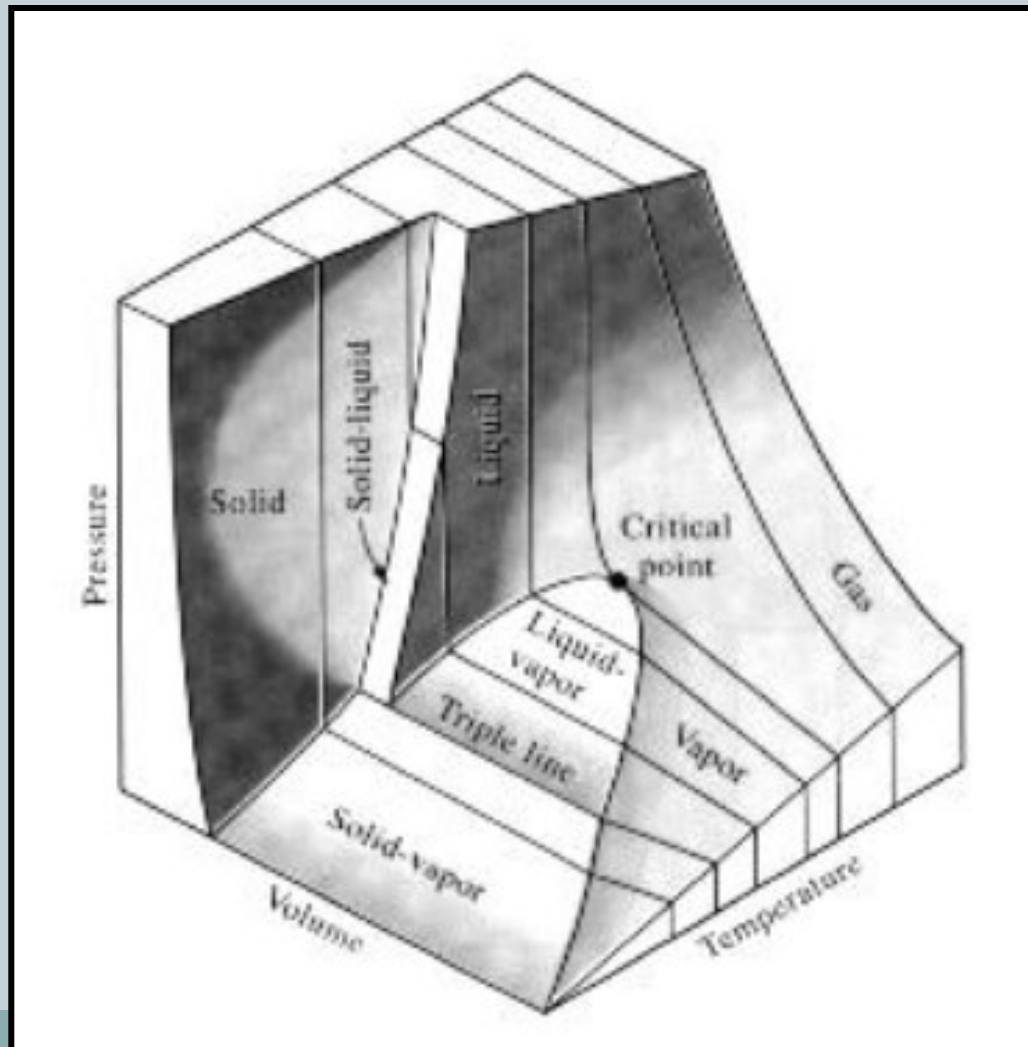


Diagrama P-v-T para uma substância que se expande durante a congelação (água)

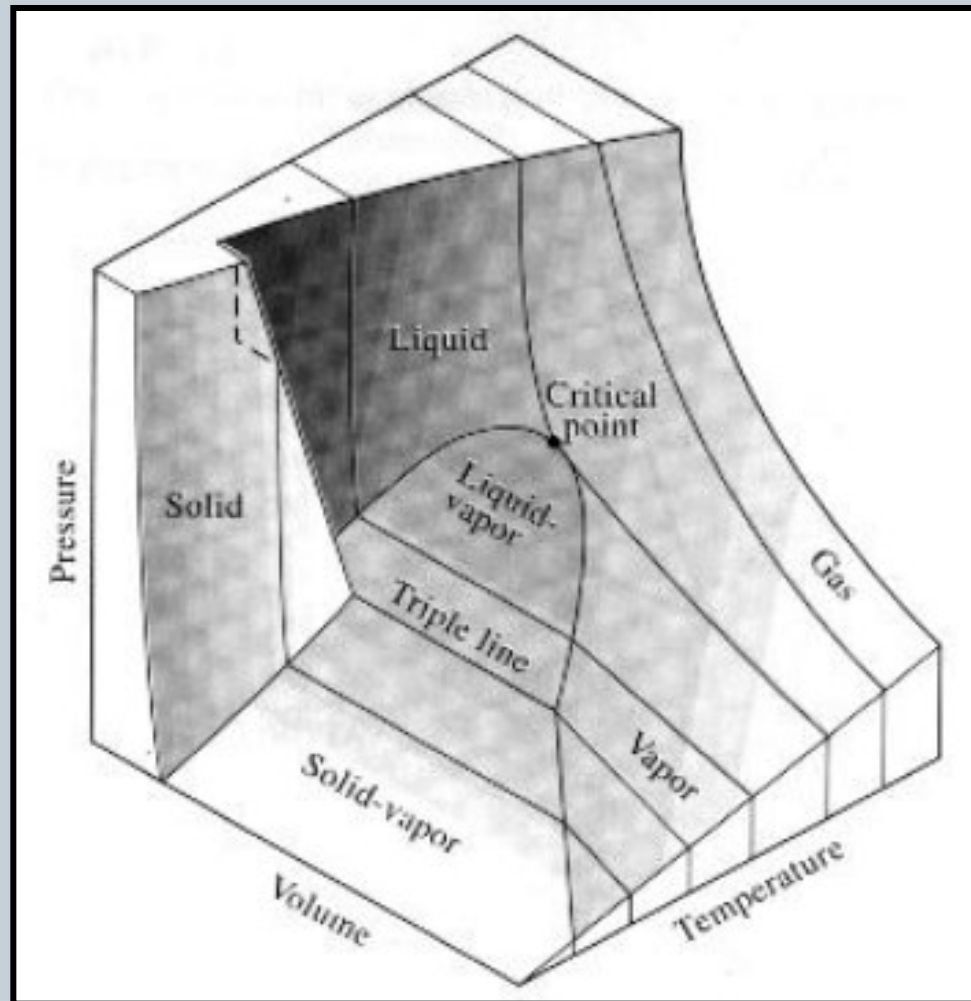


Tabela de Propriedades(Tabela A-4) Mistura de Líquido e Vapor Saturado

Extracto da Tabela A-4

Sat.		Specific volume m^3/kg	
Temp. press $^{\circ}C$ T	kPa P_{sat}	Sat. liquid v_f	Sat. vapor v_g
85	57.83	0.001 033	2.828
90	70.14	0.001 036	2.361
95	84.55	0.001 040	1.982

↑
Temperatura
específica

↑
Volume
específico do
líquido saturado

↑
Pressão de
saturação
correspondente

↑
Volume
específico do
vapor saturado

$$kPa \cdot m^3 = kJ$$

$$kPa \cdot m^3 / kg = kJ / kg$$

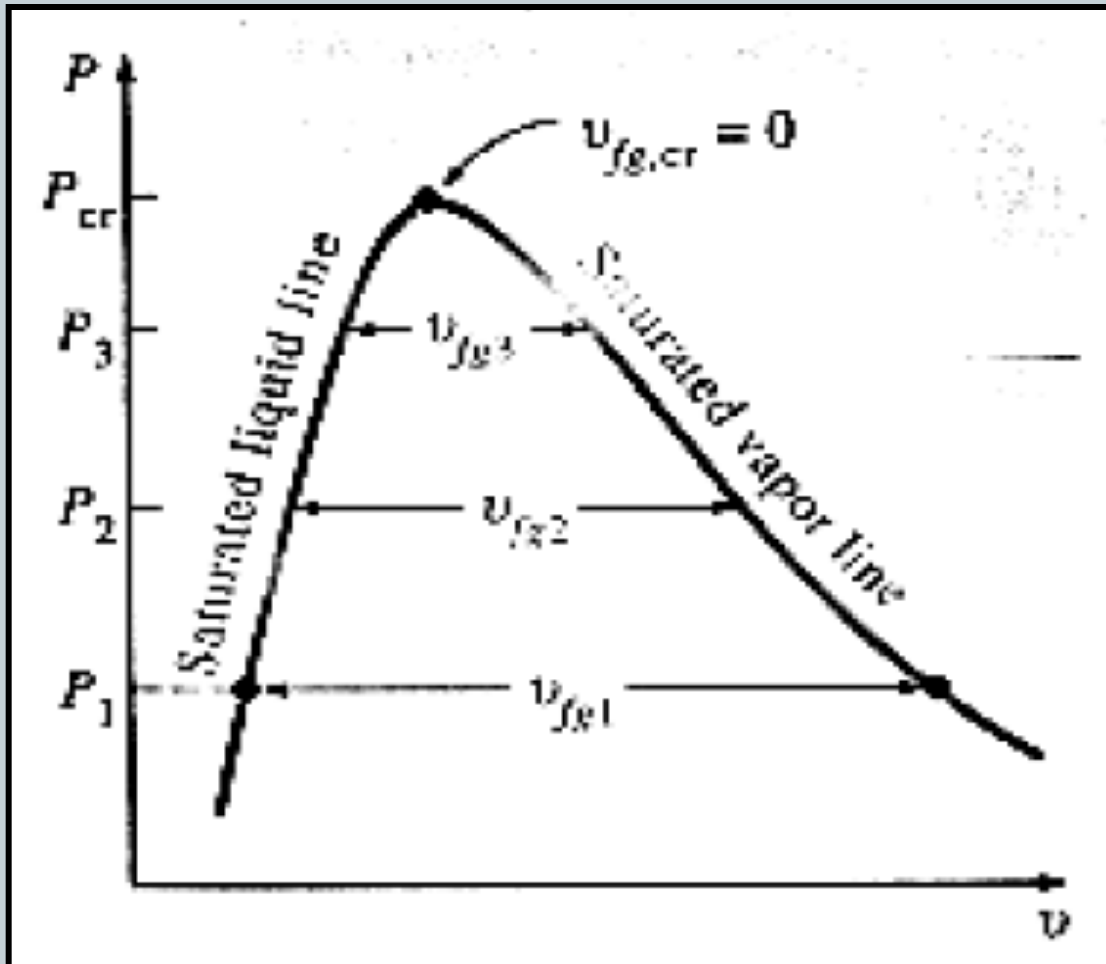
$$bar \cdot m^3 = 100 kJ$$

$$MPa \cdot m^3 = 1000 kJ$$

Mistura de Líquido e Vapor Saturado



P ou T



Mistura de Líquido e Vapor Saturado

Índice de Qualidade (x)

$$X = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}}$$

$$m_{\text{total}} = m_{\text{líquido}} + m_{\text{vapor}} = m_f + m_g$$

$$V = V_f + V_g$$

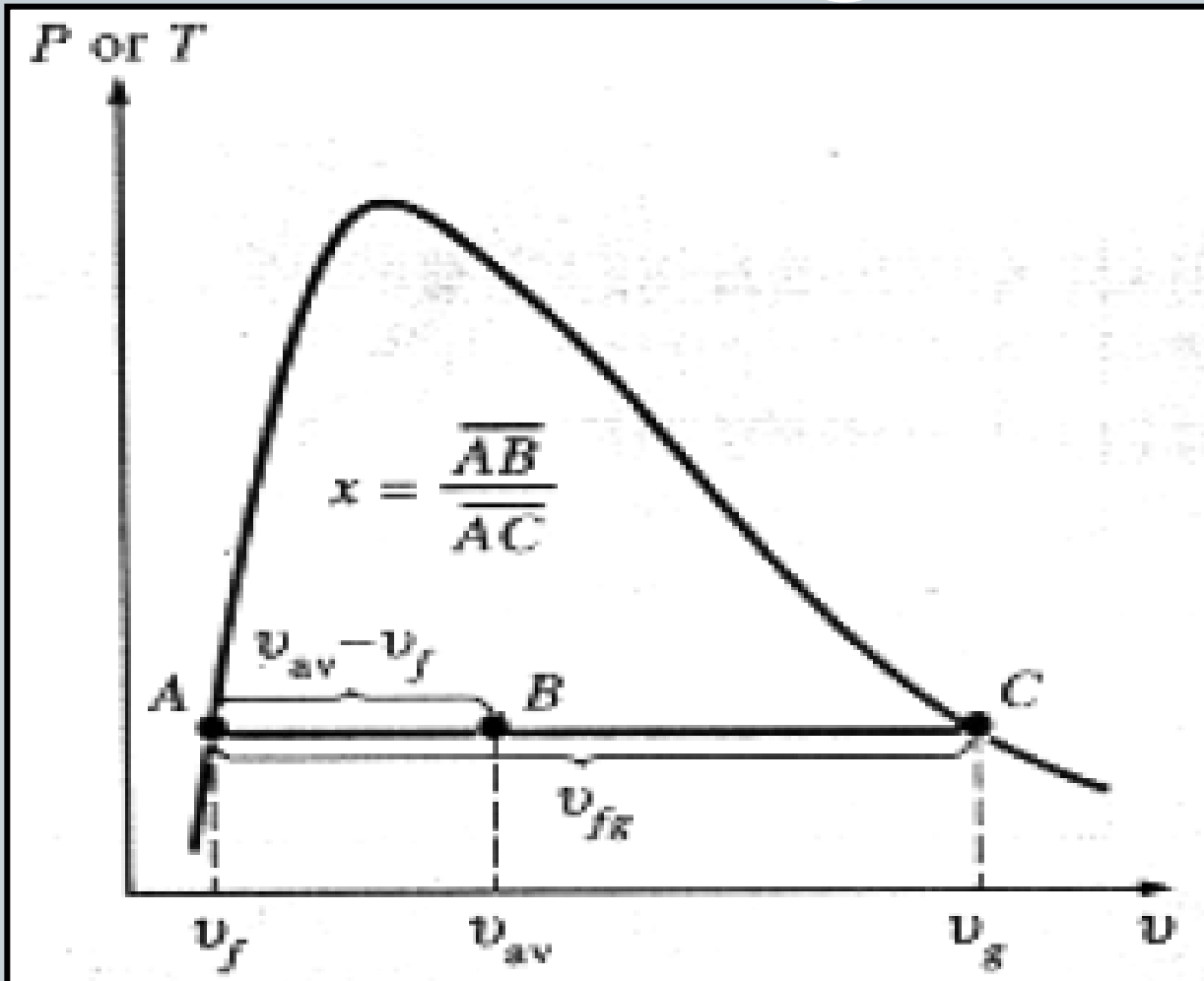
$$V = m \cdot v = m_t \cdot v_f + m_g \cdot v_g$$

Noção do
Parâmetro
Índice de
Qualidade (x)

Resolvendo em ordem a X:

$$X = \frac{v_{\text{av}} - v_f}{v_{fg}}$$

Mistura de Líquido e Vapor Saturado



Noção do
Parâmetro
Índice de
Qualidade (x)

Tabela de Propriedades (Tabela A-6)

Vapor Sobreaquecido



$T, ^\circ\text{C}$	$v,$ m^3/kg	$u,$ kJ/kg	$h,$ kJ/kg
$P = 0.1 \text{ MPa (} 99.63^\circ\text{C)}$			
Sat.	1.6940	2506.1	2675.5
100	1.6958	2506.7	2676.2
150	1.9364	2582.8	2776.4
⋮	⋮	⋮	⋮
1300	7.260	4683.5	5409.5
$P = 0.5 \text{ MPa (} 151.86^\circ\text{C)}$			
Sat.	0.3749	2561.2	2748.7
200	0.4249	2642.9	2855.4
250	0.4744	2723.5	2960.7

(vapor sobreaquecido)

Líquido Comprimido \approx Líquido Saturado à mesma Temperatura



Dando: P e T

$$v \cong v_f(T)$$

$$u \cong u_f(T)$$

$$h \cong h_f(T)$$

Um líquido comprimido pode ser aproximado a um líquido saturado à mesma temperatura

Equação de Estado de Gás Ideal

$$P \cdot v = RT$$

$$R = \frac{Ru}{M},$$

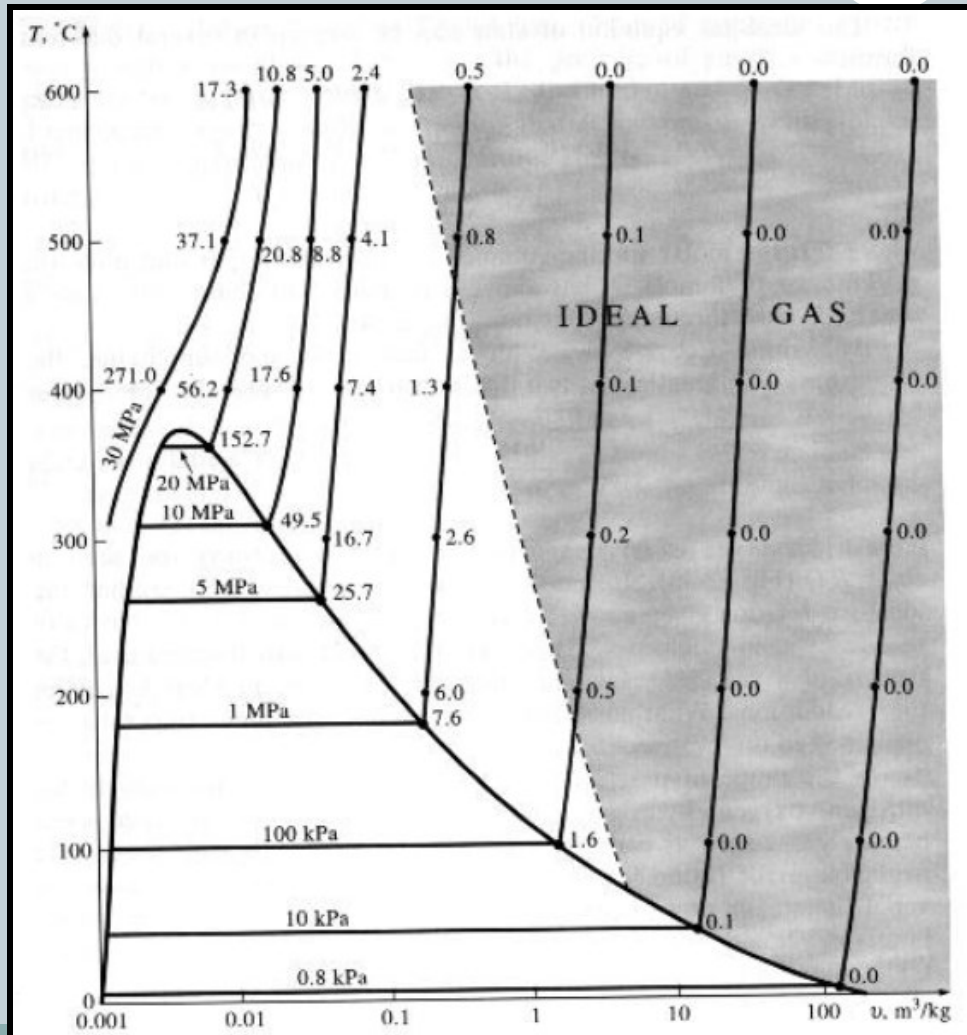
Ru é a constante universal dos gases e M é a massa molecular

Valor da constante R para diferentes substâncias

Substância	R (kJ/(kg.K))
Ar	0,2870
Hélio	2,0769
Argon	0,2081
Azoto	0,2968

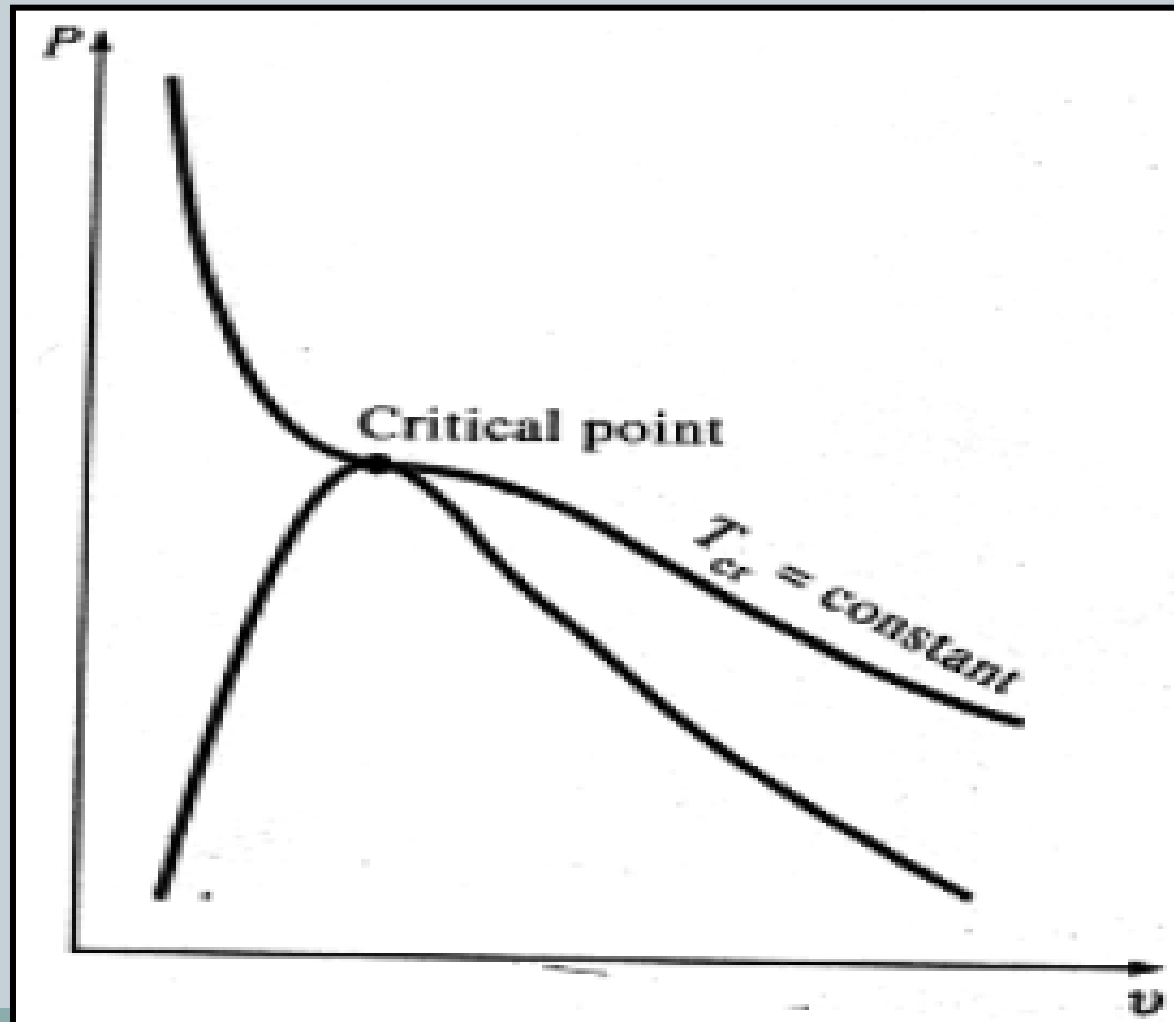
Para os valores de R e M, consultar Tabela A1

Percentagem de erro considerando o vapor de água como gás ideal



A escuro está indicada a região onde o vapor de água pode ser considerado gás ideal com um erro inferior a 1%

Isotérmica crítica de uma substância pura



Outras Equações de estado



Equação de estado de Van der Waals

$$\left(P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = R.T$$

Onde:

$$a = \frac{27.R^2.T_{CR}^2}{64P_{CR}}$$

$$b = \frac{R.T_{CR}}{8P_{CR}} +$$

a e b podem ser determinadas através dos dados do ponto crítico (Tabela A1)

Resumo



- Uma substância que tenha uma composição química constante chama-se substância pura.
- As substâncias puras existem em diferentes fases dependendo do seu nível de energia.
- Na fase líquida, uma substância que não está prestes a vaporizar chama-se líquido comprimido.
- Na fase gasosa, uma substância que não está prestes a condensar chama-se vapor sobreaquecido.
- Durante o processo de mudança de fase a temperatura e a pressão de uma substância são propriedades dependentes.
- A uma dada pressão, uma substância entra em ebulição a uma determinada temperatura, temperatura de saturação.
- A uma dada temperatura, uma substância entra em ebulição a uma determinada pressão, pressão de saturação.
- Durante o processo de mudança de fase, as fases líquida e vapor existem em equilíbrio e, nestas condições, o líquido chama-se líquido saturado e o vapor saturado.

Resumo (cont.)



Numa mistura de líquido-vapor saturado, a fração mássica do vapor saturado chama-se qualidade e é definido com:

$$x = \frac{m_{\text{vapor}}}{m_{\text{total}}}$$

A qualidade pode ter valores compreendidos entre 0 (líquido saturado) e 1 (vapor saturado). Na região da mistura líquido-vapor saturado o valor de qualquer propriedade intensiva y é dado por:

$$y = y_f + xy_{fg}$$

onde:

- f refere-se ao líquido saturado
- g ao vapor saturado
- fg à mistura líquido-vapor

Resumo (cont.)



Na ausência de dados relativos aos líquidos comprimidos, pode-se tratar, por aproximação, o líquido comprimido como líquido saturado a uma dada temperatura, ou seja, $y \cong f(T)$ onde y pode ser v , u ou h .

O estado para além do qual não existe um processo distinto de vaporização é chamado ponto crítico. A pressões supercríticas uma substância expande-se de uma forma gradual e uniforme da fase líquida para vapor. As três fases de uma substância coexistem em equilíbrio ao longo da linha tripla.

Os líquidos comprimidos têm valores de v , u e h mais baixos do que os líquidos saturados à mesma pressão e temperatura. Da mesma forma o vapor sobreaquecido tem valores de v , u e h mais elevados do que o vapor saturado para a mesma temperatura e pressão.

Resumo (cont.)



A qualquer relação entre a pressão, temperatura, e volume específico de uma substância chama-se equação de estado. A mais simples e mais conhecida é a equação de estado dos gases ideais, dada por: $Pv = RT$, onde R é a constante do gás. No entanto, é necessário precaução no uso desta equação uma vez que um gás perfeito é uma substância fictícia. Gases reais têm um comportamento semelhante aos gases ideais a baixas pressões e altas temperaturas.

O comportamento P - v - T das substâncias pode ser calculado com maior precisão através de equações de estado mais complexas, nomeadamente:

$$\text{Van der Waals: } \left(P + \frac{a}{v^2} \right) (v - b) = RT \text{ onde } a = \frac{27R^2T_{cr}^2}{64P_{cr}} \text{ e } b = \frac{RT_{cr}}{8P_{cr}}$$



Ficha de Trabalho n.º 2

1. Um tanque rígido contém 10 kg de água a 90 °C.

Se 8 kg de água se encontram no estado líquido e o resto na forma de vapor, determine:

- (a) a pressão no interior do tanque**
- (b) o volume do tanque.**

2. Um recipiente de 80 L contém 4 kg de refrigerante-12 a uma pressão de 150 kPa.

Determine:

- (a) a temperatura do refrigerante**
- (b) a qualidade**
- (c) a entalpia do refrigerante**
- (d) o volume ocupado pela fracção que se encontra no estado de vapor.**



3. Complete a tabela seguinte referente à água, determinando as propriedades em falta, bem como a descrição da fase.

4. Determine o volume específico do refrigerante-12 a 1 MPa a 50 °C usando:

(a) as tabelas do refrigerante-12

(b) a equação de estado do gás ideal

Determine também o erro envolvido nas alíneas (b).

5. Determine a pressão do azoto (gás) a $T = 175 \text{ K}$ e $v = 0,00375 \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ recorrendo a:

(a) equação de estado dos gases ideais

(b) equação de estado de Van der Waals

Compare os valores obtidos com o valor determinado experimentalmente de 10000kPa.

T, °C	P, KPa	u, kJ/kg	X	Descrição da fase
	200		0,6	
125		1600		
	1000	2950		
75	500			
	850		0,0	