

Termodinâmica I Propriedades Volumétricas de Fluidos Puros

PROF. DR. CASSIO HENRIQUE ZANDONAI

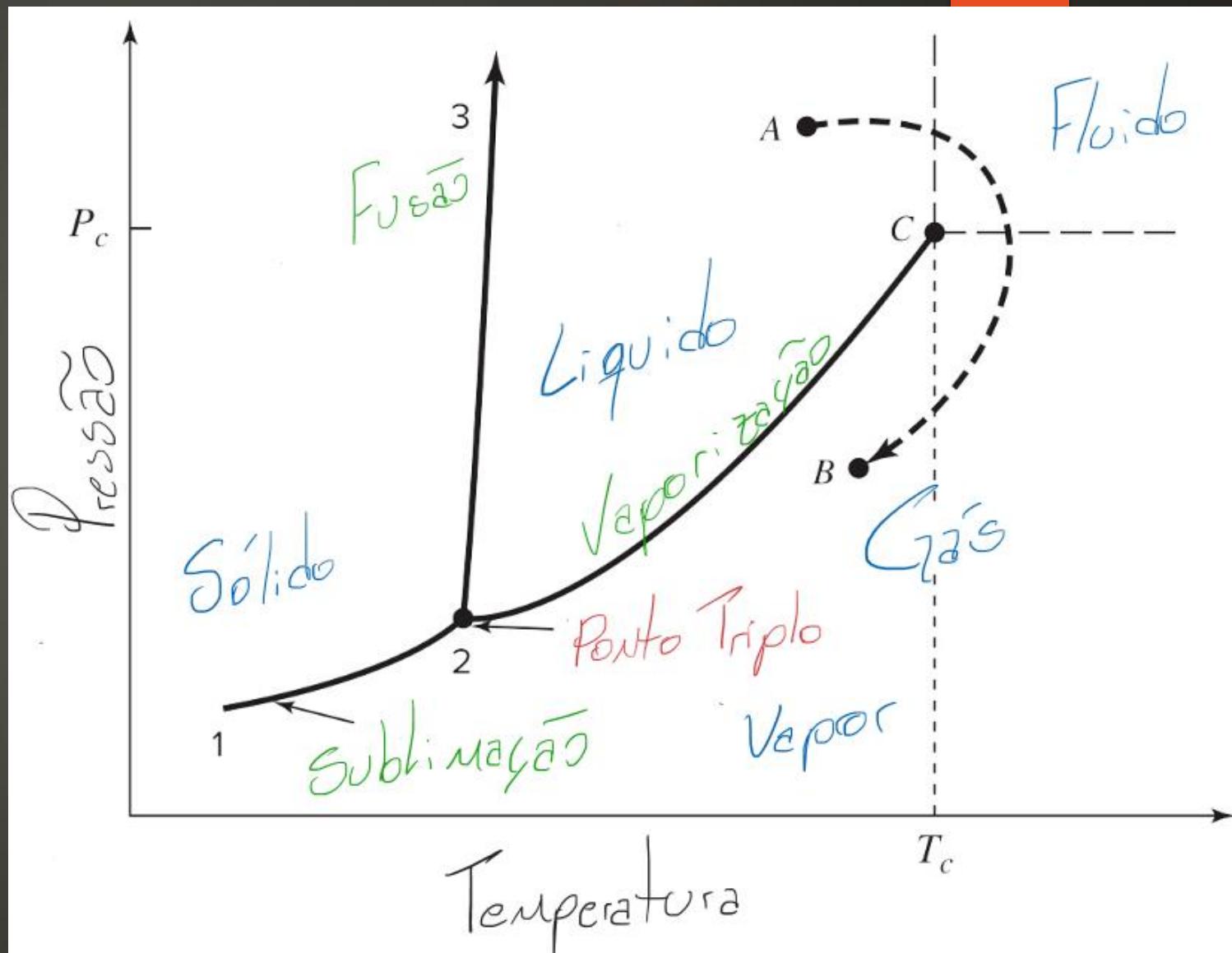
Propriedades Volumétricas

► PROCESSOS INDUSTRIAIS

- As quantidades de calor e trabalho
 - são calculadas a partir de propriedades termodinâmicas
 - como energia interna e a entalpia.
- Medida do volume molar
 - como uma função da temperatura e da pressão,
 - relações pressão/volume/temperatura (*PVT*),
 - equações de estado (expressão matemática).
 - mais simples, $PV = RT$
- Detalhamento do comportamento de gás ideal,
 - fornece equações de estado mais realísticas,
 - descrição quantitativa do comportamento de fluidos reais.
- Correlações generalizadas
 - predição do comportamento *PVT* de fluidos (não há dados experimentais)

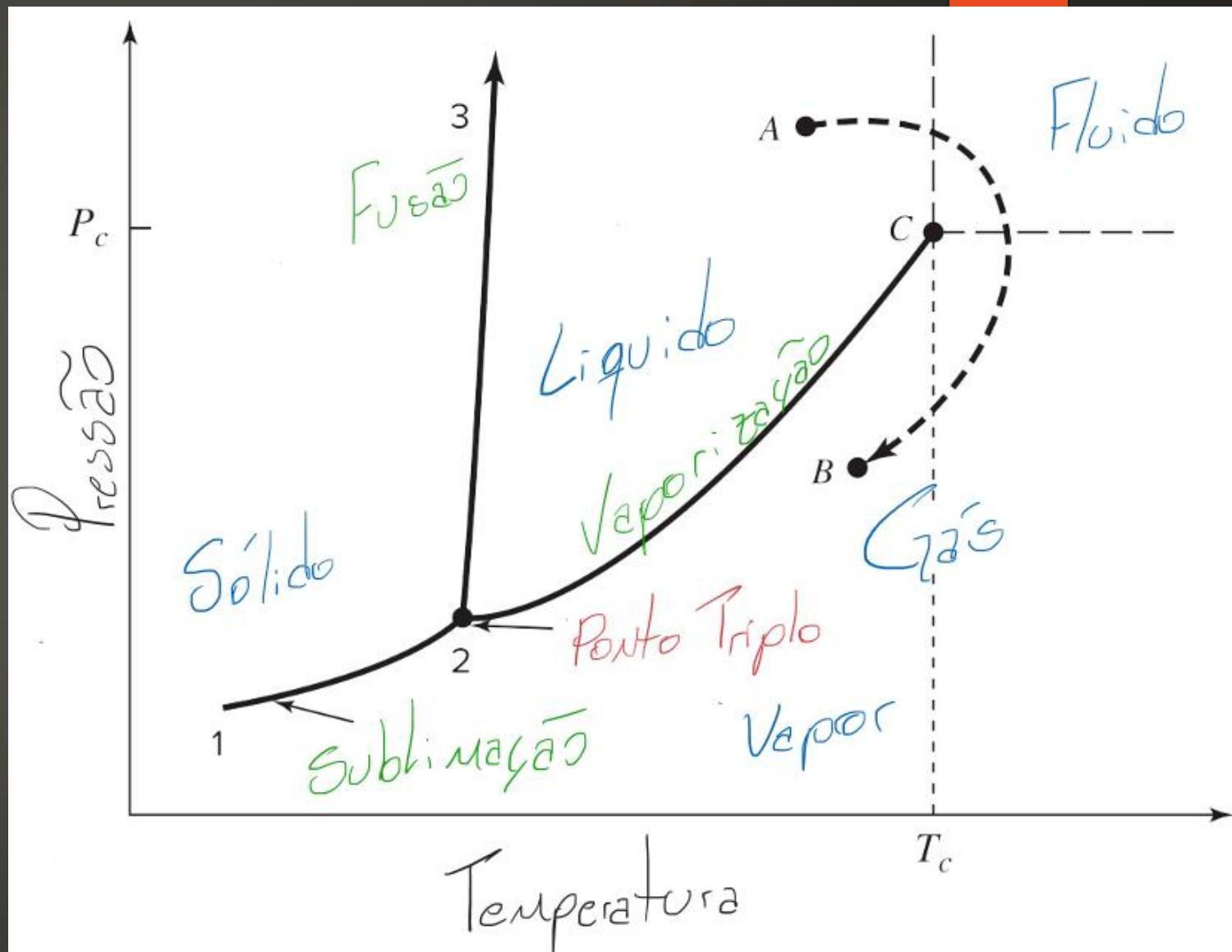
Propriedades Volumétricas

- COMPORTAMENTO PVT DE SUBSTÂNCIAS PURAS
- Linhas 1 – 2 e 2-C
 - condições de P e T nas quais
 - fases sólida e líquida
 - existem em equilíbrio
 - com uma fase vapor.
- Pressão de vapor vs. temperatura
 - equilíbrio sólido/vapor (1-2)
 - e líquido/vapor (linha 2-C)
- O equilíbrio sólido/líquido
 - linha (2-3).



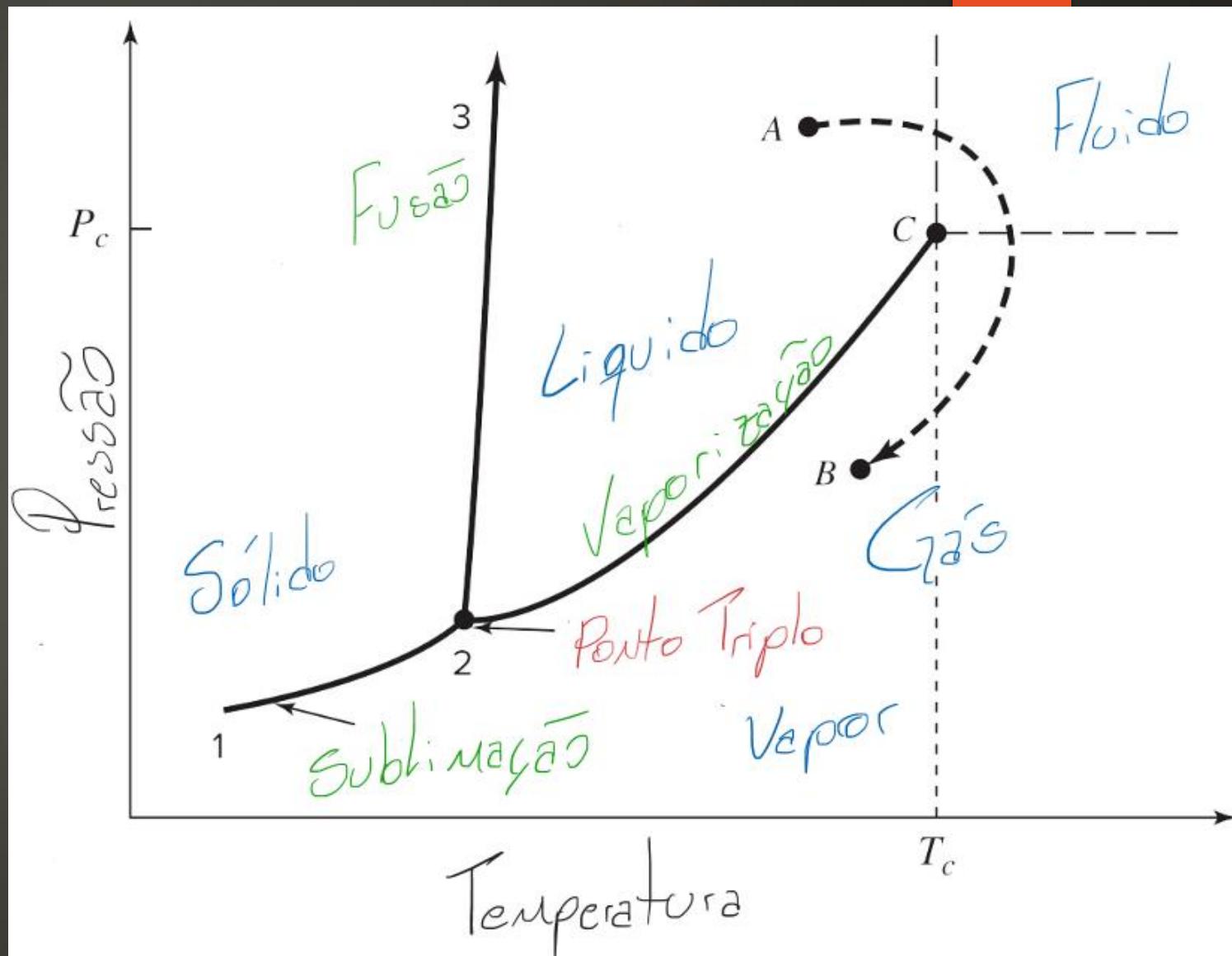
Propriedades Volumétricas

- COMP. PVT DE SUBST. PURAS
- Três linhas
 - condições de P e T
 - duas fases podem coexistir,
 - e dividem o diagrama
 - em regiões unifásicas
- A curva de sublimação (1-2),
 - separa as regiões sólido e gás;
- A curva de fusão (1-3),
 - separa as regiões sólido e líquido;
- A curva de vaporização (2-C),
 - separa as regiões líquido e gás.



Propriedades Volumétricas

- COMP. PVT DE SUBST. PURAS
- O ponto C é o ponto crítico, P_c e T_c
 - limites de T e P onde de observa
 - equilíbrio vapor/líquido.
- O ponto triplo,
 - três fases em equilíbrio,
 - ponto triplo é invariante ($F = 0$).
- Nas linhas bifásicas
 - é univariante ($F = 1$),
- Nas regiões de única fase
 - é bi variante ($F = 2$).



Propriedades Volumétricas

► COMP. PVT DE SUBST. PURAS

► Mudanças de estado

- isotérmica por uma linha vertical
- isobárica por uma linha horizontal.

► Cruzar linha de equilíbrio

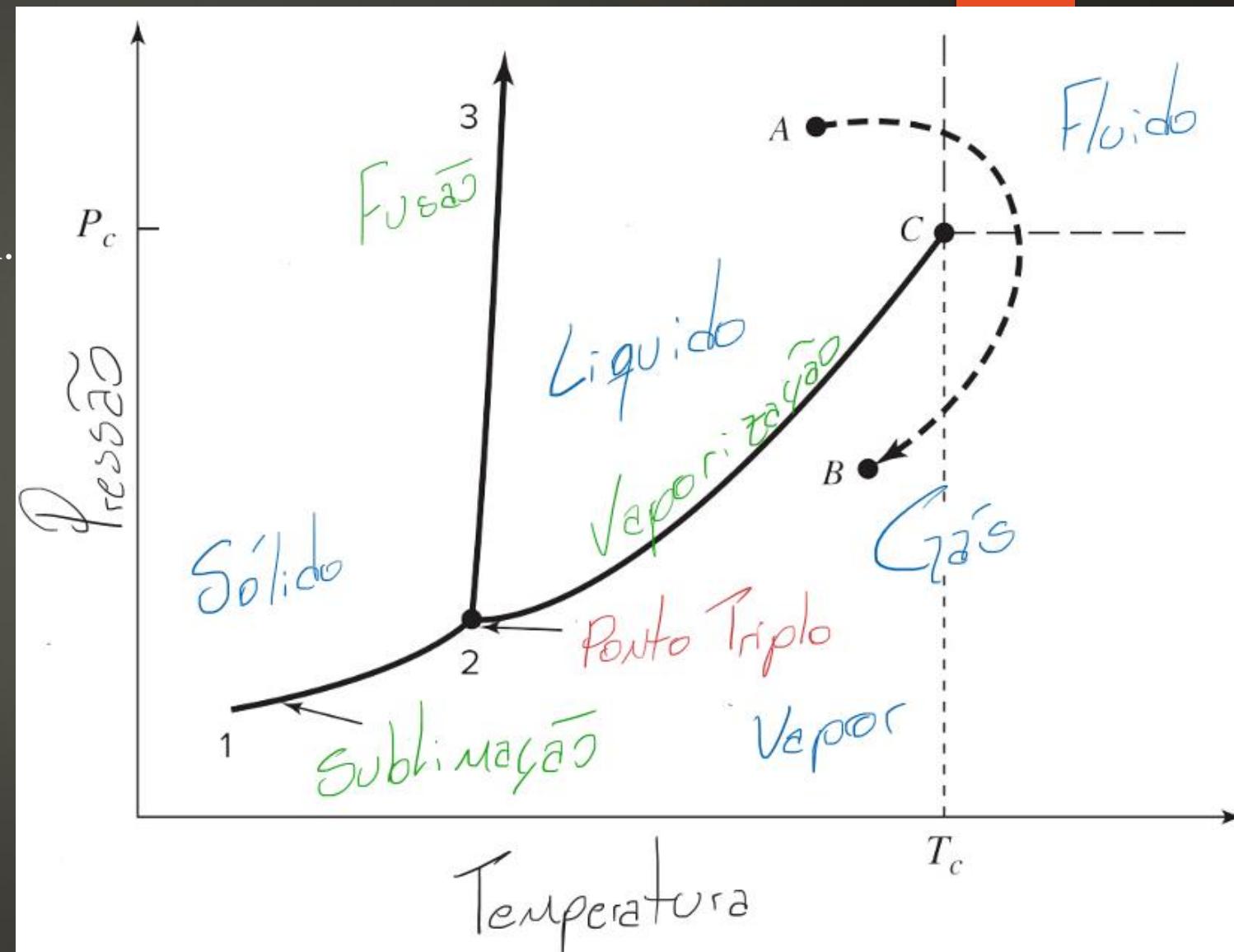
- variação nas propriedades do fluido a P e T constantes;
- por exemplo, vaporização do líquido para o vapor.

► Equilíbrio líquido-vapor.

- Propriedades muito diferentes

► Aumento de P e T

- aproxima as propriedades
- no ponto C ficam idênticas



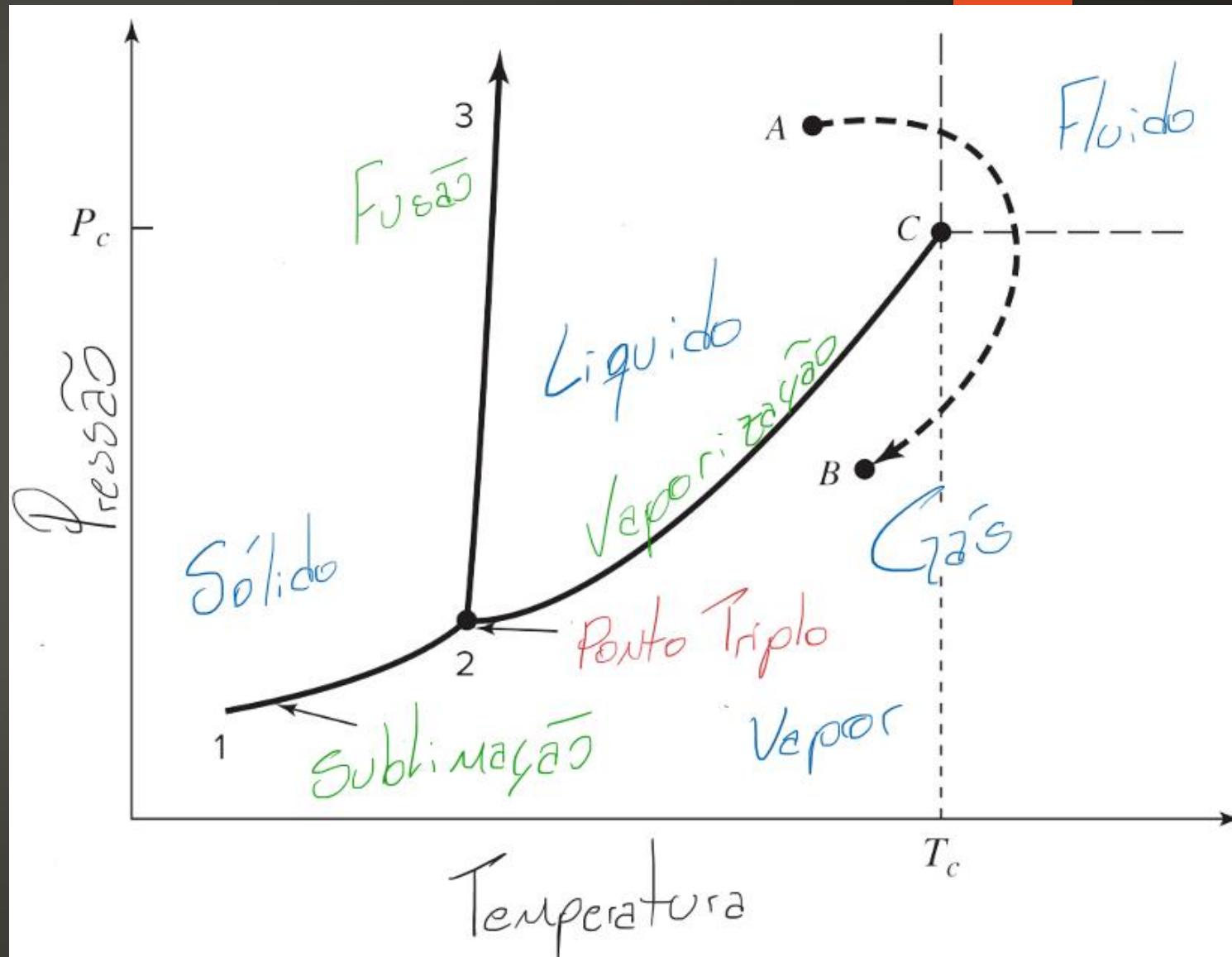
Propriedades Volumétricas

► COMP. PVT DE SUBST. PURAS

► No ponto C

- Gás e líquido são um só
- Transição líquido para vapor
- Sem vaporização
- Transição vapor para líquido
- Sem condensação

► Curva A-B



Propriedades Volumétricas

► COMP. PVT DE SUBST. PURAS

► Região de Fluido

► Sem distinção entre líquido e vapor

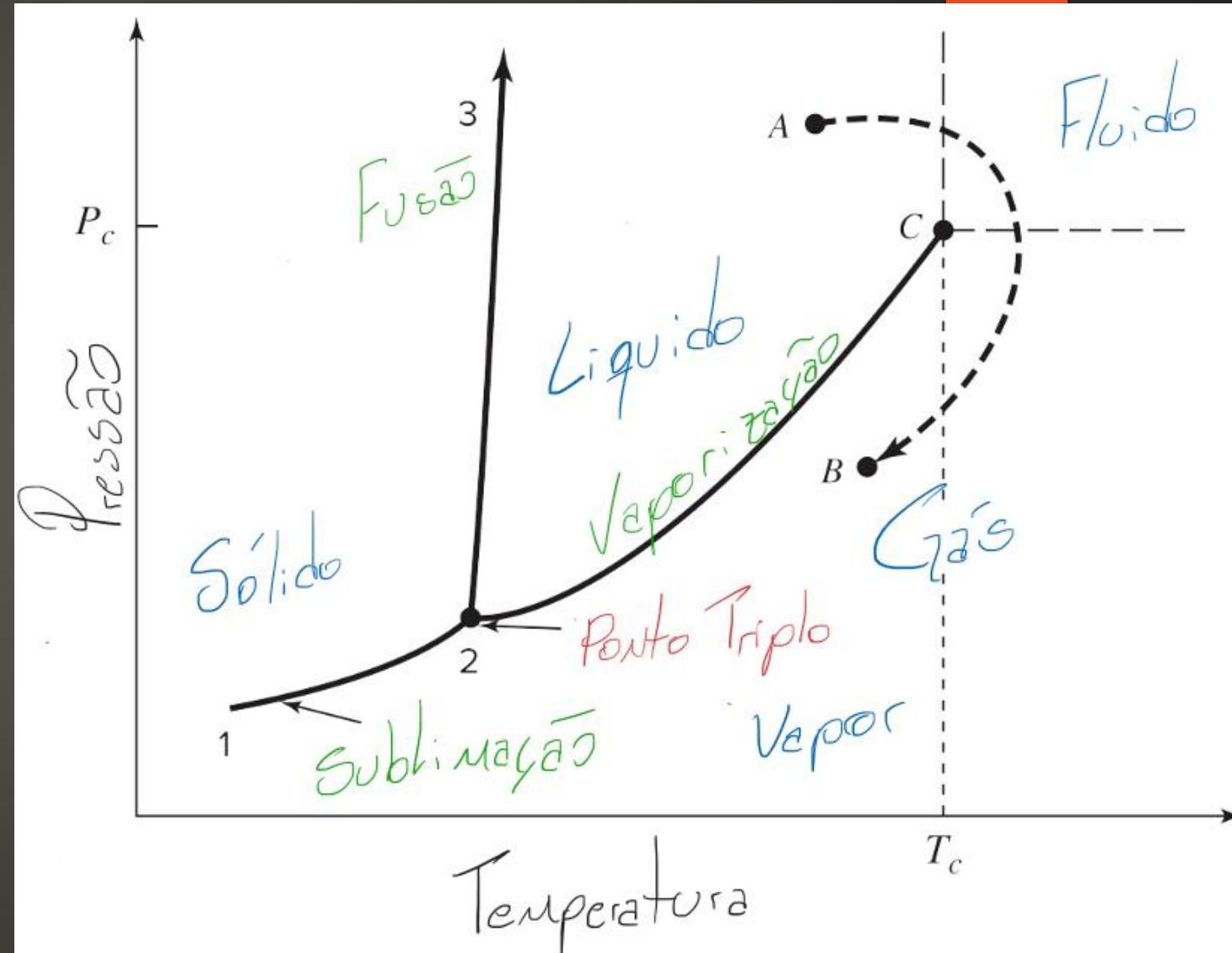
► Líquido é aquele que pode

► ser vaporizado pela redução da P a uma T constante.

► Gás é aquele que pode

► ser condensado pela redução da T a uma P constante.

► Não corre região de fluido

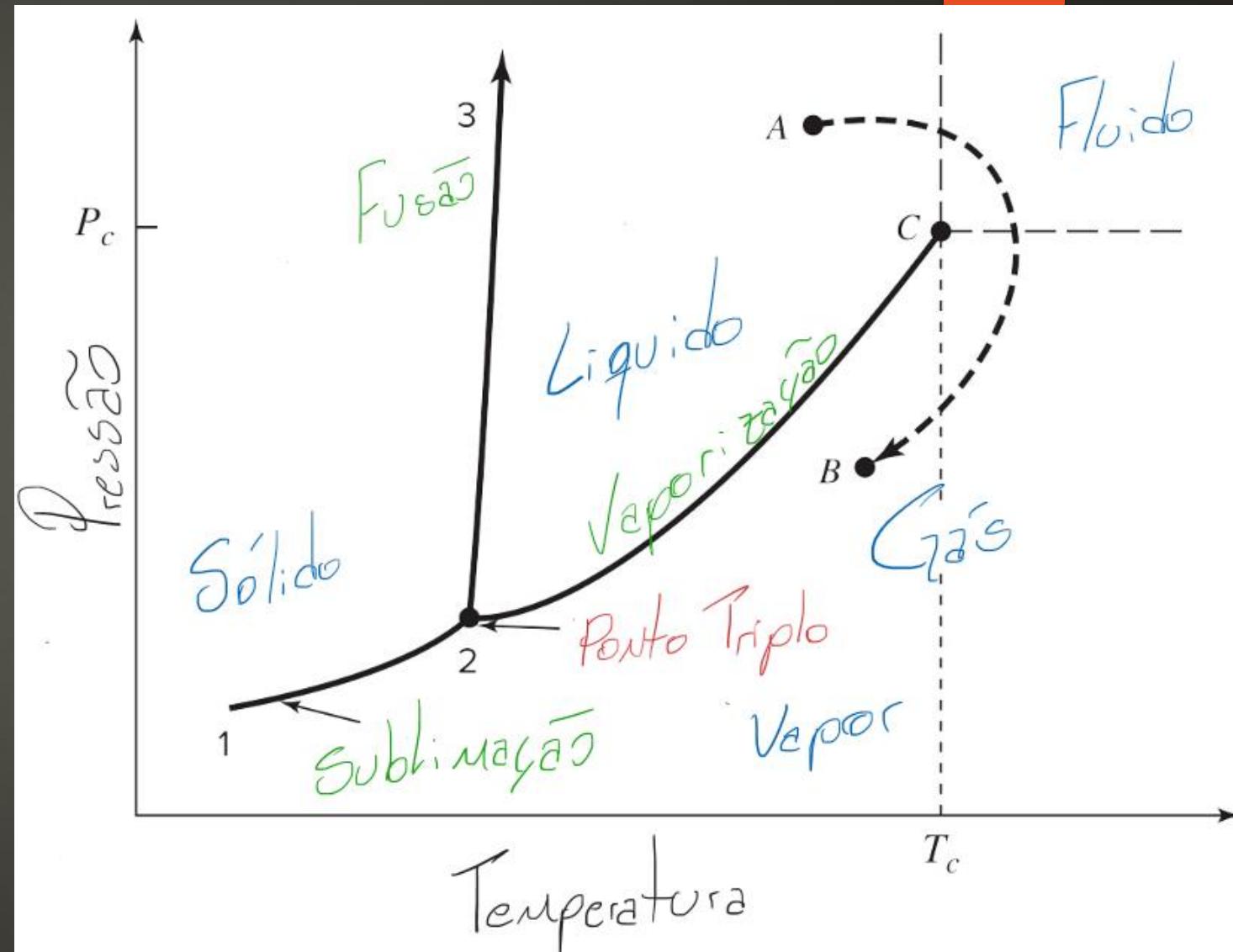


Propriedades Volumétricas

9

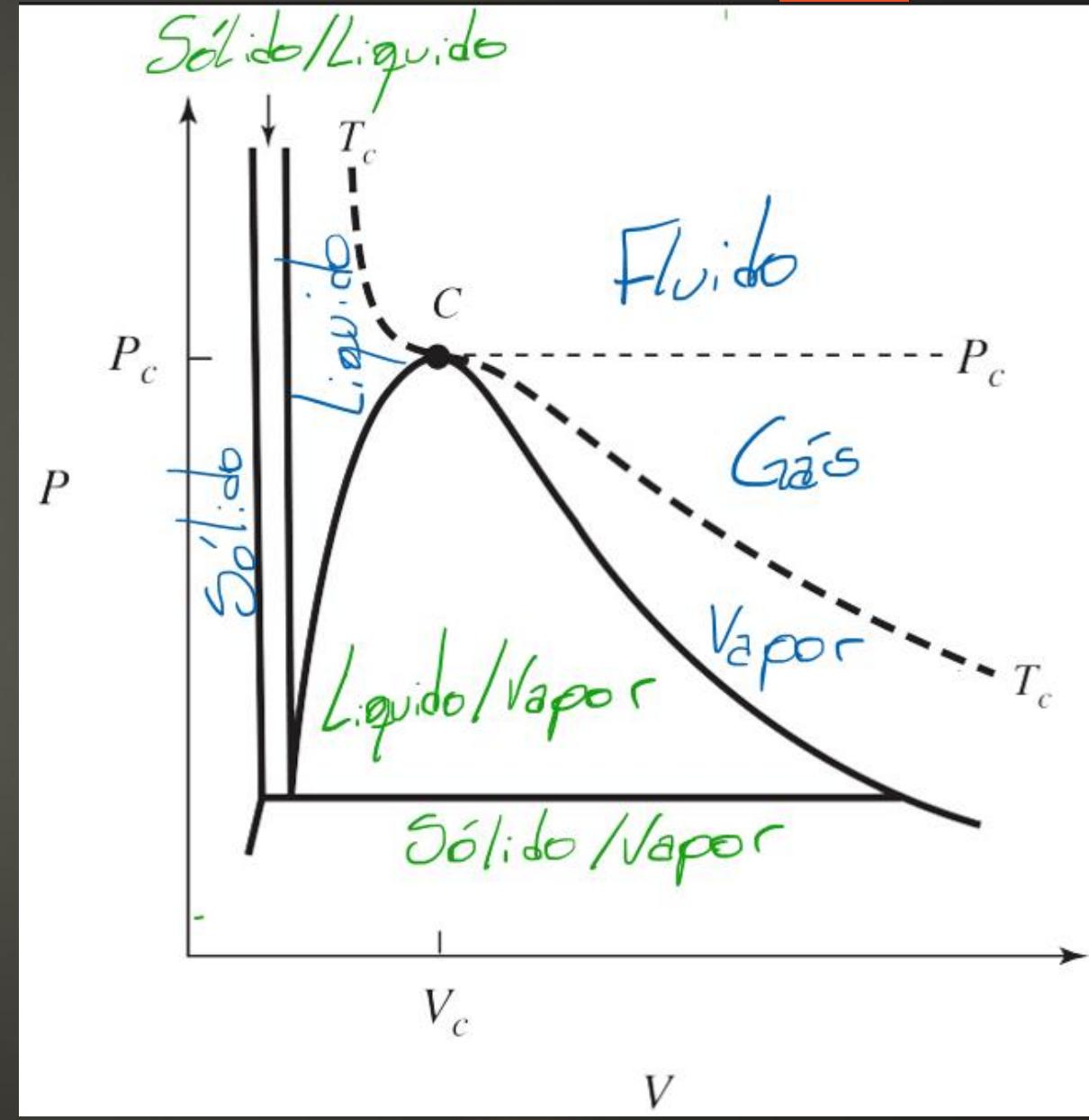
► COMP. PVT DE SUBST. PURAS

- A região do gás
 - é dividida em duas partes,
- Um gás que pode ser condensado
 - tanto por compressão a T constante
 - quanto por resfriamento a P constante,
 - é chamado um vapor.
- Um fluido a uma temperatura superior a T_c
 - é dito estar supercrítico.



Propriedades Volumétricas

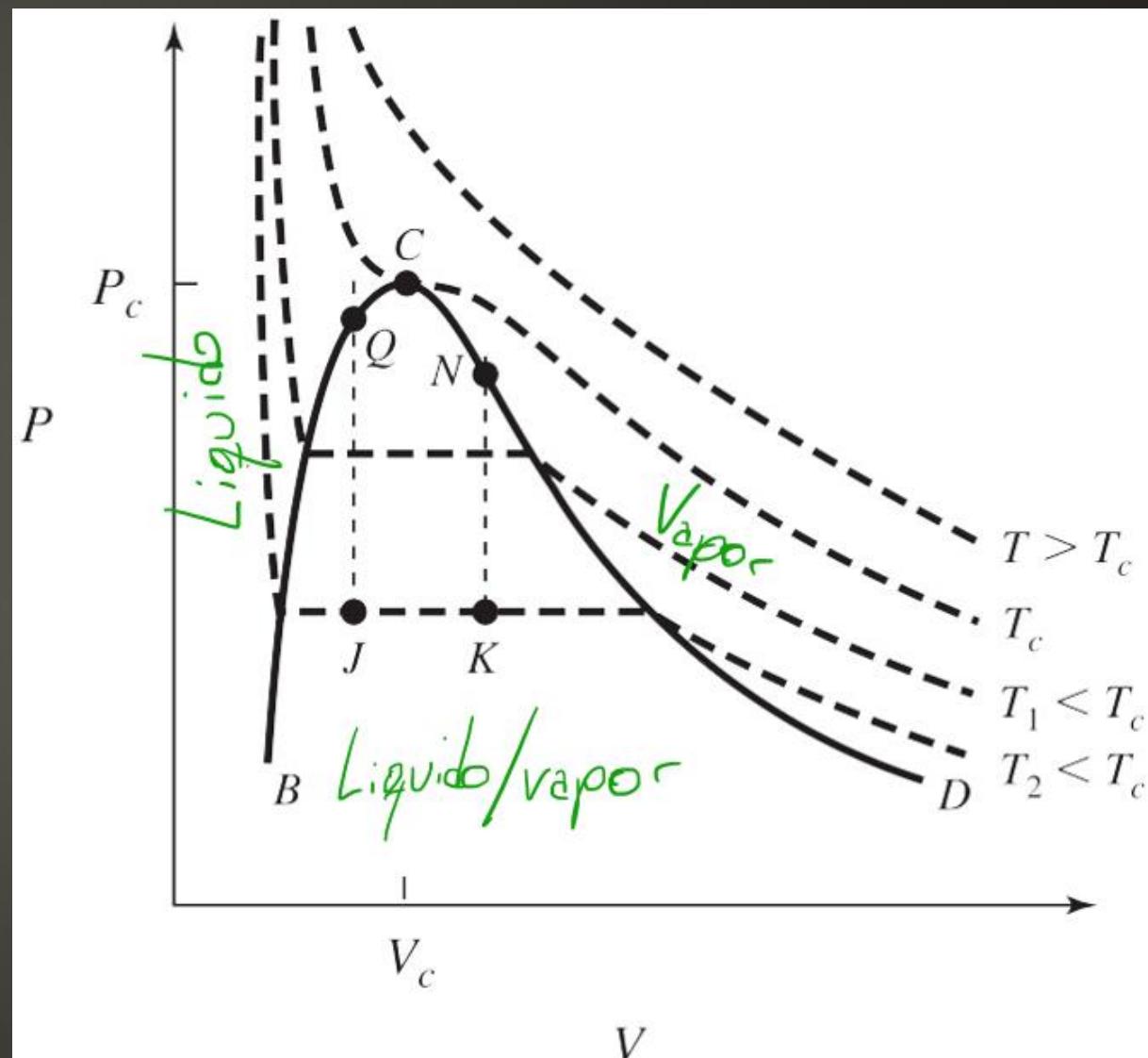
- DIAGRAMA PV
- Informação sobre o volume;
- Diagrama PT
 - Linhas de fronteira de duas fases
- Em um diagrama PV
 - regiões de duas fases em equilíbrio
 - sólido/líquido, sólido/vapor
 - ou líquido/vapor
 - separadas por curvas de fases únicas,
 - com pontos de volume molar
 - o ponto triplo é uma linha horizontal,
 - na qual as três fases coexistem
 - em uma única temperatura e pressão.



Propriedades Volumétricas

► DIAGRAMA PV

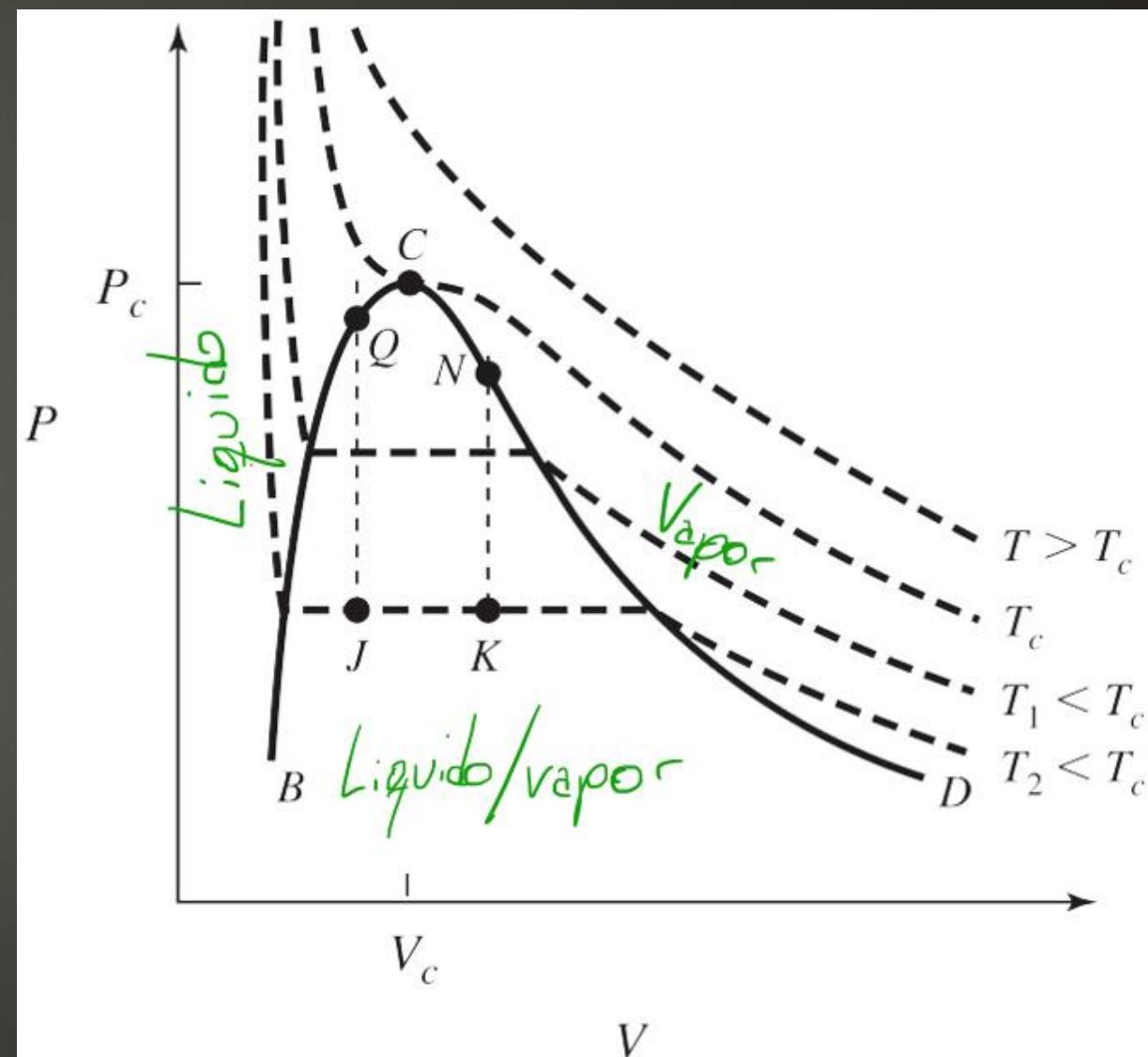
- Regiões do líquido, líquido/vapor e vapor
- Isotermas, linhas verticais,
- em temperaturas maiores que T_c ($T > T_c$)
 - não cruzam uma fronteira entre fases.
- As linhas T_1 e T_2 são temperaturas subcríticas,
 - e são formadas por três segmentos.
- O segmento horizontal
 - todas as misturas possíveis
 - de líquido e vapor em equilíbrio,
 - 100% de líquido no extremo esquerdo
 - e 100% de vapor no extremo direito.



Propriedades Volumétricas

► DIAGRAMA PV

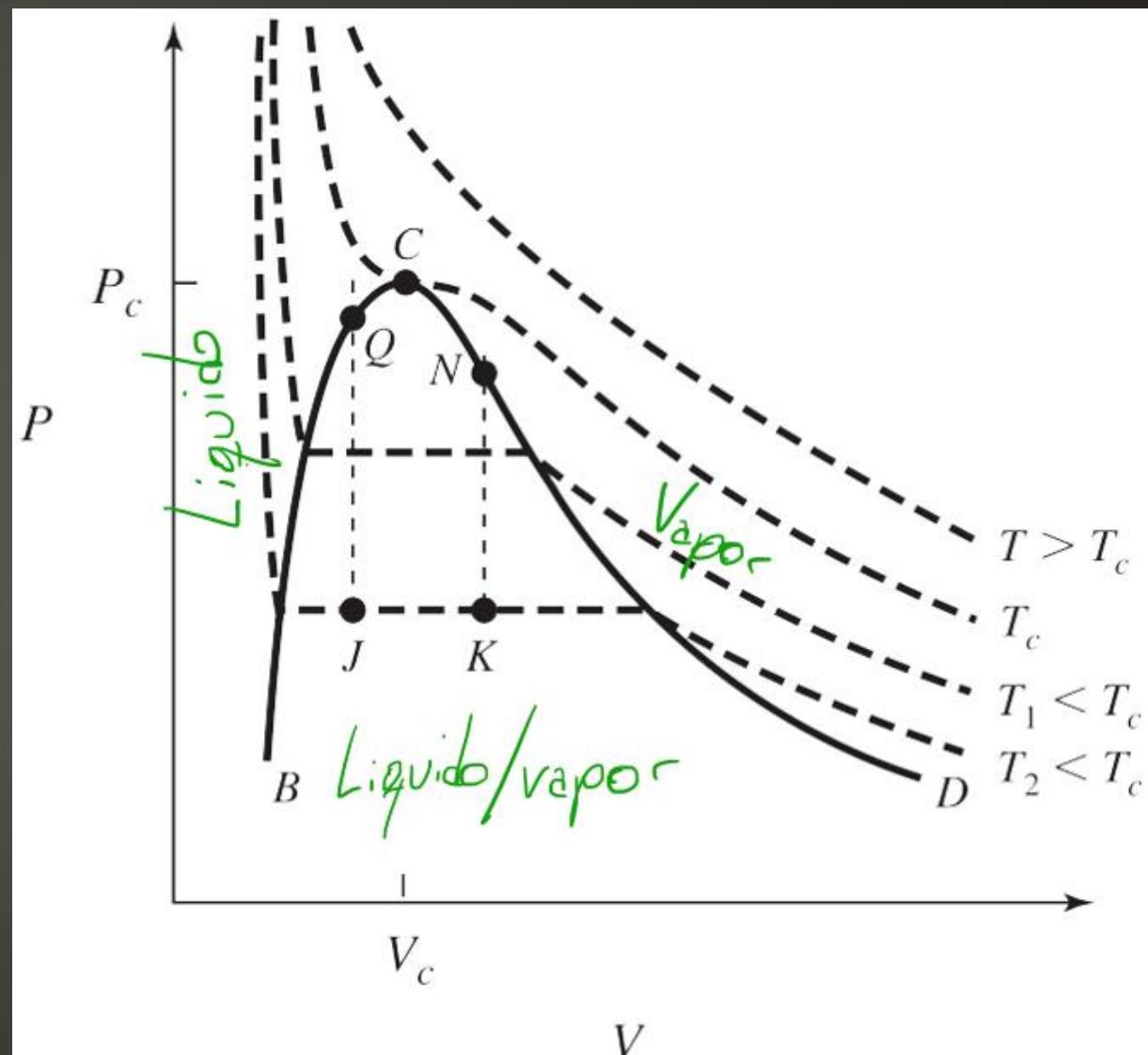
- Domo BCD ,
- metade esquerda ($B \ C$)
 - líquidos em uma fase única (monofásica)
 - temperaturas de vaporização (ebulição),
- metade direita($C \ D$)
 - vapores em uma fase única (monofásica)
 - temperaturas de condensação.
- Líquidos e vapores na curva BCD
 - são ditos saturados,
 - e as fases equilíbrio são conectadas
 - pela linha horizontal da isoterma
 - na pressão de saturação da isoterma.



Propriedades Volumétricas

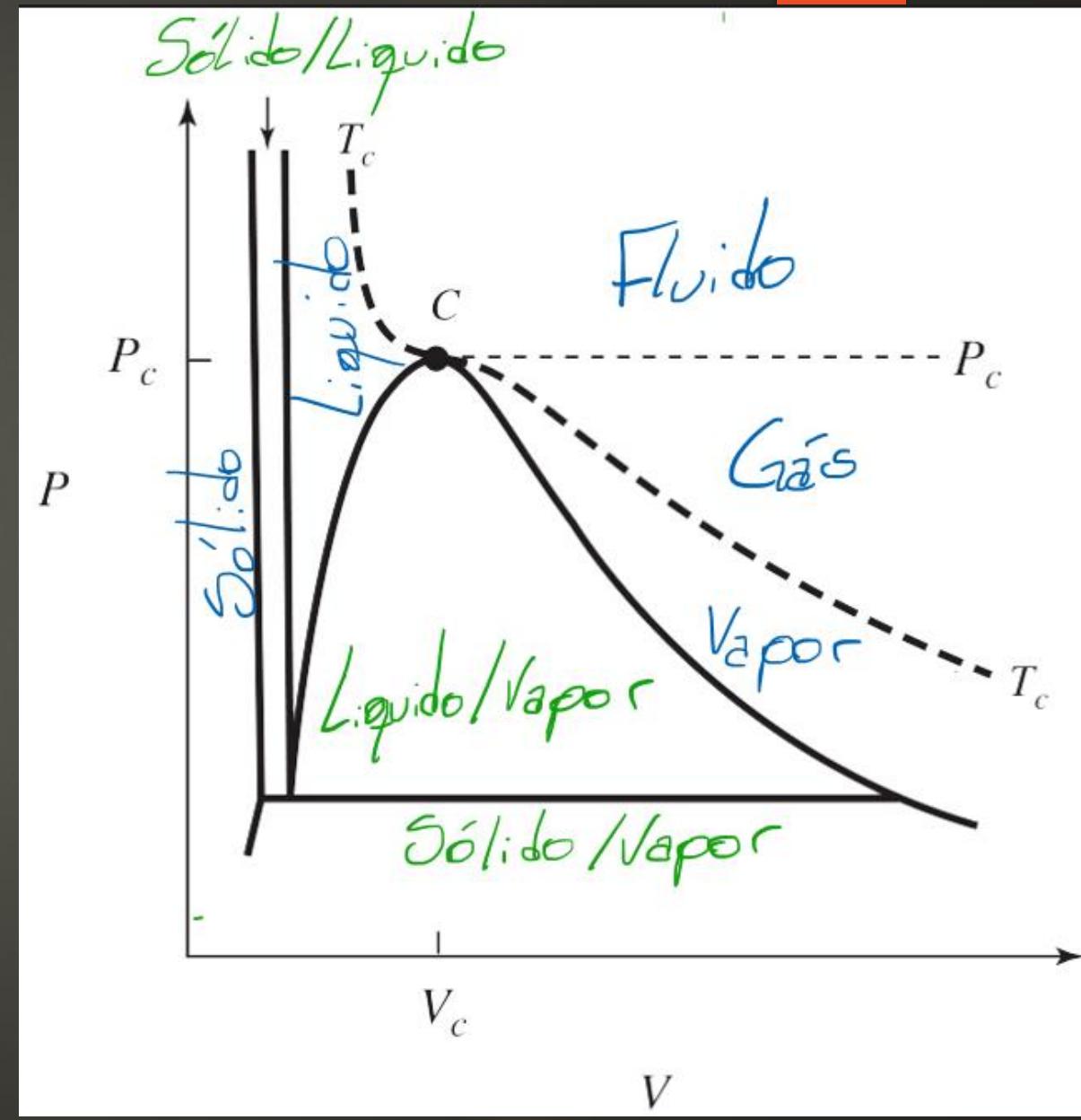
► DIAGRAMA PV

- A pressão de vapor, é um ponto na
 - no qual uma isoterma (linha vertical)
 - cruza a curva de vaporização.
- A região bifásica líquido/vapor
 - encontra-se abaixo do domo BCD ;
- A região do líquido sub-resfriado
 - encontra-se à esquerda
 - da curva do líquido saturado BC ,
- A região do vapor superaquecido
 - encontra-se à direita do vapor saturado CD .



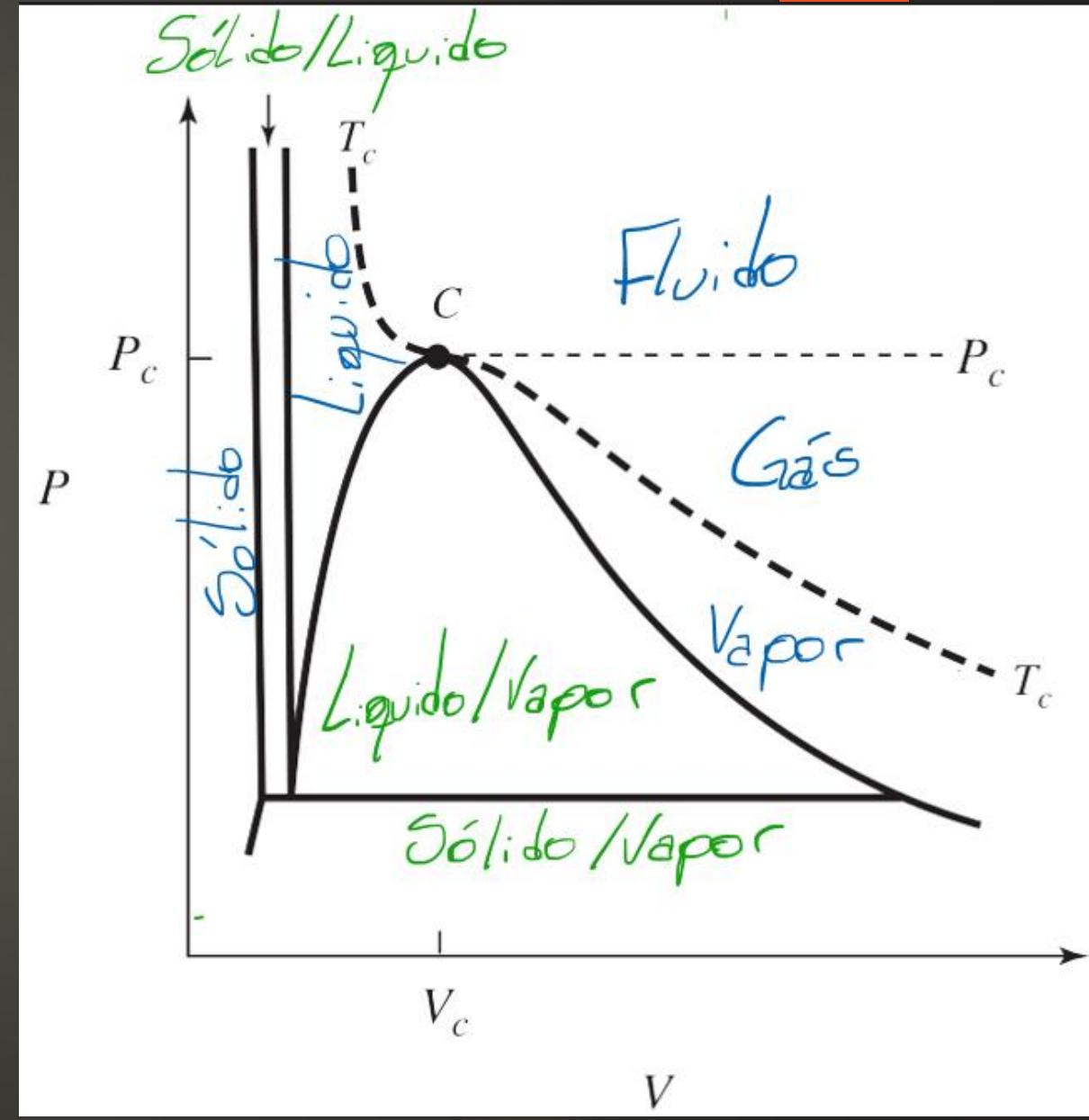
Propriedades Volumétricas

- DIAGRAMA PV
- Para uma dada P,
 - líquido sub-resfriado existe
 - a temperaturas inferiores,
 - O vapor superaquecido existe
 - em T superiores à do ponto de ebullição.
 - Isotermas do líquido sub-resfriado
 - são muito inclinadas,
 - porque o volume de líquidos varia pouco
 - com grandes variações na pressão.



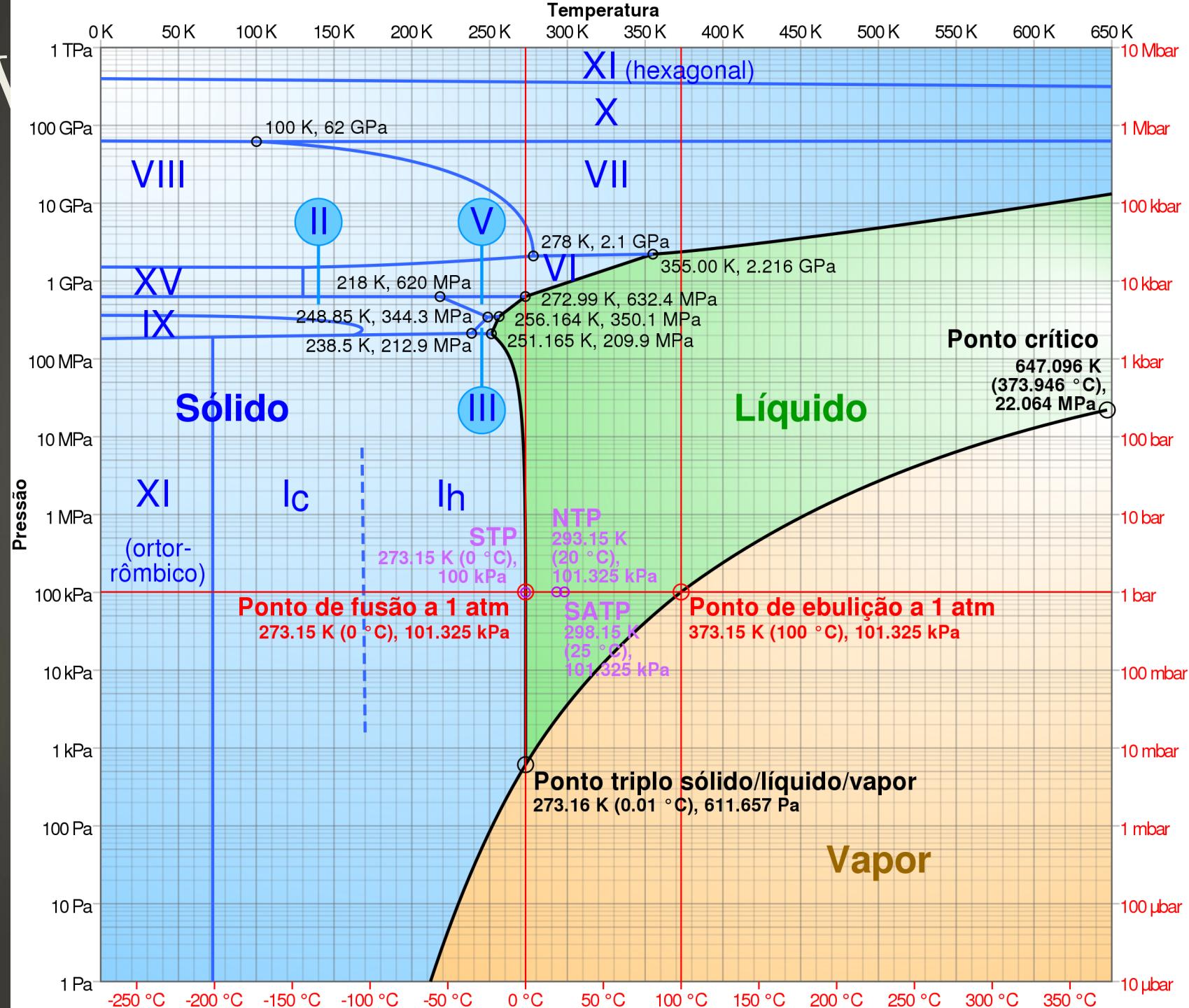
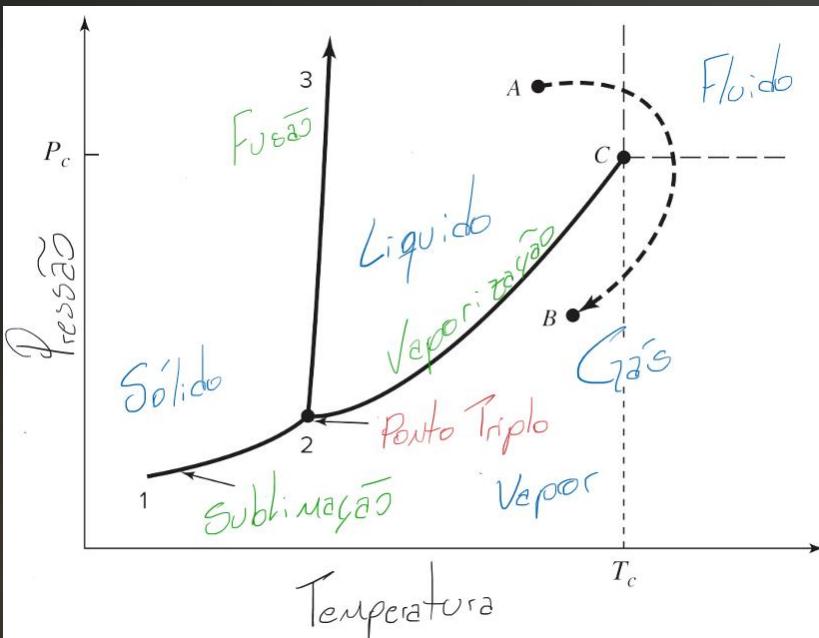
Propriedades Volumétricas

- DIAGRAMA PV
- Na região bifásica,
 - as retas horizontais das isotermas
 - tornam-se progressivamente menores,
 - na medida em que a T aumenta,
 - sendo reduzidos a um ponto em C .
- A isoterma crítica, T_c ,
 - Passa no ponto crítico C no topo do domo,
 - onde as fases líquida e vapor
 - se tornam uma só.



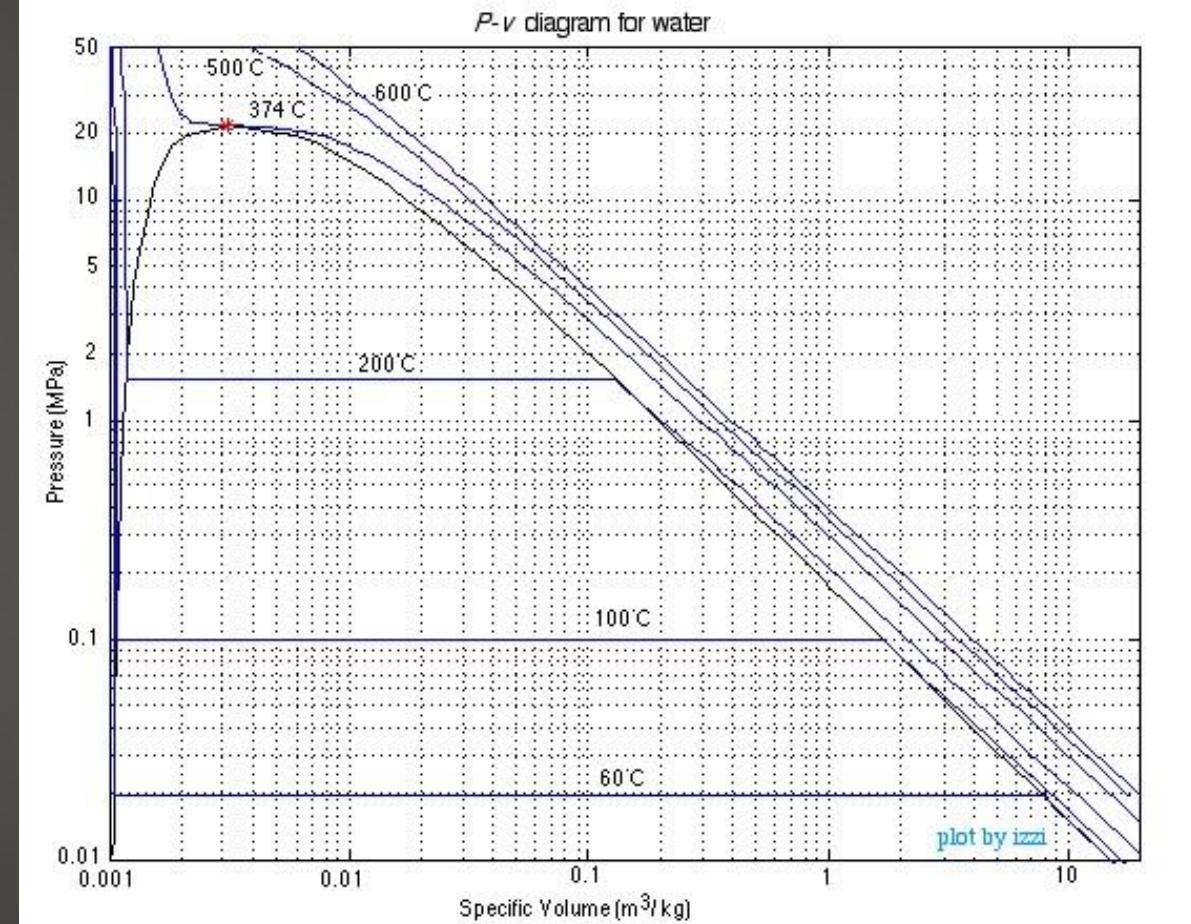
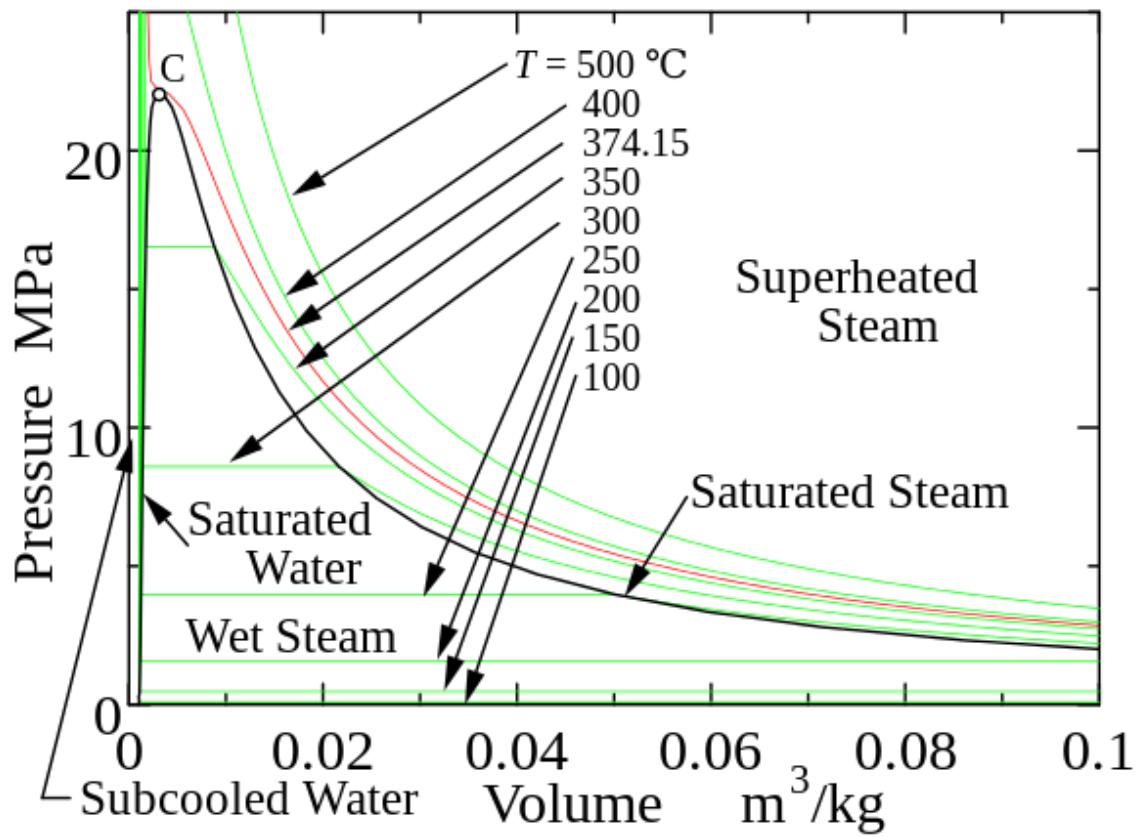
Propriedades V

► DIAGRAMA PT



Propriedades Volumétricas

► DIAGRAMA PV



Propriedades Volumétricas

► REGIÃO MONOFÁSICA

► Relação P, V e T em região monofásica

$$f(P, V, T) = 0$$

► equação de estado PVT , que relaciona

- pressão, volume molar ou específico e temperatura
- para um fluido homogêneo puro em equilíbrio.

► A equação de estado do gás ideal, $PV = RT$,

- tem validade a baixas pressões.

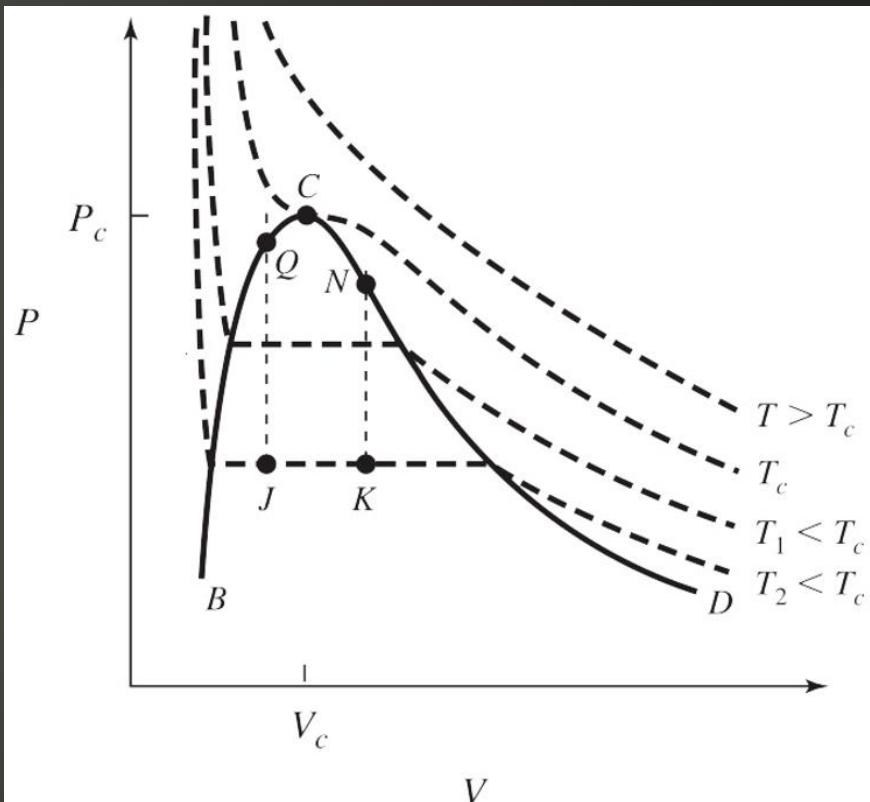
► Pode ser resolvida para qualquer uma das três grandezas

- P, V ou T , como uma função das outras duas.

► Por exemplo, V como uma função de T e P ,

► então $V = V(T, P)$ e

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T dP \quad 3.1$$



Propriedades Volumétricas

► REGIÃO MONOFÁSICA

$$dV = \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P dT + \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T dP \quad 3.1$$

► Onde as derivadas parciais são definidas como:

► Expansividade volumétrica:

$$\beta \equiv \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial T} \right)_P \quad 3.2$$

► Compressibilidade isotérmica:

$$\kappa \equiv - \frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad 3.3$$

► Combinando 3.1 com 3.2 e 3.3

$$\frac{dV}{V} = \beta dT - \kappa dP \quad 3.4$$

Propriedades Volumétricas

- REGIÃO MONOFÁSICA
 - Para líquidos as isotermas são muito inclinadas e próximas
 - $(\partial V / \partial T)_P$, $(\partial V / \partial P)_T$, β e κ são pequenos.
 - Idealização do fluido incompressível, para o qual β e κ são nulos.
 - modelo simples para o comportamento de líquidos
 - Não há equação de estado para fluido incompressível,
 - pois V é independente de T e P .
 - Para líquidos, β é quase sempre positiva e κ é positiva.
 - Longe do ponto crítico, β e κ variam pouco com a temperatura e a pressão,
 - para pequenas variações em T e P , integra-se 3.4 considerando constantes
$$\ln \frac{V_2}{V_1} = \beta(T_2 - T_1) - \kappa(P_2 - P_1) \quad 3.5$$
 - Mais abrangente que o fluido incompressível.

Propriedades Volumétricas

► EXEMPLO 3.1

► Para acetona líquida a $20^{\circ}C$ e 1 bar,

$$\beta = 1,487 \times 10^{-3} \circ C^{-1}$$

$$\kappa = 62 \times 10^{-6} bar^{-1}$$

$$V = 1,287 cm^3 g^{-1}$$

► Para a acetona, determine:

►(a) O valor de $(\partial P / \partial T)_v$ a $20^{\circ}C$ e 1 bar.

►(b) A pressão gerada pelo aquecimento a V constante, de $20^{\circ}C$ e 1 bar até $30^{\circ}C$.

►(c) A variação no volume para uma variação de $20^{\circ}C$ e 1 bar para $0^{\circ}C$ e 10 bar.

Propriedades Volumétricas

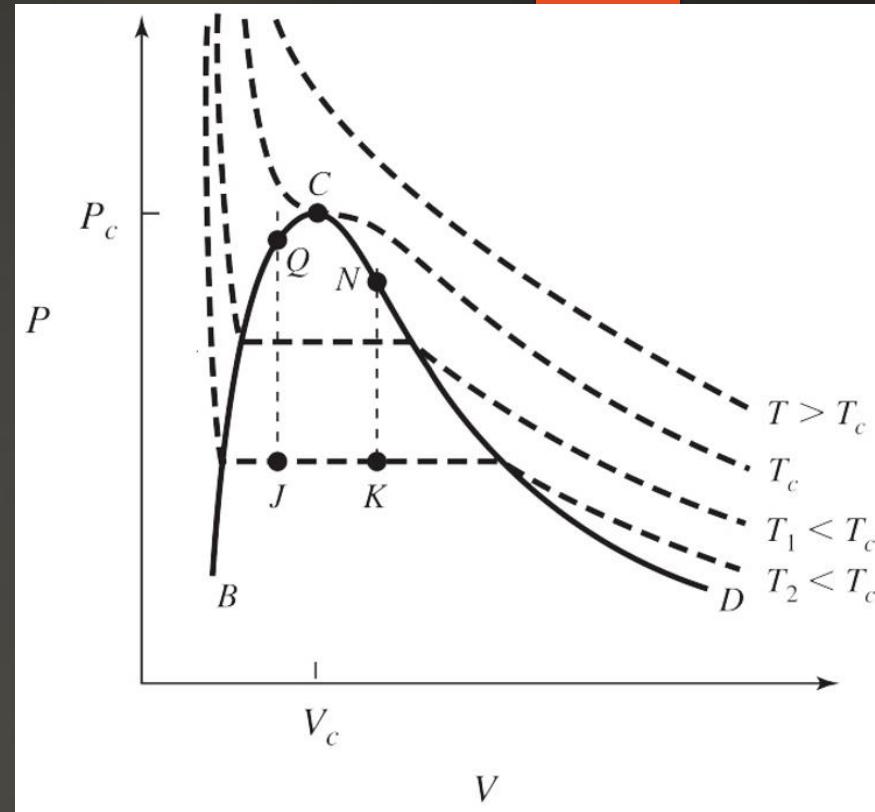
- EQUAÇÕES DE ESTADO DO TIPO VIRIAL
- Isotermas para gases e vapores, p
 - são curvas simples, V diminui com o aumento de P
 - O produto PV , em dada T , seria quase constante
 - e mais facilmente como uma função de P .
 - Isso sugere a representação de PV
 - para uma isotermia por série de potências em P :

$$PV = a + bP + cP^2 + \dots$$

- Se $b \equiv aB'$, $c \equiv aC'$, etc., então,

$$PV = a(1 + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots) \quad 3.6$$

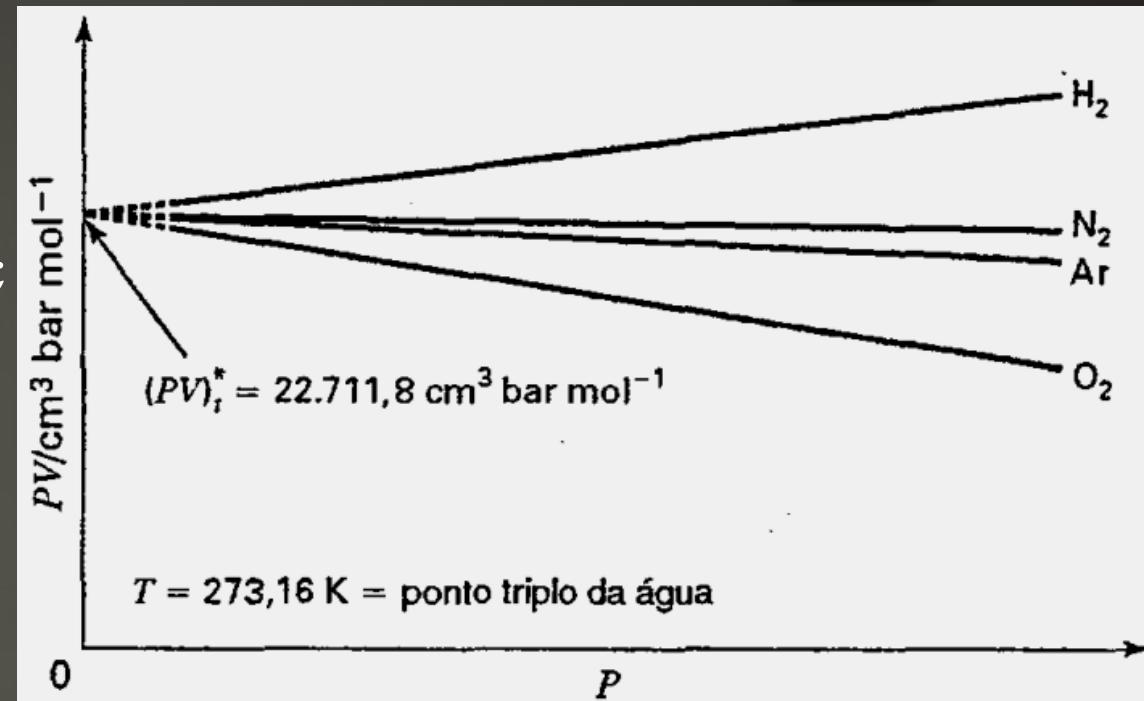
- onde a, B', C' , etc., são constantes dada T e uma dada espécie química.
- Para baixas pressões usa-se apenas dois termos.



Propriedades Volumétricas

- TEMPERATURAS DE GÁS IDEAL;
- Constante Universal dos Gases
- Os parâmetros B' , C' , etc., em 3.6
 - são funções da temperatura e da espécie química;
- Mas o parâmetro a , segundo dados experimentais,
 - é a mesma função de temperatura
 - para todas as espécies químicas.
- Por medidas de volume em função da P
 - para vários gases à temperatura constante.
- No gráfico PV vs. P para quatro gases na temperatura do ponto triplo da água.
 - O valor limite de PV quando $P \rightarrow 0$ é o mesmo para todos os gases.
- Nesse limite (indicado por um asterisco), a Eq. (3.6) se transforma em:

$$(PV)^* = a = f(T)$$



Propriedades Volumétricas

- TEMPERATURAS DE GÁS IDEAL;
- Para expressar a função de T em $f(T)$, escrevemos

- $(PV)^*$ diretamente proporcional a T ,
- com R sendo a constante de proporcionalidade:

$$(PV)^* = a \equiv RT \quad 3.7$$

- Estabelecemos o valor de $273,16K$
- para a temperatura do ponto triplo da água (subscrito t) :

$$(PV)_t^* = R \times 273,16K \quad 3.8$$

- A divisão da Eq. (3.7) pela Eq. (3.8) fornece

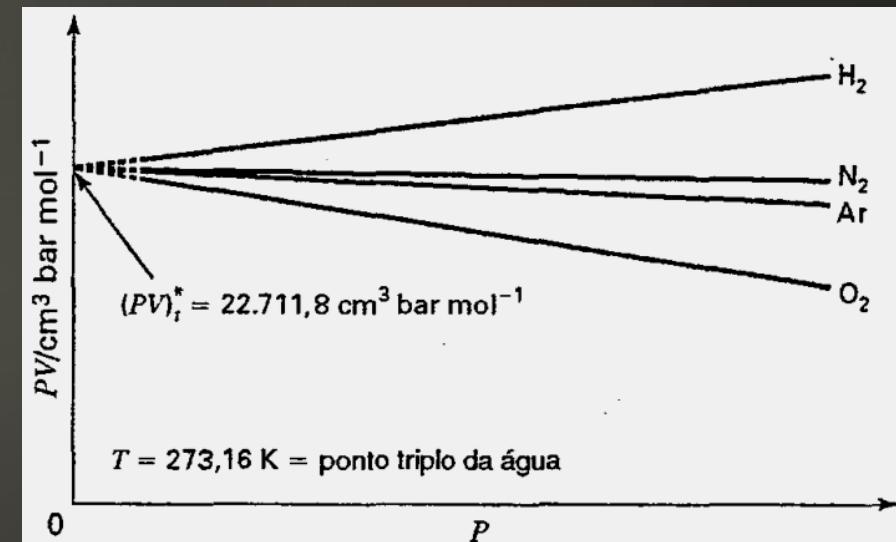
$$\frac{(PV)^*}{(PV)_t^*} = \frac{T/K}{273,16K}$$

ou

$$\frac{T}{K} = 273,16 \frac{(PV)^*}{(PV)_t^*} \quad 3.9$$

Propriedades Volumétricas

- TEMPERATURAS DE GÁS IDEAL;
- O estado de um gás
 - ocorre na condição limite quando $P \rightarrow 0$ merece discussão.
- À medida que a pressão diminui,
 - as moléculas que constituem um gás se afastam uma das outras,
 - e o volume das próprias moléculas
 - se torna uma fração cada vez menor do volume total
- As forças de atração entre as moléculas ficam menores
 - por causa do aumento da distância entre elas
- No limite, quando $P \rightarrow 0$,
 - as moléculas estão separadas por uma distância infinita
 - e as forças intermoleculares se aproximam de zero.



Propriedades Volumétricas

► TEMPERATURAS DE GÁS IDEAL;

- Essas condições definem um estado de gás ideal,
- e a Eq. (3.9) estabelece a escala de temperatura do gás ideal.

$$T/K = 273,16 \frac{(PV)^*}{(PV)_t^*}$$

- A constante de proporcionalidade R na Eq. (3.7) é a constante universal dos gases.
- O seu valor numérico é determinado por meio da Eq. (3.8) por dados experimentais PVT :

$$R = \frac{(PV)_t^*}{273,16K}$$

- Que não podem ser obtidos na pressão igual a zero,
- sendo medidos pressões não-nulas e extrapolados

- O valor aceito para $(PV)_t^*$ é de $22.711,8\text{cm}^3\text{ bar mol}^{-1}$, levando ao seguinte valor para $R:$

$$R = \frac{22.711,8\text{cm}^3\text{ bar mol}^{-1}}{273,16K} = 83,1447\text{cm}^3\text{barmol}^{-1}\text{K}^{-1}$$

- Tabela A.2 do Apêndice A.

Table A.2: Values of the Universal Gas Constant

$$\begin{aligned} R &= 8.314 \text{ J}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = 8.314 \text{ m}^3\cdot\text{Pa}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \\ &= 83.14 \text{ cm}^3\cdot\text{bar}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = 8314 \text{ cm}^3\cdot\text{kPa}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \\ &= 82.06 \text{ cm}^3\cdot(\text{atm})\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = 62,356 \text{ cm}^3\cdot(\text{torr})\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} \\ &= 1.987 \text{ (cal)}\cdot\text{mol}^{-1}\cdot\text{K}^{-1} = 1.986 \text{ (Btu)(lb mole)}^{-1}(\text{R})^{-1} \\ &= 0.7302 \text{ (ft)}^3(\text{atm})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} = 10.73 \text{ (ft)}^3(\text{psia})(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} \\ &= 1545 \text{ (ft)(lb}_f\text{)}(\text{lb mol})^{-1}(\text{R})^{-1} \end{aligned}$$

Propriedades Volumétricas

► DUAS FORMAS DA EQUAÇÃO DO TIPO VIRIAL

► Fator de compressibilidade (z)

► propriedade termodinâmica auxiliar - razão adimensional

$$Z \equiv \frac{PV}{RT} \quad 3.10$$

► Juntando 3.10 e 3.7 ($a = RT$) com 3.6 temos

$$Z = 1 + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots \quad 3.11$$

► Podendo ser escrita na forma alternativa em termos de volume

$$Z = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots \quad 3.12$$

► Onde 3.11 e 3.12 são expansões do tipo virial,

► os parâmetros B' , C' , D' , etc., e B , C , D , etc., são os coeficientes do tipo virial,

► B' e B são os segundos coeficientes do tipo virial; C' e C são os terceiros; etc

► Os coeficientes do tipo virial são somente funções de temperatura e do gás

Propriedades Volumétricas

► DUAS FORMAS DA EQUAÇÃO DO TIPO VIRIAL

► Os coeficientes das Eqs. (3.11) e (3.12) estão relacionados como segue:

$$B' = \frac{B}{RT} \quad (3.13a) \quad C' = \frac{C - B^2}{(RT)^2} \quad (3.13b) \quad D' = \frac{D - 3BC + 2B^3}{(RT)^3} \quad 3.13c$$

► As equações do tipo virial tem base na mecânica estatística,

► significado físico para os coeficientes do tipo virial

► na expansão em $1/V$,

► o termo B/V vem das interações entre pares de moléculas

► o termo C/V^2 em função das interações entre três corpos; etc.

Propriedades Volumétricas

- O GÁS IDEAL
- Os coeficientes de virial aparecem em função das interações moleculares,
 - se não houver interação, os coeficientes são nulos,
 - a expansão do tipo virial se torna
$$Z = 1 \quad \text{e} \quad PV = RT$$
- Diminuindo a pressão a temperatura constante, V aumenta
 - e os termos $B/V, C/V^2, D/V^3, \dots$ na Eq. (3.12) diminuem.
- Para $P \rightarrow 0, Z \rightarrow 1$, pois $V \rightarrow \infty$ se torna infinito.
- A energia interna de um gás real é uma função da pressão e da temperatura. $U = f(T, P)$
 - Baixas pressões diminuem as interações
 - Sem interações U depende somente da temperatura.
 - Assim, um gas ideal tem a seguinte equação de estado:

$$PV = RT \quad (\text{gás ideal}) \quad 3.14$$

Propriedades Volumétricas

► O GÁS IDEAL

- E sua energia interna é uma função somente da temperatura:

$$U = U(T) \quad (\text{gás ideal}) \quad 3.15$$

► RELAÇÕES DE PROPRIEDADES PARA UM GÁS IDEAL

- Para um gás ideal a capacidade calorífica a volume constante, C_V
- é uma função somente da temperatura:

$$C_V \equiv \left(\frac{\partial U}{\partial T} \right)_V = \frac{dU(T)}{dT} = C_V(T) \quad 3.16$$

- O que também é válido para a Entalpia, pois

$$H \equiv U + PV = U(T) + RT = H(T) \quad 3.17$$

- A capacidade calorífica a pressão constante C_P , é uma função somente da temperatura:

$$C_P \equiv \left(\frac{\partial H}{\partial T} \right)_P = \frac{dH(T)}{dT} = C_P(T) \quad 3.18$$

Propriedades Volumétricas

► RELAÇÕES DE PROPRIEDADES PARA UM GÁS IDEAL

► Relacionando C_P e C_V , para um gás ideal, pela diferenciação da Eq. (3.17), temos

$$C_P = \frac{dH}{dT} = \frac{dU}{dT} + R = C_V + R \quad 3.19$$

► Se C_p e C_v não são constantes para um gás ideal,

- elas variam com a temperatura.
- e a sua diferença é igual a R .

► Para qualquer mudança de estado de um gás ideal (3.16) e (3.18) levam a:

$$dU = C_V dT \quad (3.20a) \qquad \Delta U = \int C_V dT \quad (3.20b)$$

$$dH = C_P dT \quad (3.21a) \qquad \Delta H = \int C_P dT \quad (3.21b)$$

- Como tanto U quanto o C_V de um gás ideal são funções somente de T,
- ΔU para um gás ideal é sempre dado pela Eq. (3.20b),
- independentemente do tipo de processo que causa a mudança.

Propriedades Volumétricas

► EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS

► O trabalho reversível em um sistema fechado

► para uma unidade de massa ou um mol é

$$dW = -PdV$$

► Para um gás ideal em um sistema fechado,

► a primeira lei pode ser combinada com a Eq. (3.20a) para fornecer:

$$dQ + dW = C_VdT$$

► ou ainda,

$$dQ = C_VdT + PdV$$

► que é função de P, V e T , mas somente duas são independentes.

► O equacionamento depende de qual par dessas variáveis escolhida como independente;

► Com $P = RT/V$, temos

$$dQ = C_VdT + RT \frac{dV}{V} \quad 3.22 \qquad dW = -RT \frac{dV}{V} \quad 3.23$$

Propriedades Volumétricas

► EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS

► Com $V = RT/P$ e com C_V dado pela Eq. (3.19),

► as equações para dQ e dW se tornam:

$$dQ = C_P dT - RT \frac{dP}{P} \quad 3.24$$

$$dW = -RdT + RT \frac{dP}{P} \quad 3.25$$

► Como $T = PV/R$, o trabalho é simplesmente $dW = -PdV$,

► e com C_V dado novamente pela Eq. (3.19),

$$dQ = \frac{C_V}{R} V dP + \frac{C_P}{R} P dV \quad 3.26$$

► Essas equações podem ser usadas para gases ideais em vários tipos de processos,

► em que o sistema é fechado e que o processo é mecanicamente reversível.

Propriedades Volumétricas

- EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS
- PROCESSO ISOTÉRMICO

► Pelas Eqs. (3.20b) e (3.21b),

$$\Delta U = \Delta H = 0$$

► Pelas Eqs. (3.22) e (3.24),

$$Q = RT \ln \frac{V_2}{V_1} = -RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

► Pelas Eqs. (3.23) e (3.25),

$$W = -RT \ln \frac{V_2}{V_1} = RT \ln \frac{P_2}{P_1}$$

► Como $Q = -W$, logo,

$$Q = -W = RT \ln \frac{V_2}{V_1} = -RT \ln \frac{P_2}{P_1} \quad (T \text{ const.}) \qquad 3.27$$

Propriedades Volumétricas

► EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS

► Processo Isobárico

► Pelas Eqs. (3.20b) e (3.21b),

$$\Delta U = \int C_V dT \quad \text{e} \quad \Delta H = \int C_P dT$$

► e pelas Eqs. (3.24) e (3.25),

$$Q = \int C_P dT \quad \text{e} \quad W = -R(T_2 - T_1)$$

► Como $Q = \Delta H$, temos

$$Q = \Delta H = \int C_P dT \quad (P \text{ const.}) \quad 3.28$$

Propriedades Volumétricas

► EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS

► Processo Isocórico (V Constante)

► Novamente, as Eqs. (3.20b) e (3.21b) implicam:

$$\Delta U = \int C_V dT \quad \text{e} \quad \Delta H = \int C_P dT$$

► Pela Eq. (3.22) e pela equação básica para o trabalho,

$$Q = \int C_V dT \quad \text{e} \quad W = - \int P dV = 0$$

► Como $Q = \Delta U$ temos,

$$Q = \Delta U = \int C_V dT \text{ (} V \text{ const.} \text{)} \quad 3.29$$

Propriedades Volumétricas

- EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS
- PROCESSO ADIABÁTICO; CAPACIDADES CALORÍFICAS CONSTANTES
 - não há transferência de calor entre o sistema e sua vizinhança; $dQ = 0$.
 - (3.22), (3.24) e (3.26) são iguais a zero.
- Integrando, com C_V e C_P constantes,
 - temos relações simples entre as variáveis T, P e V ,
 - válidas na compressão ou expansão adiabática,
 - mecanicamente reversível, de gases ideais.
- Assim, 3.22 pode ser escrita como:

$$\frac{dT}{T} = -\frac{R}{C_V} \frac{dV}{V}$$

- A integração, com C_V constante, fornece:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{R/C_V}$$

Propriedades Volumétricas

- EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS
- PROCESSO ADIABÁTICO; CAPACIDADES CALORÍFICAS CONSTANTES

► Analogamente, as Eqs. (3.24) e (3.26) levam a:

$$\frac{T_2}{T_1} = \left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{R/C_P} \quad e \quad \frac{P_2}{P_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{C_P/C_V}$$

► Essas equações também podem ser expressas na forma:

$$TV^{\gamma-1} = \text{const.} \quad 3.30\text{a} \quad TP^{(1-\gamma)/\gamma} = \text{const.} \quad 3.30\text{b} \quad PV^\gamma = \text{const.} \quad 3.30\text{c}$$

► Onde

$$\gamma \equiv \frac{C_P}{C_V} \quad 3.31$$

- Aplicáveis aos gases ideais com capacidades caloríficas constantes
- em expansões ou compressões adiabáticas e mecanicamente reversíveis.

Propriedades Volumétricas

- EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS
- PROCESSO ADIABÁTICO; CAPACIDADES CALORÍFICAS CONSTANTES
- Para gases ideais, o trabalho adiabático em sistema fechado, é :

$$dW = dU = C_V dT$$

- Para C_V constante,

$$W = \Delta U = C_V \Delta T \quad 3.32$$

- que pode ser escrita em termos da razão entre capacidades caloríficas γ :

$$\gamma \equiv \frac{C_P}{C_V} = \frac{C_V + R}{C_V} = 1 + \frac{R}{C_V} \quad \text{ou} \quad C_V = \frac{R}{\gamma - 1}$$

- Assim,

$$W = C_V \Delta T = \frac{R \Delta T}{\gamma - 1}$$

- Como $RT_1 = P_1V_1$ e $RT_2 = P_2V_2$, temos

$$W = \frac{RT_2 - RT_1}{\gamma - 1} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma - 1} \quad 3.33$$

Propriedades Volumétricas

- EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS
- PROCESSO ADIABÁTICO; CAPACIDADES CALORÍFICAS CONSTANTES

- As Eqs. (3.32) e (3.33) válidas para
 - processos adiabáticos de compressão e de expansão,
 - em sistemas fechados, reversíveis ou não,
 - pois P , V e T são funções de estado, independentes da trajetória.

► Se, T_2 e V_2 são desconhecidos, elimina-se V_2 da Eq. (3.33),

► pela Eq. (3.30c) válida para processos reversíveis, logo

$$W = \frac{P_1 V_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] = \frac{RT_1}{\gamma - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\gamma-1)/\gamma} - 1 \right] \quad 3.34$$

- Que é válida somente para gases ideais com capacidades caloríficas constantes,
- em processos adiabáticos, mecanicamente reversíveis, em sistemas fechados.

Propriedades Volumétricas

- EQUAÇÕES PARA CÁLCULO DE PROCESSOS COM GASES IDEAIS
- PROCESSO ADIABÁTICO; CAPACIDADES CALORÍFICAS CONSTANTES
 - Para gases reais, as Eqs. (3.30) a (3.34)
 - fornecem aproximações satisfatórias, para pressões baixas.
 - Para gases monoatômicos, $\gamma = 1,67$;
 - valores aproximados de γ são 1,4 para gases diatônicos
 - e 1,3 para gases poliatônicos simples, como CO_2 , SO_2 , NH_3 e CH_4 .

Propriedades Volumétricas

► PROCESSO POLITRÓPICO

► É definido como um processo representado pela equação empírica:

$$PV^\delta = \text{constante} \quad 3.35a$$

► Para um gás ideal, equações análogas às 3.30a e 3.30b são dadas por:

$$TV^{\delta-1} = \text{constante} \quad 3.35b \quad \text{e} \quad TP^{(1-\delta)/\delta} = \text{constante} \quad 3.35c$$

► Avaliando a integral $\int PdV$ obtém-se a Eq. (3.34), com γ substituído por δ :

$$W = \frac{RT_1}{\delta - 1} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\delta-1)/\delta} - 1 \right] \quad 3.36$$

► para capacidades caloríficas constantes,

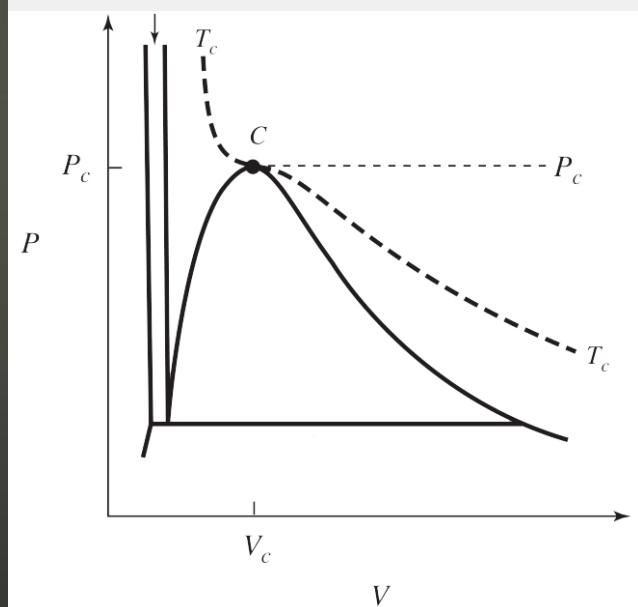
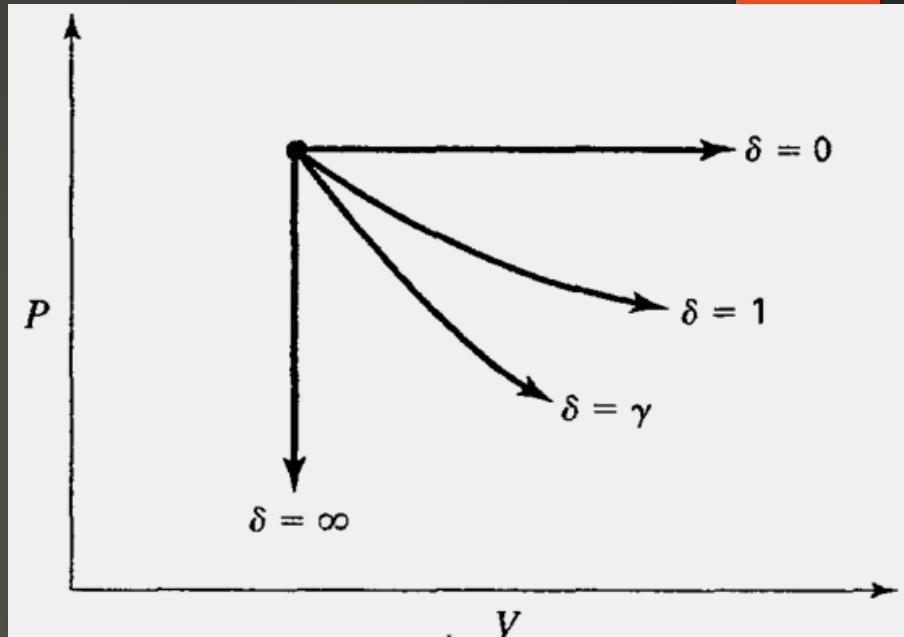
► a primeira lei explicitando Q fornece:

$$Q = \frac{(\delta - \gamma)RT_1}{(\delta - 1)(\gamma - 1)} \left[\left(\frac{P_2}{P_1} \right)^{(\delta-1)/\delta} - 1 \right] \quad 3.37$$

Propriedades Volumétricas

► PROCESSO POLITRÓPICO

- Os processos descritos por quatro trajetórias
 - para valores específicos de δ :
- Processo isobárico: Pela Eq. (3.35a), $\delta = 0$.
- Processo isotérmico: Pela Eq. (3.35b), $\delta = 1$.
- Processo adiabático: $\delta = \gamma$.
- Processo isocórico: Pela Eq. (3.35a), $dV/dP = V/P\delta$;
- Processo a V constante, $\delta = \pm\infty$.



Propriedades Volumétricas

- PROCESSO IRREVERSÍVEL
 - Todas as equações desenvolvidas
 - para processos reversíveis, em sistemas fechados,
 - envolvendo gases ideais.
 - Mas as equações de variações nos valores das propriedades (dU , dH , ΔU e ΔH)
 - são válidas para gases ideais, qualquer que seja o processo,
 - reversível e irreversível, em sistemas fechado e aberto,
 - propriedades de estado somente dependem dos estados inicial e final do sistema.
 - Porém , equações de Q ou W , dependem do processo.
 - O trabalho irreversível é calculado em duas etapas.
 - primeiro W é determinado para um processo reversível,
 - para a mesma mudança de estado do processo irreversível.
 - depois esse resultado é multiplicado por uma eficiência
 - para fornecer o trabalho real.

Propriedades Volumétricas

► EXEMPLO 3.2

Ar é comprimido de um estado inicial de 1 bar e $25^{\circ}C$ até um estado final de 5 bar e $25^{\circ}C$, através de três diferentes processos mecanicamente reversíveis em um sistema fechado:

- (a) Aquecimento a volume constante seguido de resfriamento a pressão constante.
- (b) Compressão isotérmica.
- (c) Compressão adiabática seguida de resfriamento a volume constante.

Considere que o ar seja um gás ideal com capacidades caloríficas constantes, $C_V = (5/2)R$ e $C_P = (7/2)R$. Calcule o trabalho necessário, o calor transferido e as variações na energia interna e na entalpia do ar para cada processo. A $298,15K$ e 1 bar, o volume molar do ar é de $0,02479\text{m}^3\text{mol}^{-1}$

Propriedades Volumétricas

► EXEMPLO 3.3

Um gás ideal passa pela seguinte sequência de processos mecanicamente reversíveis em um sistema fechado:

(a) De um estado inicial a $70^{\circ}C$ e 1 bar, ele é comprimido adiabaticamente até $150^{\circ}C$.

(b) Ele é então resfriado de $150^{\circ}C$ a $70^{\circ}C$, a pressão constante.

(c) Finalmente, ele é expandido isotermicamente até o seu estado original. Calcule W , Q , ΔU e ΔH para cada um dos três processos e para o ciclo completo. Considere $C_v = (3/2)R$ e $C_p = (5/2)R$

Propriedades Volumétricas

- EXEMPLO 3.4
- Se os processos do Exemplo 3.3 ocorrerem irreversivelmente, mas de tal forma que causem exatamente as mesmas mudanças de estado - as mesmas variações em P, T, U e H - então resultarão valores diferentes para Q e W . Calcule Q e W se cada etapa for realizada com uma eficiência de 80%.

Propriedades Volumétricas

► EXEMPLO 3.6

► Ar escoa, a uma vazão constante, através de um tubo horizontal, para uma válvula parcialmente fechada. O tubo que deixa a válvula é suficientemente maior do que o tubo antes de sua entrada, de tal forma que a variação da energia cinética do ar ao escoar através da válvula é desprezível. A válvula e os tubos são isolados. As condições do ar a montante da válvula são de 20°C e 6 bar, e a pressão a jusante é de 3 bar. Sendo o ar considerado um gás ideal, qual é a sua temperatura a uma certa distância a jusante da válvula?

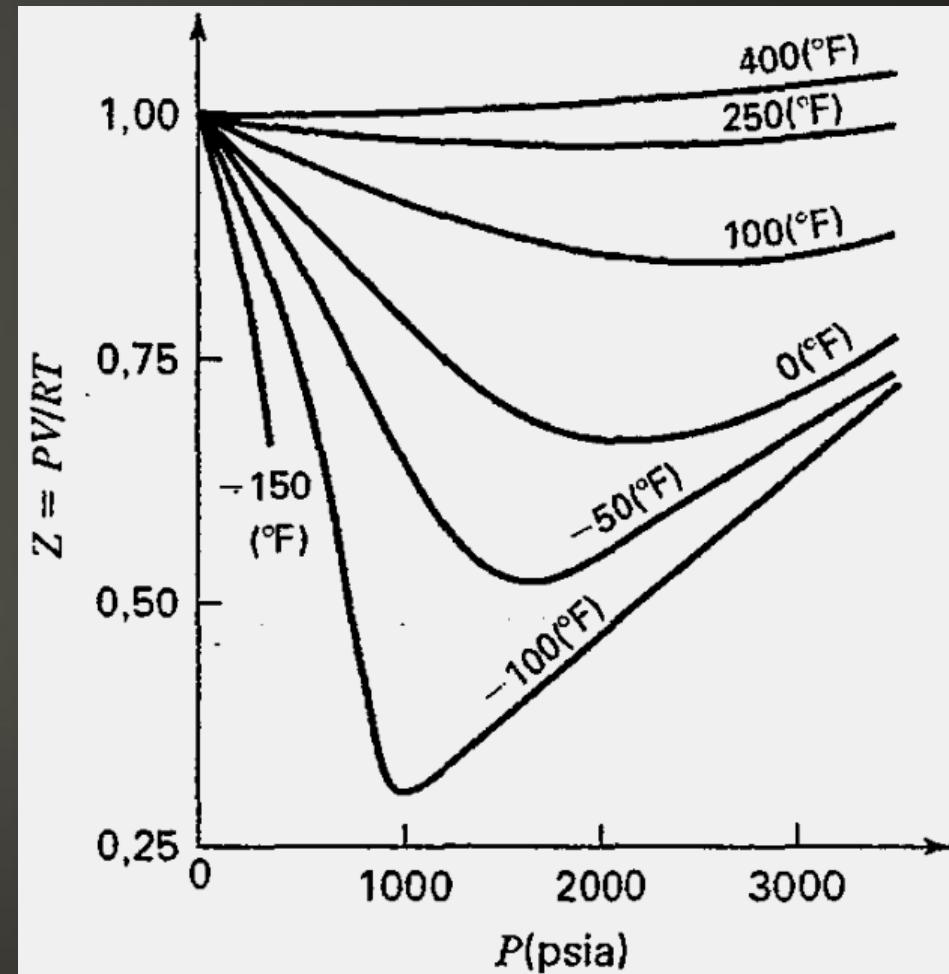
Propriedades Volumétricas

► EXEMPLO 3.7

► Se, no Exemplo 3.6, a vazão do ar for de 1mol s^{-1} e os diâmetros internos dos tubos a montante e a jusante da válvula forem de 5cm , qual será a variação da energia cinética do ar e qual será a sua variação de temperatura? Para o ar, $C_p = (7/2)R$ e $M = 29\text{g mol}^{-1}$.

Propriedades Volumétricas

- APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DO TIPO VIRIAL
- As expansões de virial [(3.11) e (3.12)] são séries infinitas.
- Usada quando até três termos geram boas aproximações
 - isso ocorre para gases e vapores
 - em pressões baixas ou moderadas.
- Gráfico do fator de compressibilidade para o metano.
- Os valores de Z (a partir dos dados PVT do metano)
 - função da pressão para temperaturas constantes.
- As isotermas se originam no valor $Z = 1$, em $P = 0$,
 - e são quase linhas retas nas pressões baixas.
- A tangente a uma isoterna em $P = 0$
 - é uma boa aproximação



Propriedades Volumétricas

► APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DO TIPO VIRIAL

► a diferenciação da Eq. (3.11) fornece:

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_T = B' + 2C'P + 3D'P^2 + \dots$$

► da qual,

$$\left(\frac{\partial Z}{\partial P}\right)_{T;P=0} = B'$$

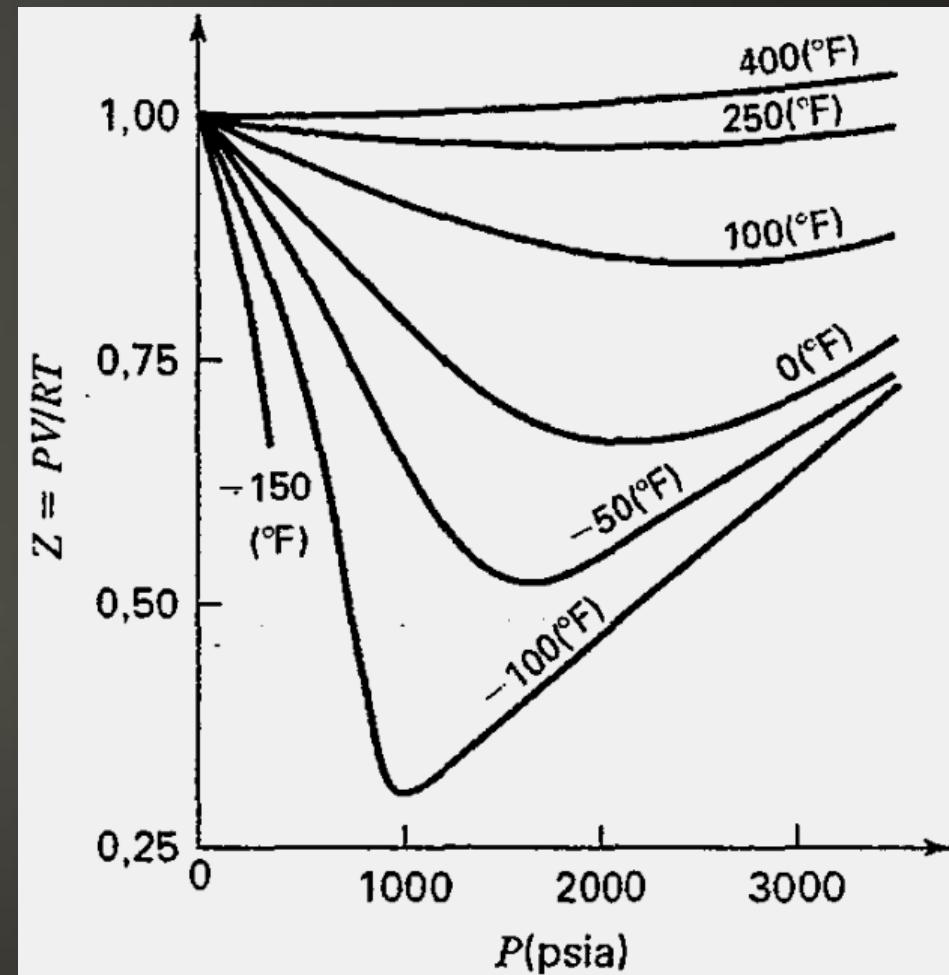
► Substituindo B'

$$Z = \frac{PV}{RT} = 1 + \frac{BP}{RT} \quad 3.38$$

► A proporcionalidade direta entre Z e P ,

► utilizada para vapores em temperaturas subcríticas
 ► até as suas pressões de saturação.

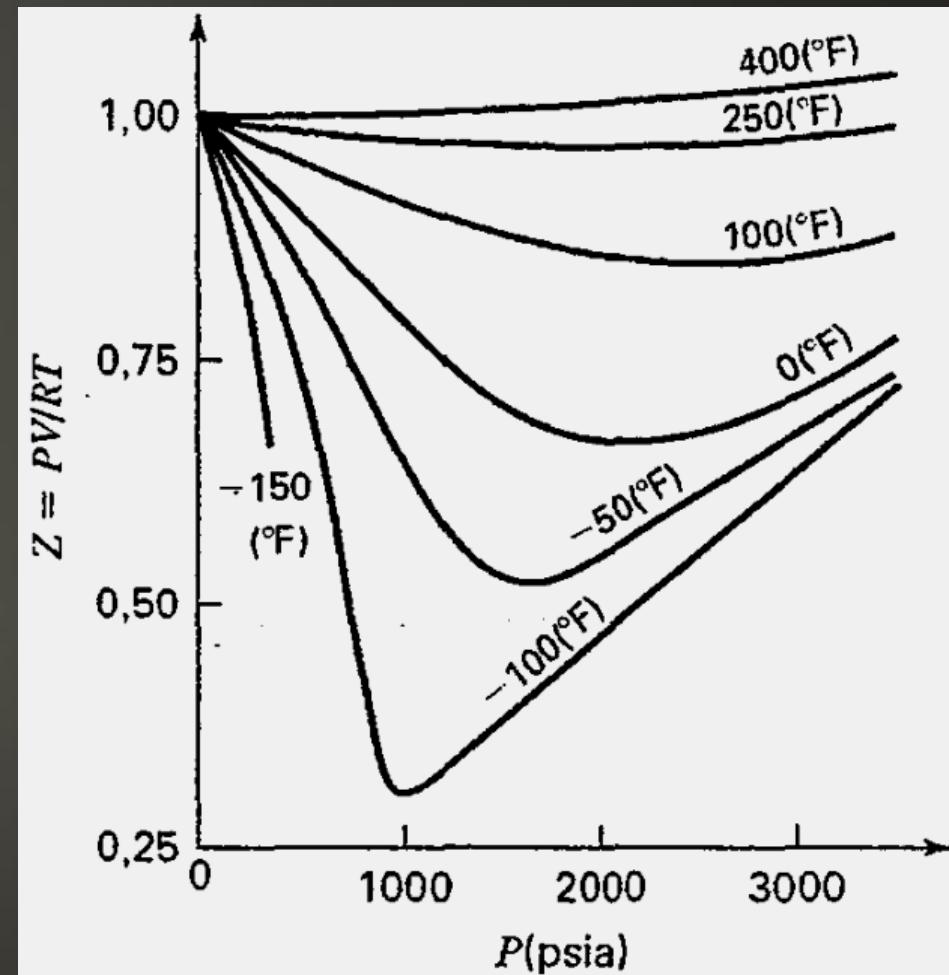
$$Z = 1 + B'P + C'P^2 + D'P^3 + \dots \quad 3.11$$



Propriedades Volumétricas

► APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DO TIPO VIRIAL

- Em temperaturas elevadas,
 - fornece uma aproximação razoável
 - até pressões de várias atmosferas,
 - onde a faixa de pressão aumenta,
 - com o aumento da temperatura.
 - Da mesma forma para 3.12 em temos de volume, temos
- $$Z = \frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B}{V} \quad 3.39$$
- O segundo coeficiente do tipo virial B
 - depende da substância e é função de temperatura.
 - Valores experimentais estão disponíveis
 - É possível estimar



Propriedades Volumétricas

► APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DO TIPO VIRIAL

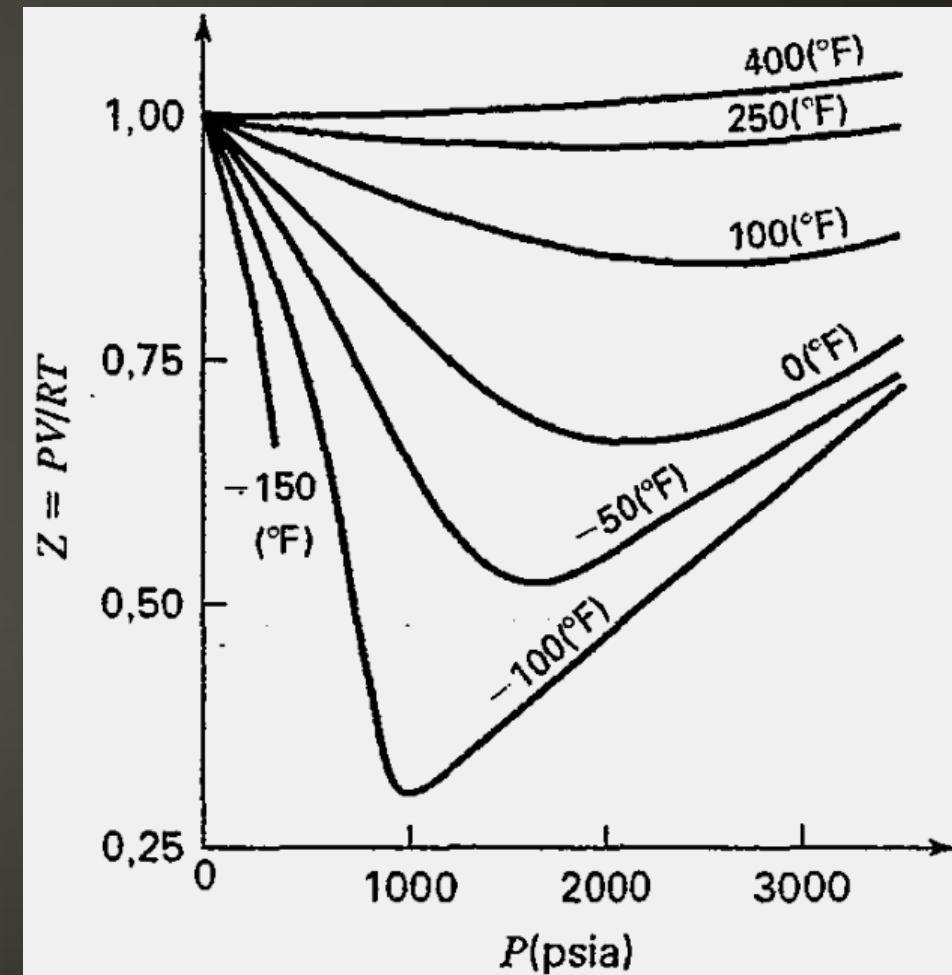
► Para pressões maiores que as aplicáveis,

- mas inferiores à pressão crítica,
- truncava-se no terceiro termo, e tem-se

$$Z = \frac{PV}{RT} = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} \quad 3\ 40$$

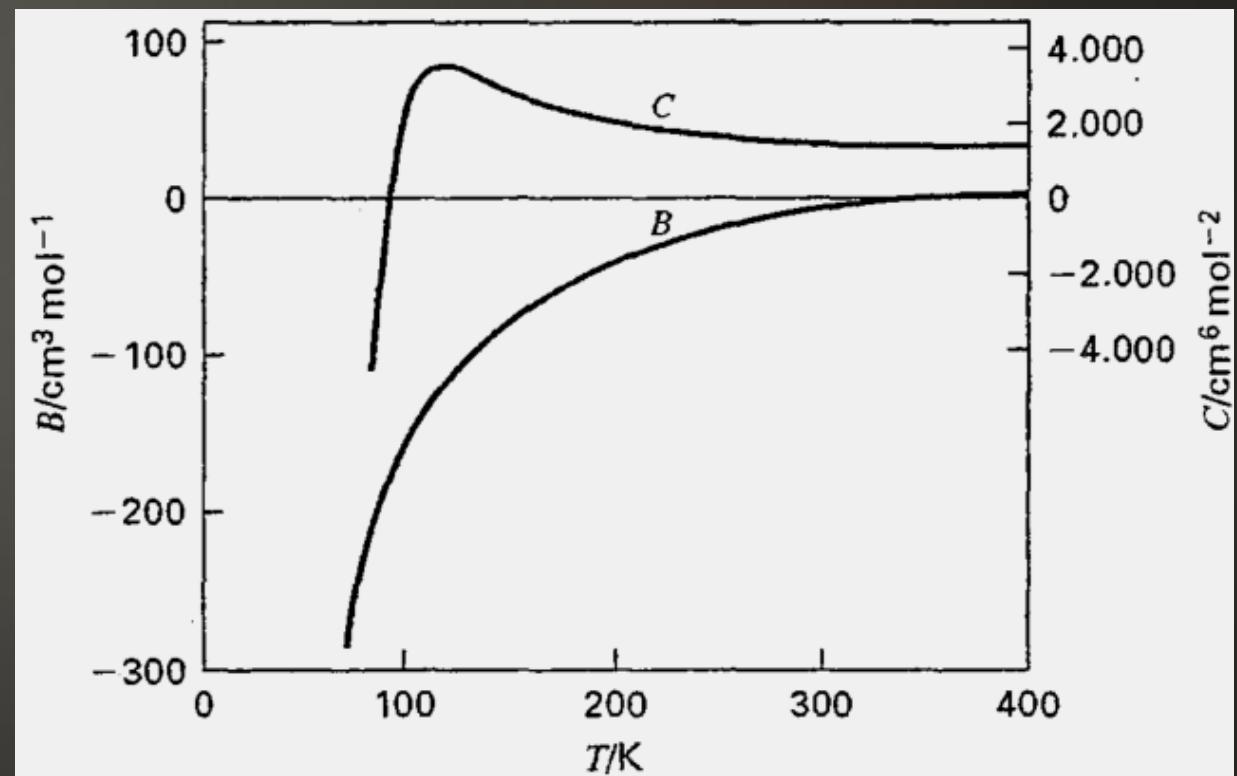
- Esta equação é cúbica no volume.
- Resolvida por procedimento iterativo
- O termo C depende do gás e da temperatura.
- Dados de alguns gases encontrados na literatura.

$$Z = 1 + \frac{B}{V} + \frac{C}{V^2} + \frac{D}{V^3} + \dots \quad 3.12$$



Propriedades Volumétricas

- APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DO TIPO VIRIAL
- O efeito da temperatura sobre os coeficientes do tipo virial B e C do nitrogênio;
 - outros gases seguem tendencias
- B aumenta com T
 - atinge um máximo e então diminui lentamente.
- C é negativo em baixas temperaturas,
 - tem um máximo em uma T próxima à crítica,
 - e depois diminui com o aumento de T .



Propriedades Volumétricas

► APLICAÇÕES DAS EQUAÇÕES DO TIPO VIRIAL

► Uma equações do tipo virial estendida,

► é a equação Benedict/Webb/Rubin:

$$P = \frac{RT}{V} + \frac{B_0 RT - A_0 - C_0/T^2}{V^2} + \frac{bRT - a}{V^3} + \frac{a\alpha}{V^6} + \frac{c}{V^3 T^2} \left(1 + \frac{\gamma}{V^2}\right) \exp \frac{-\gamma}{V^2}$$

► onde $A_0, B_0, C_0, a, b, c, \alpha$ e γ são todos constantes para um dado fluido.

► É usada das nas indústrias do petróleo e gás natural

► para hidrocarbonetos leves e outros poucos gases normalmente encontrados.

Propriedades Volumétricas

► EXEMPLO 3.8

Valores divulgados para os coeficientes do tipo virial do vapor de isopropanol a $200^{\circ}C$ são:

$$B = -388 \text{ cm}^3 \text{ mol}^{-1} \quad C = -26.000 \text{ cm}^6 \text{ mol}^{-2}$$

Calcule V e Z para o vapor de isopropanol, a $200^{\circ}C$ e 10 bar, através:

- (a) Da equação do gás ideal;
- (b) Da Eq. (3.38);
- (c) Da Eq. (3.40).

Propriedades Volumétricas

- EQUAÇÕES DE ESTADO CÚBICAS
 - Representar o comportamento *PVT* de líquidos e vapores,
 - abranger grande faixa de temperatura e pressão.
 - baixa complexidade de modo
 - Equações polinomiais (cúbicas no volume molar)
 - são genéricas e simples, sendo úteis a muitas aplicações.
 - são as equações mais simples capazes de representar
 - tanto o comportamento de líquidos quanto de vapores.,
- A EQUAÇÃO DE ESTADO DE VAN DER WAALS
 - A primeira equação de estado cúbica útil foi proposta por J.D. van der Waals,⁸ em 1873:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2}$$

Propriedades Volumétricas

► A EQUAÇÃO DE ESTADO DE VAN DER WAALS

► A primeira equação de estado cúbica útil :

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a}{V^2} \quad 3.41$$

► Onde a e b são constantes positivas;

► quando nulas é a equação do gás ideal.

► Com a e b conhecidos para um fluido,

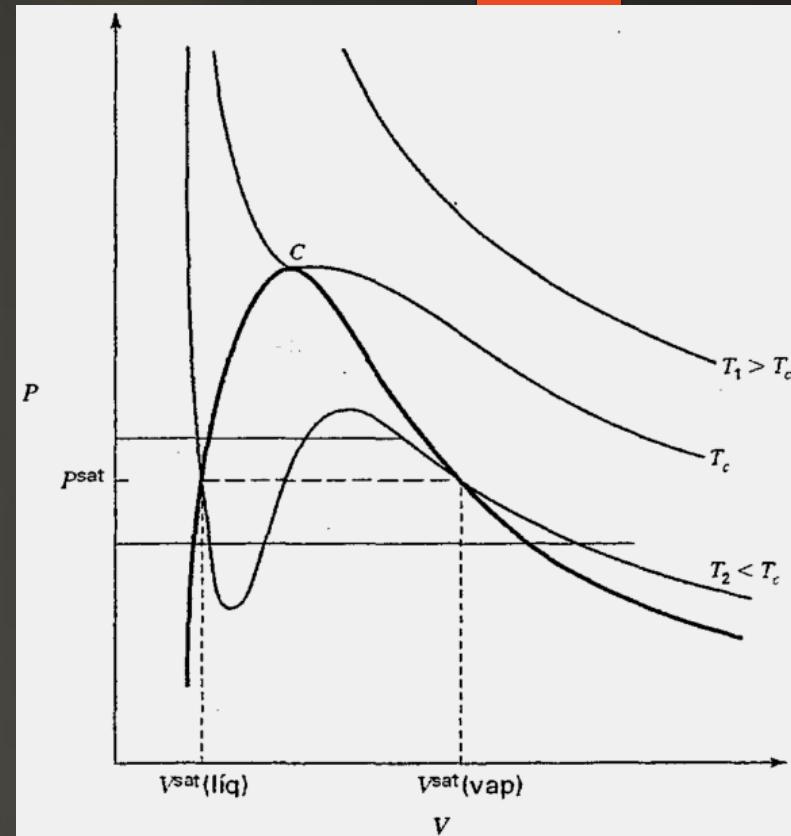
► Calcula-se P como uma função de V para vários valores de T .

► Curva dos estados saturados e Isotermas

► a isoterma $T_1 > T_c$, a pressão é uma função decrescente

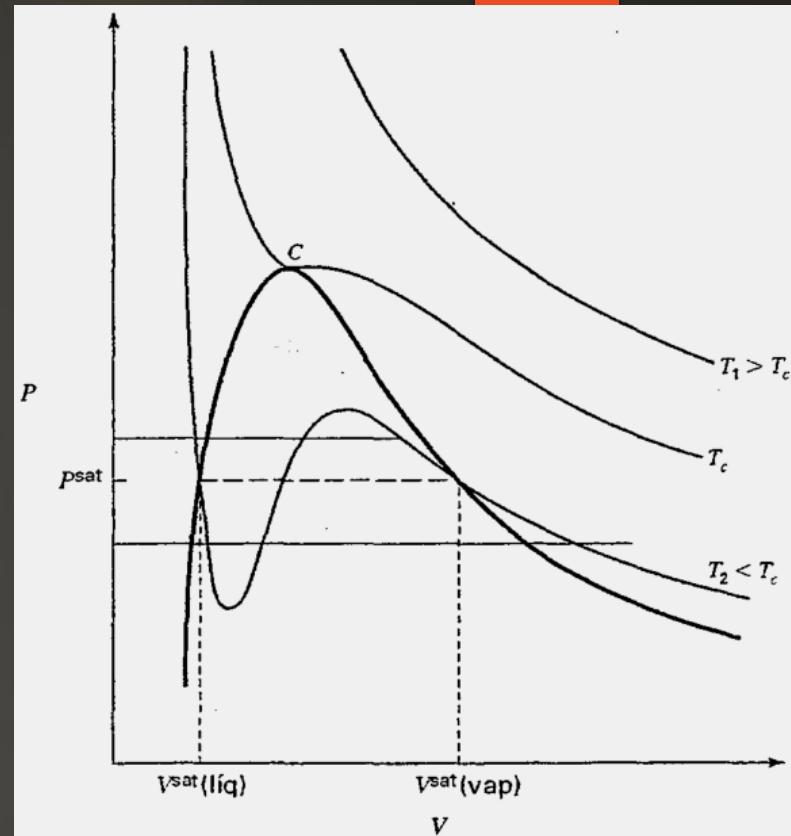
► com o aumento do volume molar.

► a isoterma crítica possui a inflexão horizontal em C



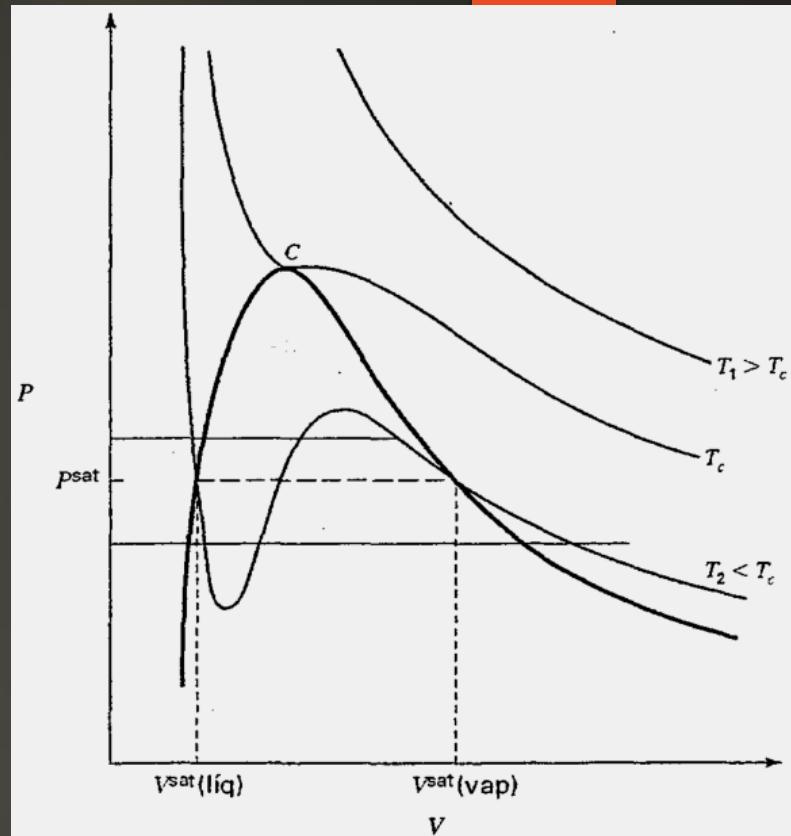
Propriedades Volumétricas

- A EQUAÇÃO DE ESTADO DE VAN DER WAALS
- A isoterma $T_2 < T_c$, na região do líquido sub-resfriado,
 - a pressão decresce rapidamente com o aumento do volume;
 - cruza a linha do líquido saturado e vai até um mínimo,
 - sobe até um máximo e então desce,
 - cruzando a linha de vapor saturado
 - e continua para a região do vapor superaquecido.
- Nas isotermas a transição do líquido saturado
 - para a região do vapor saturado; ao contrário,
 - possuem um segmento horizontal
 - onde líquido e vapor saturados coexistem,
 - na pressão de saturação ou de vapor.



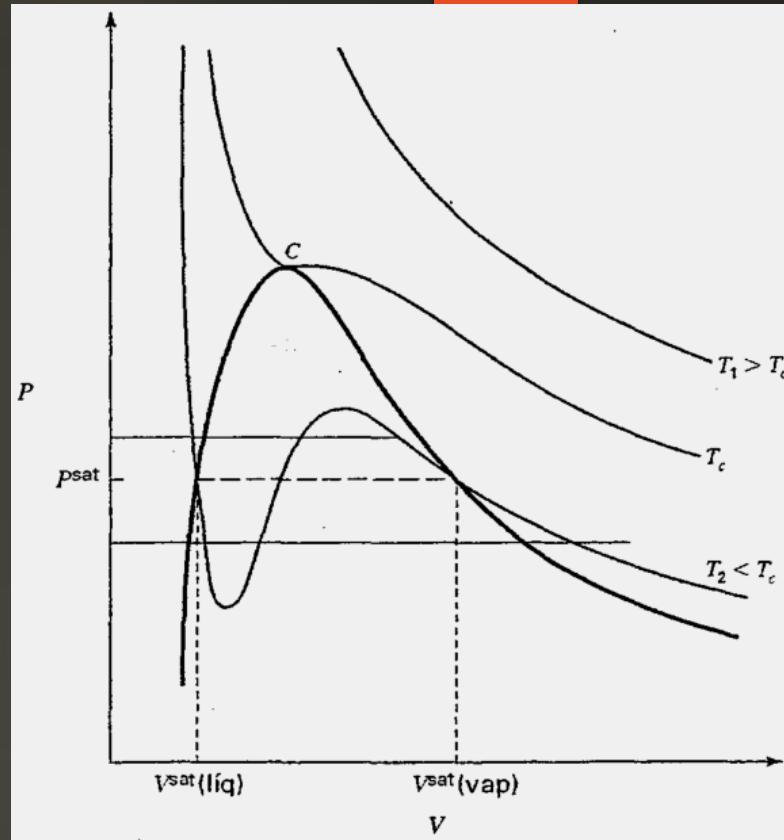
Propriedades Volumétricas

- A EQUAÇÃO DE ESTADO DE VAN DER WAALS
- Equações de estado cúbicas possuem três raízes para o volume,
 - das quais duas podem ser complexas.
- Os valores de V com significado físico
 - são sempre reais, positivos e maiores do que a constante b .
 - Para uma isoterm a $T > T_c$,
 - a solução para V , em qualquer valor positivo de P ,
 - fornece somente uma raiz real positiva.
 - Para a isoterm crítica ($T = T_c$), isso também é verdadeiro,
 - exceto na pressão crítica, onde há três raízes,
 - todas iguais ao V_c
 - Para isotermas a $T < T_c$,
 - a equação pode exibir uma ou três raízes reais, dependendo da pressão.



Propriedades Volumétricas

- A EQUAÇÃO DE ESTADO DE VAN DER WAALS
- Somente na pressão de vapor ou pressão de saturação P^{sat} ,
 - as raízes, $V^{\text{sat}}(\text{líq})$ e $V^{\text{sat}}(\text{vap})$, são estáveis,
 - localizadas nos extremos da porção horizontal da isoterma real.
- Para outras pressões acima e abaixo de P^{sat} ,
 - a menor raiz é um volume de líquido,
 - e a maior raiz é um volume de vapor.
 - A terceira raiz, localizada entre os outros dois valores,
 - não tem significado físico



Propriedades Volumétricas

- UMA EQUAÇÃO DE ESTADO CÚBICA GENÉRICA
- Equações de estado cúbicas foram propostas equação de van der Waals.

► Todas são casos particulares da equação:

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{\theta(V - \eta)}{(V - b)(V^2 + \kappa V + \lambda)}$$

- Onde $b, \theta, \kappa, \lambda$ e η são parâmetros
 - que geralmente dependem da temperatura e da composição.
- A equação tem limitações inerentes em função de sua forma cúbica. (raizes)
- Ela se reduz à equação de van der Waals, quando $\eta = b, \theta = a$, e $\kappa = \lambda = 0$.
- Especificando: $\eta = b$; $\theta = a(T)$; $\kappa = (\epsilon + \sigma)b$; $\lambda = \epsilon\sigma b^2$
 - Uma classe importante de equações cúbicas é obtida
- Rearranjada em uma equação de estado cúbica genérica,

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{(V + \epsilon b)(V + \sigma b)} \quad 3.42$$



Propriedades Volumétricas

► UMA EQUAÇÃO DE ESTADO CÚBICA GENÉRICA

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{(V + \epsilon b)(V + \sigma b)} \quad 3.42$$

- Para uma dada equação, ϵ e σ são números,
 - os mesmos para todas as substâncias,
- enquanto os parâmetros $a(T)$ e b são dependentes da substância.
 - A dependência da temperatura de $a(T)$ é específica para cada equação de estado.
 - Para a equação de van der Waals,
 - $a(T) = a$ é uma constante dependente da substância, e $\epsilon = \sigma = 0$.

Propriedades Volumétricas

► DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE ESTADO

► Podem ser determinados por um ajuste aos dados *PVT* disponíveis.

► Para equações de estado cúbicas,

► estimativas são efetuadas a partir das constantes críticas T_c e P_c .

► A isoterma crítica exibe uma inflexão horizontal no ponto crítico,

► podemos impor as condições matemáticas:

$$\left(\frac{\partial P}{\partial V}\right)_{T;cr} = 0 \quad (3.43) \quad \left(\frac{\partial^2 P}{\partial V^2}\right)_{T;cr} = 0 \quad (3.44)$$

► Diferenciando 3.42 em 3.43 e 3.44 em $P = P_c, T = T_c, e V = V_c$.

► E escrevendo a equação de estado 3.42 para as condições críticas,

► Tem-se as constantes: $P_c, V_c, T_c, a(T_c)$ e b .

► Evidencia-se V_c , gerando expressões relacionando $a(T_c)$ e b a P_c e T_c .

► Pois P_c e T_c são medidas de forma mais precisa do que V_c .

Propriedades Volumétricas

► DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE ESTADO

► De forma mais simples, para a equação de van der Waals,

► com $V = V_c$, para cada uma das três raízes no ponto crítico, tem-se

$$(V - V_c)^3 = 0 \quad A$$

► ou

$$V^3 - 3V_c V^2 + 3V_c^2 V - V_c^3 = 0 \quad B$$

► Logo 3.41, para $T = T_c$ e $P = P_c$ e expandida na forma polinomial, torna-se:

$$V^3 - \left(b + \frac{RT_c}{P_c} \right) V^2 + \frac{a}{P_c} V - \frac{ab}{P_c} = 0$$

► Onde a e b dependem da substância e são independentes da temperatura.

► Uma comparação termo por termo das Eqs. (A) e (B) fornece três equações:

$$3V_c = b + \frac{RT_c}{P_c} \quad C \quad 3V_c^2 = \frac{a}{P_c} \quad D \quad V_c^3 = \frac{ab}{P_c} \quad E$$

Propriedades Volumétricas

► DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE ESTADO

$$3V_c = b + \frac{RT_c}{P_c} \quad C \quad 3V_c^2 = \frac{a}{P_c} \quad D \quad V_c^3 = \frac{ab}{P_c} \quad E$$

► Explicitando a na Eq. (D),

► combinando o resultado com a Eq. (E) e explicitando b , tem-se:

$$a = 3P_c V_c^2 \quad b = \frac{1}{3}V_c$$

► Substituindo a expressão para b em (C),

► determina-se de V_c , que pode ser eliminado das equações para a e b :

$$V_c = \frac{3RT_c}{8P_c} \quad a = \frac{27R^2T_c^2}{64P_c} \quad b = \frac{1RT_c}{8P_c}$$

► Essas equações fornecem valores aproximados bons,

► Pois as temperaturas e as pressões críticas são conhecidas

► ou podem ser estimadas de forma segura.

Propriedades Volumétricas

► DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE ESTADO

► A substituição de V_c na equação para o fator de compressibilidade crítico fica:

$$Z_c \equiv \frac{P_c V_c}{R T_c} = \frac{3}{8}$$

► Um valor simples para Z_c encontrado com a imposição das restrições críticas.

► Porém cada espécie química possui o seu valor próprio para Z_c .

► Por analogia ao aplicado na equação cúbica genérica,

► Eq. (3.42), fornece expressões para os parâmetros $a(T_c)$ e b .

$$a(T_c) = \Psi \frac{R^2 T_c^2}{P_c}$$

► Podendo ser aplicado em temperaturas diferentes da crítica,

► Pelo uso da função adimensional $\alpha(T_r)$,

$$a(T) = \Psi \frac{\alpha(T_r) R^2 T_c^2}{P_c} \quad 3.45$$

► A função $\alpha(T_r)$ é uma expressão empírica, específica para cada equação de estado

Propriedades Volumétricas

- DETERMINAÇÃO DE PARÂMETROS DAS EQUAÇÕES DE ESTADO
- O parâmetro b é dado por:

$$b = \Omega \frac{RT_c}{P_c} \quad 3.46$$

- Nestas equações, Ω e Ψ são números, independentes da substância e determinados, para uma dada equação de estado, a partir dos valores especificados para ϵ e σ .
- O recente desenvolvimento das equações de estado cúbicas iniciou em 1949 , com a publicação da equação de Redlich/Kwong (RK):"

$$P = \frac{RT}{V - b} - \frac{a(T)}{V(V + b)} \quad 3.47$$

- onde $a(T)$ é dada pela Eq. (3.45), com $\alpha(T_r) = T_r^{-1/2}$.

Propriedades Volumétricas

► TEOREMA DOS ESTADOS CORRESPONDENTES

► FATOR ACÊNTRICO

► Experimentalmente os fatores de compressibilidade Z ,

► para diferentes fluidos, exibem comportamento similar,

► quando correlacionados como funções

► da temperatura reduzida T_r e da pressão reduzida P_r ; por definição,

$$T_r \equiv \frac{T}{T_c} \quad P_r \equiv \frac{P}{P_c}$$

► Coordenadas termodinâmicas adimensionais

► base para o teorema dos estados correspondentes:

Todos os fluidos, quando comparados na mesma temperatura reduzida e na mesma pressão reduzida, têm aproximadamente o mesmo fator de compressibilidade, e todos se desviam do comportamento do gás ideal aproximadamente da mesma forma.

Propriedades Volumétricas

- TEOREMA DOS ESTADOS CORRESPONDENTES - FATOR ACÊNTRICO
 - Correlações dos estados correspondentes para Z ,
 - são correlações a dois parâmetros redutores T_c e P_c .
 - Muito próximas de serem exatas para os fluidos simples (argônio, criptônio e xenônio),
 - apresenta desvios para fluidos mais complexos.
 - Um terceiro parâmetro melhora os resultados, vem da estrutura molecular;
 - o fator acêntrico ω ,
 - Para uma espécie química pura é definido em relação à sua pressão de vapor.
 - O logaritmo da pressão de vapor de um fluido puro
 - é aproximadamente linear em relação ao inverso da temperatura absoluta,
$$\frac{d \log P_r^{\text{sat}}}{d(1/T_r)} = S$$

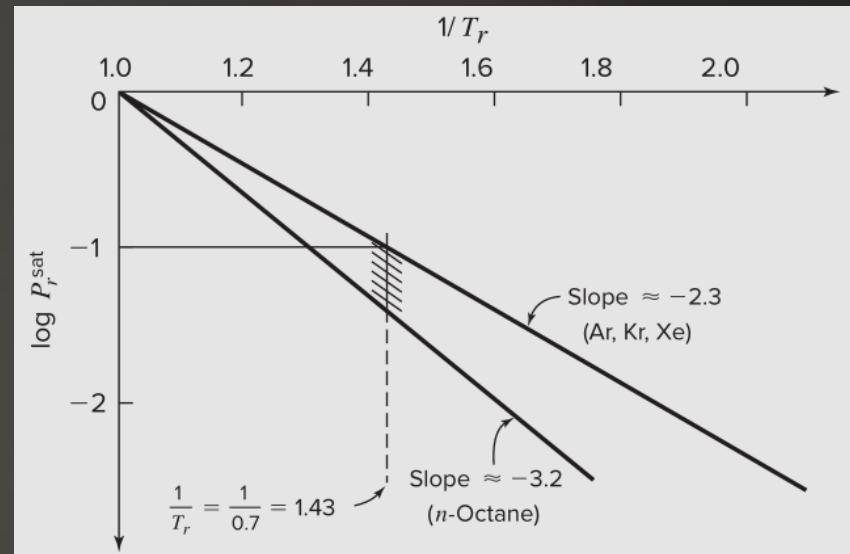
Propriedades Volumétricas

- TEOREMA DOS ESTADOS CORRESPONDENTES - FATOR ACÊNTRICO
- Cada fluido possui o seu próprio valor característico de S ,
- Porém, todos os dados de pressão de vapor dos fluidos simples (Ar, Kr, Xe)
 - se encontram sobre uma mesma linha
 - quando representados na forma $\log P_r^{\text{sat}}$ vs. $1/T_r$
 - e que a linha passa por $\log P_r^{\text{sat}} = -1$ para $T_r = 0,7$.
- Dados de outros fluidos definem outras linhas,
- cujas localizações são determinadas e
- em relação à linha dos fluidos simples (FS) por:

$$\log P_r^{\text{sat}} (\text{FS}) - \log P_r^{\text{sat}}$$

- O fator acêntrico é definido como esta diferença avaliada em $T_r = 0,7$:

$$\omega \equiv -1,0 - \log(P_r^{\text{sat}})_{T_r=0,7}$$



Propriedades Volumétricas

- TEOREMA DOS ESTADOS CORRESPONDENTES - FATOR ACÊNTRICO
- ω pode ser determinado para qualquer fluido a partir de T_c, P_c
 - e uma única medida de pressão de vapor efetuada na $T_r = 0,7$.
- Valores de ω e das constantes críticas T_c, P_c e V_c para um conjunto de fluidos
 - estão listados no Apêndice B.

Table B.1: Characteristic Properties of Pure Species

	Molar mass	ω	T_c/K	P_c/bar	Z_c	$V_c \text{ cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	T_n/K
Methane	16.043	0.012	190.6	45.99	0.286	98.6	111.4
Ethane	30.070	0.100	305.3	48.72	0.279	145.5	184.6
Propane	44.097	0.152	369.8	42.48	0.276	200.0	231.1
<i>n</i> -Butane	58.123	0.200	425.1	37.96	0.274	255.	272.7
<i>n</i> -Pentane	72.150	0.252	469.7	33.70	0.270	313.	309.2
<i>n</i> -Hexane	86.177	0.301	507.6	30.25	0.266	371.	341.9
<i>n</i> -Heptane	100.204	0.350	540.2	27.40	0.261	428.	371.6
<i>n</i> -Octane	114.231	0.400	568.7	24.90	0.256	486.	398.8
<i>n</i> -Nonane	128.258	0.444	594.6	22.90	0.252	544.	424.0
<i>n</i> -Decane	142.285	0.492	617.7	21.10	0.247	600.	447.3
Isobutane	58.123	0.181	408.1	36.48	0.282	262.7	261.4
Isooctane	114.231	0.302	544.0	25.68	0.266	468.	372.4

Propriedades Volumétricas

	Molar mass	ω	T_c/K	P_c/bar	Z_c	$V_c/\text{cm}^3\cdot\text{mol}^{-1}$	T_n/K								
Cyclopentane	70.134	0.196	511.8	45.02	0.273	258.	322.4								
Cyclohexane	84.161	0.210	553.6	40.73	0.273	308.	353.9								
Methylcyclopentane	84.161	0.230	532.8	37.85	0.272	319.	345.0								
Methylcyclohexane	98.188	0.235	572.2	34.71	0.269	368.	374.1								
Ethylene	28.054	0.087	282.3	50.40	0.281	131.	169.4								
Propylene	42.081	0.140	365.6	46.65	0.289	188.4	225.5								
1-Butene	56.108	0.191	420.0	40.43	0.277	239.3	266.9								
cis-2-Butene	56.108	0.205	435.6	42.43	0.273	233.8	276.9								
trans-2-Butene	56.108	0.218	428.6	41.00	0.275	237.7	274.0								
1-Hexene	84.161	0.280	504.0	31.40	0.265	354.	336.3								
Isobutylene	56.108	0.194	417.9	40.00	0.275	238.9	266.3								
1,3-Butadiene	54.092	0.190	425.2	42.77	0.267	220.4	268.7								
Cyclohexene	82.145	0.212	560.4	43.50	0.272	291.	356.1								
Acetylene	26.038	0.187	308.3	61.39	0.271	113.	189.4								
Benzene	78.114	0.210	562.2	48.98	0.271	259.	353.2								
Toluene	92.141	0.262	591.8	41.06	0.264	316.	383.8	Ethyl acetate	88.106	0.366	523.3	38.80	0.255	286.	350.2
Ethylbenzene	106.167	0.303	617.2	36.06	0.263	374.	409.4	Acetone	58.080	0.307	508.2	47.01	0.233	209.	329.4
Cumene	120.194	0.326	631.1	32.09	0.261	427.	425.6	Methyl ethyl ketone	72.107	0.323	535.5	41.50	0.249	267.	352.8
<i>o</i> -Xylene	106.167	0.310	630.3	37.34	0.263	369.	417.6	Diethyl ether	74.123	0.281	466.7	36.40	0.263	280.	307.6
<i>m</i> -Xylene	106.167	0.326	617.1	35.36	0.259	376.	412.3	Methyl <i>t</i> -butyl ether	88.150	0.266	497.1	34.30	0.273	329.	328.4
<i>p</i> -Xylene	106.167	0.322	616.2	35.11	0.260	379.	411.5	Methanol	32.042	0.564	512.6	80.97	0.224	118.	337.9
Styrene	104.152	0.297	636.0	38.40	0.256	352.	418.3	Ethanol	46.069	0.645	513.9	61.48	0.240	167.	351.4
Naphthalene	128.174	0.302	748.4	40.51	0.269	413.	491.2	1-Propanol	60.096	0.622	536.8	51.75	0.254	219.	370.4
Biphenyl	154.211	0.365	789.3	38.50	0.295	502.	528.2	1-Butanol	74.123	0.594	563.1	44.23	0.260	275.	390.8
Formaldehyde	30.026	0.282	408.0	65.90	0.223	115.	254.1	1-Hexanol	102.177	0.579	611.4	35.10	0.263	381.	430.6
Acetaldehyde	44.053	0.291	466.0	55.50	0.221	154.	294.0	2-Propanol	60.096	0.668	508.3	47.62	0.248	220.	355.4
Methyl acetate	74.079	0.331	506.6	47.50	0.257	228.	330.1	Phenol	94.113	0.444	694.3	61.30	0.243	229.	455.0

Propriedades Volumétricas

75

	Molar mass	ω	T_c/K	P_c/bar	Z_c	V_c $\text{cm}^3 \cdot \text{mol}^{-1}$	T_n/K								
Ethylene glycol	62.068	0.487	719.7	77.00	0.246	191.0	470.5								
Acetic acid	60.053	0.467	592.0	57.86	0.211	179.7	391.1								
<i>n</i> -Butyric acid	88.106	0.681	615.7	40.64	0.232	291.7	436.4								
Benzoic acid	122.123	0.603	751.0	44.70	0.246	344.	522.4								
Acetonitrile	41.053	0.338	545.5	48.30	0.184	173.	354.8								
Methylamine	31.057	0.281	430.1	74.60	0.321	154.	266.8								
Ethylamine	45.084	0.285	456.2	56.20	0.307	207.	289.7								
Nitromethane	61.040	0.348	588.2	63.10	0.223	173.	374.4								
Carbon tetrachloride	153.822	0.193	556.4	45.60	0.272	276.	349.8								
Chloroform	119.377	0.222	536.4	54.72	0.293	239.	334.3								
Dichloromethane	84.932	0.199	510.0	60.80	0.265	185.	312.9								
Methyl chloride	50.488	0.153	416.3	66.80	0.276	143.	249.1								
Ethyl chloride	64.514	0.190	460.4	52.70	0.275	200.	285.4								
Chlorobenzene	112.558	0.250	632.4	45.20	0.265	308.	404.9								
Tetrafluoroethane	102.030	0.327	374.2	40.60	0.258	198.0	247.1	Hydrogen sulfide	34.082	0.094	373.5	89.63	0.284	98.5	212.8
Argon	39.948	0.000	150.9	48.98	0.291	74.6	87.3	Sulfur dioxide	64.065	0.245	430.8	78.84	0.269	122.	263.1
Krypton	83.800	0.000	209.4	55.02	0.288	91.2	119.8	Sulfur trioxide	80.064	0.424	490.9	82.10	0.255	127.	317.9
Xenon	131.30	0.000	289.7	58.40	0.286	118.0	165.0	Nitric oxide (NO)	30.006	0.583	180.2	64.80	0.251	58.0	121.4
Helium 4	4.003	-0.390	5.2	2.28	0.302	57.3	4.2	Nitrous oxide (N_2O)	44.013	0.141	309.6	72.45	0.274	97.4	184.7
Hydrogen	2.016	-0.216	33.19	13.13	0.305	64.1	20.4	Hydrogen chloride	36.461	0.132	324.7	83.10	0.249	81.	188.2
Oxygen	31.999	0.022	154.6	50.43	0.288	73.4	90.2	Hydrogen cyanide	27.026	0.410	456.7	53.90	0.197	139.	298.9
Nitrogen	28.014	0.038	126.2	34.00	0.289	89.2	77.3	Water	18.015	0.345	647.1	220.55	0.229	55.9	373.2
Air [†]	28.851	0.035	132.2	37.45	0.289	84.8		Ammonia	17.031	0.253	405.7	112.80	0.242	72.5	239.7
Chlorine	70.905	0.069	417.2	77.10	0.265	124.	239.1	Nitric acid	63.013	0.714	520.0	68.90	0.231	145.	356.2
Carbon monoxide	28.010	0.048	132.9	34.99	0.299	93.4	81.7	Sulfuric acid	98.080	...	924.0	64.00	0.147	177.	610.0
Carbon dioxide	44.010	0.224	304.2	73.83	0.274	94.0									
Carbon disulfide	76.143	0.111	552.0	79.00	0.275	160.	319.4	† Pseudoparameters for $y_{\text{N}_2} = 0.79$ and $y_{\text{O}_2} = 0.21$. See Eqs. (6.78)–(6.80).							

Propriedades Volumétricas

► RAÍZES COM CARACTERÍSTICAS DO VAPOR & TIPO VAPOR DA EQUAÇÃO DE ESTADO CÚBICA GENÉRICA

► Para evitar problemas de convergência

► a equação é escrita para a determinação de uma raiz particular.

► Para a maior raiz (um volume de vapor ou de um volume tipo vapor)

► a Eq. (3.42) é multiplicada por $(V - b)/RT$. Logo,

$$V = \frac{RT}{P} + b - \frac{a(T)}{P} \frac{V - b}{(V + \epsilon b)(V + \sigma b)} \quad 3.49$$

► Uma estimativa inicial para V é o valor para o gás ideal RT/P .

► Uma equação para Z equivalente à Eq. (3.49)

► é obtida substituindo $V = ZRT/P$.

► Há simplificação com a definição das duas grandezas adimensionais a seguir. Assim,

$$\beta \equiv \frac{bP}{RT} \quad 3.50 \qquad q \equiv \frac{a(T)}{bRT} \quad 3.51$$

Propriedades Volumétricas

- RAÍZES COM CARACTERÍSTICAS DO VAPOR & TIPO VAPOR DA EQUAÇÃO DE ESTADO CÚBICA GENÉRICA

► Com estas substituições, a Eq. (3.49) se torna:

$$Z = 1 + \beta - q\beta \frac{Z - \beta}{(Z + \epsilon\beta)(Z + \sigma\beta)} \quad 3.52$$

► Combinando as Eqs. (3.50) e (3.51) com as Eqs. (3.45) e (3.46), obtém-se:

$$\beta = \Omega \frac{P_r}{T_r} \quad 3.53 \qquad q = \frac{\Psi\alpha(T_r)}{\Omega T_r} \quad 3.54$$

► A solução iterativa da Eq. (3.52) inicia com o valor $Z = 1$ substituído no lado direito.

► O valor final de Z fornece a raiz do volume através de $V = ZRT/P$.

Propriedades Volumétricas

- RAIZES COM CARACTERÍSTICAS DO LÍQUIDO & TIPO LÍQUIDO DA EQUAÇÃO DE ESTADO CÚBICA GENÉRICA
- Na Eq. (3.49), pode-se explicitar o V do numerador da última fração, obtendo:

$$V = b + (V + \epsilon b)(V + \sigma b) \left[\frac{RT + bP - VP}{a(T)} \right] \quad 3.55$$

- Essa equação, com valor inicial de $V = b$ no lado direito,
- converge após iteração para uma raiz de líquido ou tipo líquido.
- Uma equação para Z explicitando Z do numerador da última fração em 3.52

$$Z = \beta + (Z + \epsilon\beta)(Z + \sigma\beta) \left(\frac{1 + \beta - Z}{q\beta} \right) \quad 3.56$$

- No processo iterativo, um valor inicial $Z = \beta$ é substituído no lado direito.
- Uma vez conhecido Z , a raiz do volume é $V = ZRT/P$.

Propriedades Volumétricas

- As equações de estado com Z como uma função de T_r e P_r são generalizadas,
 - Tendo aplicabilidade geral para todos os gases e líquidos.
- Qualquer equação de estado pode ser colocada nessa forma,
 - fornecendo uma correlação generalizada para as propriedades dos fluidos.
- Equações de estado, como as equações
 - de van der Waals e de Redlich/Kwong,
 - que expressam Z como função somente de T_r e P_r , fornecem correlações dos estados correspondentes a dois parâmetros.
 - A equação de Soave/Redlich/Kwong (SRK) e a de Peng/ Robinson (PR),
 - nas quais o fator acêntrico entra, através da função $\alpha(T_r; \omega)$,
 - como um parâmetro adicional,
 - fornecem correlações dos estados correspondentes a três parâmetros.

Propriedades Volumétricas

- A especificação dos valores numéricos para os parâmetros ϵ , σ , Ω e Ψ dessas equações e das equações de van der Waals e de Redlich/Kwong é dada na Tabela 3.1.
- São também apresentadas expressões para $\alpha(T_r; \omega)$ para as equações SRK e PR.

Tabela 3.1: Especificação dos Parâmetros das Equações de Estado Para uso nas Eqs. (3.49) a (3.56)

Eq. de Estado	$\alpha(T_r)$	σ	ϵ	Ω	Ψ	Z_c
vdW (1873)	1	0	0	1/8	27/64	3/8
RK (1949)	$T_r^{-1/2}$	1	0	0,08664	0,42748	1/3
SRK (1972)	$\alpha_{SRK}(T_r; \omega)^*$	1	0	0,08664	0,42748	1/3
PR (1976)	$\alpha_{PR}(T_r; \omega)**$	$1 + \sqrt{2}$	$1 - \sqrt{2}$	0,07780	0,45724	0,30740

$$* \quad \alpha_{SRK}(T_r; \omega) = [1 + (0,480 + 1,574\omega - 0,176\omega^2)(1 - T_r^{1/2})]^2$$

$$** \quad \alpha_{PR}(T_r; \omega) = [1 + (0,37464 + 1,54226\omega - 0,26992\omega^2)(1 - T_r^{1/2})]^2$$

Propriedades Volumétricas

► EXEMPLO 3.9

► Sabendo que a pressão de vapor do *n*-butano a 350K é igual a 9,4573 bar, encontre os volumes molares (a) do vapor saturado e (b) do líquido saturado de *n*-butano nessas condições, dados pela equação de Redlich/Kwong.

Propriedades Volumétricas

- CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA GASES
 - As equações de Soave/Redlich/Kwong e de Peng/Robinson
 - foram desenvolvidas especificamente para cálculos do equilíbrio líquido-vapor
- CORRELAÇÕES DE PITZER PARA O FATOR DE COMPRESSIBILIDADE
 - A correlação para Z é:

$$Z = Z^0 + \omega Z' \quad 3.57$$

- onde Z^0 e Z^1 são funções de T_r e P_r .
- Casos especiais
 - Quando $\omega = 0$ (fluidos simples), Z^0 se torna idêntico a Z, logo
$$Z = Z^0 = f(T_r, P_r)$$
 - ωZ^1 é um valor pequeno, sua omissão não introduz grandes erros,
 - Z^0 pode ser usado para estimativas rápidas e menos precisas de Z,
 - em relação às obtidas por uma correlação com três parâmetros.

Propriedades Volumétricas

► CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA GASES

► PITZER - PARA O FATOR DE COMPRESSIBILIDADE

$$Z = Z^0 + \omega Z^1 \quad 3.57$$

► Dados experimentais de Z vs. ω , a T_r e P_r constantes,

- têm linhas quase retas, cujo a inclinação é Z^1 ,
 - dos quais a função generalizada é $Z^1 = f(T_r \text{ e } P_r)$

► Das correlações tipo Pitzer disponíveis,

- a desenvolvida por Lee e Kesler é mais aceita.

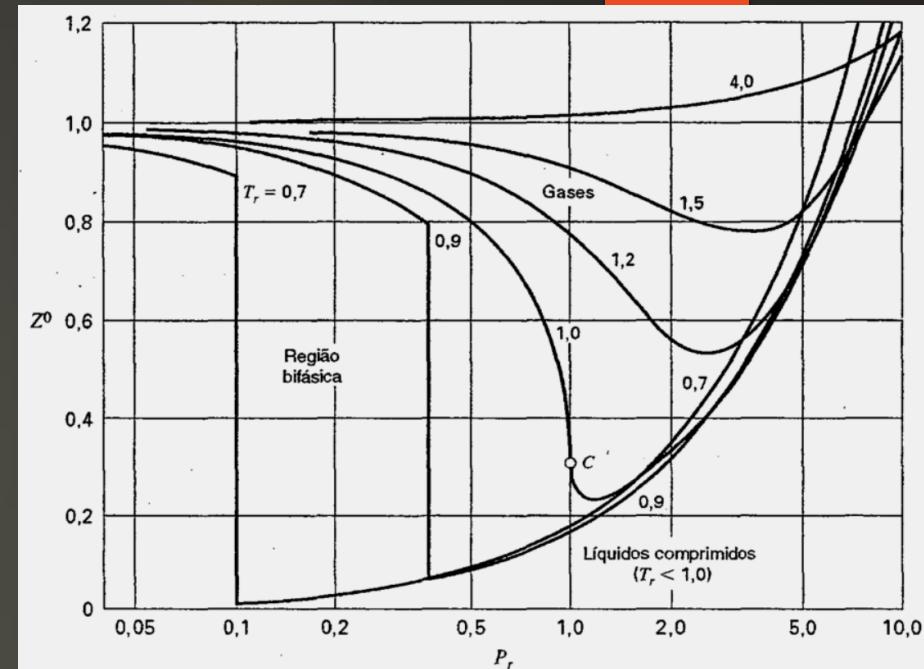
► Ela tabela valores de Z^0 e Z^1 como funções de T_r e P_r (Apêndice E)

- e sua natureza é indicada na figura (Z^0 vs. P_r) para seis isotermas.

► A correlação de Lee/Kesler é confiável para gases não-polares ou fracamente polares;

- com erros de não mais do que 3 por cento.

► e para gases altamente polares ou gases que se associam, podem-se esperar erros maiores.



Propriedades Volumétricas

► CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA GASES

► PITZER PARA O FATOR DE COMPRESSIBILIDADE

► Para gases simples (hidrogênio, hélio e neônio)

► as equações recomendadas são:

$$T_c/K = \frac{43,6}{1 + \frac{21,8}{2,016T}} \quad (H_2) \quad 3.58$$

$$P_c/bar = \frac{20,5}{1 + \frac{44,2}{2,016T}} \quad (H_2) \quad 3.59$$

$$V_c/(cm^3 mol^{-1}) = \frac{51,5}{1 - \frac{9,91}{2,016T}} \quad (H_2) \quad 3.60$$

► onde T é a temperatura absoluta em kelvin.

► E para o hidrogênio, deve-se especificar $\omega = 0$.

Propriedades Volumétricas

- CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA GASES
- PITZER - SEGUNDO COEFICIENTE DO TIPO VIRIAL
 - Para evitar o uso das tabelas um intervalo limitado de pressões.
 - Definem-se expressões para Z^0 e Z^1
 - Da forma mais simples da equação do tipo virial temos

$$Z = 1 + \frac{BP}{RT} = 1 + \hat{B} \frac{P_r}{T_r} \quad 3.61$$

- onde \hat{B} é um segundo coeficiente do tipo virial reduzido, dado por:
$$\hat{B} = \frac{BP_c}{RT_c} \quad 3.62$$
- Assim, segundo Pitzer os valores para \hat{B} são,

$$\hat{B} = B^0 + \omega B^1 \quad 3.63$$

- Juntando as Eqs. (3.61) e (3.63), obtém-se:

$$Z = 1 + B^0 \frac{P_r}{T_r} + \omega B^1 \frac{P_r}{T_r}$$

Propriedades Volumétricas

- CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA GASES
- PITZER - SEGUNDO COEFICIENTE DO TIPO VIRIAL
- A comparação desta equação com a Eq. (3.57) permite as seguintes identificações:

$$Z^0 = 1 + B^0 \frac{P_r}{T_r} \quad 3.64$$

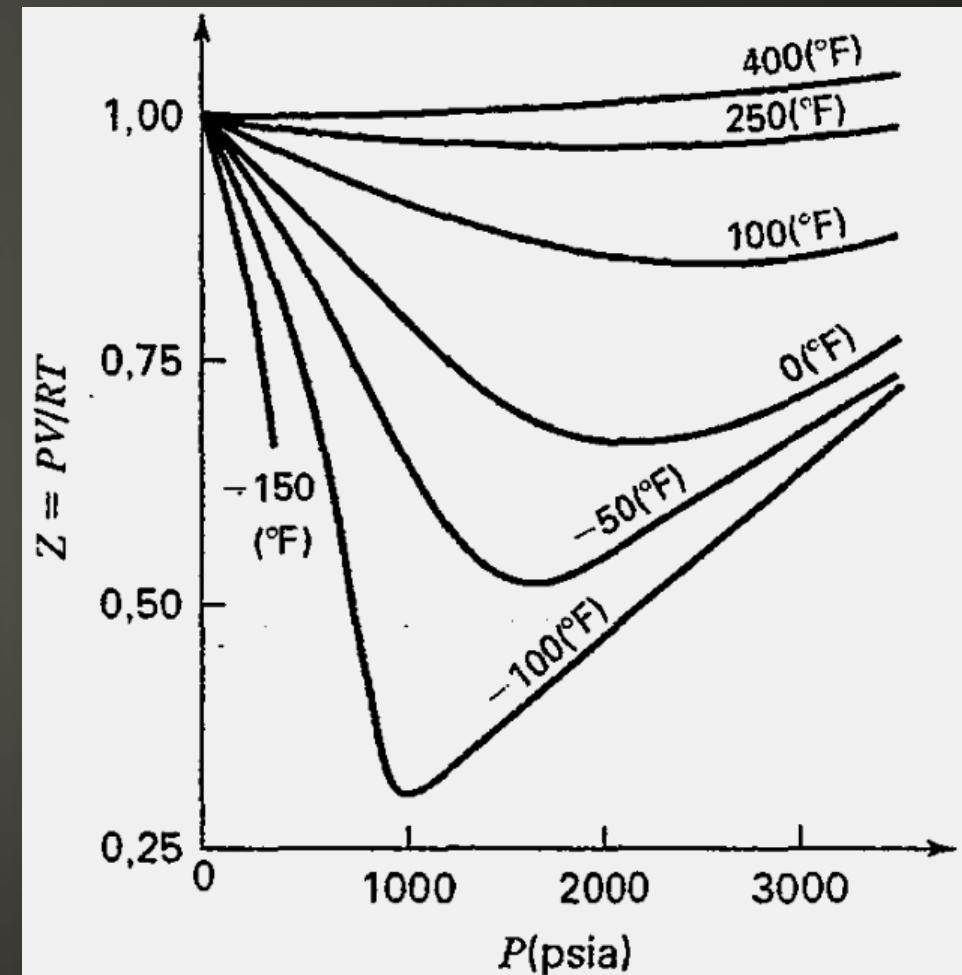
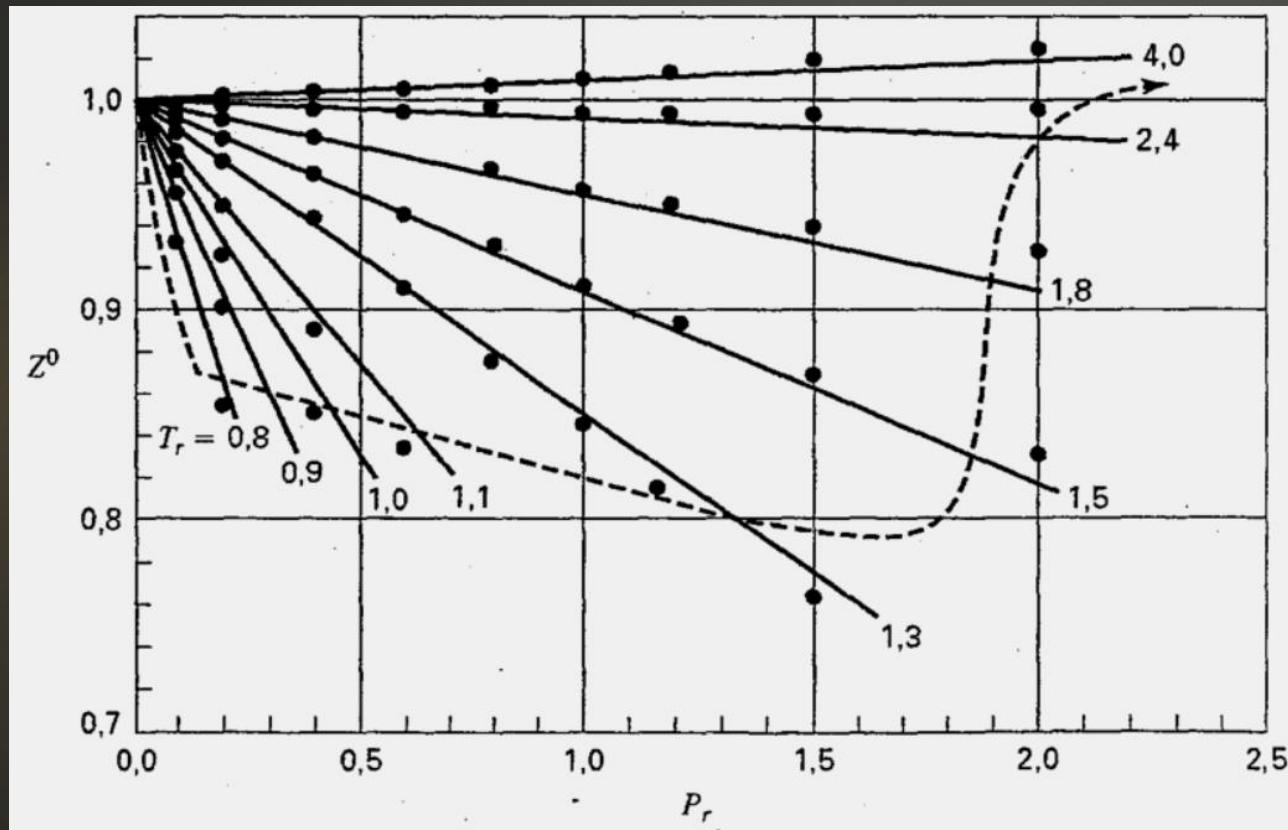
$$Z^1 = B^1 \frac{P_r}{T_r}$$

- Os segundos coeficientes do tipo virial são funções somente da temperatura,
- logo $B^0 e B^1$ são funções somente da temperatura reduzida.
- Eles são bem representados pelas seguintes equações:

$$B^0 = 0,083 - \frac{0,422}{T_r^{1,6}} \quad 3.65 \qquad B^1 = 0,139 - \frac{0,172}{T_r^{4,2}} \quad 3.66$$

Propriedades Volumétricas

- CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA GASES
- PITZER - SEGUNDO COEFICIENTE DO TIPO VIRIAL
- Valores Calculados vs Tabelados



Propriedades Volumétricas

- CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA GASES
- CORRELAÇÕES PARA O TERCEIRO COEFICIENTE DO TIPO VIRIAL

► A Eq. (3.40) pode ser escrita na forma:

$$Z = 1 + B\rho + C\rho^2 \quad 3.67$$

► onde $\rho = 1/V$ é a densidade molar.

► Reescrita na forma reduzida, esta equação se torna:

$$Z = 1 + \hat{B} \frac{P_r}{T_r Z} + \hat{C} \left(\frac{P_r}{T_r Z} \right)^2 \quad 3.68$$

► onde o segundo coeficiente do tipo virial reduzido \hat{B} é definido por 3.62

► e o terceiro coeficiente do tipo virial reduzido \hat{C} é definido como:

$$\hat{C} \equiv \frac{CP_c^2}{R^2 T_c^2}$$

► Uma correlação do tipo de Pitzer para \hat{C} é escrita na forma:

$$\hat{C} = C^0 + \omega C^1 \quad 3.69$$

Propriedades Volumétricas

- CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA GASES
- CORRELAÇÕES PARA O TERCEIRO COEFICIENTE DO TIPO VIRIAL
- Uma expressão para C^0 como função da temperatura reduzida é dada por

$$C^0 = 0,01407 + \frac{0,02432}{T_r} - \frac{0,00313}{T_r^{10,5}} \quad 3.70$$

- A expressão para C^1 é dada por

$$C^1 = -0,02676 + \frac{0,05539}{T_r^{2,7}} - \frac{0,00242}{T_r^{10,5}} \quad 3.71$$

- A Eq. (3.68) é cúbica em Z e não pode ser apresentada na forma por 3.57.
- Com T_r e P_r especificadas, a obtenção de Z é feita por iteração,
- com uma estimativa inicial $Z = 1$ no lado direito de 3.68

Propriedades Volumétricas

- CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA GASES
- CORRELAÇÕES PARA O TERCEIRO COEFICIENTE DO TIPO VIRIAL
- Uma expressão para C^0 como função da temperatura reduzida é dada por

$$C^0 = 0,01407 + \frac{0,02432}{T_r} - \frac{0,00313}{T_r^{10,5}} \quad 3.70$$

- A expressão para C^1 é dada por

$$C^1 = -0,02676 + \frac{0,05539}{T_r^{2,7}} - \frac{0,00242}{T_r^{10,5}} \quad 3.71$$

- A Eq. (3.68) é cúbica em Z e não pode ser apresentada na forma por 3.57.
- Com T_r e P_r especificadas, a obtenção de Z é feita por iteração,
- com uma estimativa inicial $Z = 1$ no lado direito de 3.68

Propriedades Volumétricas

- EXEMPLO 3.10
- Determine o volume molar do *n*-butano a 510K e 25 bar, através dos seguintes procedimentos:
 - (a) Equação do gás ideal.
 - (b) Correlação generalizada para o fator de compressibilidade.
 - (c) Equação (3.61), com a correlação generalizada para \hat{B} .
 - (d) Equação (3.68), com a correlação generalizada para \hat{B} e \hat{C} .

Propriedades Volumétricas

- CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA LÍQUIDOS
 - Os volumes molares de líquidos
 - calculados por equações de estado cúbicas generalizadas,
 - não possuem grande precisão.
 - Como a correlação de Lee/Kesler inclui dados para líquidos sub-resfriados,
 - Valores para ambas as fases são fornecidos nas Tabelas E.1 a E.4,
 - sendo mais adequada para fluidos não-polares e levemente polares.
 - Para a estimativa de volumes molares de líquidos saturados,
 - a equação mais simples, proposta por Rackett, é

$$V^{\text{sat}} = V_c Z_c^{(1-T_r)^{2/7}} \quad 3.72$$

- Uma forma alternativa desta equação é algumas vezes útil:

$$Z^{\text{sat}} = \frac{P_r}{T_r} Z_c^{[1+(1-T_r)^{2/7}]} \quad 3.73$$

- Os resultados são usualmente precisos na faixa de 1 a 2%.

Propriedades Volumétricas

► CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA LÍQUIDOS

► A correlação de Lydersen, Greenkorn e Hougen de dois parâmetros

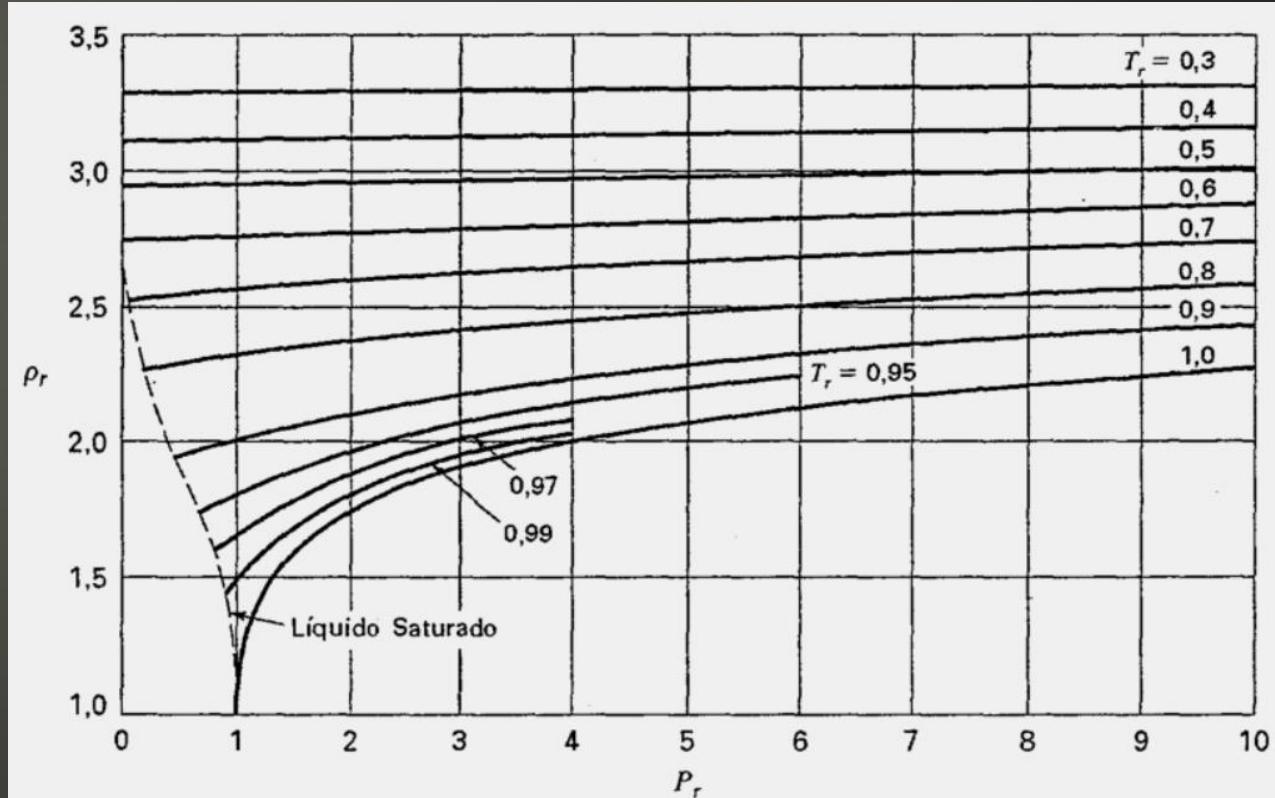
► estima o volume de líquidos pela densidade reduzida ρ_r como função de T_r e P_r

$$\rho_r \equiv \frac{\rho}{\rho_c} = \frac{V_c}{V} \quad 3.74$$

► onde ρ_c é a densidade no ponto crítico.

► A correlação generalizada

► é mostrada na Figura 3.16,



Propriedades Volumétricas

► CORRELAÇÕES GENERALIZADAS PARA LÍQUIDOS

- Pode-se também usar um único volume de líquido conhecido (estado 1) através da identidade

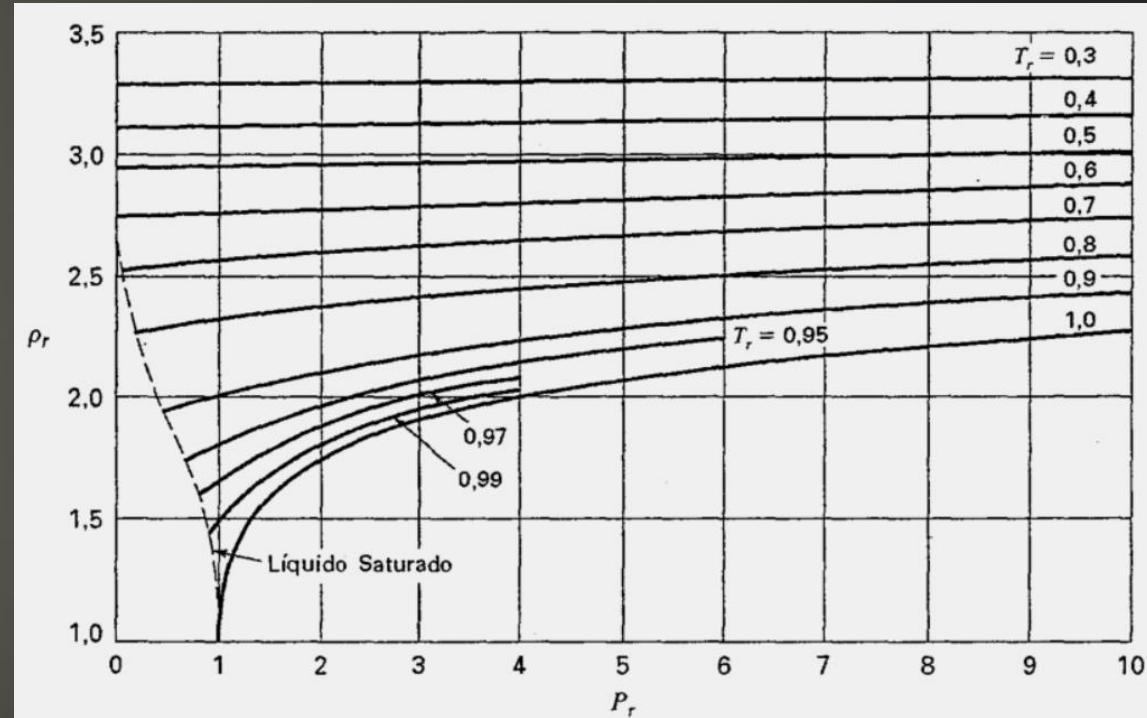
$$V_2 = V_1 \frac{\rho_{r_1}}{\rho_{r_2}}$$

► onde

V_2 = volume requerido

V_1 = volume conhecido

ρ_{r_1}, ρ_{r_2} = densidades reduzidas lidas na Figura 3.16



Propriedades Volumétricas

- EXEMPLO 3.13
- Para a amônia a $310K$, estime a densidade:
 - (a) Do líquido saturado; (b) Do líquido a 100 bar .