

ECMA7037/EMEC7063

Termodinâmica de Materiais / Termodinâmica dos Sólidos

Relação entre Propriedades
Termodinâmica e Propriedades Física

Prof. Rodrigo Perito Cardoso

Onde estamos

- Introdução histórica.
- Leis da Termodinâmica.
- Potenciais Termodinâmicos.
- Conceitos de Termodinâmica estatística.
- **Termodinâmica de sólidos.**
- Termodinâmica de transformação de fase.
- Termodinâmica química.
- Diagramas de fases.
- Cinética de transformações

Generalidades

- Uma reflexão “simples” mostra que deveríamos esperar uma relação entre propriedades termodinâmicas e propriedades físicas (intuição + interpretação atômica).
- Ex. Temos tendência a associar reações exotérmicas com espontaneidade e endotérmica com reações não espontânea (já vimos que não é o caso, mas ... mostra uma associação intuitiva)
- Neste sentido podemos também pensar em elevado ponto de fusão, contração de volume, elevado módulo de elasticidade -> todas se relacionam com a energia de ligação dos átomos no cristal (termodinâmica)

Generalidades

- Assim, parece interessante compararmos propriedades termodinâmicas com estas propriedades físicas para verificar, ao menos qualitativamente, a validade desta reflexão
- Uma relação empírica encontrada relaciona energia de vaporização de um cristal e seu ponto de ebulição (Regra de Trouton)
- De maneira similar, uma relação entre a entalpia de fusão e a temperatura de fusão foi observada (Regra de Richard)

Regras de Richard e Trouton

- Este tipo de relação poderia ser esperada, pois, podemos fazer algumas associações:
 - A entalpia de vaporização, é a energia necessária para dissociar um cristal em átomos e/ou moléculas.
 - Similarmente, o ponto de ebulição poderia ser relacionado com a energia térmica necessária para completa dissociação do “cristal” -> Maior ponto de ebulição -> maior a energia de ligação dos átomos no cristal
- Trouton propôs uma constante de proporcionalidade entre entalpia de vaporização e ponto de ebulição de 21, ou seja

$$\Delta S_v = \frac{\Delta H_v}{T_{bp}} = 21$$

Regras de Richard e Trouton

- Com raciocínio similar, a temperatura de fusão deveria refletir a energia de ligação entre os átomos de um cristal
 - visto que a fusão induz a desordem no cristal -> uma energia de ligação elevada agiria no sentido de manter a ordem.
- Daí vem a regra de Richard
$$\Delta S_f = \frac{\Delta H_f}{T_{mp}} = 2$$
- A utilidade destas regras empíricas está na possibilidade de predizer, razoavelmente bem, propriedades de materiais “desconhecidos”

Regras de Richard e Trouton

- Estas correlações são aspectos importantes da ciência física (Principalmente no passado).
- Mesmo quando modelos atômicos complexos são propostos estas regras são aplicadas para testar a validade do modelo -> o modelo deve prever esta correlação (testes preliminares)
- Muitas vezes o caminho é inverso -> as correlações acabam “sugerindo” modelos atômicos mais complexos (Procurando explicar a correlação encontrada)

Estimativas de capacidade térmica de cristais

- Como primeira aproximação, se não tivermos dados sobre a capacidade térmica de um cristal, podemos usar a regra de Dulong-Petit, válida para temperaturas elevadas (T ambiente para a maioria dos materiais - Debye)

$$C_V = 3R \text{ ou } 6\text{cal} / \text{molK}$$

- Em capítulos anteriores deduzimos a relação

$$C_P = C_V + \frac{\alpha^2 VT}{\beta}$$

Aproximação para C_P (T)

Estimativas de capacidade térmica de cristais

$$C_P = C_V + \frac{\alpha^2 VT}{\beta}$$

- Para a maioria dos cristais o segundo termo da relação vale aproximadamente 0,5 cal/molK. Da regra de Dulong-Petit ->

$$C_P \cong 6,5 \text{ cal} / \text{molK}$$

- Esta regra é somente uma aproximação, pois alguns cristais apresentam valores menores e maiores de capacidade térmica (Temperatura de Debye)
 - Ex. O diamante, com forte energia de ligação, tem C_P próximo de 4 cal/molK

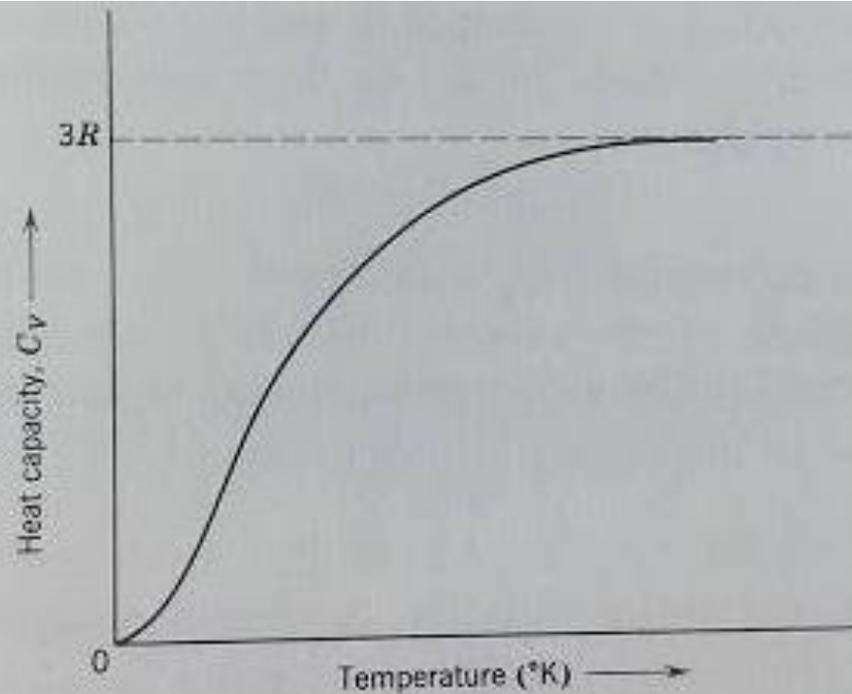


Fig. 4.5 Heat capacity as a function of temperature for a system of harmonic oscillators.

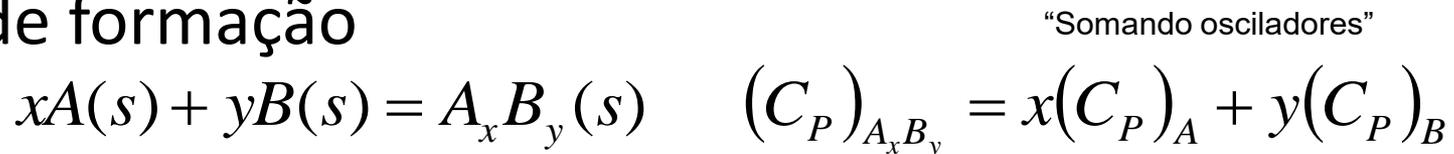
TABLE 4.1
Debye Temperature of Various Elements^a

Substance	θ ($^{\circ}\text{K}$)	Substance	θ ($^{\circ}\text{K}$)	Substance	θ ($^{\circ}\text{K}$)
Be	1160	Co	445	Al	418
Mg	406	Ni	456	In	109
Fe	467	Pd	275	Tl	89
La	132	Cu	339	C (diamond)	(2000)
Ti	278	Ag	225	Si	658
Zr	270	Au	165	Ge	366
V	273	Zn	308	Pb	94.5

^aFrom C. Kittel, *Introduction to Solid State Physics*, Second Edition, John Wiley and Sons, New York, 1956.

Estimativas de capacidade térmica de cristais

- Para compostos formados no estado sólido ou líquido, a regra de Neumann-Koop é frequentemente aplicada com relativo sucesso na estimativa da capacidade térmica. A relação é baseada na reação de formação



- Em resumo a regra diz que a capacidade térmica de um composto é a soma da capacidade térmica dos elementos que o formam (“osciladores do tipo A e B”)

Estimativas de capacidade térmica de cristais

- A tabela abaixo mostra o teste desta regra

TABLE 6.1
Test of Neumann-Kopp Rule at 300°K

Compound A_xB_y	$x(C_P)_A$	$y(C_P)_B$	Sum (cal/mole degree)	C_P (experimental) (cal/mole degree)
Ni_2Si	12.6	4.8	17.4	16.8
PbS	6.33	5.45	11.78	11.83
Ni_3Sn	18.87	6.31	25.18	23.84
Sb_2S_3	12.1	16.4	28.5	28.2

- Podemos dizer que os valores medidos e os obtidos pela regra apresentam ótima concordância
- Aparentemente os compostos sempre apresentarão maior capacidade térmica que os elementos que o formam -> Veremos que “não é o caso”

Estimativas de capacidade térmica de cristais

- Tomemos por exemplo: 1 mol de Sb_2S_3 -> corresponde a 2 mols de Sb e 3 mols de S
- Assim temos 5 mols de átomos em um mol de Sb_2S_3
- Nos capítulos seguintes trabalharemos com átomo-grama e os valores de x e y na relação de Neumann-Koop serão fatores (<1), neste caso teremos $C_p \text{ Sb}_2\text{S}_3 = 28/5 = 5,6$ cal/átomo-gramaK
- Neste caso a regra deve ser reescrita:

A capacidade térmica de um átomo-grama de uma fase sólida pode ser calculada pela média ponderada das capacidades térmicas de seus elementos formadores

Entropia de fusão/vaporização

- A regra de Richard (fusão) não é válida para uma ampla variedade de substâncias.
- A regra de Trouton (vaporização), por outro lado apresenta um surpreendente espectro de validade -> Os Valores de ΔS_v se encontram entre 20-25 para uma grande variedade de substâncias. (Próximo de 21 -> Trouton)
- Vamos analisar então o que acontece com a regra de Richard

Entropia de fusão

- A tabela apresenta valores de ΔS_f medidos experimentalmente de ΔH_f e T_{mp} (a regra de Richard prevê um valor de 2)

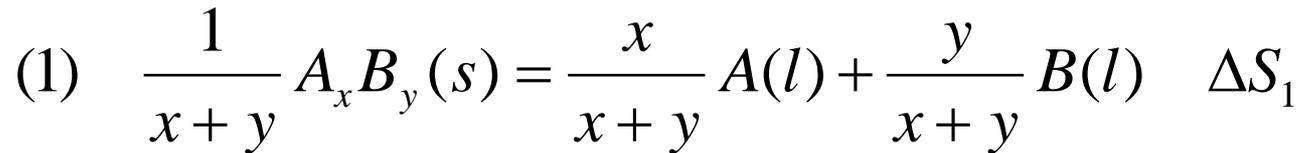
TABLE 6.2
Some Entropies of Fusion

Compound	ΔS_f (cal/gm-atom degree)	Compound	ΔS_f (cal/gm-atom degree)
Pb	2.0	V ₂ O ₅	2.35
Si	6.7	CCl ₄	0.48
NaCl	3.2	CdSb	5.25
MgO	3.0	CuAl ₂	3.48
FeO	2.3	AuSn	4.43

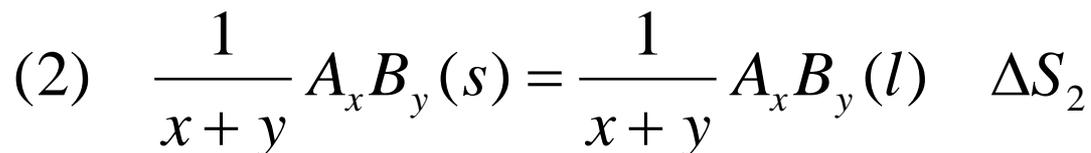
- A razão para os elevados valores de entropia de fusão dos compostos intermetálicos pode ser facilmente entendida -> Entropia de configuração e de mistura -> Zero e a solução líquida é mais randômica (não existe composto ordenado líquido)

Entropia de fusão

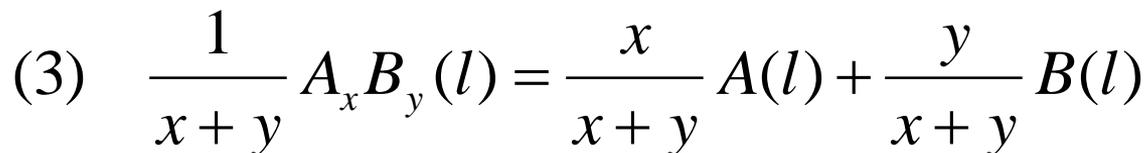
- Para entender qual a importância da entropia de configuração, considere a seguinte reação, no ponto de fusão



- A reação pode ser decomposta em duas etapas



Reação hipotética de fusão sem perda de estrutura ordenada



Desordem do composto formando uma solução randômica

Entropia de fusão

- Para a reação (2) a entropia será resultado da variação vibracional, mas não da mistura $\rightarrow \ln W \cong 0$
- Para a reação (3) \rightarrow das equações deduzidas no capítulo de noções de termodinâmica estatística

$$(3) \quad \Delta S_3 = R \left[\frac{x}{x+y} \ln \left(\frac{x}{x+y} \right) + \frac{y}{x+y} \ln \left(\frac{y}{x+y} \right) \right]$$

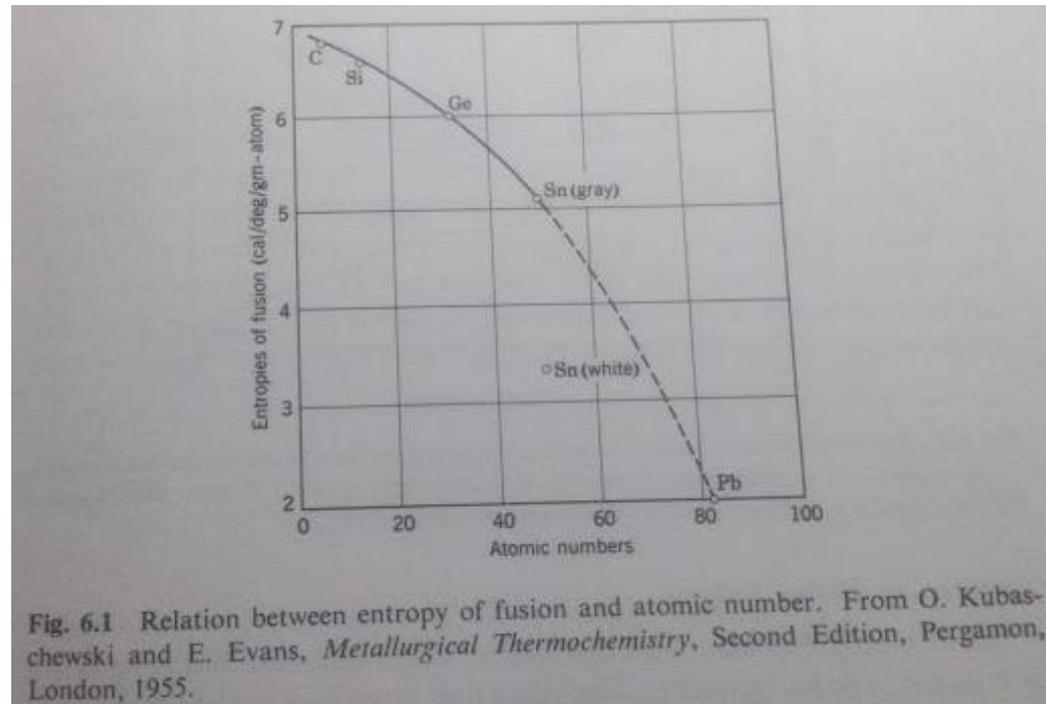
- Calculando ΔS_3 para CdSb, CuAl₂ e AuSn temos 1,37, 1,26 e 1,37 cal/atomo-gramaK, respectivamente

Entropia de fusão

- Considerando os valores da tabela para ΔS_1 e os valores de ΔS_3 , podemos calcular ΔS_2 ($\Delta S_1 = \Delta S_2 + \Delta S_3$) Assim obtemos 3,88, 2,22 e 3,06 cal/atomo-gramaK respectivamente para CdSb, CuAl₂ e AuSn, que estão bem mais próximos dos valores de Richard.
- Considerado ainda a entropia de fusão de elementos, observamos uma proporcionalidade entre ΔS_f e o número atômico.

Entropia de fusão

- A figura apresenta esta relação para elemento do grupo IV



- O parâmetro fundamental neste caso, não é o número atômico, mas sim a energia de ligação do cristal que apresenta a mesma relação com o número atômico

Entalpia de formação de compostos

- Relação com o número atômico do cátion
 - A relação entre a entalpia de formação (ΔH_f^0) de compostos e o número atômico do componente metálico é similar ao observado para ΔS_f

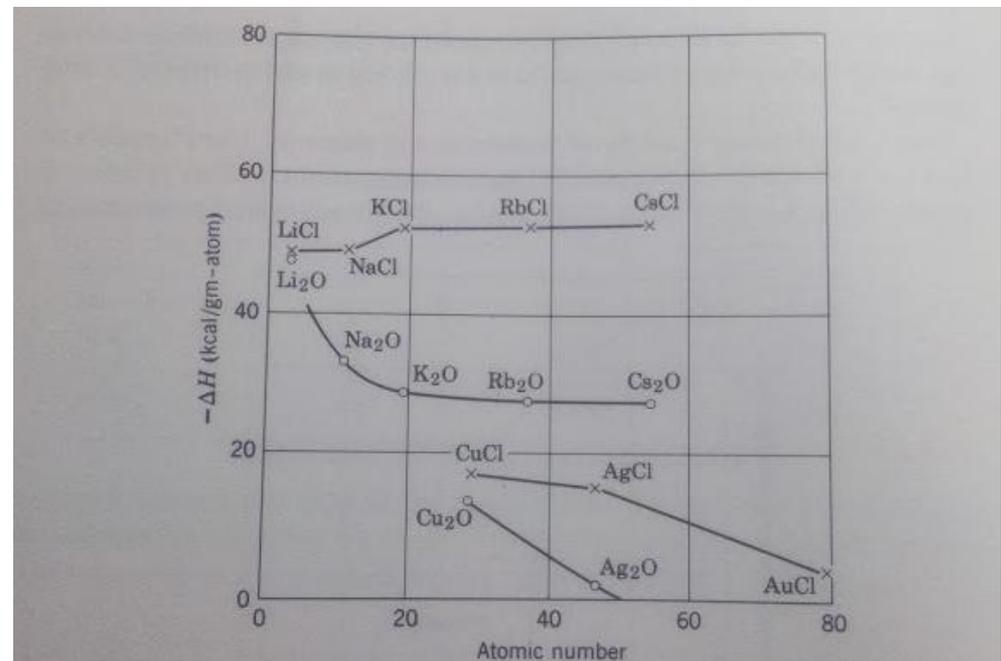


Fig. 6.2 Relation between heat of formation of compounds and cation atomic number. ○ = oxides; × = chlorides. From O. Kubaschewski and E. Evans, *Metallurgical Thermochemistry*, Second Edition, Pergamon, London, 1955.

Entalpia de formação de compostos

- Relação com o volume molar
 - Apesar de útil, o tamanho do átomo varia muito -> em um cristal ele depende do “ambiente” próximo
 - Um exemplo seria o espaçamentos atômico entre átomos de carbono em um hidrocarboneto e o número de ligações covalentes entre os átomos -> quanto maior a energia de ligação menor o raio atômico aparente.
 - De maneira similar, em um cristal, espera-se que a distância interatômica dependa da afinidade entre os átomos

Entalpia de formação de compostos

- Relação com o volume molar
 - Assim, podemos esperar uma relação entre o volume molar e a entalpia de formação de um cristal. Um ΔH_f^0 bastante negativo implica em liberação de energia e uma grande afinidade entre os átomos do cristal
 - Para ilustra a existência desta relação, vamos considerar uma grande variedade de compostos (óxidos, haletos, nitretos e intermetálicos) com estrutura cristalina tipo NaCl ou CsCl

Entalpia de formação de compostos

- Relação com o volume molar
 - Conhecendo a estrutura cristalina, o volume da célula unitária ou o volume molar pode ser calculado, assumindo que o tamanho dos átomos é o mesmo no composto que na forma pura (Adição dos volumes dos componentes puros)
 - Isto deve ser válido se a energia de ligação nos átomos for a média da energia de ligação das formas puras
 - Este volume hipotético V' deve ser comparado com o volume real V (determinado por exemplo por DRX ou medida de massa específica)

Entalpia de formação de compostos

- Relação com o volume molar

– A diferença $\Delta V=(V-V')$ será então comparado com ΔH_f^0 . ΔV pode ser associado a reação



–A comparação gráfica ($\Delta V \times \Delta H_f$) mostra a existência de uma correção forte

–Componentes com $\Delta H_f^0 \sim 0$ apresentam pequena variação de volume -> logo, reações fortemente exotérmicas são acompanhadas de grande contração

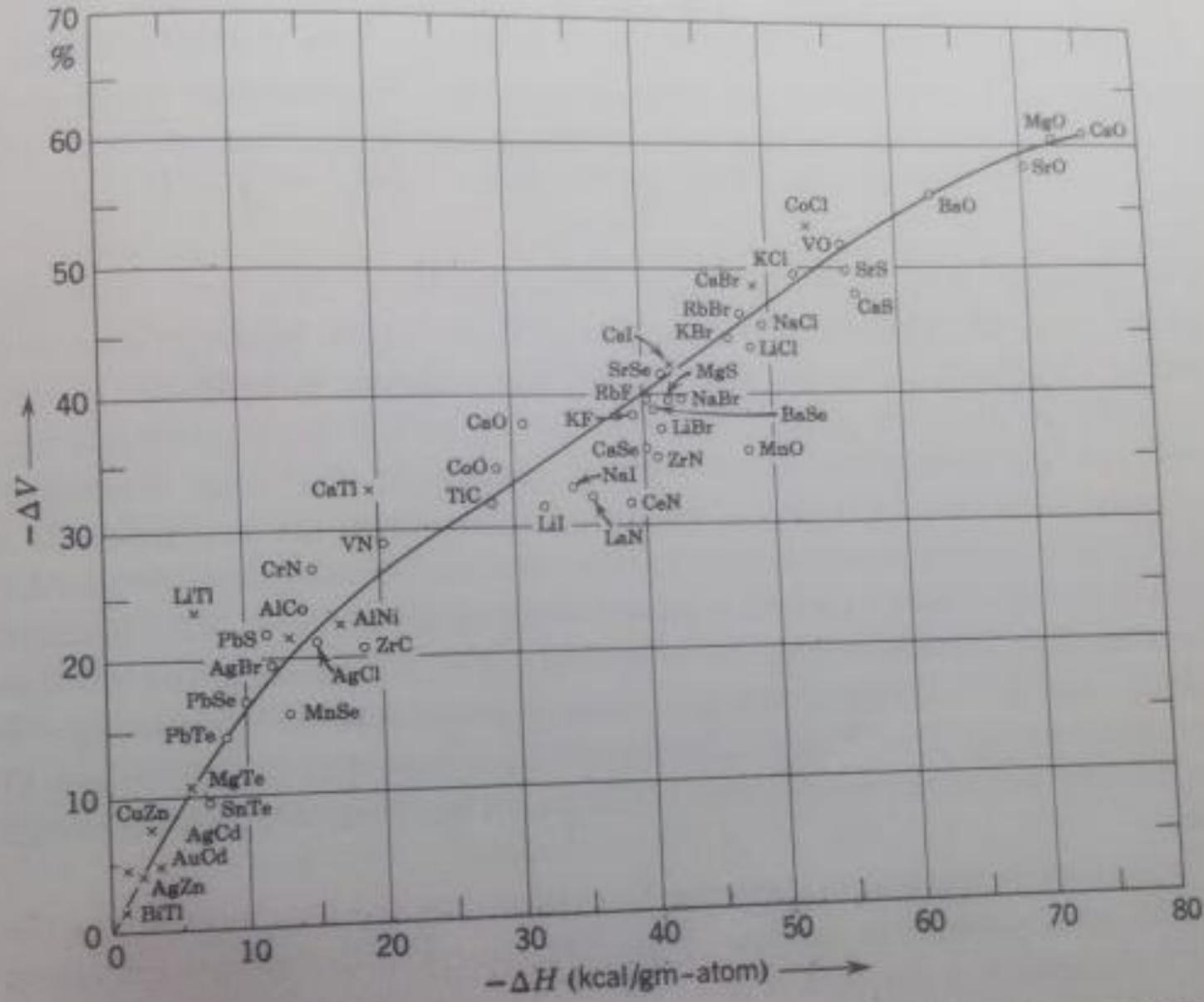
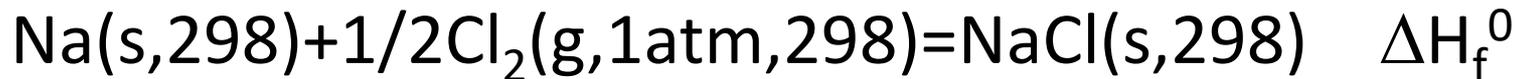


Fig. 6.3 Heat evolution and volume contraction upon formation of compounds of simple structural type. \circ = NaCl type; \times = CsCl type. From O. Kubaschewski and E. Evans, *Metallurgical Thermochemistry*, Second Edition, Pergamon, London, 1955

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber

– A entalpia de formação de compostos iônicos pode ser calculada de dados experimentais pelo Ciclo de Born-Haber. Considere a reação:



– Vamos colocar o elemento metálico na fase gasosa, dissociar o Cl_2 , transferir um elétron do sódio para uma distância infinita, transferir um elétron do infinito para o Cl e então combinar Na^+ e Cl^- para formar um cristal de NaCl

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber

– Escrevendo estas 5 etapas



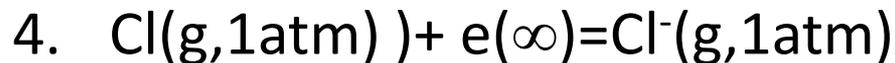
$\Delta H_1 =$ entalpia de sublimação



$\Delta H_2 =$ energia de dissociação



$\Delta H_3 =$ energia de ionização



$\Delta H_4 =$ afinidade eletrônica



$\Delta H_5 =$ energia da rede



$$\Delta H_f = \sum_1^5 \Delta H_i$$

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - ΔH_1 , a entalpia de sublimação, é facilmente encontrada na literatura -> obtida de medidas de pressão de vapor
 - ΔH_2 , energia de dissociação, é disponível de experimentos com gases (ex. feixe eletrônico de energia controlada)
 - ΔH_3 , a energia de ionização, pode ser determinada por medidas óticas ou experimentos com gases (ex. feixe eletrônico de energia controlada) -> facilmente acessível (se a reação envolver um íon +2, mais uma reação deverá ser adicionada -> segunda energia de ionização)

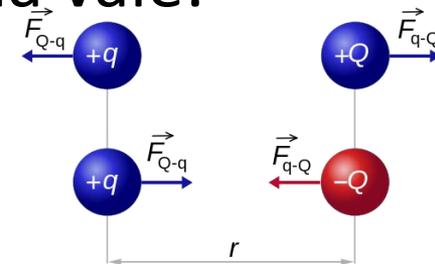
Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - ΔH_4 , a afinidade eletrônica, é a medida inversa da energia de ionização
 - ΔH_5 , a energia da rede, pode ser calculada pela teoria de Born.
 - Vamos descrevê-la.....

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - No caso de um cristal iônico, a força mantendo os átomos próximos é Coulumbiana. A energia entre dois íon univalentes em função da distância vale:

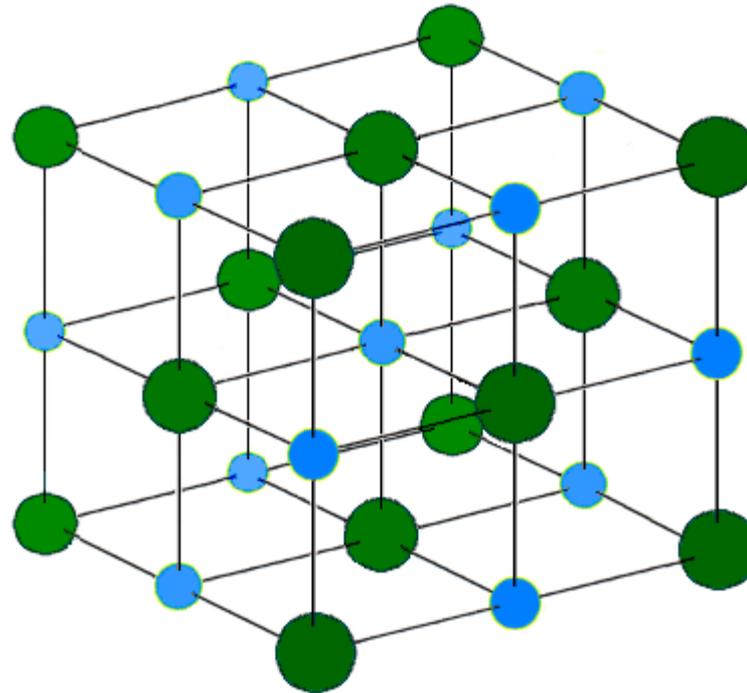
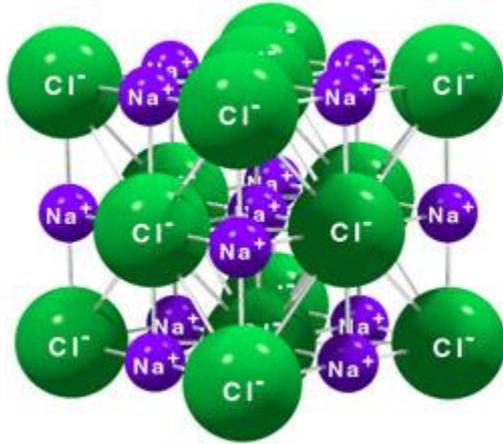
$$E_{\alpha} = \pm \frac{e^2}{x}$$



$$|\vec{F}_{Q-q}| = |\vec{F}_{q-Q}| = k \frac{|q \times Q|}{r^2}$$

- Da nossa conversão (-) se refere a atração
- No caso do cristal, um ion não é afetado somente por um ion mas sim por muitos

Estrutura do NaCl



Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - Por exemplo, no NaCl, um íon Na^+ tem 6 Cl^- em sua vizinhança a uma distância x , 12 Na^+ na segunda vizinhança a uma distância $\sqrt{2}x$, 8 Cl^- na terceira vizinhança a uma distância $\sqrt{3}x$, 6 Na^+ na quarta vizinhança a uma distância $2x$, etc....
 - Assim a energia deste Na^+ é a soma destas energias

$$E_{\alpha} = -\frac{e^2}{x} \left[6 - \frac{12}{\sqrt{2}} + \frac{8}{\sqrt{3}} - \frac{6}{2} + \dots \right] \quad \text{ou} \quad E_{\alpha} = -\frac{Ae^2}{x}$$


A = constante de Madelung (depende da estrutura)

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - Quando os íons se aproximam uma forte interação repulsiva ocorre. Este termo não é tão simples como o termo atrativo. Born assumiu que:

$$E_r = \frac{B}{x^n} \quad \text{B e n são constantes}$$

- Assim a energia de rede para N_0 cátion e N_0 ânions é:

$$E_l = N_0 [E_a + E_r] = N_0 \left[-\frac{Ae^2}{x} + \frac{B}{x^n} \right]$$

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - A figura apresenta E_l em função de x e as componente E_r e E_a

Qual seria a força resultante em x_0 ?

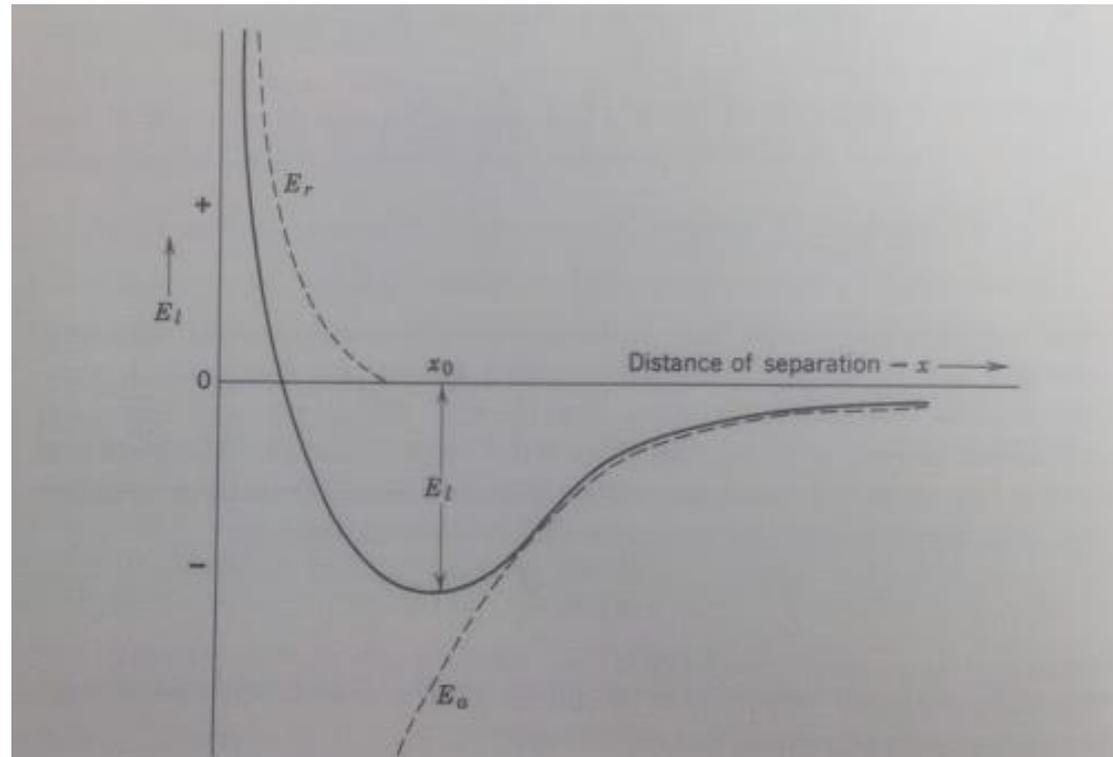


Fig. 6.4 Lattice energy of a crystal as a function of separation of the ions. E_r is the repulsive contribution and E_a is the attractive contribution.

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber

- A distância interatômica de equilíbrio será x_0 onde

$$\frac{dE_l}{dx} = 0$$

- Para obter as constantes B e n experimentos devem ser realizados

- Um destes parâmetros pode ser eliminado com a consideração de equilíbrio

$$\left(\frac{dE_l}{dx} \right)_{x=x_0} = N_0 \left[\frac{Ae^2}{x^2} - \frac{nB}{x^{n+1}} \right] = 0 \qquad B = \frac{Ae^2 x_0^{n-1}}{n}$$

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber

- Substituindo $B = \frac{Ae^2 x_0^{n-1}}{n}$ em $E_l = N_0[E_a + E_r] = N_0 \left[-\frac{Ae^2}{x} + \frac{B}{x^n} \right]$

- Para x_0 : $(E_l)_{x=x_0} = -\frac{N_0 Ae^2}{x_0} \left[1 - \frac{1}{n} \right]$

- Estritamente falando estes cálculos só seriam válidos a 0K -> pois o equilíbrio não ocorre para o mínimo desta energia, mas sim o mínimo de energia livre
- Para calcular a $T > 0K$ o termo de entropia TS_l deveria ser considerado (o que é mais complicado)

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - Agora, o único coeficiente a ser avaliado é n
 - Seria razoável esperar que o termo repulsivo esteja relacionado com a compressibilidade de um cristal.
 - Vamos considerar a compressibilidade a 0K

$$\beta \equiv -\frac{1}{V} \left(\frac{\partial V}{\partial P} \right)_T \quad \text{Considerando } T=\text{cte} \quad dP = -\frac{dV}{\beta V}$$

Se V_0 é o volume a $P=0$, aplicando uma pequena pressão teremos uma mudança de volume de V_0 para V'

$$P \cong -\frac{V' - V_0}{\beta V_0}$$

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - O trabalho realizado pelo sólido será

$$W = \int_{V_0}^{V'} P dV$$
$$P \cong -\frac{V' - V_0}{\beta V_0}$$

$$W = -\frac{1}{\beta} \int_{V_0}^{V'} \left(\frac{V' - V_0}{V_0} \right) dV$$
$$W = -\frac{(V' - V_0)^2}{2\beta V_0}$$

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber

- Considerado agora a variação da energia interna na compressão

$$\Delta E_l = E_l' - (E_l)_{x=x_0}$$

- Relembrando que E, por ser propriedade pode ser considerada função de duas outras variáveis de estado.

- A temperatura é constante = 0K, então P e V são variáveis -> P foi expresso em função de V, assim queremos expressar $E_l = E(V)$

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - Neste ponto é conveniente introduzir o teorema de Taylor que diz que se uma função $f(x)$, tem derivada contínua na região de interesse, então

$$f(x') = f(x_0) + (x' - x_0) \left[\frac{df(x)}{dx} \right]_{x=x_0} + \frac{1}{2!} (x' - x_0)^2 \left[\frac{d^2 f(x)}{dx^2} \right]_{x=x_0} + \dots$$

- No caso de $E_l = f(V)$

$$E_l' = (E_l)_{V=V_0} + (V' - V_0) \left[\frac{dE_l}{dV} \right]_{V=V_0} + \frac{1}{2!} (V' - V_0)^2 \left[\frac{d^2 E_l}{dV^2} \right]_{V=V_0} + \dots$$

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber

- No volume de equilíbrio V_0 $\left[\frac{dE_l}{dV} \right]_{V=V_0} = 0$

- Assim a variação de energia pode ser dada por

$$E_l' - (E_l)_{V=V_0} \cong + \frac{1}{2!} (V' - V_0)^2 \left[\frac{d^2 E_l}{dV^2} \right]_{V=V_0}$$

Desconsiderando termos de alta ordem, justificado se $(V' - V_0) \ll V_0$

- Usando as leis da termodinâmica $dE = TdS - PdV$ a $T=0K$

$$dE = -PdV \text{ ou } \Delta E = -W$$

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
- Assim de

$$E_l' - (E_l)_{V=V_0} \cong + \frac{1}{2!} (V' - V_0)^2 \left[\frac{d^2 E_l}{dV^2} \right]_{V=V_0} = \left(W = - \frac{(V' - V_0)^2}{2\beta V_0} \right)$$

$$\frac{1}{\beta} = V_0 \left(\frac{d^2 E_l}{dV^2} \right)_{V=V_0}$$

- Desta relação vemos que a compressibilidade de um cristal é inversamente proporcional a curvatura da curva E x distância interatômica no seu ponto de mínimo

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - Para um cristal, o volume molar é relacionado a distância interatômica (C depende da estrutura)

$$V = CN_0x^3$$

– Como

$$\frac{dE}{dV} = \left(\frac{dE}{dx} \right) \left(\frac{dx}{dV} \right) \quad \left(\frac{dE}{dV} \right) = \frac{1}{3N_0Cx^2} \left(\frac{dE}{dx} \right)$$

$$E_l = N_0[E_a + E_r] = N_0 \left[-\frac{Ae^2}{x} + \frac{B}{x^n} \right]$$

– Para a segunda derivada

$$\left(\frac{d^2E}{dV^2} \right)_{V=V_0} = \frac{1}{9N_0^2C^2x_0^2} \left(-\frac{4Ae^2}{x_0^5} + \frac{n(n+3)B}{x_0^{n+4}} \right)$$

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber

– Substituindo B $B = \frac{Ae^2 x_0^{n-1}}{n}$ em 

e substituindo $\left(\frac{d^2 E}{dV^2}\right)_{V=V_0} = \frac{1}{9N_0^2 C^2 x_0^2} \left(-\frac{4Ae^2}{x_0^5} + \frac{n(n+3)B}{x_0^{n+4}} \right)$ em



$$\frac{1}{\beta} = V_0 \left(\frac{d^2 E_l}{dV^2} \right)_{V=V_0}$$

– Obtemos $n = 1 + \frac{9Cx_0^4}{\beta e^2 A}$

Assim podemos obter n da extrapolação de β e x_0 para 0K

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - Espera-se que n varie com o número de elétrons no átomo.
 - Para números atômicos grande, espera-se n grande se compara a elementos de pequeno número atômico
 - Na realidade Pauling determinou que n está relacionado com o número de camadas/níveis eletrônicos completos
 - Para um íon com a configuração do He, Ne, Ar, Kr e Xe n vale 5, 7, 9, 10 e 12 respectivamente.
 - Para íons com configuração diferente toma-se a média
ex. para LiF $n=6$, pois n Li⁺=5 e para o F⁻=7

Entalpia de formação de compostos

- Ciclo de Born-Haber
 - para obter ΔH_5 é necessário mais duas etapas.
 - Avaliar E_1 a 0K
 - para ser rigoroso este deve ser convertido em um termo de entalpia e recalculado a 298

A tabela apresenta valores experimentais comparados aos valores da teoria de Born-Haber -> com boa concordância

TABLE 6.3
Comparison of Theoretical and Experimental Values of ΔH_f° (in kcal/mole)

Compound	ΔH_1	ΔH_2	ΔH_3	ΔH_4	ΔH_5	$\Delta H_f^\circ(\text{calc})$	$\Delta H_f^\circ(\text{exptl})$
LiCl(<i>s</i>)	38.3	29.0	125.8	-87.3	-193.5	-87.7	-96.9
NaCl(<i>s</i>)	25.7	29.0	120.0	-87.3	-184.5	-97.1	-98.7
KCl(<i>s</i>)	21.0	29.0	101.6	-87.3	-163.6	-99.3	-104.2
RbCl(<i>s</i>)	20.0	29.0	97.8	-87.3	-159.0	-99.5	-102.9
LiBr(<i>s</i>)	38.3	26.6	125.8	-82.0	-182.1	-73.4	-83.4
NaBr(<i>s</i>)	25.7	26.6	120.0	-82.0	-173.0	-82.7	-86.4
KBr(<i>s</i>)	21.0	26.6	101.6	-82.0	-156.8	-89.6	-93.7
LiI(<i>s</i>)	38.3	25.5	125.8	-75.7	-170.7	-56.8	-64.8
NaI(<i>s</i>)	25.7	25.5	120.0	-75.7	-161.4	-65.9	-69.2
KI(<i>s</i>)	21.0	25.5	101.6	-75.7	-150.0	-77.6	-78.3

É importante lembrar

- A existência das relações entre propriedades termodinâmicas e físicas
- Entender a física por traz das relações

Lista de exercícios

Apêndice 3 do livro, pg. 328:

nenhum

Resolver algebricamente entendendo todos os passos.