



1

## Cristalização na natureza

Halos atmosféricos  
Pilar (abaixo) e arco tangente (acima)

Formações geológicas, México  
cristais de gipsita ( $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ )

Fonte: National Geographic, 2007

Fonte: Linch, 1978, Atmospheric Halos. Scientific American

2

2

## Cristalização na sociedade

- Engenho de açúcar

Frans Post, ~1650 In: ENCICLOPÉDIA Itaú Cultural de Arte e Cultura Brasileiras. São Paulo: Itaú Cultural, 2019.



3

3

## Cristalização na sociedade

- Flor de sal

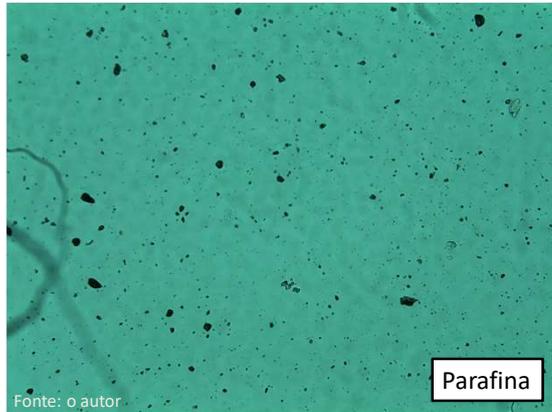


<https://www.brittanytourism.com/offers/terre-de-sel-guerande-en-2113598/>

4

4

## Cristalização na sociedade



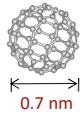
<https://fineartamerica.com/featured/light-micrograph-of-aspirin-crystals-sinclair-stammers.html>

5

5

## Dimensões das partículas

Fullerenes  $C_{60}$



1 nm

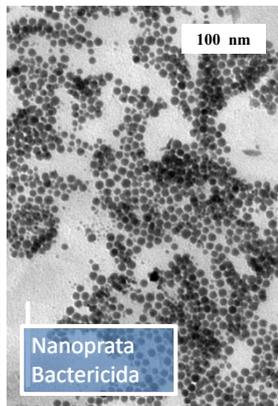
1  $\mu$ m

1 mm

$10^{-9}$

$10^{-6}$

$10^{-3}$



6

## Relevância da cristalização

- Objetivo 1: separação de componentes de uma mistura
  - Provavelmente a tecnologia de **separação** mais comum após destilação
    - Produtos de fermentação: antibióticos, enzimas
    - Orgânicos: P-xileno, Caprolactama, Parafina
    - Hidrometalurgia: Cu Co Mn
    - Tratam. Efluentes: metais, fósforo
    - Reúso de água: NaCl, CaCO<sub>3</sub>
- Objetivo2: síntese de produto particulado
  - ~ 70 % de todos os **produtos** da indústria química são sólidos
    - Sais & derivados: CuSO<sub>4</sub>, NaOH
    - Alimentos: adoçantes, sucos
    - Química fina: pigmentos
    - Fármacos: antibióticos, enzimas, insulina

7

7

## Introdução

- Cristalização admite algumas simplificações

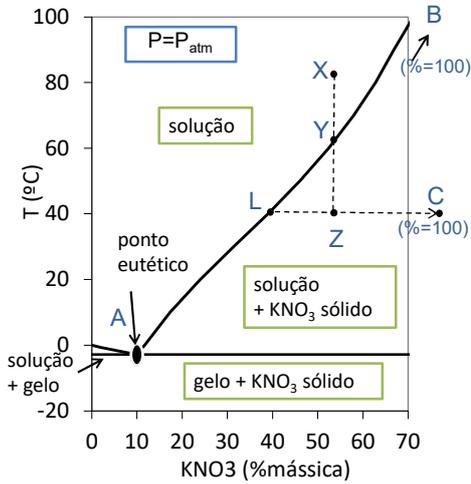
Variável	Caso simplificado	cristalização
Concentrações	Baixas	Elevadas
Equilíbrio termodinâmico	Gás perfeito, Solução ideal	Desvios da idealidade em ambas as fases
K constante?	$K_i = K_i(T)$	$K_i = K_i(x_i, T)$
Número de componentes transportados entre fases	1	1
Estágio de equilíbrio	Sim	Sim

8

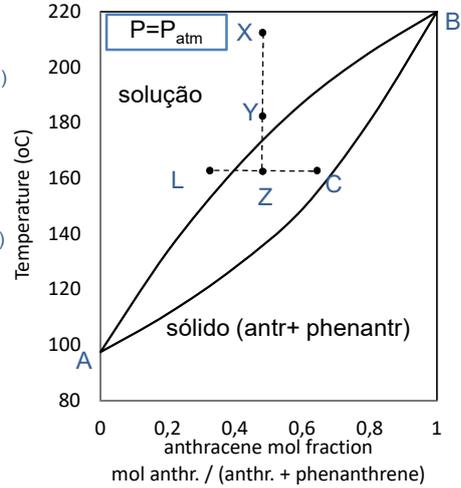
8

# Diagramas de fases S-L para sistemas binários

## Eutético



## Solução sólida

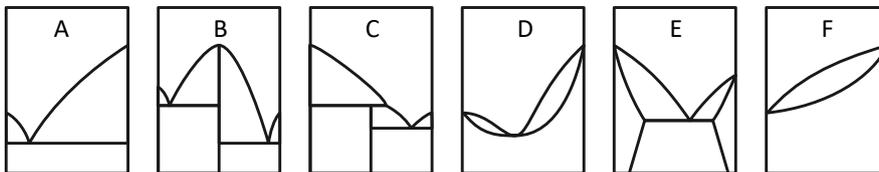


Regra da alavanca:  $LZ/LC = \text{kg sólido} / \text{kg suspensão}$

9

9

# Tipos de sistemas binários



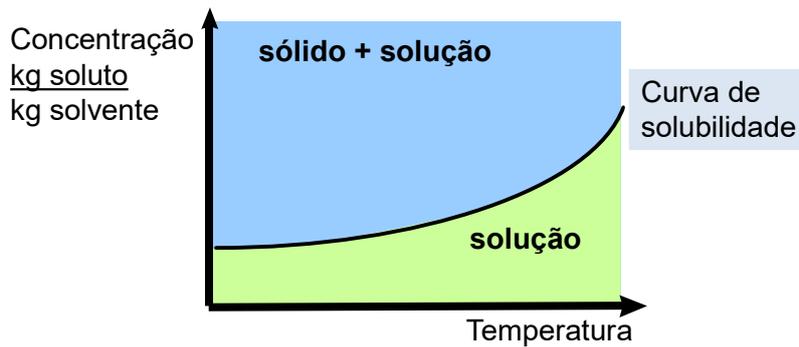
Sistema mais comum

10

10

## Diagramas de fases para sistemas binários

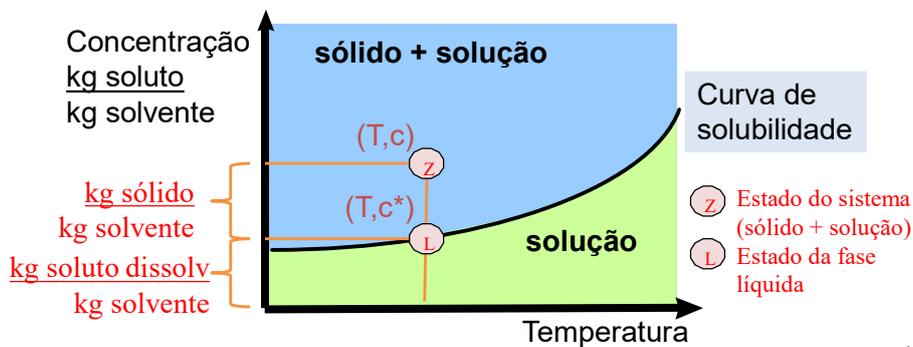
- Curva de solubilidade
  - É um trecho do diagrama de fases!
  - Usada em sistemas eutéticos (a fase sólida é constituída por um composto de composição fixa, usualmente o soluto puro)



11

## Suspensões em equilíbrio

- Se a concentração for expressa em kg/kg de solvente, a quantidade de sólidos é lida diretamente no gráfico:

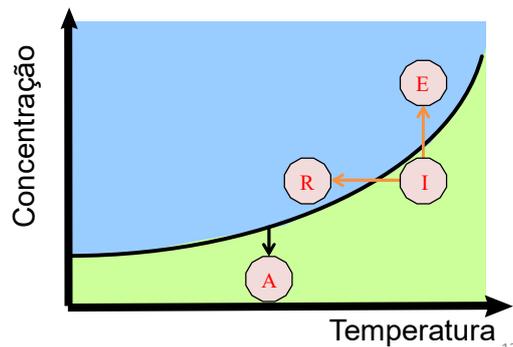


12

## Métodos de cristalização

- Os métodos de cristalização são aplicados conforme a forma da curva de solubilidade (isto é, conforme o diagrama de fases).
- Há métodos de criação de fase e de adição de agente separador de massa, a saber:

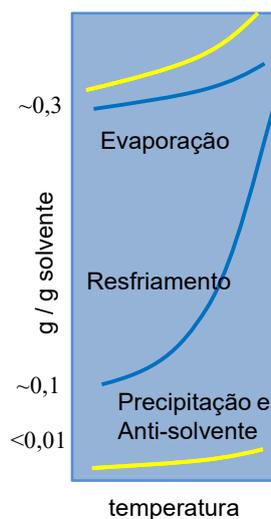
- (E) Cristalização evaporativa
- (R) Cristalização por Resfriamento
- (A) Cristalização por adição de anti-solvente
- (A) Precipitação (cristalização por reação química)



13

## Cristalização por resfriamento

- Princípio
  - Resfriamento da solução
- Diagrama de fases:
  - Solubilidade moderada (10 a 30% massa)
  - curva de solubilidade inclinada
- Recuperação
  - Estágio de equilíbrio
  - limitada pela solubilidade na menor temperatura.
- Produto: processo é lento, logo partículas são grandes (submilimétricas), facetadas, puras



14

## Sal de Platina

resfriamento

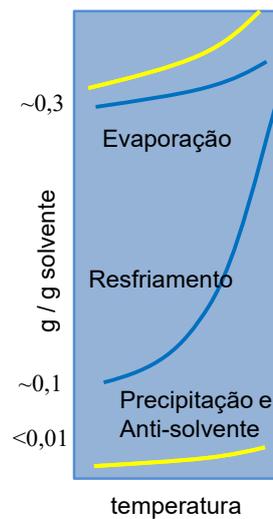


15

15

## Cristalização por evaporação

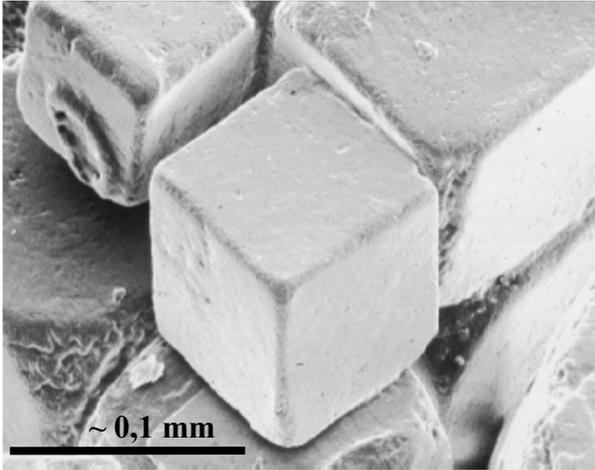
- Princípio:
  - remoção do solvente por adição de calor, vácuo (flash), ou ambos
- Diagrama de fases:
  - Solubilidade moderada (10 a 30% massa)
  - única escolha para curva de solubilidade plana
- Recuperação
  - Estágio de equilíbrio
  - limitada por impurezas na alimentação
- Produto: partículas grandes (sub-milimétricas), facetadas, puras



16

# Cloreto de sódio

evaporação



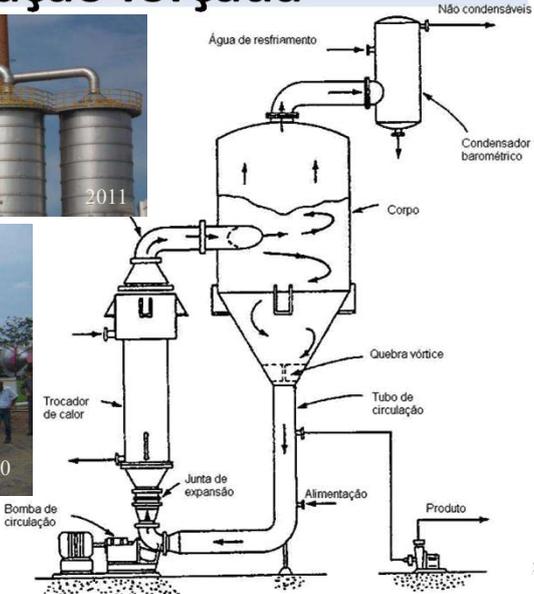
17

17

## Cristalizador evaporativo do tipo circulação forçada



Unidade industrial da Sal Cisne  
Cabo Frio, RJ  
Projeto conceitual IPT



18

## Precipitação e Anti-solvente

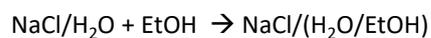
- Precipitação

- Dois compostos solúveis reagem entre si, formando um produto pouco solúvel



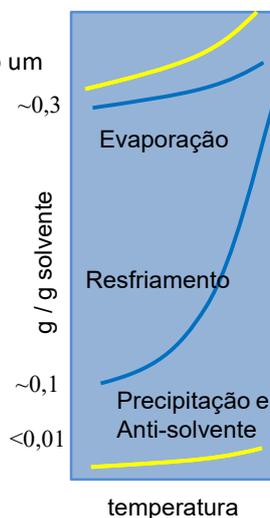
- Cristalização por anti-solventes:

- Solute altamente solúvel no solvente ,  
ex. NaCl em H<sub>2</sub>O, mas pouco solúvel na mistura do solvente com o anti-solvente, ex. H<sub>2</sub>O/EtOH



- Recuperação: não é estágio de equilíbrio!

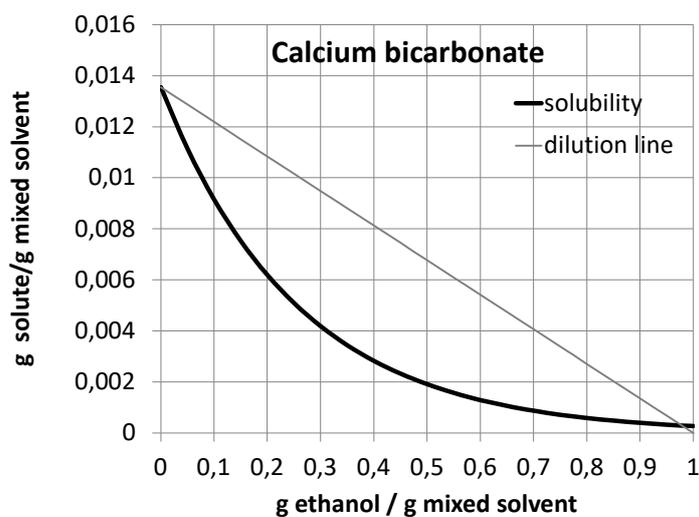
- Produto: partículas pequenas (micrométricas), impuras



19

19

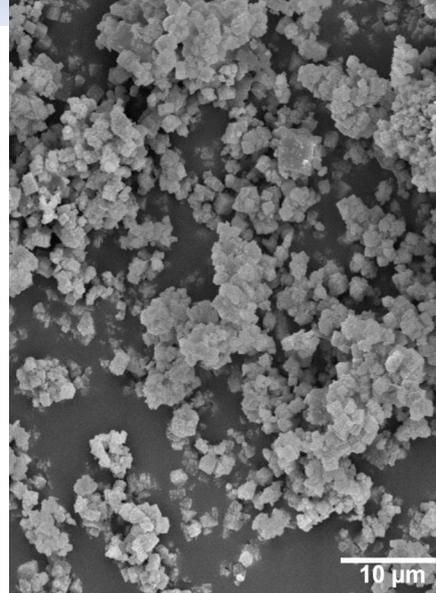
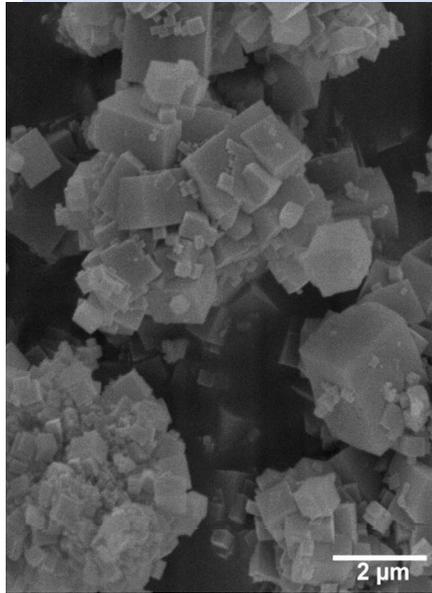
## Cristalização por anti-solvente



20

20

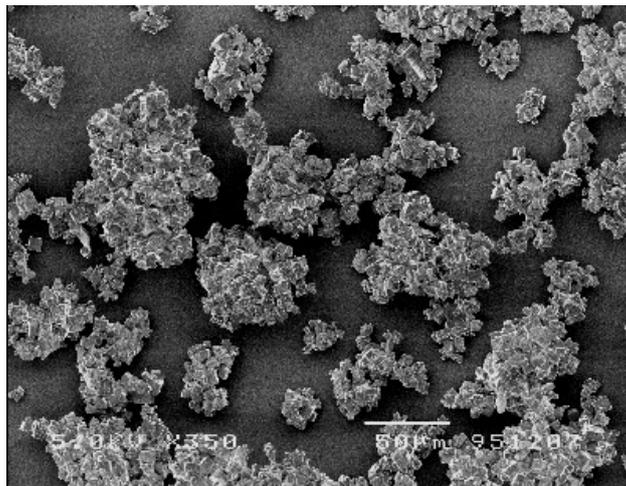
## Fluoreto de Cálcio



21

## Cloreto de sódio

Anti-solvente



22

22

## Resumo

- Cristalização a partir de soluções é usada
  - Para separação
  - Para síntese de material particulado
- A cristalização é promovida trazendo o estado do sistema da região de líquido para a região-sólido líquido.
- O caminho do processo no diagrama de fases define o método de cristalização. Os métodos são:

Método	Diagrama de fases	Solubilidade (%massa)	Estágio de equilíbrio
Resfriamento	Curva de solubilidade inclinada	10 a 30	Sim
Evaporação	Curva de solubilidade plana	10 a 30	Sim
Anti-solvente	Produto pouco solúvel na mistura solvente / anti-solvente	< 1	Não
Precipitação	Produto de reação química é pouco solúvel	< 1	Não

23

23

## CRISTALIZAÇÃO A PARTIR DE SOLUÇÕES

Métodos de cristalização e  
Balanços – parte b

Marcelo Seckler

24

24

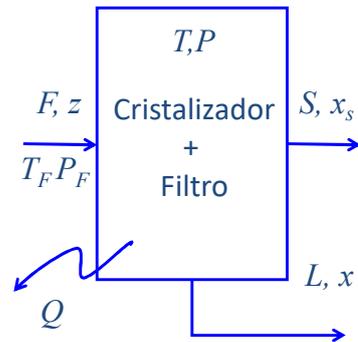
## BM para cristalização por resfriamento

- Contínuo, binário, V.C.  
cristalizador+separador

- BMG
- BMComp
- BE
- Estágio de equilíbrio:

- Recuperação

$$R \equiv \frac{Sx_s}{Fz} \quad \frac{\text{g soluto no cristal}}{\text{g soluto na alimentação}}$$



25

25

## BM para cristalização por resfriamento

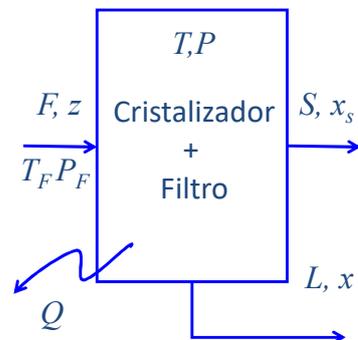
- Contínuo, binário, V.C.  
cristalizador+separador

- BMG  $F = S + L$
- BMComp  $Fz = Sx_s + Lx$
- BE  $Q + Fh_f = Sh_s + Lh_L$

- Estágio de equilíbrio:
  - $x = x(T)$  (solubilidade)
  - $x_s = 1$  (sist.eutético)

- Composições
  - Optamos por não usar
- Recuperação

$$R \equiv \frac{Sx_s}{Fz} \quad \frac{\text{g soluto no cristal}}{\text{g soluto na alimentação}}$$



26

26

## BM para cristalização por resfriamento

- Contínuo, binário, V.C. cristizador+separador
  - BMG  $F = S + L$
  - BMComp  $Fz = Sx_s + Lx$
  - BE  $Q + Fh_f = Sh_s + Lh_L$
  - Equilíbrio
    - $x = x(T)$  (solubilidade)
    - $x_s = 1$  (sist.eutético)
  - Composições
    - Optamos por não usar
  - Recuperação
    - $R \equiv \frac{Sx_s}{Fz} \frac{\text{g soluto no cristal}}{\text{g soluto na alimentação}}$
- Regra de fase de Gibbs estendida p/ cristalização por resfriamento:
  - Variáveis V=12:
    - F z T<sub>F</sub> P<sub>F</sub> / L x S x<sub>s</sub> / T P Q R
  - Equações E = 6
  - Graus de liberdade F = V-E = 6
  - A alimentação é conhecida: F z T<sub>F</sub> P<sub>F</sub>
- **Especificamos R e P**
- **Determinamos**
  - L x S x<sub>s</sub> T Q ← Refletir!

27

27

## BM para cristalização por resfriamento

- Contínuo, binário, V.C. cristizador+separador
  - BMG  $F = S + L$
  - BMComp  $Fz = Sx_s + Lx$
  - BE  $Q + Fh_f = Sh_s + Lh_L$
  - Equilíbrio
    - $x = x(T)$  (solubilidade)
    - $x_s = 1$  (sist.eutético)
  - Composições
    - Optamos por não usar
  - Recuperação
    - $R \equiv \frac{Sx_s}{Fz} \frac{\text{g soluto no cristal}}{\text{g soluto na alimentação}}$
- Solução:
  - Eutético →  $x_s = 1$
  - R →  $S / F = Rz$
  - BMG →  $L / F = 1 - Rz$
  - BMC →  $x = \frac{z - Rz}{1 - Rz}$
  - x=x(T) → T
  - BE →  $\frac{Q}{F} = -[h_{cryst}Rz + c_{p,F}(T_F - T)]$ 
    - Entalpia de cristalização  $h_{cryst} > 0$  para processo exotérmico.
    - Estado de referência é a solução saturada na T do cristizador

28

## BM para cristalização por resfriamento

- Método gráfico para uso do BMC:

- Retomamos a expressão do BMC

$$x = \frac{z - Rz}{1 - Rz}$$

- rearranjando

$$Rz = \frac{z - x}{1 - x} = \frac{z' - x'}{z' + 1}$$

- E a reescrevemos em termos de  $x'$  e  $z'$  (após alguns rearranjos)

$$x' = (1 - R)z'$$

- $x'$  pode ser lido diretamente da curva de solubilidade!

- Unidades de concentração

- $x$  – g soluto / g solução

- $x'$  – g soluto / g solvente

(solução = soluto + solvente)

$$\frac{1}{x} = 1 + \frac{1}{x'}$$

$$x = \frac{x'}{x' + 1}$$

$$x' = \frac{x}{1 - x}$$

$$\frac{z - x}{1 - x} = \frac{z' - x'}{z' + 1}$$

29

29

## BM para cristalização por resfriamento

- **Se especificarmos  $T, P$ , só**

muda a sequência de cálculos:

- Eutético  $\rightarrow x_s = 1$

- $x = x(T) \rightarrow x$

- BMC  $\rightarrow Rz = \frac{z - x}{1 - x}$

- R  $\rightarrow S / F = Rz$

- BMG  $\rightarrow L / F = 1 - Rz$

- BE  $\rightarrow \frac{Q}{F} = -[h_{cryst}Rz + c_{p,F}(T_F - T)]$

Entalpia de cristalização  $h_{cryst}$  positiva  
p/ processo exotérmico

- Método gráfico para BMC

- obtemos R da leitura da curva de solubilidade

- Dada  $T \rightarrow x = x(T) \rightarrow x'$

- BMC  $\rightarrow x' = (1 - R)z'$

- Ou seja  $R = \frac{z' - x'}{z'}$

30

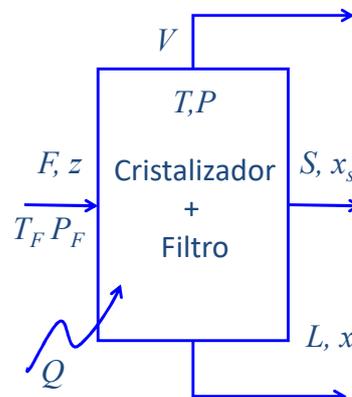
## BM para cristalização por evaporação

- Sistema binário, V.C.

cristalizador+separador

- BMG  $F = S + L + V$
- BMComp  $Fz = Sx_s + Lx + 0$
- BE  $Q + Fh_f = Sh_s + Lh_L + Vh_V$
- Equilíbrio
  - $x = x(T, P)$  (solubilidade)
  - $x_s = 1$  (eutético)
  - $P = P_{sat}(T)$  (ebulição)
- Composições: não usamos
- Recuperação

$$R \equiv \frac{Sx_s}{Fz} \quad \frac{\text{g soluto no cristal}}{\text{g soluto na alimentação}}$$



31

31

## BM para cristalização por evaporação

- Sistema binário, V.C.

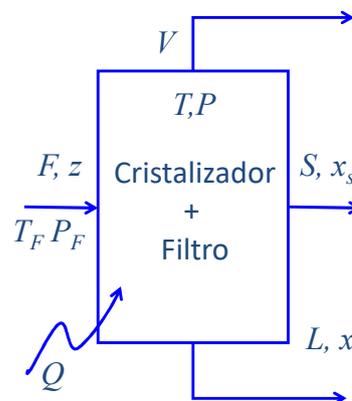
cristalizador+separador

- BMG
- BMComp
- BE
- Equilíbrio

$$P = P_{sat}(T) \quad (\text{ebulição})$$

- Composições: não usamos
- Recuperação

$$R \equiv \frac{Sx_s}{Fz} \quad \frac{\text{g soluto no cristal}}{\text{g soluto na alimentação}}$$



32

32

## BM para cristalização por evaporação

- Sistema binário, V.C. cristizador+separador
  - BMG  $F = S + L + V$
  - BMComp  $Fz = Sx_s + Lx + 0$
  - BE  $Q + Fh_f = Sh_s + Lh_L + Vh_V$
  - Equilíbrio
    - $x = x(T, P)$  (solubilidade)
    - $x_s = 1$  (eutético)
    - $P = P_{sat}(T)$  (ebulição)
  - Composições: não usamos
  - Recuperação
    - $R \equiv \frac{Sx_s}{Fz}$   $\frac{\text{g soluto no cristal}}{\text{g soluto na alimentação}}$
- Gibbs estendida para cristalização evaporativa
  - Variáveis  $V=13$ 
    - $T_F P_F F z R / L x S x_s V / T P Q$
  - Equações  $E = 7$
  - Graus de liberdade  $F=V-E=6$
  - A alimentação é conhecida:  $F z T_F P_F$
  - Por exemplo especificamos
    - $T$
    - $R$  (recuperação)

33

33

## BM para cristalização por evaporação

- Sistema binário, V.C. cristizador+separador
  - BMG  $F = S + L + V$
  - BMComp  $Fz = Sx_s + Lx + 0$
  - BE  $Q + Fh_f = Sh_s + Lh_L + Vh_V$
  - Equilíbrio
    - $x = x(T, P)$  (solubilidade)
    - $x_s = 1$  (eutético)
    - $P = P_{sat}(T)$  (ebulição)
  - Composições: não usamos
  - Recuperação
    - $R \equiv \frac{Sx_s}{Fz}$   $\frac{\text{g soluto no cristal}}{\text{g soluto na alimentação}}$
- $T \rightarrow P$  (pressão para ebulição)
- $T \rightarrow x=x(T)$
- Eutético simples  $\rightarrow x_s=1$
- $R \rightarrow$   $\frac{S}{F} = Rz$
- BMC  $\rightarrow L$   $\frac{L}{F} = \frac{z}{x}(1-R)$
- BMG  $\rightarrow V$   $\frac{V}{F} = 1 - Rz - \frac{z}{x}(1-R)$
- BE  $\rightarrow$   $\frac{Q}{F} = \frac{V}{F}h_{vap} - h_{crist}Rz - c_{p,F}(T_F - T)$

34

34

## BM para cristalização por evaporação

- Outro índice interessante

$$\frac{V}{S} = \frac{1}{Rz} - \frac{(1-R)}{R} \frac{1}{x} - 1$$

- Consumo de vapor V para produzir uma vazão de sólidos S especificada.
- Se alimentação estiver saturada

$$z = x$$

- e as equações anteriores se simplificam para

$$\frac{L}{F} = (1 - R)$$

$$\frac{V}{F} = R(1 - z) \quad \frac{V}{S} = \frac{1}{z'}$$

35

35

## Resumo

- Vimos como descrever uma operação de cristalização quando pode ser assumido estágio de equilíbrio:
  - Balanços de massa e energia, expressão para solubilidade do composto que cristaliza (equilíbrio)
  - Conhecida a alimentação, restam 2 variáveis a especificar
    - Cristalização por resfriamento: P e (R ou T)
    - Cristalização evaporativa: R e (T ou P)
  - São obtidos
    - R ou T, consumo energético, todas as correntes de saída (sólido, líquido, vapor)

36

36

## Exemplo – Suspensões em equilíbrio

1. Construa o diagrama T-x-y para uma mistura de  $\text{AgNO}_3$  e água
2. Para uma mistura contendo 10% massa de  $\text{AgNO}_3$  a  $-5^\circ\text{C}$ :  
Quais as fases (se houver sólido, qual composto?)? Em quais proporções? Qual a composição de cada fase?
3. E para uma mistura 10% a  $0^\circ\text{C}$ ?
4. E uma mistura 80% a  $20^\circ\text{C}$ ?
5. Construa a curva de solubilidade do nitrato de prata em gramas de soluto por grama de solvente. Qual o teor de sólidos de uma mistura a  $20^\circ\text{C}$  com 6 g sal /g água?

fase	x	T
	Fração mássica	(C)
gelo	0	0
gelo	0,342	-5,6
gelo+ $\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,471	-7,3
gelo+ $\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,471	-7,3
$\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,615	10
$\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,729	30
$\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,800	50
$\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,846	70
$\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,901	100
$\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,917	110
$\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,942	125
$\text{AgNO}_3$ rhomb.	0,951	133

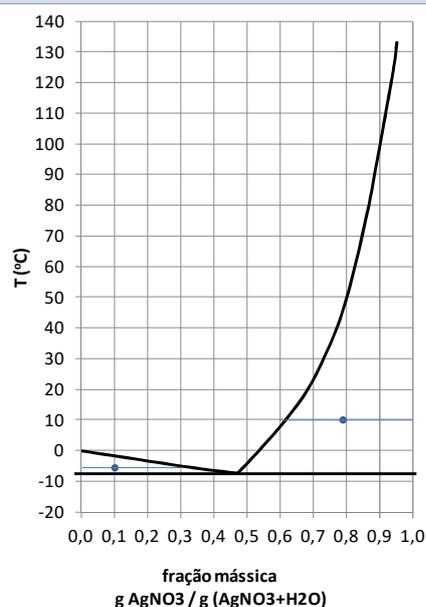
Exercício de classe

37

37

## Exemplo – Suspensões em equilíbrio

1. Construa o diagrama T-x-y para uma mistura de  $\text{AgNO}_3$  e água

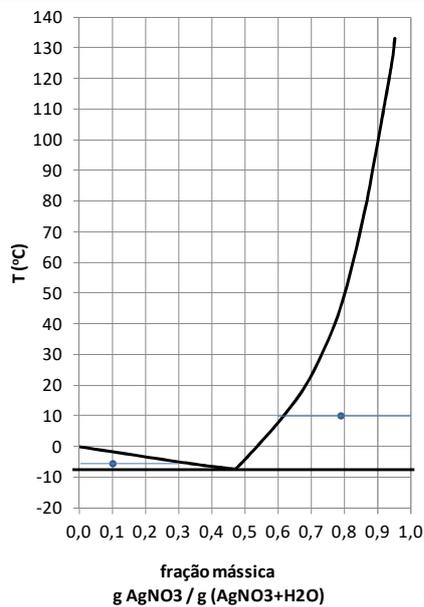


38

## Exemplo – Suspensões em equilíbrio

1. Construa o diagrama T-x-y para uma mistura de  $\text{AgNO}_3$  e água
2. Uma mistura contendo 10% massa de  $\text{AgNO}_3$  a  $-5^\circ\text{C}$ .

Sólido (gelo) e solução  
 $x_s=0$   
 $x=0,3$   
 $S/F=(0,3-0,1)/(0,3-0,0)$



39

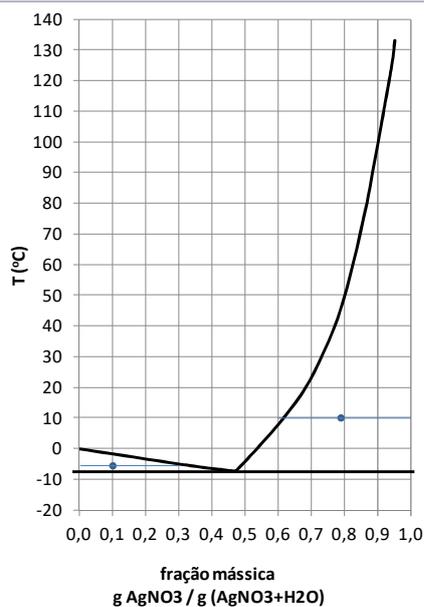
## Exemplo – Suspensões em equilíbrio

1. Construa o diagrama T-x-y para uma mistura de  $\text{AgNO}_3$  e água
2. Uma mistura contendo 10% massa de  $\text{AgNO}_3$  a  $-5^\circ\text{C}$ .

Sólido (gelo) e solução  
 $x_s=0$   
 $x=0,3$   
 $S/F=(0,3-0,1)/(0,3-0,0)$

3. E uma mistura 10% a  $0^\circ\text{C}$ ?

Solução



40

## Exemplo – Suspensões em equilíbrio

1. Construa o diagrama T-x-y para uma mistura de  $\text{AgNO}_3$  e água
2. Uma mistura contendo 10% massa de  $\text{AgNO}_3$  a  $-5^\circ\text{C}$ .

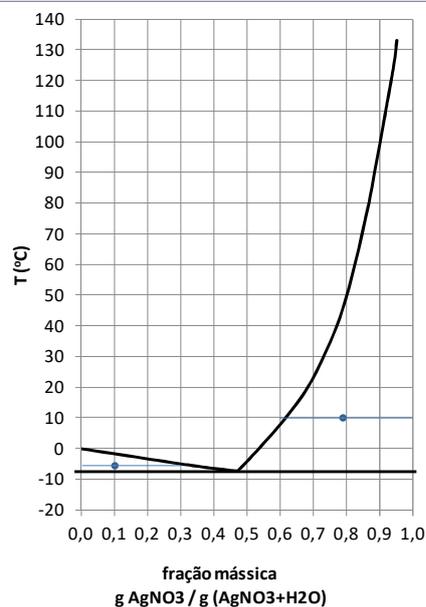
Sólido (gelo) e solução  
 $x_s=0$   
 $x=0,3$   
 $S/F=(0,3-0,1)/(0,3-0,0)$

3. E uma mistura 10% a  $0^\circ\text{C}$ ?

Solução

4. E uma mistura 80% a  $20^\circ\text{C}$ ?

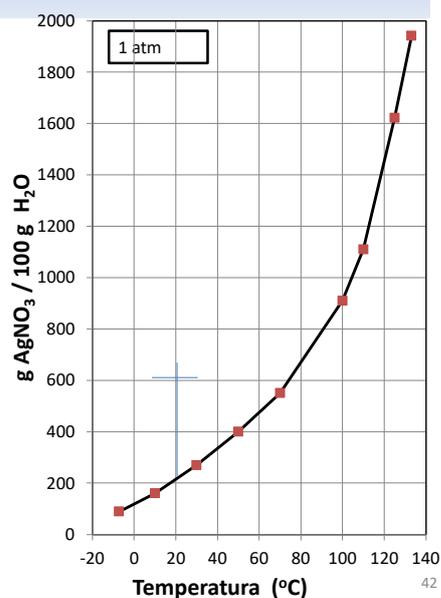
Sólido ( $\text{AgNO}_3$ ) e solução  
 $x_s=1,0$   
 $x=0,62$   
 $S/F=(0,8-0,62)/(1,0-0,62)$



41

## Exemplo – Suspensões em equilíbrio

5. Construa a curva de solubilidade da prata em g soluto por g solvente. Qual o teor de sólidos de uma mistura a  $20^\circ\text{C}$  com 600 g  $\text{AgNO}_3$ /100 g água?



Exercício de classe

42

## Exemplo – Suspensões em equilíbrio

5. Construa a curva de solubilidade da prata em g soluto por g solvente. Qual o teor de sólidos de uma mistura a 20 °C com 600 g  $\text{AgNO}_3$ /100 g água?

Para 100 g de água:

massa de sal total: 600 g

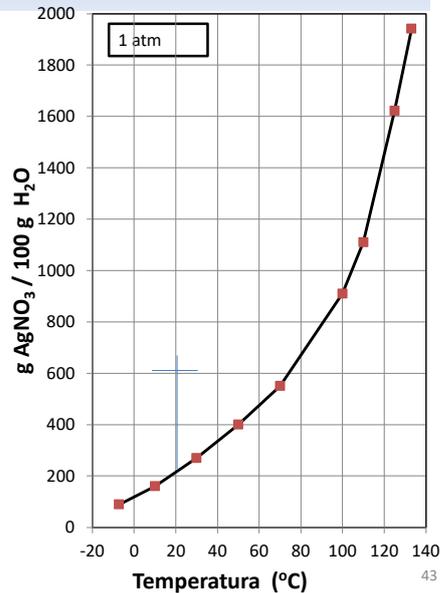
massa de sal solúvel: 210 g

massa de sal sólido:  $600 - 210 = 390$  g

Teor de sólidos

= 390 g sal / 100 g água ou

=  $390 / (100 + 390 + 210) = 0,56$  g sal / g mistura



Exercício de classe

43

## Exemplo: cristalização por resfriamento

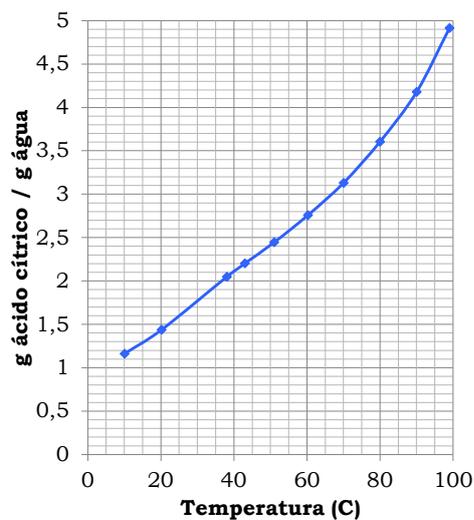
- Deseja-se cristalizar por resfriamento 2/3 do ácido cítrico contido em uma mistura com conc. 4,5 g soluto/g solvente

- Indique uma temperatura inicial adequada e justifique

- Determine a temperatura a que devemos resfriar a solução

- Qual o consumo energético deste processo?

- O calor de cristalização do ácido cítrico é 117 kJ/kg (exotérmico). Admita que o calor específico da alimentação é 2 kJ/kg/°C



Resolver em grupos ou individual na aula

44

## Exemplo: cristalização por resfriamento

### • Solução

◦  $T_F > 93^\circ\text{C}$  pois alimentação deve ser líquido (1 fase)

$$x' = (1 - R)z'$$

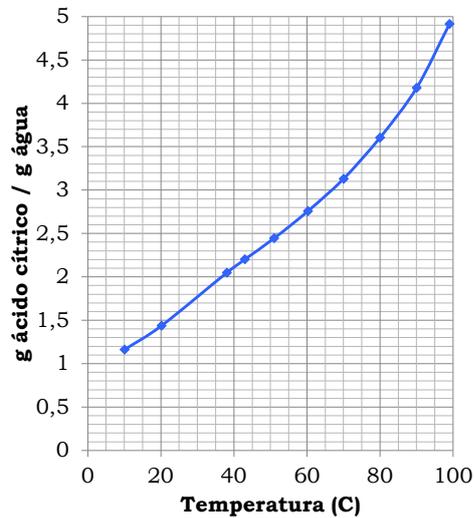
$$x' = (1 - 0,67)4,5 = 1,5 \text{ g} \cdot \text{g}_{sv}^{-1}$$

→ (curva de solubilidade)  $T_F = 23^\circ\text{C}$

$$\frac{\dot{Q}}{F} = -[h_{cryst}Rz + c_{pF}(T_F - T)]$$

$$\frac{Q}{F} = -\left[117 \cdot 0,67 \cdot \frac{4,5}{1 + 4,5} + 2(93 - 23)\right]$$

$$\frac{Q}{F} = -[64 + 140] \text{ kJ} \cdot \text{kg soln}^{-1}$$



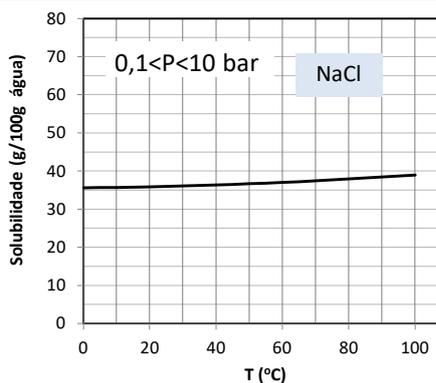
Resolver em grupos ou individual na aula

45

## Exemplo: cristalização evaporativa

Deseja-se produzir 1000 kg/h de NaCl a partir de uma solução NaCl-H<sub>2</sub>O com 5000 kg/h, fração mássica 0,25 e a 20°C. Será empregada cristalização evaporativa a 108°C.

1. Por que não é possível usar cristalização por resfriamento?
2. Qual a pressão de operação?
3. Qual a quantidade de água a ser evaporada e o consumo energético?
4. Se a alimentação for mais diluída ( $x_F=0,21$ ), o que acontecerá com o consumo energético?
5. E se a temperatura de cristalização for 50°C?



Calor latente de cristalização do NaCl  
227 kJ/kg (exotérmico),  
Cp da solução alimentada 2,7 kJ/kg/°C  
Pressão de vapor salmoura saturada:  
 $\log P_{sat} = A - B/(T + C)$  em mmHg e °C,  
A=7,8783 B=1701,05 C = 231,78

46

## Exemplo: cristalização evaporativa

- Admitindo cristalização por resfriamento

F	5.000	kg mist/h	base de cálculo
S	1.000	kg sal / h	produzido na forma sólida
z	0,25	g/g soln	
z'	0,33	g/g agua	
R	0,80		
x'	0,07	g/g agua	solubilidade a ????

$$x' = (1 - R)z'$$

Conclusão

Seria necessário reduzir a temperatura até que a solubilidade fosse 0,21

Curva de solubilidade não atinge valor tão baixo. Logo, método de resfriamento não permite obter a recuperação desejada.

Resultado similar seria obtido mesmo que uma recuperação muito pequena fosse aceitável. P.ex. R=0,2 requeriria x'=0,21

47

47

## Exemplo: cristalização evaporativa

	base	alim.	baixa		
	Diluída	T evap			
R	0,80	0,95	0,80	kg sal produzido / kg alim.	$R \equiv Sx_s / (Fz)$
x'	0,40	0,40	0,36	g/g agua	solubilidade a T
x	0,29	0,29	0,26	g/g soln	solubilidade a T
L/F	0,18	0,04	0,19	kg solução / kg alimentação	$\frac{L}{F} = \frac{z}{x}(1 - R)$
V/F	0,63	0,77	0,61	kg vapor / kg alimentação	
S/F	0,20	0,20	0,20	kg solido / kg alimentação	$\frac{V}{F} = 1 - Rz - \frac{z}{x}(1 - R)$
V/S	3,13	3,83	3,06	kg vapor / kg sólido alim	$\frac{S}{F} = Rz$
Q/F	= Qvap + Qcrist + Qsens				$V/S = (V/F) / (S/F)$
Q/F	= V/F* $h_{vap}$ - $h_{crist} * R * z$ - $cpF * (TF - T)$				
Q vap	1.250	1.530	1.222	kJ/kg solução alimentada	
Q crist	-45	-45	-45	kJ/kg solução alimentada	
Q sens	238	238	81	kJ/kg solução alimentada	
Q/F	1.442	1.722	1.258	kJ/kg solução alimentada	

48

48

## Exemplo: cristalização evaporativa

Respostas

Item 2. A pressão de operação é a pressão de vapor da água na salmoura em  $T = 108\text{ C}$ . No caso  $P = P_{\text{atm}}$

Item 3. A quantidade de água evaporada  $V/S$  é 3,13x a quantidade de sal produzida. O consumo energético é 1442 kJ/kg solução alimentada, sendo que a maior parte da energia é usada para evaporar a água.

Item 4. Se a alimentação é mais diluída aumenta o consumo energético pois a quantidade de água a evaporar aumenta (para produzir a mesma quantidade de sal)

Item 5. Se a cristalização é conduzida a temperatura mais baixa, diminui o calor sensível para aquecimento da alimentação, logo diminui o consumo energético. Uma pequena parte desta diminuição de consumo energético é oriunda da menor solubilidade no cristalizador (inspecione a expressão para consumo de vapor para entender)

49

49

## Bibliografia

- LIVROS TEXTO (disponíveis na biblioteca DEQ)
  - Lewis AE, Seckler MM, Kramer H, van Rosmalen GM Industrial crystallization: from principles to processes, Cambridge Pub., 2015.
    - equilíbrio entre fundamentos e aplicação
  - Mullin JW, Crystallization, 1997
    - Bom para fundamentos fenomenológicos
  - Myerson AS, Handbook of Industrial Crystallization, Butterworth-Heinemann, 2002.
    - equilíbrio entre fundamentos e aplicação
  - Nyvlt J, Hostomský J, Giulietti M., Cristalização, Ed UFSCar, 2001
    - Aspectos industriais, muito bom para quem trabalha no tema.
  - Beckmann W. Crystallization: Basic Concepts and Industrial Applications. Wiley, 2013.
    - Aspectos industriais, poucos bons capítulos

50

50

## Bibliografia

- REVISÕES / APOSTILAS

- Davey and Garside, From molecules to crystallizers – An introduction to crystallization, Oxford University Press, 2000
- Seckler MM, Cekinski E, Giuliatti M, Derenzo S, Industrial crystallization and precipitation from solutions: state of the technique. Brazilian J. Chem. Engineering., v.18, p.423 - 440, 2001.
- COSTA CBB e GIULIETTI M, Introdução à cristalização, Princípios e aplicações. EdUFSCar, São Carlos, 2010.
- Crystallization & Precipitation, J.W.Mullin, In: Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry, 5th edition, Ed. W. Gerhartz, 1988, Vol. B2, page 3-1 to 3-46.

51