

COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA NA CRISTALIZAÇÃO DE SACAROSE

L. C. S. DIAS¹, R.G. ARAÚJO², J. R. D. FINZER³

^{1,2,3} Universidade de Uberaba, Departamento de Engenharia Química

RESUMO – *A cristalização de partículas é uma importante operação unitária empregada na produção de pigmentos, sais e sacarose. Consiste na transferência simultânea de calor e massa, sendo um processo denominado de polimento, por obter produtos com alta pureza. Este estudo tem por objetivo quantificar o coeficiente de transferência de massa na cristalização de sacarose a temperatura constante quando ocorre o crescimento de cristais em solução supersaturada. O coeficiente de transferência de massa obtido foi de $1,43 \cdot 10^{-5}$ m/s.*

1. INTRODUÇÃO

1.1 Cristalização

A cristalização é uma operação de separação sólido-líquido na qual moléculas são transferidas de um soluto dissolvido na fase líquida para uma fase sólida (MULLIN, 2001; JONES, 2002). Esta operação unitária é considerada como uma etapa de baixo custo operacional na produção de sólidos puros a partir de soluções impuras (NAGY et al., 2013; BLACKADDER, e NEDDERMAN, 2004).

O processo de fabricação de sacarose, açúcar de cana-de-açúcar, inicia-se com a limpeza dos colmos seguindo-se a moagem. O caldo obtido é clarificado, concentrado por evaporação, depois ocorre o cozimento, cristalização, secagem e embalagem. A evaporação é utilizada para aumentar a concentração de sacarose.

O caldo é concentrado de 14-17 °Brix até 55-70 °Brix e obtém-se um produto denominado xarope. Grau Brix consiste no conteúdo de sólidos no caldo ou no xarope. Quando o caldo é concentrado, sua viscosidade aumenta rapidamente quando o Brix alcança 78 a 80°, os cristais começam a aparecer e a constituição da massa transforma-se: passa progressivamente do estado líquido a um estado pastoso.

No cozimento o xarope é concentrado ocorrendo o crescimento dos cristais, prosseguindo até formação da mistura chamada massa cozida a 92-95° Brix. Após o cozimento efetua-se a cristalização, sendo recuperada parte da sacarose ainda contida no mel (resíduo).

1.2 Solubilidade

A 40°C, é possível dissolver 2,333 kg de açúcar puro em 1 kg de água; A 80°C dissolvem-se 3,695 kg. Quando uma solução contém a quantidade total de sacarose que é capaz de dissolver, diz-se que está “saturada”. Na Tabela 1 são fornecidos dados de solubilidade da sacarose.

Tabela 1: Solubilidade da sacarose

T (°C)	X^{sat} (kg.kg ⁻¹ de água)	X^{sat} (kg.kg ⁻¹ de solução)
0	1,809	0,644
10	1,882	0,653
20	1,994	0,666
30	2,145	0,682
40	2,333	0,700
50	2,571	0,720
60	2,876	0,742
70	3,255	0,765
80	3,695	0,787
90	4,266	0,810
100	4,952	0,832

1.3 Supersaturação

A saturação é um estado de equilíbrio estável. Concentrando uma solução pela evaporação ou supersaturando por esfriamento, os cristais não aparecem imediatamente na massa. Assim, se o açúcar continua em solução e diz que a solução é “supersaturada”.

O coeficiente de supersaturação é quantificado pela Equação (1).

$$S = \frac{\bar{X}}{\bar{X}^{sat}} \quad (1)$$

1.4 Caracterização do cristal de sacarose

A Figura 1 consiste na vista espacial de um cristal de sacarose: L é a maior dimensão do cristal.

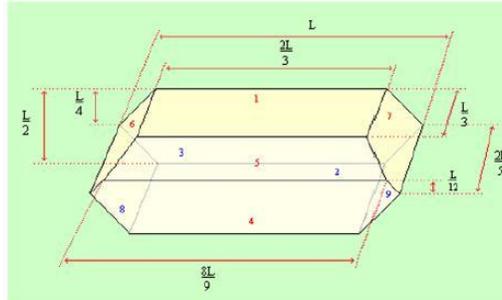


Figura 1: vista espacial de um cristal de sacarose (PEREIRA, 1996)

A área da superfície do cristal e o volume são obtidos com as Equações (2) e (3), respectivamente: (PEREIRA, 1996).

$$a_s = 1,8 L^2 \quad (2)$$

$$v_c = 0,16L^3 \quad (3)$$

A densidade da sacarose é 1588 kg/m^3 .

1.5 Coeficiente de transferência de massa

A Equação (4) possibilita o cálculo do coeficiente de transferência de massa na cristalização.

$$\dot{m} = k \cdot A \cdot (C_{\text{solução}} - C_{\text{superfície}}) \quad (4)$$

sendo: m a taxa de sacarose transferida para os cristais; k o coeficiente de transferência de massa; A a área de transferência de massa; $C_{\text{solução}}$ é a concentração de supersaturação.

Os dados da Tabela 1 são representados na Figura 1, que corresponde aos dados de $S = 1$; esse parâmetro corresponde ao cociente entre a concentração da solução supersaturada e a concentração da solução saturada; ambas quantificadas em massa de sacarose dividida pela massa de água na solução. Na cristalização de sacarose deve-se operar na região metaestável, na qual ocorre o crescimento dos cristais de sacarose sem ocorrência de nucleação, ou seja, formação de novos cristais que iriam competir com o crescimento de cristais oriundos de sementeira de pequenos cristais no processo de produção (HUGOT, 1986; McCABE et al., 2001). Na pesquisa atual efetuou-se planejamentos para operação na região metaestável.

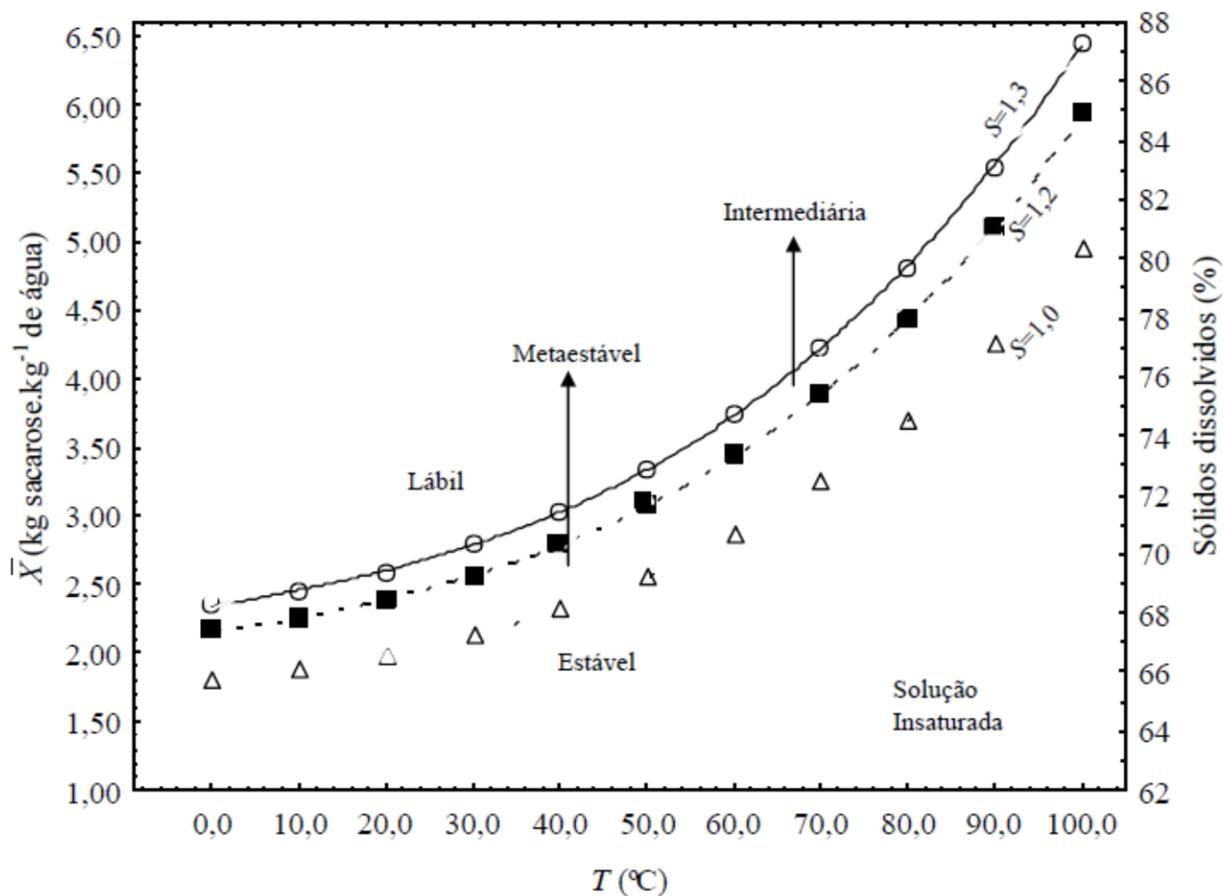


Figura 1. Curvas de saturação e de supersaturação para sacarose (pureza 100%); (FINZER e MALAGONI, 2016).

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos de cristalização de sacarose foram realizados no Laboratório de Operações Unitárias da Universidade de Uberaba (UNIUBE).

2.1 Procedimento experimental

Foi preparada uma solução saturada de sacarose em água na temperatura de 60°C (288 g de sacarose por 100 g de água) e logo após foi reduzida a temperatura da solução para 40°C (solubilidade de 233 g de sacarose por 100 g de água).

Adicionou-se a solução preparada anteriormente em um cristizador, consistindo de um cilindro com volume de 200 mL no qual foi acionado 50 mL de solução supersaturada de sacarose agitada com um impulsor magnético e adicionaram-se cristais de sacarose (sementes) com massas individuais médias conhecidas de 0,024 g. A cristalização foi efetuada por um tempo de 10 minutos e os cristais foram separados para serem direcionados para uma nova pesagem.

A massa dos cristais foi quantificada novamente obtendo-se um valor de 0,060 g. O volume dos cristais, usando a densidade de 1588 kg/m³, também foi quantificado e logo após, pela Equação (3) foi obtido o valor de L.

Pela Equação (2) foi obtido o valor da área de transferência de massa (superfície dos cristais) que foi utilizado posteriormente para quantificar o coeficiente de transferência de massa utilizando a Equação (4).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Usando os dados da Tabela 1 foram quantificados o brix da solução supersaturada e da saturada: 0,70 e 0,72, respectivamente. Como esses parâmetros foram quantificadas as densidades das soluções usando software disponibilizado pelo *sugartech*, exemplificado pela Figura 1.

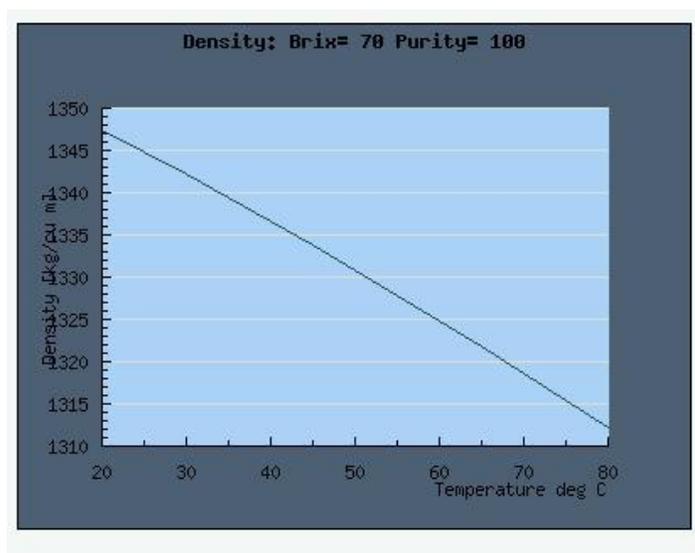


Figura 1 - Densidade de solução de sacarose, pureza 100% e Brix 70.

<http://www.sugartech.co.za/density/index.php>

As concentrações requeridas para o cálculo do coeficiente de transferência de massa foram obtidas ao dividir a massa de sacarose dissolvida em 100 kg de solução; com o último valor obteve-se o volume da solução; como na solução a 0,70 Brix, tem-se 70 kg de sacarose por 100 kg de solução ($0,075 \text{ m}^3$). Da divisão da massa de sacarose pelo volume da solução tem-se a concentração na condição de saturação, a qual corresponde a da superfície dos cristais. Como o mesmo raciocínio se obtém a concentração da solução supersaturada, sendo os resultados: $933,33 \text{ kg/m}^3$ e $1010,90 \text{ kg/m}^3$, respectivamente.

Usando a Equação (4) calcula-se o coeficiente de transferência de massa. A taxa de aumento da massa de cristais foi de: $(0,060 - 0,024) \text{ g/10 min}$, igual a $0,0036 \text{ g/min}$.

Com a massa dos cristais e a densidade da sacarose foi calculada a dimensão L usando a Equação (3).

Usando a massa média aritmética dos cristais de $0,042 \text{ g}$, e a densidade da sacarose: $1,388 \text{ g/cm}^3$; o volume dos cristais é de $0,0264 \text{ cm}^3$.

Com o volume dos cristais foi calculada a dimensão L (ver a Figura 1) usando a Equação (3):

$$0,0264 = 0,16 \cdot L^3 \text{ de onde: } L = 0,55 \text{ cm.}$$

Usando a Equação (2) a área da superfície dos cristais, que corresponde à área média de transferência de calor e massa foi quantificada:

$$A = 1,8 \cdot 0,55^2: \text{ obtendo-se: } A = 0,54 \text{ cm}^2$$

O coeficiente médio de transferência de massa foi calculado com o uso da Equação (4):

$$0,0036 = K \cdot 0,54 \cdot (1,011 - 0,933) \text{ de onde: } K = 0,0855 \text{ cm/min ou no SI: } (1,43 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}).$$

4. CONCLUSÃO

A operação de cristalização de sementes de sacarose possibilitou um aumento de 150% na massa dos cristais em 10 minutos de cristalização, sendo quantificado o coeficiente de transferência de massa médio em $1,43 \cdot 10^{-5} \text{ m/s}$. O estudo mostrou como se interpreta fenomenologicamente a cristalização de sacarose usando solução supersaturada.

REFERÊNCIAS

MULLIN, J. W. **Crystallization**. Oxford: Butterworth – Heinemann, 2001.

NAGY, K. Z.; FEVOTTE, G.; KRAMER, H., SIMON, L. L. Recent advances in the monitoring, modeling and control of crystallization system. **Chemical Engineering Research and Design**, v.91, p.1903–1922, 2013.

BLACKADDER, D. A.; NEDDERMAN, R. M. **Manual de Operações Unitárias**. São Paulo: Ed. Hemus. 2004. 276 P.

FINZER, J.R.D. e MALAGONI, R.A. **Cristalização**. In: TADINI, C.C.; MEIRELLES, A.J.A.; TELIS, V.R.N. **Operações unitárias na indústria de alimentos**. LTC. 2016.

HUGOT, E. **Handbook of cane sugar engineering**. 3rd ed. Amsterdam: Elsevier, 1986. 1166 p

MACCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOT, P. **Unit operations of chemical engineering**. 6th. Boston: McGraw Hill, 2001. 1114 p.

PEREIRA, A. G. Cristalização de Sacarose em leito vibro-jorrado. **Dissertação de Mestrado**. PPGEQ-Engenharia Química. UFU. 1997.

7. AGRADECIMENTOS

OS AUTORES AGRADECEM À FAPEMIG PELO APOIO PRESTADO.

Uberaba, 30 de Novembro e 01 de Dezembro de 2018