

# ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE MONOAMÔNIO FOSFATO

Guilherme Bellini de Souza<sup>1</sup>; Marcello Nitz<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Aluno de Iniciação Científica da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT);

<sup>2</sup> Professor da Escola de Engenharia Mauá (EEM/CEUN-IMT)

**Resumo.** O artigo versa sobre o estudo da operação de secagem do fertilizante monoamônio fosfato (MAP), realizada em secador de bandejas. Foram avaliados os efeitos da temperatura (70°C, 80°C e 95°C) e da granulometria (1,40 mm e 2,38 mm de diâmetro médio de partícula) nas curvas de secagem. Um modelo cinético empírico foi ajustado aos resultados experimentais — modelo de Page. As curvas de secagem mostraram a existência de um período inicial de taxa constante, que permanece até uma umidade reduzida de aproximadamente 0,7, seguido de um período de taxa decrescente. A velocidade de secagem a 95°C mostrou-se maior do que a 80°C e 70°C. A Equação de Page mostrou-se adequada para a modelagem dos períodos de taxa decrescente das curvas de secagem, com valores de  $R^2$  superiores a 0,99.

## Introdução

Fertilizantes são utilizados na agricultura, visto que a sua aplicação supre a falta de nutrientes disponíveis no solo, essenciais ao desenvolvimento e crescimento normal das plantas. Desta forma, a sua utilização aumenta a produtividade agrícola. São formados por misturas dos macronutrientes primários Nitrogênio (N), Fósforo (P) e Potássio (K), originando composições NPK (DIAS e FERNANDES, 2006). Sua forma sólida é predominantemente utilizada no Brasil.

O Monoamônio Fosfato (MAP) ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), também conhecido como Fosfato Monoamônico ou Fosfato de Amônio Monobásico, é um fertilizante obtido por meio da reação exotérmica do ácido fosfórico com amônia anidra, conforme descrito pela Equação 1 (MACHADO, 2012).



O MAP é sólido, apresentado sob a forma de grãos, e possui coloração que varia de cinza claro até tons mais escuros. É muito favorável à agricultura, devido à sua alta concentração de Nitrogênio (10% a 12%) e de Fósforo (50% a 52%), e a propriedades físico-químicas satisfatórias, como higroscopidade e solubilidade. Possui pH alcalino e é um material estável, que libera, porém, gases tóxicos, quando aquecido (MACHADO, 2012).

Em sua fabricação, os fertilizantes necessitam ser submetidos a um processo de secagem para a remoção da umidade. O produto seco reduz os custos de armazenamento e transporte, e facilita o seu manuseio. A secagem é uma etapa onerosa, exigindo um alto consumo energético para aquecer o gás de secagem, e o processo a ser escolhido depende das características do material de interesse. A secagem de fertilizante MAP costuma ser realizada em secadores rotativos, por estes suportarem diversos produtos e possuírem grandes capacidades de processamento (SILVA, 2010). Há poucas aplicações industriais de secagem deste produto por outros tipos de secadores. Na literatura há poucos trabalhos relacionados à secagem de fertilizantes. Como exemplos, citam-se os trabalhos de Silvério (2010) e Arruda (2008). Silvério (2010) realizou um estudo comparando a utilização secadores rotatórios com fluxo de gás concorrente e contracorrente. Nesse estudo, foi utilizado o fertilizante superfosfato simples em que foi possível observar que a taxa de secagem utilizando o fluxo de gás de concorrente é menor que no contracorrente. Arruda (2008) comparou o desempenho de

secadores roto-fluidizados com secadores rotatórios convencionais para a secagem de fertilizante superfosfato simples.

Conhecer a cinética de secagem de um determinado material é importante para realizar o projeto, simulação e otimização do processo de secagem. Normalmente, as curvas de secagem são traçadas com a finalidade de definir os parâmetros das equações que definem a taxa de secagem (PARK, 2007). Pode-se subdividir os modelos de secagem em três grupos. Os modelos teóricos, os empíricos e os semi-empíricos. Os modelos teóricos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido se baseiam na lei da difusão de Fick, que define que o fluxo de massa por unidade de área é proporcional ao gradiente de concentração de água. Já os modelos empíricos são formulados com uma abordagem baseada em dados experimentais e na análise dimensional. Esses modelos apresentam uma relação direta entre a umidade e o tempo de secagem, mas omitem os fundamentos do processo de secagem e os seus parâmetros não possuem significado físico. Dessa forma, eles não oferecem uma visão apurada dos fenômenos que ocorrem durante o processo de secagem (SENADEERA, 2002).

Com o objetivo de contribuir para o estudo da operação de secagem de fertilizantes MAP, foram determinadas curvas de secagem do material em diferentes temperaturas, velocidade do ar e tamanho de partícula. Aos resultados experimentais foi ajustado um modelo cinético.

## Material e Métodos

Os experimentos foram realizados com Monoamônio Fosfato ( $\text{NH}_4\text{H}_2\text{PO}_4$ ), cedido pela Vale Fertilizantes S.A., complexo industrial de Piaçagüera, localizado em Cubatão, São Paulo, Brasil. As amostras coletadas na unidade industrial da Vale Fertilizantes foram extraídas após a etapa industrial de granulação. O material era acondicionado em sacos plásticos fechados e levados ao campus do IMT. O material era recebido e separado em três faixas granulométricas — maior do que 2,38 mm e menor do que 3,36 mm, maior do que 2,00 mm e menor do que 2,38 mm e maior do que 1,40 mm e menor do que 2,00 mm. As diferentes classificações eram misturadas para obter massas com diâmetro médio de 1,40 mm e 2,36 mm, utilizadas neste trabalho.

Para os ensaios de secagem foi utilizado um secador de bandejas disponível no Laboratório de Engenharia Química da Escola de Engenharia Mauá. O secador de badejas da marca Armfield Tray Dryer – representado nas figuras 1 e 2 – apresenta uma seção transversal retangular e chapa metálica de espessura  $1,0 \cdot 10^{-3}$  m. Apresenta dimensões externas de 2,95 m  $\times$  0,73 m  $\times$  1,40 m e internas de 0,300 m  $\times$  0,300 m  $\times$  0,400 m. O soprador é equipado com um motor de 200/220V, 1,0 A, 125 W que gera uma velocidade máxima de ar no centro do bocal de saída igual a 2,6 m/s. Todos os ensaios foram realizados nessa velocidade máxima, medida com um anemômetro.



Figura 1 – Vista do secador.

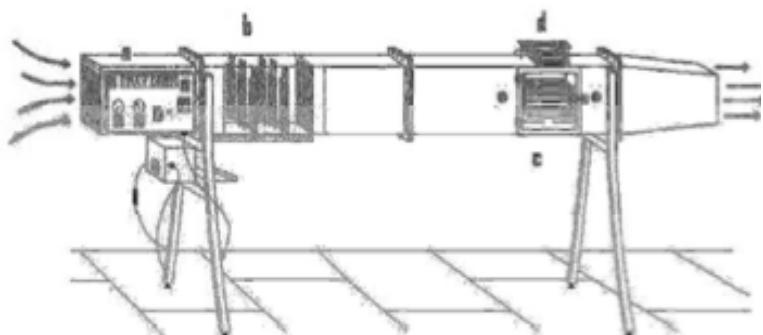


Figura 2 – Representação do secador.

Para o controle da temperatura do ar foi utilizado um painel de controle por potenciômetro (a) e nove resistências (b), sendo duas de 1000 W e sete resistências de 500 W localizados lateralmente, em conjuntos de três em três. A capacidade do suporte das bandejas disposto sobre um balança digital da marca Mettler-Toledo (d), está em torno de 3 kg de sólidos úmidos. Há uma abertura lateral equipada com um vidro temperado (c) para acesso ao suporte de até quatro bandejas.

Em cada ensaio de secagem, a quantidade de aproximadamente 500 g do material úmido era distribuída entre três bandejas de inox com altura de aproximadamente 3 mm. Posteriormente o material era coberto com folhas duplas de papel higiênico da marca Soft, a fim de se evitar a perda de finos durante o processo de secagem. O conjunto foi suspenso por uma balança digital da marca Mettler-Toledo, no interior do secador de bandejas, Armfield Tray Drier. A balança foi conectada a um computador, para que um software desenvolvido no Instituto Mauá de Tecnologia fizesse leituras em tempo real da perda de massa de água durante o processo, capturadas no intervalo de 3 minutos, até o tempo de equilíbrio do ensaio, pré-determinado para cada condição, que variava de 4 a 9 horas. Três amostras do material foram colhidas antes e após a secagem para que fosse comparada a umidade inicial e final. Para tanto, as amostras foram pesadas em balança analítica, secas em estufa dentro de um pesa filtro, a uma temperatura de 105°C, por tempo superior a 24 horas e, então, pesadas novamente.

As condições estudadas nos ensaios de secagem estão relacionadas na Tabela 1.

Tabela 1 – Combinações de variáveis na secagem

Condição	Diâmetro médio de partícula (mm)	Temperatura do ar (°C)
1	2,36	95
2	1,40	95
3	2,36	70
4	2,36	80

Os ensaios 1 e 2 foram realizados em duplicata para verificação da reprodutibilidade. Não houve réplica dos demais ensaios, pois não havia material suficiente, tendo em vista o fato de a empresa ter inesperadamente interrompido o fornecimento do material para a pesquisa.

As curvas de secagem foram apresentadas na forma de umidade reduzida (umidade  $X$  pela umidade inicial  $X_0$ , ambas em base seca) em função do tempo.

A Equação (2) apresenta o modelo cinético que foi utilizado no ajuste das curvas de secagem (PAGE, 1949).

$$MR = \exp(-k \times t^n) \quad (2)$$

Em que  $MR$  é a umidade reduzida  $X/X_0$  e  $k$  e  $n$  são os parâmetros do modelo, obtidos por regressão linear.

## Resultados e Discussões

Para a análise da reprodutibilidade das curvas de secagem, os ensaios 1 e 2 da Tabela 1 foram realizados em duplicata e as curvas de secagem resultantes estão apresentadas nas figuras 3 e 4. Percebe-se que as curvas estão sobrepostas até uma umidade reduzida de 0,7 aproximadamente. A partir desse ponto, ocorre um distanciamento e as curvas apresentam diferentes decréscimos da taxa de secagem.

Uma análise qualitativa dessas curvas sugere a existência de um período de secagem com taxa constante até a umidade reduzida crítica de aproximadamente 0,7. Segue-se um período de taxa de secagem decrescente desse ponto em diante. Até a umidade reduzida de 0,7 a secagem é controlada pelas condições externas e a superfície do material permanece úmida. A

partir desse ponto, a secagem passa a ser controlada pelas condições internas e infere-se que a superfície do material entra em equilíbrio com o ar.

Algumas hipóteses podem ser aventadas para explicar a falta de reprodutibilidade. Uma delas é a perda de finos por arraste, apesar da medida adotada de se cobrir as bandejas com papel.

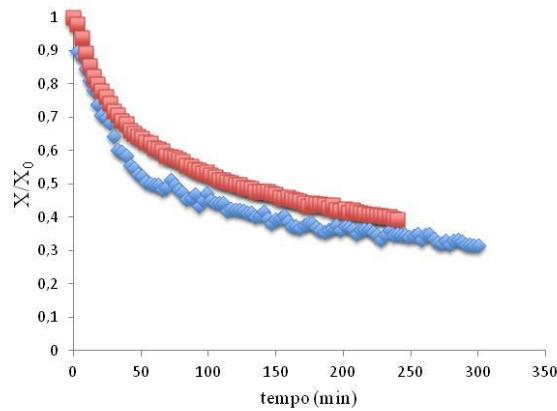


Figura 3 – Duplicata das curvas de secagem com diâmetro médio 2,36 mm a 95°C.

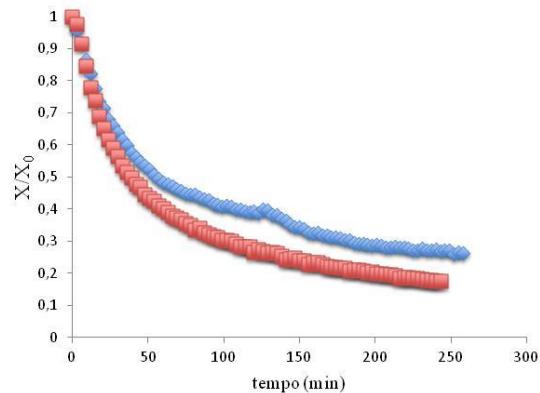


Figura 4 – Duplicata das curvas de secagem com diâmetro médio 1,40 mm a 95°C.

A figura 5 ilustra três curvas de secagens que foram obtidas em diferentes temperaturas 70°C, 80°C e 95°C. Todas foram realizadas com material de diâmetro médio igual a 2,36 mm.

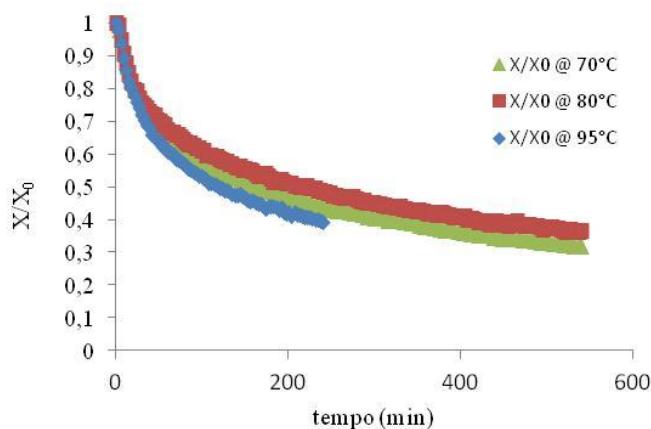


Figura 5 – Curvas de secagem a 70°C, 80°C e 95°C.

Como é possível observar, o comportamento das três curvas é semelhante, com um período inicial curto de taxa constante seguido de um período de taxa decrescente. A taxa de secagem a 95°C é mais alta do que nas duas outras temperaturas. No entanto, quando são comparadas as curvas de secagem a 70°C e 80°C, ocorre uma inversão com relação ao que era

esperado: a velocidade de secagem é maior a 70°C. Não há explicação teórica para essa diferença. Os erros experimentais evidenciados nos ensaios de reprodutibilidade apresentados nas figuras 3 e 4 explicam essa diferença.

A figura 6 apresenta a influência do tamanho da partícula na taxa de secagem.

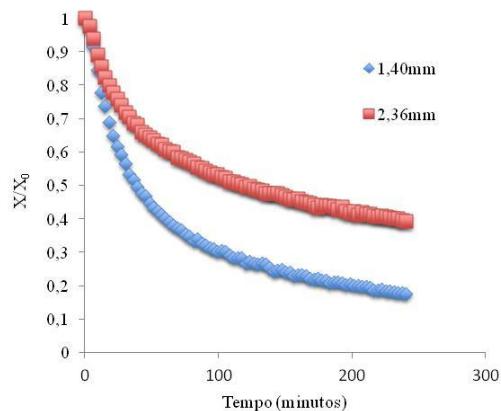


Figura 6 – Efeito da granulometria na taxa de secagem

Na figura 6 pode-se encontrar o resultado esperado — o material com menor granulometria, por possuir uma maior área de contato com o ar, seca de forma mais rápida. Essa diferença de velocidade de secagem ocorre nos dois períodos da curva: no de taxa constante e no de taxa decrescente. Assim, pode-se observar uma relação inversamente proporcional entre a área superficial dos grãos e a velocidade de secagem.

O modelo de Page apresentado na equação (2) foi ajustado às curvas de secagem apresentadas na figura 5 e o resultado é mostrado nas figuras 7, 8 e 9.

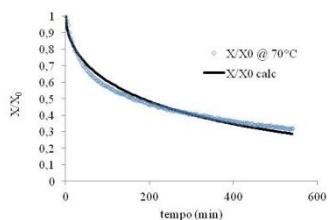


Figura 7 – Curva de secagem a 70°C – valores experimentais e calculados

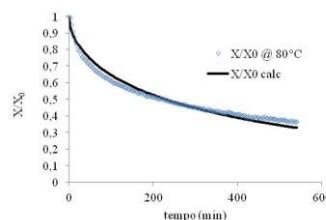


Figura 8 – Curva de secagem a 80°C – valores experimentais e calculados

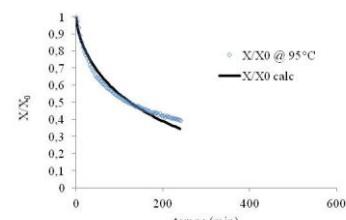


Figura 9 – Curva de secagem a 95°C – valores experimentais e calculados

O ajuste do modelo de Page foi realizado por regressão linear, como mostra a figura 10, válida para a curva de secagem a 70°C. Observa-se que o ajuste não é bom na fase inicial da secagem. Observa-se um comportamento bem mais aderente ao se realizar o ajuste apenas para os valores de umidade reduzida inferiores a 0,7 — veja a curva mostrada na figura 11.

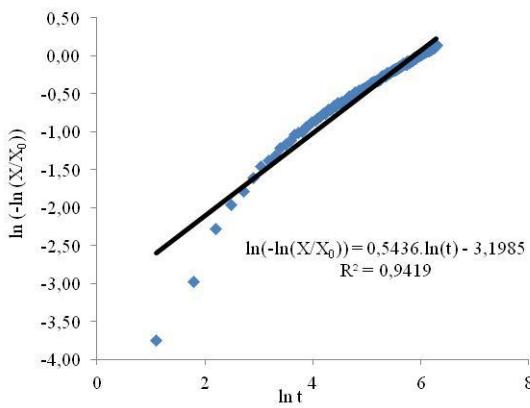


Figura 10 – Linearização da curva de secagem a 70°C – todos os pontos

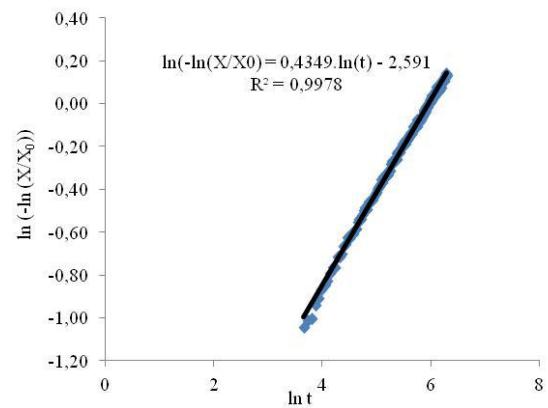


Figura 11 – Linearização da curva de secagem a 70°C – valores de umidade reduzida inferiores a 0,70.

A Tabela 2 apresenta os valores das constantes do modelo de Page e os valores de  $R^2$  obtidos tanto considerando todos os pontos, como também apenas com os valores de  $X/X_0$  menores do que 0,70.

Tabela 2 – Resultados do ajuste do modelo de Page

	Todos os pontos			Para MR<0,7		
	k	n	R <sup>2</sup>	k	n	R <sup>2</sup>
70°C	0,0408	0,544	0,942	0,0755	0,434	0,998
80°C	0,0341	0,555	0,898	0,0676	0,432	0,998
90°C	0,0301	0,651	0,936	0,0301	0,467	0,996

Não só do ponto de vista da modelagem matemática, como também do fenômeno, evidencia-se que há a existência de dois períodos distintos de secagem. O primeiro, controlado pelas condições externas, com taxa constante ( $dX/dt = \text{constante}$ ) até um valor de umidade reduzida de aproximadamente 0,70. O segundo, para valores de umidade reduzida inferiores a 0,70, corresponde ao período em que as taxas de secagem são decrescentes e podem ser descritas adequadamente pelo modelo de Page.

## 5. Conclusão

A secagem de fertilizante MAP em secador de bandejas mostrou a existência de dois períodos de secagem — o primeiro controlado pelas condições externas, de menor duração, ocorre até o valor de umidade reduzida 0,70 aproximadamente, seguido de um segundo período, de taxa de secagem decrescente. A secagem sofre influência tanto da temperatura do ar como do tamanho das partículas. Verificou-se maior velocidade de secagem a 95°C do que a 70°C e 80°C. Como esperado, valores menores de partícula influenciaram positivamente na taxa de secagem, devido à maior área superficial. O modelo cinético de Page representa muito bem o período de taxa de secagem decrescente.

## Referências Bibliográficas

- ARRUDA, E. B. (2008) *Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: Secagem de fertilizantes*. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 176.
- DIAS, V. P.; FERNANDES, E. (2006) *Fertilizantes: Uma visão global sintética*. BNDES Setorial, Rio de Janeiro, **24**, 97 - 138.

- MACHADO, L. O. (2012) *Adubação fosfatada*. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.
- PAGE, G. E. (1949) *Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers*. Purdue University. West Lafayette, p. 63.
- PARK, K. J. et al. (2007) *Conceitos de processo e equipamentos de secagem*. Primeira edição. ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas.
- SILVÉRIO, B. C. (2010) *Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em secadores rotatórios concorrentes*. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 100.