

ANDRÉ LUÍS DE CAMPOS COVELLO

ESTUDO DA SECAGEM DE MONO-AMÔNIO FOSFATO

SÃO CAETANO DO SUL

2014

ANDRÉ LUÍS DE CAMPOS COVELLO

ESTUDO DA CINÉTICA DE SECAGEM DE MONO-AMÔNIO FOSFATO

Dissertação apresentada à Escola de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de Tecnologia para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Processos Químicos e Bioquímicos.

Linha de Pesquisa: Desenvolvimento de Processos na Indústria Química

Orientador: Prof. Dr. Marcello Nitz

SÃO CAETANO DO SUL

2014

Covello, André Luís de Campos

Estudo da Secagem de Mono-Amônio Fosfato – André Luís de Campos
Covello — São Caetano do Sul, SP : CEUN-EEM, 2014.

68 p.

Dissertação de Mestrado — Programa de Pós-Graduação. Linha de
Pesquisa: Desenvolvimento de Processos na Indústria Química — Escola
de Engenharia Mauá do Centro Universitário do Instituto Mauá de
Tecnologia, São Caetano do Sul, SP, 2014.

Orientador: Prof. Dr. Marcello Nitz da Costa

1. Cinética de secagem. 2. Mono-amônio fosfato. 3. Secador de
bandejas.

I. Instituto Mauá de Tecnologia. Centro Universitário. Escola de
Engenharia Mauá. II. Título.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em primeiro lugar a Deus, por me proporcionar saúde para transpor os obstáculos e realizá-lo. Dedico também aos meus pais Mário Augusto e Denise, que sempre me motivaram a seguir em frente para realizar meus sonhos com a empolgação e energia de como se também fossem os sonhos deles.

AGRADECIMENTOS

Ao estimado Professor Dr. **Marcello Nitz** pelo total suporte, inúmeras dúvidas esclarecidas e sugestões dadas para compor este trabalho.

Às alunas de iniciação científica **Luísa Rodrigues Molina Donna'**, **Maria Fernanda Giraldi Vidal** e **Guilherme Bellini de Souza** pela enorme dedicação para a realização dos ensaios de cinética de secagem. Sem vocês certamente este trabalho não teria sido finalizado.

Ao técnico **Sidnei Ribeiro Moraes** pelos auxílios com os equipamentos do laboratório e esclarecimentos de dúvidas quanto à operação destes.

À **Edna Santos** e **Margareth Marques** pelo suporte e confiança depositada.

Aos amigos e companheiros de trabalho da Vale Fertilizantes: **Henrique José Brum da Costa**, **Carlos Alberto de Souza Dias**, **Fabiano Roberto Gomes Arce**, **Verônica Figueiredo Campos**, **Erica Mayumi Hasegawa**, **Fernanda Katiuscia Barreto** e **Jorge Ferreira de Jesus** pela disponibilização do vosso tempo, incentivo e auxílio para a coleta de amostras de fertilizante.

Ninguém é suficientemente perfeito que não possa aprender com o outro, e ninguém é totalmente destituído de valores que não possa ensinar algo ao seu irmão.

São Francisco de Assis

RESUMO

A necessidade de fertilização do solo para aumentar a sua produtividade não é algo recente. A humanidade manteve a fertilidade do solo por meio de excrementos de animais por volta de 5000 anos. Atualmente, para fertilizar o solo, são utilizados fertilizantes de base mineral, orgânica ou mista. O agronegócio brasileiro vem crescendo com taxas expressivas, o que indica um aumento de demanda de fertilizantes para os anos futuros. O mono-amônio fosfato, também conhecido por MAP, é um fertilizante mineral de base fosfatada amoniacal, produzido por meio da reação do ácido fosfórico com amônia anidra. A etapa de secagem no processo de fabricação do MAP demanda alto consumo energético. Por este motivo, costuma ser muito onerosa. Assim, estudos devem ser feitos de forma a aperfeiçoar o processo de secagem, reduzindo custos e o seu impacto ambiental. Os estudos de cinética de secagem permitem entender melhor o processo de secagem, bem como escolher o procedimento, tratamento, equipamento e temperatura mais adequados. O objetivo desta pesquisa é contribuir para uma análise mais detalhada acerca da cinética de secagem do MAP, de forma que possibilite o aperfeiçoamento do seu processo de secagem em trabalhos futuros. Para os estudos de cinética de secagem foram variados os parâmetros: temperatura do ar de secagem (80 °C e 95 °C); velocidade do ar de secagem (0,5 m/s e 2,6 m/s) e faixas granulométricas (1,4 mm; 2,00 mm e 2,38 mm). Os ensaios de secagem foram realizados utilizando um secador de bandejas da marca Armfield Tray Drier® que se encontra nas dependências do Instituto Mauá de Tecnologia. As curvas de umidade foram traçadas com base nos ensaios experimentais e então a difusividade segundo a lei de Fick foi calculada para cada ensaio. O ajuste da equação da Lei de Fick da difusão em relação aos dados experimentais foi avaliado com o coeficiente de determinação e chi quadrado. Outros cinco modelos de secagem foram ajustados aos dados experimentais por regressão. O modelo que apresentou o coeficiente de determinação mais próximo a 1 e o valor de chi quadrado mais baixo foi o modelo Dois Termos, indicando que esse modelo é capaz de prever adequadamente os valores de umidade durante a secagem do fertilizante MAP. Pôde ser verificado que a difusividade aumenta a temperatura e velocidade aumentam muito provavelmente ao rápido movimento da água em altas temperaturas e velocidades de escoamento do ar de secagem.

Palavras-chave: cinética de secagem, mono-amônio fosfato, secador de bandejas.

ABSTRACT

The need for ground fertility to increase your productivity is not something new. Humanity has maintained soil fertility through animal excrements around 5000 years. Actually, to fertilize the ground, are used mineral-based fertilizers, organic or mixed. The Brazilian agribusiness is growing at significant rates, which indicates an increase in fertilizer demand for future years. The mono-ammonium phosphate, also known as MAP, is a mineral fertilizer ammonium phosphate based produced by the reaction of phosphoric acid with anhydrous ammonia. The drying step in the manufacturing process of the MAP demand high energy consumption, for this reason is often very costly. Thus, studies should be done in order to improve the drying process, with the intention of reducing costs and increasing the profits of companies that manufacture this type of fertilizer. Studies on drying kinetics allow better understand the drying process, as well as choose the procedure, treatment, equipment and temperature most suitable. The intention of this research is to contribute to a more detailed analysis on the drying kinetics of MAP, in order to enable the improvement of your drying process in future work. For kinetic studies of drying parameters were varied: temperature of the drying air (80 ° C and 95 ° C) drying air speed (0.5 m / s and 2.6 m / s) and particle sizes (1.4 mm, 2.00 mm and 2.38 mm). The drying experiments were performed using a tray dryer brand Armfield Tray Drier ® that is installed on Maua Institute of Technology. The curves of reduced humidity were calculated based on experimental tests and then the diffusivity according to Fick's law was calculated for each test. The fit of the equation of Fick's law of diffusion in relation to the experimental data was evaluated using the coefficient of determination and chi square. Five other drying models were fitted by linear regression with the help of the Solver tool in MS ® Excel ®. The model that showed the coefficient of determination close to 1 and the value of chi square lower, was the "Two Terms" model, indicating that this model is able to predict adequately the values of moisture during MAP fertilizer drying. It can be seen that the diffusivity increases as temperature and speed increase, most likely due to the rapid movement of water at high temperatures and flow rates of the drying air.

Keywords: drying kinects, mono-ammonium phosphate, tray dryer.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 - TIPOS DE FERTILIZANTES	19
FIGURA 2 - CADEIA PRODUTIVA DE FERTILIZANTES MINERAIS [9]	21
FIGURA 3- ROTA DE PRODUÇÃO DOS PRINCIPAIS FERTILIZANTES FOSFATADOS PRODUZIDOS NO BRASIL (ADAPTADO DE [9])	22
FIGURA 4 - ASPECTO DO FERTILIZANTE MAP	23
FIGURA 5- PROCESSO GENÉRICO DE PRODUÇÃO DE FOSFATOS DE AMÔNIA (ADAPTADO DE [11])	23
FIGURA 6- TAXA DE SECAGEM DE UM MATERIAL QUALQUER EM FUNÇÃO DO TEMPO (ADAPTADO DE [12])	26
FIGURA 7 - SECADOR DE BANDEJAS INSTALADO NO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA	31
FIGURA 8 - PENEIRA UTILIZADA PARA REALIZAR A SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA.....	32
FIGURA 9 – TELA DO SOFTWARE UTILIZADO PARA REGISTRAR OS VALORES DE MASSA DAS AMOSTRAS.....	33
FIGURA 10 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm.....	39
FIGURA 11 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm.....	40
FIGURA 12 – UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm.....	40
FIGURA 13 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm.....	41
FIGURA 14 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm.....	41
FIGURA 15 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm.....	42
FIGURA 16 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm.....	42
FIGURA 17 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm.....	43
FIGURA 18 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm.....	43
FIGURA 19 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm.....	44
FIGURA 20 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm.....	44
FIGURA 21 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm.....	45
FIGURA 22 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm	45
FIGURA 23 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm	46
FIGURA 24 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm	46
FIGURA 25 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm	47
FIGURA 26 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm	47

FIGURA 27 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm	48
FIGURA 28 - FIGURA 26 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm.....	48
FIGURA 29 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm	49
FIGURA 30 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm	49
FIGURA 31 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm	50
FIGURA 32 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm	50
FIGURA 33 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm	51
FIGURA 34 – INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS GRÃOS A 80 °C E 0,5 m/s	53
FIGURA 35 - INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS GRÃOS A 95 °C E 0,5 m/s.....	54
FIGURA 36 - INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS GRÃOS A 80 °C E 2,6 m/s.....	54
FIGURA 37 - INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS GRÃOS A 95 °C E 2,6 m/s.....	55
FIGURA 38 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 0,5 m/s E 1,40 mm.....	56
FIGURA 39 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 0,5 m/s E 2,00 mm.....	56
FIGURA 40 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 0,5 m/s E 2,38 mm.....	57
FIGURA 41 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 2,6 m/s E 1,40 mm.....	57
FIGURA 42 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 2,6 m/s E 2,00 mm.....	58
FIGURA 43 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 2,6 m/s E 2,38 mm.....	58
FIGURA 44 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 80 °C E 2,38 mm.....	60
FIGURA 45 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 80 °C E 2,00 mm.....	60
FIGURA 46 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 80 °C E 1,40 mm.....	61
FIGURA 47 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 95 °C E 2,38 mm.....	61
FIGURA 48 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 95 °C E 2,00 mm.....	62

FIGURA 49 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 95 °C E 1,40 mm.....	62
FIGURA 50 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm	65
FIGURA 51 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm	65
FIGURA 52 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm	66
FIGURA 53 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm	66
FIGURA 54 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm	67
FIGURA 55 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm	67
FIGURA 56 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm	68
FIGURA 57 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm	68
FIGURA 58 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm	69
FIGURA 59 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm	69
FIGURA 60 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm	70
FIGURA 61 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm	70
FIGURA 62 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA E CALCULADA A 80 °C E 0,5 m/s	74
FIGURA 63 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA E CALCULADA A 95 °C E 0,5 m/s	74
FIGURA 64 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA E CALCULADA A 80 °C E 2,6 m/s	75
FIGURA 65 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA E CALCULADA A 95 °C E 2,6 m/s	75

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VENDAS DE FERTILIZANTES DE 2009 A 2012 [5]	19
TABELA 2- MODELOS MATEMÁTICOS DE SECAGEM.....	29
TABELA 3 - PROPRIEDADES DO FERTILIZANTE MAP	32
TABELA 4 - VARIÁVEIS POR ENSAIO	35
TABELA 5 - DECRÉSCIMO DE UMIDADE (B.S.) DURANTE O PERÍODO DE TAXA DE SECAGEM CONSTANTE.....	52
TABELA 6 - UMIDADE CRÍTICA (B.S.) POR ENSAIO	52
TABELA 7 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS E DIFUSIVIDADE PARA A APLICAÇÃO DA LEI DE FICK COM 1 TERMO.....	63
TABELA 8 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS E DIFUSIVIDADE PARA A APLICAÇÃO DA LEI DE FICK COM 2 TERMOS	64
TABELA 9 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS E DIFUSIVIDADE PARA A APLICAÇÃO DA LEI DE FICK COM 3 TERMOS	64
TABELA 10 – VARIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA DE ACORDO COM OS PARÂMETROS DE SECAGEM.....	71
TABELA 11 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS MODELOS DE SECAGEM.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

- a - Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional)
- b - Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional)
- D - Difusividade (m^2/s)
- DAP - Fertilizante di amônio fosfato
- D_{max} - Diâmetro máximo (m)
- D_{min} - Diâmetro mínimo (m)
- g - Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional)
- k - Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional)
- k_0 - Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional)
- k_1 - Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional)
- m - Massa (kg)
- $m_{(t)}$ - Massa total (kg)
- MAP - Fertilizante mono amônio fosfato
- MR - Umidade reduzida (adimensional)
- m_s - Massa seca (kg)
- n - Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional) / número de observações (adimensional)
- NPK - Fertilizante composto pela mistura dos componentes nitrogênio, fósforo e potássio
- r - Raio (m)
- R^2 - Coeficiente de determinação (adimensional)
- SQ_{exp} - Soma dos quadrados explicada (adimensional)
- SQ_{tot} - Soma total dos quadrados (adimensional)
- t - Tempo (s)
- T - Temperatura (C)
- v - Velocidade (m/s)
- X - Umidade (adimensional)
- X_0 - Umidade inicial (adimensional)
- X_e - Umidade de equilíbrio (adimensional)
- \bar{y} - Média das observações (adimensional)
- y_i - Valor observado (adimensional)
- \hat{y}_i - Valor estimado (adimensional)
- χ^2 - Valor da dispersão para duas variáveis de escala nominal (adimensional)

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	16
2.	OBJETIVOS	18
3.	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
3.1.	FERTILIZANTES MINERAIS	19
3.2.	FERTILIZANTES FOSFATADOS	21
3.3.	MONO-AMÔNIO FOSFATO	22
3.4.	SECAGEM	24
3.4.1.	Condições externas	24
3.4.2.	Condições internas	25
3.4.3.	Cinética de secagem	26
3.5.	SECAGEM DE FERTILIZANTES	30
3.6.	SECADOR DE BANDEJAS	31
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	32
4.1.	MATERIAIS	32
4.1.1.	Fertilizante MAP	32
4.1.2.	Secador de bandejas	33
4.2.	MÉTODOS	34
4.2.1.	Cinética de secagem	34
4.2.2.	Ajuste dos modelos	36
4.2.3.	Taxa de secagem	38
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	39
5.1.	DADOS EXPERIMENTAIS	39
5.1.1.	Análise da reprodutibilidade	39
5.1.2.	Taxa de secagem	45
5.1.3.	Influência do tamanho dos grãos	53
5.1.4.	Influência da temperatura do ar de secagem	55
5.1.5.	Influência da velocidade do ar de secagem	59
5.2.	AJUSTE DOS MODELOS MATEMÁTICOS	63
5.2.1.	Modelo da difusão de Fick	63
5.2.2.	Modelos empíricos e semi-empíricos	71
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	76
6.1.	CONCLUSÕES	76

6.2.	RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS	77
	REFERÊNCIAS	78

1. INTRODUÇÃO

A utilização de excrementos animais para a fertilização do solo não é algo recente. A humanidade manteve a fertilidade do solo com essa técnica por volta de 5000 anos, de forma a manter os rendimentos elevados dos plantios. Antes do ano de 1900, por exemplo, mais de 90% de todo o fertilizante nitrogenado era proveniente de substâncias orgânicas naturais. Em 1950, essa proporção foi reduzida a 4% [1].

Para que as plantas possuam um desenvolvimento normal, são necessários alguns elementos químicos. São eles: C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, B, Cu, Mo, Cl e Ni. Os três primeiros elementos são retirados do ar, do gás carbônico e da água. Os demais elementos são retirados do solo por meio de absorção pelas raízes e em pequenas quantidades pelas folhas. Os seis seguintes elementos são conhecidos como macronutrientes, pois são requeridos em quantidade considerável para o desenvolvimento das plantas, já os demais são considerados micronutrientes, pois apesar de serem indispensáveis, as plantas requerem quantidades mínimas para se desenvolverem. A ausência de nutrientes disponíveis no solo pode ser compensada com a adição de fertilizantes, que aliam a facilidade de recuperação dos nutrientes pelo solo com custos relativamente baixos e aplicação simples [1].

Haverá dificuldade aos países superpopulosos em atender às demandas de produção de alimentos devido às restrições em relação às áreas próprias para plantio. Tendo em vista as dificuldades em repor estoques e aumento da demanda por grãos como o milho, a soja e o trigo, cria-se uma vantagem competitiva a países que possuem potencial de produção e tecnologia disponível, como o Brasil [2].

O agronegócio brasileiro vem crescendo com taxas bastante expressivas, o que tem contribuído para o aumento do consumo de fertilizantes, uma vez que o desenvolvimento da produtividade no campo se deve, entre outros fatores, à utilização da tecnologia agrícola, em especial ao uso desse insumo [3].

O mono-amônio fosfato ($NH_4H_2PO_4$), também conhecido pela sigla MAP, é um fertilizante fosfatado oriundo principalmente do minério apatita e provê fósforo ao solo. Durante o seu processo de fabricação, é necessário retirar o excesso de umidade do fertilizante para o seu transporte e manuseio, submetendo-o ao processo de secagem, normalmente realizado por secadores rotativos devido a esses possuírem diversas vantagens quando comparados a outros secadores, podendo-se citar a versatilidade em secar uma grande variedade de materiais e baixos custos de operação e manutenção quando são processadas grandes quantidades de material. Porém, por se tratar de um processo oneroso, devido ao consumo energético

elevado, devem ser realizados estudos com o intuito de aperfeiçoar a secagem, buscando o menor custo do processo, sem que haja perda de qualidade do produto.

A determinação das curvas de secagem e do teor de água permite entender o processo de secagem, bem como escolher o procedimento, o tratamento, o equipamento e a temperatura mais adequados [4] para se realizar a secagem do fertilizante.

2. OBJETIVOS

O Objetivo geral desta pesquisa é contribuir para uma análise mais detalhada da secagem do MAP por meio do levantamento das curvas de secagem em secador de bandejas, o que permite caracterizar a resistência limitante à secagem e a influência das principais variáveis de processo, servindo de base para projetos de secadores.

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- Determinação e análise das curvas de secagem do fertilizante MAP;
- Aplicação de 8 modelos de cinética de secagem e análise quanto ao melhor ajuste.

A determinação dessas curvas foi realizada variando os seguintes parâmetros:

- Temperatura do ar de secagem: 80 °C e 95 °C;
- Velocidade do ar de secagem: 0,5 m/s e 2,6 m/s;
- Granulometria: 1,40 mm, 2,00 mm e 2,38 mm.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. FERTILIZANTES MINERAIS

Segundo estatísticas da Associação Nacional para Difusão de Adubos – sigla ANDA – as vendas de fertilizantes seguem em crescimento nos últimos quatro anos, com uma variação positiva de 4,3% do total de vendas do ano de 2012 em relação ao de 2011, o que indica uma tendência de crescimento das vendas para os anos futuros (Tabela 1).

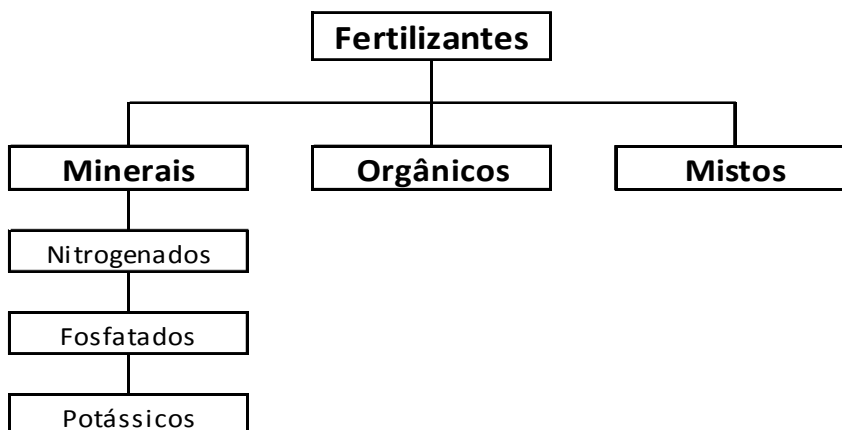
TABELA 1 - VENDAS DE FERTILIZANTES DE 2009 A 2012 [5]

Fertilizantes Entregues ao Consumidor Final (em toneladas de produto)					
	2009	2010	2011	2012	2012x2011
Janeiro	1.313.453	1.613.857	1.720.856	1.865.687	8,4%
Fevereiro	1.362.398	1.541.496	1.739.161	1.724.303	-0,9%
Março	1.381.814	1.306.271	1.499.974	1.717.828	14,5%
Abril	1.053.783	1.116.490	1.377.007	1.556.680	13,0%
Maio	1.358.762	1.342.309	2.192.847	2.394.281	9,2%
Junho	1.795.677	1.705.861	2.578.738	2.469.978	-4,2%
Julho	2.419.063	2.279.621	2.745.061	2.622.968	-4,4%
Agosto	2.550.660	2.667.406	3.117.602	3.478.611	11,6%
Setembro	2.692.668	3.095.265	3.421.724	3.450.451	0,8%
Outubro	2.867.630	3.400.364	3.391.235	3.633.119	7,1%
Novembro	2.166.517	2.731.701	2.725.334	2.789.009	2,3%
Dezembro	1.437.876	1.715.545	1.816.716	1.834.091	1,0%
Total	22.400.301	24.516.186	28.326.255	29.537.006	4,3%

Os fertilizantes são utilizados para auxiliar o desenvolvimento das plantas, aumentando a sua produtividade por meio da compensação dos macronutrientes nitrogênio (N), fósforo (P) e potássio (K). No Brasil, os fertilizantes apresentam-se predominantemente em forma esfarelada ou granulada.

Pode-se classificar os tipos de fertilizantes conforme demonstrado na figura 1.

FIGURA 1 - TIPOS DE FERTILIZANTES



Os fertilizantes minerais são em geral sais inorgânicos de diferentes solubilidades desprovidos de carbono em sua composição. Os fertilizantes orgânicos constituem-se praticamente em diversos dejetos animais ou vegetais que de forma lenta fornecem os nutrientes essenciais às plantas. Pode-se citar como exemplos o estrume ou esterco animal, chorume, farinha de peixe, farinha de ossos, etc. Já os fertilizantes mistos constituem-se de uma mistura entre fertilizantes minerais e orgânicos [6].

Ainda, os fertilizantes minerais subdividem-se em três tipos. São eles [7]:

- **Nitrogenados:** compostos essencialmente por nitrogênio. Possuem como principal matéria prima a amônia;
- **Fosfatados:** fertilizantes constituídos de fósforo assimilável aos vegetais;
- **Potássicos:** são substâncias solúveis em água, que fornecem o potássio necessário ao desenvolvimento vegetal e possuem como matérias primas principais o sulfato de potássio e o cloreto de potássio.

Os fertilizantes minerais são desenvolvidos com o objetivo de prover elementos que auxiliem o desenvolvimento das plantas. Por volta de 90% da massa das plantas é constituído por água. O restante é basicamente matéria seca formada pelos 17 elementos essenciais para o seu crescimento (C, H, O, N, P, K, Ca, Mg, S, Fe, Mn, Zn, Cu, B, Mo, Cl e Ni).

O carbono, o hidrogênio e o oxigênio correspondem a 90% do peso seco das plantas, porém, esses elementos são obtidos do ar e da água e não estão na composição dos fertilizantes.

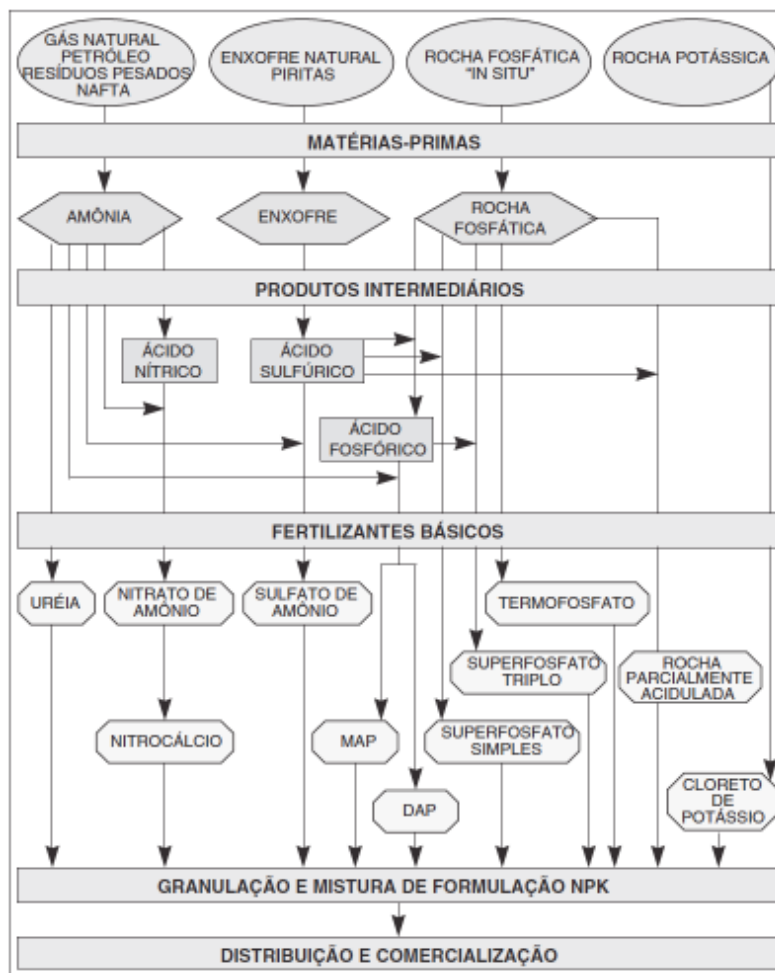
Os elementos nitrogênio, fósforo e potássio são considerados macronutrientes primários e o Ca, Mg e S são macronutrientes secundários. Os fertilizantes minerais fornecem às plantas os macronutrientes primários, devido aos solos possuírem maiores deficiências destes [8].

A cadeia produtiva de fertilizantes minerais encontra-se esquematizada na figura 2, em que é possível verificar que sua complexa produção envolve desde atividades de extração da matéria-prima até a composição de formulações voltadas à agricultura.

Do setor de extração mineral, são obtidas as matérias primas básicas como o gás natural, o rasf (resíduo asfáltico do petróleo), a nafta, a rocha fosfática, o enxofre e as rochas potássicas. Então, desses insumos é possível obter as matérias-primas intermediárias, como o ácido sulfúrico, o ácido fosfórico, a amônia anidra e os fertilizantes básicos como a ureia, o sulfato de amônio, o mono-amônio fosfato, o superfosfato simples e o cloreto de potássio. Dos fertilizantes básicos são obtidos os fertilizantes granulados e as misturas de fertilizantes de

base nitrogenada, fosfatada e potássica, conhecidas como misturas NPK, considerados fertilizantes complexos [9].

FIGURA 2 - CADEIA PRODUTIVA DE FERTILIZANTES MINERAIS [9]



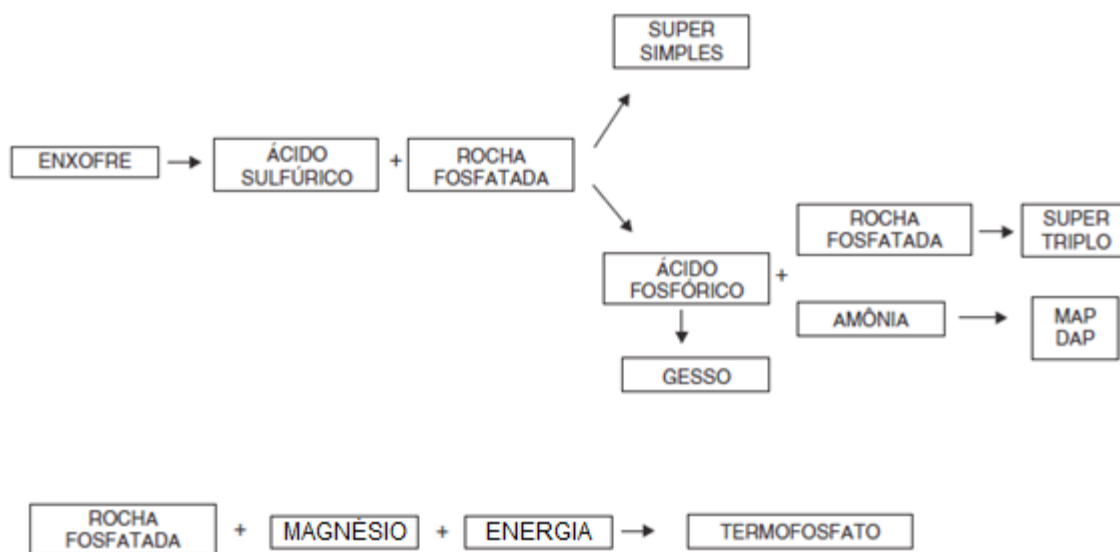
3.2. FERTILIZANTES FOSFATADOS

A forma mais comum na qual o fósforo é encontrado na natureza é por meio de fosfatos de rochas em jazidas que existem no mundo todo. Essas jazidas normalmente são provenientes de antigas atividades vulcânicas. As maiores jazidas de fósforo estão distribuídas no mundo da seguinte forma: Marrocos (60%), China (15%), Estados Unidos (4%), África do Sul (4%) e Jordânia (2%). Estes países juntos detêm 85% das 56 milhões de toneladas de reserva rocha fosfática. O Brasil encontra-se no sétimo lugar no que diz respeito a estas reservas e possui suas maiores jazidas em Minas Gerais (73,8%), Goiás (8,3%) e São Paulo (7,3%).

A rocha fosfática e o enxofre são as matérias primas elementares para a produção de quase todos os fertilizantes fosfatados comercializados no Brasil e no mundo.

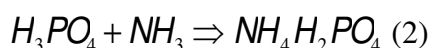
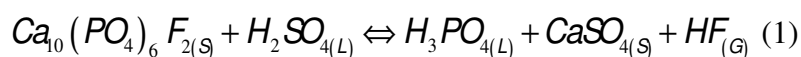
De forma simplificada, a figura 3 demonstra a rota de produção dos fertilizantes fosfatados [9].

FIGURA 3- ROTA DE PRODUÇÃO DOS PRINCIPAIS FERTILIZANTES FOSFATADOS PRODUZIDOS NO BRASIL (ADAPTADO DE [9])



3.3. MONO-AMÔNIO FOSFATO

O mono-amônio fosfato (MAP), também conhecido como fosfato monoamônico ou fosfato de amônio monobásico, é um fertilizante fosfatado amoniacal obtido da reação da apatita com ácido sulfúrico, formando assim o ácido fosfórico na forma líquida, sulfato de cálcio (gesso) na forma sólida e ácido fluorídrico em forma gasosa [equação (1)]. O ácido fosfórico é então reagido com amônia anidra para assim dar origem ao MAP [equação (2)] [10].



O MAP é um fertilizante sólido, apresentado em forma de grãos, contendo em sua composição 10% a 12% de nitrogênio e 50% a 52% de fósforo e coloração que vai do cinza claro até tons mais escuros (Figura 4).

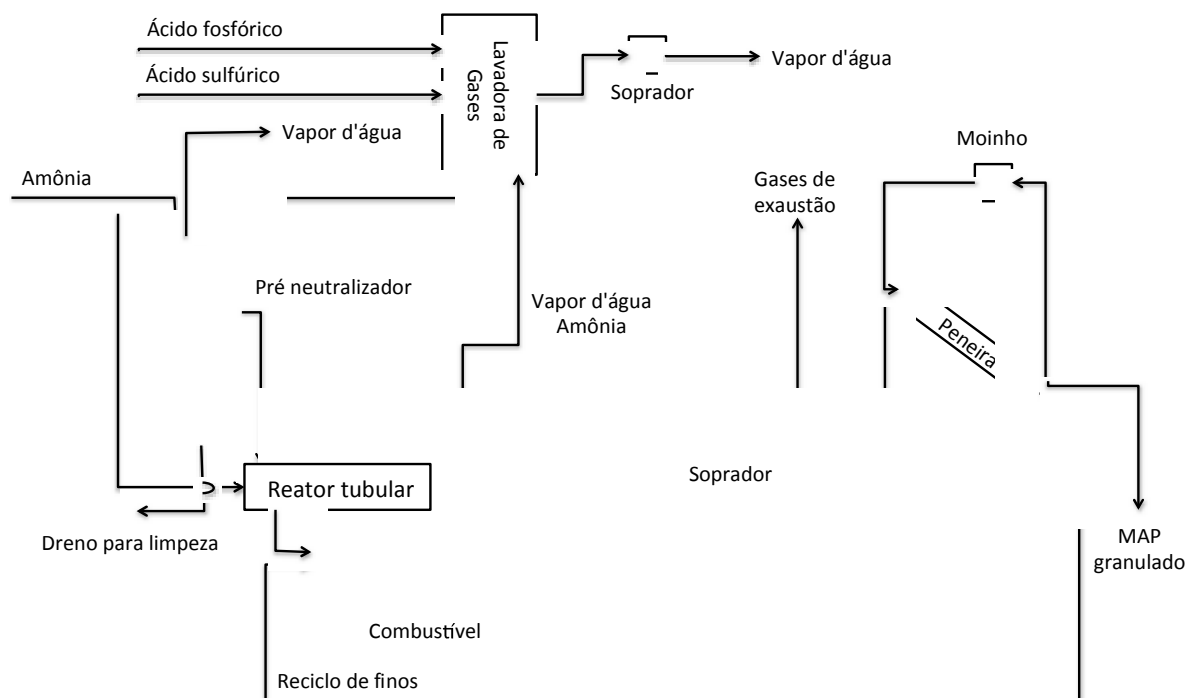
FIGURA 4 - ASPECTO DO FERTILIZANTE MAP



O termo MAP é aplicado a um dos tipos de fosfato de amônio que é produzido por técnicas de cristalização ou granulação.

Existem diversos processos de fabricação para a obtenção de MAP, porém em essência todos eles possuem o mesmo princípio. O diagrama típico deste processo pode ser ilustrado pela figura 5 [11].

FIGURA 5- PROCESSO GENÉRICO DE PRODUÇÃO DE FOSFATOS DE AMÔNIA (ADAPTADO DE [11])



Em geral, ácido fosfórico, ácido sulfúrico e amônia são reagidos para formar o fosfato de amônio desejado. Os ácidos (fosfórico e sulfúrico) são misturados na lavadora de gases, que

por sua vez também recebe vapores d'água e amônia. A solução de ácido sulfúrico, ácido fosfórico e amônia são transportados a um pré neutralizador, onde são reagidos.

No reator tubular, esta solução recebe dose extra de amônia até que seja atingida a proporção adequada para a reação desejada.

A reação obtida no reator tubular é granulada em um tambor rotativo e seca em um secador rotativo. Após a secagem, é realizado o processo de seleção dos grãos de MAP. Os finos são reciclados retornando ao granulador e os grossos são moídos em um moinho. O MAP que se encontra dentro da faixa granulométrica especificada prossegue para armazenamento.

Em sua fabricação, o fertilizante MAP necessita ser submetido a um processo de secagem para a remoção da umidade. O produto seco reduz os custos de armazenamento e transporte, além de facilitar o seu manuseio. A secagem é uma etapa onerosa, pois demanda alto consumo energético para aquecer o gás de secagem, e o processo a ser escolhido é dependente das características do material de interesse. Estudos devem ser feitos acerca da otimização dos parâmetros de secagem, para que sejam atingidos os níveis legais de teor de umidade para o referido produto, sem que sejam perdidas as suas qualidade e características comerciais.

3.4. SECAGEM

A secagem está entre as operações unitárias mais comuns da indústria química, sendo que geralmente é o último processamento do produto antes da classificação e embalagem.

O termo secagem normalmente descreve o processo de remoção térmica de substâncias voláteis em corpos não voláteis [12]. No caso específico deste trabalho, a substância volátil é a água e o corpo não volátil é o fertilizante MAP.

Quando um sólido úmido é submetido ao processo de secagem térmica, há a ocorrência de dois processos simultâneos de transferência de massa e energia, que influenciam a velocidade da secagem [12]. Essas transferências de massa e energia ocorrem tanto interna como externamente, dando origem às chamadas condições internas e externas.

3.4.1. Condições externas

As condições externas principais que influem na operação de secagem são temperatura, umidade, velocidade e direção do fluxo de ar, forma física do sólido, agitação e método de

suporte do sólido durante a secagem. Durante o início da secagem as condições externas possuem maior importância, quando a umidade superficial do sólido está sendo removida. Em alguns casos, como por exemplo durante a secagem de madeira e materiais cerâmicos, podem ocorrer trincas ou empenamento da superfície dos sólidos que estão sendo secos devido ao aumento da tensão superficial. Em casos como estes, deve-se aumentar a umidade relativa do ar utilizado para a secagem de forma a retardar a evaporação da umidade superficial dos sólidos [12].

3.4.2. Condições internas

Segundo Mujumdar [12], as condições internas referem-se às características do sólido que está sendo seco. Durante a transferência de calor para um sólido úmido, ocorre um gradiente de temperatura no sólido enquanto a umidade é evaporada através da superfície. Isto provoca a migração da umidade do sólido para a superfície e pode ocorrer por um ou mais mecanismos que podem ser difusão, capilaridade, surgimento de pressões internas devido ao encolhimento gerado pelo processo de secagem dentre outros.

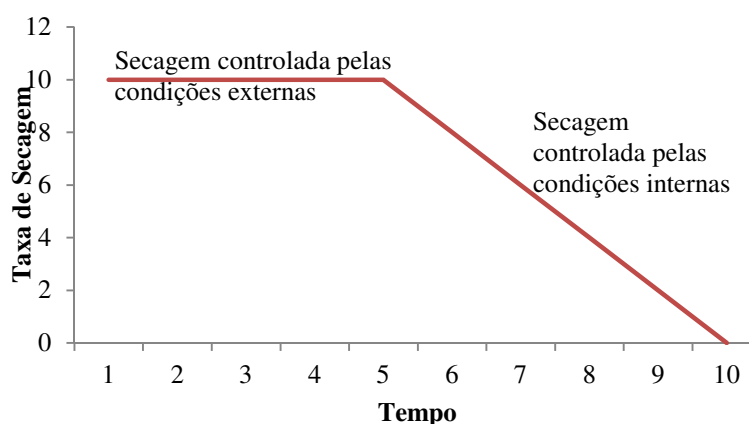
O gradiente de temperatura gerado no sólido por sua vez gera um gradiente de pressão e então resulta em difusão do vapor de água para a superfície. Isto ocorre simultaneamente com o movimento da umidade dentro do sólido.

Para que haja a secagem do material, é necessário que a umidade seja transportada do interior do sólido até a superfície para então ser evaporada. Os mecanismos mais importantes para que haja a migração da umidade do interior do sólido até a superfície são [13]:

- **Difusão líquida:** ocorre devido à existência de um gradiente de concentração;
- **Difusão de vapor:** ocorre devido à existência de um gradiente de pressão de vapor que é causado por um gradiente de temperatura;
- **Escoamento de líquido e vapor:** ocorrem devido à diferença de pressão externa, de concentração, capilaridade e alta temperatura. Todos estes fatores como conteúdo inicial de umidade do material, umidade de equilíbrio, forma como a água está relacionada à estrutura do sólido e a forma como o transporte da água é feito do interior à superfície do sólido durante a secagem podem fundamentar a operação de secagem.

Estes dois processos podem ser evidenciados nas curvas de cinética de secagem. Se a quantidade de água que chega até a superfície do material é igual à quantidade de água que está sendo vaporizada - taxa constante de secagem -, a taxa de secagem depende exclusivamente das condições externas. Caso contrário, a secagem é controlada pelas condições internas - taxa de secagem decrescente (Figura 6) [14].

FIGURA 6- TAXA DE SECAGEM DE UM MATERIAL QUALQUER EM FUNÇÃO DO TEMPO
(ADAPTADO DE [12])



3.4.3. Cinética de secagem

Conhecer a cinética de secagem de um determinado material é importante para realizar o projeto, simulação e otimização do processo de secagem deste material. Normalmente, as curvas de secagem são traçadas com a finalidade de definir os parâmetros das equações que definem a taxa de secagem [15].

Pode-se subdividir os modelos de secagem em três grupos. Os modelos teóricos, os empíricos e os semi-empíricos. Não há como estabelecer uma única relação teórica que generalize os tratamentos na secagem. Atualmente, o processo de secagem do fertilizante MAP é desenvolvido de forma empírica. O secador de bandejas permite conhecer os parâmetros necessários para otimizar o processo atualmente desenvolvido com o secador rotativo.

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 por meio de uma abordagem baseada em dados experimentais e na análise dimensional. Estes 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 qualquer significado físico. Desta forma, eles não oferecem uma visão apurada dos fenômenos que ocorrem durante o processo de secagem [16].

3.4.3.1. Modelo da difusão

A secagem de alguns materiais normalmente ocorre no período de taxa de secagem decrescente. Neste período, a migração da umidade é controlada pela difusão. Para estes casos, a segunda lei de Fick pode ser utilizada para descrever o processo de secagem – equação (3) [15].

$$\frac{\partial m}{\partial t} = D \times \nabla^2 m \quad (3)$$

Em que:

m – Massa (kg);

t – Tempo (s).

Segundo Mujumdar [12], a lei de Fick desenvolvida para partículas esféricas, pode ser apresentada da seguinte forma – equação (4):

$$MR = \frac{X - X_e}{X_0 - X_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \times \exp\left(-n^2 \times \frac{\pi^2 \times D \times t}{r^2}\right) \quad (4)$$

Em que:

MR – Umidade reduzida (adimensional);

X – Umidade (adimensional);

X_e – Umidade de equilíbrio (adimensional);

X₀ – Umidade inicial (adimensional);

n – Número de termos da equação (adimensional);

D – Difusividade (m²/s);

r – Raio (m).

Para longos tempos de secagem ($MR < 0,6$), quando r é pequeno e t é grande, a equação (4) pode ser simplificada considerando apenas o primeiro termo, ou seja, $n=1$, conforme demonstrado na equação (5) [15,17]:

$$MR = \frac{6}{\pi^2} \times \exp\left(-\frac{\pi^2 \times D \times t}{r^2}\right) \quad (5)$$

Linearizando a equação (5), é possível determinar a difusividade por meio de regressão linear. Uma abordagem bastante utilizada para modelagem de processos de secagem é substituir a difusividade por uma constante chamada de Difusividade Efetiva, que engloba diversos mecanismos de transporte interno da umidade. A difusividade efetiva é uma propriedade que indica a facilidade com que a água é extraída do material. A difusividade efetiva varia conforme as condições de secagem mudam [13].

Há aplicações do modelo da difusão para a secagem de diversos materiais. Senadeera *et al.* [15], utilizaram o modelo da difusão para determinar a difusividade durante a secagem de feijão, batata e ervilha. Duran; Hayaloglu e Karabulut [18], determinaram a difusividade durante a secagem de *eriste*¹ por meio do modelo de difusão de Fick. Silva *et al.* [19], determinaram a difusividade para a secagem de feijão macassar.

Alguns autores compararam a aplicação do modelo da difusão com modelos empíricos e semi-empíricos. Júnior e Corrêa [20] compararam o modelo da difusão com os modelos de Page, Thompson e exponencial para o estudo de cinética de secagem de feijão. Marques *et al.* [17] comparam a aplicação do modelo de Fick com 1, 2 e 3 termos com o modelo de Page e um modelo desenvolvido por Cavalcanti Mata para a secagem de pseudofruto de caju e Ribeiro [21], compara, a aplicação do modelo de Fick com os modelos de Midilli *et al.*, Page, Wang e Singh e Henderson e Pabis para a secagem de piraíba.

Em todos os casos citados, os modelos empíricos e semi-empíricos se ajustaram melhor aos dados experimentais.

3.4.3.2. Modelos empíricos e semi-empíricos

Tem sido dada grande ênfase aos modelos semi-empíricos, que são desenvolvidos de forma a haver uma harmonia entre a teoria e a facilidade de uso. De uma forma geral, estes modelos

¹ Tipo de cereal da Turquia.

se baseiam na lei de Newton para resfriamento aplicada à transferência de massa. São exemplos o modelo dois termos, o modelo de Page e o modelo de Page modificado [16,12,12].

O modelo exponencial de secagem, o mais simples está demonstrado na equação (6).

$$MR = \exp(-k \times t) \quad (6)$$

Em que:

k – Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional).

Este modelo não costuma de ajustar muito bem às curvas de secagem obtidas experimentalmente, pois o modelo exponencial prevê valores maiores que os reais nos instantes iniciais e valores menores que os reais nos instantes finais da curva de secagem.

Devido a este problema de ajuste, foram criados modelos com modificações empíricas, como por exemplo, o modelo de Page, demonstrado na equação (7) [15,22].

$$MR = \exp(-k \times t^n) \quad (7)$$

Em que:

n – Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional).

Há outros modelos com modificações empíricas, desenvolvidos para ajustar melhor aos resultados experimentais. A tabela 2 demonstra alguns destes modelos matemáticos de cinética de secagem [18].

TABELA 2- MODELOS MATEMÁTICOS DE SECAGEM

#	Nome do Modelo	Equação
1	Page	$MR = \exp(-k \times t^n) \quad (8)$
2	Page modificado	$MR = \exp[-(k \times t)^n] \quad (9)$
3	Dois termos	$MR = a \times \exp(-k_0 \times t) + b \times \exp(-k_1 \times t) \quad (10)$
4	Midilli <i>et al.</i>	$MR = a \times \exp(-k \times t^n) + b \times t \quad (11)$
5	Verma <i>et al.</i>	$MR = a \times \exp(-k \times t) + (1 - a) \times \exp(-g \times t) \quad (12)$

Em que:

a – Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional);

k_0 – Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional);

b – Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional);

k_1 – Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional);

g – Parâmetro de ajuste do modelo experimental (adimensional).

Os modelos Page e Page modificado são talvez os mais conhecidos entre os modelos empíricos e semi-empíricos, e são amplamente utilizado para descrever processos diversos de secagem, como secagem de eriste [18], folhas de sálvia [23], folhas da baía [24], fertilizante super-fosfato simples granulado [1], milho [22] e outros.

Os modelos dois termos e Verma *et al.* possuem, dentre outras aplicações, descrição de secagem de pimentão vermelho [25], fertilizante super-fosfato simples granulado [1,26] e eriste [18].

O modelo Midilli *et al.* foi também amplamente utilizado para estudos de cinética de secagem, tendo como alguns exemplos a secagem de pistache [27] e rosela [28].

Duran; Hayaloglu e Karabulut [18], avaliaram 5 modelos diferentes para a secagem de eriste e o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o de Verma *et al.*

Durante a secagem de feijão, batata e ervilha, Senadeera *et al.* [15], concluíram que o modelo de Page foi o que representou melhor os dados experimentais.

Para a secagem de piraíba, os modelos de Midilli *et al.* e Page apresentaram melhor ajuste em relação aos demais modelos analisados [21].

3.5. SECAGEM DE FERTILIZANTES

A secagem do fertilizante MAP costuma ser realizada por secadores rotativos, por estes suportarem diversos produtos e possuírem grandes capacidades de processamento havendo poucas aplicações industriais de secagem deste produto por outros tipos de secadores [2].

Silvério [26] realizou um estudo comparando a utilização secadores rotatórios com fluxo de gás concorrente e contracorrente. Neste estudo, em que foi utilizado o fertilizante superfosfato simples, foi possível observar que a taxa de secagem utilizando o fluxo de gás de concorrente é menor que no contracorrente.

Arruda [1] comparou o desempenho de secadores roto-aerados com secadores rotatórios convencionais para a secagem de fertilizante superfosfato simples. Devido ao melhor contato gás-partícula, o desempenho dos secadores roto-aerados foi superior. O tempo de residência

para a mesma demanda de secagem foi em média 48% menor, graças a uma taxa de secagem de 3,1 a 4,9 vezes maior.

Tanto Arruda [1], como Silvério [26] realizaram estudos para caracterização das curvas de secagem dos fertilizantes que utilizaram. Esses estudos permitiram mostrar que as curvas possuíam um trecho de taxa constante seguido de taxa decrescente, predominante. As curvas foram bem representadas pelo modelo de Page.

3.6. SECADOR DE BANDEJAS

Secadores de bandeja são secadores em que a transferência de calor entre o gás de secagem e o material úmido ocorre por convecção forçada de ar quente. São caracterizados pelo baixo custo de instalação e manutenção e geralmente utilizados em produções de pequena escala. Consistem em uma câmara de secagem com isolamento térmico e um sistema de aquecimento e ventilação do ar que circulará através das bandejas (Figura 7). Estas são dispostas em uma base fixa e devem ser alimentadas com o material a ser seco. A operação ocorre em regime de batelada [29]. Secadores de bandeja como mostrado na Figura 7 são bastante utilizados para determinação de cinética de secagem de material particulado.

FIGURA 7 - SECADOR DE BANDEJAS INSTALADO NO INSTITUTO MAUÁ DE TECNOLOGIA



4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. MATERIAIS

4.1.1. Fertilizante MAP

Os experimentos foram realizados com Mono-Amônio Fosfato ($NH_4H_2PO_4$), gentilmente cedido pela Vale Fertilizantes S.A. O MAP utilizado nos ensaios foi produzido no complexo industrial de Piaçagüera, localizado em Cubatão, São Paulo, Brasil.

As amostras coletadas na unidade industrial da Vale Fertilizantes foram extraídas após o granulador (ver a figura 5, p.23) e possuem as seguintes propriedades demonstradas na tabela 3.

TABELA 3 - PROPRIEDADES DO FERTILIZANTE MAP

Propriedade	Valor
Umidade inicial (b.u.)	5%
Umidade final média (b.u.)	2,5%
Peso molar	115,03
Massa específica (g/cm^3)	1,803

Para a realização dos ensaios, o MAP coletado foi selecionado por peneiramento, sendo utilizadas as seguintes faixas granulométricas:

- Menor que 3,36 mm e retido em 2,38 mm (diâmetro médio de 2,87 mm);
- Menor que 2,38 mm e retido em 2,00 mm (diâmetro médio de 2,19 mm);
- Menor que 2,00 mm e retido em 1,40 mm (diâmetro médio de 1,70 mm).

FIGURA 8 - PENEIRA UTILIZADA PARA REALIZAR A SEPARAÇÃO GRANULOMÉTRICA



4.1.2. Secador de bandejas

Foi utilizado um secador de bandejas da marca Armfield Tray Drier® (Figura 7) para realizar os ensaios de secagem. Este secador encontra-se instalado nas dependências do Instituto Mauá de Tecnologia.

O secador possui seção transversal retangular e dimensões iguais a 0,3 x 0,3 x 0,4 m com chapa metálica de 1 mm de espessura. As dimensões externas máximas do secador são iguais a 2,95 x 0,73 x 1,40 m. O volume do compartimento de secagem é de 1,4 m³ e a capacidade de carga de sólidos úmidos é igual a 3 kg, que pode ser distribuído em até três bandejas.

A circulação do ar de secagem é feita por um soprador de ar com motor de 200 / 220 V, 1 A, 125 W e 3000 rpm. O soprador é acoplado internamente ao secador e impulsiona o ar dentro do túnel com velocidades de 0,3 até 2,1 m/s. A variação da velocidade do ar é feita por um inversor de frequência.

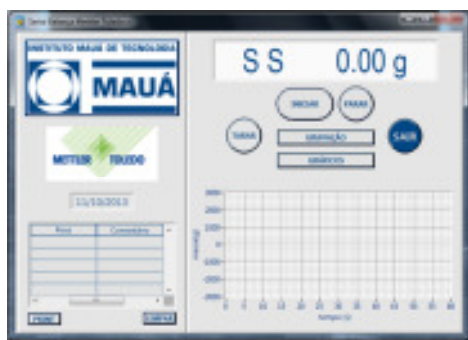
A temperatura do ar de secagem é controlada por um potenciômetro elétrico. O secador possui nove resistências elétricas – duas resistências de 1000 W e sete resistências de 500 W, localizadas logo após a entrada de ar e dispostas em conjuntos de 3 em 3.

A seção transversal do secador possui uma tela com a função de melhorar a distribuição de ar no interior do túnel. Esta tela fica localizada após as resistências.

Há uma abertura lateral com vidro temperado que serve de acesso ao suporte das bandejas e um psicrômetro.

O suporte das bandejas é apoiado em uma balança analítica Mettler Toledo®, modelo PB3002-S, utilizada para registrar a variação de massa das amostras durante os ensaios. Esta balança foi conectada a um computador, para que um programa desenvolvido internamente no Instituto Mauá de Tecnologia registre em tempo real os valores de massa das amostras (Figura 9).

FIGURA 9 – TELA DO SOFTWARE UTILIZADO PARA REGISTRAR OS VALORES DE MASSA DAS AMOSTRAS



4.2. MÉTODOS

4.2.1. Cinética de secagem

Os estudos cinéticos são feitos por intermédio da determinação das curvas de secagem – umidade média do material em função do tempo – e da temperatura – também em função do tempo.

Para determinar as curvas de secagem, foi utilizado um secador de bandejas (ver p. 33).

Amostras de MAP de aproximadamente 500 g foram distribuídas entre as três bandejas de aço inox do secador, com camada de altura de 7 mm cada. Posteriormente, as bandejas foram cobertas com folha dupla de papel absorvente com a finalidade de se evitar a dispersão de finos durante o processo de secagem.

Inicialmente ensaios exploratórios foram realizados para verificar a viabilidade de realização dos ensaios e identificar possíveis problemas. Na ocasião foi detectada a necessidade de utilizar o recobrimento com papel absorvente pois as curvas de secagem apresentaram-se na escala negativa das ordenadas, indicando que houve perda de massa de fertilizante durante os ensaios.

A umidade inicial das amostras foi determinada pelo método gravimétrico [30]. Para isto, em cada ensaio foram coletadas três amostras iniciais do material a ser seco e estas foram pesadas em balança analítica e secas em estufa com 105 °C em tempo superior a 24 horas, até que fosse atingida a massa constante. Após as amostras terem sido secas, elas foram dispostas em dessecadores para serem resfriadas e então as suas respectivas massas foram novamente pesadas possibilitando calcular a umidade em base seca por meio da equação (13) [31].

$$X(b.s.) = \frac{m_{(t)} - m_s}{m_s} \quad (13)$$

Onde:

$X(b.s.)$ – Umidade em base seca;

$m_{(t)}$ – Massa total (kg);

m_s – Massa seca (kg).

A média aritmética dos valores de umidade obtidos nas três amostras iniciais resultou no valor da umidade inicial utilizado nos ensaios.

A massa inicial das amostras e das bandejas foram medidas antes do início dos ensaios para possibilitar o cálculo da umidade instantânea a cada intervalo de tempo definido. Com o registro da massa obtido pela balança analítica acoplada às bandejas do secador foi possível calcular as umidades em cada instante utilizando a equação (13).

Os ensaios foram realizados com intervalos de medição da massa igual a 3 minutos, e não foram finalizados até as curvas representassem a assíntota que indica que a umidade de equilíbrio foi atingida. Para determinar o tempo necessário para atingir esta condição, foram realizados ensaios exploratórios.

As curvas experimentais de umidade reduzida foram traçadas utilizando a equação (4). A umidade de equilíbrio considerada foi a umidade constante obtida em cada ensaio.

A tabela 4 demonstra as condições utilizadas para realizar cada ensaio. Antes de iniciar os ensaios, o secador foi ajustado com as condições determinadas nesta tabela durante 30 minutos, para que o regime permanente fosse atingido.

Os parâmetros de temperatura e velocidade do ar foram determinados de acordo com os limites do secador de bandejas disponível no Instituto Mauá de Tecnologia.

Os valores escolhidos para a granulometria foram selecionados de acordo com os tamanhos dos grãos do material utilizado para secagem.

TABELA 4 - VARIÁVEIS POR ENSAIO

Ensaio	Temperatura (°C)	Velocidade do ar (m/s)	Granulometria (mm)
1	80	0,5	1,40
2	80	0,5	2,00
3	80	0,5	2,38
4	95	0,5	1,40
5	95	0,5	2,00
6	95	0,5	2,38
7	80	2,6	1,40
8	80	2,6	2,00
9	80	2,6	2,38
10	95	2,6	1,40
11	95	2,6	2,00
12	95	2,6	2,38

O raio médio das partículas de MAP foi calculado por meio da equação (14):

$$r = \frac{D_{max} + D_{min}}{4} \quad (14)$$

Em que:

D_{max} – Diâmetro máximo (m);

D_{min} – Diâmetro mínimo (m).

Cada um dos ensaios demonstrados na tabela 4 foi duplicado, de forma a possibilitar a verificação da reprodutibilidade dos resultados. Os valores de umidade reduzida considerados foram os valores médios obtidos em cada ensaio e sua réplica, para que as curvas representem a tendência dos ensaios realizados.

4.2.2. Ajuste dos modelos

Os dados experimentais obtidos nos ensaios de cinética de secagem foram utilizados para ajustar os modelos matemáticos de secagem.

A tabela 2, p. 29, demonstra os modelos semi-empíricos de cinética de secagem que foram avaliados neste estudo [18]. São eles:

- Page;
- Page modificado;
- Dois termos;
- Midilli *et al.*;
- Verma *et al.*

Além destes modelos, foram avaliados também os modelos de Fick com um, dois e três termos da série.

Para cada modelo analisado, foram calculados os valores de erro, R^2 e chi quadrado para cada, inclusive para a equação da lei de Fick.

O ajuste dos modelos de forma a determinar os parâmetros de cada equação foi feito por meio de regressão linear.

O erro total do ajuste de um modelo qualquer aos resultados experimentais pode ser determinado pela seguinte equação:

$$Erro = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (15)$$

Em que:

y_i – Valor observado (adimensional);

\hat{y}_i – Valor estimado (adimensional).

O coeficiente de determinação R^2 é uma medida que indica o ajuste de um modelo estatístico linear generalizado, como é o caso da regressão linear. O valor de R^2 pode variar entre 0 e 1 e indica em percentagem o quanto o modelo adotado pode explicar os valores observados, quanto mais próximo de 1 for o valor de R^2 , melhor o modelo se ajusta à amostra observada. A equação (19) define o coeficiente de determinação.

$$R^2 = \frac{SQ_{exp}}{SQ_{tot}} \quad (16)$$

Sendo que:

$$SQ_{exp} = \sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2 \quad (17)$$

E:

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (18)$$

Logo:

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (19)$$

Em que:

R^2 – Coeficiente de determinação (adimensional);

SQ_{exp} – Soma dos quadrados explicada (adimensional);

SQ_{tot} – Soma total dos quadrados (adimensional);

\bar{y} – Média das observações (adimensional).

O teste de ajustamento com chi quadrado permite verificar se uma distribuição se ajusta a outra [equação (20)]. Quanto mais próximo de 0 for o resultado desta equação, melhor o modelo se ajusta aos dados experimentais.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i} \quad (20)$$

Em que:

χ^2 – Valor da dispersão para duas variáveis de escala nominal (adimensional).

Os parâmetros dos modelos foram estimados com o objetivo de fazer com que o valor do erro ficasse o menor possível.

Os modelos foram então comparados avaliando-se primeiramente os valores médios de R^2 e em um segundo momento foram avaliados os valores médios de chi quadrado.

4.2.3. Taxa de secagem

As curvas de taxa de secagem foram traçadas da seguinte forma:

1. As curvas de umidade reduzida em função do tempo foram divididas em duas regiões: taxa de secagem constante e taxa de secagem decrescente;
2. A taxa de secagem constante obedece à equação de uma reta. Esta equação foi ajustada até que o valor do coeficiente de determinação atingisse valor maior ou igual a 0,97; a derivada dessa reta corresponde ao valor absoluto da taxa de secagem no período de taxa constante.
3. No período de taxa de secagem decrescente, o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais na região de taxa de secagem decrescente foi derivado para obtenção da taxa de secagem.

Os valores de taxa de secagem foram colocados em gráficos em função da umidade, em base seca. Desta forma, torna-se possível verificar o comportamento da taxa de secagem, além de ser possível analisar o valor da umidade crítica para cada ensaio, que corresponde à umidade em que ocorre a transição do período de taxa constante para aquele de taxa decrescente.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. DADOS EXPERIMENTAIS

5.1.1. Análise da reprodutibilidade

As figuras 10 a 21 apresentam os resultados experimentais de umidade reduzida (b.s.) obtidos nos ensaios realizados. Em cada figura há dois conjuntos de dados que representam o ensaio e a sua respectiva réplica.

É possível observar que em praticamente todas as curvas houve boa reprodutibilidade dos resultados. É também possível observar que há a existência do período de taxa de secagem constante, mesmo que este se mostre muito pequeno, além do período de taxa de secagem decrescente em praticamente todas as curvas. Isso será mais bem discutido na seção seguinte.

FIGURA 10 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm

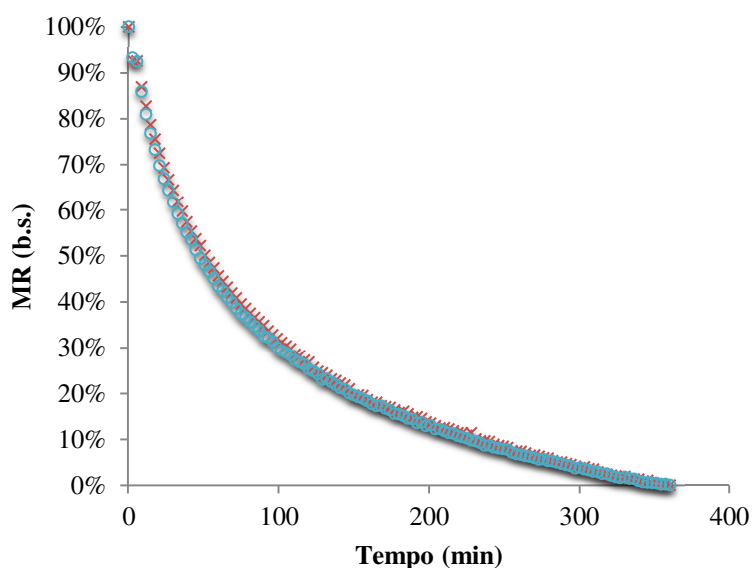


FIGURA 11 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm

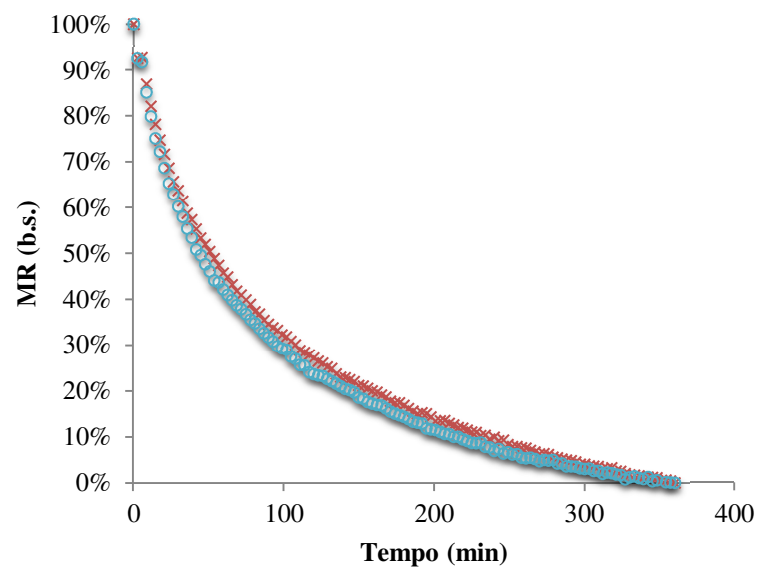


FIGURA 12 – UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm

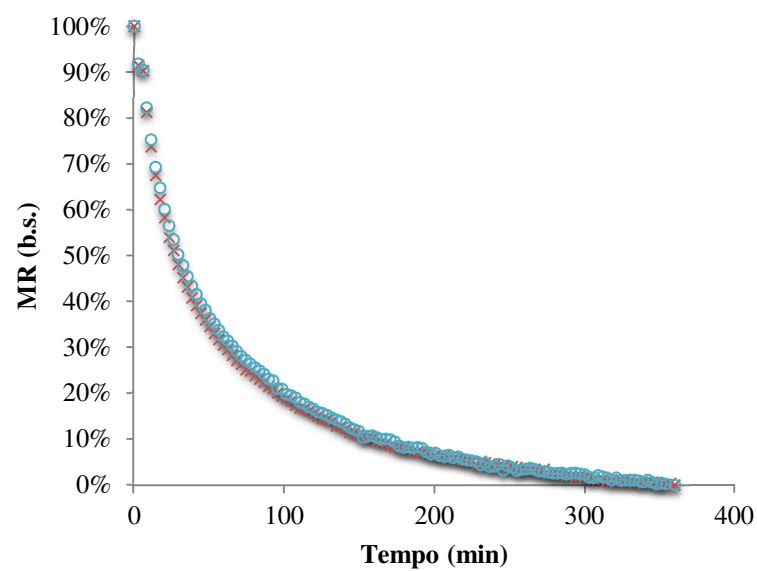


FIGURA 13 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm

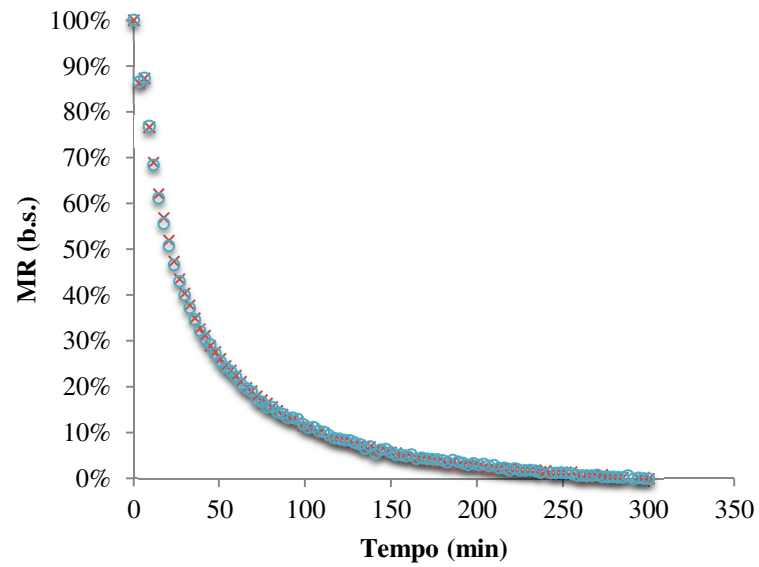


FIGURA 14 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm

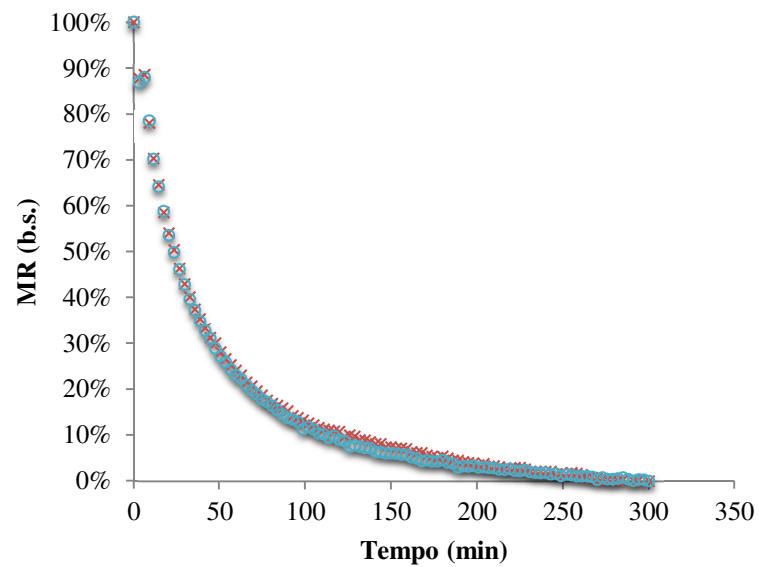


FIGURA 15 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm

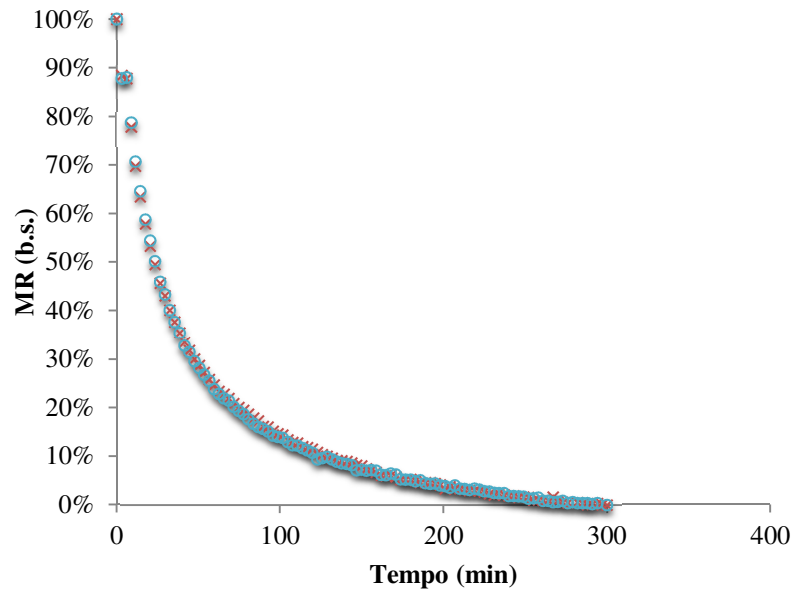


FIGURA 16 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm

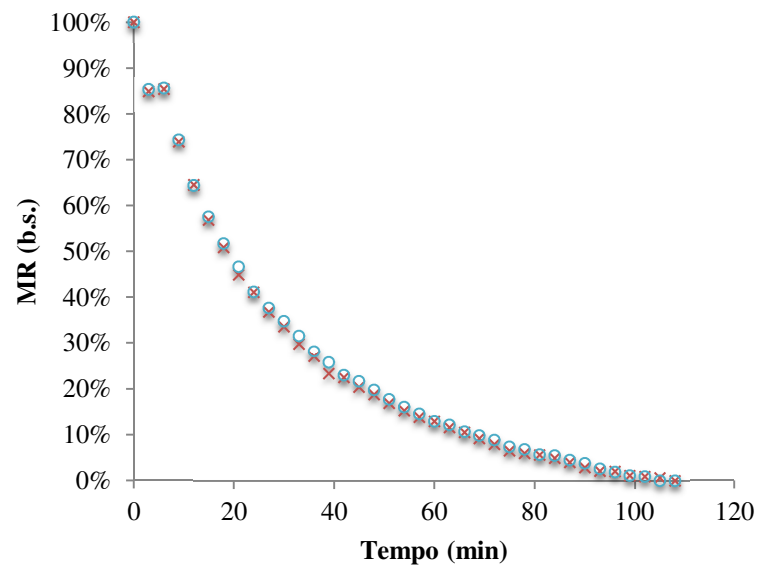


FIGURA 17 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm

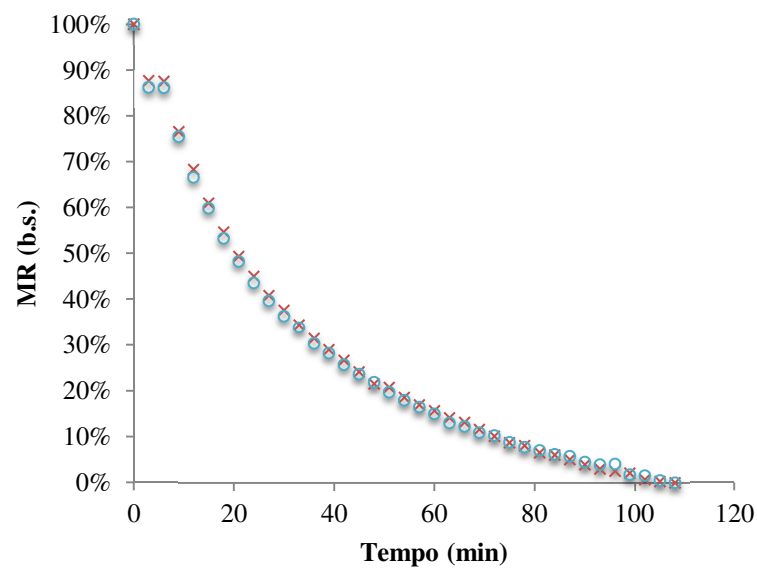


FIGURA 18 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 80 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm

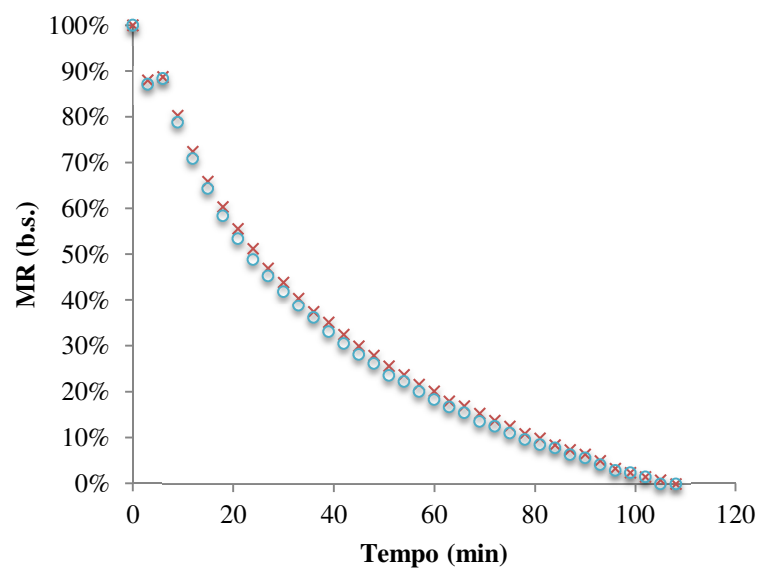


FIGURA 19 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm

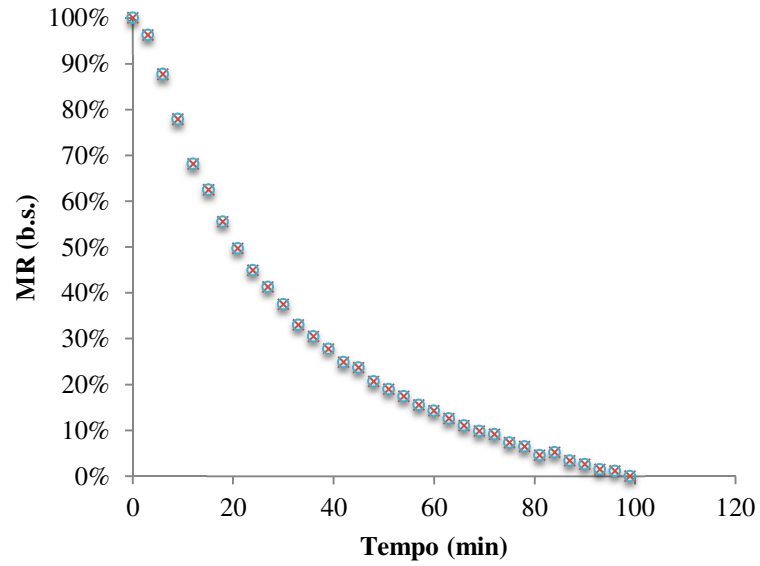


FIGURA 20 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm

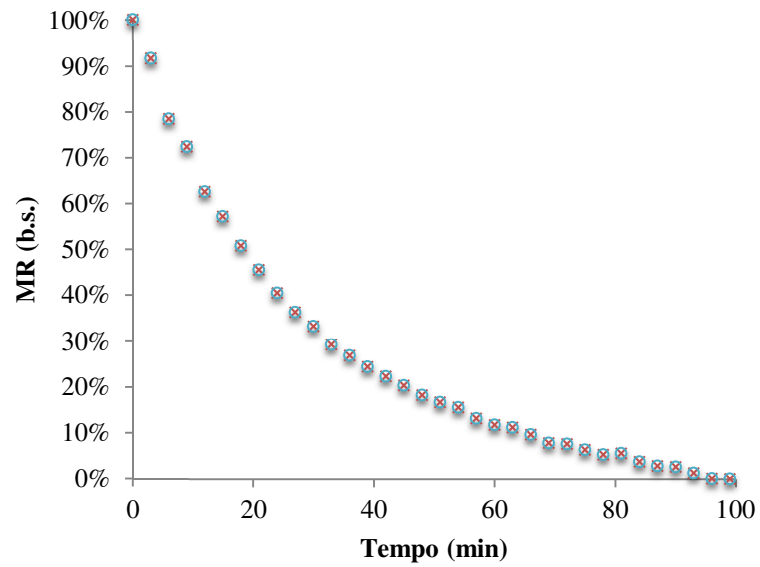
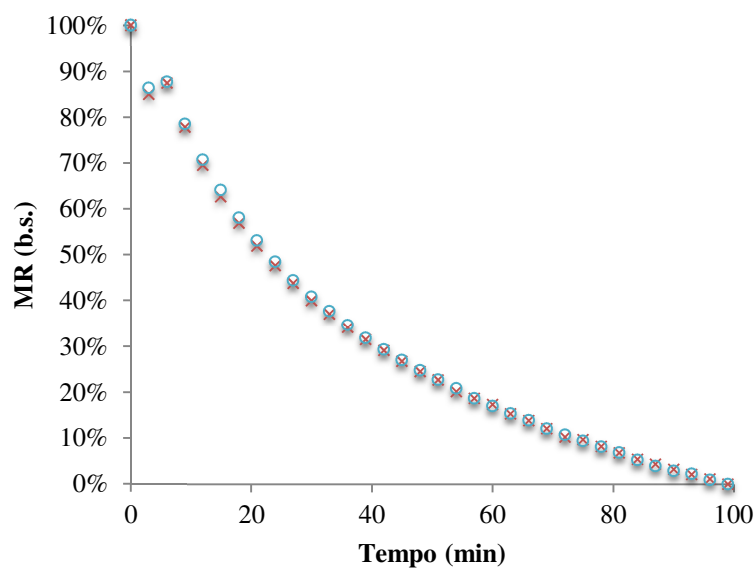


FIGURA 21 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA A 95 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm



5.1.2. Taxa de secagem

As figuras desta seção demonstram a taxa de secagem em função da umidade em base seca. Por intermédio destas figuras é possível observar que em todos os casos houve o período de taxa de secagem constante e o período de taxa de secagem decrescente.

FIGURA 22 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm

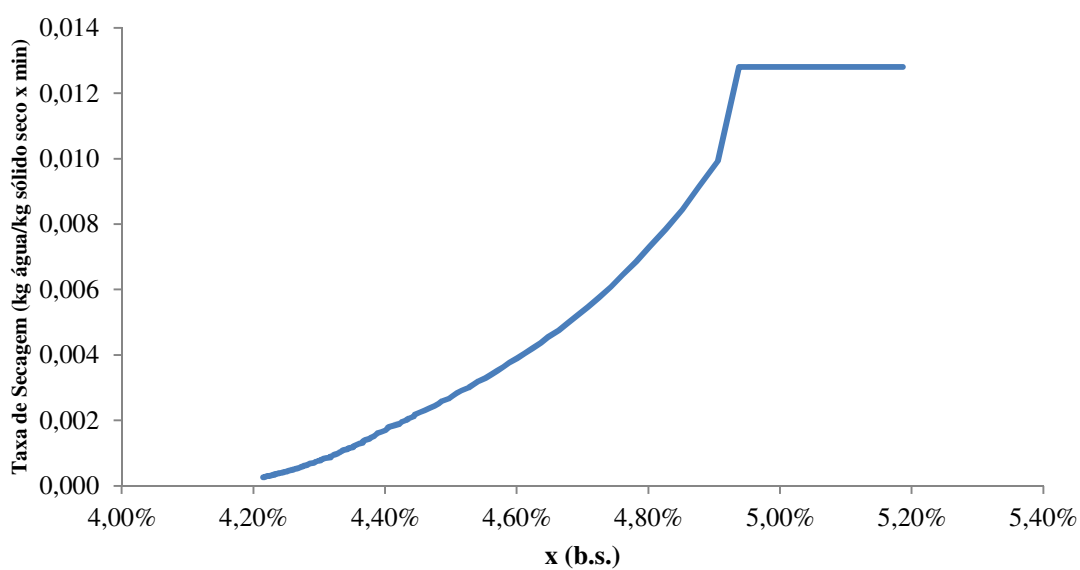


FIGURA 23 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm

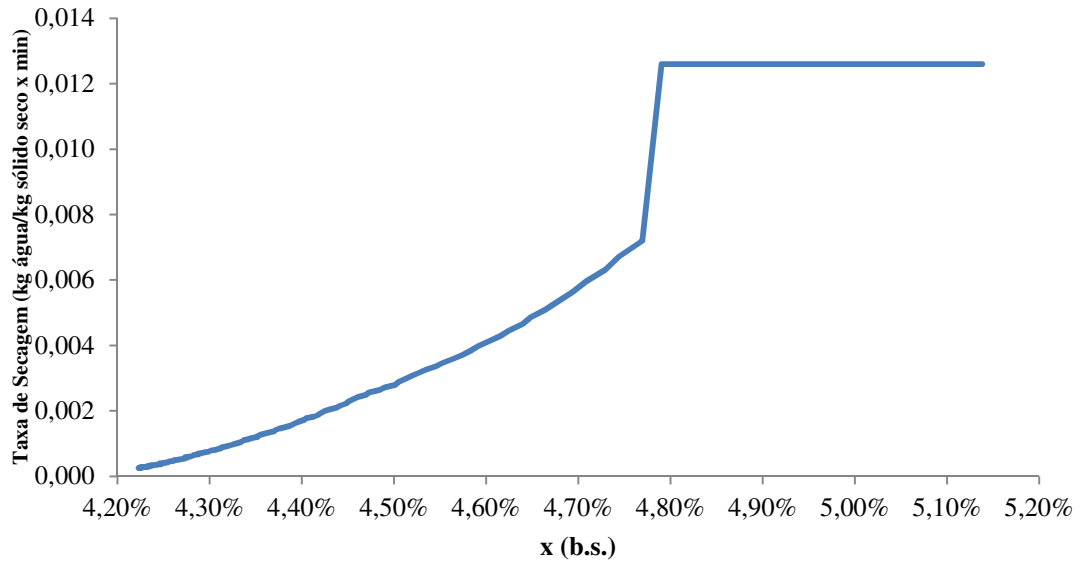


FIGURA 24 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm

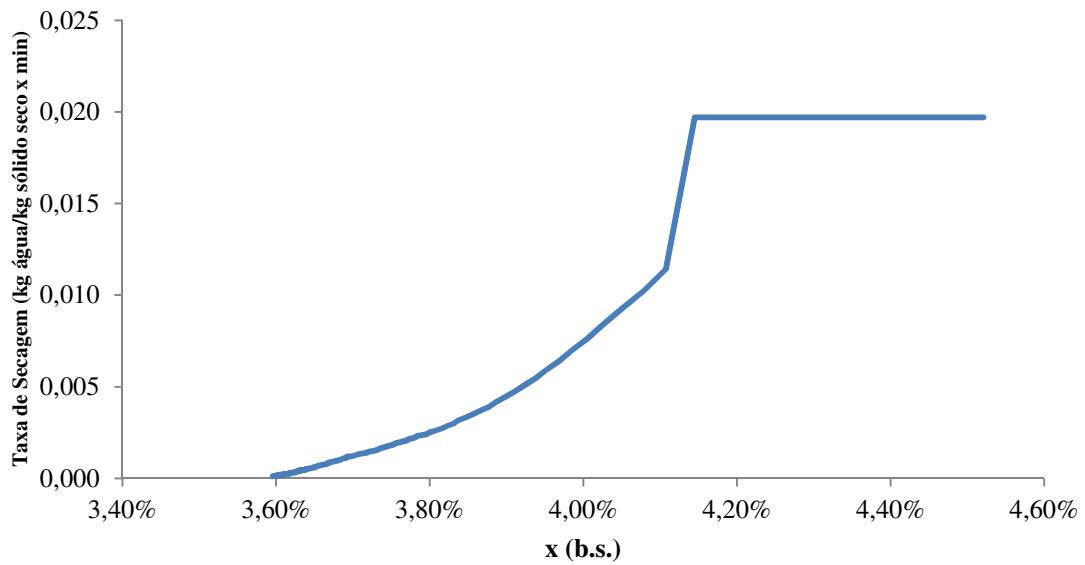


FIGURA 25 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm

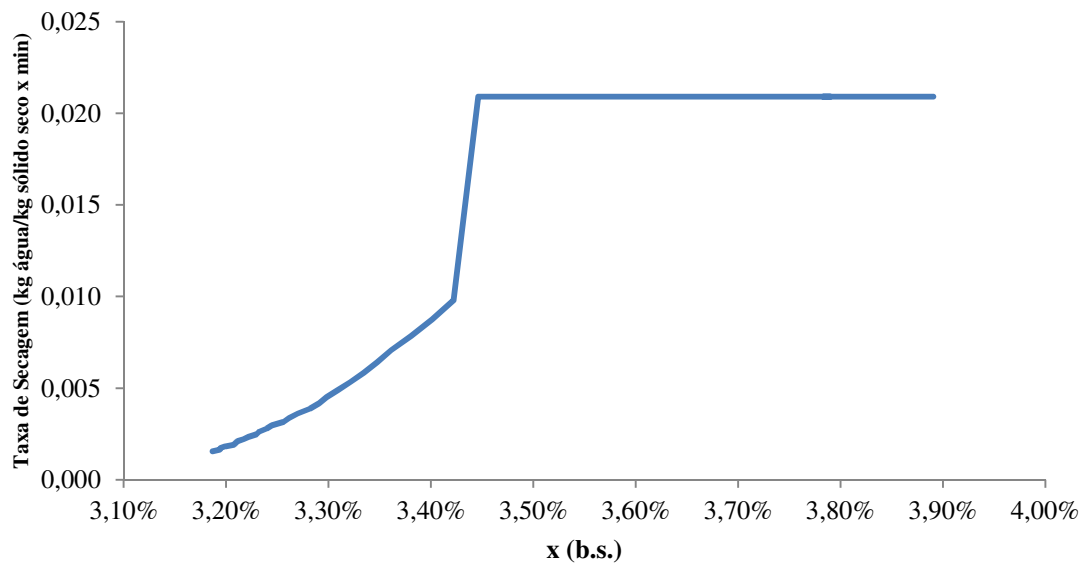


FIGURA 26 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm

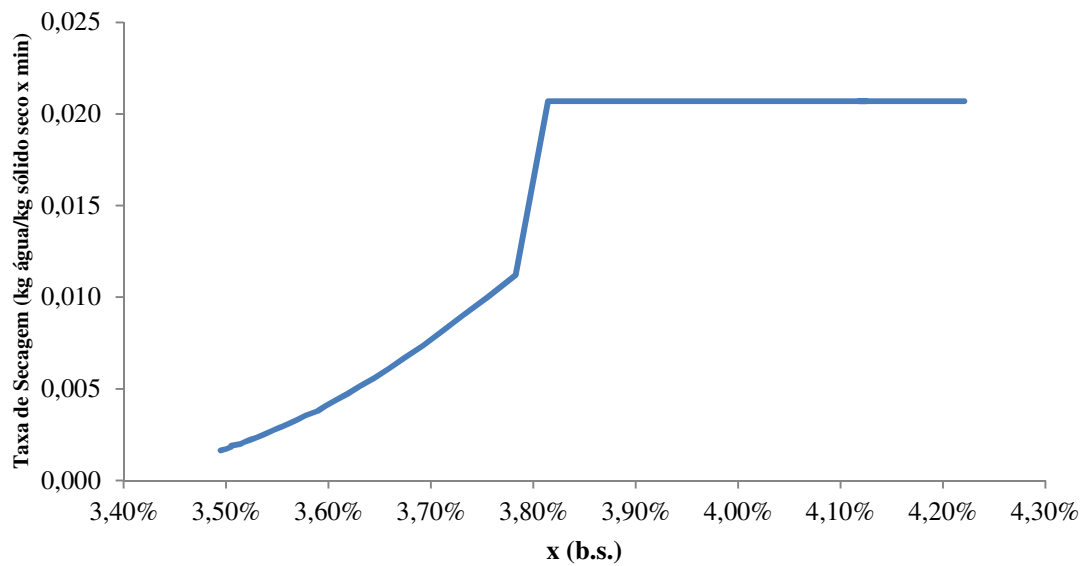


FIGURA 27 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm

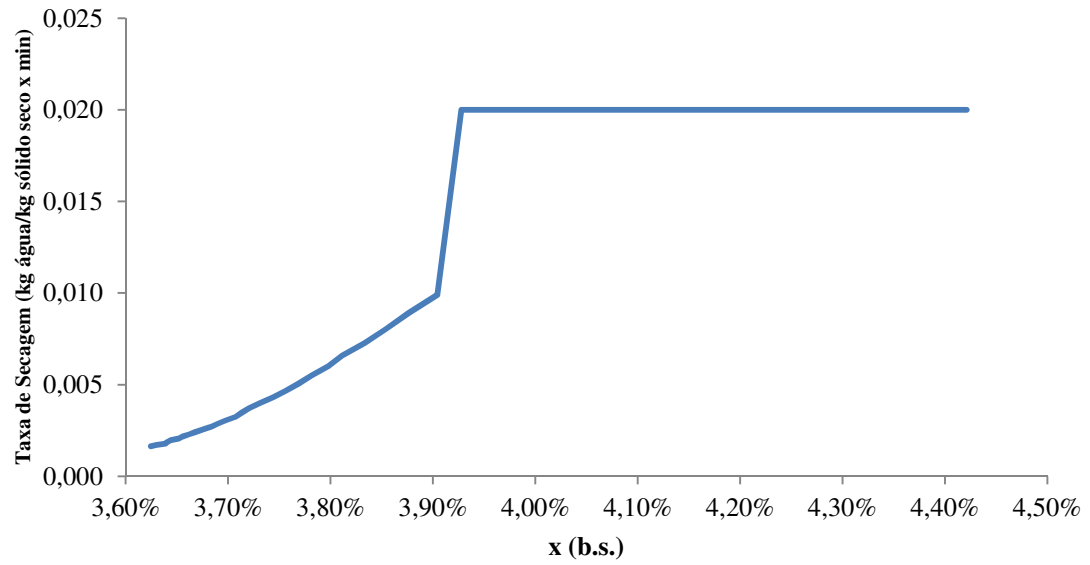


FIGURA 28 - FIGURA 26 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm

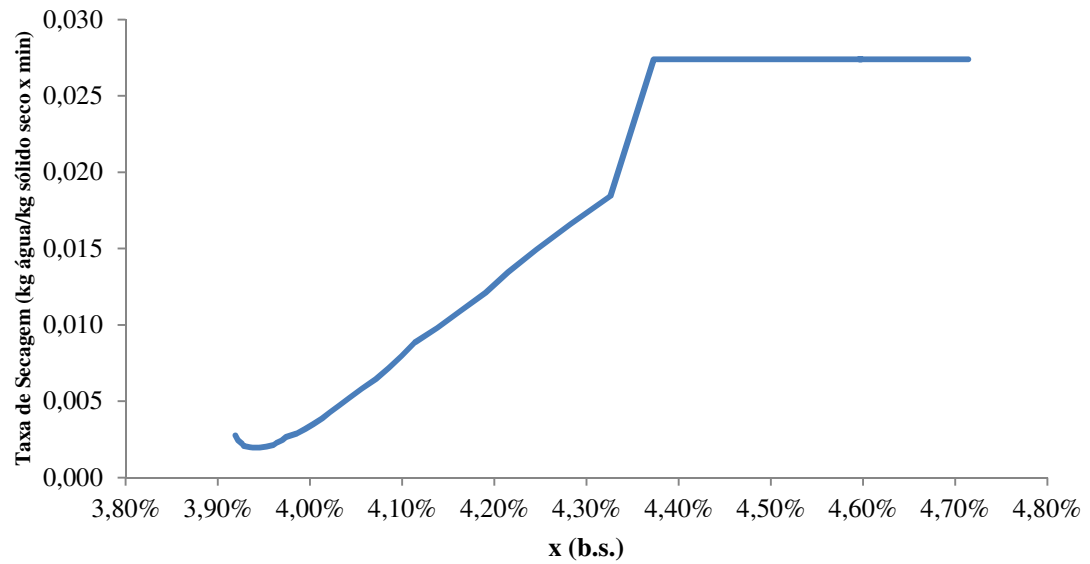


FIGURA 29 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm

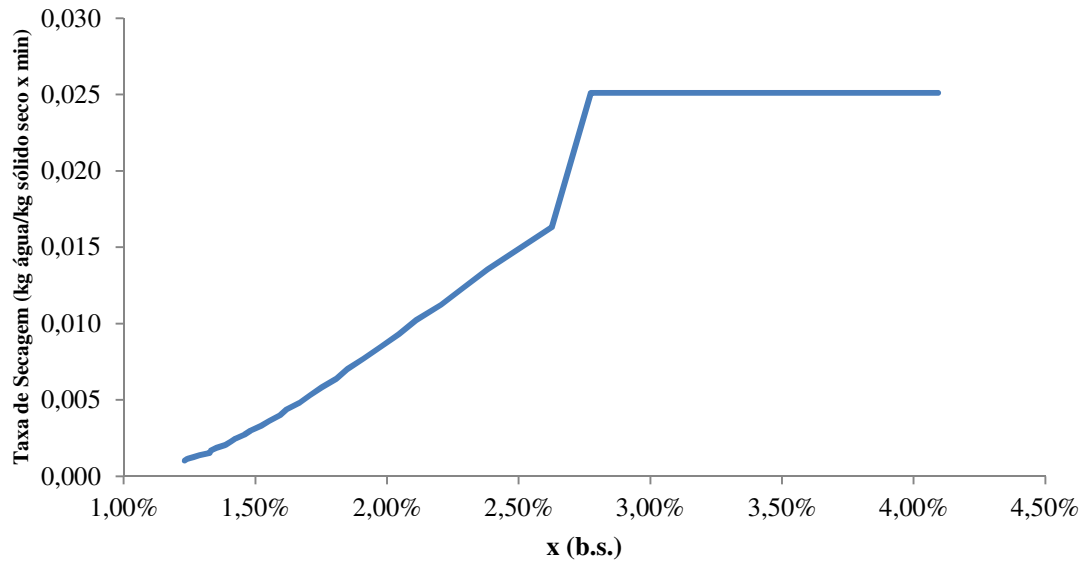


FIGURA 30 - TAXA DE SECAGEM A 80 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm

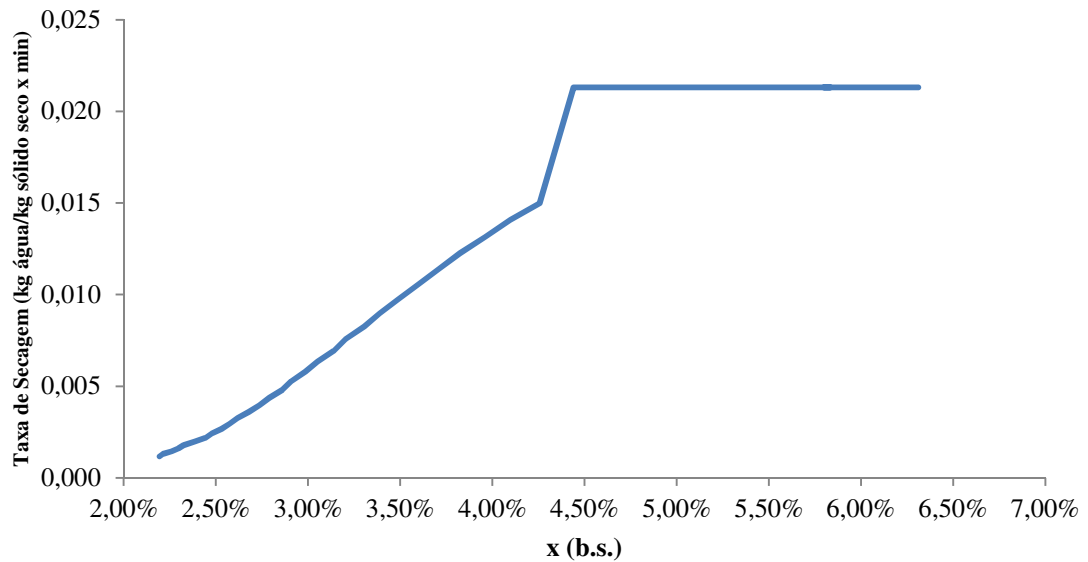


FIGURA 31 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm

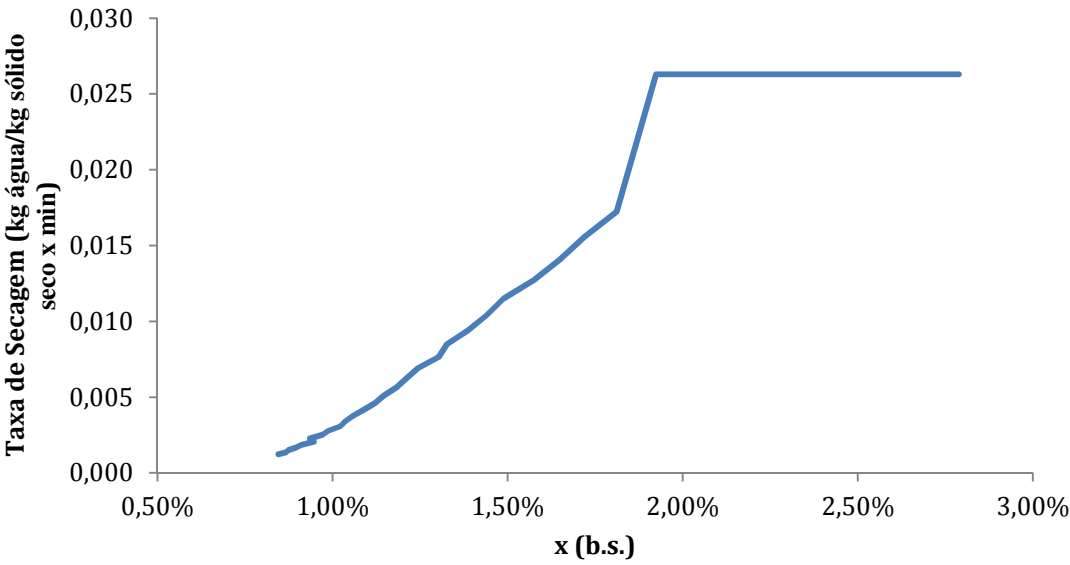


FIGURA 32 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm

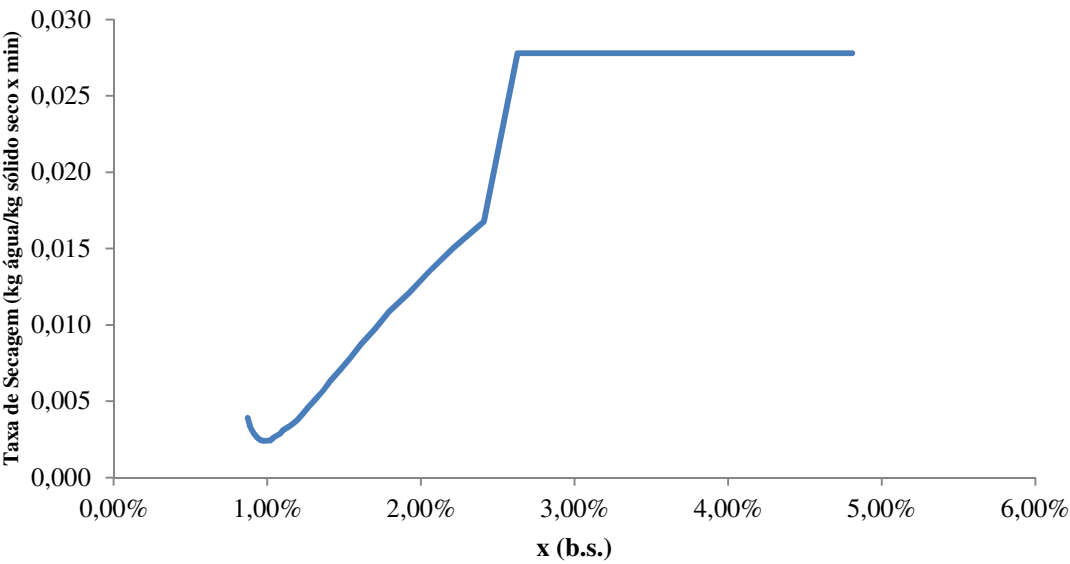
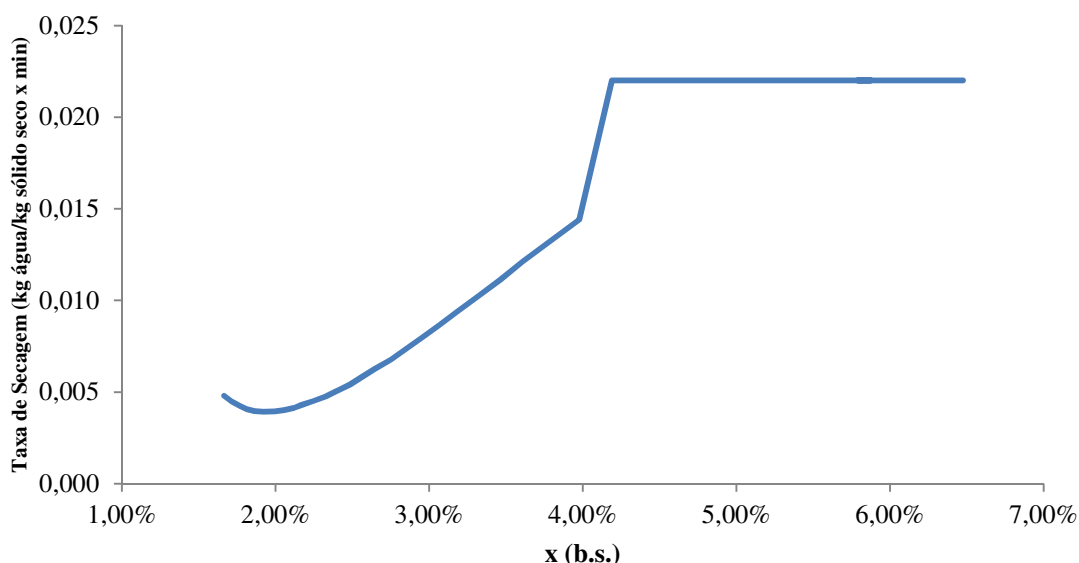


FIGURA 33 - TAXA DE SECAGEM A 95 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm



A tabela 5 demonstra a umidade reduzida (b.s.) observada por ensaio que foi decrescida durante o período de taxa de secagem constante. Esse valor corresponde à massa de água retirada por massa de matéria seca. De uma forma geral, pode-se dizer que os ensaios realizados com velocidade do ar mais baixa tiveram um decréscimo menor na umidade durante o período de taxa de secagem constante, o que indica que a velocidade do ar exerce grande influência no processo de secagem. Quanto maior a velocidade do ar, maior é o decréscimo de umidade no período de taxa de secagem constante.

O ensaio número 7, realizado com velocidade do ar mais elevada – 2,6 m/s – houve comportamento diferente dos demais ensaios realizados com esta velocidade e apresentou decréscimo de umidade mais baixa. Este fenômeno não pôde ser explicado e pode ser estudado em pesquisas futuras.

TABELA 5 - DECRÉSCIMO DE UMIDADE (B.S.) DURANTE O PERÍODO DE TAXA DE SECAGEM CONSTANTE

Ensaio	Decréscimo de umidade (b.s.)
1	0,27%
2	0,35%
3	0,40%
4	0,45%
5	0,43%
6	0,50%
7	0,34%
8	1,30%
9	1,96%
10	0,88%
11	2,29%
12	2,35%

A Tabela 6 demonstra a umidade crítica, ou seja, a umidade em que a secagem muda de taxa de secagem constante para taxa de secagem decrescente por ensaio. Observa-se que nos ensaios realizados com velocidade do ar mais baixa, a umidade crítica se mostrou mais alta, enquanto que nos ensaios realizados com velocidade do ar mais alta, a umidade crítica foi mais baixa, demonstrando novamente que a velocidade do ar tem grande influência na secagem do MAP.

TABELA 6 - UMIDADE CRÍTICA (B.S.) POR ENSAIO

Ensaio	Tempo (min)	Umidade crítica
1	18	4,94%
2	30	4,79%
3	21	4,14%
4	27	3,45%
5	24	3,81%
6	27	3,93%
7	15	4,37%
8	18	2,77%
9	21	4,14%
10	18	1,92%
11	18	2,63%
12	21	4,19%

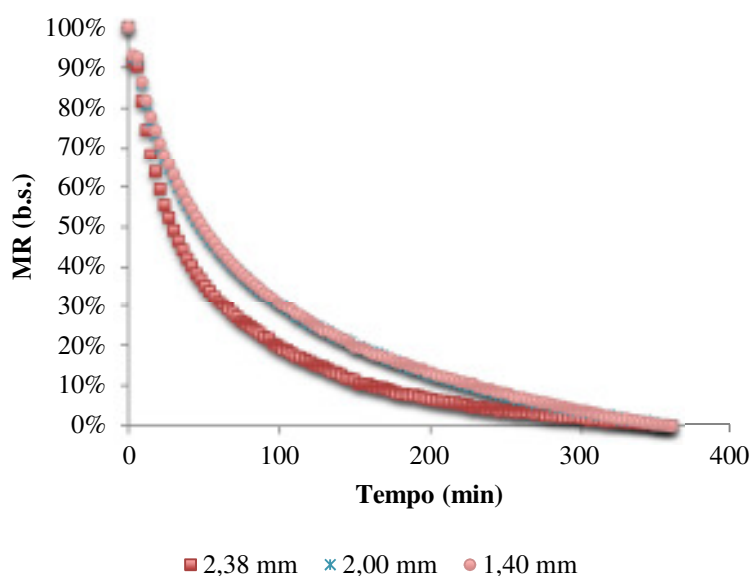
5.1.3. Influência do tamanho dos grãos

Os gráficos apresentados nesta seção demonstram as curvas de umidade reduzida (b.s.) do MAP em função do tempo, obtidas experimentalmente por intermédio dos ensaios de secagem no secador de bandejas. Estas curvas estão apresentadas de forma a fixar os parâmetros de velocidade do ar e temperatura, facilitando a análise da influência do tamanho dos grãos na cinética de secagem.

Observa-se nas figuras 34 a 37 que a influência do tamanho dos grânulos foi diferente em cada conjunto de ensaios.

Os grânulos menores oferecem maior área superficial por unidade de massa de material. Por esse motivo, espera-se uma taxa de secagem mais rápida com partículas menores. Não foi isso que ocorreu nesses ensaios a 80 °C e 0,5 m/s (Figura 34), os grânulos maiores secaram mais rapidamente e os demais tiveram comportamento de secagem muito parecido.

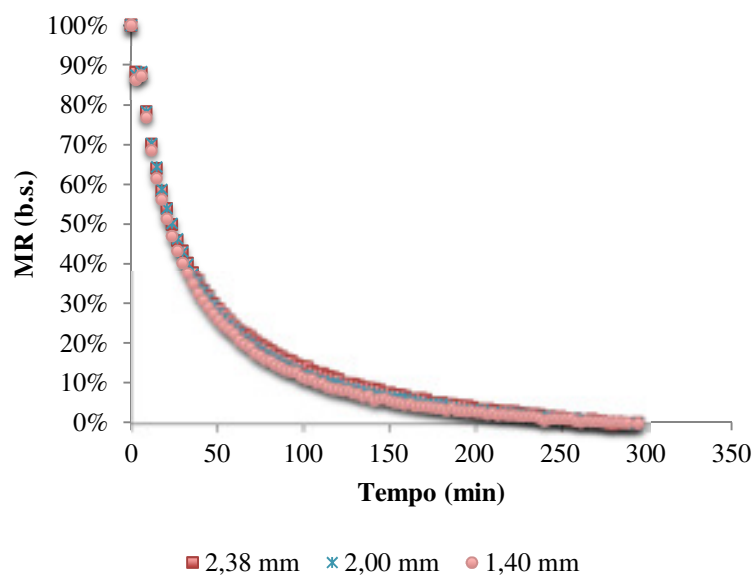
FIGURA 34 – INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS GRÃOS A 80 °C E 0,5 m/s



NOS ENSAIOS REALIZADOS A 95 °C E 0,5 M/S (

Figura 35), as curvas de secagem estão praticamente sobrepostas, não se percebendo influência significativa do tamanho de partícula.

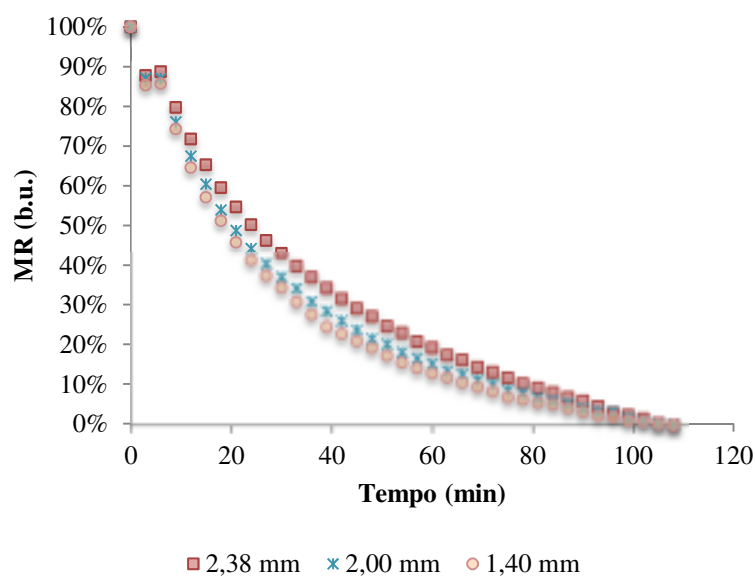
FIGURA 35 - INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS GRÃOS A 95 °C E 0,5 m/s



NOS ENSAIOS REALIZADOS A 80 °C E 2,6 M/S (

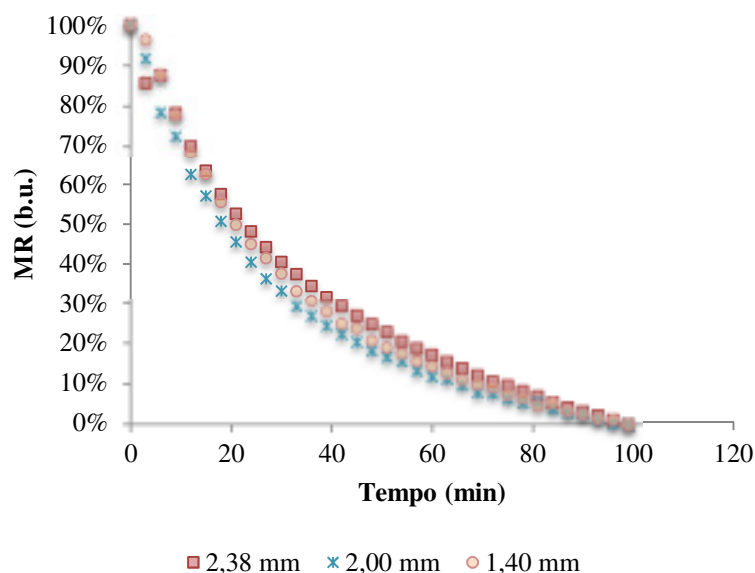
Figura 35), os grânulos maiores secaram de forma mais lenta enquanto os menores secaram mais rapidamente. Esse resultado está de acordo com o que se espera, tendo em vista que os grânulos menores oferecem maior área de contato gás-partícula para os transporte de calor e massa.

FIGURA 36 - INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS GRÃOS A 80 °C E 2,6 m/s



Já nos ensaios realizados a 95 °C e 2,6 m/s (Figura 37), os grânulos maiores secaram mais lentamente, como esperado. Porém, os grânulos de 1,40 mm secaram mais lentamente que os de 2,00 mm.

FIGURA 37 - INFLUÊNCIA DO TAMANHO DOS GRÃOS A 95 °C E 2,6 m/s



Este comportamento de secagem não é o esperado conforme explica a teoria de secagem, pois os grânulos maiores, consequentemente com área superficial específica menor deveriam sempre secar de forma mais lenta que os grânulos menores. O fenômeno ocorrido neste estudo pode estar ligado à falta de uniformidade da matéria-prima, acarretando variação da porosidade do material utilizado nos ensaios. Determinações de porosimetria podem ser realizadas em estudos futuros de forma a verificar essa hipótese. A influência da porosidade na secagem é discutida no trabalho de Garside et. al (1970).

5.1.4. Influência da temperatura do ar de secagem

As figuras 38 a 43 demonstram as curvas de umidade reduzida (b.s.) do MAP em função do tempo, obtidas experimentalmente por meio dos ensaios de secagem no secador de bandejas. Estas curvas estão apresentadas de forma a fixar os parâmetros de velocidade do ar e granulometria, facilitando a análise da influência da temperatura do ar na cinética de secagem.

Pode-se notar, com exceção dos ensaios realizados a 2,6 m/s e 1,4 mm (Figura 41), que o aumento da temperatura reduziu o tempo de secagem do MAP. Isto pode ser explicado devido ao fato de a temperatura mais alta facilitar a remoção de água do sólido tanto na região de taxa de secagem constante como na região de taxa decrescente.

FIGURA 38 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 0,5 m/s E 1,40 mm

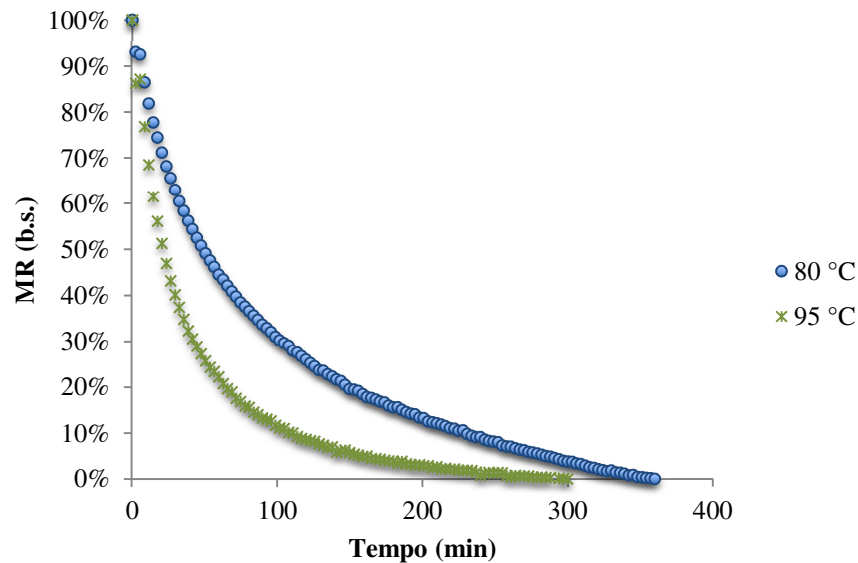


FIGURA 39 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 0,5 m/s E 2,00 mm

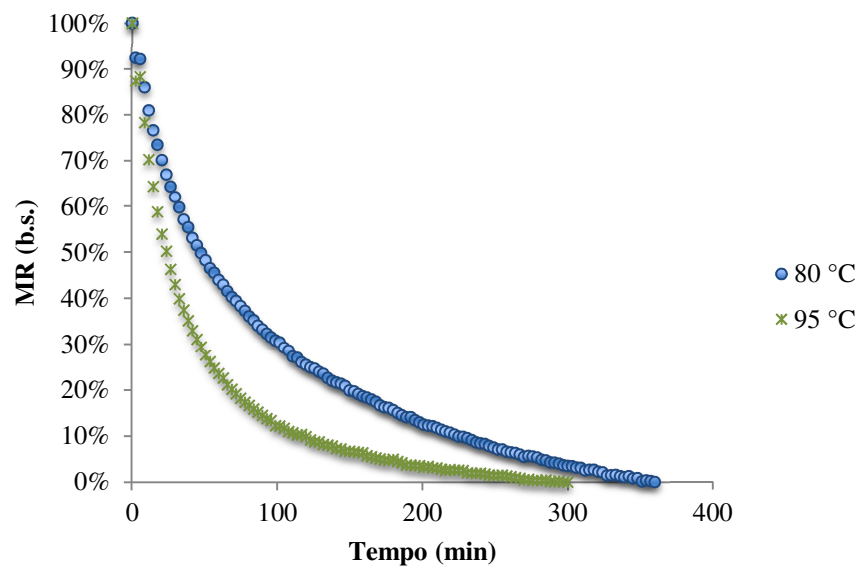


FIGURA 40 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 0,5 m/s E 2,38 mm

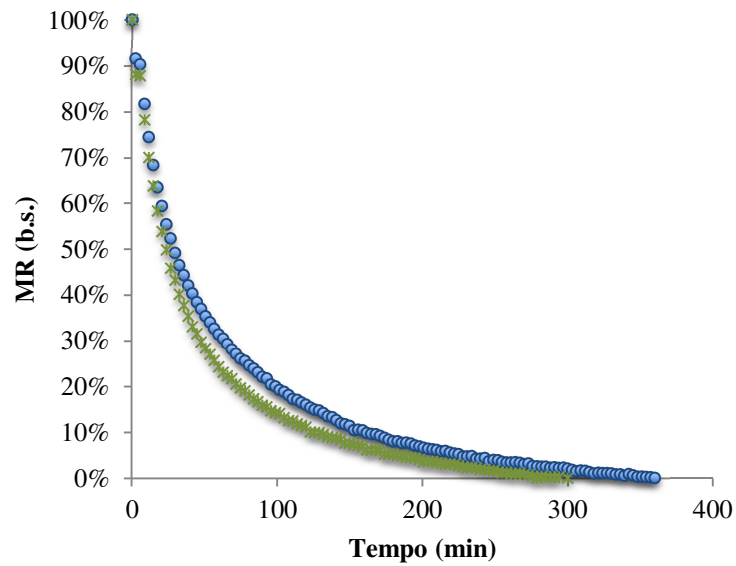


FIGURA 41 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 2,6 m/s E 1,40 mm

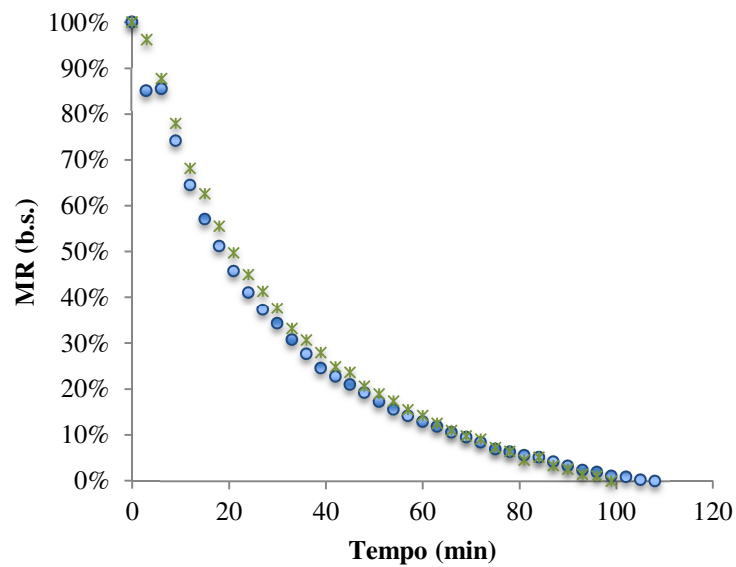


FIGURA 42 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 2,6 m/s E 2,00 mm

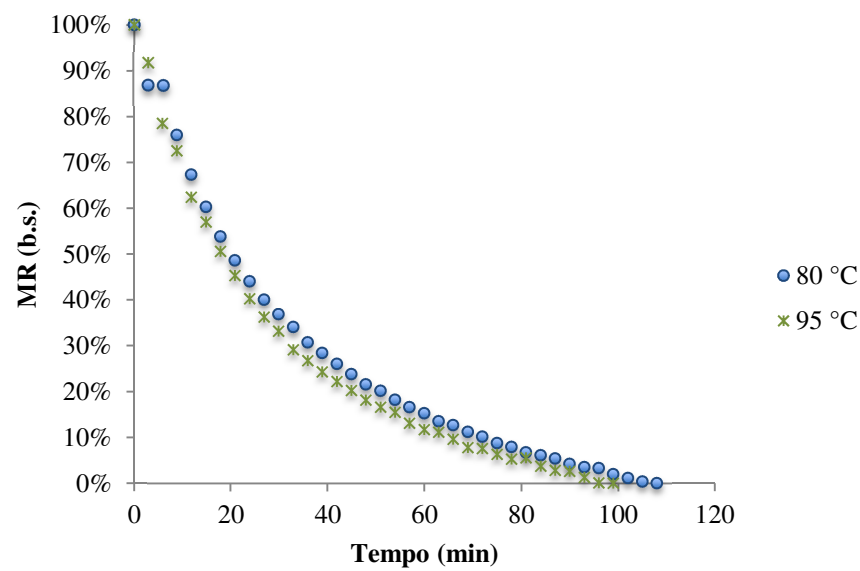
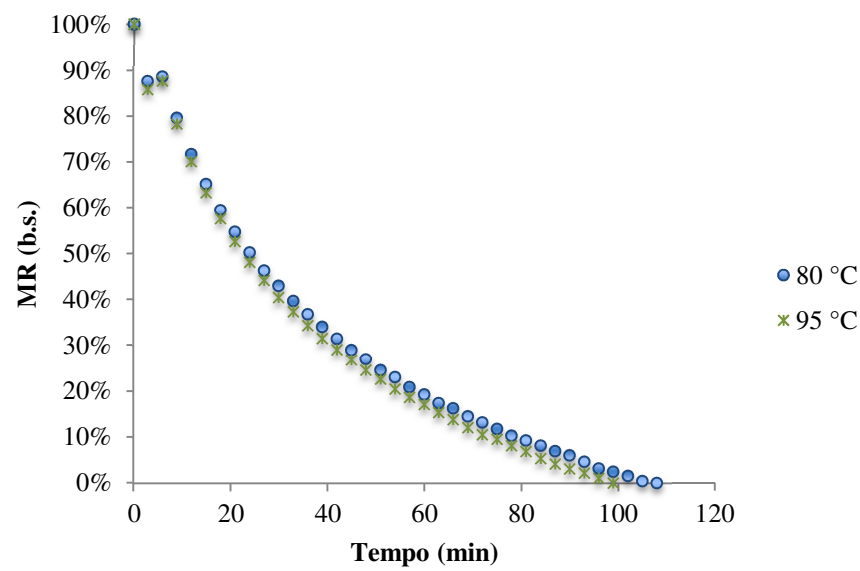


FIGURA 43 - INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A 2,6 m/s E 2,38 mm



Nota-se também que a influência da temperatura foi maior nos ensaios realizados com velocidade do ar mais baixa. Nos ensaios realizados a 0,5 m/s e 2,00 mm, por exemplo, a umidade reduzida em 100 minutos é de 13% quando realizado com temperatura de 95 °C e 30% quando realizado com temperatura de 80 °C. Nos ensaios realizados com o mesmo tamanho de grânulos, porém com velocidade de 2,6 m/s, as umidades reduzidas com 100 minutos decorridos foram de 0% e 3% quando realizados com 95 °C e 80 °C respectivamente. Nos ensaios realizados a 2,6 m/s e 1,40 mm, a influência da temperatura foi praticamente inexistente.

A influência da temperatura aparece nos estudos de secagem de outros grãos em que a secagem é controlada pelo transporte interno da umidade. Resende *et al.* encontrou resultados similares durante a secagem de feijão *adzuki* [32]. Em seu estudo, Resende *et al.* ensaiaram a secagem de feijão *adzuki* em 5 diferentes temperaturas – 30, 40, 50, 60 e 70 °C – e obtiveram menor tempo de secagem conforme a temperatura aumentou.

Silva *et al.* e Souza *et al.* também encontraram resultados semelhantes para a secagem de feijão massacar [19,33]. Silva *et al.* ensaiaram o feijão massacar a 40, 50 e 60 °C e Souza *et al.* ensaiaram a 30, 40 e 60 °C e em todos os casos, quanto maior a temperatura, menor foi o tempo de secagem.

As curvas de secagem obtidas por Arruda [1] para fertilizante super-fosfato simples mostram clara influência da temperatura entre 65°C e 95°C na taxa de secagem. No entanto, a velocidade superficial do ar não exerceu influência entre 1 e 5 m/s. Deve-se observar, no entanto, que o fluxo de ar utilizado foi através do leito de partículas e não paralelo, como no secador de bandejas utilizado neste trabalho. Silvério [12] limitou-se a reproduzir as curvas de Arruda [1] a 80 °C e com velocidade de gás igual a 3 m/s.

5.1.5. Influência da velocidade do ar de secagem

As figuras de 44 a 49 demonstram as curvas de umidade reduzida (b.s.) do MAP em função do tempo, obtidas experimentalmente por meio dos ensaios de secagem no secador de bandejas. Essas curvas estão apresentadas de forma a fixar os parâmetros de temperatura e granulometria, facilitando a análise da influência da velocidade do ar na cinética de secagem.

FIGURA 44 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 80 °C E 2,38 mm

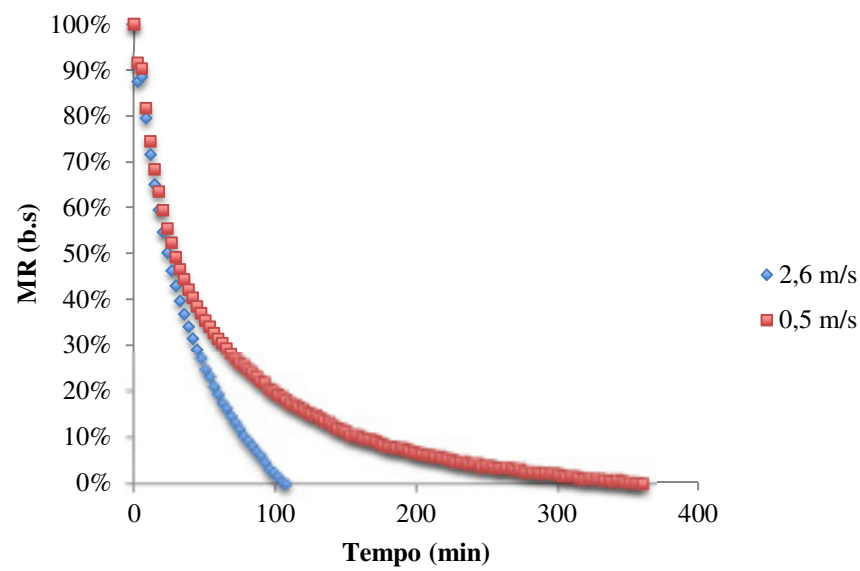


FIGURA 45 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 80 °C E 2,00 mm

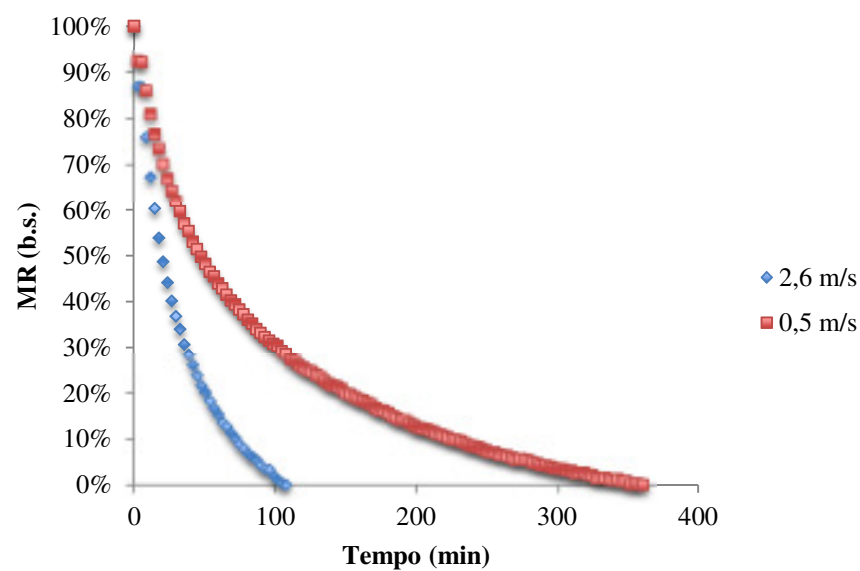


FIGURA 46 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 80 °C E 1,40 mm

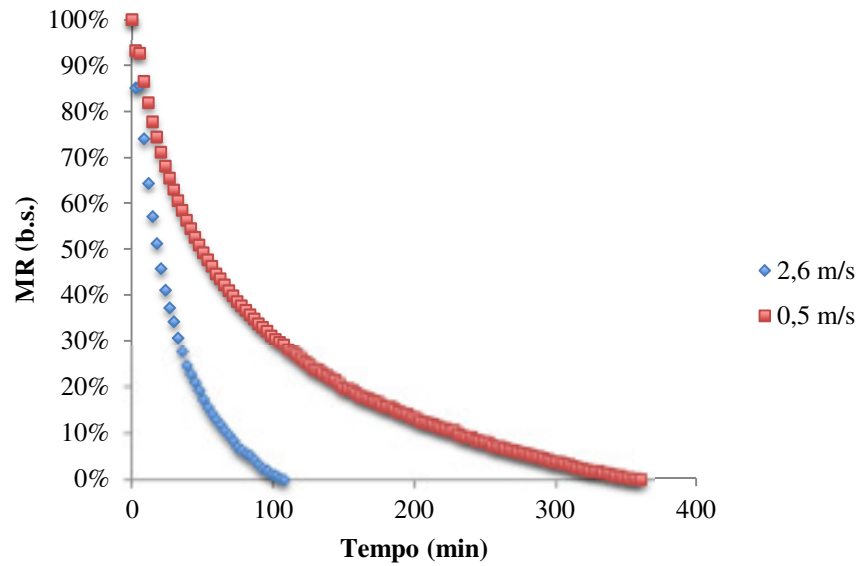


FIGURA 47 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 95 °C E 2,38 mm

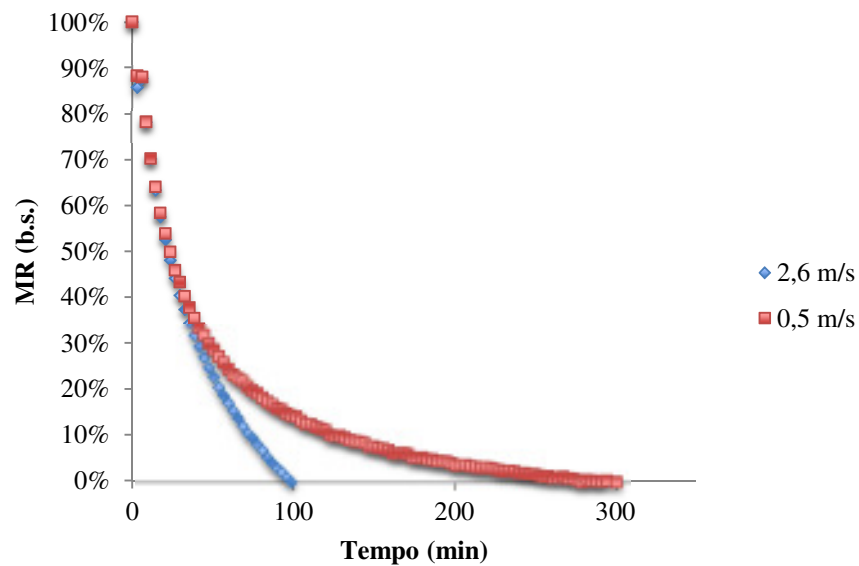


FIGURA 48 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 95 °C E 2,00 mm

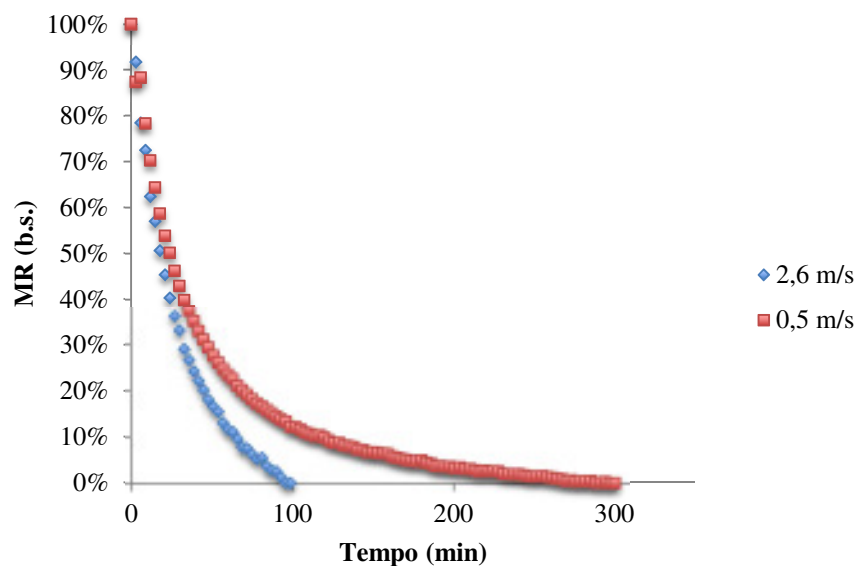
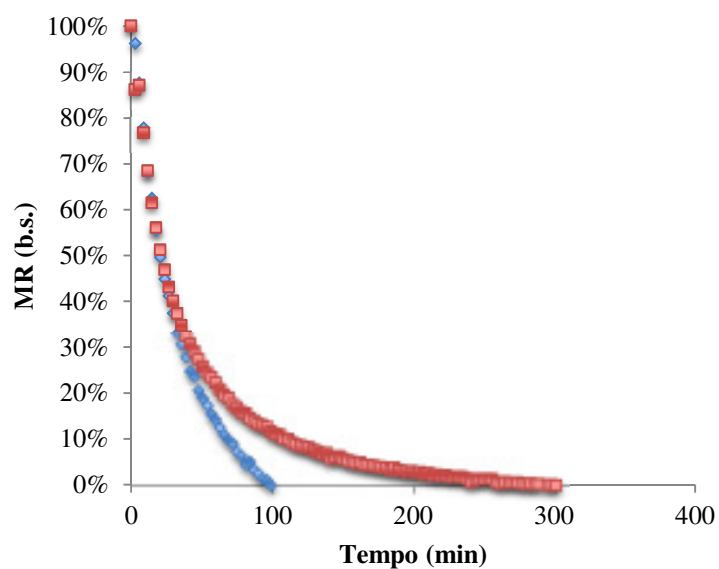


FIGURA 49 - INFLUÊNCIA DA VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM A 95 °C E 1,40 mm



Percebe-se que em todos os gráficos demonstrados, o tempo de secagem do MAP reduziu com o aumento da velocidade do ar de secagem. Porém, percebe-se que nos ensaios a 95 °C, as curvas são sobrepostas no início da secagem, período em que o processo é controlado pelas

condições externas. Quando o processo passa a ser controlado pela difusão, não deveria mais existir influência significativa da velocidade do ar, variável que afeta as condições externas. Uma hipótese que pode explicar o comportamento dessas curvas é o arraste de partículas finas pela corrente de ar. As velocidades mais altas do ar favoreceriam esse arraste de finos, que acabam sendo contabilizados como perda de umidade. Como no início do processo a superfície do material é úmida, esse efeito não aparece, Nas curvas a 80°C, esse efeito de arraste de finos também parece ser o responsável pelas grandes diferenças. Porém, observa-se também uma pequena diferença de inclinação das curvas no trecho de velocidade constante. Essa inclinação diferente pode sim indicar alguma influência da velocidade do ar na taxa de secagem.

5.2. AJUSTE DOS MODELOS MATEMÁTICOS

5.2.1. Modelo da difusão de Fick

As tabelas 7 a 9 demonstram os resultados de difusividade, coeficiente de determinação e chi quadrado para cada ensaio realizado aplicando-se o modelo de Fick com 1, 2 e 3 termos respectivamente. Analisando os valores de R^2 e chi quadrado, nota-se que quanto maior o número de termos utilizados na equação de Fick, melhor foi o ajuste, pois o coeficiente de determinação ficou mais próximo de 1 e o valor de chi quadrado ficou mais próximo de 0.

TABELA 7 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS E DIFUSIVIDADE PARA A APLICAÇÃO DA LEI DE FICK COM 1 TERMO

r (m)	Parâmetros				R^2	χ^2
	D (m ² /s)	T (°C)	v (m/s)	Granulometria (mm)		
0,000850	1,2E-11	80	0,5	1,40	0,5616	4,6336
0,001095	2,4E-11	80	0,5	2,00	0,6182	9,0904
0,001435	4,6E-11	80	0,5	2,38	0,5702	2,1115
0,000850	2,1E-11	95	0,5	1,40	0,5564	1,0353
0,001095	3,4E-11	95	0,5	2,00	0,5454	1,4513
0,001435	6,0E-11	95	0,5	2,38	0,5604	2,1042
0,000850	4,2E-11	80	2,6	1,40	0,4944	2,1624
0,001095	6,3E-11	80	2,6	2,00	0,5055	2,3508
0,001435	8,9E-11	80	2,6	2,38	0,4825	2,3097
0,000850	4,9E-11	95	2,6	1,40	0,5945	5,1951
0,001095	5,5E-11	95	2,6	2,00	0,4064	1,2327
0,001435	1,3E-10	95	2,6	2,38	0,6726	5,7301

TABELA 8 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS E DIFUSIVIDADE PARA A APLICAÇÃO DA LEI DE FICK COM 2 TERMOS

r (m)	Parâmetros				R ²	χ^2
	D (m ² /s)	T (°C)	v (m/s)	Granulometria (mm)		
0,000850	1,2E-11	80	0,5	1,40	0,6805	3,3824
0,001095	2,4E-11	80	0,5	2,00	0,7237	7,8708
0,001435	4,6E-11	80	0,5	2,38	0,7118	1,3191
0,000850	2,1E-11	95	0,5	1,40	0,7072	0,4397
0,001095	3,4E-11	95	0,5	2,00	0,6868	0,7916
0,001435	6,0E-11	95	0,5	2,38	0,6985	1,4364
0,000850	4,2E-11	80	2,6	1,40	0,5950	1,5879
0,001095	6,3E-11	80	2,6	2,00	0,6034	1,7268
0,001435	9,9E-11	80	2,6	2,38	0,6286	2,3410
0,000850	4,9E-11	95	2,6	1,40	0,6689	4,5271
0,001095	5,5E-11	95	2,6	2,00	0,5270	0,6750
0,001435	1,3E-10	95	2,6	2,38	0,7501	5,0894

TABELA 9 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS E DIFUSIVIDADE PARA A APLICAÇÃO DA LEI DE FICK COM 3 TERMOS

r (m)	Parâmetros				R ²	χ^2
	D (m ² /s)	T (°C)	v (m/s)	Granulometria (mm)		
0,000850	1,2E-11	80	0,5	1,40	0,7187	3,2106
0,001095	2,4E-11	80	0,5	2,00	0,7579	7,7104
0,001435	4,6E-11	80	0,5	2,38	0,7554	1,1946
0,000850	2,1E-11	95	0,5	1,40	0,7540	0,3428
0,001095	3,4E-11	95	0,5	2,00	0,7310	0,6875
0,001435	6,0E-11	95	0,5	2,38	0,7420	1,3321
0,000850	4,2E-11	80	2,6	1,40	0,6338	1,5084
0,001095	6,3E-11	80	2,6	2,00	0,6415	1,6408
0,001435	7,0E-11	80	2,6	2,38	0,5289	0,8568
0,000850	4,9E-11	95	2,6	1,40	0,7003	4,4390
0,001095	7,1E-11	95	2,6	2,00	0,6429	1,4450
0,001435	1,3E-10	95	2,6	2,38	0,7832	5,0095

O modelo com 3 termos demonstrou coeficiente de determinação em torno de 0,6991 e chi quadrado igual a 2,4481. Os gráficos de umidade reduzida em função do tempo apresentados nas figuras 50 a 61 demonstram os valores observados (experimentais) comparando-os com os valores previstos pela equação de Fick de 3 termos.

O ensaio com temperatura de 95 °C, 2,6 m/s e granulometria de 2,38 mm foi o que demonstrou coeficiente de determinação mais próximo de 1, em contrapartida, foi o ensaio que apresentou o segundo maior valor de chi quadrado (5,0095) o que reflete em pouca aderência dos dados experimentais ao modelo de Fick (Figura 61).

FIGURA 50 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm

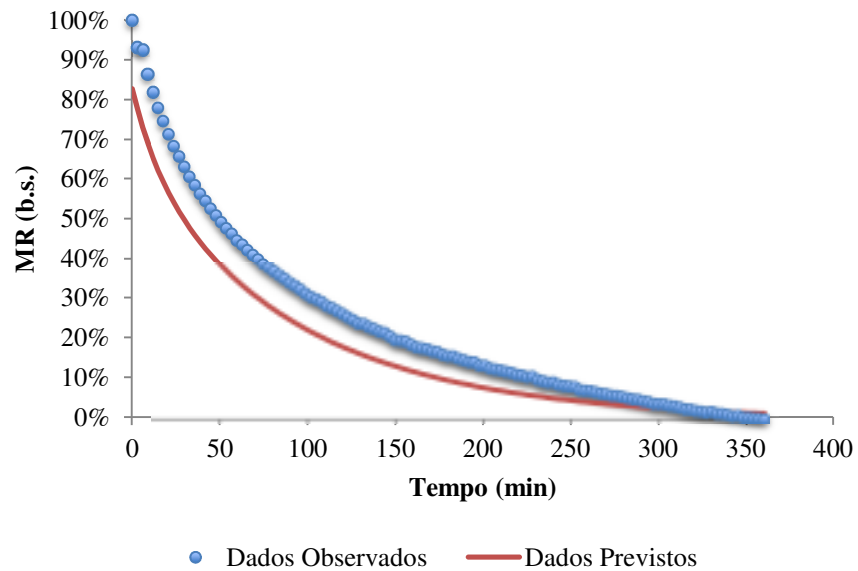


FIGURA 51 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm

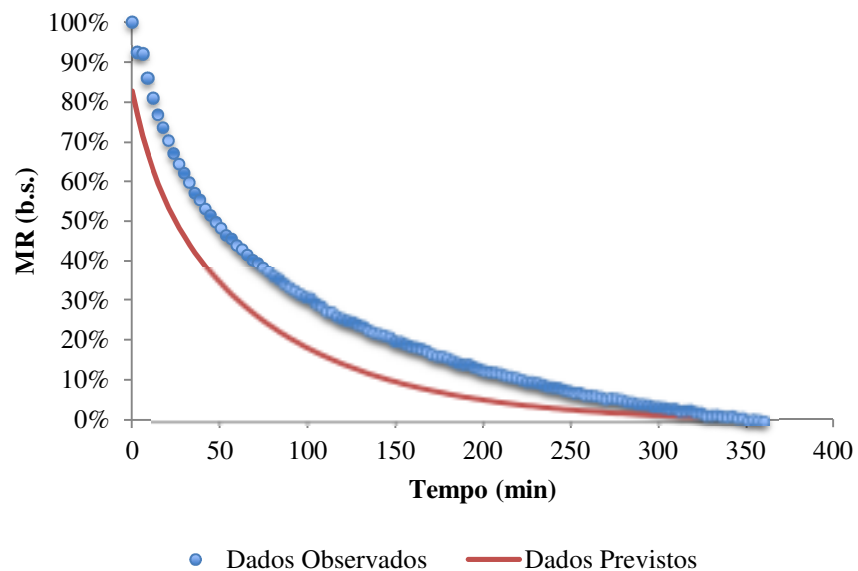


FIGURA 52 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm

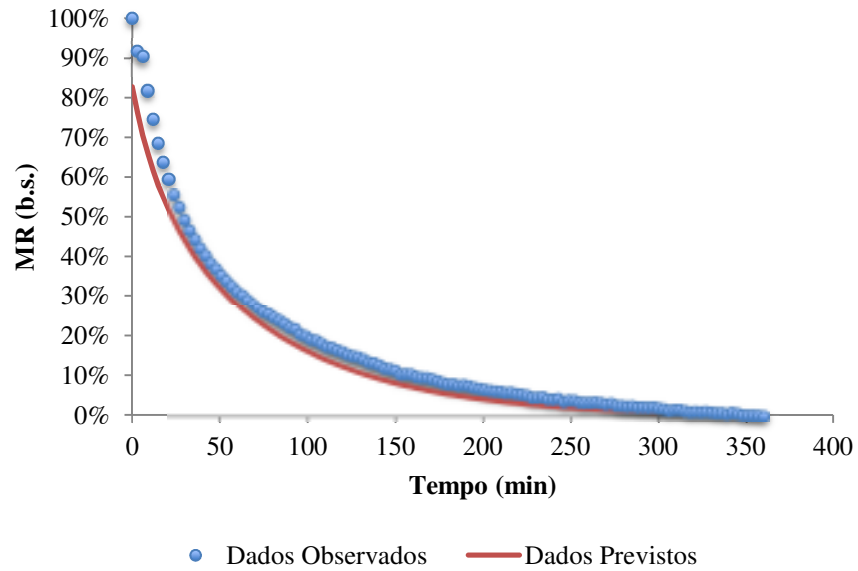


FIGURA 53 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm

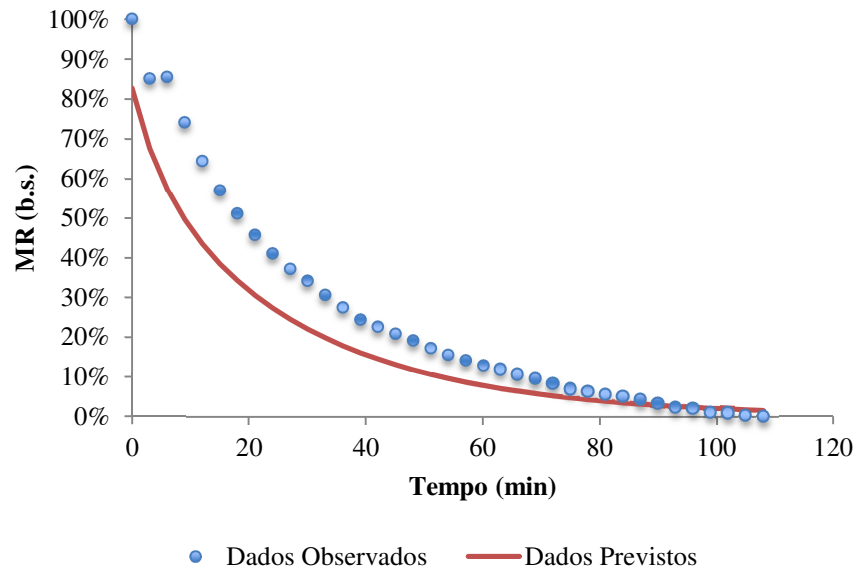


FIGURA 54 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm

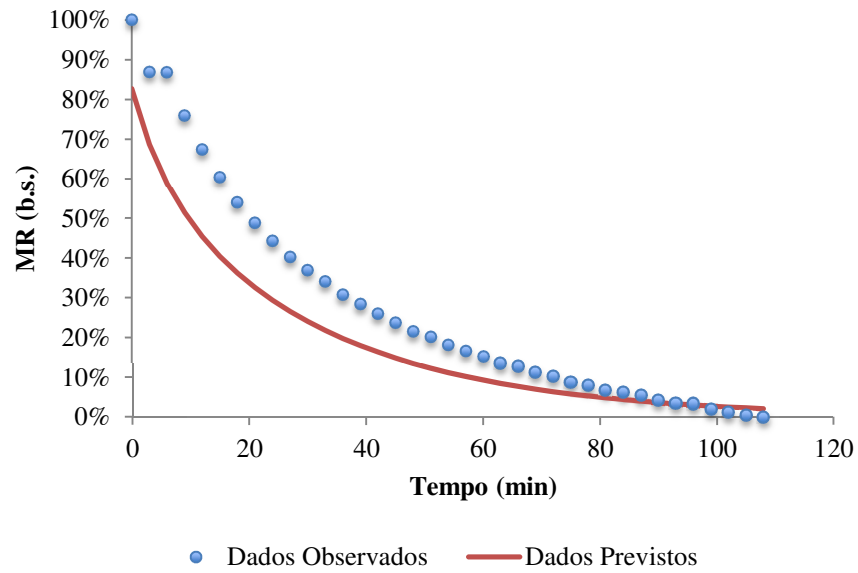


FIGURA 55 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 80 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm

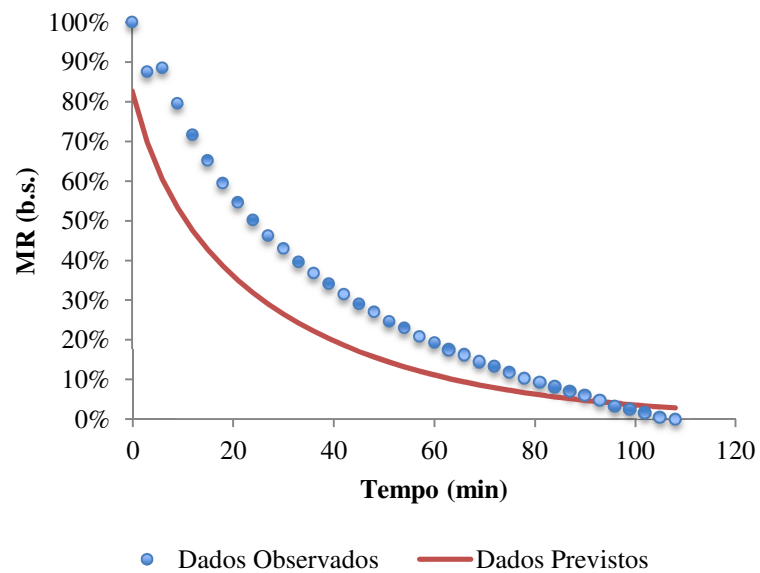


FIGURA 56 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 0,5 m/s E 1,40 mm

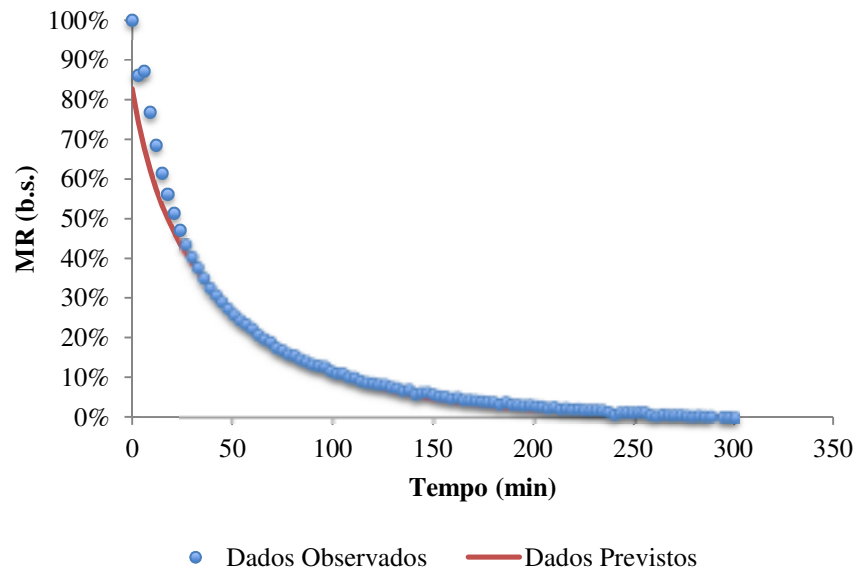


FIGURA 57 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 0,5 m/s E 2,00 mm

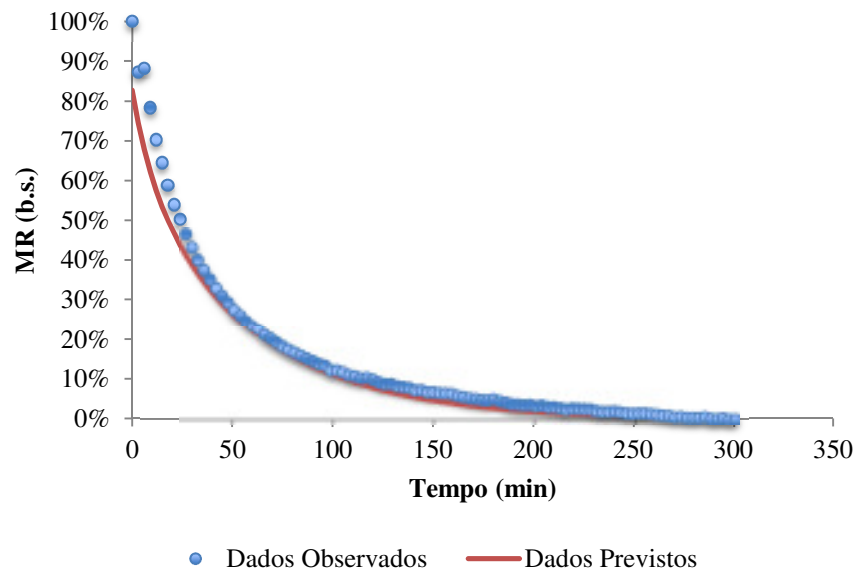


FIGURA 58 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 0,5 m/s E 2,38 mm

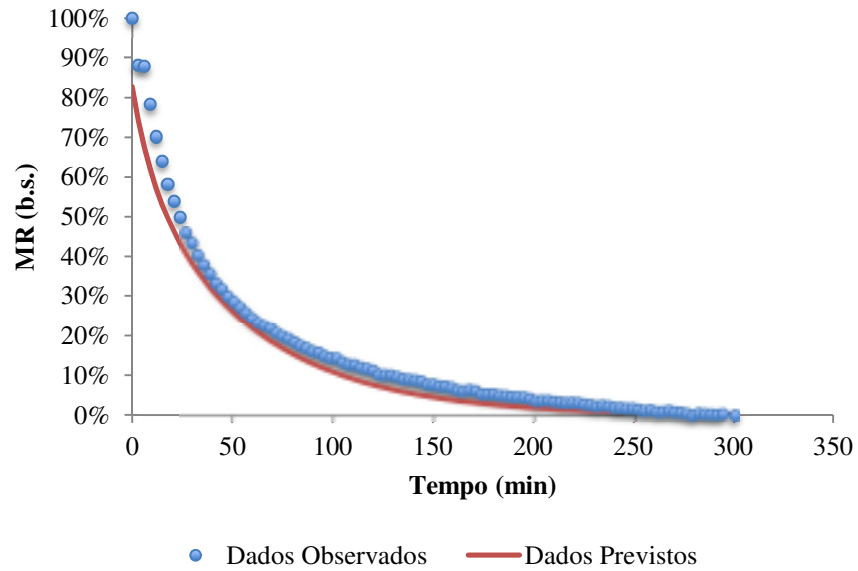


FIGURA 59 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 2,6 m/s E 1,40 mm

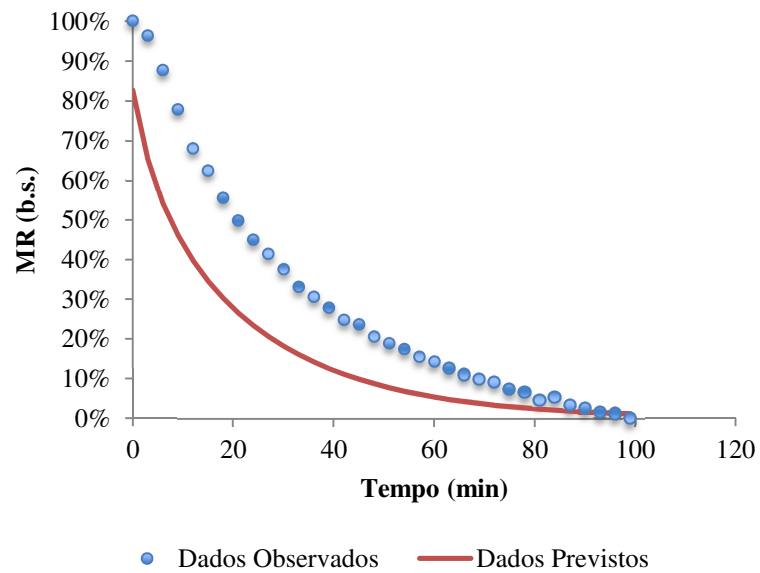


FIGURA 60 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 2,6 m/s E 2,00 mm

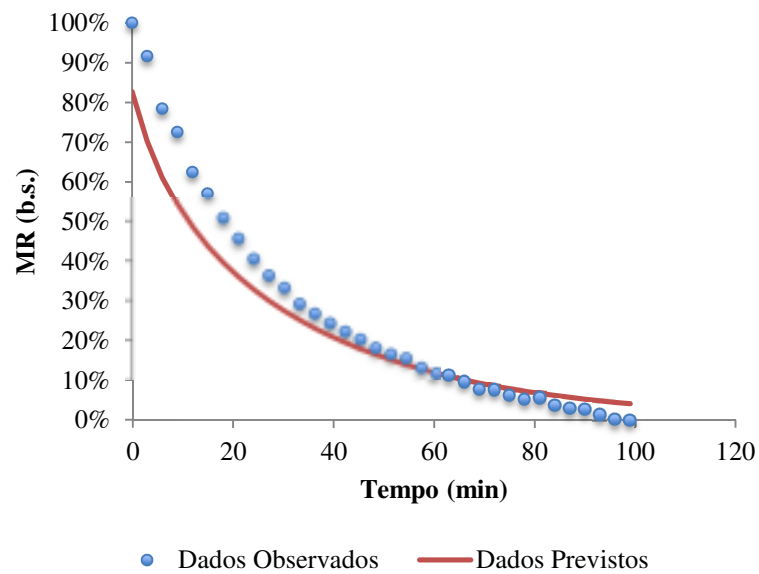
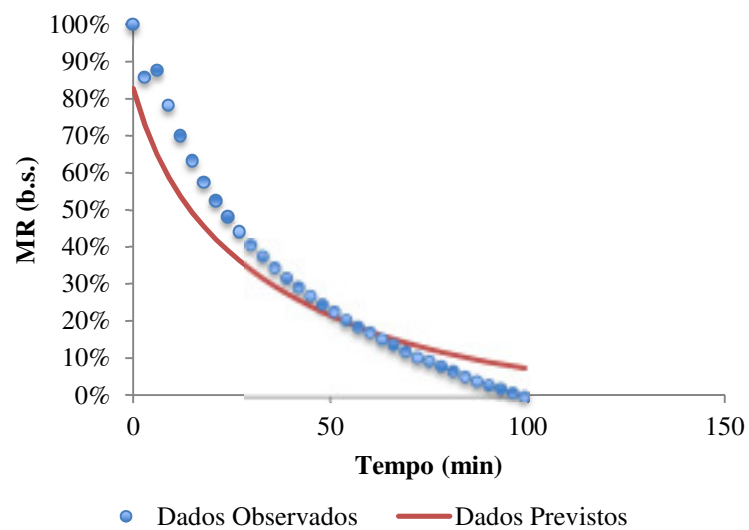


FIGURA 61 - MODELO DE FICK COM 3 TERMOS A 95 °C, 2,6 m/s E 2,38 mm



De maneira geral, observa-se que o modelo de Fick não se ajusta ao período inicial das curvas de secagem, em que as condições externas controlam o processo. Um melhor ajuste poderia

ter sido obtido caso a secagem fosse dividida em dois períodos e a lei de Fick fosse aplicada apenas no período de taxa decrescente.

A figura 55 demonstra o pior ajuste do modelo de Fick com 3 parâmetros, com coeficiente de determinação igual a 0,5289 e chi quadrado igual a 0,8568.

A tabela 10 demonstra o valor da difusividade efetiva obtida em função do tamanho dos grãos de MAP, da temperatura e da velocidade do ar de secagem.

TABELA 10 – VARIAÇÃO DA DIFUSIVIDADE EFETIVA DE ACORDO COM OS PARÂMETROS DE SECAGEM

T (°C)	v (m/s)	Granulometria (mm)	D (m ² /s)
80	0,5	1,40	1,2E-11
		2,00	2,4E-11
		2,38	4,6E-11
	2,6	1,40	4,2E-11
		2,00	6,3E-11
		2,38	7,0E-11
95	0,5	1,40	2,1E-11
		2,00	3,4E-11
		2,38	6,0E-11
	2,6	1,40	4,9E-11
		2,00	7,1E-11
		2,38	1,3E-10

Com base nesta tabela, pode-se notar que quanto maior é a temperatura e a velocidade do ar de secagem, maior é a difusividade efetiva.

O efeito da temperatura sobre o transporte interno da umidade já era esperado e apareceu nos valores da difusividade efetiva calculados na tabela 10. O efeito da velocidade do ar, que não deveria exercer influência significativa nas condições internas, também apareceu. Conforme já discutido anteriormente, o arraste de partículas finas pelo ar pode ser o responsável por esse aparente efeito que, do ponto de vista teórico, não se explica.

5.2.2. Modelos empíricos e semi-empíricos

As constantes dos modelos adotadas em cada ensaio, assim como os parâmetros de temperatura, velocidade do ar, granulometria, coeficiente de determinação e chi quadrado, estão explicitados na tabela 11.

O modelo de Page Modificado foi o que representou pior os dados experimentais, obtendo coeficiente de determinação em torno de 0,970 e chi quadrado em torno de 0,275.

O modelo de Page, embora tenha apresentado valores do coeficiente de determinação mais próximos de 1, apresentou os valores de chi quadrado elevados, o que demonstra que o modelo não representa bem os dados experimentais.

Quanto aos demais, o modelo que melhor representou os dados experimentais de secagem do MAP foi o Dois Termos, com coeficiente de determinação em torno de 0,992 e chi quadrado em torno de 0,109.

Os gráficos das figuras 62 a 65 demonstram os valores previstos pelo modelo Dois Termos comparados com valores obtidos experimentalmente para cada ensaio.

TABELA 11 - RESULTADOS ESTATÍSTICOS DOS MODELOS DE SECAGEM

Nome do Modelo	Constantes do Modelo				Parâmetros			R ²	χ ²				
					T (°C)	v (m/s)	Granulometria (mm)						
Page	k=	0,32178344	n=	0,48267516	80	0,5	1,40	1,089	8,65E+19				
	k=	0,79449567	n=	0,22297287	80	0,5	2,00	1,079	2,01E+23				
	k=	0,34988274	n=	0,09819356	80	0,5	2,38	1,000	474,591				
	k=	0,07200000	n=	0,59808100	95	0,5	1,40	0,951	240,352				
	k=	0,20235000	n=	0,19825800	95	0,5	2,00	0,964	188,618				
	k=	0,23987200	n=	0,19150200	95	0,5	2,38	0,950	777,511				
	k=	0,10956934	n=	0,32757833	80	2,6	1,40	1,000	0,089				
	k=	0,21640480	n=	0,15148336	80	2,6	2,00	0,986	0,102				
	k=	0,20416904	n=	0,14291833	80	2,6	2,38	0,950	0,174				
	k=	0,21702977	n=	0,15192084	95	2,6	1,40	0,896	0,128				
	k=	0,00100000	n=	40,00000000	95	2,6	2,00	0,993	0,171				
k=	0,19628428	n=	0,15504997	95	2,6	2,38	0,951	0,163					
Page Modificado	k=	0,01239374	n=	0,82232957	80	0,5	1,40	0,978	0,401				
	k=	0,01267589	n=	0,81171744	80	0,5	2,00	0,977	0,410				
	k=	0,01945129	n=	0,75341192	80	0,5	2,38	0,971	0,149				
	k=	0,02752634	n=	0,78238746	95	0,5	1,40	0,984	0,133				
	k=	0,02544255	n=	0,79181180	95	0,5	2,00	0,985	0,158				
	k=	0,02483899	n=	0,76471391	95	0,5	2,38	0,975	0,169				
	k=	0,03573754	n=	0,99998273	80	2,6	1,40	1,000	0,089				
	k=	0,03277308	n=	1,00127087	80	2,6	2,00	0,988	0,101				
	k=	0,02844367	n=	1,05251070	80	2,6	2,38	1,000	0,148				
	k=	0,03208037	n=	1,04442637	95	2,6	1,40	0,935	0,110				
	k=	0,02797520	n=	0,81942135	95	2,6	2,00	0,861	1,293				
k=	0,03020626	n=	1,04248952	95	2,6	2,38	0,993	0,137					
Dois Termos	a=	0,77472686	b=	0,23422501	k0=	0,00921709	k1=	0,05661753	80	0,5	1,40	0,981	0,303
	a=	0,76921886	b=	0,23945680	k0=	0,00928311	k1=	0,06123132	80	0,5	2,00	0,979	0,290
	a=	0,56935284	b=	0,45258494	k0=	0,01080606	k1=	0,05450310	80	0,5	2,38	0,992	0,093
	a=	0,50829955	b=	0,51443217	k0=	0,01482761	k1=	0,06197666	95	0,5	1,40	1,000	0,062
	a=	0,50864795	b=	0,51461630	k0=	0,01390627	k1=	0,05613495	95	0,5	2,00	1,000	0,077
	a=	0,47490104	b=	0,53813850	k0=	0,01254428	k1=	0,05293586	95	0,5	2,38	0,991	0,135
	a=	-0,00000688	b=	0,98827917	k0=	-0,07627422	k1=	0,03509934	80	2,6	1,40	1,000	0,016
	a=	-0,03045019	b=	1,01993676	k0=	0,00575854	k1=	0,03082497	80	2,6	2,00	0,996	0,070
	a=	9,24893742	b=	-8,28981717	k0=	0,04192413	k1=	0,04449523	80	2,6	2,38	1,000	0,125
	a=	0,80704875	b=	0,23010588	k0=	0,03380282	k1=	0,03380201	95	2,6	1,40	0,965	0,113
	a=	-0,00000225	b=	0,99050298	k0=	-0,09610419	k1=	0,03625135	95	2,6	2,00	1,000	0,015
a=	-0,00030610	b=	0,99050291	k0=	-0,05330109	k1=	0,02916873	95	2,6	2,38	1,000	0,005	
Midilli et al.	a=	0,90899458	b=	0,00002654	k=	0,01078219	n=	-0,00008587	80	0,5	1,40	0,998	0,429
	a=	0,89999572	b=	0,00002405	k=	0,01083418	n=	-0,00008587	80	0,5	2,00	0,997	0,403
	a=	0,89656763	b=	0,00007548	k=	0,01652424	n=	-0,00008587	80	0,5	2,38	0,999	0,718
	a=	0,92189990	b=	0,00008210	k=	0,02440070	n=	-0,00008616	95	0,5	1,40	1,000	0,696
	a=	0,92861345	b=	0,00008983	k=	0,02294110	n=	-0,00008616	95	0,5	2,00	1,000	0,668
	a=	0,91353062	b=	0,00009521	k=	0,02177164	n=	-0,00008587	95	0,5	2,38	1,000	0,789
	a=	0,98811907	b=	-0,00009550	k=	0,03474310	n=	-0,00008616	80	2,6	1,40	0,999	0,058
	a=	0,98957253	b=	-0,00015477	k=	0,03156042	n=	-0,00008616	80	2,6	2,00	0,999	0,056
	a=	0,95859956	b=	-0,00073563	k=	0,02404430	n=	-0,00008616	80	2,6	2,38	1,000	0,000
	a=	0,97388709	b=	-0,00053541	k=	0,02802118	n=	-0,00008616	95	2,6	1,40	0,929	0,056
	a=	0,94260207	b=	0,00015831	k=	0,02611226	n=	-0,00008616	95	2,6	2,00	0,900	1,170
a=	0,98160730	b=	-0,00050216	k=	0,02747369	n=	-0,00008616	95	2,6	2,38	0,998	0,040	
Verma et al.	a=	0,77265674	k=	0,00920421	g=	0,05395247			80	0,5	1,40	0,976	0,332
	a=	0,76761382	k=	0,00927288	g=	0,05863966			80	0,5	2,00	0,975	0,291
	a=	0,55802708	k=	0,01069563	g=	0,05037636			80	0,5	2,38	0,978	0,099
	a=	0,43089613	k=	0,01361915	g=	0,05086231			95	0,5	1,40	0,988	0,082
	a=	0,13190429	k=	0,00578655	g=	0,03147824			95	0,5	2,00	1,000	0,437
	a=	0,55318222	k=	0,07618180	g=	0,06245010			95	0,5	2,38	0,975	0,106
	a=	1,00004479	k=	0,03577275	g=	0,00044388			80	2,6	1,40	1,000	0,089
	a=	-0,00749802	k=	0,00089332	g=	0,03214642			80	2,6	2,00	1,000	0,084
	a=	-0,00000701	k=	-0,08437977	g=	0,02809904			80	2,6	2,38	1,000	0,002
	a=	-35,74610770	k=	0,02408827	g=	0,02427268			95	2,6	1,40	0,930	0,097
	a=	0,28305163	k=	0,09154574	g=	0,01966029			95	2,6	2,00	0,856	1,339
a=	1,00003090	k=	0,02992061	g=	-0,07503056			95	2,6	2,38	1,000	0,020	

FIGURA 62 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA E CALCULADA A 80 °C E 0,5 m/s

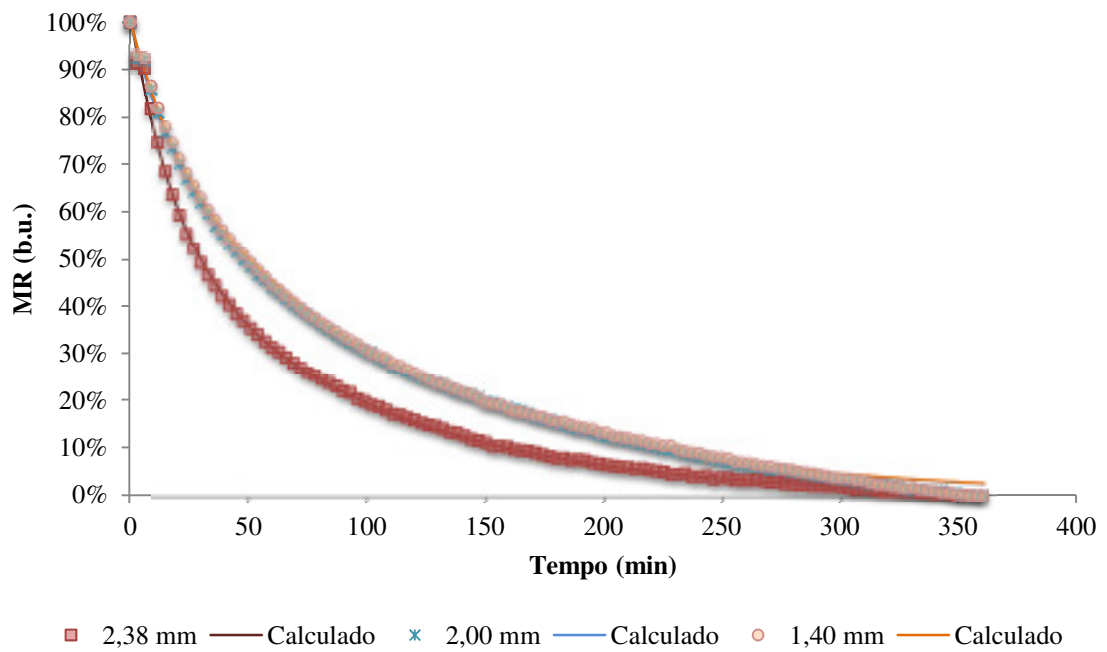


FIGURA 63 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA E CALCULADA A 95 °C E 0,5 m/s

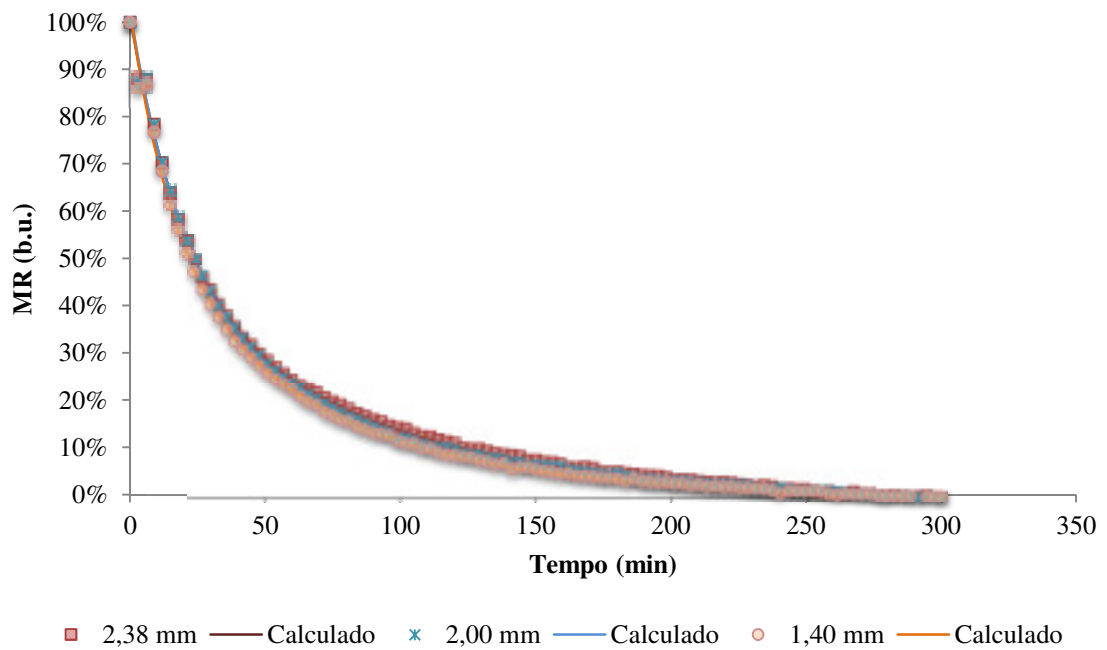


FIGURA 64 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA E CALCULADA A 80 °C E 2,6 m/s

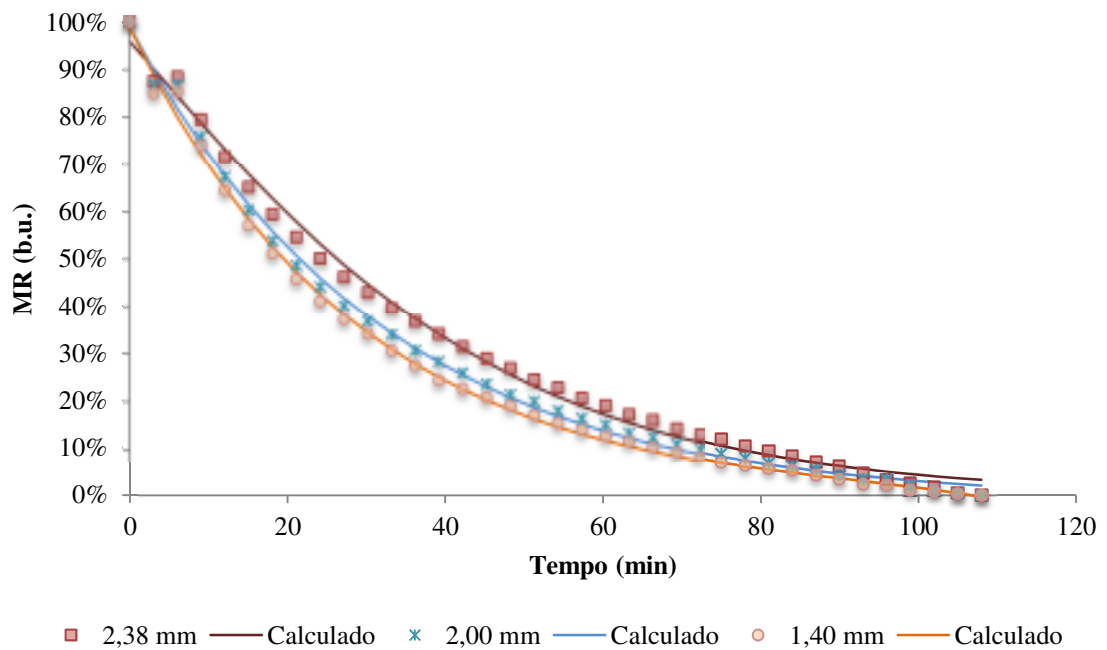
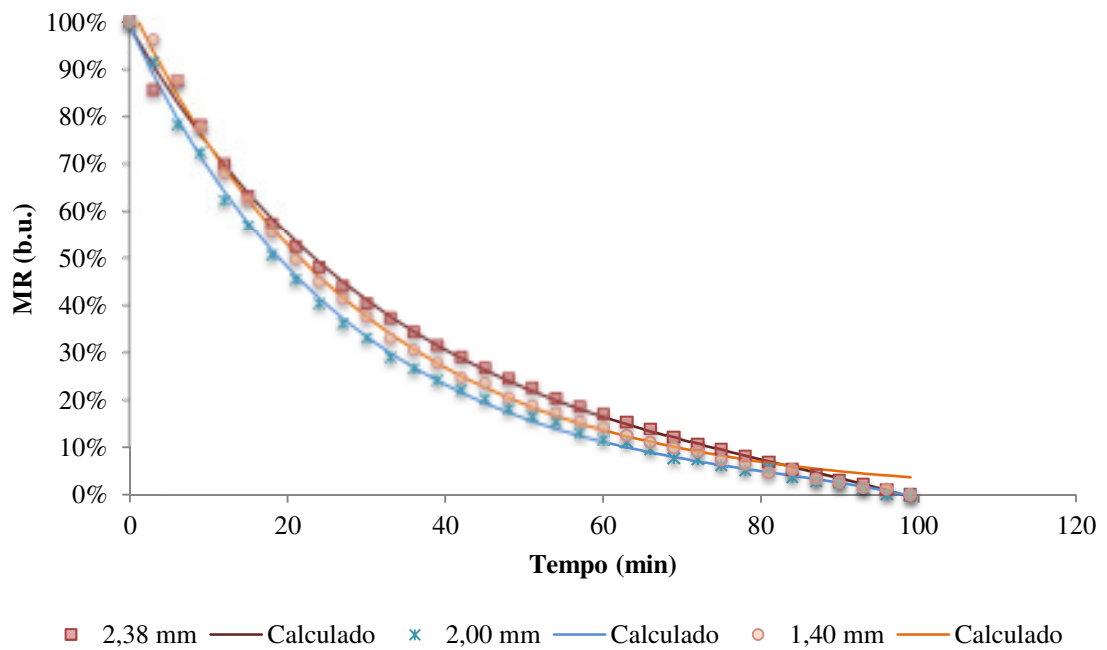


FIGURA 65 - UMIDADE REDUZIDA OBSERVADA E CALCULADA A 95 °C E 2,6 m/s



6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

6.1. CONCLUSÕES

Após realizar os ensaios de secagem do fertilizante MAP foi possível contribuir para uma análise mais detalhada da secagem do MAP, detalhando melhor como este material se comporta diante de diferentes condições de temperatura, velocidade do ar e faixas de granulometria.

Com a determinação das curvas de secagem e aplicação dos 8 modelos de cinética de secagem, é possível observar que em todas as curvas houve a representação da taxa de secagem constante e decrescente.

A influência do tamanho dos grânulos não é bem definida. Em alguns ensaios os grânulos maiores secaram mais rapidamente, em outros não. A influência do fator porosidade deve ser melhor investigada.

A temperatura do ar de secagem exerceu influência significativa apenas nos ensaios realizados a 0,5 m/s, nos ensaios realizados com velocidade do ar igual a 2,6 m/s esta influência é pequena. Em todos os casos, com exceção dos ensaios realizados a 2,6 m/s e 1,40 mm, quanto maior a temperatura do ar, menor é o tempo de secagem do fertilizante. Este fenômeno deve ser melhor investigado em estudos futuros.

Já a velocidade do ar de secagem exerceu influência notória em todas as condições ensaiadas. Quanto maior a velocidade do ar, menor foi o tempo de secagem. A influência da velocidade do ar de secagem pôde ser constatada também na análise do decréscimo da umidade no período de taxa de secagem constante e no valor da umidade crítica de cada ensaio realizado (p. 52).

Ficou evidente que a difusividade aumenta conforme a temperatura e a velocidade do ar de secagem aumentam. Isto pode ser constatado nos dados demonstrados na tabela 10 (p. 71). Altas temperaturas e grandes velocidades de escoamento do ar de secagem contribuem para que haja um rápido movimento da água contida nos sólidos, isto explicaria este aumento da difusividade.

De uma forma geral, a equação da lei de Fick da difusão não se adequa bem aos resultados experimentais de secagem do MAP, pois não ocorre apenas o processo de difusão. Isto pode ser evidenciado nas curvas de secagem, que apresentam os períodos de taxa de secagem constante e decrescente.

O modelo de Page Modificado foi o que pior se ajustou aos dados experimentais de umidade reduzida do fertilizante MAP e o modelo de Page, embora tenha apresentado coeficiente de determinação próximo de 1, apresentou o valor de chi quadrado muito elevado, demonstrando baixa aderência aos dados experimentais.

Dentre os modelos avaliados, o que melhor se ajustou aos dados experimentais foi o Dois Termos. O coeficiente de determinação para este modelo foi em torno 0,992 e chi quadrado em torno de 0,109. Os valores dos parâmetros ajustados na regressão linear para cada ensaio podem ser consultados na Tabela 11, p. 73, caso se deseje adotar o modelo para fazer previsões de curvas de secagem.

6.2. RECOMENDAÇÕES PARA ESTUDOS FUTUROS

A seguir constam algumas recomendações atividades para a continuação deste trabalho:

- Realizar ensaios com outros parâmetros de granulometria, velocidade e temperatura do ar;
- Determinar o significado físico dos parâmetros adotados nos modelos de secagem;
- Estudar a relação entre a porosidade do MAP com o comportamento de secagem;
- Verificar o motivo dos ensaios realizados a 2,6 m/s e 1,40 mm terem apresentado comportamento de secagem diferente do esperado.

REFERÊNCIAS

1. ARRUDA, E. B. **Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: Secagem de fertilizantes**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 176. 2008.
2. SILVA, M. G. D. **Análise de sensibilidade paramétrica na modelagem da secagem de fertilizantes em secador rotatório**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 110. 2010.
3. VALE FERTILIZANTES. Nosso Negócio. **Vale Fertilizantes**, 29 Novembro 2012. Disponível em: <<http://www.valefertilizantes.com/valefertilizantes/nosso.asp>>. Acesso em: 29 Novembro 2012.
4. SANTOS, C. T. et al. Cinética e modelagem da secagem de carambola (Averrhoa carambola L.) em secador de bandeja. **Acta Scientiarum. Technology**, Maringá, 32, n. 3, 24 Setembro 2009. 309-313.
5. ANDA. Estatísticas - Planilhas - ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos. **ANDA - Associação Nacional para Difusão de Adubos**. Disponível em: <<http://www.anda.org.br/index.php?mpg=03.01.00&ver=por>>. Acesso em: 2 Abril 2013.
6. AGROLINK. Tipos de Fertilizantes. **Agrolink**. Disponível em: <<http://www.agrolink.com.br/fertilizantes/FormulacaodeAdubos.aspx>>. Acesso em: 3 Abril 2013.
7. CARDOSO, M. L. Fertilizantes. **InfoEscola Navegando e Aprendendo**. Disponível em: <<http://www.infoescola.com/agricultura/fertilizantes/>>. Acesso em: 3 Abril 2013.
8. LATIMER, J. G. The basics of fertilizer calculations for greenhouse crops. **Virginia Cooperative Extension**, Burruss Hall, 2009.
9. DIAS, V. P.; FERNANDES, E. Fertilizantes: Uma visão global sintética. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, 24, Setembro 2006. 97 - 138.
10. MACHADO, L. O. **Adubação fosfatada**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 6. 2012.
11. BIXBY, D. W.; RUCKER, D. L.; TISDALE, S. L. **Phosphatic fertilizers properties and processes a study of technological, economic and agronomic considerations**. Washington: The Sulphur Institute, 1966.
12. MUJUMDAR, A. S. **Handbook of industrial drying - Second edition revised and expanded - Volume 1**. Segunda edição. ed. New York: Marcel Dekker, Inc., v. 1, 1995. 742 p. ISBN ISBN 0-8247-8996-2.
13. PARK, K. J. et al. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Primeira edição.

- ed. Campinas: Universidade Estadual de Campinas, 2007. 121 p.
14. SANTOS, G. R. V. D. **Otimização da secagem da madeira de eucalyptus grandis**. Universidade de São Paulo. Piracicaba, p. 70. 2002.
 15. SENADEERA, W. et al. Influence of shapes of selected vegetable materials on drying kinetics during fluidized bed drying. **Journal of Food Engineering**, v. 58, p. 277-283, Setembro 2002.
 16. MARTINAZZO, A. P. et al. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de campim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 11, n. 3, 19 Janeiro 2007. 301-306.
 17. MARQUES, L. F. et al. Secagem precedida de desidratação osmótica de pseudofruto de caju: Comparação entre modelos matemáticos aplicados. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, 29 Novembro 2006. 161-170.
 18. DURAN, A.; HAYALOGLU, A. A.; KARABULUT, I. Thin layer drying characteristics of eriste: A dried cereal product of Turkey. **International Journal of Food Engineering**, v. 4, n. 2, p. 1-11, 2008.
 19. SILVA, W. P. D. et al. Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna uguiculata* (L.) Walp.), variedade de sempre-verde, com base no comportamento da secagem. **Eng. Agríc.**, Jaboticabal, Junho 2008. 325-333.
 20. JÚNIOR, P. C. A.; CORRÊA, P. C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 3, n. 3, p. 349-353, 1999.
 21. RIBEIRO, C. D. F. A. **Processamento de piraíba (brachyplatystoma filamentosum): Desidratação osmótica, defumação e secagem**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 166. 2009.
 22. PAGE, G. E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin layers**. Purdue University. West Lafayette, p. 63. 1949.
 23. RADÜNZ, L. L. et al. Análise da cinética de secagem de folhas de sálvia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, 14, n. 9, 26 Março 2010. 979-986.
 24. DEMIR, V. et al. Mathematical modelling and the determination of some quality parameter of air-dried bay leaves. **Biosystems Engineering**, v. 88, n. 3, p. 325-335, 7 Abril 2004.
 25. ALIBAS, I. Selection of a the best suitable thin-layer drying mathematical model for vacuum dried red chili pepper. **J. Biol. Environ. Sci.**, v. 6, n. 17, p. 161-170, 23 Junho 2012.

26. SILVÉRIO, B. C. **Estudos fluidodinâmicos e de secagem de fertilizantes em secadores rotatórios concorrentes**. Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, p. 100. 2010.
27. MIDILLI, A.; KUCUK, H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. **Energy Conversion and Management**, 7 Maio 2003.
28. SAEED, I. E.; SOPIAN, K.; ABIDIN, Z. Z. Drying characteristics of roselle (1): Mathematical modeling and drying experiments. **Agricultural Engineering International: the CIGR Ejournal**, Bangi, v. 10, n. 8, p. 1-25, 2008.
29. MELONI, P. L. S. **Desidratação de frutas e hortaliças**. Fortaleza, p. 87. 2003.
30. PARK, K. J.; ANTONIO, G. C. **Análises de materiais biológicos**. Universidade Estadual de Campinas. Campinas, p. 21. 2006.
31. BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. [S.l.]: Westport: The AVI Publishing Company, 1992. 450 p. p.
32. RESENDE, O.; FERREIRA, L. U.; ALMEIDA, D. P. Modelagem matemática para descrição da cinética de secagem de feijão adzuki. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v. 12, n. 2, p. 171-178, 2010. ISSN ISSN 1517-8595.
33. SOUZA, J. A. D. et al. Modelos matemáticos para descrição do processo de secagem em camada fina de feijão massacar, p. 1526-1528, 2011.
34. BABALIS, S. J.; BELESSIOTIS, V. G. Influence of the drying conditions on the drying constants and moisture diffusivity during the thin-layer drying of figs. **Journal of Food Engineering**, v. 65, p. 449-458, 2004.
35. DOYMAZ, I.; PALA, M. The thin-layer drying characteristics of corn. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p. 125-130, 2003.