



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA



Contribuição à Modelagem da Secagem em Leito Deslizante Concorrente

Taisa Shimosakai de Lira

Uberlândia
2005



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
EM ENGENHARIA QUÍMICA



Contribuição à Modelagem da Secagem em Leito Deslizante Concorrente

Taisa Shimosakai de Lira

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre em Engenharia Química. Área de Concentração: Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia
2005

Contribuição à Modelagem da Secagem em Leito Deslizante Concorrente

Dissertação de mestrado submetida ao corpo docente do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de mestre em Engenharia Química.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Adilson José de Assis
Orientador - PPG - FEQUI/UFU

Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
Co-orientador - PPG - FEQUI/UFU

Prof^a Dr^a Valéria Viana Murata
PPG - FEQUI/UFU

Prof. Dr. Carlos Alberto Severo Felipe
Pesquisador DCR/CNPq/SECTEC - UEG

Dedicatória

Aos meus pais, Roberto e Kayo, por sempre depositarem confiança e incentivo; por serem amigos, perseverantes, companheiros, batalhadores e exemplos de honestidade e humildade. À eles dedico este trabalho, por serem o motivo maior do meu viver e por darem lições de vida, pois nos vários momentos difíceis que passamos, eles carregaram o fardo pesado com muita dignidade e persistência, mostrando-nos que é preciso lutar e ultrapassar os obstáculos que a vida nos impõe.

Ao Thiago pela constante compreensão, apoio e amor a mim dedicados todos os dias; pelos momentos difíceis que abdicou de minha companhia e com paciência soube esperar por um minuto de atenção. Com carinho, amor e gratidão dedico-lhe este trabalho. Consegui trilhar esse caminho e graças ao seu incentivo alcancei meu objetivo.

Aos meus queridos irmãos Tommaso, Tatiana, Tarita e Tâmara pelo apoio e carinho oferecidos em todos os momentos de minha vida e principalmente neste.

Agradecimentos

Aos Professores Adilson José de Assis e Marcos Antônio de Souza Barrozo pela valiosa orientação, confiança e dedicação durante toda a realização deste trabalho, bem como pela amizade cultivada.

Aos Professores Valéria Viana Murata e Carlos Alberto Severo Felipe pela atenção dispensada e opiniões relevantes na conclusão deste trabalho.

Aos meus amigos Débora, José Gonçalves, Vinícius, Tatyana, Rafaela, Nathália e Cynara pelos momentos de alegria, descontração e serenidade ao longo de nossa amizade.

À todos os professores e funcionários da FEQUI/UFU pelo grande apoio.

À CAPES pela concessão de bolsa de estudo.

À todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

Lista de Figuras	vi
Lista de Tabelas	viii
Lista de Símbolos	ix
Resumo	xii
Abstract	xiii
1 Introdução	1
2 Revisão Bibliográfica	4
2.1 Importância da Secagem da Soja	4
2.2 Métodos de Secagem	7
2.3 Fases da Secagem	7
2.4 Secadores de Leito Deslizante	9
2.5 Perfis Radiais de Porosidade e Velocidade	13
2.5.1 Perfil de Porosidade Radial	13
2.5.2 Perfil de Velocidade Radial	14

2.6	Análise de Sensibilidade de EADs	15
2.7	Planejamento de Experimentos	16
2.8	Conclusões	18
3	Modelo Matemático	19
3.1	Modelo Matemático do Secador Concorrente	19
3.1.1	Transferência Simultânea de Calor e Massa	19
3.1.2	Equações para o Coeficiente de Transferência de Calor, Umidade de Equilíbrio e Cinética de Secagem	22
3.2	Equações para o Perfil Radial de Velocidade	23
3.2.1	Perfil de Porosidade	23
3.2.2	Perfil de Velocidade	24
3.3	Conclusões	27
4	Resultados e Discussão	28
4.1	Estudo do Perfil Radial de Velocidade do Ar	28
4.1.1	Dados Experimentais e Perfis Simulados	28
4.1.2	Efeito do Perfil Radial de Velocidade do Ar no Modelo a Duas Fases	31
4.2	Análise de Sensibilidade de Parâmetros Físico-Químicos	34
4.2.1	Introdução	34
4.2.2	Análise de Sensibilidade por Planejamento de Experimentos	35
4.2.3	Análise de Sensibilidade por DASPK 3.0	39
4.3	Conclusões	43
5	Conclusões e Sugestões	44
5.1	Conclusões	44
5.2	Sugestões	45
	Referências Bibliográficas	46

Apêndices	50
Apêndice A - Rotinas em Scilab das Equações de Velocidade	50
Apêndice B - Descrição do Vetor INFO do DASPK 3.0	57
Apêndice C - Rotinas em FORTRAN da Análise de Sensibilidade	59

LISTA DE FIGURAS

2.1	Curva típica de secagem (PARK et al., 2001).	8
2.2	Configurações do leito deslizante.	10
2.3	Unidade típica de secagem em leito deslizante e escoamentos concorrentes.	12
3.1	Esquema para escoamentos concorrentes em secador de leito deslizante.	20
3.2	Distribuição de porosidade radial.	23
4.1	Perfis radiais de velocidade experimental e simulados (equações de Vortmeyer e Schuster (1983) e de Fahien e Stankovich (1979)).	29
4.2	Perfis radiais de velocidade experimental e simulados (equações de Johnson e Kapner (1990) e de Fahien e Stankovich (1979)).	30
4.3	Esquema do leito deslizante concorrente dividido em camadas concêntricas.	31
4.4	Perfis axiais de temperatura do ar (condições operacionais: $v_{int} = 2,0$ m/s, $T_{f0} = 37,0$ °C, $T_{s0} = 22,4$ °C, $\bar{M}_0 = 0,1581$ Kg água/Kg sol. seco, $W_0 = 0,0030$ Kg água/Kg ar seco, $G_f = 8,8210 \times 10^{-1}$ Kg/m ² s, $G_s = 2,1075 \times 10^{-1}$ Kg/m ² s).	32
4.5	Perfis axiais de umidade das sementes (condições operacionais: $v_{int} = 2,0$ m/s, $T_{f0} = 37,0$ °C, $T_{s0} = 22,4$ °C, $\bar{M}_0 = 0,1581$ Kg água/Kg sol. seco, $W_0 = 0,0030$ Kg água/Kg ar seco, $G_f = 8,8210 \times 10^{-1}$ Kg/m ² s, $G_s = 2,1075 \times 10^{-1}$ Kg/m ² s).	33

4.6	Perfis radiais de temperatura do ar simulados para as posições axiais $x = 0,3$ e $0,8$	34
4.7	Perfis de temperatura das sementes para a entalpia de vaporização da água (λ) igual a 531 cal/g , 544 cal/g , 573 cal/g , 602 cal/g e 615 cal/g	37
4.8	Perfis de temperatura das sementes para o calor específico do ar seco (Cp_f) igual a $0,23 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,24 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,25 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,26 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e $0,27 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$	38
4.9	Perfis de umidade das sementes para a entalpia de vaporização da água (λ) igual a 531 cal/g , 544 cal/g , 573 cal/g , 602 cal/g e 615 cal/g	38
4.10	Perfis de umidade das sementes para o calor específico do ar seco (Cp_f) iguais a $0,23 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,24 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,25 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,26 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e $0,27 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$	39
4.11	Sensibilidade da umidade das sementes com relação aos parâmetros Cp_f , Cp_v , Cp_l e λ	41
4.12	Sensibilidade da umidade das sementes com relação aos parâmetros Cp_v , Cp_l e λ	41
4.13	Sensibilidade da temperatura das sementes com relação aos parâmetros Cp_f , Cp_v , Cp_l e λ	42
4.14	Sensibilidade da temperatura das sementes com relação aos parâmetros Cp_v , Cp_l e λ	42

LISTA DE TABELAS

2.1	Balanço mundial da soja (em mil toneladas) nos últimos cinco anos, segundo o United States Department of Agriculture (USDA).	5
2.2	Matriz de planejamento do tipo composto central com quatro fatores. .	17
4.1	Matriz do planejamento composto central para análise de sensibilidade	36
4.2	Resultados da análise de variância.	37
4.3	Parâmetros físico-químicos estudados na análise de sensibilidade por DASPK 3.0	40

LISTA DE SÍMBOLOS

a - área interfacial de transferência por unidade de volume do leito, L^{-1}

A_1, A_2, A_3, B - parâmetros da Equação 3.32

B_1, a_1, n, R^* - parâmetros da Equação 3.21

Cp - calor específico, $L^{-2}\theta^{-1}T^{-2}$

d_p - diâmetro da partícula, L

d_T - diâmetro do tubo, L

De_f - difusividade mássica efetiva da água no interior do grão, L^2T^{-1}

f_m - taxa local de secagem por unidade de área, $ML^{-2}T^{-1}$

G_f - fluxo mássico do gás seco, $ML^{-2}T^{-1}$

G_s - fluxo mássico do sólido seco, $ML^{-2}T^{-1}$

h - coeficiente de transferência de calor, $M\theta^{-1}T^{-3}$

k_f - condutividade térmica do ar, $ML\theta^{-1}T^{-3}$

L - altura do leito, L

M - umidade do sólido, massa de água por massa de sólido seco

$\overline{M}$ - umidade média volumétrica do sólido, massa de água por massa de sólido seco

MR - adimensional de umidade, adimensional

$Nu = \frac{hd_p}{k_f}$ - número de Nusselt, adimensional

P - pressão, $ML^{-1}T^{-2}$

P_m - função de permeabilidade, adimensional

$Pr = \frac{\mu \rho C_p}{k_f}$ - número de Prandtl, adimensional

r - coordenada radial, L

R - raio do tubo, L

$Re = \frac{G_s d_p}{\mu}$ - número de Reynolds, adimensional

R_p - raio da partícula, L

t - variável tempo, T

T - temperatura, θ

u - componente axial da velocidade, LT^{-1}

UR - umidade relativa do ar, adimensional

v - componente radial da velocidade, LT^{-1}

v_z - velocidade do fluido na direção axial, LT^{-1}

v_m - velocidade média do fluido, LT^{-1}

x - coordenada da direção do escoamento do sólido, L

y - coordenada da direção do escoamento do fluido, L

W - umidade absoluta do ar, massa de água por massa de ar seco

Símbolos Gregos

$\alpha = \frac{R}{R_p} = \delta = \frac{d_T}{d_p}$ - aspecto de raio, adimensional

ε - porosidade do leito, adimensional

λ - entalpia de vaporização da água, L^2T^{-2}

μ - viscosidade do ar, $ML^{-1}T^{-1}$

ρ - densidade do ar, ML^{-3}

ρ_s - densidade das sementes, ML^{-3}

ϕ - adimensional de velocidade radial, adimensional
 ξ - adimensional de comprimento axial, adimensional
 ζ - adimensional de comprimento radial, adimensional
 ε_0 - porosidade média do leito, adimensional

Sub-índices

eq - equilíbrio
f - fluido
int - intersticial
l - líquido
s - sólido
ref - referência
v - vapor
0 - condição de entrada

RESUMO

A modelagem da transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em secadores de leito deslizante é baseada na aplicação das equações de balanço de massa e energia para as fases sólida e fluida (modelo a duas fases). No desenvolvimento destas equações, algumas hipóteses clássicas são assumidas, tais como perfil plano de velocidade do ar e parâmetros físico-químicos constantes ao longo do leito, dentre outras. O principal objetivo desta dissertação foi discutir a validade destas considerações no modelo do secador de leito deslizante com escoamentos concorrentes. Para tanto, diversas equações de distribuição de porosidade do leito e de velocidade do fluido foram consideradas e comparadas com dados experimentais. Este estudo verificou que perfis não planos de velocidade do ar são significativos em leitos com razão $d_T/d_p = 13,3$. A equação que melhor representou os dados experimentais foi a equação de Fahien e Stankovich (1979), sendo a mesma incorporada ao modelo a duas fases. Através de comparações entre dados experimentais e respostas simuladas foi possível verificar a influência significativa da distribuição da velocidade do ar no modelo de secagem. As influências de alguns parâmetros físico-químicos do modelo também foram analisadas através de estudos de sensibilidade por planejamento de experimento e pelo método das derivadas usando o código DASPK 3.0. O modelo apresentou maior sensibilidade absoluta à perturbação do parâmetro calor específico do ar seco (Cp_f). Isto significa então que pequenas variações no valor deste parâmetro têm forte influência nos resultados obtidos pelo modelo.

Palavras-chave: *transferência de calor e massa, sementes de soja, leito deslizante, perfil radial de velocidade, análise de sensibilidade.*

ABSTRACT

The modelling of heat and mass transfer between the air and soybean seeds in moving bed dryers is based on the application of mass and energy balances equations for both solid and fluid phases (two phases model). In the development of these equations, some classic hypotheses are assumed, such as flat air velocity profiles and constant physico-chemical parameter along the bed, among others. The main goal of this thesis was to discuss the validity of these assumptions in concurrent moving bed dryer modelling. For so much, several equations of bed porosity and air velocity distribution were considered and compared with experimental data. This study verified that non-flat fluid velocity profiles are significant in beds with reason $d_T/d_p = 13,3$. The equation that best represented the experimental data was the Fahien e Stankovich (1979) equation. This equations was incorporated to the two phases model. Through comparisons between the experimental data and the simulated responses it was possible to verify the significant influence of the air velocity distribution in the drying process. The influences of some physico-chemical parameters of the model were also analyzed through sensitivity studies using experiment design and derivative methods using the code DASPK 3.0. The model presented large absolute sensitivity to the perturbations of the parameter specific heat of the dry air (Cp_f). This means then that small variations in the value of this parameter have strong influence in the results obtained by the model.

Keywords: *heat and mass transfer, soybean seeds, moving bed, radial velocity profile, sensitivity analysis.*

CAPÍTULO 1

Introdução

Os produtos granulares recém colhidos do campo apresentam, em geral, um teor de umidade inadequado para a armazenagem segura, necessitando, portanto, de serem submetidos a um processo de secagem. A escolha de um equipamento de secagem e condições operacionais adequados é de fundamental importância para preservação das qualidades físicas e fisiológicas das sementes.

Os trabalhos relativos ao secador de leito deslizante têm despertado o interesse da comunidade científica nos últimos anos. A literatura apresenta vários estudos sobre este equipamento que vão desde a análise de aspectos tecnológicos até a modelagem e simulação de processos. Na Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI/UFU), os trabalhos com este tipo de secador foram iniciados com o estudo da transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante com escoamentos concorrentes (CELESTINO, 1998), vindo em seguida os trabalhos ligados a análise da qualidade das sementes submetidas à secagem (FELIPE, 1999; LACERDA, 2002) e o estudo fluidodinâmico em leito deslizante contracorrente (SOUZA, 2001).

A modelagem da transferência de calor e massa em secadores de leito deslizante é realizada a partir da aplicação das equações de balanço de massa e energia para ambas as fases, sólida e fluida. No desenvolvimento destas equações, algumas hipóteses

clássicas são assumidas, tais como a consideração do perfil plano de velocidade do ar e propriedades físico-químicas constantes ao longo do leito, dentre outras.

Entretanto, uma característica peculiar que tem sido observada por vários autores é que a estrutura de empacotamento de leitos é caracterizada por significativas variações na porosidade na direção radial. Com as características de escoamento do fluido intimamente relacionadas com a variação da porosidade e, portanto, definindo o mecanismo de transferência de calor e massa no leito, é fácil verificar que a adoção da hipótese de perfil plano da velocidade do ar necessita ser revista em leitos com baixa razão d_T/d_p . Além do perfil de velocidade do fluido, há uma outra suposição que poderia ter forte influência nos resultados da simulação do modelo: parâmetros físico-químicos constantes ao longo do leito. Os valores de parâmetros contêm, geralmente, erros e incertezas, e estas incertezas podem refletir diretamente na precisão dos resultados obtidos pelo modelo.

Embora a questão do perfil radial de velocidade do ar ser de pouca importância quando se leva em conta secadores industriais, dada a sua dimensão com alta razão d_T/d_p , o projeto destes é feito tendo como referência parâmetros levantados em secadores em escala piloto. O mesmo acontece com os parâmetros físico-químicos do modelo. Assim, o procedimento de aumento de escala (*scale-up*) será influenciado por parâmetros medidos nos quais as influências aqui discutidas são impactantes. Como consequência, um mau dimensionamento poderá levar a secadores com gasto inadequado de energia e com qualidade de produto indesejada.

Diante do contexto apresentado, o objetivo geral desta dissertação foi estudar a transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos concorrentes. Para tanto, teve-se como objetivos específicos discutir a validade das considerações de perfil plano de velocidade do ar e parâmetros físico-químicos constantes ao longo do leito. Diversos modelos de distribuição de porosidade e de velocidade do ar foram considerados e validados por dados experimentais. Foram realizadas também análises de sensibilidade de parâmetros físico-químicos por planejamento de experimentos e por coeficientes de sensibilidade usando o código DASPK 3.0.

O Capítulo 2 faz uma abordagem inicial sobre a importância e os fundamentos da secagem da soja, além de uma revisão sobre os secadores de leito deslizante de forma geral, configurações e modelagem; em seguida, é feita uma breve introdução sobre os perfis radiais de porosidade e velocidade em leitos empacotados. Este capítulo aborda

também a análise de sensibilidade através de coeficientes de sensibilidade absoluta e planejamento de experimentos do tipo composto central.

O Capítulo 3 traz o desenvolvimento do modelo a duas fases para o leito deslizante com escoamentos concorrentes, sendo as equações para o coeficiente de transferência de calor, umidade de equilíbrio e cinética de secagem oriundas de estudos específicos de Barrozo (1995) e Sartori (1986). Na sequência, são apresentadas as equações que foram utilizadas para representar o perfil radial de porosidade do leito e de velocidade do ar.

O Capítulo 4 apresenta os resultados dos perfis de velocidade radial do ar, experimentais e simulados, e o posterior estudo do efeito do perfil radial de velocidade do ar no modelo a duas fases. Apresenta também os resultados dos estudos de sensibilidade de parâmetros físico-químicos por planejamento de experimentos e por coeficientes de sensibilidade usando o código DASPK 3.0. E, finalmente, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

Revisão Bibliográfica

2.1 Importância da Secagem da Soja

Nos últimos vinte anos foi surpreendente o desenvolvimento do complexo soja (soja e seus derivados) em todo o planeta. Apesar da expressiva queda de preços internacionais do grão e do aumento dos estoques mundiais no período, a produção global, da ordem de 62 milhões de toneladas no início da década de 1980, atingiu o nível recorde de 197 milhões de toneladas na safra de 2002/03. A Tabela 2.1 mostra o balanço mundial da soja nos últimos cinco anos. Esse aumento de produção deveu-se à elevada expansão da demanda nos principais países consumidores do grão de soja e seus derivados. O consumo, no mesmo período, saltou de 68 milhões para 190 milhões de toneladas (NETO, 2004).

Essa evolução do complexo soja, antes restrita a poucos participantes do comércio internacional, pode ser explicada, em boa parte, pela abertura comercial e a maior interação entre os mais diversos países. Nesse período, a presença da soja brasileira fortaleceu-se e deverá continuar fortalecendo-se no mercado mundial, tanto em termos de produção quanto de exportação.

Tabela 2.1: Balanço mundial da soja (em mil toneladas) nos últimos cinco anos, segundo o United States Department of Agriculture (USDA).

Países	1999/00	2000/01	2001/02	2002/03	2003/04
Produção	159.941	175.231	184.907	197.314	189.120
Estados Unidos	72.224	75.055	78.672	75.010	65.796
Brasil	34.200	39.000	43.500	52.500	52.600
Argentina	21.200	27.800	30.000	35.500	34.000
China	14.290	15.400	15.410	16.510	16.000
Índia	5.200	5.250	5.400	4.000	6.800
Outros	12.827	12.726	11.925	13.794	13.924
Consumo	159.554	171.604	184.200	190.492	191.830
Estados Unidos	47.388	49.203	50.867	47.505	43.726
China	22.894	26.697	28.310	35.290	34.967
Brasil	22.910	24.690	26.911	29.761	32.845
Argentina	18.045	18.400	22.064	24.862	26.355
União Européia-25	15.288	18.309	19.501	17.840	16.381
Outros	33.029	34.305	36.547	35.234	37.556
Importação	45.986	53.122	54.261	62.794	55.592
China	10.100	13.245	10.385	21.417	16.900
União Européia-25	14.129	17.448	18.369	16.824	15.591
Japão	4.907	4.767	5.023	5.087	4.900
México	4.039	4.381	4.510	4.230	4.000
Taiwan	2.408	2.330	2.578	2.351	2.300
Outros	10.403	10.951	13.396	12.885	11.901
Exportação	45.517	53.799	53.594	62.075	56.421
Estados Unidos	26.537	27.103	28.948	28.442	24.222
Brasil	11.161	15.470	15.000	20.129	19.500
Argentina	4.131	7.415	6.005	8.713	8.000
Paraguai	2.025	2.509	2.386	3.200	2.465
Canadá	949	747	495	700	700
Outros	714	555	760	891	1.534

A agricultura brasileira está passando por grandes transformações resultantes da globalização da economia. São mudanças notáveis no sistema de produção agrícola e de processamento agroindustrial das matérias-primas, associada à utilização de modernas ferramentas tecnológicas em busca de maior produtividade, qualidade e rendimento industrial. Mundialmente, os mercados agrícolas estão se tornando cada vez mais exigentes quanto à origem e qualidade de produtos vegetais, resultando em maior competitividade entre os mercados tradicionais e no surgimento de novos.

A produção de sementes ou grãos de alta qualidade inicia-se no campo. A época de colheita é crucial para reduzir as chances de haver deterioração. As sementes ou grãos quando deixados no campo além do período em que estão prontos para ser colhidos (umidade favorável à debulha ou trilha mecânica), ficam sujeitos às condições climáticas desfavoráveis, tais como chuvas e orvalhos fortes que fazem variar a umidade das sementes ou grãos.

A colheita no momento certo e com os devidos cuidados é a chave para a produção de sementes ou grãos de alta qualidade. Isto porque na colheita as sementes ou grãos estão no máximo, ou próximo do máximo, de qualidade fisiológica e todas as atividades subsequentes, como secagem, beneficiamento e armazenamento, devem ser projetadas para a manutenção do nível de qualidade estabelecido, ou inicial, até a próxima temporada de semeadura (BALDET; VILELA, 2000).

A secagem é um processo fundamental da tecnologia para a produção de sementes ou grãos de alta qualidade. Além de preservar as sementes ou grãos de alterações físicas e químicas induzidas pelo excesso de umidade, tornando possível a manutenção da qualidade inicial durante o armazenamento, também é importante no que concerne à produção e comercialização, uma vez que (ATHIÉ et al., 1998):

- possibilita a antecipação da colheita, reduzindo as perdas de campo ocasionadas por intempéries, ação de insetos, roedores e pássaros;
- propicia o planejamento da colheita e o emprego mais eficiente de maquinário e mão-de-obra;
- fornece condições ao produtor de obter melhores preços na comercialização durante a entressafra, no caso de estar associada ao armazenamento;
- permite a formação de estoques reguladores de mercado;
- promove a valorização de preço com a oferta de produtos de melhor qualidade, no caso de grãos, quanto às características organolépticas e nutricionais;
- proporciona às sementes alta porcentagem de germinação.

2.2 Métodos de Secagem

Existem diferentes métodos para se proceder a redução do teor de umidade de sementes ou grãos que podem ser divididos, basicamente, em dois grupos: secagem natural e secagem artificial.

A secagem natural consiste na exposição das sementes ou grãos ao sol, ou à sombra, em ambiente atmosférico relativamente seco, podendo ser feita em terreiros, encerados ou tabuleiros. Tal processo tem como fator muito importante a possibilidade de ser praticada com baixo investimento em recursos materiais, sendo usada principalmente em pequenas propriedades rurais. Entretanto, é limitado pelas condições meteorológicas que podem conduzir à deterioração do produto (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000; FREIRE; GUBULIN, 1990).

Já secagem artificial é realizada em secadores, submetendo-se as sementes ou grãos à ação de um fluxo de ar aquecido, ou não, promovendo a secagem num período relativamente curto. Os altos custos para aquisição, implantação e operacionalização destes sistemas fazem com que os mesmos só se tornem economicamente viáveis quando se trabalha com grandes volumes de sementes ou grãos. Este método permite o controle da temperatura, do fluxo do ar de secagem e do tempo de exposição das sementes ou grãos ao ar aquecido, fatores fundamentais para garantir a eficiência do processo e obtenção de produtos com características pré-estabelecidas (CARVALHO; NAKAGAWA, 2000; FREIRE; GUBULIN, 1990).

2.3 Fases da Secagem

Na secagem, quando o produto é colocado em contato com o ar quente ocorre uma transferência de calor do ar para o produto, devido à diferença de temperatura existente entre eles. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor d'água existente entre o ar e a superfície do produto determina uma transferência de massa para o ar. Esta última, faz-se na forma de vapor d'água. Uma parte do calor que chega ao produto é utilizada para vaporizar a água e a outra para elevar a temperatura do material (DAUDIN, 1983).

A evolução destas transferências simultâneas de calor e massa, no decorrer da operação de secagem, ocorre em três períodos, mostrados na Figura 2.1, onde são

apresentadas as curvas de evolução do teor de água do produto ($\bar{M}$), de sua temperatura (T_s) e da velocidade de secagem ($d\bar{M}/dt$), também chamada de taxa de secagem, ao longo do tempo.

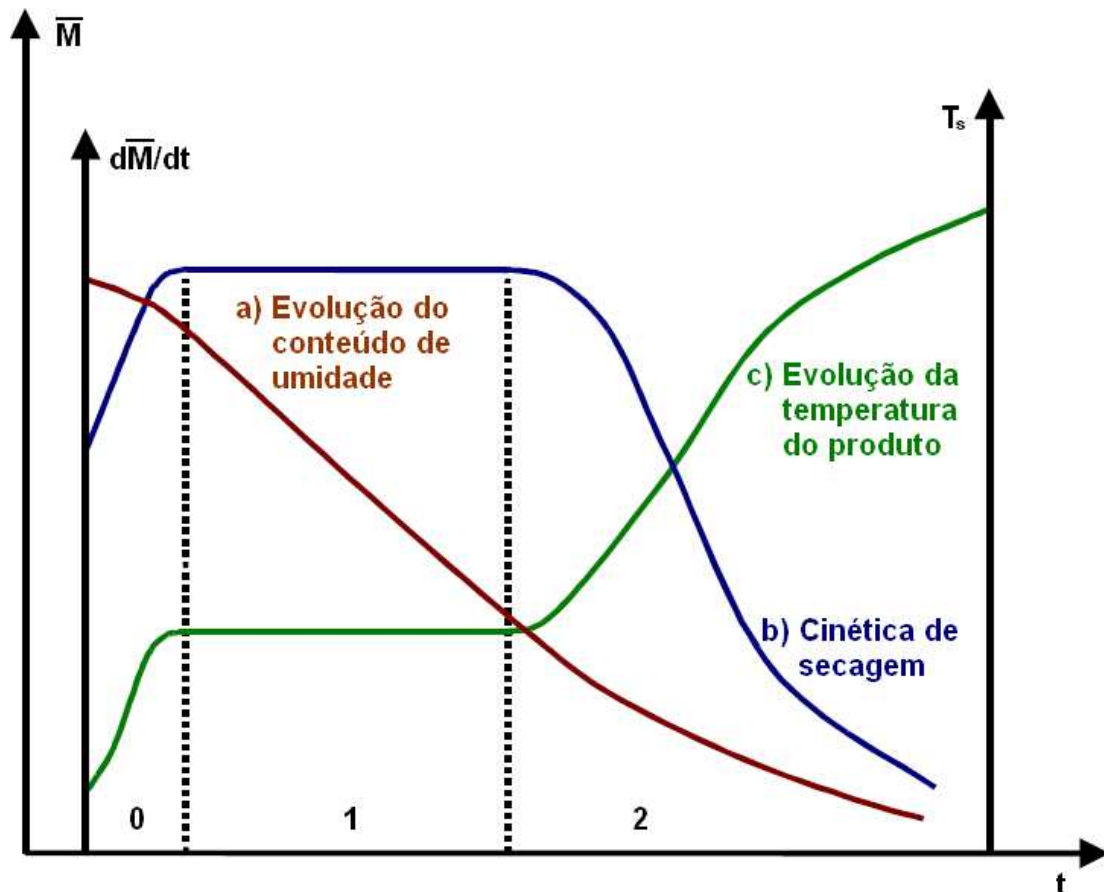


Figura 2.1: Curva típica de secagem (PARK et al., 2001).

A curva (a) representa a redução do teor de água do produto durante a secagem. A curva (b) representa a velocidade (taxa) de secagem do produto, ou seja, a variação do teor de umidade do produto por intervalo de tempo. A curva (c) representa a variação da temperatura do produto ao longo do período de secagem.

O período 0 representa o início da secagem, com elevação gradual da temperatura do produto e da pressão de vapor. Essas elevações tem prosseguimento até o ponto em que a transferência de calor seja equivalente à transferência de massa.

No período 1 a taxa de secagem é constante. Durante este período, a quantidade de água disponível dentro do produto é bem grande e a resistência interna ao transporte de umidade é bem menor do que a resistência externa de remoção do vapor da superfície.

A pressão de vapor d'água na superfície é constante e igual à pressão de vapor de água pura à temperatura do produto. A temperatura do produto, por sua vez, é também constante e igual à temperatura de bulbo úmido, característica do fato de que as transferências de calor e de massa se compensam exatamente. A velocidade de secagem é, por conseguinte, constante.

No período 2 a taxa de secagem é decrescente. Desde o momento em que a água começa a ser deficiente na superfície, a velocidade de secagem diminui. Durante este período, a troca de calor não é mais compensada, conseqüentemente, a temperatura do produto aumenta e tende assintoticamente à temperatura do ar. Durante todo este período, o fator limitante é a migração interna de água. No final deste período o produto estará em equilíbrio com o ar ($\overline{M} = \overline{M}_{eq}$) e a velocidade de secagem é nula.

As leguminosas raramente apresentam o período de secagem a taxa constante, a menos que as mesmas sejam colhidas imaturas ou sofram algum processo de umidificação excessiva. Isto posto, é de se esperar que os mecanismos internos de transferência de umidade tenham bastante relevância na análise do processo de secagem.

2.4 Secadores de Leito Deslizante

Entre os secadores industriais, o secador de leito deslizante tem apresentado algumas vantagens em relação aos demais, tais como: menor investimento e baixo consumo de energia, além de provocar menos injúrias mecânicas à semente (BARROZO, 1995). As três configurações clássicas são definidas de acordo com as direções de escoamentos do fluido e dos sólidos, como mostra a Figura 2.2, podendo ser concorrentes, contracorrentes e cruzados.

Na secagem com escoamentos concorrentes, o fluido e os sólidos escoam em direções paralelas e no mesmo sentido. Esta configuração apresenta maior aproveitamento do calor transferido pelo gás, resultando em um produto com temperatura relativamente baixa que, com o aumento do tempo de residência dos sólidos, aproxima-se do valor de equilíbrio termodinâmico. Entretanto, é a configuração em que se verificam menores taxas de transferência de umidade (VALENÇA; MASSARANI, 1996).

Na secagem com fluxos contracorrentes, ambas as fases, sólida e fluida, apresentam escoamentos paralelos, porém em sentidos opostos. Neste tipo de configuração, ao contrário do que ocorre nos fluxos concorrentes, o produto sai do secador com temperatura

alta, próxima da temperatura de entrada do fluido. Contudo, é a configuração em que se verificam as maiores taxas de redução no teor de umidade dos sólidos (VALENÇA; MASSARANI, 1996).

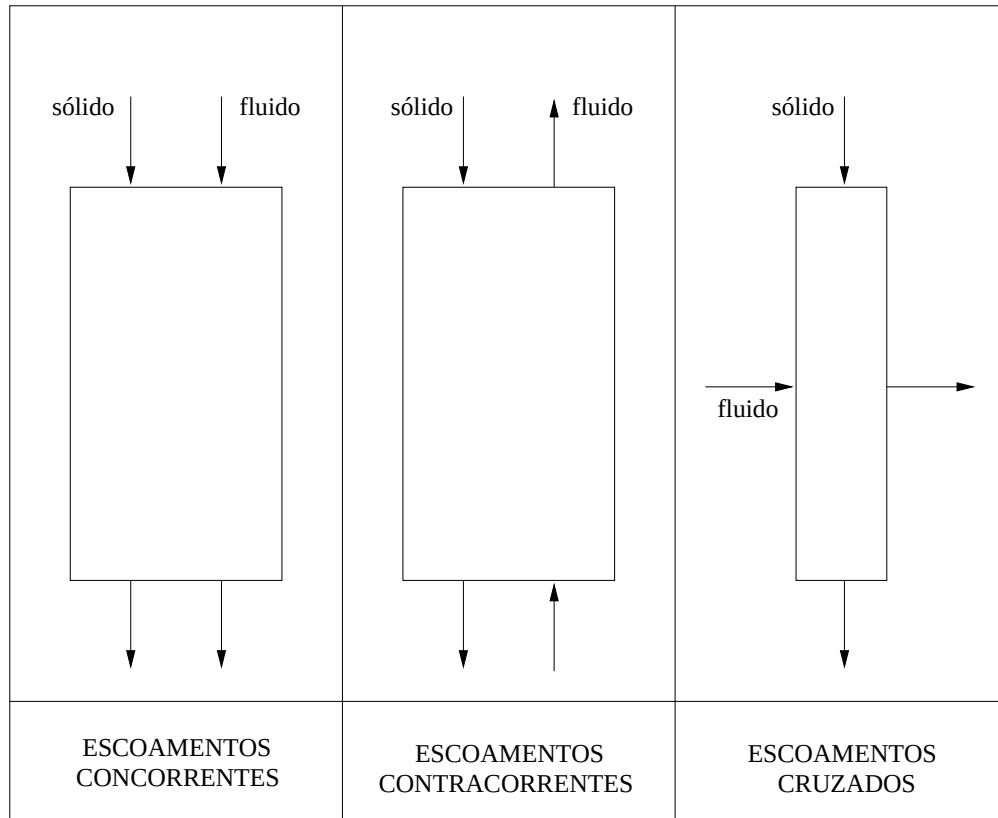


Figura 2.2: Configurações do leito deslizante.

No leito deslizante com fluxos cruzados, a direção de escoamento dos sólidos é perpendicular à direção do escoamento do fluido. Este tipo de configuração causa uma maior secagem e um maior aumento de temperatura nos sólidos com os quais entra em contato primeiro. O resultado é que ocorre uma supersecagem de um lado e uma subsecagem de outro, do que pode resultar diferença significativa de conteúdo de água de um sólido para outro ao final da secagem (CARVALHO, 1994).

A configuração com escoamentos cruzados apresenta como vantagem operacional uma menor diferença de pressão imposta ao escoamento do ar, permitindo o uso de sopradores de menor potência. Já os escoamentos com fluxos paralelos fornecem um produto final mais homogêneo e proporcionam um melhor aproveitamento energético durante o processo (BARROZO, 1995; BARROZO; MURATA, 1996).

Na FEQUI/UFU, os trabalhos relativos aos leitos deslizantes concorrentes e contracorrentes foram orientados pelo Professor Marcos Antônio de Souza Barrozo, sendo que o mesmo estudou a configuração cruzada do leito. O primeiro trabalho foi o de Celestino (1998) que adotou o mesmo modelo que foi utilizado neste trabalho e que será apresentado no próximo capítulo. Os perfis simulados de temperatura do ar e dos sólidos e umidade dos sólidos apresentaram a mesma tendência dos dados experimentais. O estudo fluidodinâmico deste leito mostrou que o perfil de velocidade dos sólidos tem um típico comportamento empistonado, entretanto não foi possível verificar a distribuição de velocidade do ar durante o escoamento dos sólidos devido à configuração do equipamento.

O trabalho seguinte foi o de Felipe (1999) que estudou a influência das principais variáveis do processo de secagem em leito deslizante concorrente na qualidade das sementes de soja. A qualidade das sementes foi analisada em termos dos índices de germinação, vigor e fissuras e as variáveis estudadas foram: velocidade, temperatura e umidade relativa do ar e vazão dos sólidos. Os melhores índices de qualidade foram obtidos com altos valores de umidade relativa do ar e baixos valores de temperatura e velocidade do ar e vazão dos sólidos.

Já o estudo fluidodinâmico realizado por Souza (2001) em leito deslizante contracorrente permitiu verificar que o perfil de velocidade do ar pode ser considerado plano apenas quando a célula de secagem encontra-se vazia. Para a situação em que as sementes de soja escoam através da célula, as regiões próximas à parede apresentaram velocidades maiores. Verificou-se que este efeito é minimizado, ou seja, o perfil torna-se mais plano, à medida em que a velocidade do ar é elevada. Foi avaliado também o efeito da velocidade do ar sobre as variáveis de secagem através de simulações do processo. As simulações foram realizadas utilizando os valores das velocidades do ar no centro e próximo à parede do leito, permitindo identificar diferenças significativas entre os valores finais de umidade dos sólidos, o que representa a possibilidade do comprometimento da homogeneidade do produto.

E por fim, o trabalho de Lacerda (2002) avaliou a influência da temperatura, velocidade e umidade do ar e vazão de sólidos na qualidade das sementes de soja submetidas a secagem em leito deslizante contracorrente. De forma geral, os melhores índices (germinação, vigor e fissura) foram conseguidos em condições que conduzem a menores taxas de secagem, ou seja, menores temperatura e velocidade do ar, e maiores umidades relativas do ar.

A Figura 2.3 mostra a unidade típica de secagem em leito deslizante com escoamentos concorrentes utilizada nos trabalhos desenvolvidos na FEQUI/UFU, sendo a diferença básica entre esta unidade e a unidade com escoamentos contracorrentes a posição de entrada da corrente de ar.

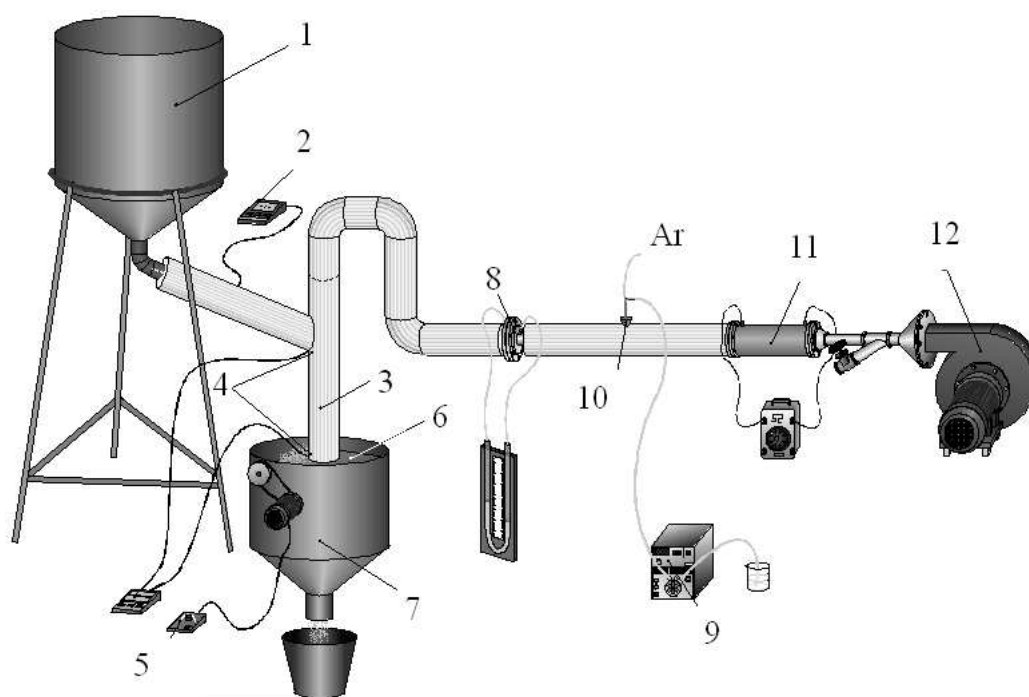


Figura 2.3: Unidade típica de secagem em leito deslizante e escoamentos concorrentes.

- | | |
|-------------------------------|---------------------------|
| 1 - Reservatório superior | 7 - Reservatório inferior |
| 2 - Equalizador de pressão | 8 - Placa de orifício |
| 3 - Célula de secagem | 9 - Bomba peristáltica |
| 4 - Termopares | 10 - Bico atomizador |
| 5 - Controlador de velocidade | 11 - Aquecedor elétrico |
| 6 - Esteira transportadora | 12 - Soprador |

2.5 Perfis Radiais de Porosidade e Velocidade

2.5.1 Perfil de Porosidade Radial

A presença de uma parede limitando um leito de partículas ocasiona modificações no mesmo. As partículas próximas à parede da coluna adaptam-se à mesma diferentemente do que ocorre com as partículas que constituem o leito propriamente dito. Isso ocasiona a formação de duas regiões distintas: uma bem definida, onde o caráter casual na disposição das partículas permanece e a influência das paredes não é percebida; e outra, de estrutura incerta, onde predomina a formação de arranjos regulares, denotando, assim, a influência das paredes do recipiente (FREIRE; GUBULIN, 1986).

Muitos pesquisadores têm investigado o comportamento de partículas empacotadas na vizinhança de uma parede confinante, na tentativa de verificar uma relação entre a porosidade do leito com o grau de arranjo das partículas, na direção radial.

Furnas (1929) foi um dos precursores nos estudos relativos ao efeito de parede, cujo trabalho baseou-se em observações visuais do escoamento de água em leitos de partículas envolvidos por colunas de material transparente. Estes experimentos levaram-no a concluir que a permeabilidade do leito é maior nas regiões próximas à parede da coluna.

Graton e Fraser (1935) observaram a perda da homogeneidade no que se refere à disposição das partículas nas proximidades das paredes de uma coluna de recheio. Desta forma, parâmetros básicos envolvidos em operações de colunas de recheio, tais como porosidade média, porosidade, velocidade e temperatura, mostraram-se direta ou indiretamente relacionados com a estrutura do leito de partículas.

Leva e Grummer (1947) demonstraram que a porosidade de um leito depende das dimensões da coluna e que a porosidade média aumenta com o decréscimo da razão entre diâmetro da coluna (d_T) e o diâmetro das partículas (d_p). Também apresentaram dados de porosidade média em função da razão d_T/d_p para diversos tipos de recheio.

Os trabalhos de Roblee et al. (1958), Benenati e Brosilow (1962), Zotin (1985) e Zotin et al. (1985), entre outros, praticamente definiram um comportamento geral do perfil de porosidade radial para os principais tipos de recheio.

Foi observado que partículas de formato altamente regular, como esferas e cilindros equiláteros, apresentam um perfil de porosidade oscilatório amortecido indicando um caráter bastante ordenado das partículas próximo à parede.

Os recheios nitidamente irregulares como selas de Berl e lascas, por outro lado, proporcionam perfis praticamente uniformes, uma vez que sua geometria mascara a ordenação que a parede tende a inserir no empacotamento das partículas que lhe avizinham. Já os anéis de Raschig, partículas consideradas regulares, apresentam perfis de porosidade uniforme, devendo-se à sua região oca esse perfil.

2.5.2 Perfil de Velocidade Radial

A porosidade variável conduz a um número de importantes efeitos, gerando uma particular distribuição do escoamento e a formação de caminhos preferenciais, com a ocorrência de picos de velocidade na região próxima ao contorno externo.

Schwartz e Smith (1953), no estudo de percolação de gases em colunas de recheio, verificaram um pico no perfil de velocidade a, aproximadamente, um diâmetro de partícula da parede do tubo. Essa observação foi, de modo geral, também confirmada por Morales et al. (1951), Cairns e Prausnitz (1959) e Fahien e Stankovich (1979), dentre outros.

A dimensão desse pico, segundo a maioria dos trabalhos citados, varia com a razão d_T/d_p e com o tipo de recheio envolvido, chegando a atingir 100% acima do valor registrado no centro do tubo, tomando-se por base leitos de partículas regulares como esferas e cilindros equiláteros.

Entretanto, Marivoet et al. (1974) e Lerou e Froment (1977) discordam que o perfil de velocidade obtido apresente um único pico e, através de observações experimentais, afirmam que o mesmo é oscilante, lembrando o comportamento do perfil de porosidade.

Segundo Zotin e Freire (1986) da mesma forma que as perturbações na estrutura do leito interferem nos perfis de velocidade, o mesmo ocorre com os perfis de temperatura. Então, de acordo com estes autores, é necessário analisar as conseqüências das perturbações nos perfis de porosidade, velocidade e temperatura tanto na hidrodinâmica quanto nos fenômenos de transferência de calor e massa.

2.6 Análise de Sensibilidade de EADs

Muitos problemas de engenharia são descritos por sistemas de equações algébrico-diferenciais (EADs). Um sistema de EADs é caracterizado pelo seu índice diferencial, que é o número mínimo de vezes que o sistema é diferenciado analiticamente com relação a variável independente, até ser transformado por manipulações algébricas num sistema explícito de EDOs (equações diferenciais ordinárias). O valor do índice diferencial está diretamente relacionado às propriedades de convergência dos métodos numéricos de solução (MURATA, 1996).

O modelo a duas fases, utilizado para representar a secagem em leito deslizante, juntamente com suas equações constitutivas (coeficiente de transferência de calor, cinética de secagem e umidade de equilíbrio), é um exemplo de um sistema de EADs de índice diferencial zero.

A análise de sensibilidade de EADs pode ser usada para quantificar a magnitude da dependência das predições do modelo a determinados parâmetros e condições iniciais.

O sistema de EADs de um modelo pode ser representado pela equação geral:

$$F(x, y, y', p) = 0, \quad y(0) = y_0 \quad (2.1)$$

onde $y \in \mathbb{R}^{n_y}$ e $p \in \mathbb{R}^{n_p}$. Aqui, n_y e n_p são a dimensão e o número de parâmetros do sistema de EADs original, respectivamente. A análise de sensibilidade consiste em encontrar a derivada do sistema em relação a cada parâmetro de interesse:

$$\frac{\partial F}{\partial y} s_i + \frac{\partial F}{\partial y'} s'_i + \frac{\partial F}{\partial p_i} = 0, \quad i = 1, \dots, n_p, \quad (2.2)$$

onde $s_i = \frac{dy}{dp_i}$ é o coeficiente de sensibilidade absoluta. Isto produz $n_s = n_p \cdot n_y$ equações de sensibilidade adicionais, que juntamente com o sistema original, rende:

$$F = \begin{bmatrix} F(x, y, y', p) \\ \frac{\partial F}{\partial y} s_1 + \frac{\partial F}{\partial y'} s'_1 + \frac{\partial F}{\partial p_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial F}{\partial y} s_{n_p} + \frac{\partial F}{\partial y'} s'_{n_p} + \frac{\partial F}{\partial p_{n_p}} \end{bmatrix} = 0, \quad Y(0) = \begin{bmatrix} y_0 \\ \frac{\partial y_0}{\partial p_1} \\ \vdots \\ \frac{\partial y_0}{\partial p_{n_p}} \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

As equações de sensibilidade podem ser resolvidas analiticamente se a equação do modelo tem solução analítica conhecida. Infelizmente, isto raramente acontece e alguns métodos numéricos têm sido utilizados para aproximar as equações de sensibilidade. Dentre eles estão o método diferencial direto (ATHERTON et al., 1975), o método função de Green (HWANG et al., 1978), o método da aproximação polinomial (HWANG, 1983) e o método de diferenciação automática (HWANG et al., 1997).

2.7 Planejamento de Experimentos

A característica básica de um planejamento fatorial de experimentos é o estudo simultâneo de vários fatores em contrapartida da idéia de variar um fator de cada vez. Neste tipo de planejamento, a primeira coisa que se deve fazer é decidir quais são os fatores e as respostas de interesse para o sistema em estudo. Os fatores, em geral, são as variáveis que se podem manipular. As respostas são as variáveis de saída do sistema, nas quais estamos interessados, e que serão, ou não, afetadas por modificações provocadas nos fatores (BRUNS et al., 2003).

O planejamento composto central é uma classe de planejamento fatorial de primeira ordem acrescido de alguns pontos que permitem a estimativa de coeficientes de segunda ordem (MYERS, 1976). Os experimentos a serem realizados são organizados em uma matriz de planejamento, onde os níveis são representados numa forma codificada de acordo com a seguinte equação:

$$x_i = \frac{\varphi_i - \varphi_{(0)}}{(\varphi_{(1)} - \varphi_{(-1)})/2} \quad (2.4)$$

onde:

x_i - valor da variável codificada;

φ_i - valor da variável não codificada;

$\varphi_{(0)}$ - valor da variável não codificada referente ao nível central;

$\varphi_{(1)}$ e $\varphi_{(-1)}$ - valores das variáveis não codificadas referentes aos níveis 1 e -1 .

O número de experimentos a serem realizados é dado por:

$$N_T = 2^k + 2k + n_2 \quad (2.5)$$

onde N_T é o número total de experimentos, k é o número de variáveis em estudo e n_2 é o número de pontos no centro.

A Tabela 2.2 mostra como deve ser montada uma matriz de planejamento para realização de um planejamento composto central com quatro fatores, sendo Y_i as respostas do experimento e α e $-\alpha$ os níveis extremos escolhidos pelo pesquisador para análise das variáveis.

Tabela 2.2: Matriz de planejamento do tipo composto central com quatro fatores.

x_1	x_2	x_3	x_4	Y_i
-1	-1	-1	-1	Y_1
1	-1	-1	-1	Y_2
-1	1	-1	-1	Y_3
1	1	-1	-1	Y_4
-1	-1	1	-1	Y_5
1	-1	1	-1	Y_6
-1	1	1	-1	Y_7
1	1	1	-1	Y_8
-1	-1	-1	1	Y_9
1	-1	-1	1	Y_{10}
-1	1	-1	1	Y_{11}
1	1	-1	1	Y_{12}
-1	-1	1	1	Y_{13}
1	-1	1	1	Y_{14}
-1	1	1	1	Y_{15}
1	1	1	1	Y_{16}
0	0	0	0	Y_{17}
0	0	0	0	Y_{18}
$-\alpha$	0	0	0	Y_{19}
α	0	0	0	Y_{20}
0	$-\alpha$	0	0	Y_{21}
0	α	0	0	Y_{22}
0	0	$-\alpha$	0	Y_{23}
0	0	α	0	Y_{24}
0	0	0	$-\alpha$	Y_{25}
0	0	0	α	Y_{26}

Para que um planejamento composto central seja ortogonal é necessário que o valor de α adotado pelo pesquisador torne a matriz de variância e covariância diagonal e os parâmetros estimados, relativos aos efeitos, não correlacionados. Das Equações (2.6) e (2.7), é obtido o valor de α para um planejamento ortogonal (MYERS, 1976).

$$\alpha = \left(\frac{QG}{4} \right)^{\frac{1}{4}} \quad (2.6)$$

$$Q = \left[(G + T)^{\frac{1}{2}} - G^{\frac{1}{2}} \right]^2 \quad (2.7)$$

onde G é o número de pontos fatoriais (2^k) e T é o número de pontos adicionais no pcc ($2k + n_2$).

2.8 Conclusões

Neste capítulo foi apresentada uma visão geral do processo de secagem, focando a secagem em leito deslizante nas suas três configurações clássicas. Foi realizada também uma revisão dos principais trabalhos relativos ao estudo do perfil não plano de velocidade do ar, assim como os dois principais métodos de análise de sensibilidade.

CAPÍTULO 3

Modelo Matemático

3.1 Modelo Matemático do Secador Concorrente

3.1.1 Transferência Simultânea de Calor e Massa

A modelagem da transferência de calor e massa em secadores de leito deslizante é realizada a partir da aplicação das equações de balanço de massa e energia para as fases fluida e sólida. É o chamado modelo a duas fases em que se considera fase fluida o ar e o vapor d'água, e fase sólida a matriz seca e a água líquida. No estabelecimento destas equações, são assumidas as seguintes suposições:

- regime permanente de operação;
- escoamentos unidirecionais do gás e do sólido;
- difusão interna é o mecanismo predominante na transferência de massa;
- o encolhimento do grão é desprezível durante o processo de secagem;
- convecção é o mecanismo predominante na transferência de calor;
- os grãos têm velocidade uniforme;

- o gás tem perfil plano de velocidade;
- propriedades físico-químicas constantes ao longo do leito;
- perda de calor através do sistema é desprezível.

Considerando tais suposições e a geometria cilíndrica do leito, conforme as coordenadas indicadas na Figura 3.1, as equações de balanço de massa e energia para ambas as fases podem ser escritas, para a configuração de escoamentos concorrentes, como:

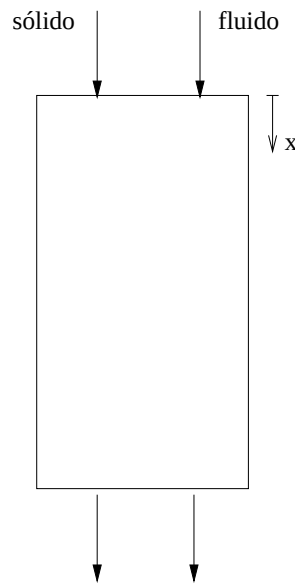


Figura 3.1: Esquema para escoamentos concorrentes em secador de leito deslizante.

a) Conservação de massa

- Fase fluida

$$G_f \frac{dW}{dx} = f_m a \quad (3.1)$$

- Fase sólida

$$G_s \frac{d\bar{M}}{dx} = -f_m a \quad (3.2)$$

b) Conservação de energia

- Fase fluida

$$\frac{dH_f}{dx} = f_m a \langle H \rangle - ha(T_f - T_s) \quad (3.3)$$

- Fase sólida

$$\frac{dH_s}{dx} = -f_m a \langle H \rangle + ha(T_f - T_s) \quad (3.4)$$

A entalpia associada ao vapor da água evaporada e as entalpias do fluido e do sólido podem ser expressas, respectivamente, por:

$$\langle H \rangle = \lambda + Cp_v(T_v - T_{ref}) \quad (3.5)$$

$$H_f = Cp_f(T_f - T_{ref}) + W[\lambda + Cp_v(T_v - T_{ref})] \quad (3.6)$$

$$H_s = Cp_s(T_s - T_{ref}) + \overline{M}Cp_l(T_s - T_{ref}) \quad (3.7)$$

Assumindo que a evaporação ocorra na temperatura do ar, ou seja, $T_v = T_f$ (BROOKER et al., 1974), e substituindo as Equações 3.5, 3.6 e 3.7 nas equações de balanço de energia, chega-se às seguintes equações:

$$\frac{dT_f}{dx} = -\frac{ha(T_f - T_s)}{G_f(Cp_f + WCp_v)} \quad (3.8)$$

$$\frac{dT_s}{dx} = \frac{ha(T_f - T_s)}{G_s(Cp_s + \overline{M}Cp_l)} - \frac{f_m a(\lambda + Cp_v T_f - Cp_l T_s)}{G_s(Cp_s + \overline{M}Cp_l)} \quad (3.9)$$

As temperaturas e umidades de ambas as fases são consideradas constantes na entrada do leito ($x = 0$), resultando nas seguintes condições de contorno:

$$W(0) = W_0 \quad (3.10)$$

$$\overline{M}(0) = \overline{M}_0 \quad (3.11)$$

$$T_f(0) = T_{f0} \quad (3.12)$$

$$T_s(0) = T_{s0} \quad (3.13)$$

3.1.2 Equações para o Coeficiente de Transferência de Calor, Umidade de Equilíbrio e Cinética de Secagem

O coeficiente de transferência de calor entre o ar e as sementes de soja em leito deslizante concorrente é estimado usando a correlação proposta por Sartori (1986), como segue:

$$Nu = 0,84Pr^{1/3}Re^{0,65} \quad (3.14)$$

para $80 < Re < 900$ e $Pr = 0,72$.

O teor de umidade das sementes de soja no equilíbrio é bem descrito pela equação de Halsey modificada com os parâmetros estimados pelos dados de equilíbrio obtidos por Barrozo (1995), qual seja:

$$\overline{M}_{eq} = \left[\frac{-\exp(-0,00672T_s + 3,02)}{\ln(UR)} \right] \frac{1}{1,508} \quad (3.15)$$

para $\overline{M}_{eq}$ em base seca e T_s em Celsius.

O modelo difusivo, representado pela Equação (3.16), é usado para descrever a cinética de secagem de sementes de soja:

$$MR = \frac{\overline{M} - \overline{M}_{eq}}{\overline{M}_0 - \overline{M}_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left[\frac{-n^2\pi^2 D_{ef} t}{R^2}\right] \quad (3.16)$$

Baseado em dados experimentais obtidos na secagem de sementes de soja em camada fina, Barrozo (1995) estimou o coeficiente de difusividade efetiva D_{ef} . A variação deste coeficiente com a temperatura é obtida pela reparametrização da equação de Arrhenius, como mostra a Equação (3.17).

$$D_{ef} = \exp(\beta)\exp[-T'\exp(\gamma)] \quad (3.17)$$

onde $T' = (1/T_f - 1/T^*)$, $T^* = 273K$, T_f em Kelvin e D_{ef} em cm^2/min . Os parâmetros β e γ , estimados pelo método dos mínimos quadrados, são -13,185 e 8,36, respectivamente.

3.2 Equações para o Perfil Radial de Velocidade

3.2.1 Perfil de Porosidade

No trabalho de Benenati e Brosilow (1962), realizado com esferas de 4 mm, verificou-se que ocorre uma típica variação oscilatória na porosidade na região próxima à parede, sendo proposta uma equação empírica que relaciona a porosidade com a distância a partir da parede e com a razão d_T/d_p .

$$\varepsilon = 0,38 + 0,62e^{1,70x^{0,434}}\cos(6,67x^{1,13}) \quad (3.18)$$

onde $x = (1 - \zeta)\delta/2 =$ número de d_p a partir da parede, conforme mostrado na Figura 3.2. Observa-se que junto à parede a porosidade tende a 1 e que o perfil radial da mesma tem um comportamento oscilatório amortecido em direção ao centro do tubo.

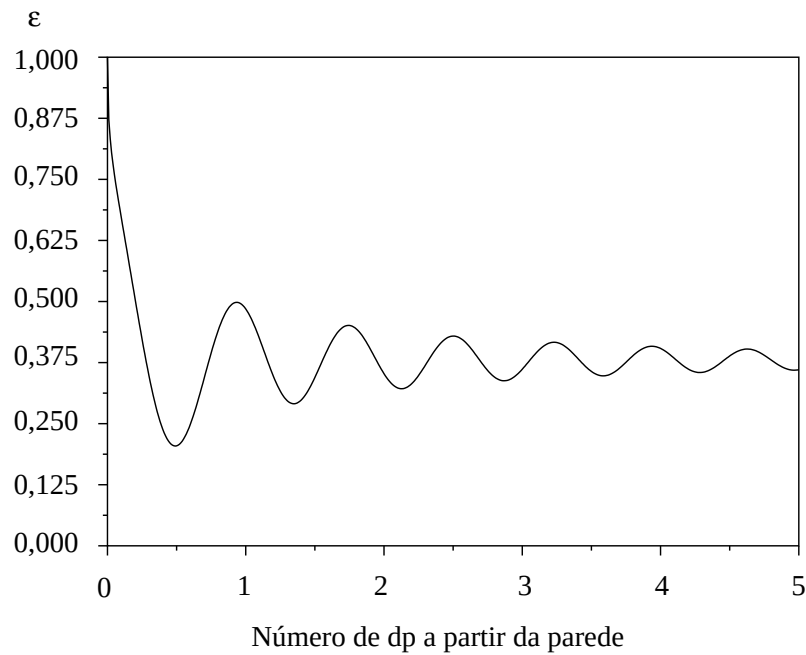


Figura 3.2: Distribuição de porosidade radial.

Já Vortmeyer e Schuster (1983), reportando-se a dados experimentais de terceiros, mostraram que o perfil de porosidade em tubos circulares oscila apenas duas vezes quando o leito é constituído por esferas com pequenos desvios da estrutura esférica, adotando, neste caso, um perfil de porosidade aproximado por uma função exponencial

da forma:

$$\varepsilon = \varepsilon_o \left[1 + C \exp \left(1 - 2 \frac{R-r}{d_p} \right) \right] \quad (3.19)$$

sendo ε_o a porosidade média e C ajustado de acordo com ε_o .

3.2.2 Perfil de Velocidade

Vortmeyer e Schuster (1983) reportam-se à formulação diferencial proposta por Brinkman (1947) que descreve o perfil de escoamento dentro de um meio poroso confinado por uma parede rígida. Embora Brinkman tenha feito seus desenvolvimentos utilizando o regime de escoamento de Darcy, ampliando-o pela introdução de um termo de viscosidade a fim de incluir as forças viscosas próximas à parede, posteriormente este modelo foi estendido a vazões maiores pela incorporação da equação de Ergun que prediz a queda de pressão ao longo do leito. Utilizando uma correlação empírica para predizer o perfil radial de porosidade na forma da Equação (3.19), Vortmeyer e Schuster (1983) propuseram uma solução para o modelo de Brinkman estendido, utilizando o método variacional, que consiste na transformação do problema original na forma diferencial para um problema na forma integral. A solução analítica para o perfil radial de velocidade é apresentada a seguir:

$$\frac{v_z}{v_m} = B_1 \left[1 - \exp \left(a_1 \frac{R-r}{d_p} \right) \left(1 - n \frac{R-r}{d_p} \right) \right] \quad (3.20)$$

com:

$$B_1 = \frac{1}{2} R^{*2} \left[\frac{R^{*2}}{2} - (a_1 R^* + 1)(n R^* - 1) \frac{1}{a_1^2} + n \left(\frac{R^{*2}}{a_1} + \frac{2R^*}{a_1^2} + \frac{2}{a_1^3} \right) - e^{-a_1 R^*} \frac{1}{a_1^2} \left(1 - R^* n + n \frac{2}{a_1} \right) \right]^{-1}$$

$$R^* = \frac{R}{d_p}, \quad a_1 = \frac{4n}{4-n}, \quad Re = \frac{G_f d_p}{\mu}$$

Se $0,1 \leq Re \leq 1$:

$$n = 112,5 - 26,31Re + 10,97Re^2 - 0,1804Re^3$$

Se $1 \leq Re \leq 1000$:

$$n = -1803 + 201,62(\ln Re + 4) - 3737(\ln Re + 4)^{\frac{1}{2}} + 5399(\ln Re + 4)^{\frac{1}{3}}$$

Se $Re > 1000$:

$$n = 27$$

Uma outra abordagem também empregando a Equação de Navier-Stokes, porém com algumas simplificações a fim de se chegar a um modelo final mais simples, foi apresentada por Johnson e Kapner (1990). Com as propriedades do fluido constantes e um termo adicional, como sugerido por Brinkman (1947), a fim de considerar a resistência adicional do escoamento devido à presença do empacotamento, a Equação de Navier-Stokes se reduz a:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = -gradP + \mu \nabla^2 \vec{V} + \rho \vec{g} - \frac{\mu \dot{V}}{k} \quad (3.21)$$

Ao se impor restrições de estado estacionário e simetria axial, o componente de velocidade axial é dado por:

$$\rho \left(v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial^2 u}{\partial z^2} \right) - \frac{\mu}{k} u + \rho g \quad (3.22)$$

A equação anterior pode ser linearizada assumindo que $v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z}$ possa ser escrito como $u(r, z)$ vezes uma função apenas de z :

$$v \frac{\partial u}{\partial r} + u \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\mu}{R^2} \lambda^2(z) u(r, z) \quad (3.23)$$

Quando o escoamento está completamente desenvolvido, $\lambda^2 = 0$. Assumindo que $-\frac{\partial P}{\partial z}$ seja uma função somente de z e que o termo $\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}$ possa ser negligenciado, tem-se:

$$\frac{\mu}{R^2} \lambda^2 u = -\frac{dP}{dz} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial u}{\partial r} \right) - \frac{\mu}{k} u + \rho g \quad (3.24)$$

Introduzindo as variáveis adimensionais:

$$\zeta = \frac{r}{R} = \frac{r}{R_p \delta} \quad , \quad \xi = \frac{z}{2R_p}$$

onde: $\delta = \frac{R}{R_p}$. Rearranjando:

$$\frac{\partial^2 u}{\partial \zeta^2} + \frac{1}{\zeta} \frac{\partial u}{\partial \zeta} - \left(\lambda^2 + \frac{R_p^2 \delta^2}{k} \right) u = \frac{R_p \delta^2}{2\mu} \frac{dP}{d\xi} - \frac{\rho g R_p^2 \delta^2}{\mu} \quad (3.25)$$

Pode-se observar que o lado direito da equação acima é função apenas de ξ ; chamando este termo de $\gamma(\xi)$, e então introduzindo a variável escalonada $\phi = \frac{u}{\gamma}$; também definindo $P_m = \frac{R_p^2 \delta^2}{k}$ como sendo a função de permeabilidade adimensional, a equação de velocidade axial se torna:

$$\frac{\partial^2 \phi}{\partial \zeta^2} + \frac{1}{\zeta} \frac{\partial \phi}{\partial \zeta} - (\lambda^2 + P_m) \phi = 1 \quad (3.26)$$

com as condições de contorno:

(i) aderência na parede e simetria no centro

$$\phi(1, \xi) = \frac{\partial \phi}{\partial \zeta}(0, \xi) = 0 \quad (3.27)$$

(ii) distribuição inicial de velocidade

$$\phi(\zeta, 0) = \phi_m \left[\frac{\eta + 1}{\eta} (1 - \zeta^{2\eta}) \right] \quad (3.28)$$

A solução da Equação (3.26) juntamente com as condições de contorno (Equações 3.27 e 3.28) fornecerá perfis de velocidade perpendiculares ao escoamento, no estado estacionário. Para o caso particular de escoamento completamente estabelecido, ou nenhuma dependência com ξ , tem-se que $\lambda^2 = 0$. Neste caso, a forma do perfil de velocidade será dependente da velocidade média, isto é, γ é uma constante. Assim, a equação da velocidade axial no estado estacionário é dada por:

$$\frac{d^2 \phi}{d\zeta^2} + \frac{1}{\zeta} \frac{d\phi}{d\zeta} - P_m(\zeta) \phi = 1 \quad (3.29)$$

com a condição de contorno:

$$\phi(1) = \frac{d\phi}{d\zeta}(0) = 0 \quad (3.30)$$

Muitas expressões têm sido desenvolvidas relacionando a permeabilidade de meios porosos à porosidade e ao tamanho das partículas. Neste trabalho, utilizou-se a expressão (JOHNSON; KAPNER, 1990):

$$P_m = 45\delta^2 \frac{(1 - \varepsilon)^2}{\varepsilon^3} \quad (3.31)$$

onde ε é descrito pela Equação (3.18).

Ao invés de tentar obter perfis radiais de velocidade aplicando as equações de balanço, outros autores correlacionaram dados experimentais de velocidade para uma ampla faixa de d_p , d_T e número de Reynolds, resultando em modelos empíricos. Fahien e Stankovich (1979) propuseram uma expressão em função apenas da razão $\alpha = d_T/d_p$:

$$V^* = \frac{v_z}{v_m} = \frac{A_1 + A_2 r^{*(B+1)} - A_3 r^{*(B+2)}}{A_1 + \frac{2A_2}{B+3} - \frac{2A_3}{B+4}} \quad (3.32)$$

onde:

$$B = 0,45\alpha^{1,5}$$

$$A_1 = \frac{1}{B+2} - \frac{\alpha-1}{\alpha(B+1)}$$

$$A_2 = \frac{\alpha-1}{\alpha(B+1)}$$

$$A_3 = \frac{1}{B+2}$$

$$r^* = \frac{r}{r_T} \quad \text{e} \quad r_T = \frac{d_T}{2}$$

3.3 Conclusões

Neste capítulo foram apresentadas as equações de balanço de massa e energia para o secador de leito deslizante concorrente juntamente com as equações para o coeficiente de transferência de calor, umidade de equilíbrio e cinética de secagem. Foram apresentadas também algumas equações que descrevem o perfil de porosidade do leito e de velocidade do ar (fenomenológico e empírico).

CAPÍTULO 4

Resultados e Discussão

4.1 Estudo do Perfil Radial de Velocidade do Ar

4.1.1 Dados Experimentais e Perfis Simulados

Os dados experimentais utilizados neste estudo são do leito deslizante contracorrente, pois o equipamento com fluxos concorrentes não permite a introdução de um anemômetro de fio quente durante o escoamento dos sólidos, impossibilitando, desse modo, verificar a distribuição de velocidade radial do ar. Apesar disto, os resultados obtidos neste estudo podem ser aplicados também a configuração concorrente uma vez que a fluidodinâmica do leito não é afetada pelo sentido de escoamento do ar.

As medidas de velocidade do ar feitas por Souza (2001) na direção radial foram realizadas introduzindo-se um anemômetro de fio quente na posição de saída do ar do leito, sendo registrados os valores de velocidade do ar em cinco posições radiais distintas. As medidas foram realizadas utilizando os seguintes valores de velocidade média superficial do ar: 0,74; 0,98; 1,11; 1,25 e 1,42 m/s (incerteza: 3,0 %). Dentro de cada ensaio, as medidas radiais de velocidade foram registradas cinco vezes, garantindo a obtenção de uma média representativa em cada posição.

A Figura 4.1 mostra a distribuição de velocidade radial do ar experimental e simulada utilizando as equações de Vortmeyer e Schuster (1983) e de Fahien e Stankovich (1979) (Equações 3.20 e 3.32). Nota-se que ambas as equações tendem a prever um perfil mais achatado no centro do que aqueles observados experimentalmente, sendo este comportamento mais pronunciado no perfil obtido pela equação de Vortmeyer e Schuster (1983).

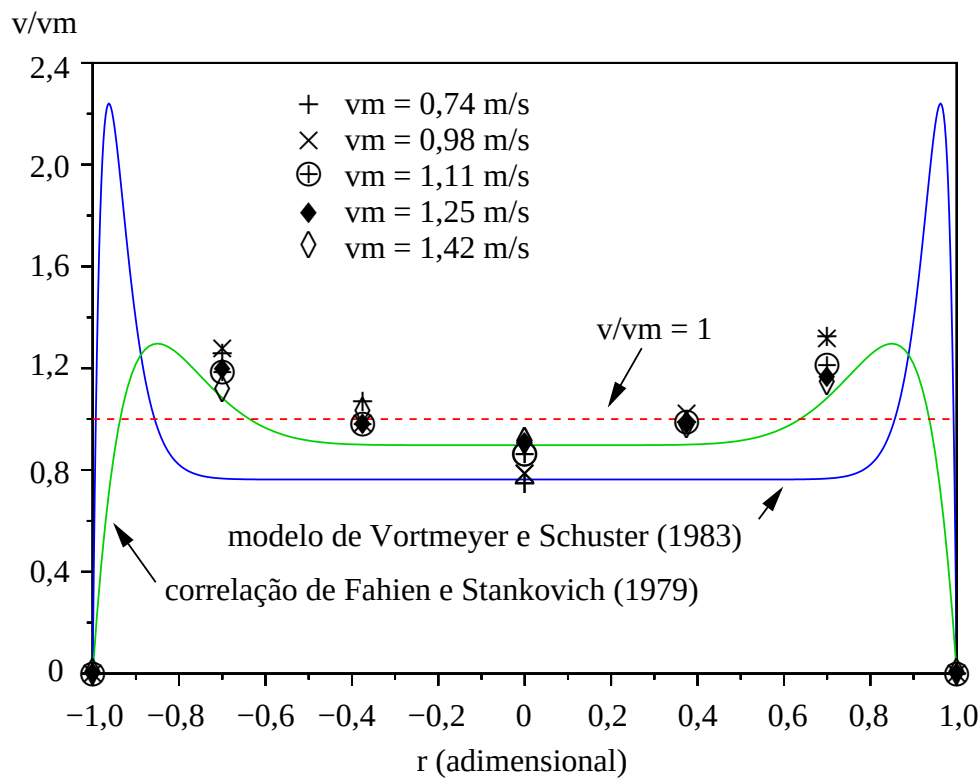


Figura 4.1: Perfis radiais de velocidade experimental e simulados (equações de Vortmeyer e Schuster (1983) e de Fahien e Stankovich (1979)).

Percebe-se também, uma melhor representação dos dados experimentais pela correlação de Fahien e Stankovich (1979), a qual é função apenas da razão d_T/d_p , embora os dados experimentais sugiram claramente que o perfil radial de velocidade seja função do Re ; entretanto, apesar da equação de Vortmeyer e Schuster (1983), ser função do Re no leito, apresenta uma predição pior, com um pico mais acentuado de velocidade muito próximo à parede (a $0,25 d_p$), enquanto que a correlação de Fahien e Stankovich (1979) prevê a velocidade máxima a $1 d_p$ a partir da parede.

O modelo de Johnson e Kapner (1990) advindo da Equação de Navier-Stokes modificada, conforme a Equação (3.29), com as condições de contorno apresentadas na Equação (3.30), com permeabilidade do leito dada pela Equação (3.31) e o perfil de porosidade dado pela Equação (3.18), foi resolvido numericamente empregando a técnica de diferenças finitas implementada no *software* livre *Scilab*TM (www.scilab.org), empregando uma malha com 200 pontos. A Figura 4.2 mostra a solução numérica juntamente com os pontos experimentais obtidos para uma velocidade média superficial do ar de 1,25 m/s.

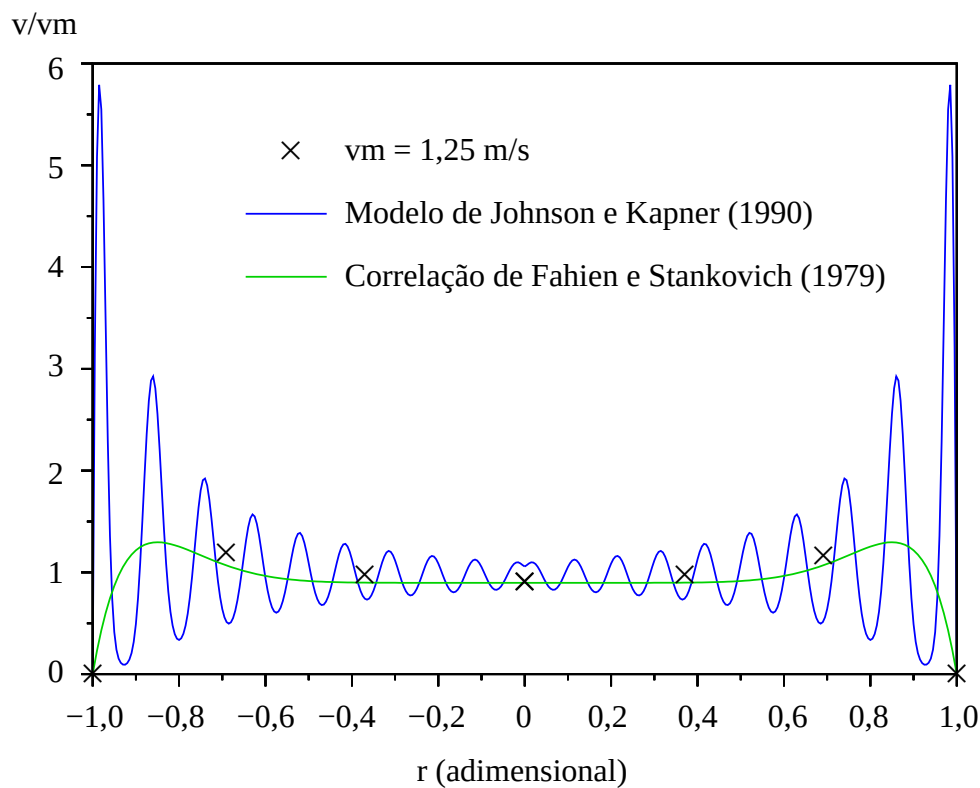


Figura 4.2: Perfis radiais de velocidade experimental e simulados (equações de Johnson e Kapner (1990) e de Fahien e Stankovich (1979)).

O comportamento oscilatório do perfil de velocidade está diretamente relacionado com o perfil de porosidade empregado, e, segundo Johnson e Kapner (1990), tal característica do perfil, prevista pelo modelo empregado, deve ser retida quando o objetivo é a estimativa de parâmetros de transferência de calor e massa; caso contrário, tais parâmetros não são estimados de modo satisfatório. Resultados recentes de perfil de velocidade (NEGRINI et al., 1999) corroboram a natureza oscilatória deste, embora não com uma amplitude e frequência tão acentuados como os previstos pelo modelo

de Johnson e Kapner (1990). A Figura 4.2 também mostra que o perfil de velocidade obtido com a correlação de Fahien e Stankovich (1979) está muito próximo à média das velocidades previstas pela solução numérica citada.

Os resultados mostrados anteriormente devem ser levados em consideração na modelagem de leitos com recheio tal como a secagem de soja em leito deslizante. Isto porque leitos com baixa razão d_T/d_p são utilizados na determinação de parâmetros de transferência de calor e massa, através do ajuste de dados experimentais a modelos apropriados para descrever os fenômenos intrínsecos da secagem. Por sua vez, tais parâmetros são utilizados no dimensionamento de secadores industriais. Assim, considerar perfil plano de velocidade do ar incorrerá em erros nos parâmetros estimados que por sua vez resultará em projetos sub ou superespecificados, o que acarretará produto de qualidade inferior e/ou consumo energético superior ao mínimo necessário.

4.1.2 Efeito do Perfil Radial de Velocidade do Ar no Modelo a Duas Fases

O fato de existir um perfil não plano de velocidade do ar faz com que $v_x = v_x(r)$, ou seja, a velocidade axial do ar depende da posição radial. Entretanto, não há (por hipótese) uma velocidade do ar na direção do raio (não existe v_r), o que não justifica o uso de um modelo bidimensional para representar o secador, já que este levaria a uma complexidade numérica muito maior. Assim, a melhor maneira de incorporar $v_x(r)$ ao modelo, e a mais simples, é tomar como hipótese que o secador seja dividido em camadas concêntricas, como mostra a Figura 4.3, nas quais a velocidade do ar é constante e diferente das demais. Isto equivale a fazer uma discretização na direção radial.

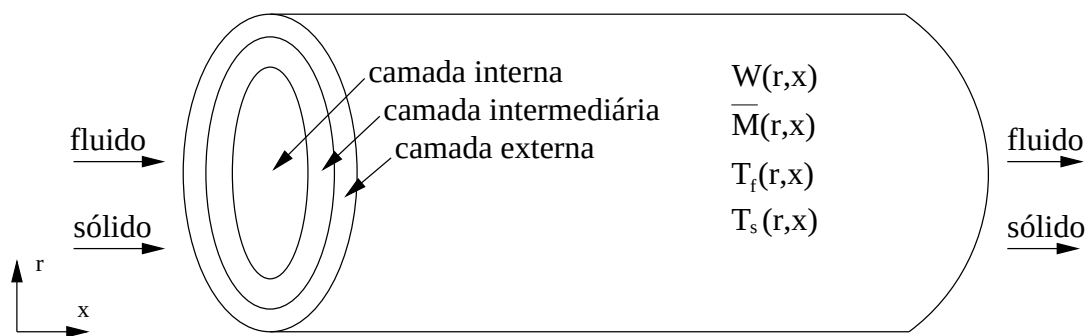


Figura 4.3: Esquema do leito deslizante concorrente dividido em camadas concêntricas.

A fim de estudar o efeito do perfil radial de velocidade do ar no modelo a duas fases, o leito deslizante foi dividido em seis camadas concêntricas ($\delta = r/R = 0-0,5$; $0,5-0,6$; $0,6-0,7$; $0,7-0,8$; $0,8-0,9$; $0,9-1$ em unidades dimensionais). A velocidade do ar foi calculada com a equação de Fahien e Stankovich (1979) (Equação 3.20) usando as posições radiais médias para cada camada mencionada acima. Os dados experimentais utilizados neste estudo foram obtidos por Felipe e Barrozo (2003) para secagem de sementes de soja usando um leito deslizante concorrente de $d_T/d_p = 13,3$.

As Figuras 4.4 e 4.5 comparam resultados simulados do modelo aos dados experimentais para as variáveis: temperatura do ar e umidade das sementes, respectivamente, para as posições radiais mencionadas anteriormente, ao longo do sentido axial. Pode-se observar que o perfil axial de temperatura depende da posição radial. Na posição bem próxima à parede, onde a velocidade é significativamente mais baixa (veja Figura 4.1), a temperatura também é mais baixa, e um pequeno incremento na posição radial, a partir desse ponto, faz com que a temperatura aumente consideravelmente.

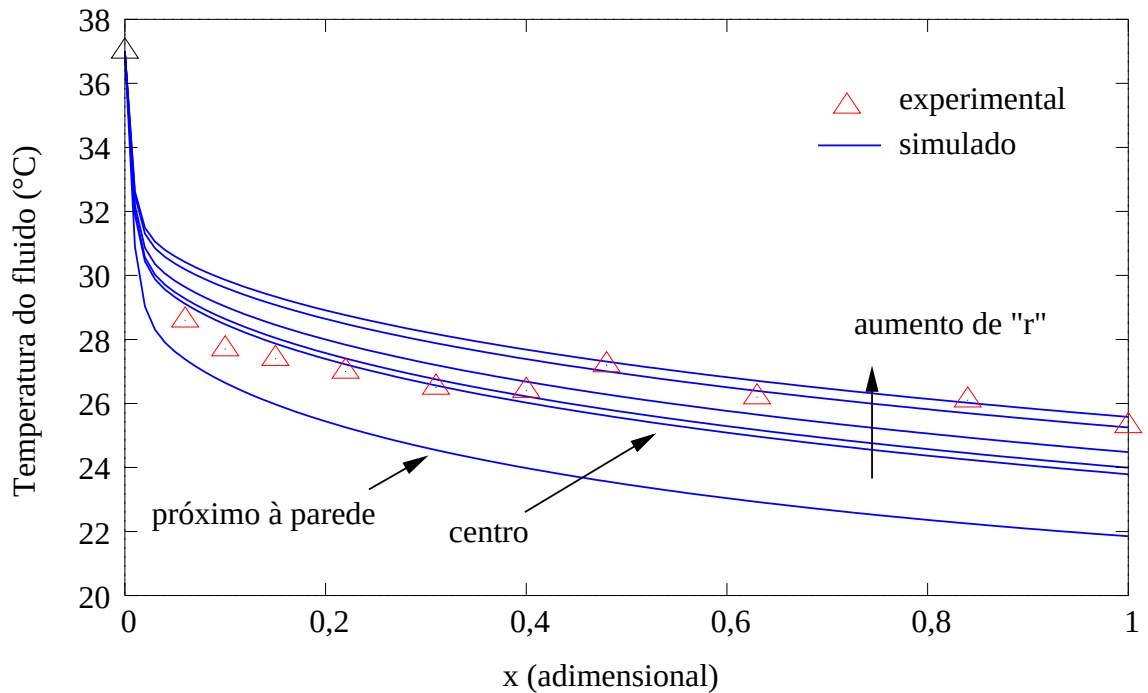


Figura 4.4: Perfis axiais de temperatura do ar (condições operacionais: $v_{int} = 2,0 \text{ m/s}$, $T_{f0} = 37,0 \text{ °C}$, $T_{s0} = 22,4 \text{ °C}$, $\bar{M}_0 = 0,1581 \text{ Kg água/Kg sol. seco}$, $W_0 = 0,0030 \text{ Kg água/Kg ar seco}$, $G_f = 8,8210 \times 10^{-1} \text{ Kg/m}^2\text{s}$, $G_s = 2,1075 \times 10^{-1} \text{ Kg/m}^2\text{s}$).

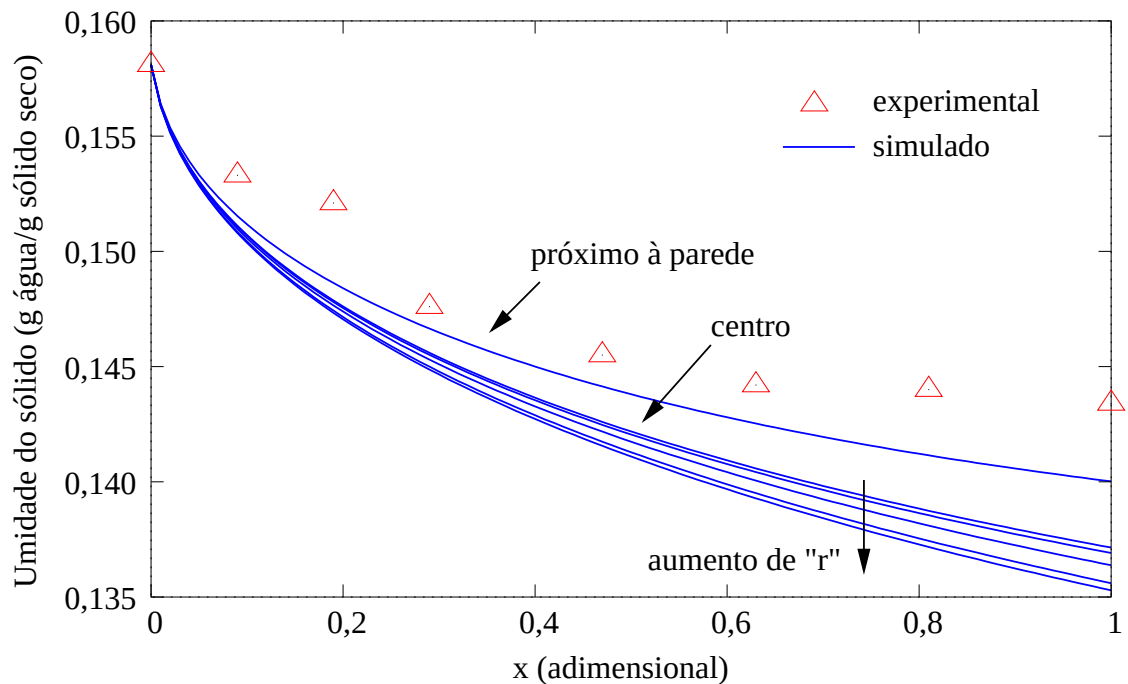


Figura 4.5: Perfis axiais de umidade das sementes (condições operacionais: $v_{int} = 2,0$ m/s , $T_{f0} = 37,0$ $^{\circ}C$, $T_{s0} = 22,4$ $^{\circ}C$, $\overline{M}_0 = 0,1581$ Kg $agua/Kg$ $sol. seco$, $W_0 = 0,0030$ Kg $agua/Kg$ $ar seco$, $G_f = 8,8210 \times 10^{-1}$ Kg/m^2s , $G_s = 2,1075 \times 10^{-1}$ Kg/m^2s).

Os dados experimentais aqui utilizados foram obtidos na região central do secador, mas devido à característica do equipamento experimental empregado é difícil de assegurar que todos os dados sejam realmente desta região; assim, aceita-se que os pequenos desvios dessa região possam ter ocorrido e isto poderia explicar os pequenos desvios entre resultados experimentais e simulados. Além disso, diversos parâmetros físico-químicos foram considerados constantes durante todo o secador no desenvolvimento do modelo. Não obstante, como estes parâmetros são afetados pelo perfil de temperatura, pode se esperar que esta consideração contribua para os desvios entre os dados experimentais e simulados. Apesar disso, os desvios médios entre dados experimentais e simulados para a temperatura de ar e umidade das sementes estão perto das incertezas da medida destas variáveis.

A Figura 4.6 mostra perfis radiais simulados para a temperatura do ar em duas posições axiais ($x = 0,3$ e $0,8$). Fica claro que há gradientes da temperatura no sentido radial, afetando desse modo o mecanismo de transferência de calor e massa ao longo de todo o leito. Em consequência deste fato, a qualidade das sementes poderá ser afetada como mostrado por Felipe e Barrozo (2003).

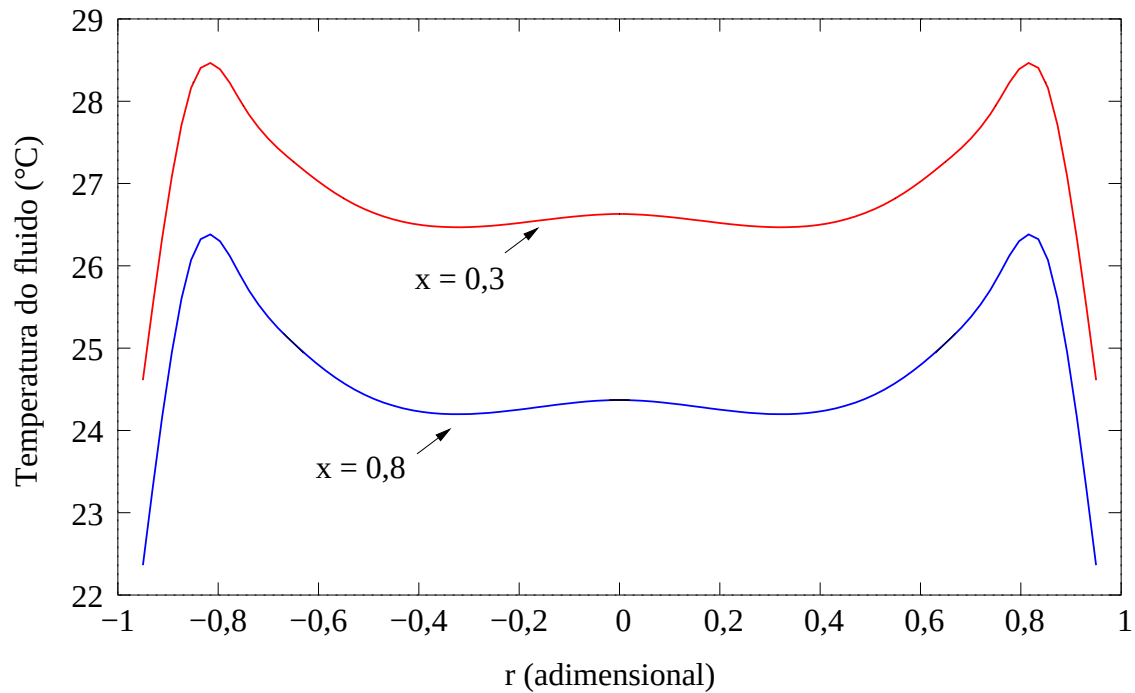


Figura 4.6: Perfis radiais de temperatura do ar simulados para as posições axiais $x = 0,3$ e $0,8$.

4.2 Análise de Sensibilidade de Parâmetros Físico-Químicos

4.2.1 Introdução

Além da hipótese do perfil de velocidade do ar ser plano, foi questionada também a hipótese dos parâmetros físico-químicos serem constantes ao longo do leito. Para tanto, faz-se necessário detectar qual(ais) parâmetro(s) influencia(m) mais significativamente o modelo, pois não há razões para buscar descrever com grande acurácia um parâmetro que não trará melhorias significativas ao modelo. A influência de parâmetros em um modelo é determinada através da sensibilidade paramétrica, que neste trabalho foi avaliada usando dois métodos distintos conforme segue.

4.2.2 Análise de Sensibilidade por Planejamento de Experimentos

A análise de sensibilidade por planejamento de experimentos tem a vantagem de ser simples de ser efetuada, embora o número de vezes que o programa deve ser executado aumenta muito com o aumento no número de parâmetros investigados. Ademais, neste tipo de análise de sensibilidade verifica-se a influência de parâmetros **em apenas um ponto** do secador, neste estudo, na saída, não havendo nenhuma informação sobre o que acontece ao longo do secador.

As condições experimentais para as simulações deste estudo de sensibilidade de parâmetros físico-químicos foram estabelecidas por um planejamento de experimentos do tipo composto central. Foram estudados apenas quatro parâmetros: densidade do sólido (ρ_s), calor específico do ar seco (Cp_f), viscosidade do ar (μ) e entalpia de vaporização da água (λ). Desta forma, o número total de experimentos realizados foi igual a 26, sendo que este valor foi calculado através da Equação (2.5) com réplica no ponto central. Foram utilizadas como respostas a umidade e a temperatura das sementes, $\overline{M}$ e T_s , respectivamente.

As Equações (4.1), (4.2), (4.3) e (4.4) são relativas às codificações dos parâmetros estudados. Os valores dos níveis -1 e 1 foram escolhidos de forma que a diferença entre os valores extremos do intervalo ($-\alpha$ e α) e o valor original (nível central) não fosse maior que 10% do valor original do parâmetro.

$$x_1 = \frac{\rho_s(g/cm^3) - 0,117g/cm^3}{0,012g/cm^3} \quad (4.1)$$

$$x_2 = \frac{Cp_f(cal/g^\circ C) - 25cal/g^\circ C}{0,02cal/g^\circ C} \quad (4.2)$$

$$x_3 = \frac{\mu(g/cms) - 0,185g/cms}{0,018g/cms} \quad (4.3)$$

$$x_4 = \frac{\lambda(cal/g) - 573cal/g}{58cal/g} \quad (4.4)$$

O valor de α foi de 1,4826, determinado pela Equação (2.6) e que conduz a um planejamento composto central ortogonal, ou seja, um planejamento em que a matriz de variância e covariância é diagonal e os parâmetros não são correlacionados. A Tabela 4.1 apresenta a matriz de planejamento com os níveis utilizados dos 26 experimentos.

Tabela 4.1: Matriz do planejamento composto central para análise de sensibilidade

$\rho_s(g/cm^3)$	$Cp_f(cal/g^\circ C)$	$\mu(g/cms)$	$\lambda(cal/g)$	Y_i
0,111	0,24	0,176	544	Y_1
0,123	0,24	0,176	544	Y_2
0,111	0,26	0,176	544	Y_3
0,123	0,26	0,176	544	Y_4
0,111	0,24	0,194	544	Y_5
0,123	0,24	0,194	544	Y_6
0,111	0,26	0,194	544	Y_7
0,123	0,26	0,194	544	Y_8
0,111	0,24	0,176	602	Y_9
0,123	0,24	0,176	602	Y_{10}
0,111	0,26	0,176	602	Y_{11}
0,123	0,26	0,176	602	Y_{12}
0,111	0,24	0,194	602	Y_{13}
0,123	0,24	0,194	602	Y_{14}
0,111	0,26	0,194	602	Y_{15}
0,123	0,26	0,194	602	Y_{16}
0,117	0,25	0,185	573	Y_{17}
0,117	0,25	0,185	573	Y_{18}
0,108	0,25	0,185	573	Y_{19}
0,126	0,25	0,185	573	Y_{20}
0,117	0,23	0,185	573	Y_{21}
0,117	0,27	0,185	573	Y_{22}
0,117	0,25	0,171	573	Y_{23}
0,117	0,25	0,199	573	Y_{24}
0,117	0,25	0,185	531	Y_{25}
0,117	0,25	0,185	615	Y_{26}

A análise estatística dos resultados foi realizada no *software Statistica* (STATSOFT, 1997), efetuando-se uma análise de variância para cada uma das respostas. Os parâmetros com nível de significância do teste t de Student superior a 5% foram desprezados e considerados não relevantes. A Tabela 4.2 mostra os resultados da análise de variância, em que os parâmetros físico-químicos entalpia de vaporização da água (λ) e calor específico do ar seco (Cp_f) foram os que influenciaram de forma mais significativa a umidade e temperatura das sementes na saída do leito.

Tabela 4.2: Resultados da análise de variância.

Variável	Parâmetro	Coef. regres.	Des. padrão	t de Student	Nível de signif.
T_s	Média	27,33103	0,094010	290,7235	0,000000
	x_2 (Cp_f)	0,24501	0,055129	4,4443	0,000225
	x_2^2 (Cp_f^2)	-0,18363	0,079490	-2,3101	0,031133
	x_4 (λ)	-0,30237	0,055129	-5,4847	0,000019
	x_4^2 (λ^2)	0,19694	0,079490	2,4775	0,021810
$\bar{M}$	Média	0,169703	0,000125	1354,516	0,000000
	x_2 (Cp_f)	-0,000320	0,000084	-3,823	0,000992
	x_4 (λ)	0,000352	0,000086	4,071	0,000548
	x_4^2 (λ^2)	-0,000310	0,000128	-2,420	0,024678

As Figuras 4.7, 4.8, 4.9 e 4.10 apresentam os perfis de umidade e temperatura das sementes em função do comprimento adimensional do leito para os vários valores de λ e Cp_f estabelecidos pelo planejamento experimental. Observa-se que as diferenças das temperaturas e umidades das sementes na saída do leito são maiores quando varia-se o valor do parâmetro Cp_f . Observa-se também que as diferenças entre as temperaturas das sementes na saída do leito para os valores extremos de λ e Cp_f são de 3,26% e 3,52%, respectivamente, ou seja, são maiores que as incertezas experimentais.

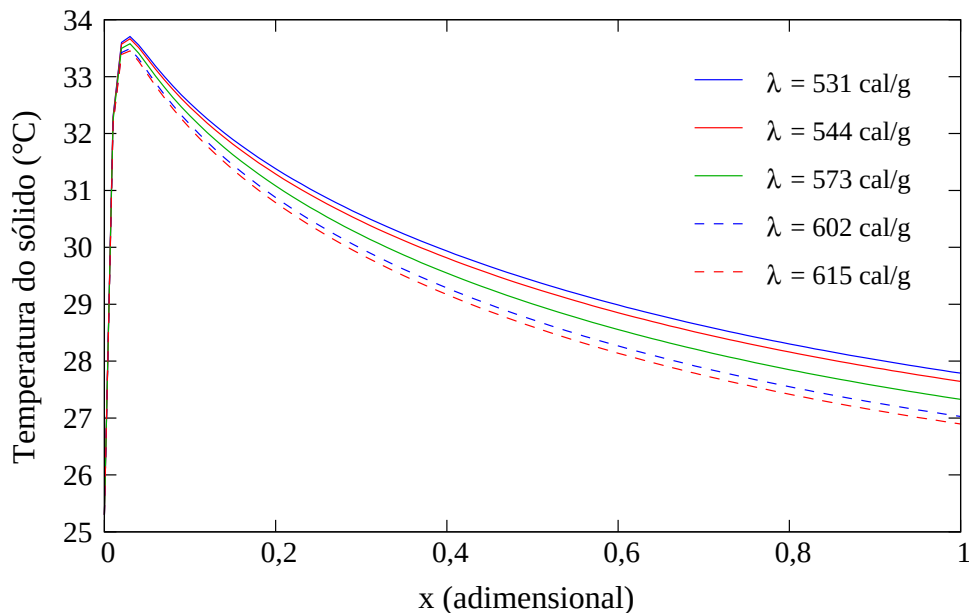


Figura 4.7: Perfis de temperatura das sementes para a entalpia de vaporização da água (λ) igual a 531 cal/g, 544 cal/g, 573 cal/g, 602 cal/g e 615 cal/g.

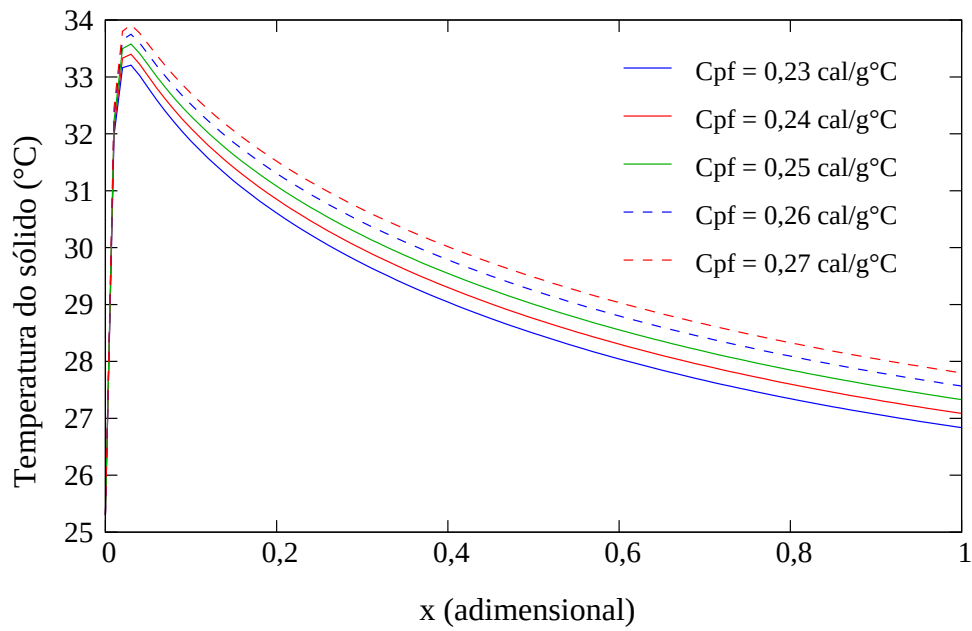


Figura 4.8: Perfis de temperatura das sementes para o calor específico do ar seco (C_{pf}) igual a $0,23 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,24 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,25 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,26 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e $0,27 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$.

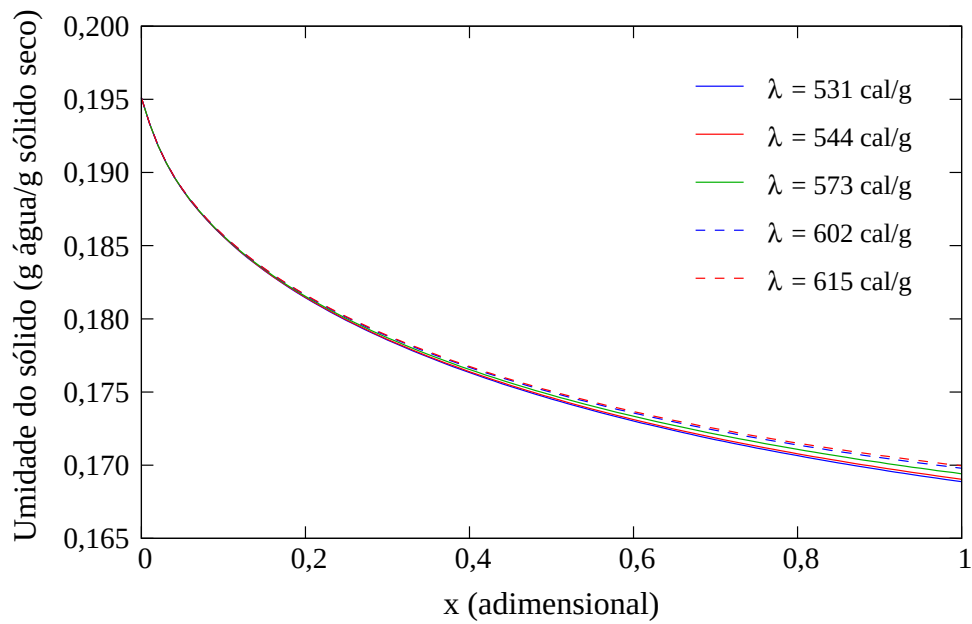


Figura 4.9: Perfis de umidade das sementes para a entalpia de vaporização da água (λ) igual a 531 cal/g , 544 cal/g , 573 cal/g , 602 cal/g e 615 cal/g .

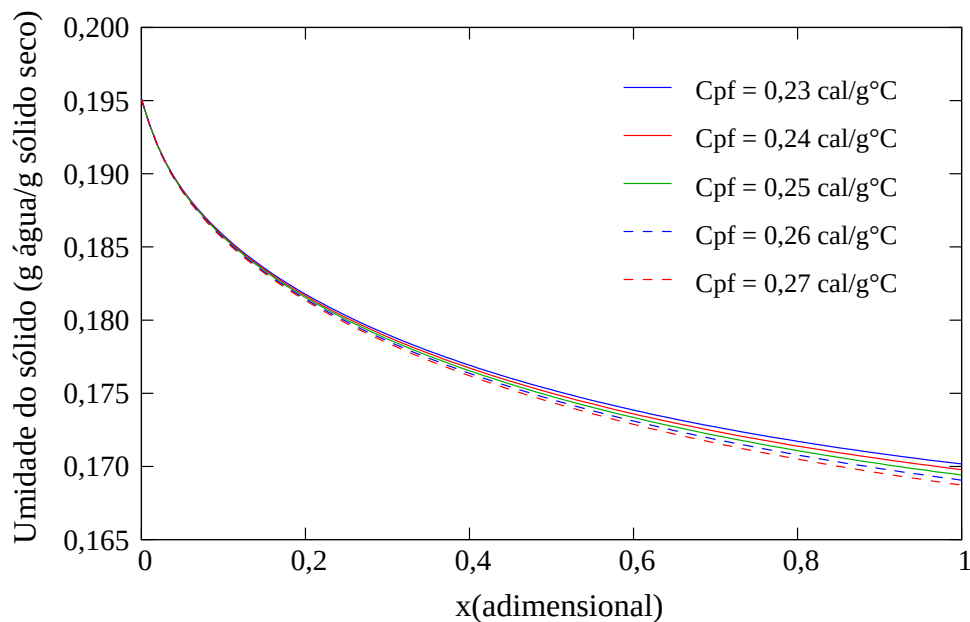


Figura 4.10: Perfis de umidade das sementes para o calor específico do ar seco (C_{pf}) iguais a $0,23 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,24 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,25 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$, $0,26 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$ e $0,27 \text{ cal/g}^\circ\text{C}$.

4.2.3 Análise de Sensibilidade por DASPK 3.0

Em contraposição ao método de análise de sensibilidade por planejamento de experimentos, o método por derivadas constitui o procedimento mais rigoroso, porém apresenta uma complexidade matemática muito maior. Entretanto, a vantagem deste método é que se obtém a sensibilidade ao longo do leito, permitido assim uma avaliação muito mais precisa de cada parâmetro.

As equações diferenciais do modelo a duas fases, juntamente com suas equações constitutivas e os coeficientes de sensibilidade, foram resolvidas utilizando o código DASPK 3.0 (LI; PETZOLD, 1999). O DASPK 3.0 é um código desenvolvido em FORTRAN que além de resolver sistema de EADs com índice zero, um ou dois, também executa o cálculo de coeficientes de sensibilidade absoluta de parâmetros e condições iniciais. O código e alguns exemplos podem ser obtidos no site dos desenvolvedores ¹.

O código oferece vários métodos para resolver sistemas de EADs e calcular coeficientes de sensibilidade, dependendo da complexidade do problema. Análises e comparações entre alguns métodos são apresentados por Li et al. (2000). Neste trabalho

¹www.engineering.ucsb.edu/~cse/software

foram utilizados os métodos padrão do pacote por serem simples e não apresentar grandes diferenças nos resultados ao se utilizar outras opções.

Além dos parâmetros que foram significativos na análise de sensibilidade por planejamento de experimentos, neste estudo analisou-se também outros parâmetros que poderiam influenciar o modelo: calor específico das sementes (Cp_s), calor específico do vapor d'água (Cp_v) e calor específico da água (Cp_l). O coeficiente de transferência de calor (h) não foi estudado, pois Barrozo (1995) analisou a sensibilidade do modelo a este parâmetro, utilizando várias equações da literatura, concluindo que este parâmetro não influencia de forma significativa o modelo a duas fases. Desse modo, os coeficientes de sensibilidade absolutos da temperatura e umidade das sementes com relação à perturbação de 10% nos parâmetros físico-químicos apresentados na Tabela 4.3 foram determinados.

Tabela 4.3: Parâmetros físico-químicos estudados na análise de sensibilidade por DASPK 3.0

Parâmetro	Valor
calor específico do ar seco (Cp_f)	0,25 cal/g°C
calor específico das sementes (Cp_s)	0,53 cal/g°C
calor específico do vapor d'água (Cp_v)	0,28 cal/g°C
calor específico da água (Cp_l)	1,0 cal/g°C
entalpia de vaporização da água (λ)	573 cal/g

A temperatura e umidade das sementes apresentaram grande sensibilidade absoluta com relação ao parâmetro calor específico do ar seco (Cp_f) como mostram as Figuras 4.11 a 4.13. Com relação aos parâmetros calor específico das sementes (Cp_s) e calor específico da água (Cp_l) os coeficientes de sensibilidade absolutos foram menores. Já os parâmetros calor específico do vapor d'água (Cp_v) e entalpia de vaporização da água (λ) influenciaram muito pouco os resultados da simulação (veja as Figuras 4.12 e 4.14).

Estes resultados mostram que o calor específico do ar seco (Cp_f) é o parâmetro mais importante a ser considerado, uma vez que a umidade e temperatura das sementes apresentaram maior sensibilidade absoluta a este parâmetro em toda a extensão do secador. Isto significa que pequenas variações no valor deste parâmetro têm forte influência nos resultados obtidos pelo modelo.

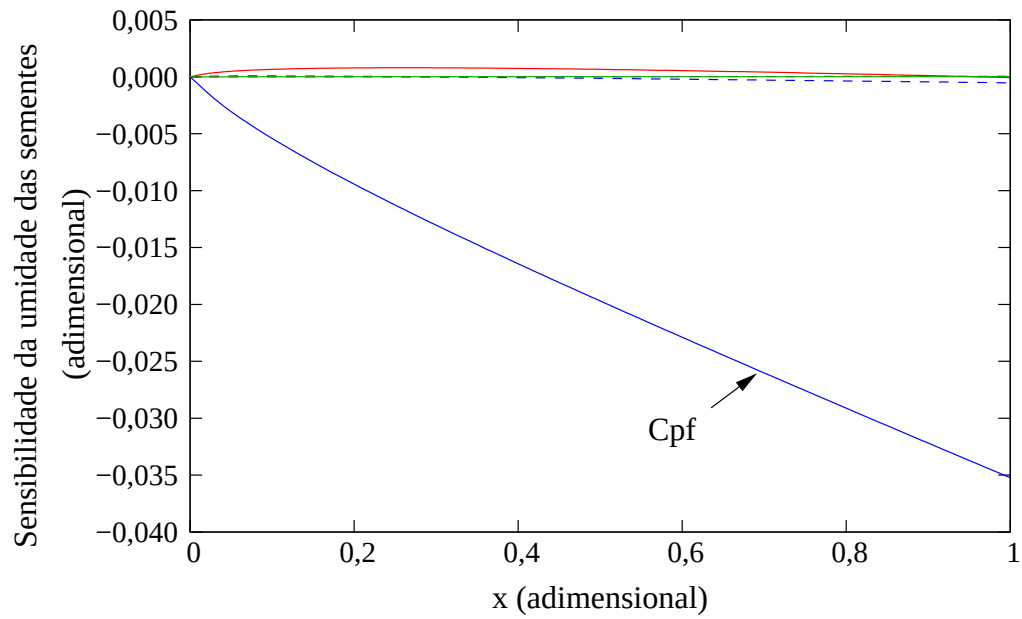


Figura 4.11: Sensibilidade da umidade das sementes com relação aos parâmetros C_{pf} , C_{pv} , C_{pl} e λ .

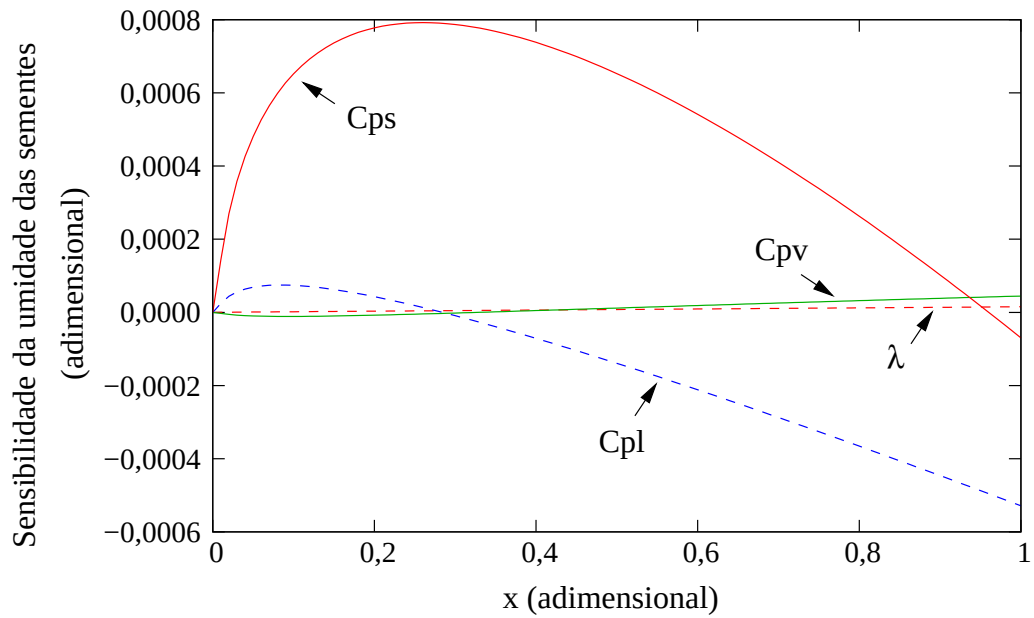


Figura 4.12: Sensibilidade da umidade das sementes com relação aos parâmetros C_{pv} , C_{pl} e λ .

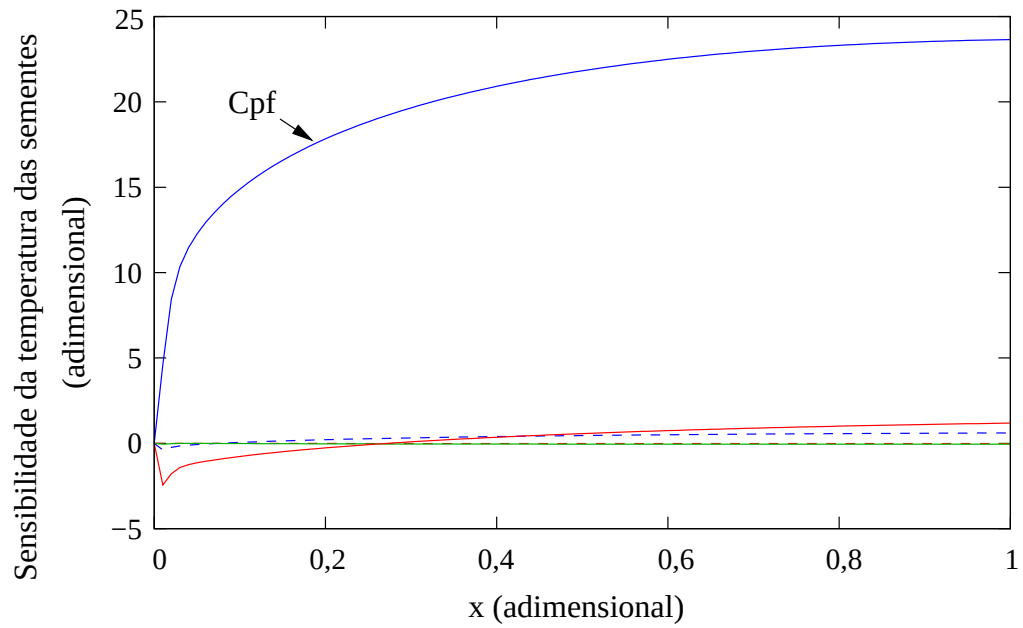


Figura 4.13: Sensibilidade da temperatura das sementes com relação aos parâmetros C_{pf} , C_{pv} , C_{pl} e λ .

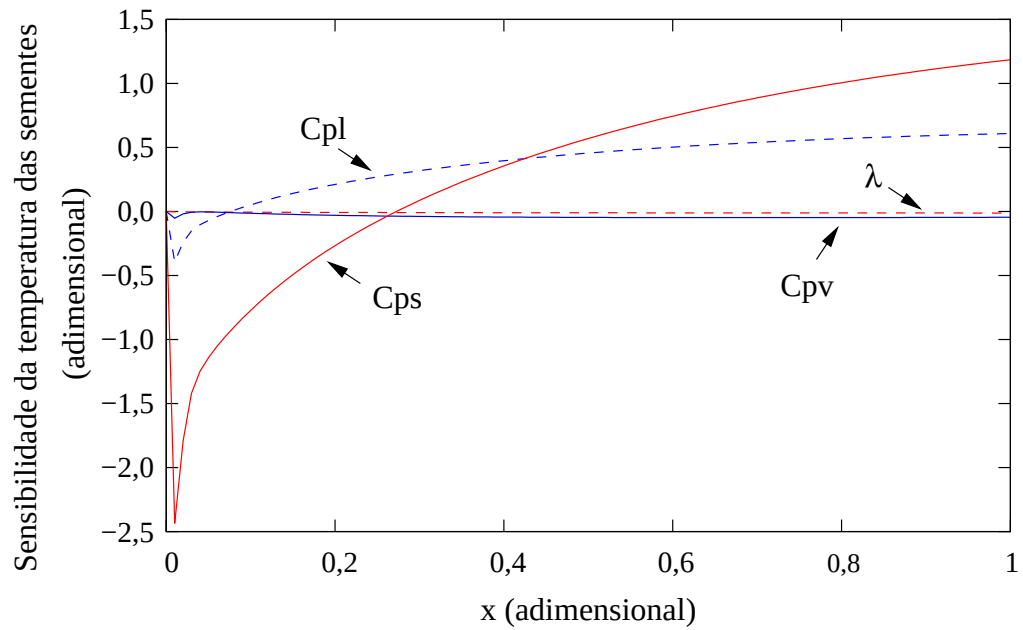


Figura 4.14: Sensibilidade da temperatura das sementes com relação aos parâmetros C_{pv} , C_{pl} e λ .

Apesar dos resultados da análise de sensibilidade por planejamento de experimentos indicar que o modelo do secador também apresenta grande sensibilidade a entalpia de vaporização da água (λ), os resultados obtidos pela análise por coeficientes de sensibilidade são mais importantes por serem mais completos, já que a análise por planejamento de experimentos é feita em apenas um ponto do secador, no final do leito, não havendo nenhuma informação do que acontece ao longo do secador. Entretanto, os parâmetros considerados neste trabalho têm grandezas completamente diferentes e um estudo futuro deve também considerar a análise de sensibilidade relativa ou a adimensionalização do modelo.

4.3 Conclusões

A partir dos modelos propostos obteve-se perfis com comportamento qualitativo semelhante, mostrando que a velocidade do ar é maior próxima à parede do leito. A equação que melhor representou os dados experimentais obtidos em leito deslizante contracorrente foi a de Fahien e Stankovich (1979), sendo a mesma incorporada ao modelo do secador de leito deslizante concorrente, e deste modo, observou-se que os perfis de temperatura e umidade das sementes representaram bem os dados experimentais;

Na análise de sensibilidade por planejamento de experimentos, o modelo a duas fases apresentou maior sensibilidade aos parâmetros entalpia de vaporização da água (λ) e calor específico do ar seco (Cp_f). Vale lembrar que a análise estatística utilizada neste estudo foi efetuada com os dados simulados na saída do leito e que nada se sabe sobre o que acontece ao longo do mesmo. Já na análise de sensibilidade usando o código DASPK 3.0, que leva em consideração coeficientes de sensibilidade absolutos, o parâmetro calor específico do ar seco (Cp_f) foi o que influenciou de forma mais significativa o modelo.

CAPÍTULO 5

Conclusões e Sugestões

5.1 Conclusões

Diante os resultados obtidos neste trabalho, foi possível concluir que:

- O modelo a duas fases representa adequadamente a secagem em leito deslizante com escoamentos concorrentes, entretanto, as hipóteses de perfil plano de velocidade do ar e parâmetros físico-químicos constantes ao longo do leito limitam a precisão dos resultados obtidos pelo modelo;
- Utilizando-se de uma revisão da literatura mostrou-se que o perfil radial de porosidade em leitos empacotados, com baixa razão d_T/d_p , possui um comportamento não uniforme, indo de 1 na parede, até o valor médio no centro, de modo oscilatório amortecido. Isto se deve ao arranjo peculiar das partículas próximas à parede, sendo mais evidenciado em empacotamentos com recheios esféricos;
- Tanto o perfil de velocidade radial calculado utilizando uma equação empírica quanto os obtidos através da equação da quantidade de movimento apresentaram comportamento qualitativo semelhante, mostrando que a velocidade do ar é maior próxima à parede, sendo que a equação de Fahien e Stankovich (1979) foi a que forneceu melhor ajuste aos dados experimentais;

- A equação de Fahien e Stankovich (1979) incorporada ao modelo a duas fases é apropriada para estudar e analisar os mecanismos de transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja, tanto quanto, o efeito do perfil de velocidade do ar na operação de secagem em leito deslizante com escoamentos concorrentes. Os resultados simulados foram comparados aos dados experimentais obtidos na região central do secador para a temperatura do ar e umidade das sementes, tendo como resultado uma boa concordância;
- No estudo de sensibilidade por planejamento de experimentos, o modelo a duas fases apresentou maior sensibilidade aos parâmetros físico-químicos entalpia de vaporização da água (λ) e calor específico do ar seco (Cp_f). Já na análise por coeficientes de sensibilidade, usando o código DASPK 3.0, os resultados obtidos pelo modelo mostraram maior sensibilidade absoluta à perturbação do parâmetro calor específico do ar seco (Cp_f).
- As metodologias de análise de sensibilidade empregadas neste trabalho possuem uma grande gama de aplicações em outros problemas da Engenharia Química, devido a sua generalidade. Estudos de otimização de parâmetros e escolha de variáveis para controle de processos são dois exemplos de utilização destas técnicas.

5.2 Sugestões

Como sugestões para trabalhos futuros, têm-se:

- Estudo do efeito do perfil radial de velocidade do ar na modelagem dos leitos deslizantes com escoamentos contracorrentes e cruzados;
- Análise de sensibilidade relativa de parâmetros físico-químicos para as três configurações do leito deslizante;
- Uso de uma equação que represente a variação do parâmetro calor específico do ar seco com a temperatura ao longo do leito.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATHERTON, R. W.; SCHAIKER, R. B.; DUCOT, E. R. Statistical sensitivity analysis of models for chemical-kinetics. *AIChE J.*, v. 21, p. 441–448, 1975.

ATHIÉ, I. et al. *Conservação de grãos*. Campinas: Fundação Cargill, 1998.

BALDET, L.; VILELA, F. A. Armazenamento. *Revista Seed News*, n. 4, p. 28–33, 2000.

BARROZO, M. A. S. *Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos cruzados*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal de São Carlos, 1995.

BARROZO, M. A. S.; MURATA, V. V. Modelagem e simulação da secagem de sementes de soja em leito deslizante com escoamentos concorrentes e contracorrentes. In: *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*. Uberlândia: [s.n.], 1996. p. 213–220.

BENENATI, R. F.; BROSILOW, C. B. Void fraction distribution in beds of spheres. *AIChE J.*, v. 8, p. 359–362, 1962.

BRINKMAN, H. C. A calculation of the viscous forces exhibited by a flowing fluid on a dense swarm of particles. *Appl. Sci. Res.*, A1, p. 27–34, 1947.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. *Drying cereal grains*. Westport: The Avi Publishing Company, Inc., 1974.

BRUNS, R. E.; NETO, B. B.; SCARMINIO, I. S. *Como fazer experimentos*. Campinas: Editora Unicamp, 2003.

CAIRNS, E. J.; PRAUSNITZ, J. M. Velocity profiles in packed and fluidized beds. *Ind. Eng. Chem.*, v. 51, p. 11441–1444, 1959.

- CARVALHO, N. M.; NAKAGAWA, J. *Sementes: ciência, tecnologia e produção*. Jaboticabal: Funep, 2000.
- CARVALHO, N. M. A. *A secagem de sementes*. Jaboticabal: Funep, 1994.
- CELESTINO, S. M. C. *Transferência de calor e massa em leito deslizante e escoamentos concorrentes: secagem de sementes de soja*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 1998.
- DAUDIN, J. D. Calcul des cinétiques de séchage par l'air chaud des produits biologiques solides. *Sciences des Aliments*, v. 3, p. 1–36, 1983.
- FAHIEN, R. W.; STANKOVICH, I. An equation for the velocity profile in packed columns. *Chem. Eng. Sci.*, v. 34, p. 1350–1354, 1979.
- FELIPE, C. A. S. *Influência das variáveis de processo na qualidade de sementes de soja submetidas a secagem em leito deslizante e escoamentos concorrentes*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 1999.
- FELIPE, C. A. S.; BARROZO, M. A. S. Drying of soybean seeds in a concurrent moving bed: heat and mass transfer and quality analysis. *Drying Technology*, v. 21, p. 439–456, 2003.
- FREIRE, J. T.; GUBULIN, J. C. *Tópicos especiais em sistemas particulados*. São Carlos: Editora UFScar, 1986.
- FREIRE, J. T.; GUBULIN, J. C. *Tópicos especiais em sistemas particulados*. São Carlos: Editora UFScar, 1990.
- FURNAS, C. Flow of gases through beds of broken solids. *United States Department of Commerce, Bureau of Mines, Bulletin 307*, p. 74–83, 1929.
- GRATON, L. C.; FRASER, H. J. Systematic packing of spheres with particular relation to porosity and permeability. *J. Geol.*, v. 43, p. 785–909, 1935.
- HWANG, D.; BYUN, D. W.; ODMAN, M. T. An automatic differentiation technique for sensitivity analysis of numerical advection schemes in air quality models. *Atmospheric Environment*, v. 31, p. 879–888, 1997.
- HWANG, J. T. Sensitivity analysis in chemical kinetics by the method of polynomial approximations. *International Journal of Chemical Kinetics*, v. 15, p. 959–987, 1983.
- HWANG, J. T. et al. The green's function method of sensitivity analysis in chemical kinetics. *J. Chem. Phys.*, v. 69, p. 5180–5191, 1978.
- JOHNSON, G. W.; KAPNER, R. S. The dependence of axial dispersion on non-uniform flows in beds of uniform packing. *Chem. Eng. Sci.*, v. 45, p. 3329–3339, 1990.

LACERDA, A. F. *Secagem em leito deslizante concorrente: análise da qualidade das sementes de soja*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2002.

LEROU, J. J.; FROMENT, G. F. Velocity, temperature and conversion profiles in fixed bed catalytic reactors. *Chem. Eng. Sci.*, v. 32, p. 853–861, 1977.

LEVA, M.; GRUMMER, M. Pressure drop through packed tubes: Prediction of voids in packed tubes. *Chem. Eng. Prog.*, v. 43, p. 713–718, 1947.

LI, S.; PETZOLD, L. R. *Design of new DASPCK for sensitivity analysis*. Santa Barbara, 1999.

LI, S.; PETZOLD, L. R.; ZHU, W. Sensitivity analysis of differential-algebraic equations: a comparison of methods on a special problem. *Appl. Numer. Math.*, v. 32, p. 161–174, 2000.

MARIVOET, J.; TEODOROIU, P.; WAJC, S. J. Porosity, velocity and temperature profiles in cylindrical packed bed. *Chem. Eng. Sci.*, v. 29, p. 1836–1840, 1974.

MORALES, M.; SPINN, C. W.; SMITH, J. M. Velocities and effective thermal conductivities in packed beds. *Ind. Eng. Chem.*, v. 43, p. 225–231, 1951.

MURATA, V. V. *Caracterização simbólica de equações algébrico-diferenciais por um sistema de álgebra computacional com aplicações na engenharia química*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1996.

MYERS, R. H. *Response Surface Methodology*. Ann Arbor, Mich.: Edwards Brothers (Distributors), 1976.

NEGRINI, A. L.; FUELBER, A.; FREIRE, J. T. Fluid dynamics of air in a packed bed: velocity profiles and the continuum model assumption. *Brazilian J. Chem. Eng.*, v. 16, p. 421–432, 1999.

NETO, S. P. S. Expansão da demanda sustenta crescimento da produção. *Anuário Estatístico da Agricultura Brasileira*, p. 423–425, 2004.

PARK, K. J.; YADO, M. K. M.; BROD, F. P. R. Estudo de segagem de pera bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. *Revista Ciência e tecnologia de Alimentos*, v. 21, n. 3, p. 288–292, 2001.

ROBLEE, L. H. S.; BAIRD, R. M.; TIERNEY, J. W. Radial porosity variations in packed beds. *AIChE J.*, v. 4, p. 460–464, 1958.

SARTORI, D. J. M. *Transferência de calor em leito deslizante*. Tese (Doutorado) — Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1986.

SCHWARTZ, C. E.; SMITH, J. M. Flow distribution in packed beds. *Ind. Eng. Chem.*, v. 45, p. 1209–1218, 1953.

SOUZA, A. M. *Estudo fluidodinâmico e de transferência de calor e massa em leito deslizante contracorrente*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de Uberlândia, 2001.

STATSOFT. *Statistica 5.1*. Tulsa: Statsoft, Inc., 1997.

VALENÇA, G. C.; MASSARANI, G. Avaliação de secadores em fluxo concorrentes e contracorrentes. In: *Anais do XXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*. Uberlândia: [s.n.], 1996. p. 231–239.

VORTMEYER, D.; SCHUSTER, J. Evaluation of steady flow profiles in rectangular and circular packed beds by a variational method. *Chem. Eng. Sci.*, v. 38, p. 1691–1699, 1983.

ZOTIN, F. M. Z. *O efeito de parede em colunas de recheio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 1985.

ZOTIN, F. M. Z.; FREIRE, J. T. Efeito de parede em colunas de recheio. In: *Tópicos especiais em sistemas particulados*. São Carlos: Editora UFScar, 1986. v. 2, p. 347–392.

ZOTIN, F. M. Z.; SOUZA, R.; FREIRE, J. T. Efeito de parede no escoamento monofásico: perfil de porosidade radial. In: *Anais do XIII Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos*. São Paulo: [s.n.], 1985.

APÊNDICES

Apêndice A

Rotinas em Scilab das Equações de Velocidade

Equação de Vortmeyer e Schuster (1983)

```
clear;
function va = veloc3(r)
dtdp = (dt/2)/dp;
R = dt/2;

Re = Gf*dp/mi;
if Re > 0.1
    if Re <= 1
        n = 112.5-26.31*Re+10.97*Re*Re-0.1804*Re^3;
    elseif Re <= 1000
        n = -1803+201.62*(log(Re)+4)-3737*sqrt(log(Re)+4) ..
            +5399*(log(Re)+4)^(1/3);
    elseif Re > 1000
        n = 27
    end
end
```

```
    else
        printf('Re fora da faixa de validade da correlação \n');
    end

    g = 4*n/(4-n);
    aux1 = (n*dtdp-1)*(g*dtdp+1)/g^2;
    aux2 = n*((dtdp^2)/g+2*dtdp/g^2+2/g^3);
    aux3 = exp(g*dtdp)*(1-n*dtdp+2*n/g)/g^2;
    B = (dtdp^2)/(2*((dtdp^2)/2-aux1+aux2-aux3));
    aux4 = g*dtdp*(1-r/R);
    aux5 = 1-n*dtdp*(1-r/R);
    va = B*(1-exp(aux4)*aux5);
endfunction

dt = 8.0;//diâmetro do tubo (cm)
dp = 0.6;//diâmetro da partícula (cm)
rt = dt/2;//raio do tubo (cm)
Gf = 0.038*2;//fluxo mássico do ar (g/cm2.s)
mi = 0.185e-3;//viscosidade do ar (g/cm.s)

r = 0:0.01:rt;
for i=1:length(r)
    va(i) = veloc3(r(i));
    ra(i) = r(i)/rt;
end

xset('line style',2)
plot2d(ra,va,2),plot2d(-ra,va,2)
```

Equação de Johnson e Kapner (1990)

```
clear;
function [fi, kk]=pf(xrange, filbound, epsilon, nmax)
n = length(xrange);
h = (xrange(n)-xrange(1))/(n-1);

//estimativa inicial de fi e fik (var. auxiliar)
fi = -1*ones(n);
fik = -1*ones(n)

//condições de contorno
fi(n) = filbound;

printf('iterações iniciadas...aguarde!\n\n');

for k=1:nmax
    ke = 0; kk = k;

    //imprime a iteração se for múltipla de 10, inclusive.
    if modulo(kk,10) == 0 then
        printf('A iteração atual é %g.\n',k);
    end;

    for j = 1:n-1
        x(j) = (1-xrange(j))*delta/2;
        eps(j) = 0.38 + 0.62*exp(-1.70*x(j)^0.434)*cos(6.67*x(j)^1.13);
        Pm = 45*(delta^2)*((1-eps(j))^2)/(eps(j)^3);
    if j==1 then
        fik(j) = (4*fi(j+1)-h^2)/(4+h^2*Pm);
    else
        fik(j) = ((1-h/(2*xrange(j)))*fi(j-1)+(1+h/(2*xrange(j)))*fi(j+1)-h^2)/(2+h^2*Pm);
    end
    if abs(abs(fik(j))-abs(fi(j))) > epsilon then
        ke = ke + 1;
```

```
        end
        fi(j)=fik(j);
    end;
    if ke == 0 then
        break
    end
end
end
if kk == nmax then
    printf('0 número máximo de iterações %g foi alcançado \n\n',kk);
end
endfunction

Rp = 0.6/2; //raio da partícula (cm)
R  = 8.1/2; //raio do leito (cm)
mi = 0.185e-3; //viscosidade do ar (g/cm s)
Tf = 30; //temperatura do ar (oC)
rho = 1.2e-3*293.15/(Tf+273.15); //densidade do ar a oC (g/cm^3)
g = 980; //aceleração da gravidade (cm/s^2)
poros = 0.39; //porosidade do leito (adimensional)
delta = R/Rp; //aspecto de raio (adimensional)

//velocidade média do ar [cm/s]
v(1) = 74/poros;
v(2) = 98/poros;
v(3) = 111/poros;
v(4) = 125/poros;
v(5) = 142/poros;

for i=1:5
    dpdcsi = -1*rho*v(i)^2; //queda de pressão indep. do comprimento
    aux1 = Rp*delta^2*dpdcsi/(2*mi);
    aux2 = rho*g*Rp^2*delta^2/(mi);
    fator(i) = aux1 - aux2; // cálculo do fator de adimensionalização
end
```

```
//solução da EDO de 2a ordem por diferenças finitas
uL = 0;
nmax = 1000;
epsilon = 1e-14;
J = 400; //200 pontos na malha
X = 1;
h = X/J;
x128 = [0:h:X];
[u128,k128] = pf(x128,uL,epsilon,nmax);
u = u128;
for i=1:5
    u(:,i) = u128*fator(i)/v(i);
end

//posição radial (cm)
xx1 = [0;          1.5;      2.8;      4.05]/(R);

//velocidade do ar (m/s)
vv1 = [0.55 0.55; 0.73 0.79; 0.98 0.93; 0 0]*100/(poros*v(1));
vv2 = [0.77 0.77; 1.00 0.96; 1.29 1.25; 0 0]*100/(poros*v(2));
vv3 = [0.96 0.96; 1.10 1.09; 1.35 1.32; 0 0]*100/(poros*v(3));
vv4 = [1.13 1.13; 1.22 1.22; 1.45 1.49; 0 0]*100/(poros*v(4));
vv5 = [1.29 1.29; 1.38 1.46; 1.62 1.58; 0 0]*100/(poros*v(5));

for i=1:5
    xbase(i);
    xset('window',i)
    xset('font size',10);
    xset('thickness',2);
    xset('line style',1);
    plot2d(x128,u(:,i),2);
    plot2d(-1*x128,u(:,i),2);
end
```

```

xset('window',1)
xset('mark size',4);
plot2d(xx1,vv1(:,1),-2);
plot2d(-1*xx1,vv1(:,2),-2);
xset('window',2)
xset('mark size',4);
plot2d(xx1,vv2(:,1),-2);
plot2d(-1*xx1,vv2(:,2),-2);
xset('window',3)
xset('mark size',4);
plot2d(xx1,vv3(:,1),-2);
plot2d(-1*xx1,vv3(:,2),-2);
xset('window',4)
xset('mark size',4);
plot2d(xx1,vv4(:,1),-2);
plot2d(-1*xx1,vv4(:,2),-2);
xset('window',5)
xset('mark size',4);
plot2d(xx1,vv5(:,1),-2);
plot2d(-1*xx1,vv5(:,2),-2);

```

Equação de Fahien e Stankovich (1979)

```

clear;
function v = veloc(r)
alfa = (dt/2.0)/dp;
B = 0.45*alfa^1.5;
A1 = 1/(B+2)-(alfa-1)/(alfa*(B+1));
A2 = (alfa-1)/(alfa*(B+1));
A3 = 1.0/(B+2);
v = (A1 + A2*r^(B+1) - A3*r^(B+2))/(A1 + 2*A2/(B+3) - 2*A3/(B+4));
endfunction

dt = 8.0;//diâmetro do tubo (cm)
dp = 0.6;//diâmetro da partícula (cm)
rt = 0.04;//raio do tubo (m)

```

```
r = 0:0.01:1;
va = veloc(r);

//velocidade média do ar [m/s]
vm1 = 0.74;
vm2 = 0.98;
vm3 = 1.11;
vm4 = 1.25;
vm5 = 1.42;

//velocidade do ar (m/s)
v1 = [0.55 0.55; 0.73 0.79; 0.98 0.93; 0 0]/vm1;
v2 = [0.77 0.77; 1.00 0.96; 1.29 1.25; 0 0]/vm2;
v3 = [0.96 0.96; 1.10 1.09; 1.35 1.32; 0 0]/vm3;
v4 = [1.13 1.13; 1.22 1.22; 1.45 1.49; 0 0]/vm4;
v5 = [1.29 1.29; 1.38 1.46; 1.62 1.58; 0 0]/vm5;

//posição radial (m)
xx1 = [0;          0.015;      0.028;      0.04]/rt;
xx2 = [0;          -0.015;     -0.028;     -0.04]/rt;

xset('font size',10);
xset('thickness',2);
xset('mark size',4);
plot2d(xx1,[v1(:,1),v2(:,1),v3(:,1),v4(:,1),v5(:,1)],...
        [-1,-2,-3,-4,-5]);
plot2d(xx2,[v1(:,2),v2(:,2),v3(:,2),v4(:,2),v5(:,2)],...
        [-1,-2,-3,-4,-5]);

xset('line style',1)
plot2d(r,va,1),plot2d(-r,va,1)

xset('line style',3)
plot2d([-1 1],[1 1])
```

Apêndice B

Descrição do Vetor INFO do DASPK 3.0

O uso do vetor INFO (dimensão igual a 30) dá ao código detalhes de como o problema deve ser resolvido. O uso mais simples do DASPK 3.0 corresponde a atribuir 0 (zero) a todos os valores de INFO. Os principais parâmetros do código estão listados a seguir:

INFO(5) - Os métodos numéricos usados em DASPK 3.0 fazem uso de uma matriz de derivadas parciais do sistema de EADs (matriz jacobiana). Se for dada uma rotina (JAC) para avaliar essa matriz analiticamente atribua $\text{INFO}(5) = 0$, caso contrário, a mesma será aproximada por diferenças numéricas ($\text{INFO}(5) = 1, 2$, ou 3). Lembrando que essa matriz é apenas com respeito as variáveis de estado, excluindo as de sensibilidade.

INFO(11) - O DASPK 3.0 requer que os valores iniciais de Y e Y' sejam consistentes, ou seja, que $F(x, Y, Y', p) = 0$ em $x = 0$, incluindo as equações de sensibilidade. Se as condições iniciais são conhecidas precisamente atribua $\text{INFO}(11) = 0$, do contrário, em alguns casos, o DASPK 3.0 pode calculá-lo ($\text{INFO}(11) = 1, 2, 3, 4$ ou 5).

INFO(12) - Na solução do sistema de EADs, o DASPK 3.0 usa uma combinação do método BDF (Backward Differentiation Formula) e uma escolha de dois métodos de solução de sistema linear: interação de Newton com o método direto ($\text{INFO}(12) = 0$) ou interação de Newton com o método de Krylov ($\text{INFO}(12) = 1$).

INFO(19) - Armazena o número de parâmetros e/ou condições iniciais que serão analisados.

INFO(20) - A avaliação das equações de sensibilidade pode ser feita de quatro maneiras: por diferenças finitas ao centro ($\text{INFO}(20) = 0$), por diferenças finitas a frente ($\text{INFO}(20) = 1$), analiticamente ($\text{INFO}(20) = 2$) ou por diferenciação automática usando o código ADIFOR ($\text{INFO}(20) = 3$ ou 4).

INFO(21) - O valor padrão do fator de perturbação usado na aproximação por diferenças finitas para as equações da sensibilidade é 10^{-3} . Para mudar este valor atribua $\text{INFO}(21) = 1$ e $\text{RWORK}(16)$ igual ao valor desejado.

INFO(22) - Número de parâmetros analisados que aparece na subrotina RES.

INFO(25) - Existem três métodos para resolver o sistema não linear originado do método BDF:

- Método silmutâneo corretor ($\text{INFO}(25) = 0$): As EADs e as equações de sensibilidade são resolvidas simultaneamente;
- Método escalonado corretor ($\text{INFO}(25) = 1$): Em cada passo, primeiro são resolvidas as EADs, depois as equações de sensibilidade são resolvidas a cada interação de Newton;
- Método escalonado direto ($\text{INFO}(25) = 2$): Em cada passo, primeiro são resolvidas as EADs, depois o sistema linear das equações de sensibilidade são resolvidas diretamente por uma interação. Neste método, o jacobiano será avaliado e fatorado em cada passo.

Apêndice C

Rotinas em FORTRAN da Análise de Sensibilidade

```
PROGRAM MAIN
  IMPLICIT DOUBLE PRECISION (A-H,O-Z)
  EXTERNAL RESH,JAC
  PARAMETER (NY = 4) !número de equações do modelo
  PARAMETER (NP = 5) !número de parâmetros analisados
  PARAMETER (NEQ = NY*(NP+1)) !número total de equações
  PARAMETER (LRW = 500)
  PARAMETER (LIW = 50)
  DIMENSION Y(NEQ),RWORK(LRW),IWORK(LIW),YPRIME(NEQ),DELTA(NEQ)
  DIMENSION INFO(30),SENPAR(NP)
  COMMON/propriedades/Epslon,Ral,RDs,dp,Fhi,Gs,vs,
#           Gf,h,a,Visc,Rkf,Rhos,Rho
  COMMON/condinicial/Wo,Tfo,RMo,Tso

  !arquivos de saída dos dados
  OPEN(unit=1,file='sol_drying.dat',status='unknown')
  OPEN(unit=2,file='sens_drying1.dat',status='unknown')
  OPEN(unit=3,file='sens_drying2.dat',status='unknown')
  OPEN(unit=4,file='sens_drying3.dat',status='unknown')
  OPEN(unit=5,file='sens_drying4.dat',status='unknown')
  OPEN(unit=6,file='sens_drying5.dat',status='unknown')

  DO i = 1,30
    INFO(i) = 0
  END DO
  INFO(19) = NP      !número de parâmetros analisados
  INFO(21) = 1      !muda o fator de perturbação
  RWORK(16) = 1.0D-1 !fator de perturbação
  INFO(22) = NP      !número de parâmetros analisados em RES
```

```

!parâmetros analisados
senpar(1) = 0.25E0 !calor especifico do ar seco (cal/g.C)
senpar(2) = 0.1E1 !calor especifico da agua liquida (cal/g.C)
senpar(3) = 0.28E0 !calor especifico do vapor d agua (cal/g.C)
senpar(4) = 0.53E0 !calor especifico do solido (cal/g.C)
senpar(5) = 573.E0 !entalpia de vaporização da água (cal/g)

Epsilon = 0.39E0 !porosidade do leito (adimensional)
Ral      = 64.E0 !altura do leito (cm)
RDs      = 7.62E0 !diâmetro do leito (cm)
dp       = 0.6E0 !diâmetro da partícula (cm)
Fhi      = 0.9E0 !esfericidade (adimensional)
Visc     = 0.185E-3 !viscosidade do ar (g/cm.s)
Rkf      = 0.637E-4 !condutividade térmica do ar (g.cm/C.s3)
Rhos     = 1.17E0 !densidade do sólido (g/cm3)
Rho      = 1.0E0 !densidade do fluido (g/cm3)
Gf       = 0.1073E0 !fluxo massico do ar seco (g ar seco/cm2.s)
Gs       = 0.0165E0 !fluxo massico do sol.seco (g sol.seco/cm2.s)
vs       = Gs/Rhos !velocidade do solido (cm/s)

!Condições iniciais das eq. do modelo
x=0.
y(1) = 0.014156 !umidade do ar (g agua/g ar seco)
y(2) = 0.20501 !umidade do solido (g água/g sol. seco)
y(3) = 42.1147 !temperatura do ar (C)
y(4) = 33.74 !temperatura do solido (C)
Taxa = Fma(Tfo,y(4),Wo,x)*Ral
aux1 = h*a*(y(3)-y(4))
aux2 = Gs*(senpar(4)+y(2)*senpar(2))
aux3 = Gf*(senpar(1)+y(1)*senpar(3))
yprime(1) = Taxa/Gf
yprime(2) = -Taxa/Gs
yprime(3) = -aux1*Ral/aux3
yprime(4) = (aux1*Ral)/aux2-Taxa*(senpar(5)+senpar(3)*y(3)
# -senpar(2)*y(4))/aux2

```

```
Wo = y(1)
RMo = y(2)
Tfo = y(3)
Tso = y(4)

!condições iniciais das eq. de sensibilidade
DO i = 5,neq
  y(i) = 0.0
  yprime(i) = 0.0
END DO

WRITE(1,140)x,y(1),y(2),y(3),y(4)
WRITE(2,140)x,y(5),y(6),y(7),y(8)
WRITE(3,140)x,y(9),y(10),y(11),y(12)
WRITE(4,140)x,y(13),y(14),y(15),y(16)
WRITE(5,140)x,y(17),y(18),y(19),y(20)
WRITE(6,140)x,y(21),y(22),y(23),y(24)

!calcula a área interfacial por unidade de volume
a = 6.*(1.-Epslon)/(Phi*dp)

!calcula o coeficiente de transferência de calor (Sartori)
Pr = Visc*senpar(1)*Rho/Rkf !número de Prandtl
Re = Gf*dp/Visc !número de Reynolds
h = 0.84*Pr**(1./3.)*Re**0.65*Rkf/dp

RTOL = 1.0d-8
ATOL = 1.0d-8

XOUT = 1.0d-2
DXOUT = 1.0d-2
NOUT = 100
```

```

DO 170 IOUT=1,NOUT
    CALL DDASPK (RES, NEQ, X, Y, YPRIME, XOUT, INFO, RTOL,
#           ATOL, IDID, RWORK, LRW, IWORK, LIW, RPAR, IPAR,
#           JAC, PSOL, SENPAR)

    WRITE(1,140)x,y(1),y(2),y(3),y(4)
    WRITE(2,140)x,y(5),y(6),y(7),y(8)
    WRITE(3,140)x,y(9),y(10),y(11),y(12)
    WRITE(4,140)x,y(13),y(14),y(15),y(16)
    WRITE(5,140)x,y(17),y(18),y(19),y(20)
    WRITE(6,140)x,y(21),y(22),y(23),y(24)
140    FORMAT(1X,E15.5,4(E16.5))

170    XOUT = XOUT + DXOUT
    CONTINUE
    STOP
    END

!subrotina que contém as equações do modelo
SUBROUTINE RES(X,Y,YPRIME,CJ,DELTA,IRES,RPAR,IPAR,SENPAR)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DIMENSION Y(*),YPRIME(*),DELTA(*),SENPAR(*)
COMMON/propriedades/Epslon,Ral,RDs,dp,Fhi,Gs,vs,
#           Gf,h,a,Visc,Rkf,Rhos,Rho
COMMON/condinicial/Wo,Tfo,RMo,Tso
Taxa = Fma(y(3),y(4),y(1),x)*Ral
aux1 = h*a*(y(3)-y(4))
aux2 = Gs*(senpar(4)+y(2)*senpar(2))
aux3 = Gf*(senpar(1)+y(1)*senpar(3))
delta(1) = yprime(1)-Taxa/Gf
delta(2) = yprime(2)+Taxa/Gs
delta(3) = yprime(3)+aux1*Ral/aux3
delta(4) = yprime(4)-(aux1*Ral)/aux2+Taxa*
#           (senpar(5)+senpar(3)*y(3)-senpar(2)*y(4))/aux2
RETURN
END

```

```

SUBROUTINE JAC(X,Y,YPRIME,PD,CJ,RPAR,IPAR,SENP, IJAC)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(A-H,O-Z)
DIMENSION Y(*),YPRIME(*),PD(4,4),SENP(*)
RETURN
END

```

```

DOUBLE PRECISION FUNCTION Fma(Tf,Ts,W,x)
IMPLICIT DOUBLE PRECISION(a-h,o-z)
COMMON/propriedades/Epslon,Ral,RDs,dp,Fhi,Gs,vs,
#                               Gf,h,a,Visc,Rkf,Rhos,Rho
COMMON/condinicial/Wo,Tfo,RMo,Tso
DATA B,D,Pi/4288.24,0.207667,3.141592654/
Rp = (dp/2.)**2
tempo = x*Ral/vs
TKf = Tf+273.15
TKs = Ts+273.15

```

```

!calcula a umidade relativa do ar
Pao = dexp(18.3036-3816.44/(TKs-46.13))/760.
aux4 = 695.1/760.
aux5 = (28.97/18.02)*W
Pab = (aux5/(1.+aux5))*aux4
UR = Pab/Pao
IF(UR.lt.0.) THEN
  WRITE(*,*)'Umidade negativa!'
  STOP
END IF

```

```

!calcula a umidade de equilíbrio (Halsey modificada)
aux6 = -dexp(-6.72d-3*Ts+3.02)
aux7 = dlog(UR)
Rmeq = 1.d-2*(aux6/aux7)**(1./1.508)

```

```

!calcula a difusividade efetiva (Arrhenius)
Def = D*dexp(-B/TKf)

```

```
!Isolando M no modelo difusivo; derivado M em relação à t e
!transformando a variável t em x, chega-se a equação para
!o cálculo da fma.
sum = 0
DO i = 1,50
    sum = sum+6./Rp*(RMo-Rmeq)*(Gs*Def/vs)*dexp(-(i**2)*
#      (Pi**2)/Rp*Def*tempo)
END DO
fma = sum
RETURN
END
```