



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



# Análise da Modelagem, Simulação e Otimização da Secagem em Leito Deslizante com Escoamentos Paralelos

Adriene Artiaga Pfeifer

Uberlândia - MG

2011



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

Análise da Modelagem, Simulação e  
Otimização da Secagem em Leito  
Deslizante com Escoamentos Paralelos

Adriene Artiaga Pfeifer

Uberlândia - MG

2011



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

# Análise da Modelagem, Simulação e Otimização da Secagem em Leito Deslizante com Escoamentos Paralelos

Adriene Artiaga Pfeifer

Orientadores:

Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo  
Profa. Dra. Valéria Viana Murata

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutor em Engenharia Química, área de concentração Desenvolvimento de Processos Químicos.

Uberlândia - MG

2011

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFU, MG - Brasil

---

- P525a    Pfeifer, Adriene Artiaga, 1982-  
2011      Análise da modelagem, simulação e otimização da secagem em leito  
             deslizante com escoamentos paralelos / Adriene Artiaga Pfeifer. - 2011.  
             203 f. : il.
- Orientadores: Marcos Antônio de Souza Barrozo e Valéria Viana  
             Murata.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal de Uberlândia, Programa  
             de Pós-Graduação em Engenharia Química.  
             Inclui bibliografia.
1. Engenharia química - Teses. 2. Soja - Secagem - Teses. 3. Semen-  
             tes - Qualidade - Teses. I. Barrozo, Marcos Antônio de Souza. II. Murata,  
             Valéria Viana. III. Universidade Federal de Uberlândia. Programa de Pós-  
             Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

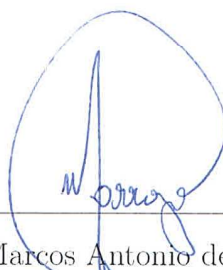
---

CDU: 66.0

# Análise da Modelagem, Simulação e Otimização da Secagem em Leito Deslizante com Escoamentos Paralelos

Tese de Doutorado submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia como parte dos requisitos necessários para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química em 31/10/2011.

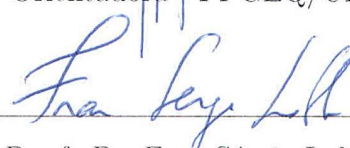
## Banca Examinadora



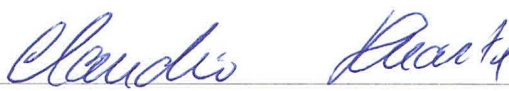
*Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo*  
Orientador - PPGEQ/UFU



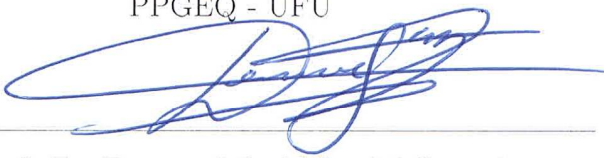
*Prof.ª Dr.ª Valéria Viana Murata*  
Orientadora - PPGEQ/UFU



*Prof. Dr. Fran Sérgio Lobato*  
FEQUI - UFU



*Prof. Dr. Claudio Roberto Duarte*  
PPGEQ - UFU



*Prof. Dr. Derneval José Mazzini Sartori*  
PPGEQ - UFSCar



*Prof. Dr. Rafael de Pelegrini Soares*  
PPGEQ - UFRGS



---

# Agradecimentos

Agradeço a Deus pelos recursos necessários dados para o cumprimento desta jornada.

Aos meus pais, Randolpho e Eleni, que sempre me incentivaram e aconselharam em todos os momentos da minha vida. Às minhas irmãs, meus sobrinhos e à minha avó Orávia que sempre me apoiaram.

Aos meus orientadores, Prof. Dr. Marcos Antonio de Souza Barrozo e Profa. Valéria Viana Murata pela orientação, pela sinceridade e incentivos em todos os momentos.

Aos Professores Fran Sérgio Lobato, Rodrigo Béttega, Cláudio Roberto Duarte e Edu Barbosa Arruda pela atenção dispensada e opiniões relevantes na conclusão deste trabalho.

Ao meu amigo e companheiro Ricardo pelo apoio, amizade e incentivo dado ao longo destes anos.

Aos meus amigos e companheiros de curso Ricardo, Davi, Sandra, Marcos, Ricardo Pires, José Luiz, Fabiano e Kássia, pelos momentos de descontração, alegria e ajuda.

À todos os funcionários da Faculdade de Engenharia Química pelo apoio.

Aos professores da Faculdade de Engenharia Química.

Ao Instituto Federal de Goiás pelo incentivo à qualificação.

À CAPES pela concessão da bolsa de estudo.



*“Quem conhece a sua ignorância revela a mais profunda sapiência. Quem ignora a sua ignorância vive na mais profunda ilusão.”*

Lao -Tsé



---

# SUMÁRIO

<b>Lista de Figuras</b>	<b>v</b>
<b>Lista de Tabelas</b>	<b>xiii</b>
<b>Nomenclatura</b>	<b>xv</b>
<b>Resumo</b>	<b>xv</b>
<b>Abstract</b>	<b>xv</b>
<b>1 Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2 Revisão Bibliográfica</b>	<b>5</b>
2.1 A Soja . . . . .	5
2.1.1 Dados Estatísticos . . . . .	5
2.1.2 O Processo de Germinação . . . . .	7
2.2 O Processo de Secagem . . . . .	9
2.3 Modelagem da Transferência de Massa e Energia . . . . .	11
2.3.1 Equações Constitutivas . . . . .	14
2.3.2 Trabalhos sobre Leito Deslizante . . . . .	17

2.4	Qualidade das Sementes . . . . .	20
2.4.1	Planejamento de Experimentos e Metodologia da Superfície de Resposta . . . . .	22
2.4.2	Secador de Múltiplos Estágios . . . . .	25
2.5	Otimização . . . . .	26
2.6	Efeito da Parede e Fluidodinâmica Computacional . . . . .	30
2.6.1	Efeito da Parede . . . . .	30
2.6.2	A Técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD) . . . . .	32
<b>3</b>	<b>Metodologia</b>	<b>37</b>
3.1	Modelagem Matemática . . . . .	37
3.2	Balances de Massa e Energia para a Fase Fluida . . . . .	38
3.2.1	Balanco de Massa de Vapor na Fase Fluida . . . . .	43
3.2.2	Balanco de Energia na Fase Fluida . . . . .	43
3.3	Balanco de Massa e Energia para a Fase Sólida . . . . .	45
3.3.1	Balanco de Massa de Umidade na Fase Sólida . . . . .	47
3.3.2	Balanco de Energia na Fase Sólida . . . . .	47
3.4	Resumo . . . . .	49
3.5	Modelagem dos Estudos de Casos . . . . .	50
3.5.1	Modelo 1 . . . . .	50
3.5.2	Modelo 2 . . . . .	53
3.5.3	Modelo 3 . . . . .	53
3.5.4	Modelo 4 . . . . .	56
3.5.5	Modelo 5 . . . . .	58
3.5.6	Perfil de Porosidade . . . . .	59
3.5.7	Perfil de Velocidade . . . . .	59
3.6	Fluidodinâmica Computacional . . . . .	61
3.6.1	Geração da Malha Computacional . . . . .	61

---

3.6.2	Modelagem de Escoamentos Multifásicos . . . . .	62
3.7	Etapas . . . . .	71
<b>4</b>	<b>Simulação dos Modelos</b>	<b>73</b>
4.1	Condições Experimentais . . . . .	73
4.2	Solução Numérica . . . . .	77
4.2.1	Resumo dos Modelos . . . . .	77
4.3	Solução do Modelo 1 . . . . .	79
4.3.1	Escoamento Concorrente . . . . .	79
4.3.2	Escoamento Contracorrente . . . . .	81
4.4	Solução do Modelo 2 . . . . .	82
4.4.1	Escoamento Concorrente . . . . .	82
4.4.2	Escoamento Contracorrente . . . . .	84
4.5	Solução dos Modelos 3 e 4 . . . . .	86
4.5.1	Escoamento Concorrente . . . . .	86
4.5.2	Escoamento Contracorrente . . . . .	91
4.6	Resultados do Estudo sobre a Fluidodinâmica Computacional . . . . .	94
4.6.1	Perfil de Porosidade . . . . .	96
4.6.2	Perfil de Velocidade . . . . .	98
4.7	Conclusões . . . . .	100
<b>5</b>	<b>Análise da Qualidade das Sementes e do Desempenho da Secagem</b>	<b>103</b>
5.1	Qualidade das Sementes . . . . .	103
5.1.1	Influência das Variáveis de Secagem na Qualidade das Sementes e na Remoção de Umidade . . . . .	104
5.1.2	Equações para os Escoamentos Concorrente e Contracorrente . .	107
5.2	Resultados . . . . .	115
5.2.1	Escoamento Concorrente . . . . .	115

---

5.2.2	Perfis de Temperatura e Umidade do Escoamento Concorrente .	120
5.2.3	Escoamento Contracorrente . . . . .	121
5.2.4	Perfis de Temperatura e Umidade do Escoamento Contracorrente	126
5.3	Otimização . . . . .	127
5.3.1	Maximização dos Índices de Qualidade . . . . .	129
5.3.2	Maximização da Remoção de Umidade . . . . .	135
5.4	Conclusões . . . . .	144
<b>6</b>	<b>Conclusões e Sugestões</b>	<b>145</b>
6.1	Conclusões . . . . .	145
6.2	Sugestões para Trabalhos Futuros . . . . .	146
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>149</b>
<b>A</b>	<b>Equações Auxiliares</b>	<b>161</b>
<b>B</b>	<b>Dados Experimentais e Simulados de Temperatura e Umidade</b>	<b>165</b>
B.1	Gráficos Dados Experimentais . . . . .	165
B.1.1	Escoamento Concorrente . . . . .	165
B.1.2	Escoamento Contracorrente . . . . .	175
<b>C</b>	<b>Ajuste das Equações de Qualidade</b>	<b>181</b>
C.1	Escoamento Concorrente . . . . .	181
C.2	Escoamento Contracorrente . . . . .	188
<b>D</b>	<b>Condições Operacionais Otimizadas</b>	<b>195</b>
D.1	Maximização dos Índices de Qualidade . . . . .	195
D.2	Maximização da Remoção de Umidade . . . . .	200

---

## LISTA DE FIGURAS

1.1	Área e Produção de cereais, leguminosas e oleaginosas no Brasil - 1980 a 2011 . . . . .	2
2.1	Produção de soja em grão em diferentes estados do Brasil . . . . .	6
2.2	Variações absolutas das principais culturas em comparação com a safra anterior . . . . .	6
2.3	Aspecto de uma semente de soja . . . . .	7
2.4	Germinação e emergência . . . . .	8
2.5	Perdas de qualidade entre as etapas de colheita e armazenagem . . . . .	9
2.6	Curva de secagem . . . . .	10
2.7	Curva da taxa de secagem . . . . .	10
2.8	Configurações do leito deslizante. . . . .	12
2.9	Esquema do secador concorrente de múltiplos estágios. . . . .	26
3.1	Esquema de um meio poroso. . . . .	38
3.2	Malha computacional do secador de leito deslizante com escoamento contracorrente. . . . .	62
4.1	Variação do calor específico do ar seco com a temperatura. . . . .	76
4.2	Variação do calor específico da água líquida com a temperatura. . . . .	76

4.3	Variação do calor específico do vapor d'água com a temperatura. . . . .	76
4.4	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 3, para o escoamento concorrente - Modelo 1. . . . .	79
4.5	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 5, para o escoamento concorrente - Modelo 1. . . . .	80
4.6	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 21, para o escoamento contracorrente - Modelo 1. . . . .	81
4.7	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 24, para o escoamento contracorrente - Modelo 1. . . . .	82
4.8	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 3, para o escoamento concorrente - Modelo 2. . . . .	83
4.9	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 13, para o escoamento concorrente - Modelo 2. . . . .	83
4.10	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 20, para o escoamento contracorrente - Modelo 2. . . . .	85
4.11	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 27, para o escoamento contracorrente - Modelo 2. . . . .	85
4.12	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 10, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	87
4.13	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 13, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	87
4.14	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 7, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	88
4.15	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 8, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	89
4.16	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 5, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	90
4.17	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 16, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	90
4.18	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 25, para o escoamento contracorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	91
4.19	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 21, para o escoamento contracorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	92

4.20	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 20, para o escoamento contracorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	93
4.21	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 26, para o escoamento contracorrente - Modelo 3 e 4. . . . .	93
4.22	Esquema do leito deslizante com escoamento contracorrente. . . . .	94
4.23	Esquema do leito deslizante com posição para a análise. . . . .	95
4.24	Perfil de fração de volume de sólidos. . . . .	96
4.25	Perfis de porosidade para a linha 4 do Teste E. . . . .	97
4.26	Perfis de porosidade para a linha 12 do teste B. . . . .	97
4.27	Perfis de velocidade do ar para a linha 12 do Teste A. . . . .	98
4.28	Perfis de velocidade do ar para a linha 7 do Teste C. . . . .	99
4.29	Perfis de velocidade do ar para a linha 13 do Teste D. . . . .	99
5.1	Esquema do secador concorrente de múltiplos estágios. . . . .	105
5.2	Esquema do secador contracorrente de múltiplos estágios. . . . .	105
5.3	Superfície de resposta para o índice de germinação em função de $T_{f0}$ e $Q_s$ - Concorrente. . . . .	109
5.4	Superfície de resposta para o índice de germinação em função de $V$ e $T_{f0}$ - Contracorrente. . . . .	110
5.5	Superfície de resposta para o índice de germinação em função de $V$ e $Q_s$ - Contracorrente. . . . .	110
5.6	Superfície de resposta para o índice de vigor em função de $UR$ e $T_{f0}$ - Concorrente. . . . .	111
5.7	Superfície de resposta para o índice de vigor em função de $UR$ e $Q_s$ - Contracorrente. . . . .	112
5.8	Superfície de resposta para o índice de vigor em função de $UR$ e $T_{f0}$ - Contracorrente. . . . .	112
5.9	Superfície de resposta para o índice de sementes não fissuradas em função de $UR$ e $Q_s$ - Concorrente. . . . .	113
5.10	Superfície de resposta para o índice de sementes não fissuradas em função de $UR$ e $Q_s$ - Contracorrente. . . . .	114

5.11 Superfície de resposta para o índice de sementes não fissuradas em função de $V$ e $Q_s$ - Contracorrente. . . . .	115
5.12 Equação do índice de germinação sem a variação com o tamanho do leito.	116
5.13 Equação do índice de germinação com a variação com o tamanho do leito.	116
5.14 Equação do índice de vigor sem a variação com o tamanho do leito. . .	117
5.15 Equação do índice de vigor com a variação com o tamanho do leito. . .	117
5.16 Equação do índice de sementes sem fissuras sem a variação com o tamanho do leito. . . . .	118
5.17 Equação do índice de sementes sem fissuras com a variação com o tamanho do leito. . . . .	118
5.18 Remoção de umidade para o escoamento concorrente. . . . .	119
5.19 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 8. . . . .	120
5.20 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 15. . . . .	121
5.21 Equação do índice de germinação sem a variação com o tamanho do leito.	122
5.22 Equação do índice de germinação com a variação com o tamanho do leito.	122
5.23 Equação do índice de vigor sem a variação com o tamanho do leito. . .	123
5.24 Equação do índice de vigor com a variação com o tamanho do leito. . .	123
5.25 Remoção de umidade para o escoamento contracorrente. . . . .	124
5.26 Equação do índice de sementes sem fissuras sem a variação com o tamanho do leito. . . . .	125
5.27 Equação do índice de sementes sem fissuras com a variação com o tamanho do leito. . . . .	125
5.28 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 1. . . . .	126
5.29 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 5. . . . .	127
5.30 Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	129
5.31 Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	130

5.32	Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	130
5.33	Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	131
5.34	Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade. . .	132
5.35	Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	132
5.36	Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	133
5.37	Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade. . .	133
5.38	Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	134
5.39	Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	134
5.40	Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	135
5.41	Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização dos índices de qualidade. . . . .	135
5.42	Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade. . . . .	136
5.43	Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade. . . . .	137
5.44	Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade. . . . .	137
5.45	Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade. . . . .	138
5.46	Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento concorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade. . . . .	138

5.47	Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade. . .	139
5.48	Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade. . . . .	140
5.49	Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade. . . . .	140
5.50	Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade. . .	141
5.51	Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade. . . . .	142
5.52	Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade. .	142
5.53	Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade. . . . .	143
5.54	Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade. . . . .	143
B.1	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 1 . . . . .	166
B.2	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 2 . . . . .	166
B.3	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 3 . . . . .	167
B.4	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 4 . . . . .	167
B.5	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 5 . . . . .	168
B.6	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 6 . . . . .	168
B.7	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 7 . . . . .	169
B.8	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 8 . . . . .	169
B.9	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 9 . . . . .	170
B.10	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 10 . . . . .	170
B.11	Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 11 . . . . .	171

B.12 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 12 . . . . .	171
B.13 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 13 . . . . .	172
B.14 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 14 . . . . .	172
B.15 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 15 . . . . .	173
B.16 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 16 . . . . .	173
B.17 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 17 . . . . .	174
B.18 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 18 . . . . .	174
B.19 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 19 . . . . .	175
B.20 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 20 . . . . .	176
B.21 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 21 . . . . .	176
B.22 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 22 . . . . .	177
B.23 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 23 . . . . .	177
B.24 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 24 . . . . .	178
B.25 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 25 . . . . .	178
B.26 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 26 . . . . .	179
B.27 Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 27 . . . . .	179



---

## LISTA DE TABELAS

2.1	Valores das constantes $a$ e $b$ da Equação 2.15. . . . .	15
2.2	Equações para umidade de equilíbrio. . . . .	15
2.3	Matriz de Planejamento de um PCC com quatro variáveis. . . . .	23
2.4	Representação dos mecanismos de mutação no algoritmo de Evolução Diferencial. . . . .	29
3.1	Fase Secundária - Soja . . . . .	62
4.1	Condições operacionais dos experimentos. . . . .	74
4.2	Propriedades do leito e da semente de soja. . . . .	75
4.3	Parâmetros das equações de calor específico . . . . .	75
4.4	Resumo dos modelos. . . . .	78
5.1	Matriz do PCC com quatro variáveis. . . . .	106
C.1	Respostas do índice de germinação para o escoamento concorrente. . . .	182
C.2	Respostas do índice de vigor para o escoamento concorrente. . . . .	183
C.3	Respostas do índice de sementes não fissuradas para o escoamento concorrente. . . . .	184
C.4	Resultados da regressão para o índice de germinação. . . . .	185

C.5	Resultados da regressão para o índice de vigor. . . . .	186
C.6	Resultados da regressão para o índice de sementes não fissuradas. . . .	187
C.7	Respostas do índice de germinação para o escoamento contracorrente. .	188
C.8	Respostas do índice de vigor para o escoamento contracorrente. . . . .	189
C.9	Respostas do índice de sementes não fissuradas para o escoamento con- corrente. . . . .	190
C.10	Resultados da regressão para o índice de germinação. . . . .	191
C.11	Resultados da regressão para o índice de vigor. . . . .	192
C.12	Resultados da regressão para o índice de sementes não fissuradas. . . .	193
D.1	Resultados da otimização com função objetivo de maximizar os índices de qualidade, para o escoamento concorrente de 1 estágio. . . . .	196
D.2	Resultados da otimização com função objetivo de maximizar os índices de qualidade, para o escoamento concorrente de N estágios. . . . .	197
D.3	Resultados da otimização com função objetivo de maximizar os índices de qualidade, para o escoamento contracorrente de 1 estágio. . . . .	198
D.4	Resultados da otimização com função objetivo de maximizar os índices de qualidade, para o escoamento contracorrente de N estágios. . . . .	199
D.5	Resultados da otimização com função objetivo de maximizar a remoção de umidade, para o escoamento concorrente de 1 estágio. . . . .	200
D.6	Resultados da otimização com função objetivo de maximizar a remoção de umidade, para o escoamento concorrente de N estágios. . . . .	201
D.7	Resultados da otimização com função objetivo de maximizar a remoção de umidade, para o escoamento contracorrente de 1 estágio. . . . .	202
D.8	Resultados da otimização com função objetivo de maximizar a remoção de umidade, para o escoamento contracorrente de N estágios. . . . .	203

---

# NOMENCLATURA

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

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

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

$F$  - sementes sem fissuras, -

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

$G$  - germinação, -

$G_f$  - fluxo mássico de ar,  $ML^{-2}T^{-1}$

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

$h$  - coeficiente de transferência de calor,  $ML^{-1}T^{-3}$

$L$  - altura do leito,  $L$

$M$  - umidade absoluta do sólido, -

$M$  - umidade média volumétrica do sólido, -

$MR$  - adimensional de umidade, -

$Nu$  - número de Nusselt, -

$Pr$  - número de Prandtl, -

$Q_s$  - vazão de sólidos,  $MT^{-1}$

$r$  - coordenada radial,  $L$

$r^2$  - coeficiente quadrático de correlação, -

$R$  - raio do secador,  $L$

$Re$  - número de Reynolds, -

$t$  - variável tempo,  $T$

$T$  - temperatura,  $\theta$

$UR$  - umidade relativa do ar, -

$v$  - velocidade intersticial do ar,  $LT^{-1}$

$V$  - vigor, -

$W$  - umidade absoluta do ar, -

$x$  - variáveis de secagem adimensionais, -

$z$  - coordenada da direção do escoamento do sólido,  $L$

$Z = z/L$  - comprimento adimensional, -

### **Letras Gregas**

$\lambda$  - entalpia de vaporização da água,  $L^2T^{-2}$

### **Subscritos**

**0** - condições de entrada

**ef** - efetiva

**eq** - equilíbrio

**f** - fluido ou ar

**l** - líquido

**s** - sólido

**v** - vapor



---

## Resumo

A produção brasileira de soja aumenta a cada ano, sendo armazenada em lugares seguros de modo a suprir demandas futuras ou colheitas mal sucedidas. O processo de secagem deve reduzir o teor de umidade e manter as qualidades físicas e fisiológicas (fissuras, germinação e vigor), principalmente quando o objetivo é o replantio. A técnica do leito deslizante demonstra ser uma alternativa segura para a manutenção da qualidade das sementes e redução da umidade em menor tempo. A literatura apresenta diversos estudos sobre as configurações do escoamento entre o sólido e o fluido, e as variáveis operacionais que influenciam na qualidade das sementes de soja. Funções empíricas são utilizadas para representar os índices de germinação, vigor e de sementes sem fissuras como funções das variáveis de secagem, sendo as mais comumente analisadas: a velocidade intersticial do ar, temperatura de entrada do ar, vazão de sólidos e umidade relativa do ar de entrada. Uma forma de reduzir o desgaste das sementes de soja é dividir o leito do secador em estágios, gerando um secador de múltiplos estágios. A modelagem matemática que descreve a transferência de massa e energia em secadores de leito deslizante são largamente apresentados na literatura. Associa-se a este modelo, as equações dos índices de qualidade, além das equações constitutivas para o coeficiente de transferência de calor entre as duas fases, a cinética de secagem e o conteúdo de umidade no equilíbrio do material sólido. Verifica-se que a modelagem e a simulação dos modelos apresentados na literatura necessitam ser melhor estudadas. Para isso, esta tese buscou analisar a modelagem, simulação e otimização da transferência de massa e energia entre o ar e sementes de soja em leito deslizante com escoamentos paralelos, buscando encontrar condições satisfatórias que promovam a manutenção da qualidade das sementes e melhores taxas de remoção de umidade. Além disso, a modelagem buscou melhorar a concordância entre os modelos utilizados e os dados experimentais obtidos na literatura. A modelagem matemática generalizada gerou 5 modelos, que propunham a variação das propriedades físico-químicas ( $C_{pf}$ ,  $C_{pv}$ ,  $C_{pl}$  e  $C_{ps}$ ) constantes ou não, variação da porosidade do leito e do perfil de velocidade, e estes forneceram dados importantes para a análise do modelo de secagem. De acordo com as

simulações, os resultados apresentaram concordância em relação àqueles modelos que consideravam a propriedade calor específico do sólido ( $C_{ps}$ ) constante. Esta propriedade foi representada por uma função da umidade do sólido, enquanto que as outras propriedades eram funções explícitas da temperatura. De forma geral, foi observado que as propriedades físico-químicas, perfil de porosidade e de velocidade influenciam nos perfis de umidade e temperatura do sólido e do fluido, para todos os experimentos realizados, confirmando que as hipóteses adotadas em cada modelo geram modificações significativas nos resultados de secagem. A fluidodinâmica computacional mostrou-se de grande ajuda para a verificação do efeito da parede nos perfis de porosidade e velocidade do fluido, confirmando que a suposição de perfil plano de velocidade da fase fluida, no modelo a duas fases, não é válida na faixa de ar analisada. Em relação ao estudo da qualidade das sementes de soja, quanto aos índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras, e do desempenho de secagem, observou-se que a utilização do secador de múltiplos estágios é bastante satisfatória em relação à elevação do potencial de secagem e manutenção da qualidade das sementes. O estudo da otimização do secador, por meio da técnica de Evolução Diferencial, obteve condições operacionais ótimas que maximizam os índices de qualidade ou a remoção de umidade. Assim, esta tese gerou dados de simulação e otimização que poderão ser utilizados para a melhoria dos modelos já apresentados na literatura e conseqüentemente, fornecer informações para a construção e melhoria de secadores, além de condições experimentais ótimas para o estudo da secagem em leito deslizante.

**Palavras-chave:** Leito deslizante, Modelagem matemática, Qualidade das sementes, Múltiplos estágios, Otimização.

---

# Abstract

The Brazilian soybean production increases every year, and its stored in safe places so as to meet future demands, or unsuccessful crops. The drying process must reduce the moisture content and maintain the physical and physiological qualities (seeds fissures, germination and vigor), especially when the objective is to replant. The technique of sliding bed proves to be a safe alternative for the maintenance of seed quality and reduction of moisture in less time. The literature presents several studies on different configurations of flow between the solid and fluid, and the operating variables that influence the quality of soybean seeds. Empirical functions are used to represent the germination, vigor and non-fissured seeds indices as functions of drying variables, which are: the interstitial air velocity, inlet air inlet temperature, solids flow rate and inlet relative humidity. Another method to reduce the damage on the soybean seed is to divide the bed of the dryer in stages, generating a multi-stage dryer. The mathematical model that describes the transfer of mass and energy in sliding bed dryers are widely reported in the literature. Associated with this model, the equations of the quality indices, in addition to the constitutive equations for the coefficient of heat transfer between the two phases, the drying kinetics and equilibrium moisture content in the solid material. The modeling and simulation of the models presented in the literature need to be better studied. To this end, this thesis examine the modeling, simulation and optimization of energy and mass transfer between air and soybean seeds in parallel flow sliding bed, searching for satisfactory conditions that promote the maintenance of seed quality and better removal rates moisture. In addition, the modeling sought to improve the agreement between the models used and the experimental data obtained in the literature. The mathematical model generated five general models, which proposed the change in physicochemical properties ( $C_{pf}$ ,  $C_{pv}$ ,  $C_{pl}$  and  $C_{ps}$ ) constants or not, variation of the porosity of the bed and the velocity profile, and these have provided important data for the analysis of the drying model. According to the simulations, the results showed agreement in relation to those models that considered the property of the solid specific heat ( $C_{ps}$ ) constant. This property was represented by an equation

that was a function of moisture from the solids, whereas other properties were explicit functions of temperature. Overall, it was observed that the physico-chemical profile and porosity influence the velocity profiles of humidity and temperature of the solid and fluid for all experiments, confirming that the assumptions made in each model generates significant changes in drying results. The computational fluid dynamics proved to be of great help to verify the effect of wall profiles of porosity and fluid velocity, confirming that the assumption of flat velocity profile of fluid phase in two-phase model is not valid in the range of air analysis. Regarding the study of the quality of soybean seeds, and index of germination, vigor and seeds without cracking and drying performance, it was observed that the strategy to transform a conventional sliding bed dryer on a multi-stage dryer is proved quite satisfactory in relation to the elevation of the potential for drying and maintaining the quality of seeds. The study of optimization of the dryer through the technique of Differential Evolution, obtained optimum operational conditions that maximize the quality indices or the removal of moisture. Thus, this thesis has generated data from simulation and optimization that can be used to improve the models already presented in the literature and thus provide for the construction and improvement of dryers, and optimal experimental conditions to study the sliding bed drying.

**Keywords:** Sliding bed, Mathematical modelling, Seed quality, Multiple stage, Optimization.

---

---

# CAPÍTULO 1

---

## Introdução

A soja (Gênero *Glycine* e Espécie *G. max* (L.) Merrill) é um grão arredondado e de cor amarelada originário da China, sendo cultivado para a alimentação humana e animal. Segundo Miyasaka e Medina (1981), esta cultura agrícola é uma das mais antigas do mundo; sua história e origem se perdem em tempos remotos. A literatura chinesa antiga revela que a soja pode ter sido cultivada extensivamente na China e Manchúria pelo menos há 2.500 anos A.C. Desde as primeiras menções, sempre foi considerada uma das mais importantes leguminosas cultivadas no Oriente, sendo que suas sementes são utilizadas em muitas formas para fins alimentícios, inclusive medicinais. Segundo Verneti (1983), a soja foi introduzida no Brasil por Gustavo Dutra, por volta de 1882, na Bahia.

A soja apresenta ampla variabilidade genética e morfológica, devido ao grande número de cultivares existentes, devido aos programas de melhoramento, visando aumentar a produtividade, a resistência às pragas e moléstias e adaptar a cultura a diferentes regiões (VERNETTI, 1983). É a mais importante oleaginosa no mercado mundial por ser excepcionalmente nutritiva e rica em proteína e ter alto potencial como fonte de energia na alimentação humana e animal (RAFIEE et al., 2009; AMIN, 2010).

De acordo com dados do IBGE (2011), a sexta estimativa da safra nacional de cereais, leguminosas e oleaginosas, de 2011, indica uma produção em torno de 161,5 milhões de toneladas, superior em 8,0% à safra recorde de 2010 (149,6 milhões de toneladas). A área a ser colhida em 2011, de 49,0 milhões de hectares, apresenta acréscimo de 5,3%, frente à área colhida em 2010. As três principais culturas, que somadas representam 90,5% da produção de cereais, leguminosas e oleaginosas, o arroz, o milho e a soja, respondem por 82,4% da área a ser colhida registrando, em relação

ao ano anterior, variações de +1,5%, +5,3% e +3,4%, respectivamente. A estimativa de produção brasileira de soja em grãos para o ano de 2011 é de aproximadamente 75,0 milhões de toneladas. A Figura 1.1 apresenta a evolução da área e produção de cereais, leguminosas e oleaginosas no Brasil entre os anos de 1980 e 2011.

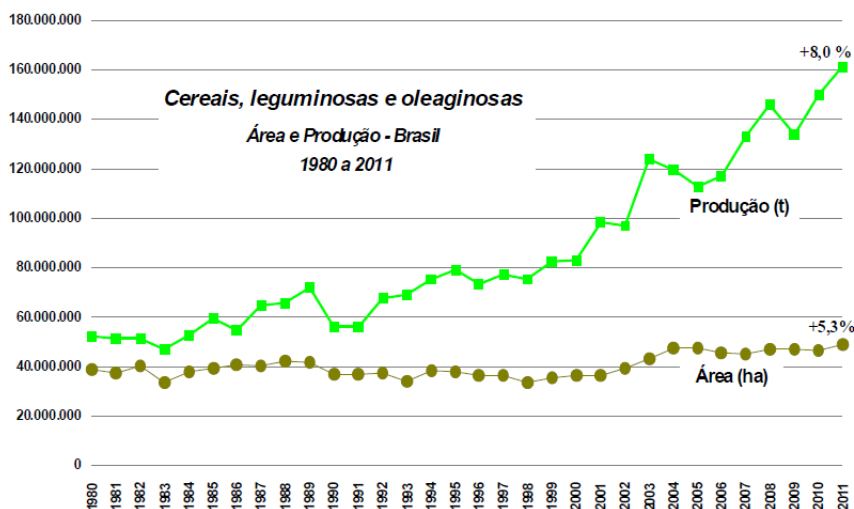


Figura 1.1: Área e Produção de cereais, leguminosas e oleaginosas no Brasil - 1980 a 2011 (IBGE, 2011).

Este grande volume de soja produzido deve ser armazenado em lugares seguros de modo a suprir demandas futuras ou colheitas mal sucedidas. Os grãos são colhidos quando ainda apresentam um alto teor de umidade, necessitando assim, passar pelo processo de secagem para o futuro armazenamento em longo prazo.

O processamento e armazenamento em condições inadequadas (umidade e temperatura) podem alterar propriedades importantes, como seu valor nutritivo e qualidades organolépticas, quando se trata do consumo humano (grãos); além de qualidades físicas e fisiológicas (fissuras, germinação e vigor), quando o objetivo é o replantio (sementes).

A secagem artificial é realizada em secadores, submetendo as sementes ou grãos à ação de um fluxo de ar aquecido, ou não, promovendo a secagem num período relativamente curto. A técnica do leito deslizante é muito utilizada em secadores de produtos agrícolas, devido ao menor investimento e baixo custo de energia, além de provocar um menor índice de injúrias mecânicas, quando comparada com outros tipos de secadores (BARROZO, 1995).

Com o objetivo de se produzir sementes para o replantio, deve-se tomar cuidado com a escolha do tipo de configuração do escoamento de fluido e dos sólidos, de condições de operação de secagem a fim de se obter um produto que mantenha suas qualidades físicas, sejam elas a germinação, o vigor e sementes sem fissuras. Para esta análise, são encontrados na literatura, estudos sobre a influência das variáveis de secagem na qualidade das sementes de soja. Autores propõem funções empíricas para

representar os índices de germinação, vigor e de sementes sem fissuras como funções das variáveis de secagem. As variáveis de secagem que são comumente analisadas são: velocidade intersticial do ar, temperatura de entrada do ar, vazão de sólidos e umidade relativa do ar de entrada.

A fim de reduzir o desgaste das sementes de soja (melhorando a qualidade e aumentando a capacidade de remoção de umidade), o leito do secador pode ser dividido em estágios, com seções de comprimento iguais ou não, no qual é gerado um secador de múltiplos estágios. Aliado à essa divisão, faz-se também a divisão do fluxo mássico do ar de entrada, mantendo o mesmo custo operacional a fim de se comparar com o secador de 1 estágio (aqui denominado secador convencional), mantendo a temperatura e umidade relativa do ar de entrada do secador (PFEIFER et al., 2009).

Estas equações dos índices de qualidade são acopladas a modelos matemáticos aplicados a secagem de grãos em leito deslizante, o qual compreende as equações de balanço de massa e energia aplicadas para ambas as fases fluida e sólida e requer equações constitutivas para o coeficiente de transferência de calor entre estas duas fases, a cinética de secagem e o conteúdo de umidade no equilíbrio do material sólido. Este modelo é obtido através de hipóteses como: propriedades físico-químicas do sistema constantes e perfil plano de velocidade do ar.

Na literatura, trabalhos sobre a modelagem e experimentação da secagem em leito deslizante demonstram que estas considerações devem ser melhor avaliadas, pois verifica-se 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, nas regiões próximas à parede as velocidades são maiores (SOUZA, 2001; BARROZO, 1995; LIRA, 2005; LIRA et al., 2007). Verifica-se também, que o modelo apresenta alta sensibilidade paramétrica em relação ao parâmetro calor específico do ar seco, significando que pequenas variações no valor deste parâmetro tem forte influência nos resultados obtidos pelo modelo (LIRA, 2005; LIRA et al., 2009).

Na Faculdade de Engenharia Química (FEQUI), da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), diversos trabalhos, de iniciação científica e mestrado, foram realizados sobre a secagem em leito deslizante. Estes trabalhos analisaram o efeito da configuração do escoamento dos sólidos e do fluido na taxa de secagem das sementes de soja (CELESTINO, 1998; SOUZA, 2001). Associado à esta secagem, a consideração de perfil plano de velocidade do ar foi estudada, assim como a qualidade das sementes (FELIPE, 1999; LACERDA, 2002). A modelagem matemática associada com as hipóteses de perfil não plano de velocidade e propriedades físico-químicas constantes foram estudadas e apresentaram resultados válidos para a melhoria da literatura relacionada com secadores de leito deslizante.

Assim, aliado aos estudos já realizados, uma melhor análise da modelagem matemática da transferência de massa e energia da secagem de sementes de soja em leito deslizante em escoamentos paralelos (concorrente e contracorrente) deve ser feita com o objetivo de analisar os efeitos das hipóteses simplificadoras feitas no modelo e ob-

servar o ajuste deste modelo aos dados experimentais obtidos na literatura. A análise da qualidade das sementes com relação à metodologia da divisão do comprimento do leito em estágios deve ser realizada a fim de se obter condições operacionais ótimas, podendo ser posteriormente utilizadas na construção do equipamento.

Diante do contexto apresentado, o objetivo geral desta tese foi estudar o modelo da transferência de massa e energia entre o ar e sementes de soja em leito deslizante com escoamentos paralelos, analisando os índices de qualidade das sementes e o desempenho da secagem. Para tanto, teve-se como objetivos específicos:

- Apresentar a modelagem matemática da secagem em leito deslizante sem as considerações de perfil plano de velocidade e propriedades físico-químicas constantes;
- Avaliar a simulação do modelo quanto as propriedades variáveis e equações para a velocidade e porosidade do leito;
- Avaliar de forma qualitativa a fluidodinâmica computacional do secador com escoamento contracorrente;
- Avaliar a simulação do secador de múltiplos estágios quanto aos índices de qualidade e remoção de umidade;
- Otimizar as variáveis de secagem em secadores de 1 estágio e de múltiplos estágios quanto aos índices de qualidade e remoção de umidade, utilizando a técnica de Evolução Diferencial;

Esta tese possui a estrutura conforme segue. O Capítulo 2 apresenta aspectos sobre a semente de soja, o modelo a duas fases, os parâmetros de qualidade física e fisiológica, uma revisão sobre a secagem em leito deslizante, configurações do escoamento fluido e sólido, o conceito de múltiplos estágios e de otimização por Evolução Diferencial. O Capítulo 3 apresenta a modelagem matemática da transferência de massa e energia, as equações constitutivas e as equações da técnica de fluidodinâmica computacional. O Capítulo 4 apresenta os conceitos sobre as hipóteses simplificadoras do modelo e a fluidodinâmica computacional e os resultados obtidos pelos mesmos. O Capítulo 5 apresenta os modelos para a análise da qualidade das sementes através dos índices de germinação, vigor e de sementes sem fissuras. O conceito de múltiplos estágios e a otimização são apresentados. As conclusões e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas no Capítulo 6.

---

---

# CAPÍTULO 2

---

## Revisão Bibliográfica

### 2.1 A Soja

#### 2.1.1 Dados Estatísticos

Cereais são a maior fonte de alimentos para os humanos e os animais. Dentre estes, a soja (*Glycine max* (L.) Merr.) pertencente à subfamília *Fabaceae*, assim como o feijão, a lentilha e a ervilha, é considerada uma fonte de proteína completa, pois proporciona alimento ao homem, com elevado valor nutricional, em forma de proteína e óleo. Esta leguminosa produz mais proteína por hectare que qualquer outra planta de lavoura, sendo fonte de calorias, utilizada como alimento básico potencial na luta contra a fome, em certas áreas densamente populosas e menos desenvolvidas (MIYASAKA; MEDINA, 1981).

Segundo dados do IBGE (2011), a produção recorde esperada de 74,9 milhões de toneladas de soja em grão em maio, cresceu 0,8% no mês de junho. A pesquisa destacou que foram observados incrementos na produção de 7,4% e 6,1%, nas regiões Norte e Sudeste, respectivamente. Vale destacar que na região Centro-Oeste, responsável por 45,2% da produção nacional, houve aumento de 0,6% na produção por conta das revisões efetuadas no Mato Grosso do Sul (+1,8%) e Goiás (+1,3%) onde a cultura já se encontra colhida (Figura 2.1).

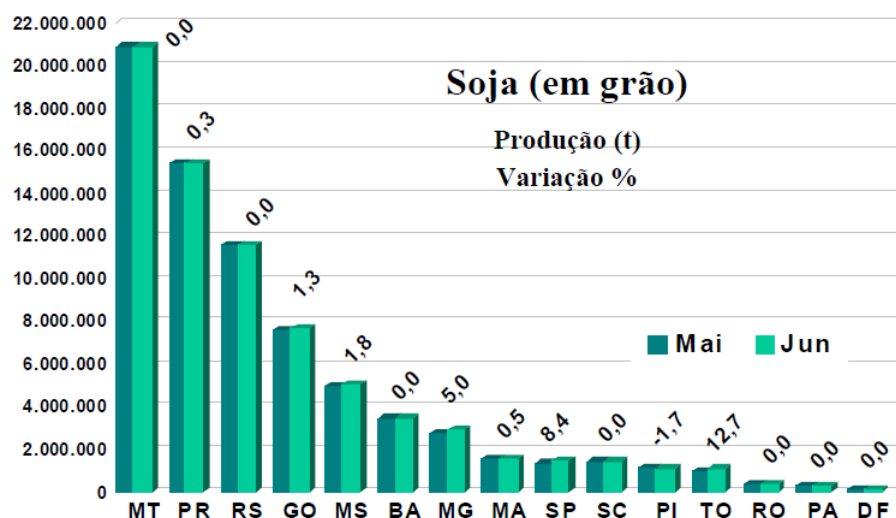


Figura 2.1: Produção de soja em grão em diferentes estados do Brasil (IBGE, 2011).

Dentre os produtos estudados, a soja em grão apresentou variação positiva na estimativa de produção em relação ao ano anterior (9,3%), conforme ilustrado na Figura 2.2. Portanto, vê-se que o desenvolvimento de novas áreas de produção e a difusão do consumo de soja são fundamentais para o suprimento alimentar diário de grande parte da população e dos animais.

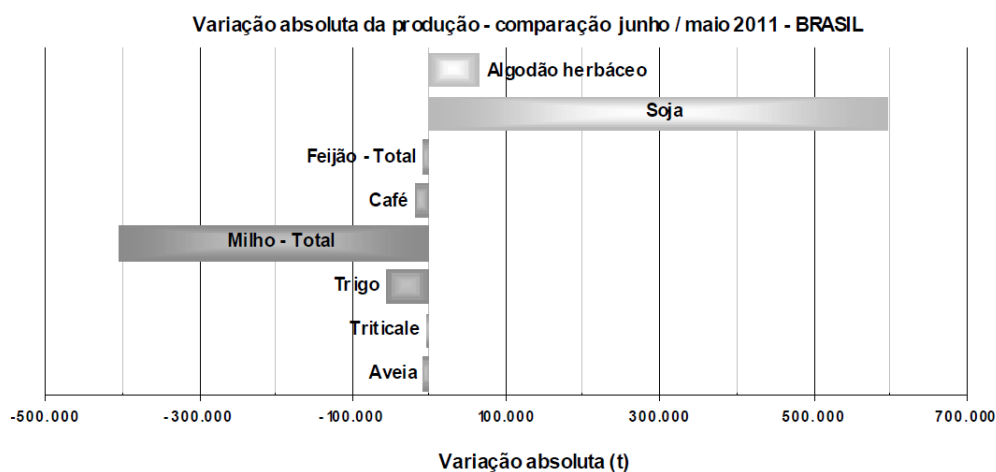


Figura 2.2: Variações absolutas das principais culturas em comparação com a safra anterior (IBGE, 2011).

### 2.1.2 O Processo de Germinação

As sementes de soja têm a aparência típica de uma semente de leguminosa. A forma é variável, mas, normalmente, esférica a aplanada, às vezes um pouco alongada ou ovalada. O hilo, bem visível, varia na forma de linear-elíptico a ovalado, como mostra a Figura 2.3 (MIYASAKA; MEDINA, 1981).

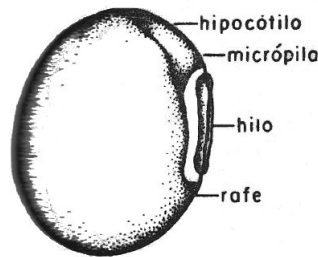


Figura 2.3: Aspecto de uma semente de soja (MIYASAKA; MEDINA, 1981).

O processo de germinação da semente de soja começa, segundo Vernetti (1983), com a absorção de umidade suficiente (Figura 2.4A). A plântula começa a emergir geralmente dentro de quatro a dez dias após a semeadura, dependendo das condições de umidade, temperatura e profundidade de semeadura. Para germinar, as sementes de soja precisam absorver mais água do que a maioria das outras espécies cultivadas, sendo necessário um conteúdo de água de aproximadamente 50%, enquanto que milho, arroz e cana-de-açúcar germinam com 30, 26 e 31%, de umidade, respectivamente.

A radícula é a primeira parte do embrião que atravessa o tegumento (Figura 2.4B). Desenvolve-se rapidamente até estar bem fixa a fim de que a plântula encontre apoio suficiente para abrir caminho até a superfície. Pouco depois que a radícula começou a crescer se formam as raízes laterais (Figura 2.4C) e dentro de 4 a 5 dias após a semeadura aparecem nela os pêlos radiculares. Estes configuram a principal superfície de absorção do sistema radicular, sendo de tamanho muito reduzido e de vida curta. Uma vez aflorada a radícula, o hipocótilo começa a crescer e em três a quatro dias o hipocótilo toma a forma de um arco e cresce até a superfície do solo (Figura 2.4D). Durante este tempo o cotilédone permanece em sua posição original. A partir deste ponto o hipocótilo vai se tornando reto, pois as células da parte superior deixam de crescer, enquanto que as da parte inferior continuam crescendo até que o arco se endireite, impulsionando os cotilédones até acima da superfície do solo (germinação epígea). Este processo permite que os cotilédones se elevem em posição oposta e aumentem de tamanho devido à absorção de água (Figura 2.4E).

A maturidade fisiológica da soja é atingida com teores de umidade de aproximadamente 50% (MIYASAKA; MEDINA, 1981). Neste ponto, não ocorrem aumentos na produção de matéria seca, nem na capacidade de germinação; a planta ainda apresenta grande número de folhas verdes, inviabilizando a colheita e aumentando o custo de secagem.

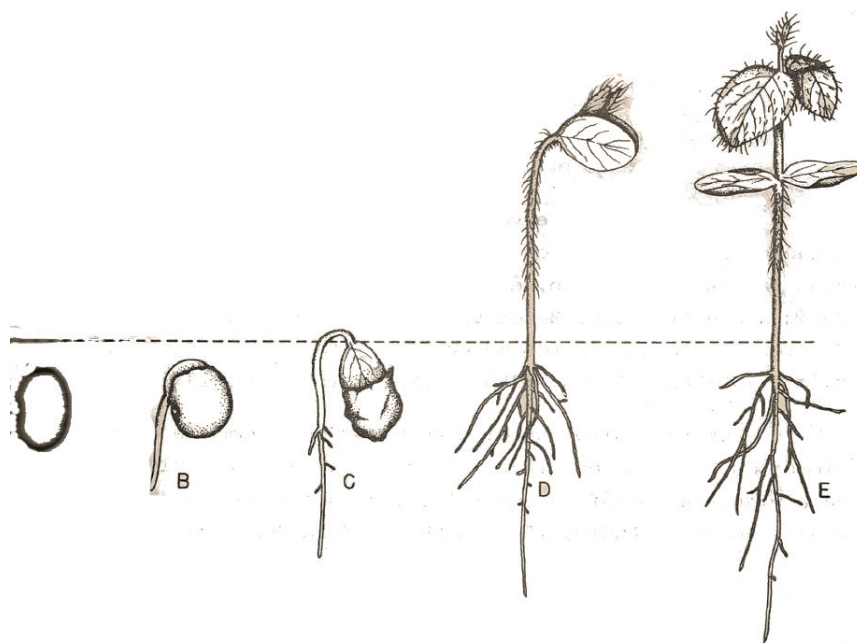


Figura 2.4: Germinação e emergência. A - Semente embebida; B - crescimento da radícula; C - alongamento do hipocótilo e início da emergência; D - hipocótilo reto; cotilédones elevados e livres; E - cotilédones estendidos, alongamento do epicótilo e as duas folhas primordiais desenroladas. A linha pontilhada indica o nível do solo (VERNETTI, 1983).

A qualidade fisiológica da semente de soja é muito afetada pelas condições climáticas durante a fase de secagem no campo; condições climáticas adversas, tais como chuvas, temperatura e umidade altas podem causar séria deterioração nas sementes. Até atingir o teor de umidade de 25% até a colheita, as sementes já estão fisiologicamente maduras e ficam “armazenadas no campo”(MIYASAKA; MEDINA, 1981).

Segundo Miyasaka e Medina (1981) e Vernetti (1983), do ponto de vista de danos mecânicos dos grãos, a operação de colheita e batidura é uma das fases mais críticas. Colheita mal cuidada e com equipamentos mal regulados contribui decisivamente para o aumento na quantidade de grãos danificados, podendo reduzir, drasticamente, a germinação e o vigor das sementes. O conteúdo de umidade da semente no momento da colheita também influencia: se for muito baixo, a semente se partirá facilmente e a percentagem de grãos quebrados e com rachaduras na casca será alta; porém, se o teor de umidade for relativamente alto, ocasionará uma redução na armazenabilidade dos grãos.

Pelo exposto, a qualidade da semente de soja é afetada pelas condições climáticas e por outros fatores ambientais, a partir da fase de maturação fisiológica, durante a fase da sua secagem no campo, assim como durante a operação de colheita e secagem da semente. Brooker et al. (1974) apresentam em forma gráfica os prejuízos causados aos grãos durante as fases de processamento da soja (Figura 2.5).

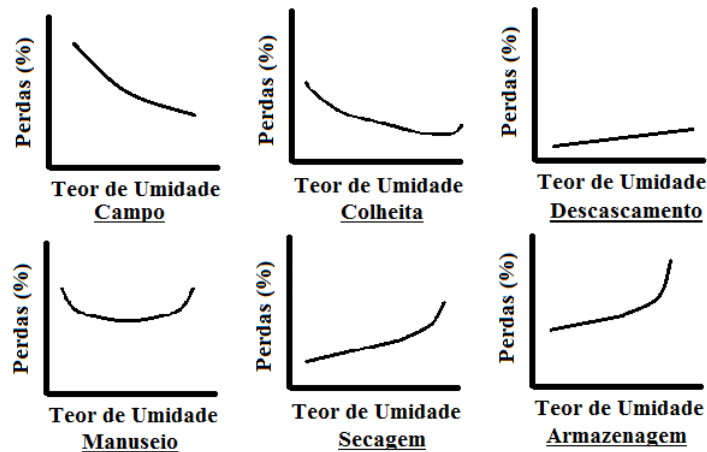


Figura 2.5: Perdas de qualidade entre as etapas de colheita e armazenagem (BROOKER et al., 1974).

## 2.2 O Processo 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 (LIRA, 2005). A secagem artificial é realizada em secadores, sendo uma operação termofísica e físico-química, que envolve a transferência de um líquido que está em um sólido úmido para uma fase gasosa não saturada. A secagem de materiais sólidos envolve o transporte simultâneo de calor e massa na seguinte forma (Oliveira Jr., 2003):

- o calor é transferido do meio para o sólido a fim de evaporar o líquido, e
- a massa de líquido é transferida do sólido para o meio.

A operação de secagem de sementes é fundamental no sistema de produção, pois, além de reduzir o teor de água, para permitir a preservação de sua qualidade fisiológica durante o armazenamento, possibilita a antecipação da colheita evitando perdas de natureza diversa (GARCIA et al., 2004). A Figura 2.6 apresenta uma curva típica de secagem com mecanismo de transferência de calor convectivo.

A variação da umidade ( $X$ ) em função do tempo, para o período inicial de secagem, é ilustrada na curva A-B (ou curva A'-B). Com o transcorrer do tempo a relação  $X = f(t)$  torna-se linear (segmento BC) e a taxa de secagem, que é igual ao coeficiente angular da reta BC, torna-se constante. A variação linear do conteúdo de umidade em função do tempo ocorre até o ponto crítico C. A partir deste ponto a linha reta torna-se uma curva, que se aproxima, assintoticamente, do conteúdo de umidade de equilíbrio,  $X_{eq}$  (STRUMILLO; KUDRA, 1986; SFREDO, 2006).

Um método apropriado para representar o comportamento fenomenológico da secagem considera a variação da taxa de secagem, expressa por  $W_D$ , em função do

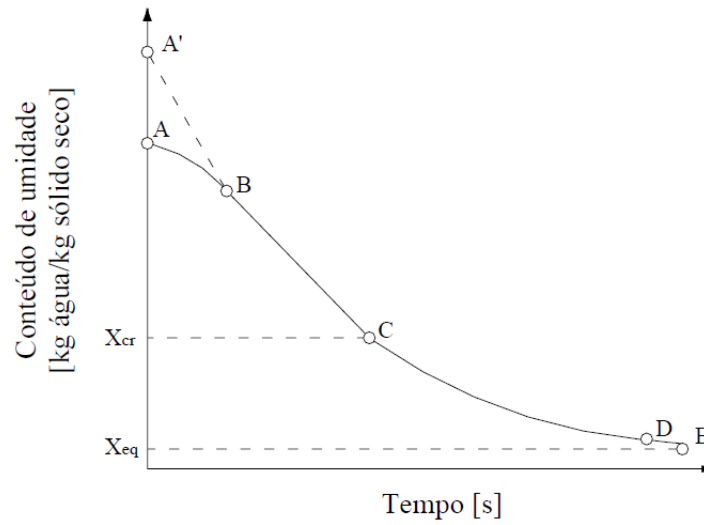


Figura 2.6: Curva de secagem (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

teor de umidade. A Figura 2.7 mostra o diagrama da curva de taxa de secagem  $W_D = f(X)$ .

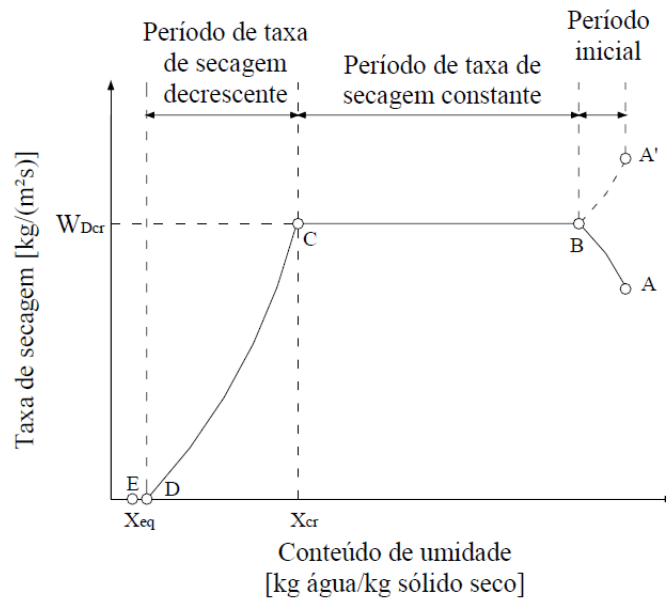


Figura 2.7: Curva da taxa de secagem (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

A taxa de secagem, definida como a quantidade de umidade removida por unidade de tempo e por unidade de superfície de secagem, é quantificada pela Eq.(2.1).

$$W_D = \frac{-m_s}{A_s} \cdot \frac{dX}{dt} \quad (2.1)$$

sendo:  $m_s$  a massa de sólido (kg) e  $A_s$  a área superficial de secagem, em  $m^2$ .

No período inicial de secagem, o material e sua superfície (recoberta com fina película de água) têm temperatura menor do que a temperatura de equilíbrio. Assim, a taxa de secagem aumenta (curva A-B) até que a temperatura na superfície do material atinja a temperatura de equilíbrio (segmento BC). Raramente, o secador é alimentado com material à temperatura maior do que a temperatura de equilíbrio (curva A'-B). O período inicial é muito curto e, na prática, pode ser negligenciado (STRUMILLO; KUDRA, 1986).

O período de secagem à taxa constante (segmento BC) corresponde à situação onde a superfície do sólido está completamente umedecida (NONHEBEL e MOSS (1971) *apud* Sfredo (2006)). Neste período a taxa de transferência de calor e massa depende, primordialmente, do mecanismo de transporte na camada limite.

O teor de umidade no qual a taxa de secagem do produto muda de constante para decrescente (ponto C, Figuras 2.6 e 2.7) é chamado de conteúdo de umidade crítico ( $X_{cr}$ ). O valor do conteúdo de umidade crítico depende das características do sólido (forma, tamanho e condições operacionais de secagem) (BROOKER et al., 1974).

## 2.3 Modelagem da Transferência de Massa e Energia

A técnica do leito deslizante é muito utilizada em secadores de produtos agrícolas, devido ao menor investimento e baixo custo de energia, além de provocar um menor índice de injúrias mecânicas, quando comparada com outros tipos de secadores (BARROZO, 1995). Existem três configurações clássicas para o secador em leito deslizante, definidas de acordo com as direções de escoamento do fluido e dos sólidos, quais sejam: secadores de escoamentos concorrentes, contracorrentes e cruzados. Uma configuração alternativa é a de escoamento misto (Figura 2.8).

Na literatura são apresentados três métodos de modelagem do fenômeno de transferência simultânea de calor e massa - métodos logarítmicos, camada por camada e os baseados nas leis de transferência de calor e massa. Os dois primeiros tratam o problema a partir de simplificações e o último apresenta o fenômeno de forma mais fundamental e com um número menor de simplificações (LACERDA, 2002).

### Modelo logarítmico

Este modelo foi utilizado para secadores de leito fixo por Hukill (1955). Foi admitido que todo o calor cedido pelo gás é usado somente para evaporar a água contida

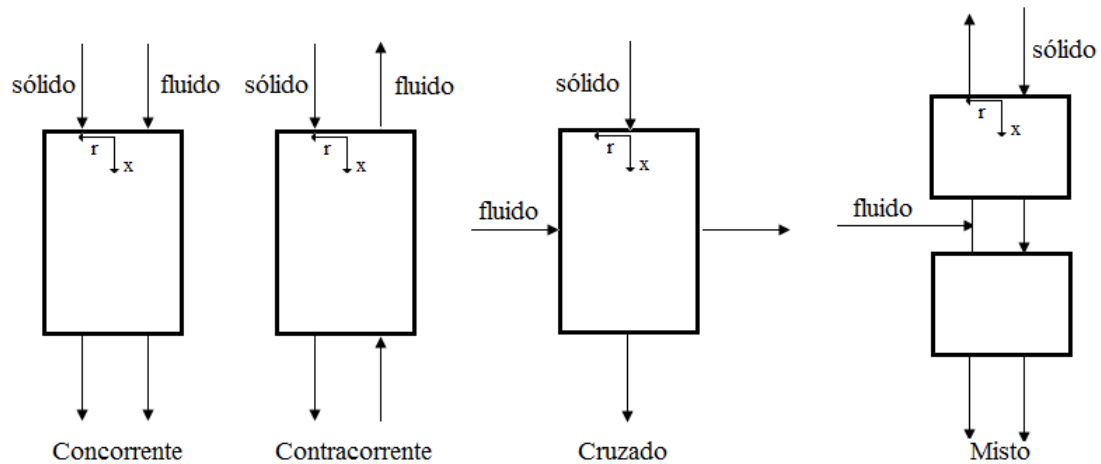


Figura 2.8: Configurações do leito deslizante.

no grão. O modelo apresenta as equações de balanço de forma mais simples, não exigindo ferramentas computacionais sofisticadas. Foi observado que o modelo subestima o tempo requerido para a secagem do grão até uma dada umidade e apresenta resultados aceitáveis apenas para baixas temperaturas e velocidades do ar de secagem, ficando fora da faixa usualmente empregada na secagem de sementes (BARROZO, 1995; LACERDA, 2002).

### Modelo camada por camada

O modelo camada por camada é baseado na divisão hipotética do leito em camada espessa em várias camadas finas. Os balanços de massa e energia são realizados em cada camada, sendo admitidas constantes as condições para uma dada variação no tempo de secagem (THOMPSON et al., 1968; LACERDA, 2002; HENDERSON; HENDERSON, 1968; GINER; BRUCE, 1993).

### Modelo a duas fases

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. O modelo a duas fases considera o ar de secagem e o vapor d'água como a fase fluida, e a matriz seca e a água líquida como a fase sólida. No estabelecimento do modelo, são assumidas as seguintes hipóteses (BARROZO, 1995):

- os escoamentos do fluido e do sólido têm perfis planos de velocidade;

- a convecção na superfície do sólido é o mecanismo predominante no processo de troca térmica;
- perfis planos de temperatura nas regiões de entrada em ambas as fases;
- perda de calor é desprezível através das paredes do sistema;
- transferência de calor na direção normal aos escoamentos é desprezível em relação à transferência de calor nas direções dos escoamentos;
- leito com propriedades homogêneas;
- escoamentos unidirecionais do gás e do sólido;
- propriedades físico-químicas constantes ao longo do leito.

As equações diferenciais (2.2)-(2.5) descrevem a troca térmica entre o fluido e o sólido em leito deslizante e escoamentos concorrentes (CELESTINO, 1998):

#### Fase Fluida

$$G_f \frac{dW}{dx} = f_m a \quad (2.2)$$

$$\frac{dH_f}{dx} = f_m a \langle H \rangle - ha (T_f - T_s) \quad (2.3)$$

#### Fase Sólida

$$G_s \frac{d\bar{M}}{dx} = -f_m a \quad (2.4)$$

$$\frac{dH_s}{dx} = -f_m a \langle H \rangle + ha (T_f - T_s) \quad (2.5)$$

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

$$\langle H \rangle = \lambda + Cp_v (T_v - T_{ref}) \quad (2.6)$$

$$H_f = Cp_f (T_f - T_{ref}) + W (\lambda + Cp_v (T_v - T_{ref})) \quad (2.7)$$

$$H_s = Cp_s (T_s - T_{ref}) + \bar{M} Cp_l (T_s - T_{ref}) \quad (2.8)$$

Assumindo que a evaporação ocorre na temperatura do ar ( $T_v = T_f$ ).

$$\frac{dT_f}{dx} = -\frac{ha (T_f - T_s)}{G_f (Cp_f + W Cp_v)} \quad (2.9)$$

$$\frac{dT_s}{dx} = +\frac{ha (T_f - T_s)}{G_s (Cp_s + \bar{M} Cp_l)} - \frac{f_m a (\lambda + Cp_v T_f - Cp_l T_s)}{G_s (Cp_s + \bar{M} Cp_l)} \quad (2.10)$$

As condições de contorno do sistema de equações (2.2, 2.4, 2.9, 2.10) são:

$$\bar{M} (0) = \bar{M}_0 \quad (2.11)$$

$$T_s (0) = T_{s0} \quad (2.12)$$

$$W (L) = W_0 \quad (2.13)$$

$$T_f (L) = T_{f0} \quad (2.14)$$

Nas quais,  $W$  é a umidade absoluta do fluido,  $M$  é a umidade do sólido,  $H_f$  é a entalpia do fluido,  $H_s$  é a entalpia do sólido,  $f_m$  é a taxa local de secagem por unidade de área,  $a$  é a área interfacial de transferência por unidade de volume do leito,  $h$  é o coeficiente de transferência de calor,  $T_f$  é a temperatura do fluido,  $T_s$  é a temperatura do sólido,  $G_s$  é o fluxo mássico de sólidos,  $G_f$  é o fluxo mássico de fluido,  $\lambda$  é a entalpia de vaporização da água,  $T_{ref}$  é a temperatura de referência,  $Cp_{(s,f,l,v)}$ , são os calores específicos do sólido, do fluido, do líquido e do vapor de água, respectivamente, e  $x$  é a coordenada da direção do escoamento do sólido.

### 2.3.1 Equações Constitutivas

#### Coeficiente de transferência de calor

Sartori (1986) realizou a determinação experimental do coeficiente de transferência de calor entre sólidos e fluidos em leito deslizante. Testes foram feitos utilizando partículas como areia, vidro, grãos de milho, arroz e soja e uma correlação foi proposta para a determinação do coeficiente de transferência, conforme segue:

$$Nu = a P_r^{\frac{1}{3}} Re^b \quad (2.15)$$

na qual os valores das constantes  $a$  e  $b$  são mostrados na Tabela 2.1. A equação anterior é válida para número de Reynolds ( $Re$ ) e Prandtl ( $Pr$ ), de acordo com as seguintes faixas:  $80 < Re < 900$  e  $Pr = 0,72$ , para os escoamentos concorrentes e contracorrentes e  $70 < Re < 500$  e  $Pr = 0,72$ , para escoamentos cruzados.

Tabela 2.1: Valores das constantes  $a$  e  $b$  da Equação 2.15.

Configuração do escoamento	Contracorrente	Concorrente	Cruzado
$a$	1,54	0,84	1,31
$b$	0,57	0,65	0,59
Coeficiente de Correlação ( $R^2$ )	0,97	0,98	0,98

### Umidade de Equilíbrio

O teor de umidade de equilíbrio de um material é a umidade que este atinge quando deixado por tempo suficientemente longo em determinada condição de temperatura e umidade relativa do ar que o envolve (CELESTINO, 1998). Nestas condições, há o equilíbrio entre as pressões de vapor da água no material e no ambiente. Esta variável determina o teor mínimo de umidade que o material pode atingir em condições operacionais determinadas, sendo fundamental para a modelagem do processo de secagem (BARROZO, 1995).

Diversas equações (teóricas, empíricas e semi-empíricas) são utilizadas para representar a umidade de equilíbrio. As equações empíricas e semi-empíricas possuem maior precisão ao se estimar a umidade de equilíbrio quando comparadas aos modelos teóricos clássicos. As principais equações utilizadas na literatura para a determinação da umidade de equilíbrio são apresentadas na Tabela 2.2.

Tabela 2.2: Equações para umidade de equilíbrio.

Nome	Equação	Referência
Henderson	$M_{eq} = \left( \frac{\ln(1-UR)}{-a \cdot T_s} \right)^{\frac{1}{b}}$	Henderson (1952)
Henderson-Thompson	$M_{eq} = \left( \frac{\ln(1-UR)}{-a(T_s+c)} \right)^{\frac{1}{b}}$	Thompson et al. (1968)
Chung-Pfost	$M_{eq} = -\frac{1}{b} \ln \left( \frac{(T_s+c) \ln(UR)}{-a} \right)$	Chung e Pfost (1967)
Chen-Clayton	$M_{eq} = -\frac{1}{c \cdot T_s^d} \ln \left( \frac{\ln(UR)}{-a \cdot T_s^b} \right)$	Chen e Clayton (1971)
Halsey Modificada	$M_{eq} = \left( \frac{-\exp(a \cdot T_s + c)}{\ln(UR)} \right)^{\frac{1}{b}}$	Osborn et al. (1989)

Sendo:  $UR$  - umidade relativa do fluido,  $T_s$  - temperatura do sólido,  $a$ ,  $b$  e  $c$  são parâmetros dos modelos.

Barrozo (1995) realizou estudos baseado nas equações empíricas e semi-empíricas para determinar a umidade de equilíbrio de amostras de sementes de soja. Experimentos foram feitos para diversas amostras e o comportamento diante das equações

foi estudado por métodos estatísticos, a fim de se obter o melhor ajuste aos dados experimentais. De acordo com o trabalho, o autor verificou que a equação de Halsey modificada dos autores Osborn et al. (1989) foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais. A equação com os parâmetros ajustados é apresentada na Eq. (2.16) e esta foi a utilizada neste presente trabalho.

$$\bar{M}_{eq} = \left( \frac{-\exp(-0,00672 T_s + 3,02)}{\ln(UR)} \right)^{\frac{1}{1,508}} \quad (2.16)$$

para  $M_{eq}$  em base seca e  $T_s$  em Celsius.

### Cinética de secagem

Conforme descrito na Seção 2.2, o processo de secagem passa por fases de taxa de secagem constante e com períodos de taxa decrescente. Trabalhos da literatura citam teorias para explicar o mecanismo de migração de umidade no interior dos sólidos; sendo que alguns destes trabalhos, não levam em consideração a resistência interna à transferência de calor, e outros indicam que os mecanismo internos controlam a transferência de massa e que a resistência externa pode ser considerada desprezível (LUIKOV, 1966; BROOKER et al., 1974; BARROZO et al., 1994; BARROZO, 1995; CELESTINO, 1998).

De acordo com as hipóteses acima mencionadas, e considerando constante a difusividade efetiva em relação à umidade do ar, a equação da difusão que representa a cinética de secagem é dada por: (BARROZO, 1995).

$$MR = \frac{\bar{M} - \bar{M}_{eq}}{\bar{M}_0 - \bar{M}_{eq}} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left[ \frac{-n^2 \pi^2 D_{ef} \cdot t}{R_p^2} \right] \quad (2.17)$$

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 partir da reparametrização da equação de Arrhenius, como mostra a Eq. (2.18):

$$D_{ef} = \exp(\beta) \exp \left( -T' \exp(\gamma) \right) \quad (2.18)$$

na qual  $T' = (1/T_f - 1/T^*)$ ,  $T^* = 273K$ ,  $T_f$  em Kelvin e  $D_{ef}$  em  $cm^2 \cdot min^{-1}$ . Os parâmetros  $\beta$  e  $\gamma$ , foram estimados pelo método dos mínimos quadrados e são  $-13,1854$  e  $8,36$ , respectivamente.

### 2.3.2 Trabalhos sobre Leito Deslizante

Diversos trabalhos sobre a secagem em leito deslizante são encontrados na literatura. Estes tratam de diversas configurações do escoamento entre o sólido e o fluido; estudam o efeito da secagem sobre a qualidade das sementes; tratam da modelagem; das hipóteses simplificadoras do modelo; da solução do sistema de equações, conforme descrito nas seções anteriores (NELLIST; HUGHES, 1973; BROOKER et al., 1974; SARTORI, 1986; MANCINI, 1991; GINER; BRUCE, 1993; CALADO, 1993; BARROZO, 1995; Biscaia Jr.; VIEIRA, 2000; VIEIRA; Biscaia Jr., 2001; MANCINI et al., 2002; SRIVASTAVA; JOHN, 2002; IGUAZ et al., 2003; LACERDA et al., 2005; SOUZA et al., 2005). Alguns destes trabalhos são apresentados a seguir, de forma a direcionar aos motivos que levaram à elaboração desta tese.

De acordo com a configuração do escoamento entre o sólido e o fluido como concorrente, contracorrente, cruzado ou misto, verifica-se que 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. Porém, nesta configuração se verificam as menores taxas de transferência de umidade (VALENÇA; MASSARANI, 1996).

Na secagem com escoamentos contracorrentes, as fases sólida e fluida, apresentam escoamentos paralelos, porém em sentidos opostos. Nesta configuração, o produto sai do secador com temperatura alta, próxima da temperatura de entrada do fluido. Entretanto, é a configuração em que se verificam as maiores taxas de redução no teor de umidade dos sólidos (VALENÇA; MASSARANI, 1996).

No leito deslizante com escoamentos cruzados, a direção de escoamentos 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, resultando em uma supersecagem de um lado e uma subsecagem de outro. Neste caso, o processo de secagem pode apresentar uma diferença significativa de conteúdo de água de um sólido para outro ao final da secagem (LIRA, 2005). Segundo Barrozo (1995), esta configuração apresenta como vantagem operacional uma menor diferença de pressão imposta ao escoamento do ar, permitindo o uso de sopradores de menor potência. Desta forma, as configurações com escoamentos concorrentes e contracorrentes apresentam algumas vantagens sobre a configuração de escoamentos cruzados, tais como: a obtenção de um produto mais homogêneo e um menor consumo de energia (MURATA; BARROZO, 1996).

Murata e Barrozo (1996) desenvolveram um estudo de simulação em leito deslizante com escoamentos concorrentes e contracorrentes. O modelo a duas fases foi utilizado para representar a transferência simultânea de calor e massa entre o ar e sementes de soja. A resolução numérica do modelo foi obtida através do código computacional DASSL de Petzold et al. (1989). Os perfis simulados de temperatura do ar

e das sementes permitiram verificar que a troca térmica ocorre predominantemente na região mais próxima da entrada.

O trabalho de Celestino (1998) apresentou os perfis simulados de temperatura do ar e dos sólidos e umidade dos sólidos a partir da solução do modelo a duas fases conforme apresentado anteriormente nesta tese. Estes perfis apresentaram a mesma tendência dos dados experimentais. Foi realizado um estudo fluidodinâmico deste leito, que mostrou que o perfil de velocidade dos sólidos tem um típico comportamento empistonado, porém, apenas o perfil da velocidade do ar com o leito vazio foi realizado, pois, devido à configuração concorrente do equipamento, não foi possível verificar a distribuição de velocidade do ar durante o escoamento dos sólidos.

Nos trabalhos de Felipe (1999), Felipe e Barrozo (2003) e Barrozo et al. (2006) foi estudada a influência das principais variáveis do processo de secagem em leito deslizante concorrente, contracorrente e cruzado, na qualidade das sementes de soja. A qualidade das sementes foi analisada em termos dos índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras. Os melhores índices de qualidade para o escoamento concorrente foram obtidos com altos valores de umidade relativa do ar e baixos valores de temperatura e velocidade do ar e vazão dos sólidos.

Souza (2001) realizou um estudo fluidodinâmico em leito deslizante contracorrente, o que 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 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.

O trabalho de Lacerda (2002) apresentou as variáveis operacionais que influenciam na qualidade das sementes de soja submetidas a secagem em leito deslizante com escoamento contracorrente. Foi verificado que os melhores índices de qualidade foram atingidos com menores temperatura e velocidade do ar, e maiores umidades relativas do ar, resultando em menores índices de remoção de umidade.

O trabalho de Lira (2005) teve como objetivo estudar a transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamentos concorrentes. A partir do modelo a duas fases, foi verificada a validade das considerações de perfil plano de velocidade do ar e parâmetros físico-químicos constantes ao longo do leito. A autora validou através de dados experimentais, diversos modelos de distribuição de porosidade e de velocidade do ar e análises de sensibilidade paramétrica também foram realizadas para as propriedades físico-químicas. O modelo apresentou maior sensibilidade absoluta à perturbação do parâmetro calor específico do ar seco, significando

que pequenas variações no valor deste parâmetro tem forte influência nos resultados obtidos pelo modelo.

Valença e Massarani (1996) realizaram a simulação da secagem de milho em leito deslizante com fluxos contracorrentes abrangendo o regime transiente. O modelo a duas fases foi adotado pelos autores, tendo como base equações gerais de balanço em meios porosos sob secagem convectiva. A resolução do modelo foi obtida pela combinação do método das características com o de Runge-Kutta de 4ª ordem.

Alguns autores apresentam trabalhos sobre a alteração dos escoamentos, como uma combinação entre os escoamentos concorrentes e contracorrentes, aqui denominados como escoamentos mistos (VALENÇA, 1999; Valença; MASSARANI, 2000; BRUCE, 1984; MILLER; WHITFIELD, 1984). Destes podemos citar os trabalhos de Valença (1999) e Valença e Massarani (2000), nos quais os autores analisaram e compararam o desempenho de secadores de leito deslizante com fluxos concorrentes e contracorrentes, modelando e simulando a secagem para cada uma das configurações e combinações delas. Os autores utilizaram o modelo a duas fases, sendo as equações para cinética de secagem e para o coeficiente de transferência de calor obtidas por Mancini (1991) e Sartori (1986), respectivamente. Com o estudo, as seguintes conclusões foram obtidas:

- Para o processo em fluxos concorrentes, foi observado um melhor aproveitamento do calor transferido pelo gás, mas as menores taxas de transferência de umidade.
- Para a configuração contracorrente, embora a temperatura de saída do sólido tenha sido elevada, próxima à temperatura de entrada do gás, verificaram-se as maiores taxas de redução no teor de umidade.
- O estágio de fluxos concorrentes seguido de fluxos contracorrentes resultou em um produto com temperatura alta e baixa redução no teor de umidade do sólido, sendo a configuração menos recomendável dentre as analisadas.
- O estágio de fluxos contracorrentes seguido de fluxos concorrentes, promoveu grande redução no teor de umidade do sólido, e as temperaturas finais do sólido foram menores que a temperatura inicial do gás.

Coutois et al. (1993) propuseram um projeto específico de secadores de fluxo misto, utilizados na França, no qual a solução do modelo do processo de secagem segue uma abordagem dinâmica de compartimentos. Os autores descrevem que a abordagem de compartimentos apresenta-se como sendo uma boa aproximação, pois acopla cálculos rápidos com sofisticação suficiente para descrever as variações do gradiente da mistura do interior da semente. Este gradiente é o principal fator responsável pela dinâmica da secagem do grão. Para simplificação, os autores não consideram o gradiente de temperatura no interior do grão.

Courtois (1995) propôs um modelo dinâmico que combina a qualidade e secagem de milho em secadores com escoamentos mistos e implementa uma solução numérica

otimizada. Os dutos de ar são divididos em camadas sucessivas de fluxos de entrada e saída alternados. Assim, o ar precisa atravessar a massa de grãos para chegar na saída. Por isso, os secadores mistos são vistos como uma combinação de secadores com escoamentos concorrentes e contracorrentes. O autor descreve o processo como um sistema composto por três estágios:

- 2 estágios de secagem com 2 temperaturas diferentes;
- 1 estágio de resfriamento no fundo para garantir a temperatura baixa do produto de saída e reutilizar a energia térmica da umidade do ar.

Giner et al. (1998) apresentaram um modelo de secagem de grãos com fluxos mistos onde o secador pode ser representado usando blocos de leitos, onde cada leito possui apenas um fluxo que pode ser, concorrente, contracorrente ou cruzado. Foi realizada uma simulação computacional baseada nas equações de transferência de massa e energia, e esta se apresentou como sendo realista do ponto de vista das condições do ar e grãos dentro do secador.

A modificação do leito deslizante, de escoamento com uma única configuração para a configuração mista, apresenta benefícios ao aliar as vantagens das configurações concorrente e contracorrente. Esta versão de configuração pode ser aliada a qualidade das sementes, a partir da determinação de condições operacionais ótimas (SINNECKER et al., 2005; PARDE et al., 2002; MENSAH et al., 1985; GOMES et al., 2003; BENNAMOUN; BELHAMRI, 2008; COURTOIS, 1995; GINER; ESTREBOU, 2004; BRUCE, 1992). Diversos trabalhos na literatura, analisam a qualidade da sementes após o processo de secagem em leito deslizante com equações empíricas obtidas para as configurações clássicas de escoamento (BARROZO, 1995; FELIPE, 1999; SOUZA, 2001; FELIPE; BARROZO, 2003; BARROZO et al., 2006; LACERDA, 2002; SOUZA, 2001).

Na seção seguinte são descritas as variáveis que influenciam na qualidade das sementes e os índices que representam a qualidade.

## 2.4 Qualidade das Sementes

A qualidade das sementes pode ser definida como um conjunto de atributos genéticos, físicos, fisiológicos e sanitários que contribuem para a formação de plantas vigorosas, que sejam capazes de garantir alta produtividade (FELIPE; BARROZO, 2003).

Os aspectos físicos estão relacionados com danos mecânicos e fissuras no tegumento. As propriedades fisiológicas definem a capacidade da semente em desempenhar funções vitais, que são caracterizadas pela sua germinação e vigor (NELLIST; HUGHES, 1973).

O vigor da semente é definido pela ISTA (*International Seed Testing Association*) como “a soma total das propriedades das sementes que determinam o nível de atividade e desempenho das sementes durante a germinação e o aparecimento das plântulas”(GOVENDER et al., 2008). Estas propriedades podem ser altamente afetadas durante o processo de secagem e podem ser utilizadas para se tomar decisões sobre o valor dos diferentes lotes de sementes.

A qualidade das sementes de soja tem influência direta no sucesso da colheita e contribui significativamente nos níveis de produtividade (BEWLEY; BLACK, 1994). Trabalhos sobre mudanças da qualidade das sementes de soja durante a secagem mostram que cuidados devem ser tomados em qualquer sistema que envolva movimentação das sementes (LACERDA et al., 2004; BARROZO et al., 2006; SINNECKER et al., 2005; PARDE et al., 2002; MENSAH et al., 1985; GOMES et al., 2003).

Para avaliar as condições operacionais da secagem em leito deslizante com escoamentos paralelos e cruzados na qualidade das sementes de soja, diversos trabalhos apresentam correlações para representar os índices de germinação ( $G$ ), vigor ( $V$ ) e de sementes não fissuradas ( $F$ ) (BARROZO, 1995; FELIPE, 1999; LACERDA, 2002; FELIPE; BARROZO, 2003; LACERDA et al., 2004; BARROZO et al., 2006; PFEIFER et al., 2009). As variáveis de secagem analisadas são: velocidade intersticial do ar ( $v$ ), temperatura de entrada do ar ( $T_{f0}$ ), vazão de sólidos ( $Q_s$ ) e umidade relativa do ar de entrada ( $UR$ ).

A partir das variáveis de secagem, um planejamento de experimentos é realizado, no qual indica as condições de operação e o número de experimentos a serem realizados. Nos trabalhos de Felipe (1999) e Lacerda (2002), 26 experimentos foram realizados, coletando-se as amostras das sementes de soja ao final do processo de secagem e executando os testes de germinação, vigor e fissuras de acordo com testes padronizados (Teste Padrão de Germinação - TPG, Teste de Envelhecimento Precoce e Teste do Hipoclorito de Sódio). As respostas obtidas serviram como base para as análises estatísticas realizadas, que geraram correlações empíricas das relações entre as quatro variáveis analisadas.

De acordo com os estudos anteriores de análise da qualidade das sementes de soja após o processo de secagem (FELIPE, 1999; LACERDA, 2002), cabe ressaltar a técnica estatística de superfície de resposta, que tem como base o planejamento fatorial dos experimentos (BOX et al., 1978). Esta técnica permite verificar os efeitos individuais e as interações entre as variáveis, a avaliação de erros experimentais e de regressão e o equacionamento empírico dos resultados em função das variáveis escolhidas (MYERS, 1976).

### 2.4.1 Planejamento de Experimentos e Metodologia da Superfície de Resposta

A organização de um planejamento fatorial consiste em selecionar os fatores (variáveis independentes do sistema) e escolher os níveis (valores assumidos pelas variáveis) que serão estudados. Esta organização envolve a combinação entre os níveis de dois ou mais fatores (RODRIGUES; IEMMA, 2009). O planejamento é representado na forma de potência, fornecendo assim o número de experimentos a serem realizados (LACERDA, 2002).

Assim, por exemplo, num delineamento com dois fatores, cada qual com dois níveis (Temperatura com níveis 1 e 2 e pH com níveis 1 e 2), o planejamento  $N^k$  se torna  $2^k$ , sendo  $k = 2$ , que indica que dois níveis foram escolhidos para as duas variáveis em estudo e que quatro experimentos deverão ser realizados. Esta classe de planejamento fatorial é a mais simples e útil nos casos onde a situação experimental pode ser representada por uma equação de primeira ordem (BOX et al., 1978).

Planejamentos que visam obter uma superfície de resposta de 2ª ordem necessitam de pelo menos três níveis de estudo, são os chamados planejamentos  $3^k$  (LACERDA, 2002). Sua desvantagem é a realização de um excessivo número de experimentos quando muitas variáveis estão envolvidas, no qual o número de ensaios cresce exponencialmente, como no caso dos trabalhos discutidos, onde quatro variáveis são estudadas, o que necessitaria de 81 experimentos. Em função desta dificuldade, o planejamento composto central fornece uma resposta equivalente com um menor número de experimentos (BOX e WILSON (1951) *apud* MYERS (1976)).

Este método é uma classe de planejamentos 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 Eq.(2.19).

$$\text{Variável codificada} = \frac{\xi_i - \xi_0}{\frac{\xi_1 - \xi_{-1}}{2}} \quad (2.19)$$

na qual:  $\xi_i$  - valor da variável não codificada;

$\xi_0$  - valor da variável não codificada referente ao nível central;

$\xi_1$  e  $\xi_{-1}$  - valores da variável não codificada referentes aos níveis 1 e -1.

Um exemplo de matriz de planejamento está na Tabela (2.3), sendo  $Y_i$  as repostas dos experimentos e  $\alpha$  e  $-\alpha$ , os níveis extremos escolhidos pelo pesquisador para a análise das variáveis.

Para que um planejamento composto central (PCC) seja ortogonal, é necessário que o valor de  $\alpha$  adotado torne a matriz de variância e covariância diagonal e os parâmetros não sejam correlacionados.

Tabela 2.3: Matriz de Planejamento de um PCC com quatro variáveis.

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_i$
-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	$Y_{16}$
$-\alpha$	0	0	0	$Y_{17}$
$\alpha$	0	0	0	$Y_{18}$
0	$-\alpha$	0	0	$Y_{19}$
0	$\alpha$	0	0	$Y_{20}$
0	0	$-\alpha$	0	$Y_{21}$
0	0	$\alpha$	0	$Y_{22}$
0	0	0	$-\alpha$	$Y_{23}$
0	0	0	$\alpha$	$Y_{24}$
0	0	0	0	$Y_{25}$
0	0	0	0	$Y_{26}$

A Eq.(2.20) pode ser usada para representar a resposta em função das variáveis independentes estudadas. Os coeficientes são obtidos pelo método dos mínimos quadrados e a avaliação da correlação é feita estatisticamente através do coeficiente de correlação, pelo valor calculado para o teste F e pela análise de resíduos.

$$Y = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{ij, i < j} \beta_{ij} x_i x_j \quad (2.20)$$

O coeficiente de correlação ( $R^2$ ) compara a variância dos pontos experimentais

em relação ao ajuste proposto, com a variância da própria população de pontos experimentais (BOX et al., 1978). Um valor do coeficiente de correlação igual a 0,95, indica que 95% de variabilidade dos dados é explicada pela equação. Um valor zero indica que não existe correlação. Quanto mais próximo da unidade estiver o valor do coeficiente de correlação, melhor será o ajuste proposto.

O resíduo da estimação é definido como a diferença entre os resultados experimentais e os previstos dados pela Eq.(2.21). A soma dos quadrados da equação (SQE) e a soma dos quadrados dos resíduos (SQR) são apresentadas pelas Eqs. (2.22) e (2.23), respectivamente, sendo  $n$  o número de pontos experimentais.

$$\epsilon = Y_{exp} - Y_t \quad (2.21)$$

$$SQE = (Y_{t1})^2 + (Y_{t2})^2 + \dots + (Y_{tn})^2 \quad (2.22)$$

$$SQR = (Y_{exp1} - Y_{t1})^2 + (Y_{exp2} - Y_{t2})^2 + \dots + (Y_{expn} - Y_{tn})^2 \quad (2.23)$$

O grau de liberdade da equação (DFE) é definido como o número de parâmetros menos um, e o grau de liberdade do resíduo (DFR) é definido como o número de pontos experimentais menos o número de parâmetros, Eqs. (2.24) e (2.25), respectivamente.

$$DEF = n^\circ \text{ de parâmetros} - 1 \quad (2.24)$$

$$DFR = n^\circ \text{ de pontos experimentais} - n^\circ \text{ de parâmetros} \quad (2.25)$$

O quadrado médio da equação (QME) é a razão entre a soma dos quadrados dos resultados previstos pela equação teórica e o grau de liberdade desta equação e o quadrado médio do resíduo (QMR) é obtido pela razão entre a soma do quadrado dos resíduos e os graus de liberdade do resíduo, Eqs. (2.26) e (2.27), respectivamente.

$$QME = \frac{SQE}{DFE} \quad (2.26)$$

$$QMR = \frac{SQR}{DFR} \quad (2.27)$$

A estatística  $F$  é a relação entre o quadrado médio da equação e o quadrado médio dos resíduos (Eq. 2.28).

$$F = \frac{QME}{QMR} \quad (2.28)$$

O valor obtido para  $F$  pode ser usado para a realização de um teste de hipótese para verificação da adequação da equação aos dados experimentais. Com os graus de liberdade do resíduo e da equação, pode ser determinado o valor da estatística  $F$  de Fisher, para diversos níveis de significância da equação. Este valores são tabelados em BOX et al. (1978).

### 2.4.2 Secador de Múltiplos Estágios

A obtenção de índices de qualidade satisfatórios para a manutenção do potencial germinativo das sementes de soja, pode ser alcançada através da modificação do escoamento entre a fase sólida e fluida, conforme já apresentado nas seções anteriores. Uma outra alternativa é a modificação do leito deslizante através da divisão do mesmo em estágios. Em cada estágio, diferentes condições de temperatura, umidade e vazão de ar poder ser alternadas na busca de melhor qualidade das sementes e maior remoção de umidade.

No trabalho de Katz (1962), esta modificação foi proposta para melhorar o desempenho de sistemas como reatores, buscando obter melhores perfis de temperatura e concentração, através do controle destes sistemas a partir do cálculo variacional.

Ahn et al. (1963) apresenta pela primeira vez um secador de leito deslizante modificado, a partir da divisão equitativa do leito de um secador com escoamento cruzado em estágios, no qual aplica-se uma versão discreta do Princípio do Máximo, com o objetivo de reduzir o custo do ar na secagem de sorgo.

Holmberg e Ahtila (2004) compararam os custos da secagem de madeira realizada em um secador de escoamento cruzado de único estágio com um secador de múltiplos estágios utilizando biocombustíveis e concluíram que a alternativa de se utilizar múltiplos estágios é mais econômica para longos tempos de amortização. Saastamoinen (2004) analisa a transferência de calor através de secadores de leito deslizante, para a recuperação do calor de produtos quentes para o aquecimento de reagentes.

Baseado no trabalho de Ahn et al. (1963), Figueira et al. (2007a, 2007b) propõem encontrar condições operacionais ótimas que levem a elevadas taxas de secagem com redução do custo energético, de secadores de leito deslizante com escoamento concorrente. Nestes trabalhos, as condições do suprimento de ar foram definidas por métodos de otimização, os quais eram aplicados a cada estágio. A temperatura e a vazão de

alimentação de ar eram calculadas por um algoritmo iterativo, estipulando previamente o grau de secagem a ser atingido em cada estágio. Foi concluído que a umidade do grão e a temperatura do ar na entrada do secador diminuem com o aumento do número de estágios, com conseqüente diminuição no gasto de energia para aquecer o ar, indicando que a divisão do suprimento do ar de secagem é uma alternativa viável quando comparada com o secador convencional.

Pfeifer et al. (2009) estudaram o efeito da divisão em estágios de um secador de leito deslizante concorrente, comparando os resultados com um secador de um único estágio. Foi demonstrado que a estratégia de se transformar um secador de leito deslizante convencional em um secador de múltiplos estágios é satisfatória em relação à elevação do potencial de secagem.

Nesta tese, foi proposto modificar a configuração convencional de um secador de leito deslizante, dividindo o suprimento de ar em estágios igualmente divididos (Figura 2.9). Ar novo, ou seja, com condições de temperatura e umidade do ar iguais para cada estágio, é introduzido, gerando condições modificadas para a secagem em relação à velocidade e fluxo mássico de fluido.

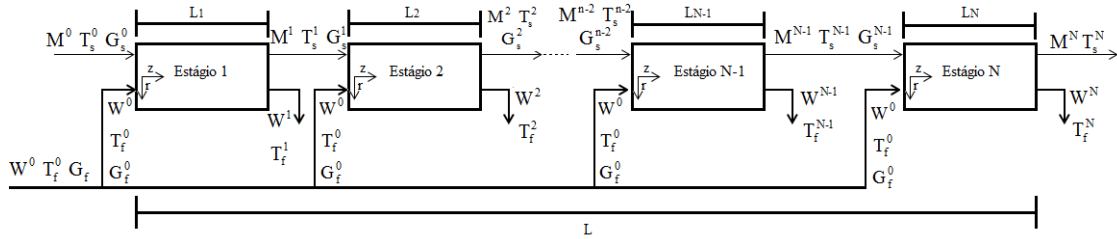


Figura 2.9: Esquema do secador concorrente de múltiplos estágios.

## 2.5 Otimização

A otimização matemática é uma área da ciência que busca encontrar a melhor solução (solução ótima) para problemas, quais sejam, de negócios, engenharia, economia, administração, entre outros.

A solução de um problema inicia-se com a sua formulação, baseada na função objetivo e nas restrições. A Função Objetivo é um índice de desempenho que permite medir a qualidade de uma resposta; no problema de minimização, quanto menor este valor, melhor a resposta; no problema de maximização, o inverso ocorre. Já as restrições estão relacionadas à limitação no espaço de busca.

Um problema de otimização pode ser resolvido através de Métodos Determinísticos e Estocásticos. No método Determinístico é possível prever todos os seus passos conhecendo seu ponto de partida. Em outras palavras, este método sempre leva à

mesma resposta se partir do mesmo ponto inicial. Nos métodos Estocásticos ou Aleatórios, o caráter aleatório de vários processos é simulado. Nestes métodos, várias escolhas são feitas com base em números aleatórios, sorteados no momento de execução do código. Como a cada execução do código os números sorteados serão diferentes, um método aleatório não executará a mesma sequência de operações em duas execuções sucessivas. Partindo de um mesmo ponto inicial, cada execução do código seguirá o seu próprio caminho, e possivelmente levará a uma resposta final diferente (Biscaia Jr., 2007), caso este código não apresente a mesma semente na geração do código aleatório.

Dentre os métodos estocásticos, os chamados Algoritmos Evolutivos (AEs) imitam os princípios da evolução natural ao criar procedimentos de otimização e busca. Um modelo simplificado do processo de seleção natural poderia ser expresso por (Biscaia Jr., 2007):

1. as características (boas ou ruins) dos indivíduos estão registradas nos seus genes, de forma codificada;
2. cada geração de indivíduos em uma população é formada pela combinação do material genético dos indivíduos da geração anterior;
3. ocasionalmente, ocorrem mutações aleatórias no material genético de um indivíduo, que podem torná-lo mais ou menos apto a sobreviver em seu meio;
4. os indivíduos mais aptos têm maior chance de sobreviverem e conseguirem passar seus genes para a próxima geração, ou seja, têm maior chance de se reproduzirem;
5. qualquer indivíduo - mais ou menos apto - tem a mesma probabilidade de sofrer mutação.

Dentre os AEs, se destacam os Algoritmos Genéticos (AGs) e as Estratégias Evolutivas (EEs). Segundo Bergamaschi e Bonfim (2010), o algoritmo de Evolução Diferencial (Estratégia Evolutiva) possui melhor desempenho, pois o número de avaliações da função objetivo, necessárias para encontrar a solução global, é geralmente menor que o número requerido pelos demais algoritmos evolutivos. Nesta tese, a estratégia evolutiva baseada no algoritmo de Evolução Diferencial é utilizada para otimizar as variáveis operacionais que influenciam na qualidade das sementes de soja.

O algoritmo de Evolução Diferencial (ED), proposto em 1995, por Storn e Price (1995), se configura como uma das estratégias evolutivas mais utilizadas para a resolução de problemas de otimização na ciência e engenharia. Seu sucesso se deve a sua concepção conceitual simples, fácil implementação, capacidade de estruturação em arquitetura paralela, habilidade de escapar de ótimos locais, e pelos resultados obtidos em aplicações com diferentes graus de complexidade (LOBATO, 2008).

O algoritmo de ED baseia-se na realização de operações vetoriais na qual a diferença ponderada entre dois indivíduos distintos, adicionada a um terceiro indivíduo, é responsável pela geração de candidatos. Assim, o indivíduo gerado através deste

esquema é avaliado segundo a função objetivo, podendo inclusive substituir indivíduos mal sucedidos nas gerações seguintes. Esta característica faz com que essa técnica seja reconhecida como uma abordagem puramente estrutural, o que a diferencia em relação às outras técnicas evolutivas, já que essas têm fundamentação teórica inspirada na natureza.

De maneira geral, o algoritmo de ED apresenta as seguintes operações: inicialização da população, mutação, cruzamento, seleção e o critério de parada do algoritmo.

O processo de inicialização da população no algoritmo de ED, assim como acontece em outras estratégias heurísticas, consiste na geração de indivíduos de forma aleatória. Neste caso, faz-se uso da definição do tamanho da população e do domínio de cada variável de projeto. A partir daí, geram-se números aleatórios que serão aplicados a esse intervalo, obtendo-se assim um vetor de indivíduos da população, como apresentado a seguir:

$$x_{i,j} = x_{i,L} + rand(x_{i,U} - x_{i,L}) \quad (2.29)$$

onde  $x_{i,L}$  e  $x_{i,U}$  são os limites inferiores e superiores das  $j$ -ésimas variáveis de projeto, respectivamente, e  $rand$  é um gerador de números aleatórios entre 0 e 1.

Uma vez inicializado o processo evolutivo, o algoritmo de ED realiza as operações de mutação e recombinação para a geração de uma nova população com  $NP$  indivíduos. O operador de mutação diferencial adiciona um vetor de referência, escolhido aleatoriamente na população, a um vetor diferença obtido a partir de outros dois vetores também escolhidos aleatoriamente na população. A equação (2.30) mostra como essa combinação é realizada para gerar o novo vetor (candidato)  $v_{i,g}$ :

$$v_{i,g} = x_{r0,g} + F(x_{r1,g} - x_{r2,g}) \quad (2.30)$$

onde o escalar  $F$ , denominado taxa de perturbação, é um número real que controla a magnitude do vetor diferença obtido em cada operação aritmética realizada. Os vetores  $x_{r0,g}$ ,  $x_{r1,g}$  e  $x_{r2,g}$  são geralmente escolhidos aleatoriamente na população, apesar de poderem ser definidos de outras formas (FAN; LAMPINEN, 2003), como ilustrado na Tabela 2.4.

A convenção utilizada nesta tabela é DE/X/Y/Z, onde X representa o vetor que será perturbado (BEST ou RAND). Por exemplo, optando-se por RAND, o vetor que será perturbado é escolhido aleatoriamente na população. Y é o número de pares de vetores que são considerados durante a perturbação e Z é o tipo de cruzamento usado para a geração do candidato, BIN no caso binomial e EXP no caso exponencial. Os subscritos  $\kappa_i$  ( $i=1, \dots, 5$ ) são índices escolhidos aleatoriamente na população.  $x_{best}$  é o melhor indivíduo da população na geração anterior e  $x_{old}$  é um indivíduo escolhido aleatoriamente dentro da população na geração anterior.

Para complementar a operação de mutação, o algoritmo de ED emprega o operador de cruzamento. Nesta operação, o vetor  $v_{i,g}$  gerado anteriormente pode ou não ser

Tabela 2.4: Representação dos mecanismos de mutação no algoritmo de Evolução Diferencial.

Estratégia	Representação	Mecanismo de Mutação
1	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j)$	DE/BEST/1/EXP
2	$x^{j+1} = x_{\kappa_3}^j + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j)$	DE/RAND/1/EXP
3	$x^{j+1} = x_{old}^j + F(x_{best}^j - x_{old}^j) + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j)$	DE/RAND-TO-BEST/2/EXP
4	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j) + F(x_{\kappa_3}^j - x_{\kappa_4}^j)$	DE/BEST/2/EXP
5	$x^{j+1} = x_{\kappa_5}^j + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j) + F(x_{\kappa_3}^j - x_{\kappa_4}^j)$	DE/RAND/2/EXP
6	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j)$	DE/BEST/1/BIN
7	$x^{j+1} = x_{\kappa_3}^j + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j)$	DE/RAND/1/BIN
8	$x^{j+1} = x_{old}^j + F(x_{best}^j - x_{old}^j) + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j)$	DE/RAND-TO-BEST/2/BIN
9	$x^{j+1} = x_{best}^j + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j) + F(x_{\kappa_3}^j - x_{\kappa_4}^j)$	DE/BEST/2/BIN
10	$x^{j+1} = x_{\kappa_5}^j + F(x_{\kappa_1}^j - x_{\kappa_2}^j) + F(x_{\kappa_3}^j - x_{\kappa_4}^j)$	DE/RAND/2/BIN

aceito na próxima geração de acordo com a seguinte condição:

$$u_{i,g} = \begin{cases} v_{i,g} & \text{se } rand \leq CR \text{ ou } j = j_{rand} \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.31)$$

na qual  $CR$  é denominada probabilidade de cruzamento, definida pelo usuário e contida no intervalo  $[0, 1]$ . Esse parâmetro controla as informações dos pais que serão transmitidas aos filhos. Para determinar qual a contribuição de um determinado vetor gerado, o cruzamento compara  $CR$  com o gerador de números randômicos  $rand$ . Se o número randômico gerado é menor ou igual a  $CR$ , o vetor  $v_{i,g}$  (com posição  $j_{rand}$ ) é aceito, caso contrário, o vetor  $x_{i,g}$  é mantido na população atual.

Se o vetor  $u_{i,g}$  tem melhor valor de função objetivo ( $f$ ) em relação ao vetor  $x_{i,g}$ , ele o substitui na próxima geração; caso contrário,  $x_{i,g}$  é mantido na população por mais uma geração, como mostrado a seguir:

$$x_{i,g+1} = \begin{cases} u_{i,g} & \text{se } f(u_{i,g}) \leq f(x_{i,g}) \\ x_{i,g} & \text{caso contrário} \end{cases} \quad (2.32)$$

Uma vez completado o processo de atualização da população que será considerada na próxima geração, todo o processo descrito acima é repetido até que um determinado critério de parada seja satisfeito.

Tradicionalmente, o principal critério de parada utilizado em abordagens evolutivas é restringir o número máximo de gerações. Todavia, outros mecanismos podem ser utilizados para finalizar o processo evolutivo, dentre os quais se pode citar: o tempo de processamento, o número de avaliações da função objetivo, o uso de um valor de referência obtido da literatura para essa finalidade e o monitoramento do próprio usuário.

Com relação à escolha dos parâmetros do algoritmo de ED, Storn e Price (1995) aconselham o uso dos seguintes valores: número de indivíduos da população como sendo igual a um valor entre 5 e 10 vezes o número de variáveis de projeto, taxa de perturbação  $F$  entre 0,2 e 2,0 e probabilidade de cruzamento  $CR$  entre 0,1 e 1,0.

Com relação à escolha da estratégia DE/X/Y/Z, Babu et al. (2005) e Babu e Anbarasu (2005) constataram em seus trabalhos que os melhores resultados, em termos de convergência e diversidade para os problemas estudados por esses autores, foram obtidos quando se utiliza a estratégia DE/RAND/1/BIN.

Na literatura, inúmeras aplicações usando o algoritmo de ED podem ser encontradas, dentre as quais pode-se citar a estimação de parâmetros cinéticos em um secador rotatório (LOBATO et al., 2008a); a estimação de parâmetros de um filtro adaptativo utilizado como ferramenta para controle de qualidade em linhas de montagem de câmbios automotivos (LOBATO et al., 2008b); e a estimação da difusividade térmica de frutas (MARIANI et al., 2008), entre outros (OLIVEIRA; SARAMAGO, 2005; BERGAMASCHI; BONFIM, 2010; FALCONE, 2004; BANGA et al., 2003; EGEEA et al., 2010).

Na área de controle ótimo tem-se como exemplos a determinação do perfil ótimo de alimentação de substrato em fermentadores (KAPADI; GUDI, 2004) e a resolução de problemas de controle ótimo clássicos com restrições de desigualdade (LOBATO et al., 2007). No contexto multi-objetivo destacam-se a otimização estrutural de vigas (LOBATO; Steffen Jr, 2007), a otimização das condições operacionais de um reator industrial utilizado para a produção de estireno (BABU et al., 2005) e o uso de técnicas de meta-modelagem associada ao enfoque multi-objetivo para o tratamento de um problema de interação fluido-estrutura (LOBATO, 2008).

## 2.6 Efeito da Parede e Fluidodinâmica Computacional

Nesta seção são apresentados os trabalhos referentes ao estudo do efeito da parede e a aplicação da fluidodinâmica computacional para a verificação deste efeito em leito deslizante.

### 2.6.1 Efeito da Parede

A presença de uma parede limita as partículas presentes em um leito empacotado, produzindo modificações no comportamento das partículas próximas à parede em relação às partículas no seio do leito. Essas modificações geram uma região na qual o efeito da parede não influencia a disposição das partículas, e outra, em que a estrutura

incerta, ocasiona a formação de arranjos regulares (FREIRE; GUBULIN, 1990).

A partir de observações visuais do escoamento de água em leitos de partículas envolvidos por colunas de material transparente, Furnas (1929) verificou que a permeabilidade do leito é maior nas regiões próximas à parede das colunas. Da mesma forma, foi verificado por Graton e Fraser (1935), que as partículas próximas às paredes de uma coluna de recheio apresentaram perda de homogeneidade, influenciando em variáveis como temperatura, velocidade e porosidade.

No trabalho de Leva e Grummer (1947) ficou demonstrado que a porosidade de um leito depende das dimensões da coluna, sendo que a porosidade média aumenta com o decréscimo da razão entre o diâmetro da coluna e o diâmetro das partículas.

Estudos mostram que em leitos fixos, a porosidade apresenta um comportamento oscilatório na direção radial (ZOTIN, 1985; ZOTIN; FREIRE, 1986; ZOTIN et al., 1985; JOHNSON; KAPNER, 1990; BENENATI; BROSILOW, 1962; DELMAS; FROMENT, 1988; BEY; EIGENBERGER, 1997; PAPAGEORGIOU; FROMENT, 1995). Para representar tais efeitos, modelos são apresentados na literatura (RIDGWAY; TARBUCK, 1968; VORTMEYER et al., 1992; LEGAWIEC; ZIOLKOWSKI, 1994) e validados por dados experimentais que demonstram o perfil não plano da velocidade radial (VORTMEYER; SCHUSTER, 1983; FAHIEN; STANKOVICH, 1979; SOUZA, 2001; LIRA et al., 2006, 2007, 2009).

Segundo Nagliate et al. (2010), Celestino (1998) e Souza (2001), a restrição estrutural observada em leitos fixos, faz com que a medida de velocidade seja realizada a uma determinada distância da saída do leito, no qual são adotados os valores e o comportamento fluidodinâmico do fluido na posição de medida como sendo o mesmo para toda a extensão do leito fixo (BEY; EIGENBERGER, 1997; SUBAGYO; BROOKS, 1998; BÉTTEGA et al., 2007).

Segundo Zotin (1985), Zotin e Freire (1986) e Zotin et al. (1985), da mesma forma que perturbações na geometria do leito interferem nos perfis de velocidade, o mesmo ocorre com os perfis de temperatura; os picos de velocidade provocados pelo escoamento do fluido, ocasionam mudanças de temperatura. Assim, é necessário analisar as consequências das modificações dos perfis de porosidade, velocidade e de temperatura, tanto na dinâmica do escoamento fluido/sólido quanto na transferência de massa e energia. Trabalhos na literatura apresentam as consequências desses efeitos na secagem em leito deslizante com escoamento concorrente e contracorrente (CELESTINO, 1998; SOUZA, 2001; LIRA et al., 2006, 2007, 2009; ASSIS et al., 2005).

Béttega et al. (2007) estudaram o efeito da medida de velocidade do fluido na saída do secador de leito fixo em relação à obtenção do perfil de velocidade dentro do secador. Os autores verificaram que grandes desvios ocorrem quando inferências são feitas, em relação ao efeito da parede, com a célula de secagem vazia e o mesmo efeito na saída do secador; e, que cuidados devem ser tomados na utilização desta medida na saída do secador em relação ao perfil de velocidade. Nagliate et al. (2010) realizaram a medição da velocidade em leito fixo através da fluidodinâmica computacional e verificaram um ajuste aos dados experimentais satisfatório, de um modelo mais simplificado que

representa a condição de contorno da saída do leito fixo.

### 2.6.2 A Técnica de Fluidodinâmica Computacional (CFD)

A intensificação do uso de computadores na área de análise numérica proporcionou a geração de metodologias e programas destinados ao estudo da dinâmica dos fluidos, como é o caso da Dinâmica de Fluido Computacional (em inglês, CFD - *Computational Fluid Dynamics*).

Diversas aplicações foram feitas e apresentadas na literatura, para o estudo em várias áreas do conhecimento. O avanço tecnológico dos computadores propiciou novas possibilidades para a abordagem dos problemas de engenharia. Com isso, esta tese, busca contribuir com o estudo da fluidodinâmica na secagem em leito deslizante, a fim de proporcionar o conhecimento de particularidades do sistema, que é de suma importância para projeto e otimização dessa classe de equipamentos.

Os códigos CFD comerciais são mais que simples resolvidores de sistemas de equações. Estes códigos permitem a geração de malhas, o controle e acompanhamento da solução ao longo das iterações e disponibilizam um *display* de resultados com alta capacidade gráfica para geração dos resultados. Uma das principais vantagens refere-se à rápida geração de resultados para sistemas simples (geometria simples, uma única fase e duas dimensões (2D)). A metodologia de volumes finitos é utilizada na maior parte dos códigos CFD comerciais, a partir da discretização das equações governantes na forma de um volume integral. (DUARTE, 2006).

A Fluidodinâmica Computacional consiste na solução da equação geral de transporte empregando métodos numéricos, como o Método dos Volumes Finitos e o Método dos Elementos Finitos, visando obter campos de velocidades, temperatura etc., possibilitando avaliar o transporte de uma propriedade de interesse. Tal ferramenta apresenta grande interesse do ponto de vista da Engenharia Química, pois a maioria dos processos desta área envolve mais de uma fase, o que acarreta uma dependência da transferência de massa e reação química com a concentração local e as superfícies de transferência locais, interfaces gás/líquido, gás-partícula, etc.

Uma ampla quantidade de escoamentos encontrados na natureza e nos processos industriais são constituídos por uma mistura de fases. Nestes tipos de escoamento, denominados de multifásicos, cada uma das fases pode ser, em tese, definida como uma classe identificável de material que possui características próprias e iterações típicas com o meio no qual está imersa.

As técnicas de Fluidodinâmica Computacional, têm contribuído para uma melhor compreensão da dinâmica dos escoamentos multifásicos. A resolução numérica dos escoamentos multifásicos pode ser compreendida tanto pela abordagem Euler-Lagrange quanto pela Euler-Euler. Pela abordagem Euler-Lagrange, a fase discreta é tratada

de forma lagrangeana. Tal fato implica em modelar a fase contínua pela resolução das equações médias de Navier-Stokes, completamente ausente da fase discreta, e a *posteriori*, utilizar as informações fluidodinâmicas previamente levantadas, como dados de entrada para a descrição do comportamento da fase discreta. Ressalta-se que esse tipo de abordagem é procedente somente naqueles casos em que a fase secundária (discreta) ocupa uma pequena fração volumétrica do sistema.

Por outro lado, a abordagem Euler-Euler, do ponto de vista matemático, considera que as diferentes fases do sistema se interpenetram. Como o volume de uma fase não pode ser ocupado pelo da outra, surge então, o conceito de fração volumétrica de fase. Estas frações volumétricas de fase são consideradas como funções contínuas no tempo e no espaço, cuja soma de todas, equivale à unidade. Para cada fase do sistema multifásico são necessárias as equações de conservação juntamente com as relações constitutivas (teóricas ou empíricas) (VIEIRA, 2006).

### Modelagem Euler-Euler

Como apresentado em Duarte (2006), dois procedimentos podem ser estabelecidos para utilização do vetor velocidade  $v(x, y, z, t)$  nos cálculos que envolvam o movimento de partículas em um fluido que escoar. Por exemplo, estipulando coordenadas fixas  $x_1$ ,  $y_1$  e  $z_1$  nas funções de campo de velocidade podemos exprimir a velocidade das partículas que passam por essa posição em qualquer instante, sendo o vetor  $v$  reescrito na forma  $v(x_1, y_1, z_1, t)$ . Esta visão é chamada de Lagrangeana.

Do ponto de vista Euleriano, deve-se usar a lei de Newton para cada partícula de um escoamento e necessita-se da razão de variação da velocidade de cada partícula em um escoamento. Assim, observando que  $x$ ,  $y$ ,  $z$  são funções do tempo, pode-se estabelecer o campo de aceleração pelo emprego da regra da cadeia da diferenciação parcial da seguinte maneira.

$$a = \frac{d}{dt}v(x, y, z, t) = \overbrace{\left( \frac{\partial v}{\partial x} \frac{dx}{dt} + \frac{\partial v}{\partial y} \frac{dy}{dt} + \frac{\partial v}{\partial z} \frac{dz}{dt} \right)}^{\text{Aceleração de Transporte ou Convectiva}} + \overbrace{\left( \frac{\partial v}{\partial t} \right)}^{\text{Aceleração Local}} \quad (2.33)$$

A aceleração das partículas fluidas em um campo de escoamento pode ser avaliada pela superposição de dois efeitos (DUARTE, 2006):

- Em um dado instante  $t$ , admite-se que o campo fique permanente. A partícula, em tais circunstâncias, está para mudar de posição nesse campo permanente. Dessa forma, ela está efetuando uma mudança de velocidade em várias posições neste campo em cada instante  $t$ . Essa razão de variação de velocidade com o tempo, devido à mudança de posição no campo, é chamada de aceleração de transporte, ou aceleração convectiva, e é dada pelos termos no primeiro parênteses da equação de aceleração precedente.

- O termo do segundo parênteses, nas equações de aceleração não aparece devido a mudança de posição da partícula, mas sim pela razão da variação do campo de velocidade na posição ocupada pela partícula nos instante  $t$ , a qual é chamada de aceleração local.

Para a modelagem de sistemas, quatro leis básicas devem ser satisfeitas para qualquer meio contínuo (DUARTE, 2006). São elas:

- conservação da matéria (equação da continuidade);
- segunda lei de Newton (equação da quantidade de movimento);
- conservação da energia (primeira lei da termodinâmica);
- segunda lei da termodinâmica.

A Eq. (2.34) a seguir representa a lei da conservação de uma propriedade,  $\phi$ :

$$\underbrace{\frac{\partial}{\partial t}(\rho\phi)}_{\text{Acúmulo}} + \underbrace{\text{div}(\rho u)\phi}_{\text{Convecção}} = \underbrace{+\text{div}(-\Gamma \text{grad}\phi)}_{\text{Difusão}} + \underbrace{S_\phi}_{\text{Geração ou destruição}} \quad (2.34)$$

considerando que  $\phi = 1$  para a conservação da massa;  $\phi = u, v, w$  para o balanço da quantidade de movimento e  $\phi = E$  para o balanço de energia.

As equações são derivadas a partir da conservação da massa e de movimento, aplicadas a cada elemento de volume da formulação Euler-Euler, consistindo nas equações da Continuidade e de Navier-Stokes para fases gasosa e sólida. Estas equações são transformadas necessariamente em sistemas de equações na forma discreta (DUARTE, 2006). Os métodos de discretização mais utilizados são: Diferenças finitas; Volumes finitos; Elementos finitos; Método híbrido volumes finitos/elementos finitos e Métodos espectrais.

A fluidodinâmica a ser modelada pode envolver os seguintes tipos de escoamentos: Estacionário e não estacionário; Compressíveis ou incompressíveis. O *software* de CFD, FLUENT 12.1, adotado neste trabalho no estudo da fluidodinâmica do secador de leito deslizante com escoamento contracorrente, utiliza o método de volumes finitos para discretização das equações de balanço de massa, energia e movimento.

A FLUENT Inc. disponibiliza por intermédio do software FLUENT® três distintos modelos multifásicos, segundo a abordagem Euler-Euler, a saber: o Modelo Volume de Fluido (VOF - *Volume of Fluid*), o Modelo de Mistura e o Modelo Euleriano. O Modelo VOF é uma técnica de localização de interfaces aplicadas a malhas eulerianas fixas. Este modelo multifásico deve ser empregado para escoamentos nos quais existe uma posição de interface bem definida entre dois ou mais fluidos imiscíveis. Este tipo de modelagem é comumente aplicado a escoamentos onde existe estratificação,

superfícies livres em tanques agitados, movimento de grandes bolhas num líquido, movimento de líquido em comportas de represas ou em valas, quebra de jatos de líquido, etc. (VIEIRA, 2006).

O Modelo de Mistura é concebido para duas ou mais fases (fluido ou partícula), sendo ambas tratadas como fluidos contínuos interpenetrantes. O Modelo de Mistura calcula as equações de transporte para a mistura e dita velocidades relativas para descrever as fases dispersas. Sua utilização é aconselhada para sistemas nos quais a fração volumétrica da fase discreta não ultrapasse o patamar de 10%. As aplicações mais frequentes do modelo de mistura encontram-se em escoamentos dotados de pequenas bolhas, ciclones, hidrociclones, transportadores pneumáticos ou hidráulicos etc (VIEIRA, 2006).

O Modelo Euleriano representa o mais complexo dos modelos multifásicos usados pelo FLUENT<sup>®</sup>. Baseia-se na resolução de um conjunto de  $n$ -equações de momento e continuidade de acordo como o número de fases incorporadas ao sistema. Neste modelo multifásico, o acoplamento é realizado por intermédio da pressão e dos coeficientes de transferência entre as fases. Quando as fases são partículas e fluidos, o escoamento recebe a nomenclatura de escoamento multifásico euleriano granular, ao passo que se as fases envolvidas forem apenas fluidos, denomina-se de escoamento multifásico não-granular euleriano. Exemplos típicos de aplicação desse modelo multifásico geralmente são para escoamentos em colunas de bolha, risers, leitos fluidizados, sedimentadores etc.

## Geração de Malhas Computacionais de Discretização

A geração de malha é a parte mais importante e que consome um maior tempo na análise de CFD. A qualidade da malha possui um papel direto na qualidade da análise, independente do tipo de resolvido de fluxo usado. Adicionalmente, os códigos CFD serão mais robustos e eficientes ao usar uma malha bem construída. É importante o analista de CFD saber e entender sobre os vários métodos de geração de grade. A partir do conhecimento destes métodos será possível selecionar a ferramenta certa para resolver o problema. Dentre os métodos de malha disponíveis atualmente destacam-se os métodos de malha estruturada, malha não estruturada e malha híbrida (DUARTE, 2006).

Na literatura são encontrados trabalhos sobre fluidodinâmica computacional relacionadas à leito de jorro, leito fluidizado, *spray dryers*, sedimentadores, entre outros (DUARTE, 2006; Vieira Neto, 2007; VIEIRA, 2006; SANTOS, 2008; AZIZIA et al., 2010; MOHANA; TALUKDAR, 2010; ERRIGUIBLEA; BERNADA, 2006; JAFARI et al., 2008; JAMALEDDINE; RAY, 2010; JIANG et al., 2001; KURIAKONSEA; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2010; LIA; MASONB, 2002; MALISKA, 2010; SALEM et al., 2011). Sobre secadores em leito deslizante, verifica-se apenas alguns trabalhos relacionados ao estudo do perfil de porosidade e velocidade radial do ar (NAGLIATE et al., 2010; BÉTTEGA et al., 2007;

SUBAGYO; BROOKS, 1998).

---

---

# CAPÍTULO 3

---

## Metodologia

Neste Capítulo, é apresentada a modelagem matemática baseada na aplicação das equações de balanço de massa e energia em um elemento de volume laminar plano com espessura infinitesimal posicionado perpendicularmente em relação aos campos de fluxos, conforme descrito por Valença (1999). O modelo resultante é utilizado para gerar cinco modelos (a partir de hipóteses simplificadoras) que serão estudados nos Capítulos 4 e 5 desta tese.

Para o estudo fluidodinâmico, são apresentadas as equações que governam o processo de secagem (movimento, massa e energia), utilizando o *software* FLUENT, conforme apresentado por Duarte (2006), Fluent (2006) e Vieira Neto (2007).

### 3.1 Modelagem Matemática

Seja o meio poroso uma região do espaço ocupada por uma fase sólida fixa ou em movimento, permeada por uma fase fluida (Figura 3.1), nas quais as propriedades do sólido e do gás são consideradas funções contínuas do tempo e da posição. Os termos fase fluida e fase sólida referem-se, respectivamente, à mistura gás-vapor e ao sólido úmido.

Nos balanços de massa e energia que serão apresentados a seguir, estão implícitas

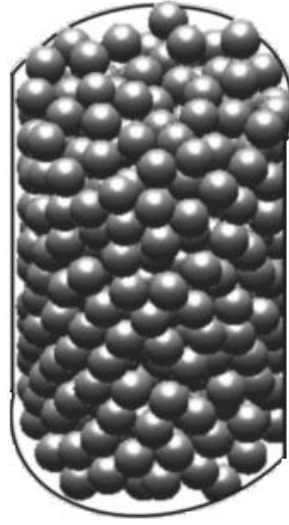


Figura 3.1: Esquema de um meio poroso.

as hipóteses:

- A transferência de massa e de energia através do meio se dá por convecção, sendo os demais mecanismos de transferência desprezíveis face a este.
- A conversão de energia mecânica em calor devido ao atrito entre os materiais em escoamento é desprezível.
- Há transferência de calor apenas entre a fase sólida e a fase fluida, sem perdas de energia através das superfícies que delimitam o meio poroso.

## 3.2 Balanços de Massa e Energia para a Fase Fluida

Seja empregado o símbolo  $\Phi_f$  para representar as propriedades extensivas da fase fluida tais como: massa de gás, massa de vapor e energia interna da fase e  $\phi_f$  para representar as propriedades intensivas expressas por  $\Phi_f$  por unidade de massa de fluido. Considerando que no meio poroso, um elemento de volume com tamanho infinitesimal  $dV$  contém uma massa  $dm_f$  de gás e uma quantidade  $d\Phi_f$  da grandeza extensiva  $\Phi_f$ , tem-se que o valor da variável intensiva  $\phi_f$  associado ao referido elemento de volume, obedece à relação:

$$\phi_f = \frac{d\Phi_f}{dm_f} \quad (3.1)$$

O balanço da grandeza  $\Phi_f$  em um volume de controle (VC), delimitado por uma superfície de controle (SC) contida no meio onde as duas fases escoam, é dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa líquida} \\ \text{de transporte} \\ \text{de } \Phi_f \text{ através} \\ \text{da superfície} \\ \text{de controle} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de transfe-} \\ \text{rência de } \Phi_f \text{ da} \\ \text{fase sólida para} \\ \text{a fase fluida no} \\ \text{interior do volu-} \\ \text{me de controle} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de variação} \\ \text{de } \Phi_f \text{ na fase fluida} \\ \text{contido no volume} \\ \text{de controle} \end{array} \right\} \quad (3.2)$$

(A) (B) (C)

Considerando cada termo desta expressão, tem-se:

i) A vazão global da grandeza  $\Phi_f$  através de toda a superfície de controle (termo A da Eq.(3.2)) é igual à soma das vazões  $d\dot{\Phi}_f$  associadas a cada um dos pontos que compõem esta superfície, ou seja:

$$A = \iint_{SC} d\dot{\Phi} \quad (3.3)$$

Da Eq.(3.1) tem-se que a taxa  $d\dot{\Phi}_f$  com que a grandeza  $\Phi_f$  flui por convecção através de um dado ponto da superfície SC é expressa por:

$$d\dot{\Phi}_f = \phi_f d\dot{m}_f \quad (3.4)$$

na qual  $d\dot{m}_f$  é a vazão mássica do gás que atravessa a superfície SC no ponto considerado. Esta vazão mássica é dada pela equação a seguir:

$$d\dot{m}_f = \rho_f dQ_f \quad (3.5)$$

na qual  $\rho_f$  é a massa de gás por unidade de volume de fase fluida e  $dQ_f$  é a vazão volumétrica de fase fluida no ponto considerado.

A vazão volumétrica  $dQ_f$  obedece à equação:

$$dQ_f = -\varepsilon \underline{\nu}_f \cdot d\underline{A} \quad (3.6)$$

na qual:

$d\underline{A}$  é o vetor área do ponto considerado sobre a superfície de controle;

$\underline{\nu}_f$  é a velocidade da fase fluida no ponto da superfície de controle ao qual está associado o vetor  $d\underline{A}$  e,

$\varepsilon$  é a fração volumétrica da fase fluida no ponto em questão.

Substituindo a Eq.(3.6) na Eq.(3.5), obtém-se:

$$d\dot{m}_f = -\varepsilon \rho_f \underline{\nu}_f \cdot d\underline{A} \quad (3.7)$$

E substituindo a Eq.(3.7) na Eq.(3.4), obtém-se:

$$d\dot{\Phi}_f = -\varepsilon \phi_f \rho_f \underline{\nu}_f \cdot d\underline{A} \quad (3.8)$$

Considerando que, em um dado ponto do meio, o fluxo mássico superficial do gás  $\underline{G}_f$ , é dado pela Eq.(3.9):

$$\underline{G}_f = \varepsilon \rho_f \underline{\nu}_f \quad (3.9)$$

e substituindo a Eq.(3.9) na Eq.(3.8), tem-se:

$$d\dot{\Phi}_f = -\phi_f \underline{G}_f \cdot d\underline{A} \quad (3.10)$$

Substituindo a Eq.(3.10) na Eq.(3.3), chega-se a:

$$A = - \iint_{SC} \phi_f \underline{G}_f \cdot d\underline{A} \quad (3.11)$$

Fazendo valer o teorema de Green da divergência, reescreve-se a Eq.(3.11) na forma:

$$A = - \iiint_{VC} \underline{\nabla} \cdot (\phi_f \underline{G}_f) dV \quad (3.12)$$

ii) Quanto à taxa de transferência de  $\Phi_f$  para o gás no interior de todo o volume

de controle (termo  $B$  da Eq.(3.2)), tem-se que:

$$B = \iiint_{VC} f_f dV \quad (3.13)$$

na qual  $f_f$  é a taxa de transferência de  $\Phi_f$  da fase sólida para a fase fluida, por unidade de volume do meio poroso em cada elemento de volume  $dV$  que compõe o volume de controle.

**iii)** Com relação à taxa de variação de  $\Phi_f$  no interior do volume de controle (termo  $C$  da Eq.(3.2)), esta pode ser expressa pela Eq.(3.14):

$$C = \iiint_{VC} \frac{\partial}{\partial t} d\Phi_f \quad (3.14)$$

na qual  $\frac{\partial}{\partial t} d\Phi_f$  é a taxa de variação de  $\Phi_f$  em cada elemento de volume  $dV$  que compõe o volume de controle. Como:

$$d\Phi_f = \frac{d\Phi_f}{dm_f} \frac{dm_f}{dV_f} dV_f \quad (3.15)$$

mas,

$$\frac{dm_f}{dV_f} = \rho_f \quad (3.16)$$

e

$$dV_f = \varepsilon dV \quad (3.17)$$

Substituindo as equações (3.1), (3.16) e (3.17) na Eq.(3.15), obtém-se:

$$d\Phi_f = \phi_f \rho_f \varepsilon dV \quad (3.18)$$

Substituindo a Eq.(3.18) na Eq.(3.14), vem:

$$C = \iiint_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_f \phi_f) dV \quad (3.19)$$

As equações (3.12), (3.13) e (3.19) quando substituídas na Eq.(3.2), resultam em:

$$- \iiint_{VC} \underline{\nabla} \cdot (\phi_f \underline{G}_f) dV + \iiint_{VC} f_f dV = \iiint_{VC} \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_f \phi_f) dV \quad (3.20)$$

$$\iiint_{VC} \left( -\underline{\nabla} \cdot (\phi_f \underline{G}_f) + f_f - \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_f \phi_f) \right) dV = 0 \quad (3.21)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_f \phi_f) + \underline{\nabla} \cdot (\phi_f \underline{G}_f) = f_f \quad (3.22)$$

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial \phi_f}{\partial t} + \phi_f \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_f) + \phi_f \underline{\nabla} \cdot \underline{G}_f + \underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} \phi_f = f_f \quad (3.23)$$

Que após manipulações algébricas, chega-se a:

$$\therefore \varepsilon \rho_f \frac{\partial \phi_f}{\partial t} + \underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} \phi_f + \phi_f \left( \frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_f) + \underline{\nabla} \cdot \underline{G}_f \right) = f_f \quad (3.24)$$

Se a grandeza  $\Phi_f$  é a massa de gás, temos, de acordo com a Eq.(3.1), que  $\phi_f$  é igual a 1. Neste caso,  $f_f$  fica sendo a taxa de transferência de gás da fase sólida para a fase fluida, que é igual a zero. Então a Eq.(3.22), se reduz a:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_f) + \underline{\nabla} \cdot (\underline{G}_f) = 0 \quad (3.25)$$

que expressa o balanço de gás seco no meio poroso.

Uma vez obtida a Eq.(3.25), a Eq.(3.24) pode ser resumida a:

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial \phi_f}{\partial t} + \underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} \phi_f = f_f \quad (3.26)$$

### 3.2.1 Balanço de Massa de Vapor na Fase Fluida

Se a grandeza  $\Phi_f$  é a massa de vapor contida no gás, tem-se, da Eq.(3.1), que:

$$\phi_f = W \quad (3.27)$$

na qual  $W$  é a umidade absoluta do gás.

Neste caso  $f_f$  fica sendo a taxa de transferência de umidade para o gás, por unidade de volume de meio poroso, taxa esta que será representada pelo símbolo  $f$ . A Eq.(3.26) passa, neste caso particular, a expressar o balanço de massa de vapor no meio, como mostra a Eq.(3.28).

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial W}{\partial t} + \underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} W = f \quad (3.28)$$

### 3.2.2 Balanço de Energia na Fase Fluida

Considerando  $f_f$  como sendo a energia transferida para a fase fluida, por unidade de volume de meio poroso (representada agora por  $f_{ef}$ ), tem-se que  $\phi_f$  fica sendo a entalpia da fase fluida por unidade de massa de gás. Esta variável, a qual se associa o símbolo  $H_{fl}$ , é dada pela Eq.(3.29):

$$H_{fl} = H_f + H_v W \quad (3.29)$$

na qual  $H_f$  é a entalpia do gás por unidade de massa de gás e  $H_v$  é a entalpia do vapor por unidade de massa de vapor.

Neste caso, a Eq.(3.26) se transforma em:

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial}{\partial t} (H_f + H_v W) + \underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} (H_f + H_v W) = f_{ef} \quad (3.30)$$

Desenvolvendo a Eq.(3.30), vem:

$$\varepsilon \rho_f \left( \frac{\partial H_f}{\partial t} + W \frac{\partial H_v}{\partial t} \right) + \underline{G}_f \cdot (\underline{\nabla} H_f + W \underline{\nabla} H_v) + H_v \left( \varepsilon \rho_f \frac{\partial W}{\partial t} + \underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} W \right) = f_{ef} \quad (3.31)$$

Substituindo a Eq.(3.28) na Eq.(3.31), obtém-se:

$$\varepsilon \rho_f \left( \frac{\partial H_f}{\partial t} + W \frac{\partial H_v}{\partial t} \right) + \underline{G}_f \cdot (\underline{\nabla} H_f + W \underline{\nabla} H_v) = f_{ef} - H_v f \quad (3.32)$$

Mas,

$$H_f = C_{pf} (T_f - T_R) \quad (3.33)$$

e

$$H_v = \lambda + C_{pv} (T_f - T_R) \quad (3.34)$$

na qual  $T_R$  é um valor arbitrário de temperatura ao qual pode-se associar entalpia igual a zero para a água líquida, o sólido e o gás, temperatura esta que para a qual considera-se o valor usual de  $0^\circ\text{C}$ .  $\lambda$  é o calor latente de vaporização da água na temperatura  $T_R$  e  $C_{pf}$ ,  $C_{pv}$  são as capacidades caloríficas à pressão constante do gás e do vapor, respectivamente.

Substituindo as Eqs.(3.33) e (3.34) na Eq.(3.32), obtém-se:

$$\begin{aligned} & \varepsilon \rho_f \left( \frac{\partial}{\partial t} (C_{pf} (T_f - T_R)) + W \frac{\partial}{\partial t} (\lambda + C_{pv} (T_f - T_R)) \right) + \\ & + \underline{G}_f \cdot (\underline{\nabla} (C_{pf} (T_f - T_R)) + W \underline{\nabla} (\lambda + C_{pv} (T_f - T_R))) = \\ & f_{ef} - (\lambda + C_{pv} (T_f - T_R)) f \end{aligned} \quad (3.35)$$

$$\begin{aligned} \therefore \varepsilon \rho_f & \left( C_{pf} \frac{\partial T_f}{\partial t} + T_f \frac{\partial C_{pf}}{\partial t} + W \left( \frac{\partial \lambda}{\partial t} + C_{pv} \frac{\partial T_f}{\partial t} + T_f \frac{\partial C_{pv}}{\partial t} \right) \right) + \\ & + \underline{G}_f \cdot (C_{pf} \underline{\nabla} T_f + T_f \underline{\nabla} C_{pf} + W (\underline{\nabla} \lambda + C_{pv} \underline{\nabla} T_f + T_f \underline{\nabla} C_{pv})) = \\ & = f_{ef} - H_v f \end{aligned} \quad (3.36)$$

$$\begin{aligned} \therefore \varepsilon \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} (C_{pf} + W C_{pv}) & + \varepsilon \rho_f \left( T_f \frac{\partial C_{pf}}{\partial t} + W \frac{\partial \lambda}{\partial t} + W T_f \frac{\partial C_{pv}}{\partial t} \right) + \\ & + \underline{G}_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \underline{\nabla} T_f + \underline{G}_f \cdot (T_f (\underline{\nabla} C_{pf} + \underline{\nabla} C_{pv}) + W \underline{\nabla} \lambda) = \\ & = f_{ef} - H_v f \end{aligned} \quad (3.37)$$

Na troca de energia entre as fases, calor é transferido pelo mecanismo convectivo

a uma taxa dada pela Lei de Newton do resfriamento que, tomando por referência a fase fluida, pode ser escrita na forma:

$$q = -h a (T_f - T_s) \quad (3.38)$$

na qual  $q$  é a transferência de calor por unidade de volume de meio poroso;  $h$  é o coeficiente de transferência de calor entre o gás e o sólido;  $a$  é a área da interface sólido-gás por unidade de volume de meio poroso;  $T_f$  é a temperatura da fase fluida e  $T_s$  é a temperatura da fase sólida.

Simultaneamente com a transferência de calor, a fase sólida cede vapor com temperatura  $T_s$  à fase fluida, na qual há uma quantidade de entalpia  $H_{sf}$  dada pela Eq.(3.39):

$$H_{sf} = f H_u \quad (3.39)$$

na qual  $H_u$  é a entalpia da umidade do sólido.

Tem-se que a taxa de ganho de energia,  $f_{ef}$ , da fase fluida é dada pela soma das equações (3.38) e (3.39), ou seja:

$$f_{ef} = -h a (T_f - T_s) + f H_v \quad (3.40)$$

Com relação à entalpia  $H_v$  do vapor, esta pode ser expressa pela Eq.(3.41):

$$H_v = \lambda + C_{pv} (T_f - T_R) \quad (3.41)$$

Substituindo as equações (3.40) e (3.41) na Eq.(37) e simplificando o resultado, obtém-se:

$$\begin{aligned} & \varepsilon \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} (C_{pf} + W C_{pv}) + \varepsilon \rho_f \left( T_f \frac{\partial C_{pf}}{\partial t} + W \frac{\partial \lambda}{\partial t} + W T_f \frac{\partial C_{pv}}{\partial t} \right) + \\ & + \underline{G}_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \underline{\nabla} T_f + \underline{G}_f \cdot (T_f (\underline{\nabla} C_{pf} + \underline{\nabla} C_{pv}) + W \underline{\nabla} \lambda) = \\ & = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.42)$$

### 3.3 Balanço de Massa e Energia para a Fase Sólida

Seja empregado o símbolo  $\Phi_s$  para representar as propriedades extensivas da fase sólida tais como: massa de sólido, massa de água retida no sólido ou energia interna da fase e  $\phi_s$  para representar as propriedades intensivas expressas por  $\Phi_s$  por unidade

de massa de sólido. Considerando que no meio poroso, um elemento de volume com tamanho infinitesimal  $dV$  contém uma massa  $dm_s$  de sólido e uma quantidade  $d\Phi_s$  da grandeza extensiva  $\Phi_s$ , tem-se que o valor da variável intensiva  $\phi_s$  associado ao referido elemento de volume, obedece à relação:

$$\phi_s = \frac{d\Phi_s}{dm_s} \quad (3.43)$$

O balanço da grandeza  $\Phi_s$  em um volume de controle (VC) inserido no meio poroso, é dado por:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa global de} \\ \text{transporte de} \\ \Phi_s \text{ através} \\ \text{da superfície} \\ \text{de controle} \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de transfe-} \\ \text{rência de } \Phi_f \text{ da} \\ \text{fase fluida para} \\ \text{a fase sólida no} \\ \text{interior do volu-} \\ \text{me de controle} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Taxa de variação} \\ \text{de } \Phi_s \text{ na fase} \\ \text{sólida contido} \\ \text{no volume} \\ \text{de controle} \end{array} \right\} \quad (3.44)$$

Repetindo dedução análoga à desenvolvida na Seção 3.2, substituindo a palavra gás pelo termo sólido, o sub-índice  $(.)_f$  pelo sub-índice  $(.)_s$  e trocando, nas equações, a fração volumétrica  $\varepsilon$  do gás pela fração volumétrica  $(1 - \varepsilon)$  do sólido, tem-se como resultado a equação geral de balanço na fase sólida, análoga à Eq.(3.22):

$$\frac{\partial}{\partial t}((1 - \varepsilon) \rho_s \phi_s) + \nabla \cdot (\phi_s \underline{G}_s) = f_s \quad (3.45)$$

na qual  $\rho_s$  é a massa de sólido por unidade de volume de fase sólida,  $\underline{G}_s$  é o fluxo mássico da fase sólida, enquanto que  $f_s$  é a taxa de transferência da grandeza  $\Phi_s$  para a fase sólida, por unidade de volume de meio poroso, em um elemento de volume infinitesimal contido no meio poroso.

Desenvolvendo a Eq.(3.45), vem:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial \phi_s}{\partial t} + \phi_s \frac{\partial}{\partial t}((1 - \varepsilon) \rho_s) + \phi_s \nabla \cdot \underline{G}_s + \underline{G}_s \cdot \nabla \phi_s = f_s \quad (3.46)$$

$$\therefore (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial \phi_s}{\partial t} + \underline{G}_s \cdot \nabla \phi_s + \phi_s \left( \frac{\partial}{\partial t}((1 - \varepsilon) \rho_s) + \nabla \cdot \underline{G}_s \right) = f_s \quad (3.47)$$

Quando se considera  $\Phi_s$  como sendo a massa de sólido, tem-se, da Eq.(3.43), que  $\phi_s$  é igual a 1. Neste caso,  $f_s$  fica sendo a taxa de transferência da grandeza  $\Phi_s$  da fase

fluida para a sólida, que é igual a zero. Então a Eq.(3.45), se reduz a:

$$\frac{\partial}{\partial t}((1 - \varepsilon) \rho_s) + \underline{\nabla} \cdot \underline{G}_s = 0 \quad (3.48)$$

Substituindo a Eq.(3.48) na Eq.(3.47), obtém-se:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial \phi_s}{\partial t} + \underline{G}_s \cdot \underline{\nabla} \phi_s = f_s \quad (3.49)$$

### 3.3.1 Balanço de Massa de Umidade na Fase Sólida

Considerando a grandeza  $\Phi_s$  como sendo a massa de água retida no sólido sob a forma de umidade, vem da Eq.(3.43) que  $\phi_s$  é, neste caso, a umidade  $M$  do sólido, em base seca, e  $f_s$  fica sendo a taxa de transferência de umidade para a fase sólida por unidade de volume de meio poroso, taxa esta que é igual a  $-f$ . A Eq.(3.49) se transforma então em:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t} + \underline{G}_s \cdot \underline{\nabla} M = -f \quad (3.50)$$

### 3.3.2 Balanço de Energia na Fase Sólida

Considerando a grandeza  $\Phi_s$  como sendo a energia interna da fase sólida, tem-se que  $\phi_s$ , sendo aqui representada por  $H_{su}$ , fica sendo a energia interna da fase sólida, por unidade de massa de sólido seco. A grandeza  $f_s$  passa a ser a taxa de transferência de energia para o sólido, por unidade de volume de meio poroso, que é igual a  $-f_{ef}$ , na qual,  $f_{ef}$  é a taxa de transferência de energia da fase sólida para a fase fluida, por unidade de volume de meio poroso, dada pela Eq.(3.40). Então a (3.49) fica:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial H_{su}}{\partial t} + \underline{G}_s \cdot \underline{\nabla} H_{su} = -f_{ef} \quad (3.51)$$

A energia interna da fase sólida por unidade de massa de sólido é dada por:

$$H_{su} = H_s + H_u M \quad (3.52)$$

na qual  $H_s$  é a entalpia do sólido por unidade de massa de sólido e  $H_u$  é a entalpia da umidade do sólido por unidade de massa de umidade.

Substituindo a Eq.(3.52) na Eq.(3.51), obtém-se:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \left( \frac{\partial H_s}{\partial t} + H_u \frac{\partial M}{\partial t} + M \frac{\partial H_u}{\partial t} \right) + \underline{G}_s \cdot (\underline{\nabla} H_s + H_u \underline{\nabla} M + M \underline{\nabla} H_u) = -f_{ef} \quad (3.53)$$

$$\begin{aligned} \therefore (1 - \varepsilon) \rho_s \left( \frac{\partial H_s}{\partial t} + M \frac{\partial H_u}{\partial t} \right) + \underline{G}_s \cdot (\underline{\nabla} H_s + M \underline{\nabla} H_u) + \\ H_u \left( (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t} + \underline{G}_s \cdot \underline{\nabla} M \right) = -f_{ef} \end{aligned} \quad (3.54)$$

Substituindo a Eq.(3.50) na Eq.(3.3.2), obtém-se:

$$\therefore (1 - \varepsilon) \rho_s \left( \frac{\partial H_s}{\partial t} + M \frac{\partial H_u}{\partial t} \right) + \underline{G}_s \cdot (\underline{\nabla} H_s + M \underline{\nabla} H_u) = -f_{ef} + H_u f \quad (3.55)$$

Mas,

$$H_s = C_{ps} (T_s - T_R) \quad (3.56)$$

e

$$H_u = C_{pl} (T_s - T_R) \quad (3.57)$$

nas quais  $C_{ps}$  e  $C_{pl}$  são as capacidades térmicas a pressão constante do sólido e da sua umidade, respectivamente.

Substituindo as equações (3.56) e (3.57) na Eq.(3.3.2), obtém-se:

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon) \rho_s \left( \frac{\partial}{\partial t} (C_{ps} (T_s - T_R)) + M \frac{\partial}{\partial t} (C_{pl} (T_s - T_R)) \right) + \\ \underline{G}_s \cdot (\underline{\nabla} (C_{ps} (T_s - T_R)) + M \underline{\nabla} (C_{pl} (T_s - T_R))) = -f_{ef} + (C_{pl} (T_s - T_R)) f \end{aligned} \quad (3.58)$$

Substituindo a Eq.(3.40) na Eq.(3.3.2) e simplificando o resultado, obtém-se:

$$\begin{aligned} & (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} (C_{ps} + M C_{pl}) + (1 - \varepsilon) \rho_s \left( T_s \frac{\partial C_{ps}}{\partial t} + M T_s \frac{\partial C_{pl}}{\partial t} \right) + \\ & + \underline{G}_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \underline{\nabla} T_s + \underline{G}_s \cdot (T_s \underline{\nabla} C_{ps} + M T_s \underline{\nabla} C_{pl}) = \\ & = -(-h a (T_f - T_s) + f (\lambda + C_{pv} (T_f - T_R))) + (C_{pl} (T_s - T_R)) f \end{aligned} \quad (3.59)$$

$$\begin{aligned} \therefore (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} (C_{ps} + M C_{pl}) + (1 - \varepsilon) \rho_s \left( T_s \frac{\partial C_{ps}}{\partial t} + M T_s \frac{\partial C_{pl}}{\partial t} \right) + \\ + \underline{G}_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \underline{\nabla} T_s + \underline{G}_s \cdot (T_s \underline{\nabla} C_{ps} + M T_s \underline{\nabla} C_{pl}) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \end{aligned} \quad (3.60)$$

## 3.4 Resumo

- Balanço de Massa de Gás Seco

$$\frac{\partial}{\partial t} (\varepsilon \rho_f) + \underline{\nabla} \cdot (\underline{G}_f) = 0 \quad (3.61)$$

- Balanço de Massa de Sólido Seco

$$\frac{\partial}{\partial t} ((1 - \varepsilon) \rho_s) + \underline{\nabla} \cdot \underline{G}_s = 0 \quad (3.62)$$

- Balanço de Massa de Vapor

$$\varepsilon \rho_f \frac{\partial W}{\partial t} + \underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} W = f \quad (3.63)$$

- Balanço de Massa de Umidade do Sólido

$$(1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial M}{\partial t} + \underline{G}_s \cdot \underline{\nabla} M = -f \quad (3.64)$$

- Balanço de Energia da Fase Fluida

$$\begin{aligned} \varepsilon \rho_f \frac{\partial T_f}{\partial t} (C_{pf} + W C_{pv}) + \varepsilon \rho_f \left( T_f \frac{\partial C_{pf}}{\partial t} + W \frac{\partial \lambda}{\partial t} + W T_f \frac{\partial C_{pv}}{\partial t} \right) + \\ + \underline{G}_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \underline{\nabla} T_f + \underline{G}_f \cdot (T_f (\underline{\nabla} C_{pf} + \underline{\nabla} C_{pv}) + W \underline{\nabla} \lambda) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.65)$$

- Balanço de Energia da Fase Sólida

$$\begin{aligned} (1 - \varepsilon) \rho_s \frac{\partial T_s}{\partial t} (C_{ps} + M C_{pl}) + (1 - \varepsilon) \rho_s \left( T_s \frac{\partial C_{ps}}{\partial t} + M T_s \frac{\partial C_{pl}}{\partial t} \right) + \\ + \underline{G}_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \underline{\nabla} T_s + \underline{G}_s \cdot (T_s \underline{\nabla} C_{ps} + M T_s \underline{\nabla} C_{pl}) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \end{aligned} \quad (3.66)$$

## 3.5 Modelagem dos Estudos de Casos

### 3.5.1 Modelo 1

Admitindo que o processo de secagem em leito deslizante opera em regime permanente, que os fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais (Eixo x), que o calor latente de vaporização da água ( $\lambda$ ) é constante, as equações obtidas na seção anterior ficam:

**Balanço de Massa de Gás Seco**

$$\underline{\nabla} \cdot (\underline{G}_f) = 0 \rightarrow \frac{\partial G_f}{\partial x} = 0 \rightarrow G_f = cte \quad (3.67)$$

**Balanço de Massa de Sólido Seco**

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{G}_s = 0 \rightarrow \frac{\partial G_s}{\partial x} = 0 \rightarrow G_s = cte \quad (3.68)$$

**Balanço de Massa de Vapor**

$$\underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} W = f \rightarrow \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{f}{G_f} \quad (3.69)$$

**Balço de Massa de Unidade do Sólido**

$$\underline{G}_s \cdot \underline{\nabla} M = -f \rightarrow \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{-f}{G_s} \quad (3.70)$$

**Balço de Energia da Fase Fluida**

$$\begin{aligned} \underline{G}_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \underline{\nabla} T_f + \underline{G}_f \cdot (T_f (\underline{\nabla} C_{pf} + \underline{\nabla} C_{pv}) + W \underline{\nabla} \lambda) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.71)$$

$$\begin{aligned} G_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \frac{\partial T_f}{\partial x} + G_f \cdot \left( T_f \left( \frac{\partial C_{pf}}{\partial x} + \frac{\partial C_{pv}}{\partial x} \right) + W \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.72)$$

$$\begin{aligned} G_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \frac{\partial T_f}{\partial x} + G_f \cdot \left( T_f \left( \frac{\partial C_{pf}}{\partial x} + \frac{\partial C_{pv}}{\partial x} \right) \right) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.73)$$

Considerando que as propriedades: calor específico do fluido e do vapor variam conforme as equações (3.74) e (3.75) (HIMMELBLAU; RIGGS, 2006), as equações de balanço resultam no sistema composto pela equações (3.69, 3.70, 3.77, 3.5.1).

$$C_{pf} = a_1 + b_1 T_f + c_1 T_f^{-2} \quad (3.74)$$

$$C_{pv} = a_2 + b_2 T_f + c_2 T_f^{-2} \quad (3.75)$$

$$\begin{aligned} G_f \cdot ((a_1 + b_1 T_f + c_1 T_f^{-2}) + W (a_2 + b_2 T_f + c_2 T_f^{-2})) \frac{\partial T_f}{\partial x} + \\ G_f \cdot \left( T_f \left( \frac{\partial (a_1 + b_1 T_f + c_1 T_f^{-2})}{\partial x} + \frac{\partial (a_2 + b_2 T_f + c_2 T_f^{-2})}{\partial x} \right) \right) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.76)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{-ha(T_f - T_s)}{G_f \left( a_1 + b_1 T_f + \frac{c_1}{T_f^2} + W \left( a_2 + b_2 T_f + \frac{c_1}{T_f^2} \right) \right) + G_f T_f \left( b_1 - \frac{2c_1}{T_f^3} + b_2 - \frac{2c_2}{T_f^3} \right)} \quad (3.77)$$

### Balanco de Energia da Fase Sólida

$$\begin{aligned} \underline{G}_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \underline{\nabla} T_s + \underline{G}_s \cdot (T_s \underline{\nabla} C_{ps} + M T_s \underline{\nabla} C_{pl}) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \end{aligned} \quad (3.78)$$

$$\begin{aligned} G_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \frac{\partial T_s}{\partial x} + G_s \cdot \left( T_s \frac{\partial C_{ps}}{\partial x} + M T_s \frac{\partial C_{pl}}{\partial x} \right) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \end{aligned} \quad (3.79)$$

A Equação (3.80) e a Equação (3.81) apresentam a variação do calor específico da água líquida e do sólido com a temperatura, respectivamente (SARTORI, 1986; HIMMELBLAU; RIGGS, 2006).

$$C_{pl} = a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2 \quad (3.80)$$

$$C_{ps} = a_4 + b_4 \frac{M}{1 + M} \quad (3.81)$$

$$\begin{aligned} G_s \cdot \left( a_4 + b_4 \frac{M}{1 + M} + M (a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2) \right) \frac{\partial T_s}{\partial x} + \\ G_s \cdot \left( T_s \frac{\partial (a_4 + b_4 \frac{M}{1 + M})}{\partial x} + M T_s \frac{\partial (a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2)}{\partial x} \right) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + (a_2 + b_2 T_f + c_2 T_f^{-2}) T_f + (a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2) T_s) \end{aligned} \quad (3.82)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{(ha(T_f - T_s) - f(\lambda + a_2 T_f + b_2 T_f^2 + c_2 T_f^{-1} + a_3 T_s + b_3 T_s^2 + c_3 T_s^3))(1 + M)^2}{Aux1} + \\ + \frac{T_s b_4 f}{Aux1} \end{aligned} \quad (3.83)$$

sendo

$$\begin{aligned} Aux1 = & G_s (a_4 (1 + 2M + M^2) + b_4 (M + M^2)) + \\ & G_s ((1 + 2M + M^2) (a_3 M + 2b_3 T_s M + 3c_3 T_s^2 M)) \end{aligned} \quad (3.84)$$

### 3.5.2 Modelo 2

Admitindo que o processo de secagem em leito deslizante opera em regime permanente, que os fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais (Eixo x), que o calor latente de vaporização da água  $\lambda$  e o calor específico do sólido são constantes, o modelo 2 é composto pelas equações (3.69, 3.70, 3.77, 3.87):

$$\begin{aligned} G_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \frac{\partial T_s}{\partial x} + G_s \cdot \left( T_s \frac{\partial C_{ps}}{\partial x} + M T_s \frac{\partial C_{pl}}{\partial x} \right) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \end{aligned} \quad (3.85)$$

$$\begin{aligned} G_s \cdot (C_{ps} + M (a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2)) \frac{\partial T_s}{\partial x} + G_s \cdot \left( M T_s \frac{\partial (a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2)}{\partial x} \right) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + (a_2 + b_2 T_f + c_2 T_f^{-2}) T_f + (a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2) T_s) \end{aligned} \quad (3.86)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{(h a (T_f - T_s) - f (\lambda + a_2 T_f + b_2 T_f^2 + c_2 T_f^{-1} + a_3 T_s + b_3 T_s^2 + c_3 T_s^3))}{G_s (C_{ps} + M(a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2)) + G_s M T_s (b_3 + 2c_3 T_s)} \quad (3.87)$$

### 3.5.3 Modelo 3

O modelo 3 é obtido a partir das seguintes hipóteses:

- a secagem em leito deslizante opera em regime permanente,
- os fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais (Eixo x),
- o calor latente de vaporização da água  $\lambda$ , o calor específico do sólido e a densidade do sólido são constantes,
- os fluxos mássicos são obtidos a partir das Equações de velocidade 3.130 e 3.135 e,

- a porosidade do leito varia conforme a Equação 3.129.

#### Balanco de Massa de Gás Seco

$$\underline{\nabla} \cdot (\underline{G}_f) = 0 \rightarrow \frac{\partial G_f}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{\partial(\epsilon \rho_f v_f)}{\partial x} = 0 \quad (3.88)$$

$$\epsilon \rho_f \frac{\partial v_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial(\epsilon \rho_f)}{\partial x} = 0 \rightarrow \epsilon \rho_f \frac{\partial v_f}{\partial x} = 0 \quad (3.89)$$

#### Balanco de Massa de Sólido Seco

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{G}_s = 0 \rightarrow \frac{\partial G_s}{\partial x} = 0 \rightarrow G_s = cte \quad (3.90)$$

#### Balanco de Massa de Vapor

$$\underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} W = f \rightarrow \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{f}{(\epsilon \rho_f v_f)} \quad (3.91)$$

#### Balanco de Massa de Umidade do Sólido

$$\underline{G}_s \cdot \underline{\nabla} M = -f \rightarrow \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{-f}{G_s} \quad (3.92)$$

#### Balanco de Energia da Fase Fluida

$$\begin{aligned} \underline{G}_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \underline{\nabla} T_f + \underline{G}_f \cdot (T_f (\underline{\nabla} C_{pf} + \underline{\nabla} C_{pv}) + W \underline{\nabla} \lambda) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.93)$$

$$\begin{aligned} G_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \frac{\partial T_f}{\partial x} + G_f \cdot \left( T_f \left( \frac{\partial C_{pf}}{\partial x} + \frac{\partial C_{pv}}{\partial x} \right) + W \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.94)$$

$$\begin{aligned} G_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \frac{\partial T_f}{\partial x} + G_f \cdot \left( T_f \left( \frac{\partial C_{pf}}{\partial x} + \frac{\partial C_{pv}}{\partial x} \right) \right) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.95)$$

mas:

$$C_{pf} = a_1 + b_1 T_f + c_1 T_f^{-2} \quad (3.96)$$

$$C_{pv} = a_2 + b_2 T_f + c_2 T_f^{-2} \quad (3.97)$$

$$\begin{aligned} & G_f \cdot ((a_1 + b_1 T_f + c_1 T_f^{-2}) + W (a_2 + b_2 T_f + c_2 T_f^{-2})) \frac{\partial T_f}{\partial x} + \\ & G_f \cdot \left( T_f \left( \frac{\partial(a_1 + b_1 T_f + c_1 T_f^{-2})}{\partial x} + \frac{\partial(a_2 + b_2 T_f + c_2 T_f^{-2})}{\partial x} \right) \right) = \\ & = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.98)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{-h a (T_f - T_s)}{(\epsilon \rho_f v_f) \left( a_1 + b_1 T_f + \frac{c_1}{T_f^2} + W \left( a_2 + b_2 T_f + \frac{c_2}{T_f^2} \right) \right) + Aux2} \quad (3.99)$$

$$Aux2 = (\epsilon \rho_f v_f) T_f \left( b_1 - \frac{2c_1}{T_f^3} + b_2 - \frac{2c_2}{T_f^3} \right) \quad (3.100)$$

### Balanco de Energia da Fase Sólida

$$\begin{aligned} \underline{G}_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \underline{\nabla} T_s + \underline{G}_s \cdot (T_s \underline{\nabla} C_{ps} + M T_s \underline{\nabla} C_{pl}) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \end{aligned} \quad (3.101)$$

$$\begin{aligned} G_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \frac{\partial T_s}{\partial x} + G_s \cdot \left( T_s \frac{\partial C_{ps}}{\partial x} + M T_s \frac{\partial C_{pl}}{\partial x} \right) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \end{aligned} \quad (3.102)$$

mas:

$$C_{pl} = a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2 \quad (3.103)$$

$$\begin{aligned}
G_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \frac{\partial T_s}{\partial x} + G_s \cdot \left( T_s \frac{\partial C_{ps}}{\partial x} + M T_s \frac{\partial C_{pl}}{\partial x} \right) = \\
= h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s)
\end{aligned} \quad (3.104)$$

$$\begin{aligned}
G_s \cdot (C_{ps} + M (a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2)) \frac{\partial T_s}{\partial x} + G_s \cdot \left( M T_s \frac{\partial (a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2)}{\partial x} \right) = \\
= h a (T_f - T_s) - f (\lambda + (a_2 + b_2 T_f + c_2 T_f^2) T_f + (a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2) T_s)
\end{aligned} \quad (3.105)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{(h a (T_f - T_s) - f (\lambda + a_2 T_f + b_2 T_f^2 + c_2 T_f^3 + a_3 T_s + b_3 T_s^2 + c_3 T_s^3))}{G_s (C_{ps} + M(a_3 + b_3 T_s + c_3 T_s^2)) + G_s M T_s (b_3 + 2c_3 T_s)} \quad (3.106)$$

### 3.5.4 Modelo 4

O modelo 4 é obtido a partir das seguintes hipóteses:

- a secagem em leito deslizante opera em regime permanente,
- os fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais (Eixo x),
- as propriedades físico-químicas são constantes,
- os fluxos mássicos são obtidos a partir das Equações de velocidade 3.130 e 3.135 e,
- a porosidade do leito varia conforme as Equações 3.129.

#### Balanco de Massa de Gás Seco

$$\underline{\nabla} \cdot (\underline{G}_f) = 0 \rightarrow \frac{\partial G_f}{\partial x} = 0 \rightarrow \frac{\partial(\epsilon \rho_f v_f)}{\partial x} = 0 \quad (3.107)$$

$$\epsilon \rho_f \frac{\partial v_f}{\partial x} + v_f \frac{\partial(\epsilon \rho_f)}{\partial x} = 0 \rightarrow \epsilon \rho_f \frac{\partial v_f}{\partial x} = 0 \quad (3.108)$$

#### Balanco de Massa de Sólido Seco

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{G}_s = 0 \rightarrow \frac{\partial G_s}{\partial x} = 0 \rightarrow G_s = cte \quad (3.109)$$

**Balanco de Massa de Vapor**

$$\underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} W = f \rightarrow \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{f}{(\epsilon \rho_f v_f)} \quad (3.110)$$

**Balanco de Massa de Umidade do Sólido**

$$\underline{G}_s \cdot \underline{\nabla} M = -f \rightarrow \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{-f}{G_s} \quad (3.111)$$

**Balanco de Energia da Fase Fluida**

$$\begin{aligned} \underline{G}_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \underline{\nabla} T_f + \underline{G}_f \cdot (T_f (\underline{\nabla} C_{pf} + \underline{\nabla} C_{pv}) + W \underline{\nabla} \lambda) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.112)$$

$$G_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \frac{\partial T_f}{\partial x} = -h a (T_f - T_s) \quad (3.113)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{-h a (T_f - T_s)}{G_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv})} \quad (3.114)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{-h a (T_f - T_s)}{(\epsilon \rho_f v_f) \cdot (C_{pf} + W C_{pv})} \quad (3.115)$$

**Balanco de Energia da Fase Sólida**

$$\begin{aligned} \underline{G}_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \underline{\nabla} T_s + \underline{G}_s \cdot (T_s \underline{\nabla} C_{ps} + M T_s \underline{\nabla} C_{pl}) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \end{aligned} \quad (3.116)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s)}{G_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl})} \quad (3.117)$$

### 3.5.5 Modelo 5

Admitindo que o processo de secagem em leito deslizante opera em regime permanente, os fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais (Eixo x), as propriedades físico-químicas são constantes e o perfil de velocidade do ar é plano, o sistema de equações do Modelo 5 é composto pelas equações (3.118-3.121, 3.125, 3.128), conforme modelo descrito no Capítulo 2.

#### Balanco de Massa de Gás Seco

$$\underline{\nabla} \cdot (\underline{G}_f) = 0 \rightarrow \frac{\partial G_f}{\partial x} = 0 \rightarrow G_f = cte \quad (3.118)$$

#### Balanco de Massa de Sólido Seco

$$\underline{\nabla} \cdot \underline{G}_s = 0 \rightarrow \frac{\partial G_s}{\partial x} = 0 \rightarrow G_s = cte \quad (3.119)$$

#### Balanco de Massa de Vapor

$$\underline{G}_f \cdot \underline{\nabla} W = f \rightarrow \frac{\partial W}{\partial x} = \frac{f}{G_f} \quad (3.120)$$

#### Balanco de Massa de Umidade do Sólido

$$\underline{G}_s \cdot \underline{\nabla} M = -f \rightarrow \frac{\partial M}{\partial x} = \frac{-f}{G_s} \quad (3.121)$$

#### Balanco de Energia da Fase Fluida

$$\begin{aligned} \underline{G}_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \underline{\nabla} T_f + \underline{G}_f \cdot (T_f (\underline{\nabla} C_{pf} + \underline{\nabla} C_{pv}) + W \underline{\nabla} \lambda) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.122)$$

$$\begin{aligned} G_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \frac{\partial T_f}{\partial x} + G_f \cdot \left( T_f \left( \frac{\partial C_{pf}}{\partial x} + \frac{\partial C_{pv}}{\partial x} \right) + W \frac{\partial \lambda}{\partial x} \right) = \\ = -h a (T_f - T_s) \end{aligned} \quad (3.123)$$

$$G_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv}) \frac{\partial T_f}{\partial x} = -h a (T_f - T_s) \quad (3.124)$$

$$\frac{\partial T_f}{\partial x} = \frac{-h a (T_f - T_s)}{G_f \cdot (C_{pf} + W C_{pv})} \quad (3.125)$$

### Balço de Energia da Fase Sólida

$$\begin{aligned} \underline{G}_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \nabla T_s + \underline{G}_s \cdot (T_s \nabla C_{ps} + M T_s \nabla C_{pl}) = \\ = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \end{aligned} \quad (3.126)$$

$$G_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl}) \frac{\partial T_s}{\partial x} = h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s) \quad (3.127)$$

$$\frac{\partial T_s}{\partial x} = \frac{h a (T_f - T_s) - f (\lambda + C_{pv} T_f + C_{pl} T_s)}{G_s \cdot (C_{ps} + M C_{pl})} \quad (3.128)$$

As equações constitutivas utilizadas para a solução dos Modelos são as mesmas descritas no Capítulo 2.

### 3.5.6 Perfil de Porosidade

No estudo do perfil de porosidade, foi utilizada a equação empírica apresentada por Benenati e Brosilow (1962), que relaciona a porosidade com a distância a partir da parede e com a razão  $d_{tubo}/d_p$ .

$$\varepsilon = 0,38 + 0,62e^{1,70x^{0,434}} \cos(6,67x^{1,13}) \quad (3.129)$$

na qual  $x = (1 - \varsigma) \delta/2 =$  número de  $d_p$  a partir da parede.

### 3.5.7 Perfil de Velocidade

Para o estudo do perfil de velocidade, foram utilizadas as equações descritas por Vortmeyer e Schuster (1983) e Fahien e Stankovich (1979). Vortmeyer e Schuster (1983) descrevem o perfil de escoamento dentro de um meio poroso confinado por uma parede rígida, no qual a solução analítica é obtida utilizando o método variacional. A Eq. (3.130) apresenta esta solução:

$$v^* = \frac{v_z}{vm} = B_1 \left( 1 - \exp \left( a_1 \frac{R-r}{d_p} \right) \left( 1 - n \frac{R-r}{d_p} \right) \right) \quad (3.130)$$

na qual:

$$B_1 = \frac{1}{2} R^{*2} \left[ \frac{R^{*2}}{2} - (a_1 R^* + 1) (n R^* - 1) \frac{1}{a_1^2} + n \left( \frac{R^{*2}}{a_1} + \frac{2R^*}{a_1^2} + \frac{2}{a_1^3} \right) - e^{-a_1 R^*} \frac{1}{a_1^2} \left( 1 - n R^* + n \frac{2}{a_1} \right) \right]^{-1} \quad (3.131)$$

$$R^* = \frac{R}{d_p} \quad (3.132)$$

$$a_1 = \frac{4n}{4-n} \quad (3.133)$$

$$Re = \frac{G_f d_p}{\mu} \quad (3.134)$$

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

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

Se  $1 \leq Re \leq 1000$ :

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

Se  $Re > 1000$ :  $n = 27$

Fahien e Stankovich (1979) obtiveram uma equação baseada no ajuste de dados experimentais de velocidade para uma ampla faixa de diâmetro da partícula ( $d_p$ ), diâmetro do secador ( $d_{tubo}$ ) e número de Reynolds ( $Re$ ). A Eq. (3.135) apresenta esta expressão:

$$V^* = \frac{v_z}{v_m} = \frac{A_1 + A_2 r^{(B+1)} - A_3 r^{(B+2)}}{A_1 + \frac{2A_2}{B+3} - \frac{2A_3}{B+4}} \quad (3.135)$$

na qual:

$$B = 0,45\alpha^{1,5} \quad (3.136)$$

$$A_1 = \frac{1}{B+2} - \frac{\alpha-1}{\alpha(B+1)} \quad (3.137)$$

$$A_2 = \frac{\alpha-1}{\alpha(B+1)} A_3 = \frac{1}{B+2} \quad (3.138)$$

$$r^* = \frac{r}{r_{tubo}} \quad (3.139)$$

$$r_T = \frac{d_{tubo}}{2} \quad (3.140)$$

## 3.6 Fluidodinâmica Computacional

No estudo da fluidodinâmica do secador de leite deslizante com escoamento contracorrentes, simulações numéricas bidimensionais foram empregadas para a determinação de algumas características do escoamento. As simulações numéricas foram conduzidas através do software comercial FLUENT® (FLUENT, 2006), cuja licença fora adquirida pela Faculdade de Engenharia Química da UFU. Na seção seguinte é apresentada a construção da malha computacional e as equações utilizadas na simulação.

### 3.6.1 Geração da Malha Computacional

O domínio da simulação numérica é dividido em pequenos volumes de controle para a posterior aplicação das equações de transporte. Este volume de controle é obtido a partir da criação da malha computacional, utilizando o *software* de construção de malhas GAMBIT 2.3.16, que disponibiliza uma interface com o software de fluidodinâmica computacional FLUENT. Este *software* permite a elaboração de malhas desde a mais simples até modelos mais sofisticados. As etapas de construção da malha segue a sequência abaixo relacionada, conforme descrito por Duarte (2006):

1. Construção da geometria do equipamento;
2. Definição das faces e/ou volumes;
3. Determinação de efeitos como camada limite, ou outro tipo de refinamento desejado;
4. Aplicação da malha no corpo geométrico construído e determinação do tipo e tamanho das células (quadrangular, tetraédrica, hexaédrica ou híbrida);
5. Definição das paredes, interiores, entradas e saídas do equipamento;
6. Determinação das fases que compõem o interior do equipamento, por exemplo, fluido (ar) e/ou sólido (sementes de soja, esferas de vidro);
7. Conversão do arquivo contendo a malha em uma extensão reconhecida pelo *software* FLUENT;
8. Uma vez lido o arquivo no FLUENT, são definidas as condições de contorno e iniciais, os modelos e os tipos de algoritmos de solução numérica a serem adotados.

A Figura 3.2 mostra a malha adotada nas simulações com 36000 células aproximadamente, sendo que, a contagem das células foi feita no software FLUENT.

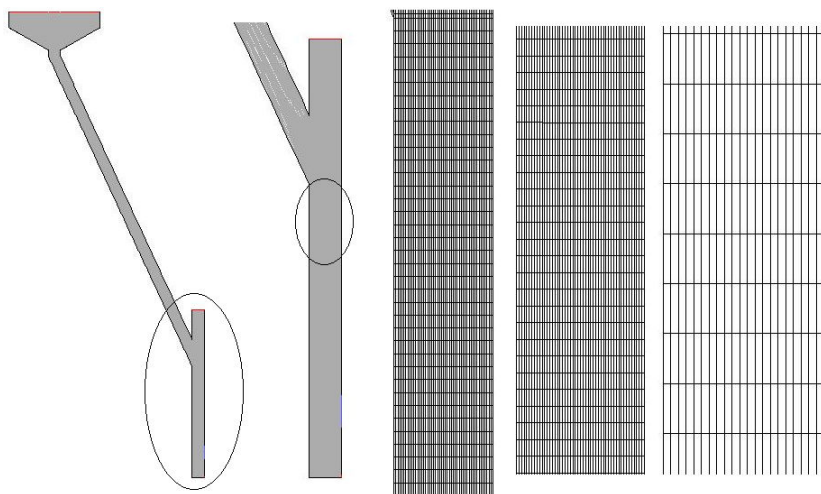


Figura 3.2: Malha computacional do secador de leito deslizante com escoamento contracorrente.

### 3.6.2 Modelagem de Escoamentos Multifásicos

Neste trabalho foi considerada a aproximação do tipo Euler-Euler e aplicou-se o Modelo Euleriano. A Tabela (3.1) apresenta as equações e parâmetros utilizados para a fase secundária. Estas são descritas em detalhes nas seções seguintes, conforme apresentadas em Duarte (2006), Vieira Neto (2007) e Fluent (2006).

Tabela 3.1: Fase Secundária - Soja

Granular		
Diâmetro	constante	0,006
Viscosidade Granular	syamlal-obrien	-
Viscosidade Granular Bulk	lun-et-al	-
Viscosidade Friccional	schaeffer	-
Ângulo de Fricção Interna	constante	30,000
Pressão Friccional	based-ktgf	-
Módulo Friccional	derived	-
Limite de Empacotamento Friccional	constante	0,61
Temperatura Granular	algebraic	-
Pressão dos Sólidos	lun-et-al	-
Distribuição Radial	lun-et-al	-
Módulo de Elasticidade	derived	-
Limite de Empacotamento	constante	0,61

### Frações Volumétricas

A descrição do fluxo multifásico como contínuo incorpora o conceito de fração de volume da fase, aqui denominada por  $\alpha_q$ . Frações volumétricas representam o espaço ocupado por cada fase, e as leis de conservação de massa e movimento são satisfeitas em cada fase individualmente. A derivação das equações de conservação pode ser feita pela média do conjunto de balanços instantâneos locais para cada fase ou usando a aproximação pela teoria de mistura (Vieira Neto, 2007).

O volume da fase  $q$ ,  $V_q$  é definida por:

$$V_q = \int_V \alpha_q dV \quad (3.141)$$

onde:

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (3.142)$$

A densidade efetiva da fase  $q$  é definida por:

$$\hat{\rho}_q = \alpha_q \rho_q \quad (3.143)$$

na qual  $\rho_q$  é a densidade física da fase  $q$ .

### Equações de Conservação

As equações gerais de conservação são derivadas e apresentadas nesta seção, seguidas pelas respectivas soluções.

#### Equação da Continuidade

A fração volumétrica para cada fase é calculada pela equação da continuidade:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\alpha_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \vec{v}_q) = \frac{1}{\rho_q} \left( \sum_{p=1}^n \dot{m}_{pq} - \alpha_q \frac{d_q \rho_q}{dt} \right) \quad (3.144)$$

A solução desta equação para cada fase secundária ( $p$ ), junto com a condição de que a soma das frações volumétricas é igual a um, permite o cálculo da fração volumétrica da fase primária ( $q$ ). Este tratamento é comum para fluxos fluido-fluido

e granulares.

No caso da modelagem do secador em leito deslizante, a fase primária é a fase fluida ( $f$ ) e só existe uma fase secundária que corresponde a fase sólida ( $s$ , sementes de soja).

### Equações de Movimento para a Fase Fluida

A conservação de movimento para a fase fluida,  $f$  é:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f) + \nabla \cdot (\alpha_f \rho_f \vec{v}_f \vec{v}_f) = & -\alpha_f \nabla p + \nabla \cdot \tau_f^- + \alpha_f \rho_f \vec{g} + \alpha_f \rho_f \left( \vec{F}_f + \vec{F}_{lift,f} + \vec{F}_{vm,f} \right) \\ & + \sum_{p=1}^n \left( \vec{K}_{fs} (\vec{v}_s - \vec{v}_f) + \dot{m}_{fs} \vec{v}_{fs} \right) \end{aligned} \quad (3.145)$$

na qual  $\vec{g}$  é a gravidade e  $\vec{F}_f$ ,  $\vec{F}_{lift,f}$ ,  $\vec{F}_{vm,f}$  e  $\tau_f^-$  são definidos conforme segue.

O termo  $\vec{F}_f$  é a força de campo; o termo  $\vec{F}_{lift,f}$  é a força de ascensão que atua na partícula, principalmente devido aos gradientes de velocidade no campo do escoamento da fase primária ( $f$ ), sendo que, esta força é mais significativa para partículas maiores. Na maioria dos casos, a força de ascensão é insignificante quando comparada com a força de arraste, então esta força pode ser desprezada. O termo  $\vec{F}_{vm,f}$  é a força de massa virtual. Esta força só é significativa quando a densidade da fase secundária é muito menor que a densidade da fase primária (por exemplo, para uma coluna de bolhas transiente). O termo  $K_{fs}$  é o coeficiente de troca de movimento, relativo a interação entre as fases, e  $p$  é a pressão de cisalhamento por todas as fases.  $\vec{v}_{fs}$  é a velocidade de interface, definida:

Se  $\dot{m}_{fs} > 0$ , ou seja, a massa da fase  $s$  está sendo transferida para a fase  $f$ , então,  $\dot{m}_{fs} = \dot{m}_s$ ;

Se  $\dot{m}_{fs} < 0$ , ou seja, a massa da fase  $f$  está sendo transferida para a fase  $s$ , então,  $\dot{m}_{fs} = \dot{m}_f$  e  $\dot{m}_{fs} = \dot{m}_{sf}$ .

Por fim,  $\tau_f^-$  é o tensor tensão de cisalhamento para a fase fluida,  $f$ , dado pela Eq. (3.146):

$$\tau_f^- = \alpha_f \mu_f (\nabla \vec{v}_f + \nabla \vec{v}_f^T) + \alpha_f \left( \lambda_f - \frac{2}{3} \mu_f \right) \nabla \cdot \nabla \vec{v}_f I^- \quad (3.146)$$

sendo  $\mu_f$  e  $\lambda_f$  as viscosidades cisalhante e *bulk* da fase fluida, respectivamente.

### Equações de Movimento para a Fase Sólida

A conservação de movimento para a fase fluida é similar a Eq. (3.146), e para a

fase sólida (s) é descrita da seguinte forma:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t} (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s \vec{v}_s) = & -\alpha_s \nabla p - \nabla p + \nabla \cdot \vec{\tau}_s + \alpha_s \rho_s \vec{g} + \alpha_s \rho_s \left( \vec{F}_s + \vec{F}_{lift,s} + \vec{F}_{vm,s} \right) \\ & + \sum_{p=1}^n \left( \vec{K}_{fs} (\vec{v}_f - \vec{v}_s) + \dot{m}_{fs} \vec{v}_{fs} \right) \end{aligned} \quad (3.147)$$

na qual  $p_s$  é a pressão da fase sólida,  $K_{fs}$  é o coeficiente de troca de movimento entre a fase fluida e a fase sólida e  $N$  é o número total de fases. Neste trabalho, considerou-se apenas uma fase fluida e uma fase sólida.

### Coeficiente de Troca Fluido-Sólido

O coeficiente de troca fluido-sólido  $K_{fs}$  pode ser escrito na forma geral:

$$K_{fs} = \frac{\alpha_s \rho_s f}{t_s} \quad (3.148)$$

na qual  $f$  é definida diferentemente para os diferentes modelos de coeficientes de troca e  $t_s$ , é o “tempo de relaxação de partícula”, é definido como:

$$t_s = \frac{\rho_s d_s^2}{18\mu_f} \quad (3.149)$$

na qual  $d_s$  é o diâmetro das partículas.

Todas as definições de  $f$  incluem um coeficiente de arraste ( $C_D$ ) baseado no número de Reynolds (Re). Esta função de arraste que difere os modelos de coeficiente de troca entre si.

Para o Modelo de Syamlal et al. (1993) *apud* Fluent (2006):

$$f = \frac{C_D \text{Re}_s \alpha_f}{24v_{r,s}^2} \quad (3.150)$$

em que a função de arraste tem a forma derivada de Valle (1948) *apud* Fluent (2006).

$$C_D = \left( 0,63 + \frac{4,8}{\sqrt{\frac{\text{Re}_s}{v_{r,s}}}} \right)^2 \quad (3.151)$$

Este modelo é baseado em medições da velocidade terminal de partículas em leitos fluidizados, com correlações que são função da fração de volume e do número de

Reynolds relativo.

$$Re_s = \frac{\rho_f d_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{\mu_f} \quad (3.152)$$

Assim, o coeficiente de troca fluido-sólido tem a forma:

$$K_{fs} = \frac{3\alpha_s\alpha_f\rho_f}{4v_{r,s}^2 d_s} C_D \left( \frac{Re_s}{v_{r,s}} \right) |\vec{v}_s - \vec{v}_f| \quad (3.153)$$

Sendo  $v_{r,s}$  a velocidade terminal para a fase sólida de Garside e Al-Dibouni (1977) *apud* Fluent (2006):

$$v_{r,s} = 0,5 \left( \alpha_f^{4,14} - 0,06Re_s + \sqrt{(0,06Re_s)^2 + 0,12Re_s (2B - \alpha_f^{4,14}) + (\alpha_f^{4,14})^2} \right) \quad (3.154)$$

Para  $\alpha_f \leq 0,85$ :  $B = 0,8\alpha_f^{1,28}$ . Para  $\alpha_f > 0,85$ :  $B = \alpha_f^{2,65}$

Este modelo é apropriado quando a tensão de cisalhamento dos sólidos é definida pelo modelo de Syamlal et al. (1993) *apud* Fluent (2006).

Para o Modelo de Wen e Yu (1966) *apud* Fluent (2006), que é apropriado para sistemas diluídos, o coeficiente de troca fluido-sólido é definido a seguir:

$$K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s\alpha_f\rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65} \quad (3.155)$$

na qual:

$$C_D = \frac{24}{\alpha_f Re_s} (1 + 0,15(\alpha_f Re_s)^{0,687}) \quad (3.156)$$

e  $Re_s$  é definido pela Eq. (3.152).

O Modelo de Gidaspow et al. (1992) *apud* Fluent (2006) é uma combinação do Modelo de Wen e Yu (1966) *apud* Fluent (2006) para região diluída e da equação de Ergun (1952) *apud* Fluent (2006) para fase densa.

Quando  $\alpha_f > 0,8$ , o coeficiente de troca fluido-sólido  $K_{fs}$  é da seguinte forma:

$$K_{fs} = \frac{3}{4} C_D \frac{\alpha_s \alpha_f \rho_f |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \alpha_f^{-2,65} \quad (3.157)$$

Quando  $\alpha_f \leq 0,8$

$$K_{fs} = 150 \frac{\alpha_s (1 - \alpha_f) \mu_f}{\alpha_f d_s^2} + 1,75 \frac{\rho_f \alpha_s |\vec{v}_s - \vec{v}_f|}{d_s} \quad (3.158)$$

### Pressão de Sólidos

Para fluxos granulares em regime compressível (no qual a fração de volume de sólidos é menor que o máximo valor permitido), a pressão de sólidos é calculada independentemente e utilizada para o termo de gradiente de pressão,  $\nabla p_s$ , na equação de movimento da fase granular. Como existe uma distribuição de velocidade para as partículas, um parâmetro denominado temperatura granular é introduzido no modelo, e aparece nas expressões de pressão de sólidos e de viscosidade. A temperatura granular é uma medida da variação da energia cinética das partículas devido aos choques entre as mesmas. A pressão de sólidos é composta por um termo cinético e um segundo termo devido às colisões entre as partículas.

$$p_s = \alpha_s \rho_s \theta_s + 2\rho_s (1 + e_{ss}) \alpha_s^2 g_{0,ss} \theta_s \quad (3.159)$$

na qual  $e_{ss}$  é o coeficiente de restituição devido à colisão das partículas,  $g_{0,ss}$  é a função de distribuição radial e  $\theta_s$  é a temperatura granular. A função  $g_{0,ss}$  é a função distribuição que governa a transição da condição compressível com  $\alpha \leq \alpha_{s,max}$ , onde o espaçamento entre as partículas sólidas pode continuar a decrescer, para a condição incompressível com  $\alpha = \alpha_{s,max}$ , onde nenhum decréscimo no espaçamento pode ocorrer. Um valor padrão de 0,61 foi adotado para  $\alpha_{s,max}$ .

### Função Distribuição Radial

A função distribuição radial,  $g_0$ , é um fator de correção que modifica a probabilidade de colisões entre os grãos quando a fase granular sólida torna-se densa. Esta função também pode ser interpretada como uma distância não dimensional entre as esferas.

$$g_0 = \frac{s + d_p}{s} \quad (3.160)$$

na qual  $s$  é a distância entre os grãos. Da Eq.(3.160) pode ser observado que para uma fase sólida diluída  $s \rightarrow \infty$  e  $g_0 \rightarrow 1$ . No limite onde a fase sólida compacta,  $s \rightarrow 0$  e

$g_0 \rightarrow \infty$ .

$$g_0 = \left( 1 - \left( \frac{\alpha_s}{\alpha_{s,\max}} \right)^{\frac{1}{3}} \right)^{-1} \quad (3.161)$$

onde  $\alpha_{s,\max}$  é especificado pelo usuário na etapa de inicialização do problema. Neste estudo, adotou-se o valor de 0,61 para  $\alpha_{s,\max}$  e não foi feita nenhuma variação deste parâmetro.

### Tensão de Cisalhamento dos Sólidos

O tensor de tensão de sólidos contém viscosidades *bulk* e de cisalhamento resultantes da troca de movimento entre as partículas devido à translação e colisão. Um componente friccional de viscosidade pode também ser incluído para quantificar a transição plástico-viscosa que ocorre quando partículas da fase sólida alcançam a máxima fração volumétrica de sólidos.

As partes colisional e cinéticas, e a parte opcional friccional, são somadas para compor o parâmetro denominado viscosidade de cisalhamento dos sólidos, conforme Eq.(3.162):

$$\mu_S = \mu_{S,col} + \mu_{S,kin} + \mu_{S,fr} \quad (3.162)$$

### Viscosidade Colisional

A parte colisional da viscosidade de cisalhamento é modelada pela Eq.(3.163):

$$\mu_{S,col} = \frac{4}{5} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.163)$$

### Viscosidade Cinética

O FLUENT disponibiliza duas expressões para a parte cinética. A expressão padrão é dada por Syamlal et al. (1993).

$$\mu_{S,kin} = \frac{\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{6(3 - e_{ss})} \left( 1 + \frac{2}{5} (1 + e_{ss}) (3e_{ss} - 1) \alpha_s g_{0,ss} \right) \quad (3.164)$$

A seguinte expressão opcional por Gidaspow et al. (1992) *apud* Fluent (2006)

também está disponível.

$$\mu_{S,kin} = \frac{10\rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{96\alpha_s (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left( 1 + \frac{4}{5} g_{0,ss} \alpha_s (1 + e_{ss}) \right)^2 \quad (3.165)$$

### Viscosidade Bulk

O parâmetro denominado viscosidade *bulk* dos sólidos é usado para quantificar a resistência dos grânulos de partículas à compressão e expansão. Ela possui a seguinte formulação por Lun et al. (1984) *apud* Fluent (2006).

$$\lambda_s = \frac{4}{3} \alpha_s \rho_s d_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \left( \frac{\theta_s}{\pi} \right)^{1/2} \quad (3.166)$$

### Viscosidade Friccional

Em fluxos densos a baixo cisalhamento, onde a fração volumétrica secundária para a fase sólida se aproxima do limite de empacotamento, a geração de tensão é devida principalmente à fricção entre as partículas. O parâmetro de viscosidade de cisalhamento dos sólidos calculada no FLUENT, como padrão, não leva em conta a fricção entre as partículas. Se a viscosidade friccional é incluída nos cálculos, o *software* utiliza a expressão de Schaeffer (1987).

$$\mu_{S,fr} = \frac{p_s \sin \phi}{2\sqrt{I_{2D}}} \quad (3.167)$$

na qual  $p_s$  é a pressão de sólidos,  $\phi$  é o ângulo de fricção interna, e  $I_{2D}$  é a segunda invariância do tensor de tensão desviatório.

### Temperatura Granular

A temperatura granular para a fase sólida é proporcional à energia cinética devido ao choque entre as partículas. A Eq.(3.168) de transporte derivada da teoria cinética é apresentada a seguir:

$$\frac{3}{2} \left( \frac{\partial}{\partial t} (\rho_s \alpha_s \theta_s) + \nabla \cdot (\rho_s \alpha_s \vec{v}_s \theta_s) \right) = \left( -p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s \right) : \nabla \vec{v}_s + \nabla \cdot (k_{\theta_s} \nabla \theta_s) - \gamma_{\theta_s} + \phi_{fs} \quad (3.168)$$

em que:

$$\left( -p_s \bar{\bar{I}} + \bar{\bar{\tau}}_s \right) : \nabla \vec{v}_s = \text{geração de energia pelo tensor tensão de sólidos};$$

$k_{\theta_s} \nabla \theta_s$  = difusão de energia ( $k_{\theta_s}$  é o coeficiente de difusão);

$\gamma_{\theta_s}$  = dissipação de energia colisional;

$\theta_s$  = troca de energia entre a fase fluida  $f$  e a fase sólida  $s$ .

A Eq.(3.168) contém o termo  $k_{\theta_s} \nabla \theta_s$  descrevendo o fluxo difusivo de energia granular. Quando o modelo padrão de Syamlal et al. (1993) *apud* Fluent (2006) é utilizado, o coeficiente difusivo para energia granular,  $k_{\theta_s}$ , é dado por:

$$k_{\theta_s} = \frac{15\alpha_s \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{4(41 - 33\eta)} \left( 1 + \frac{12}{5} \eta^2 (4\eta - 3) \alpha_s g_{0,ss} + \frac{16}{15\pi} (41 - 33\eta) \eta \alpha_s g_{0,ss} \right) \quad (3.169)$$

onde:

$$\eta = \frac{1}{2} (1 + e_{ss}) \quad (3.170)$$

O *software* FLUENT utiliza a Eq.(3.171) se o modelo opcional de Gidaspow et al. (1992) for escolhido.

$$k_{\theta_s} = \frac{150 \rho_s d_s \sqrt{\theta_s \pi}}{384 (1 + e_{ss}) g_{0,ss}} \left( 1 + \frac{6}{5} \alpha_s g_{0,ss} (1 + e_{ss}) \right)^2 + 2 \rho_s d_s \alpha_s^2 (1 + e_{ss}) g_{0,ss} \sqrt{\frac{\theta_s}{\pi}} \quad (3.171)$$

A dissipação colisional de energia,  $\gamma_{\theta_s}$ , representa a taxa de dissipação de energia dentro da fase sólida devido às colisões entre as partículas. Este termo é representado pela expressão derivada de Lun et al. (1984) *apud* Fluent (2006).

$$\gamma_{\theta_s} = \frac{12 (1 - e_{ss}^2) g_{0,ss}}{d_s \sqrt{\pi}} \rho_s \alpha_s^2 \theta_s^{3/2} \quad (3.172)$$

A transferência de energia cinética da flutuação randômica nas velocidades das partículas da fase sólida ( $s$ ) para a fase fluida ( $f$ ) ou sólida é representada por  $\phi_{fs}$ :

$$\phi_{fs} = -3K_{fs}\theta_s \quad (3.173)$$

O FLUENT geralmente usa uma relação algébrica para a temperatura granular. Esta tem sido obtida negligenciando convecção e difusão na equação de transporte.

### **Coefficiente de Especularidade**

O coeficiente de especularidade (*Specularity Coefficient*) é uma medida da fração de colisões que transferem movimento à parede e seu valor permanece entre zero e 1. Quando o valor é zero, esta condição equivale ao zero do coeficiente de cisalhamento da parede, mas quando o valor é próximo da unidade, há uma grande quantidade de transferência de movimento. Os valores entre 0 e 1 equivalem ao ajuste dos parâmetros no modelo. Esta implementação é baseada nas condições de contorno para escoamentos granulares de Johnson e Jackson (1987) *apud* Fluent (2006).

### **Demais Métodos Utilizados nas Simulações**

Para as simulações por CFD realizadas neste trabalho o método de discretização empregado foi o de volumes finitos. O tratamento do acoplamento entre a pressão e a velocidade foi feito por meio do algoritmo SIMPLE. Para as interpolações da equação do movimento e das frações de volume foi utilizado o esquema *upwind* de primeira ordem.

## **3.7 Etapas**

Neste capítulo foram apresentados os modelos baseados nas equações de transferência de energia e massa para o processo de secagem em leito deslizante. As equações auxiliares destes modelos são apresentadas no Apêndice A. Os modelos gerados foram simulados e os resultados obtidos para os modelos 1, 2, 3 e 4 serão apresentados no Capítulo 4, assim como o estudo da fluidodinâmica computacional. No Capítulo 5, são apresentados os resultados da simulação e otimização do modelo 5, juntamente com o estudo da qualidade das sementes e do secador de múltiplos estágios.



---

---

# CAPÍTULO 4

---

## Simulação dos Modelos

### 4.1 Condições Experimentais

Neste Capítulo, os modelos gerados foram simulados e os resultados obtidos apresentados nas seções seguintes. Para a validação de cada modelo, foram utilizadas as condições experimentais dadas por Celestino (1998) e por Souza (2001). Os valores das condições experimentais utilizadas por estes autores foram utilizadas nas simulações de 27 casos, e estas são apresentadas na Tabela (4.1).

Os experimentos 1 ao 18 são condições do escoamento concorrente e os experimentos 19 ao 27 são as condições dadas por Souza (2001) para o escoamento contracorrente. Sendo as unidades das variáveis:  $U_{f0}$  em  $kg_{\text{água}} \cdot kg_{\text{ar seco}}^{-1}$ ,  $U_{s0}$  em  $kg_{\text{água}} \cdot kg_{\text{sólido seco}}^{-1}$ ,  $T_{f0}$  em  $^{\circ}C$ ,  $T_{s0}$  em  $^{\circ}C$ ,  $V_{int}$  em  $m \cdot s^{-1}$ ,  $G_f$  em  $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$  e  $G_s$  em  $kg \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ .

No Apêndice B são apresentados os perfis simulados de umidade e temperatura do sólido e do fluido em relação ao comprimento adimensionalizado do secador. Nestes perfis foram também adicionados os dados experimentais com os desvios das variáveis, obtidos nos trabalhos acima citados.

Os dados das propriedades físico-químicas (quando consideradas constantes) e do leite são apresentadas na Tabela (4.2).

Tabela 4.1: Condições operacionais dos experimentos.

Experimento	$U_{f0}$	$U_{s0}$	$T_{f0}$	$T_{s0}$	$V_{int}$	$G_f$	$G_s$
1	0,0030	0,1581	37,0	22,40	2,00	0,88210	0,21075
2	0,0158	0,1607	37,0	26,80	3,00	1,31380	0,20759
3	0,0120	0,1600	37,0	27,80	4,00	1,75100	0,24560
4	0,0128	0,2210	42,5	26,20	2,00	0,85800	0,17979
5	0,0110	0,1951	42,5	25,30	2,00	0,85979	0,20991
6	0,0130	0,1580	42,5	28,00	3,00	1,28710	0,20523
7	0,0100	0,1905	42,5	27,00	3,00	1,29100	0,21466
8	0,0100	0,1988	42,5	27,50	4,00	1,72130	0,20620
9	0,0100	0,1995	42,5	26,90	4,00	1,72160	0,20255
10	0,0126	0,1688	48,0	26,80	2,00	0,84370	0,20254
11	0,0088	0,2053	48,0	24,70	2,00	0,84690	0,20049
12	0,0115	0,1634	48,0	29,10	3,00	1,26670	0,18456
13	0,0100	0,2093	48,0	25,20	3,00	1,26880	0,21239
14	0,0125	0,1848	48,0	30,30	4,00	1,68760	0,20582
15	0,0107	0,1960	48,0	28,90	4,00	1,69060	0,18913
16	0,0110	0,1867	54,5	33,00	2,00	0,82829	0,18981
17	0,0110	0,1788	54,5	32,50	3,00	1,24240	0,19598
18	0,0110	0,1918	54,5	35,00	4,00	1,65660	0,20146
19	0,0130	0,2096	43,5	24,80	0,90	0,03838	0,01024
20	0,0096	0,1921	44,6	26,20	1,59	0,06799	0,01180
21	0,0080	0,1980	43,3	20,50	0,95	0,04080	0,01217
22	0,0080	0,2123	34,3	20,40	1,36	0,06016	0,01186
23	0,0100	0,1905	35,1	24,30	1,90	0,08361	0,01282
24	0,0080	0,2246	31,5	20,00	1,31	0,05842	0,01262
25	0,0110	0,2076	41,7	19,60	1,85	0,07957	0,01233
26	0,0110	0,2096	51,2	24,80	1,90	0,07938	0,01206
27	0,0110	0,2033	51,6	22,00	1,64	0,06857	0,01186

Os parâmetros das equações do calor específico utilizadas nos modelos são apresentados na Tabela (4.3). A modelagem considerando o calor específico do ar, da água líquida e do vapor d'água variáveis, partem da observação dos perfis destas variáveis com a temperatura. Para esta análise foram feitos os gráficos, conforme apresentados nas Figuras (4.1), (4.2) e (4.3).

Tabela 4.2: Propriedades do leite e da semente de soja.

Propriedade	Variável	Valor	Unidades
Calor específico do vapor d'água	$C_{pv}$	0,44	$cal\ g^{-1}\ ^\circ C$
Calor específico da água líquida	$C_{pl}$	1,00	$cal\ g^{-1}\ ^\circ C$
Calor específico do ar seco	$C_{pf}$	0,25	$cal\ g^{-1}\ ^\circ C$
Calor específico do sólido	$C_{ps}$	0,53	$cal\ g^{-1}\ ^\circ C$
Entalpia de vaporização da água	$\lambda$	573,0	$cal\ g^{-1}$
Densidade do sólido	$\rho_s$	1,17	$g \cdot cm^{-3}$
Diâmetro do sólido	$dp$	0,6	$cm$
Diâmetro do leite	$D$	8,1	$cm$
Porosidade	$\epsilon$	0,39	-
Altura do leite (concorrente)	$L$	64,0	$cm$
Altura do leite (contracorrente)	$L$	52,8	$cm$

Tabela 4.3: Parâmetros das equações de calor específico (SMITH et al., 2000; SARTORI, 1986).

	Estado	$A$	$B$	$C$	$D$	Eq.	T(K)
Água	Líqu.	8,712	1,25e-3	-0,18e-6	-	1*	273,15-373,15
	Gás.	3,470	1,450e-3	-	0,121e5	2*	298-2000
Ar	Gás.	3,355	0,575e-3	-	-0,016e5	2*	298-2000
Sólido	-	0,391	0,461	-	-	3*	-

**Equação 1\***

$$C_p/R = A + BT + CT^2$$

**Equação 2\***

$$C_p/R = A + BT + CT^2 + DT^{-2}$$

**Equação 3\***

$$C_p = A + B \left( \frac{M}{1 + M} \right)$$

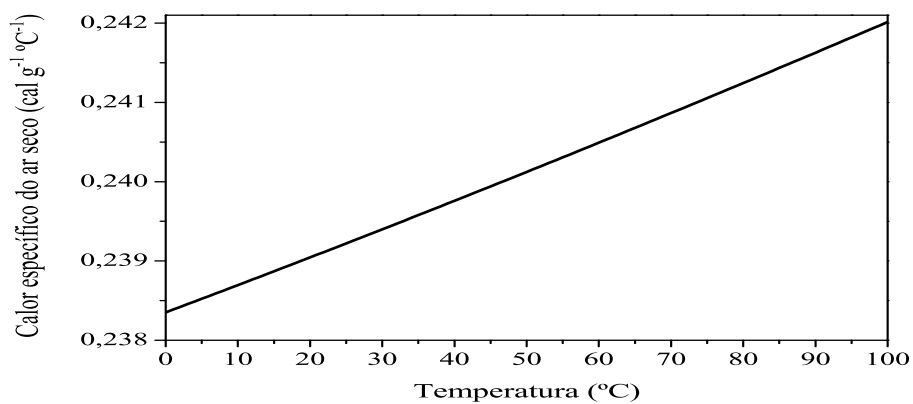


Figura 4.1: Variação do calor específico do ar seco com a temperatura.

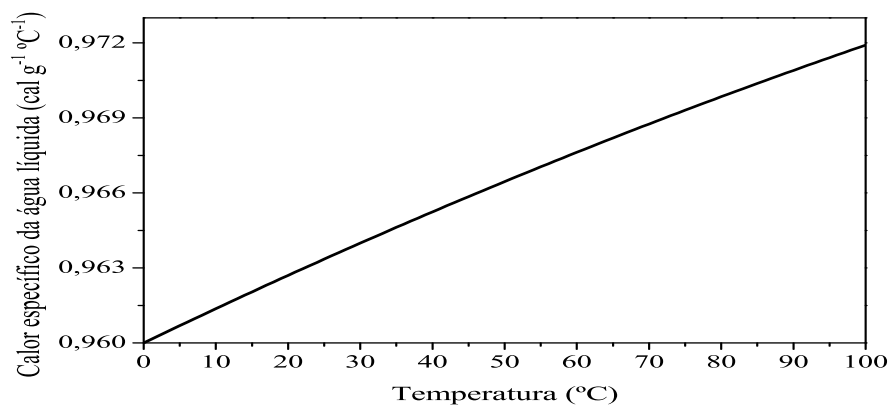


Figura 4.2: Variação do calor específico da água líquida com a temperatura.

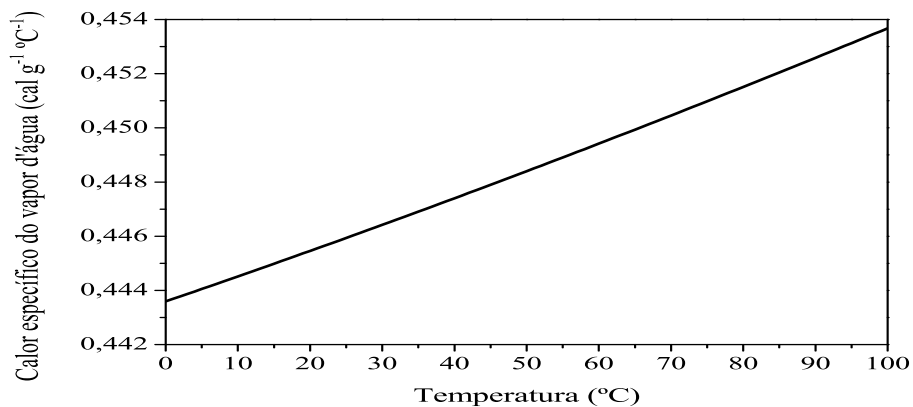


Figura 4.3: Variação do calor específico do vapor d'água com a temperatura.

Pode ser observado que para a temperatura variando entre 0 e 100°C, o calor específico do ar seco tem um aumento de 1,47%, o calor específico da água líquida, 1,25% e o calor específico do vapor d'água, 2,25%. No processo de secagem, a variação da temperatura, não apresenta grande alteração nestas propriedades, o que faz com que estas propriedades sejam consideradas constantes no modelo a duas fases. Porém, de acordo com as simulações realizadas, que são apresentadas a seguir, observa-se que a variação destas propriedades interferem nos resultados e consequentemente na aproximação dos modelos simulados com os dados experimentais.

## 4.2 Solução Numérica

Os modelos 1, 2, 3, 4 e 5 foram simulados a partir de rotinas implementadas no *software* MATLAB R2010a. Para as simulações da secagem em leito deslizante com escoamento concorrente, os sistemas de equações gerados são problemas de valor inicial (PVI), compostos por 4 equações diferenciais ordinárias, as quais foram solucionadas utilizando o comando próprio do *software*, *ode45*, que requer os seguintes parâmetros para sua chamada:

*[solução] = ode45(sistema de equações, intervalo de integração, condições iniciais, tolerâncias)*

Para as simulações em leito deslizante com escoamento contracorrente, os sistemas de equações gerados são problemas de valor no contorno (PVC), os quais foram solucionados utilizando o comando *bvp4c*, que requer os seguintes parâmetros para sua chamada.

*[solução] = bvp4c(sistema de equações, condições de contorno, chute inicial, intervalo de integração, tolerâncias)*

Os modelos acima citados, foram simulados considerando tolerância absoluta e relativa iguais a  $1,0 \cdot 10^{-9}$ .

### 4.2.1 Resumo dos Modelos

A Tabela (4.4) mostra um resumo das considerações dos 5 modelos utilizados nas simulações. Nesta tese, os 27 experimentos citados foram simulados e otimizados para os diferentes modelos e, nas seções seguintes são apresentados os resultados de alguns casos, sendo que os demais casos possuem concordância com os casos aqui apresentados.

Tabela 4.4: Resumo dos modelos.

Modelo	Considerações
Modelo 1	<p>Regime permanente de operação.</p> <p>Fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais.</p> <p>Densidade do sólido constante.</p> <p>Calor latente de vaporização da água (<math>\lambda</math>) constante.</p> <p>Calor específico do fluido, do vapor d'água, do líquido e do sólido variam conforme equações (3.74), (3.75), (3.80) e (3.81), respectivamente.</p>
Modelo 2	<p>Regime permanente de operação.</p> <p>Fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais.</p> <p>Densidade do sólido constante.</p> <p>Calor latente de vaporização da água (<math>\lambda</math>) constante.</p> <p>Calor específico do fluido, do vapor d'água e do líquido são variáveis.</p> <p>Calor específico do sólido constante.</p>
Modelo 3	<p>Regime permanente de operação.</p> <p>Fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais.</p> <p>O calor latente de vaporização da água (<math>\lambda</math>), a densidade do sólido e o calor específico do sólido são constantes.</p> <p>Calor específico do fluido, do vapor d'água e do líquido variáveis.</p> <p>Os fluxos mássicos são obtidos a partir das equações de velocidade (3.130) e (3.135).</p> <p>A porosidade do leito varia conforme a equação (3.129).</p>
Modelo 4	<p>Regime permanente de operação.</p> <p>Fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais.</p> <p>As propriedades físico-químicas são constantes.</p> <p>Os fluxos mássicos são obtidos a partir das equações de velocidade (3.130) e (3.135).</p> <p>A porosidade do leito varia conforme a equação (3.129).</p>
Modelo 5	<p>Regime permanente de operação.</p> <p>Fluxos de sólidos e de fluido são unidirecionais.</p> <p>As propriedades físico-químicas são constantes.</p> <p>Os fluxos mássicos e a porosidade do leito são constantes.</p>

## 4.3 Solução do Modelo 1

Conforme descrito no capítulo anterior, o modelo 1 considera as propriedades do calor específico variáveis, de acordo com as Eqs.(3.69, 3.70, 3.77 e 3.5.1). Nesta seção, são apresentadas os gráficos com os perfis de umidade do sólido, temperatura do sólido e do fluido em relação ao comprimento do secador adimensionalizado. As simulações são apresentadas para os experimentos com escoamento concorrente e contracorrente em seções separadas.

Neste estudo foram comparados os modelos 1 (com propriedades variáveis) e o modelo 5 (propriedades constantes). O modelo 5 também foi simulado, substituindo as variáveis do calor específico no modelo com propriedades constantes. Esta modificação, comum em alguns trabalhos da literatura, aplicam as propriedades variáveis após considerar no modelo (durante as hipóteses) que as mesmas são constantes.

### 4.3.1 Escoamento Concorrente

As Figuras (4.4) e (4.5) apresentam os perfis de umidade e temperatura para os experimentos 3 e 5, respectivamente.

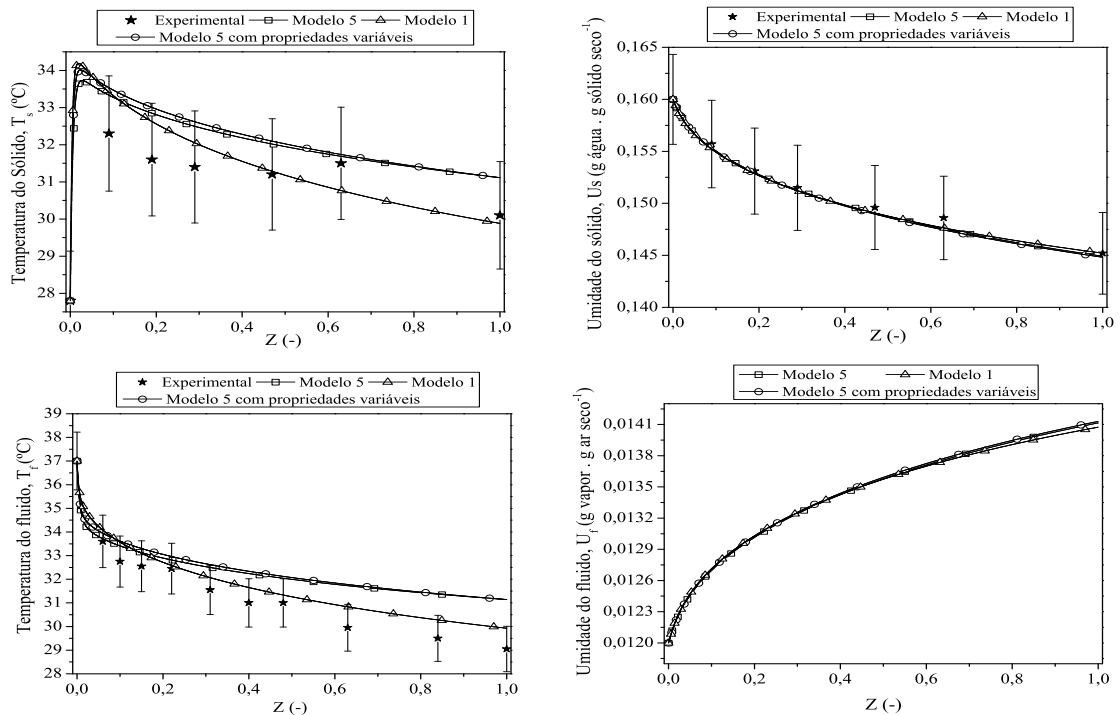


Figura 4.4: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 3, para o escoamento concorrente - Modelo 1.

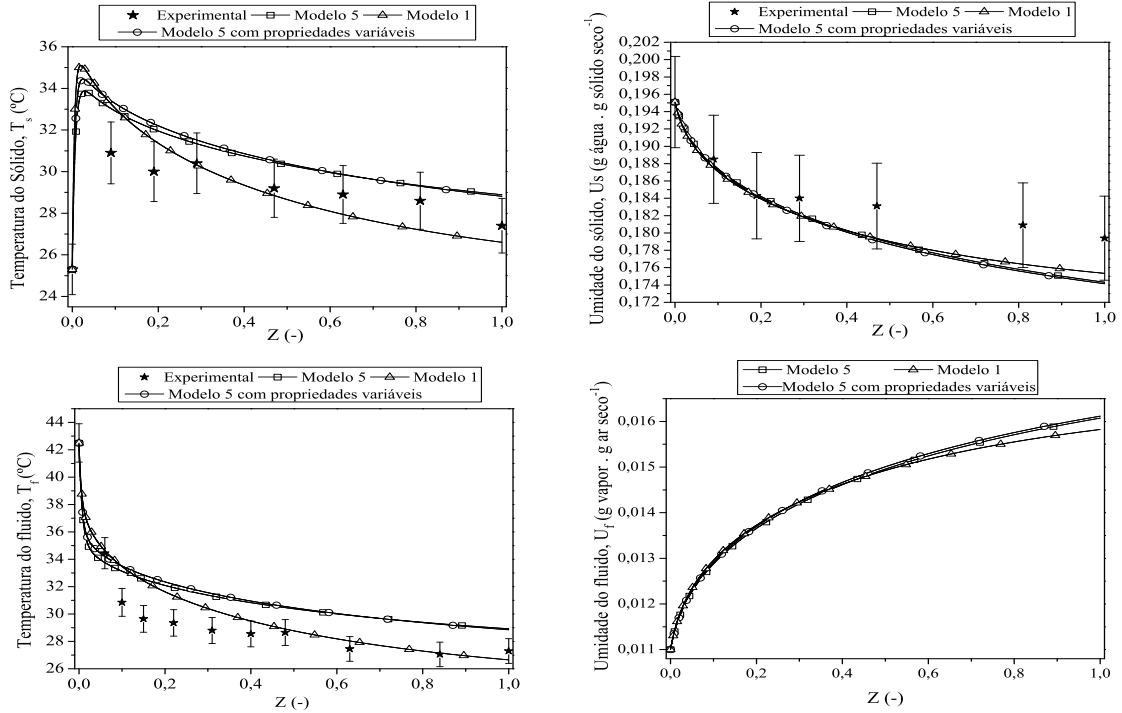


Figura 4.5: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 5, para o escoamento concorrente - Modelo 1.

Pode ser observado no Experimento 3, que as simulações do Modelo 1 e do Modelo 5 apresentam perfis diferentes, o que leva a crer que a hipótese de propriedades variáveis é adequada para o modelo a duas fases. Comparando o Modelo 5 com o Modelo 5 com propriedades variáveis pode ser percebido que estes apresentam perfis semelhantes, principalmente a partir da metade do comprimento do secador. No início do leito, o Modelo 5 com propriedades variáveis se assemelha ao perfil do Modelo 1. Conforme apresentado no Apêndice B, há um distanciamento, principalmente nos perfis de temperatura do sólido e do fluido, em relação aos perfis simulados e os dados experimentais, o que foi adequado, nesta simulação do Modelo 1, já que neste experimento, pode ser verificado um bom ajuste aos dados experimentais para as variáveis temperatura e umidade do fluido e do sólido.

No Experimento 5, da mesma forma que o experimento anterior, as simulações do Modelo 1 e do Modelo 5 apresentaram perfis diferentes, confirmando que a hipótese de propriedades variáveis é adequada para o modelo a duas fases. Neste experimento, pode ser verificado uma concordância entre os dados experimentais, principalmente para as variáveis temperatura do fluido e do sólido.

### 4.3.2 Escoamento Contracorrente

As Figuras (4.6) e (4.7) apresentam os perfis de umidade e temperatura para os experimentos 21 e 24, respectivamente.

No Apêndice B, pode ser verificado que há um distanciamento em relação aos perfis simulados e os dados experimentais. Com a simulação dos modelos, pode ser verificado, para o Experimento 21, uma maior variação entre estes perfis. Verifica-se que no Modelo 5, com e sem propriedades variáveis, os resultados foram diferentes aos apresentados para o escoamento concorrente, o que não pôde ser percebido no Experimento 24.

Pode ser observado no Experimento 21, que as simulações do Modelo 1 e do Modelo 5 apresentam perfis diferentes, o que leva a crer que a hipótese de propriedades variáveis é adequada para o modelo a duas fases. No experimento 24, houve um melhor ajuste em relação ao Modelo com propriedades constantes.

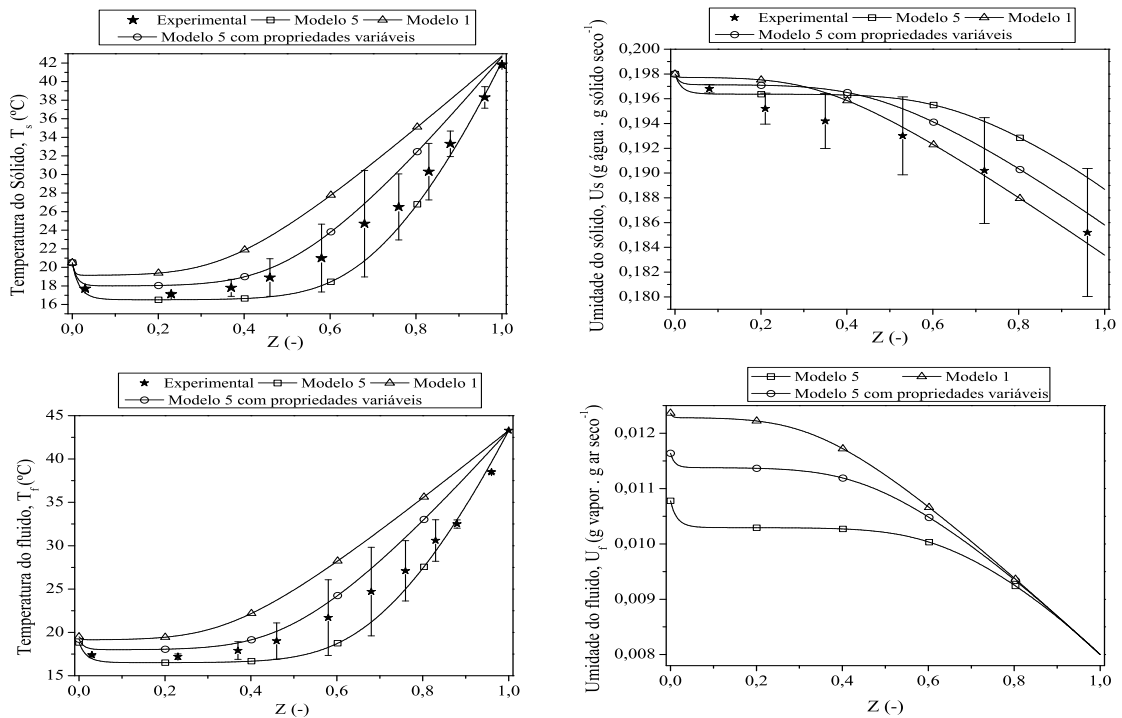


Figura 4.6: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 21, para o escoamento contracorrente - Modelo 1.

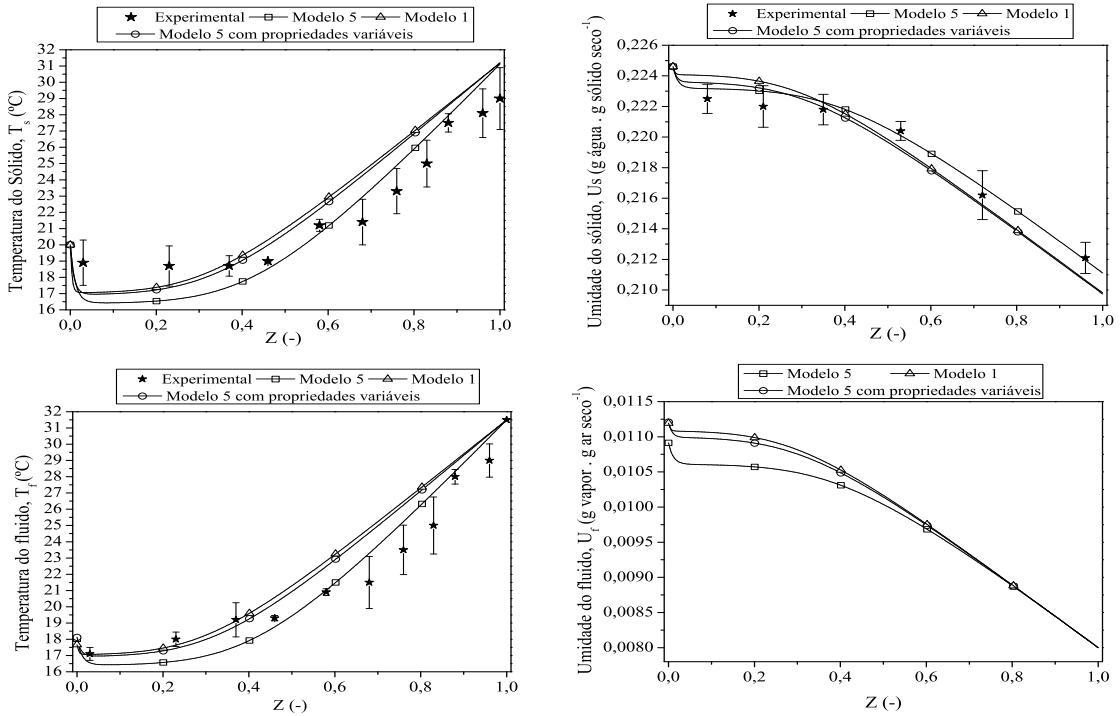


Figura 4.7: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 24, para o escoamento contracorrente - Modelo 1.

## 4.4 Solução do Modelo 2

O modelo 2 considera as propriedades do calor específico,  $C_{pf}$ ,  $C_{pl}$  e  $C_{pv}$  variáveis, e a propriedade  $C_{ps}$  constante, de acordo com as Eqs.(3.69, 3.70, 3.77 e 3.87). Neste estudo foram comparadas os modelos 2 (com  $C_{ps}$  constante) e 5 (propriedades constantes e propriedades variáveis). Nesta seção, são apresentados os gráficos com os perfis de umidade do sólido, temperatura do sólido e do fluido em relação ao comprimento do secador adimensionalizado. As simulações são apresentadas para os experimentos com escoamento concorrente e contracorrente.

### 4.4.1 Escoamento Concorrente

As Figuras (4.8) e (4.9) apresentam os perfis de umidade e temperatura para os experimentos 3 e 13, respectivamente, para o escoamento concorrente.

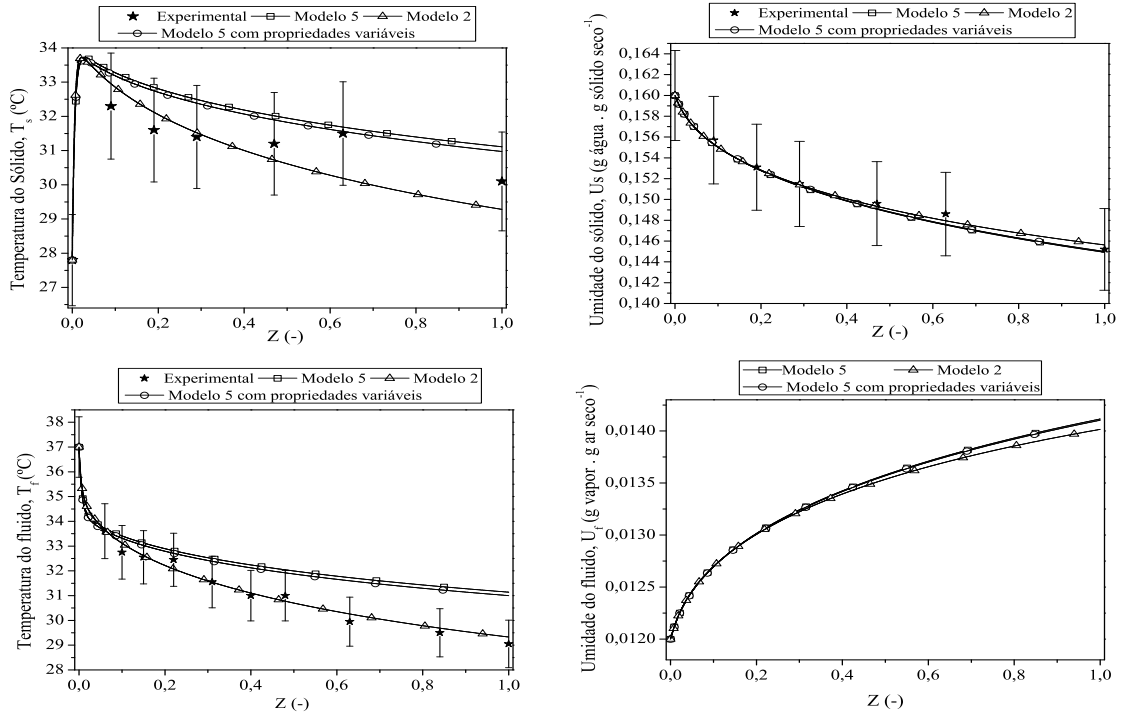


Figura 4.8: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 3, para o escoamento concorrente - Modelo 2.

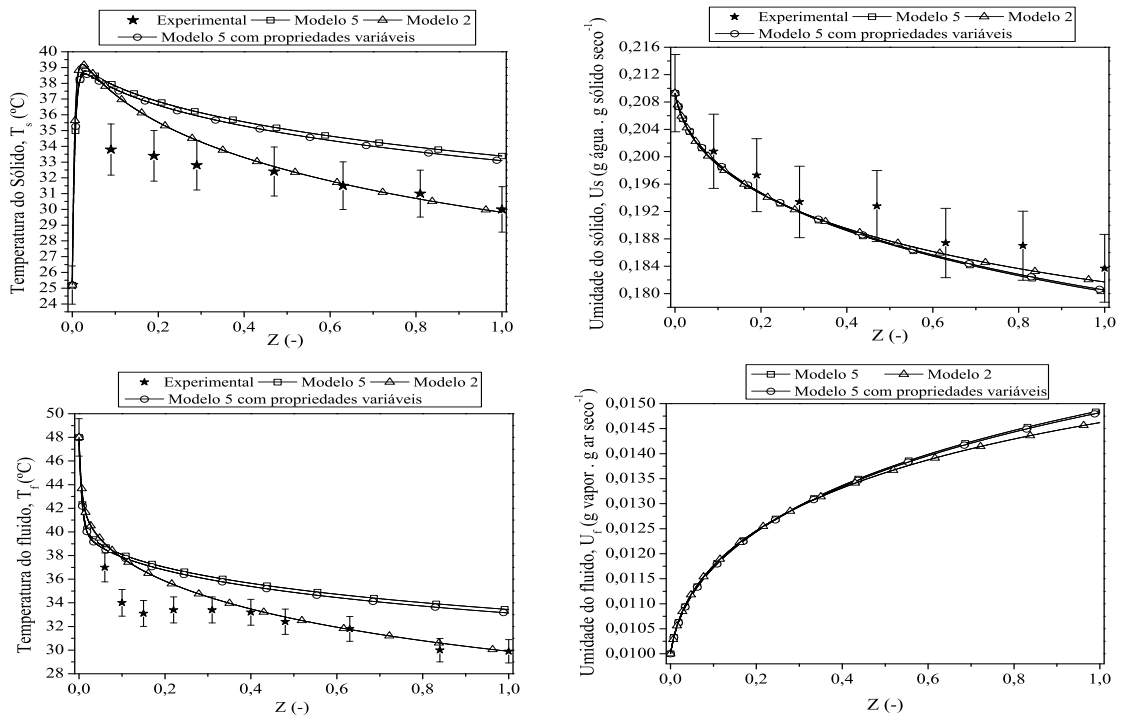


Figura 4.9: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 13, para o escoamento concorrente - Modelo 2.

Pode ser observado no Experimento 3, que as simulações do Modelo 2 e do Modelo 5 apresentam perfis diferentes, confirmando que a hipótese de propriedades variáveis é adequada para o modelo a duas fases. Comparando o Modelo 5 com o Modelo 5 com propriedades variáveis pode ser percebido que estes apresentam perfis semelhantes, principalmente a partir da metade do comprimento do secador, como verificado para a solução do Modelo 1 (Seção 4.3). No início do leito, o Modelo 5 com propriedades variáveis se assemelha ao perfil do Modelo 2. No Experimento 13, da mesma forma que o experimento anterior, pode ser verificado um bom ajuste aos dados experimentais, principalmente para as variáveis temperatura do fluido e do sólido.

Comparando os resultados do experimento 3, para a solução do Modelo 1 e do Modelo 2, pode-se concluir que o modelo com  $C_{ps}$  constante (Modelo 2), adequou-se melhor aos dados experimentais. Isto pode ser explicado pela equação de  $C_{ps}$  não variar diretamente com a temperatura e sim com a umidade do sólido, que é uma função implícita da temperatura, o que influencia no ajuste do modelo, pela temperatura da secagem ter uma variação maior do que a umidade das sementes.

Pode ser observado que na posição inicial do secador (até 0,2), os modelos não apresentam um bom ajuste para a temperatura dos sólidos. Esta observação pode ser explicada pelo método de coleta dos dados experimentais. Os autores não apresentam em que posição radial foi coletada essas informações, assim, esses dados podem ter sido obtidos em posições radiais diferentes, levando a diferentes valores, já que a porosidade do leito e a velocidade radial do ar são influenciados pelo efeito de parede.

#### 4.4.2 Escoamento Contracorrente

As Figuras (4.10) e (4.11) apresentam os perfis de umidade e temperatura para os experimentos 20 e 27, respectivamente.

No Apêndice B, pode ser verificado que há um distanciamento em relação aos perfis simulados e os dados experimentais, principalmente para a temperatura. Com a simulação dos modelos, pode ser verificado, para os experimentos 20 e 27, uma maior variação entre os perfis dos Modelos. Uma melhor concordância aos dados experimentais pode ser percebido, principalmente para a temperatura do sólido e do fluido, quando comparado ao que foi apresentado na Seção 4.3.

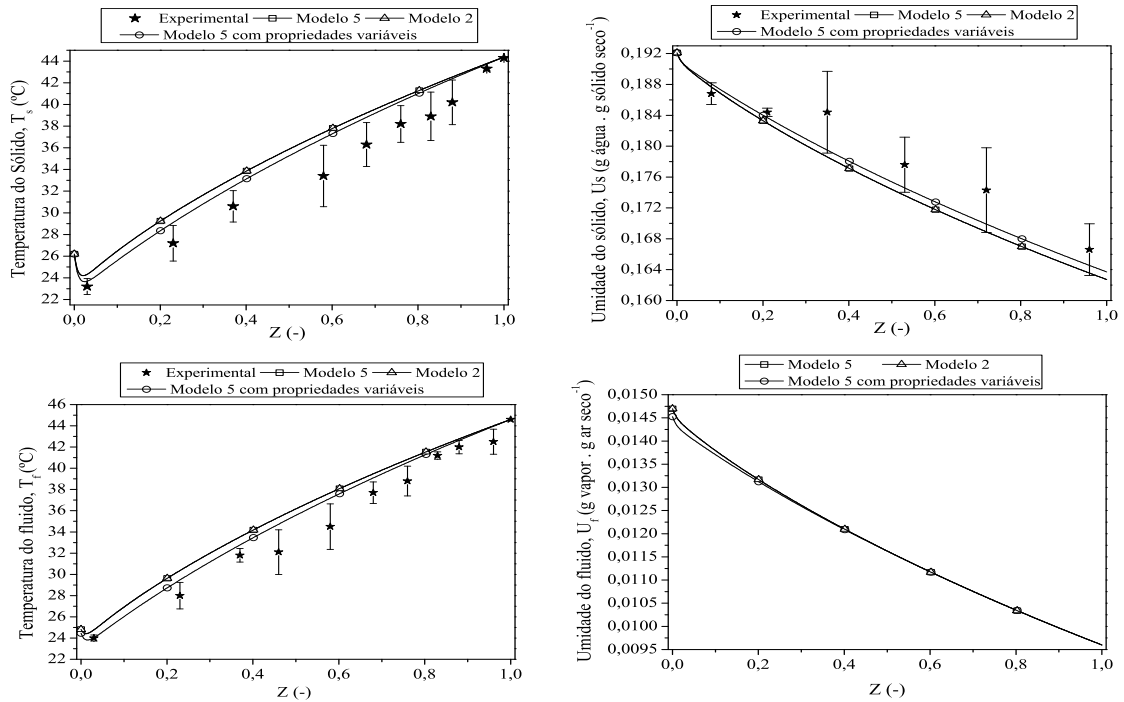


Figura 4.10: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 20, para o escoamento contracorrente - Modelo 2.

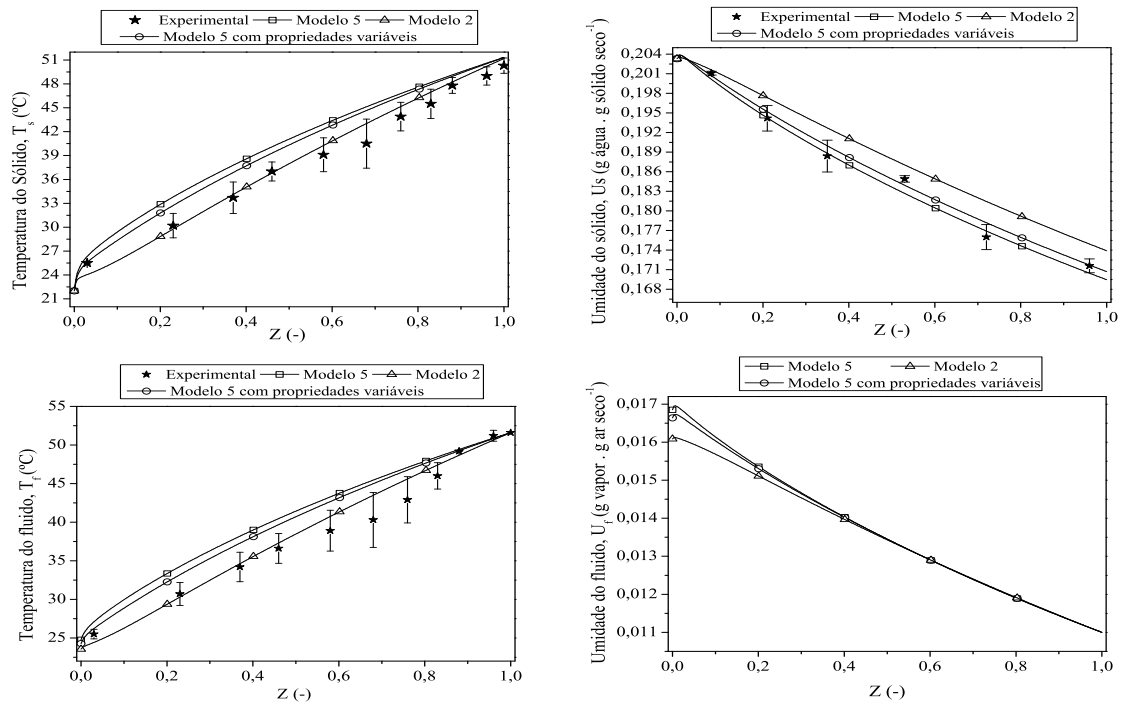


Figura 4.11: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 27, para o escoamento contracorrente - Modelo 2.

## 4.5 Solução dos Modelos 3 e 4

O modelo 3 considera as propriedades do calor específico,  $C_{pf}$ ,  $C_{pl}$  e  $C_{pv}$  variáveis, e a propriedade  $C_{ps}$  constante, para o modelo a duas fases, no qual o perfil de velocidade é dado pelas equações 3.130 e 3.135, e a porosidade do leito varia conforme a Eq. 3.129.

Neste estudo foram comparados os cinco modelos, sendo que o modelo 4 considera as propriedades do calor específico constantes, e as equações de velocidades são dadas por Vortmeyer e Schuster (1983) e Fahien e Stankovich (1979). Em outro estudo, foram comparados os modelos 3 e 4, para as equações de velocidades de Vortmeyer e Schuster (1983) e Fahien e Stankovich (1979), com o modelo 5. Os resultados são apresentados na seção 4.5.1 para o escoamento concorrente e na seção 4.5.2, para o escoamento contracorrente. Para a obtenção destes perfis com a influência das equações de velocidade, os perfis consideraram a velocidade no centro (Raio=0, simetria) do leito do secador.

### 4.5.1 Escoamento Concorrente

#### Vortmeyer e Schuster (1983)

As Figuras (4.12) e (4.13) apresentam os perfis de umidade e temperatura para os experimentos 10 e 13, respectivamente. Pode ser observado nestes experimentos, que os perfis dos modelos apresentam um distanciamento entre eles. Além disso, percebe-se que o Modelo 5 e o Modelo 4, que consideram as propriedades constantes, possuem perfis semelhantes e menos acentuados quando comparado com os dos Modelos 1, 2 e 3, para a temperatura e umidade.

Houve uma melhor concordância dos dados experimentais para a umidade dos sólidos, pode ser observado tanto para o experimento 10 quanto para o 13, de acordo com o Modelo 3 ( $C_{ps}$  constante). Para os perfis de temperatura do sólido e do fluido, verifica-se que a partir da solução do modelo 1 (propriedades variáveis) ocorre uma aproximação em relação aos dados experimentais; o que pode-se concluir que os modelos com  $C_{ps}$  constante apresentam melhor ajuste. Os experimentos discutidos mostram um melhor ajuste entre o Modelo 2 ( $C_{ps}$  constante) e o Modelo 3 ( $C_{ps}$  constante), o que confirma a pouca influência desta propriedade de acordo com a equação utilizada para a mesma.

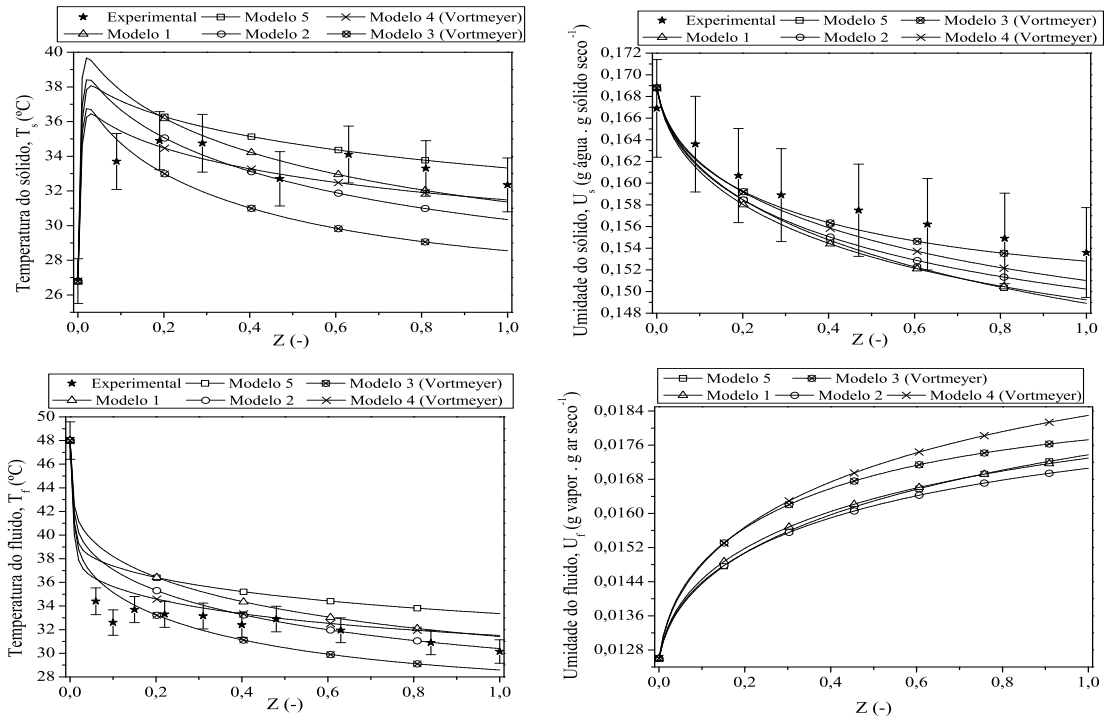


Figura 4.12: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 10, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4.

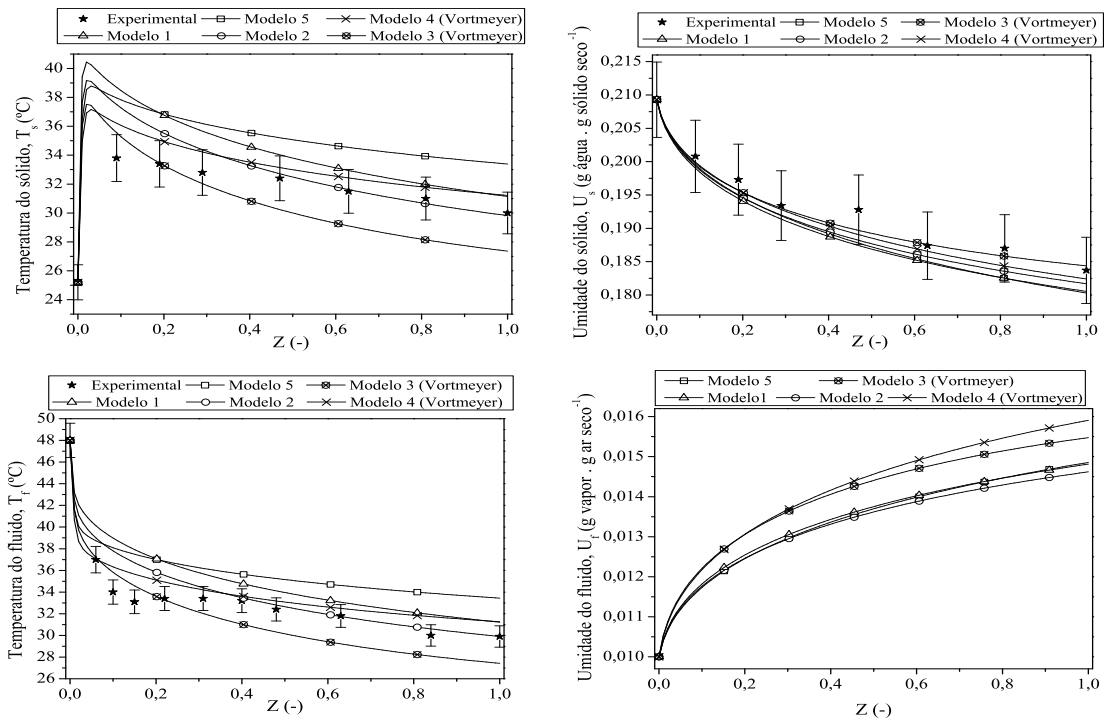


Figura 4.13: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 13, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4.

## Fahien e Stankovich (1979)

As Figuras (4.14) e (4.15) apresentam os perfis de umidade e temperatura para os experimentos 7 e 8, respectivamente. Como já discutido, nestes experimentos, também pode ser percebido que os perfis dos modelos apresentam um distanciamento entre eles. Verifica-se que há uma influência nos perfis de umidade e temperatura quando se utiliza equações para a velocidade e porosidade nos modelos.

Da mesma forma que para a equação de velocidade de Vortmeyer e Schuster (1983), percebe-se que o Modelo 5 e o Modelo 4, que consideram as propriedades constantes e a equação de velocidade de Fahien e Stankovich (1979), possuem perfis semelhantes e menos acentuados quando comparado com os dos Modelos 1, 2 e 3, para a temperatura e umidade.

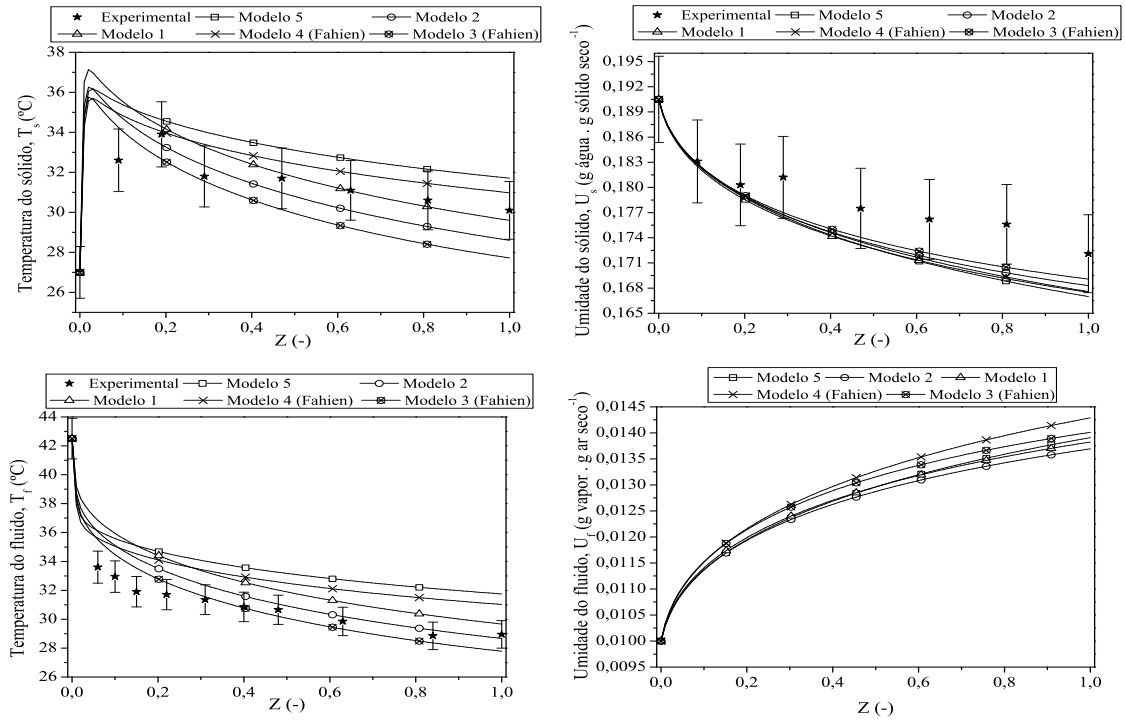


Figura 4.14: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 7, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4.

Um melhor ajuste dos dados experimentais foi observado para a temperatura do fluido para o experimento 7 e para a temperatura do fluido e dos sólidos, para o experimento 8. Os experimentos discutidos mostram um melhor ajuste entre o Modelo 2 ( $C_{ps}$  constante) e o Modelo 3 ( $C_{ps}$  constante), o que confirma a pouca influência da propriedade  $C_{ps}$  constante, considerando que esta variável é função da umidade do sólido.

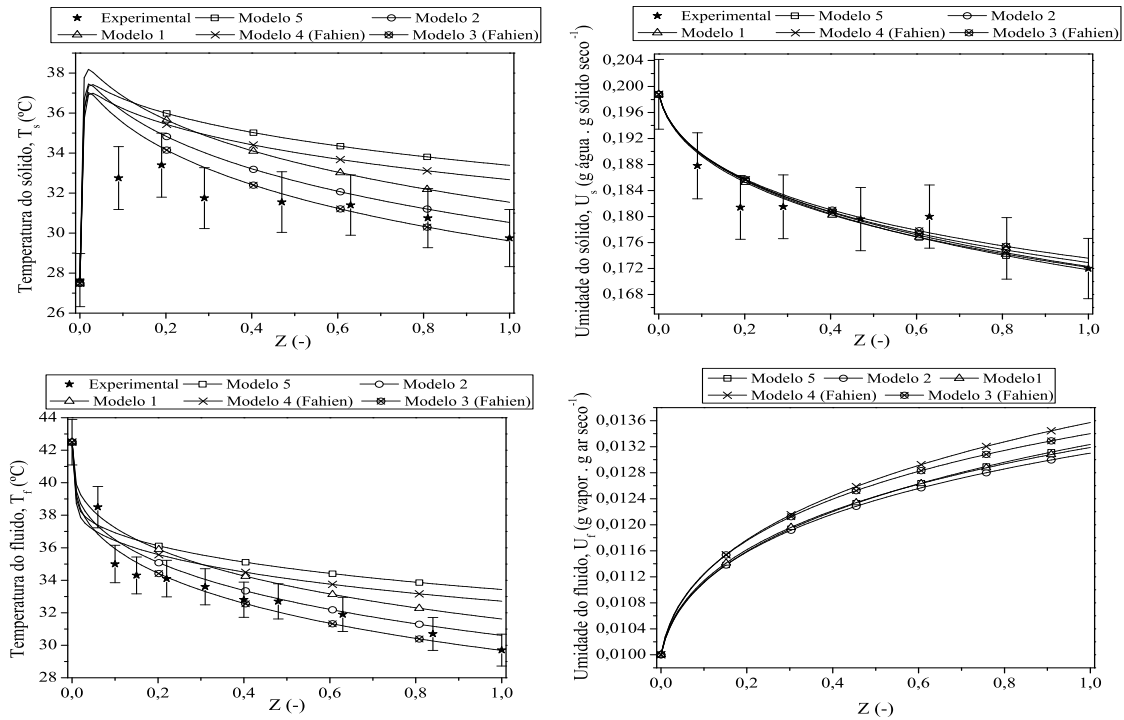


Figura 4.15: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 8, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4.

### Vortmeyer e Schuster (1983), Fahien e Stankovich (1979)

As Figuras (4.16) e (4.17) apresentam os perfis de umidade e temperatura para os experimentos 5 e 16, respectivamente.

Conforme apresentado nas figuras, observa-se que o perfil dado pela equação de Fahien (Modelo 4) se aproxima do perfil de propriedades constantes (Modelo 5), diferentemente do apresentado pela equação de Vortmeyer (Modelo 4). Os modelos 3 de Fahien e Vortmeyer, possuem o maior distanciamento entre os outros modelos, sendo que estes apresentam a influência das variáveis  $C_{pf}$ ,  $C_{pl}$  e  $C_{pv}$  nos modelos.

Nos experimentos apresentados, verifica-se que uma melhor adequação aos dados experimentais foi observado para a temperatura do sólido, pelos Modelos 4; para a temperatura do fluido, pelo Modelo 4 de Vortmeyer e para a umidade do sólido, o Modelo 3 de Vortmeyer. Desse modo, confirma-se que a variável  $C_{ps}$  em função da umidade do sólido apresenta pouca influência no ajuste dos dados experimentais e que o modelo de Vortmeyer e Schuster (1983) apresentou um ajuste mais satisfatório.

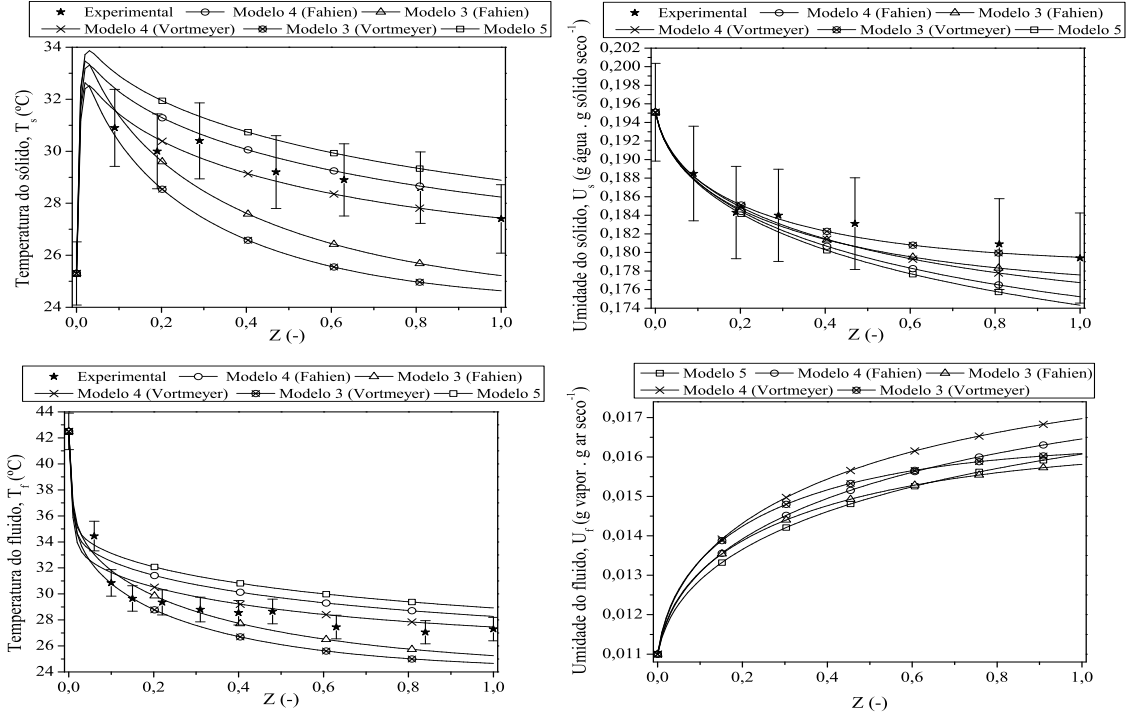


Figura 4.16: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 5, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4.

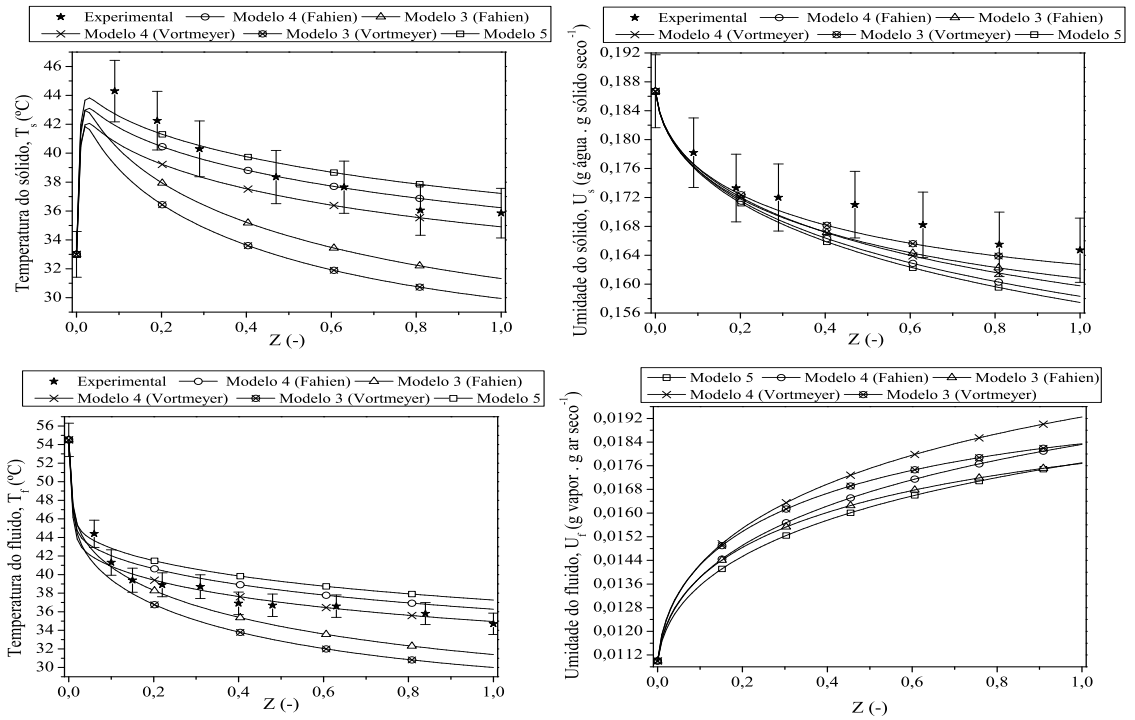


Figura 4.17: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 16, para o escoamento concorrente - Modelo 3 e 4.

### 4.5.2 Escoamento Contracorrente

#### Vortmeyer e Schuster (1983)

A Figura (4.18) apresenta os perfis de umidade e temperatura para o experimento 25. Um melhor ajuste dos dados experimentais para a umidade dos sólidos, pode ser observado com o Modelo 1 e para os perfis de temperatura do fluido, verifica-se que o Modelo 3 melhor se adequou; fato já observado no escoamento concorrente, nos quais os modelos com propriedade  $C_{ps}$  constante havia melhor ajustado os dados experimentais.

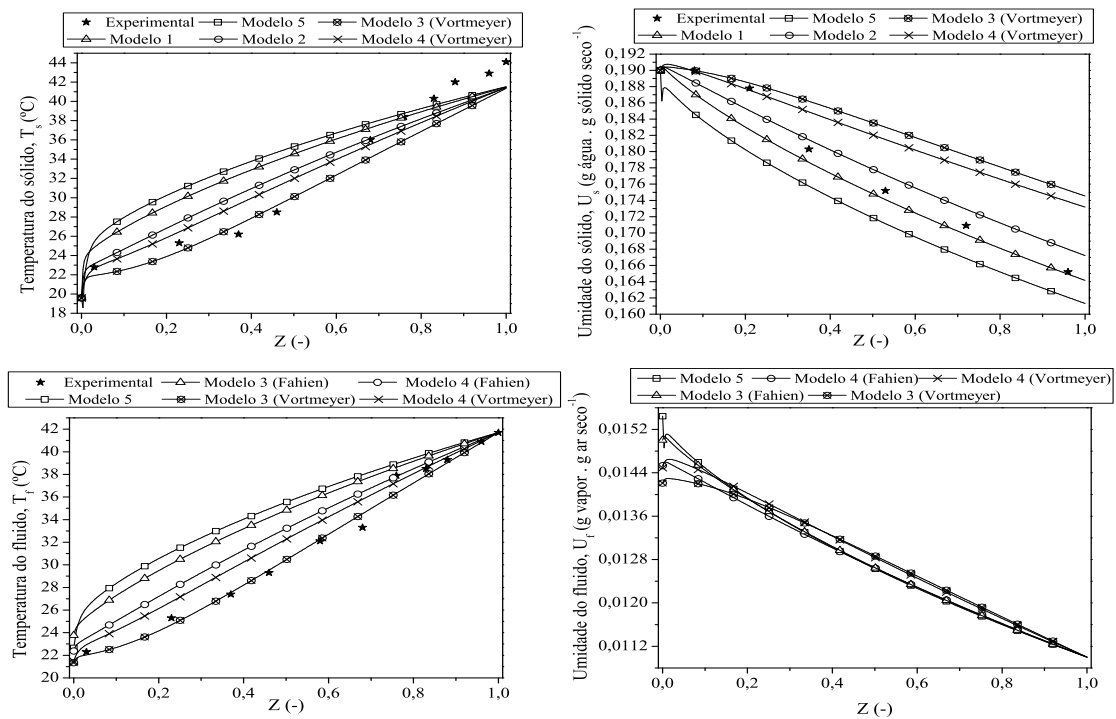


Figura 4.18: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 25, para o escoamento contracorrente - Modelo 3 e 4.

#### Fahien e Stankovich (1979)

Os perfis de temperatura e umidade do experimento 21 são apresentados na Figura (4.19). Neste experimento, os melhores ajustes foram observados para o Modelo 2 e 3, tanto para a temperatura do fluido quanto do sólido. Para a umidade do sólido, observa-se um melhor ajuste pelo Modelo 1, muito distante dos outros modelos; já observado nos ajustes apresentados no Apêndice B, no qual para este experimento havia um desvio muito maior em relação aos outros experimentos.

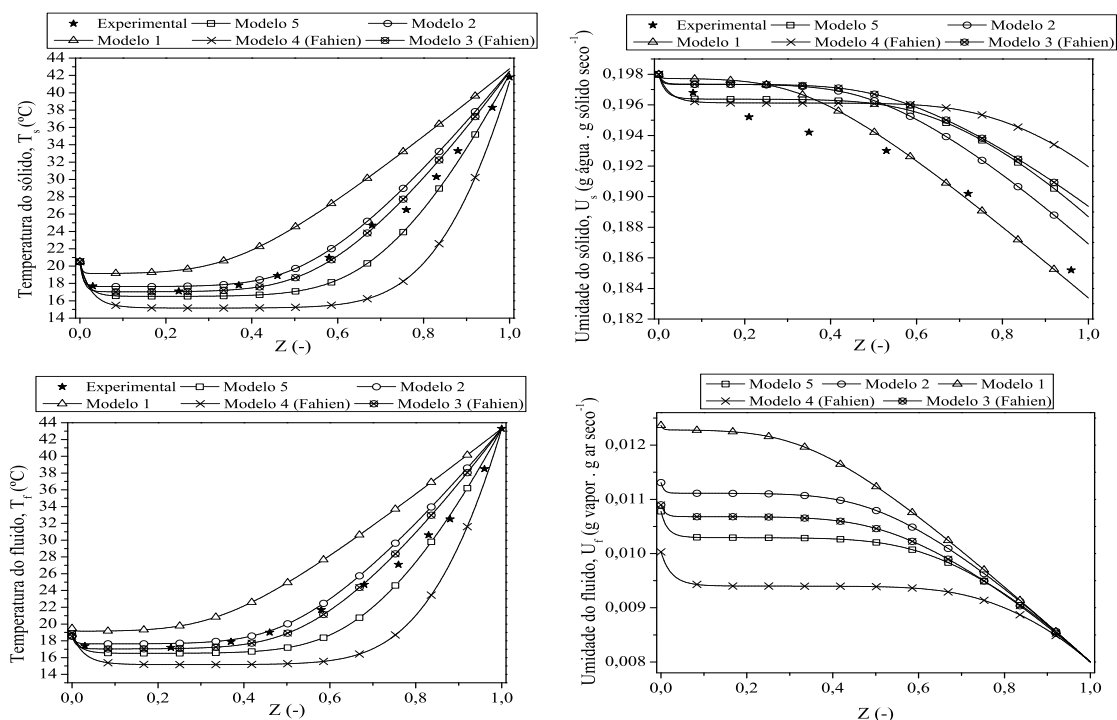


Figura 4.19: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 21, para o escoamento contracorrente - Modelo 3 e 4.

### Vortmeyer e Schuster (1983), Fahien e Stankovich (1979)

As Figuras (4.20) e (4.21) apresentam os perfis de umidade e temperatura para os experimentos 20 e 26, respectivamente. Conforme apresentado nas figuras, observa-se que o perfil dado pela equação de Fahien (Modelo 3 e 4) melhor se ajustou aos dados experimentais para as variáveis temperatura e umidade do sólido e do fluido. A exceção foi verificada para o experimento 26, para a variável umidade do sólido que melhor se ajustou entre os modelos 4 (Fahien) e 5.

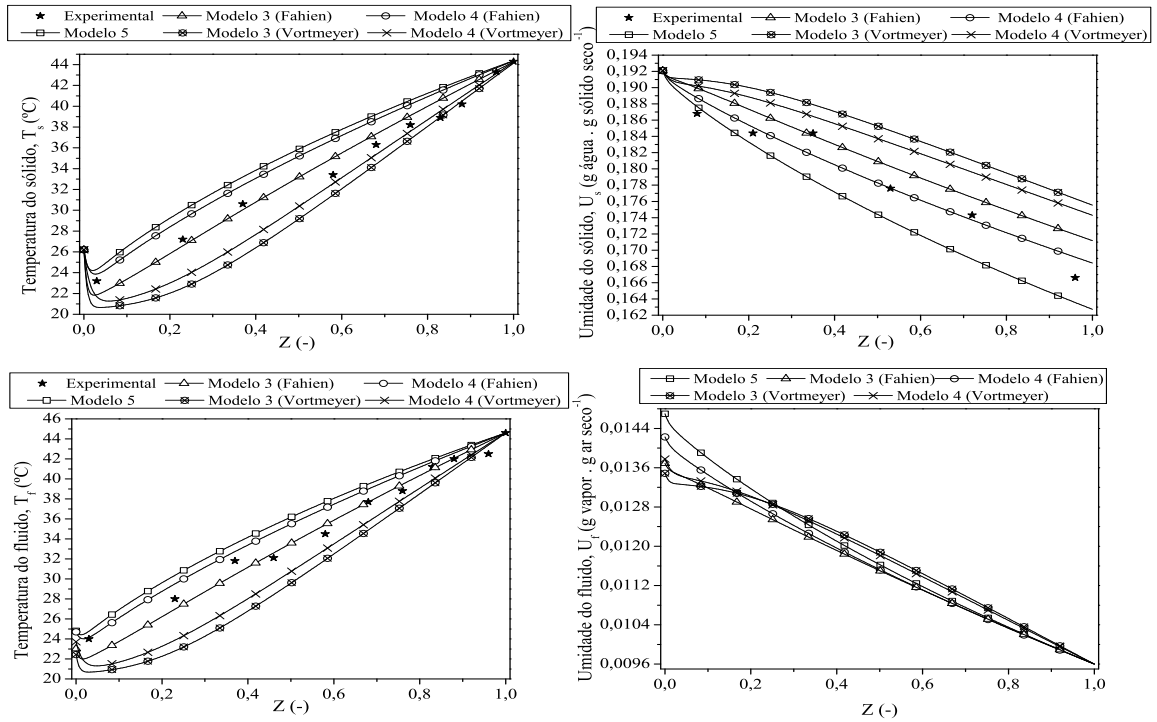


Figura 4.20: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 20, para o escoamento contracorrente - Modelo 3 e 4.

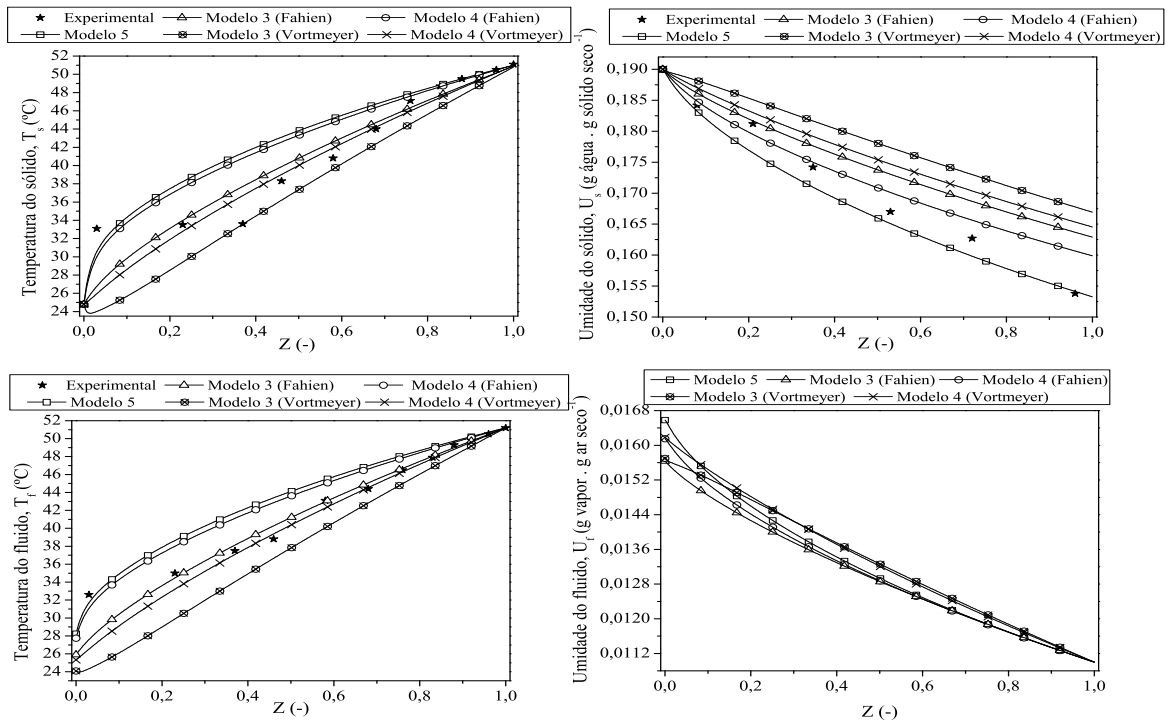


Figura 4.21: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 26, para o escoamento contracorrente - Modelo 3 e 4.

## 4.6 Resultados do Estudo sobre a Fluidodinâmica Computacional

Como já fora dito anteriormente, a presente tese de doutorado visou à simulação bidimensional do secador de leito deslizante com escoamento contracorrente a fim de se levantar as principais características da fluidodinâmica deste equipamento, tais como, perfis de velocidade e perfis de porosidade.

Com o objetivo de analisar os resultados simulados foram realizados ensaios experimentais em um secador de leito deslizante com o comprimento de 52,8 cm, conforme dados de Souza (2001). O esquema do secador de escoamento contracorrente é apresentado na Figura 4.22, com as respectivas dimensões. As partes que compõem o secador de leito deslizante são apresentadas na Figura 4.23, sendo que para a análise dos perfis de porosidade e de velocidade radial do ar, foram criadas 14 posições (linhas) ao longo do leito e na saída do secador.

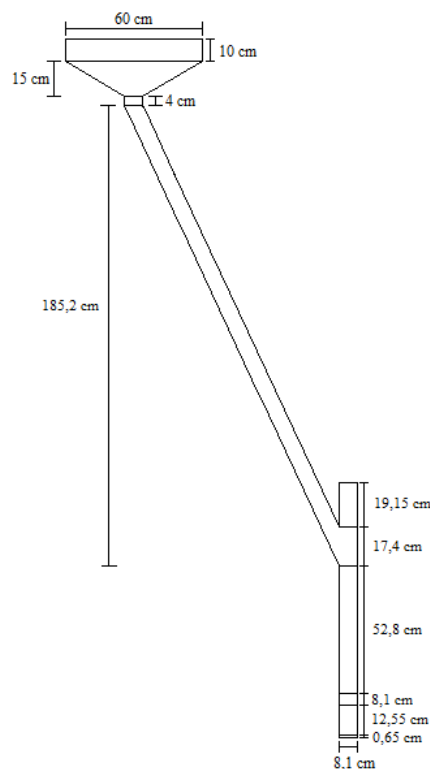


Figura 4.22: Esquema do leito deslizante com escoamento contracorrente.

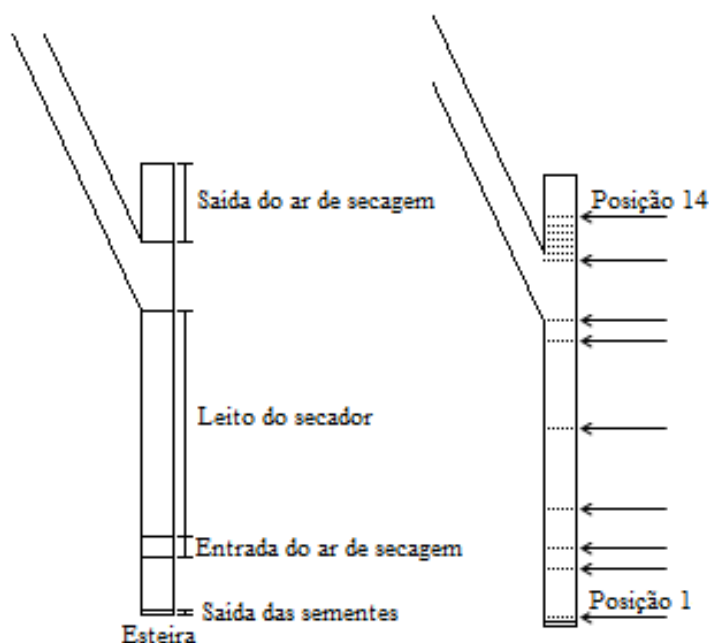


Figura 4.23: Esquema do leito deslizante com posição para a análise.

Foram obtidos os perfis de velocidade das simulações de cinco velocidades de entrada do ar ( $0,74 - 0,98 - 1,11 - 1,25 - 1,42 \text{ m s}^{-1}$ ), conforme descrito por Souza (2001). Os dados experimentais da autora foram comparados com os simulados e, além disso, testes variando o coeficiente de especularidade foram feitos para os valores do coeficiente iguais a  $0,0 - 0,1 - 0,2 - 0,4 - 0,6 - 0,8 - 0,9 - 1,0$ , com a velocidade da esteira igual a  $1,0 \cdot 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ . Os resultados apresentados foram obtidos para um tempo de simulação igual a 10 s para todos os testes.

A Figura 4.24 mostra o perfil de fração de volume de sólidos simulados. Este perfil foi obtido para os cinco testes, na saída do ar de secagem.

Observa-se que há uma semelhança qualitativa entre os perfis, isto é, não há alteração significativa no perfil com o aumento da velocidade do ar e, confirma a hipótese de que o perfil de velocidade não é plano. Ressalta-se aqui, que estas simulações foram obtidas para um tempo de simulação de 10 segundos.

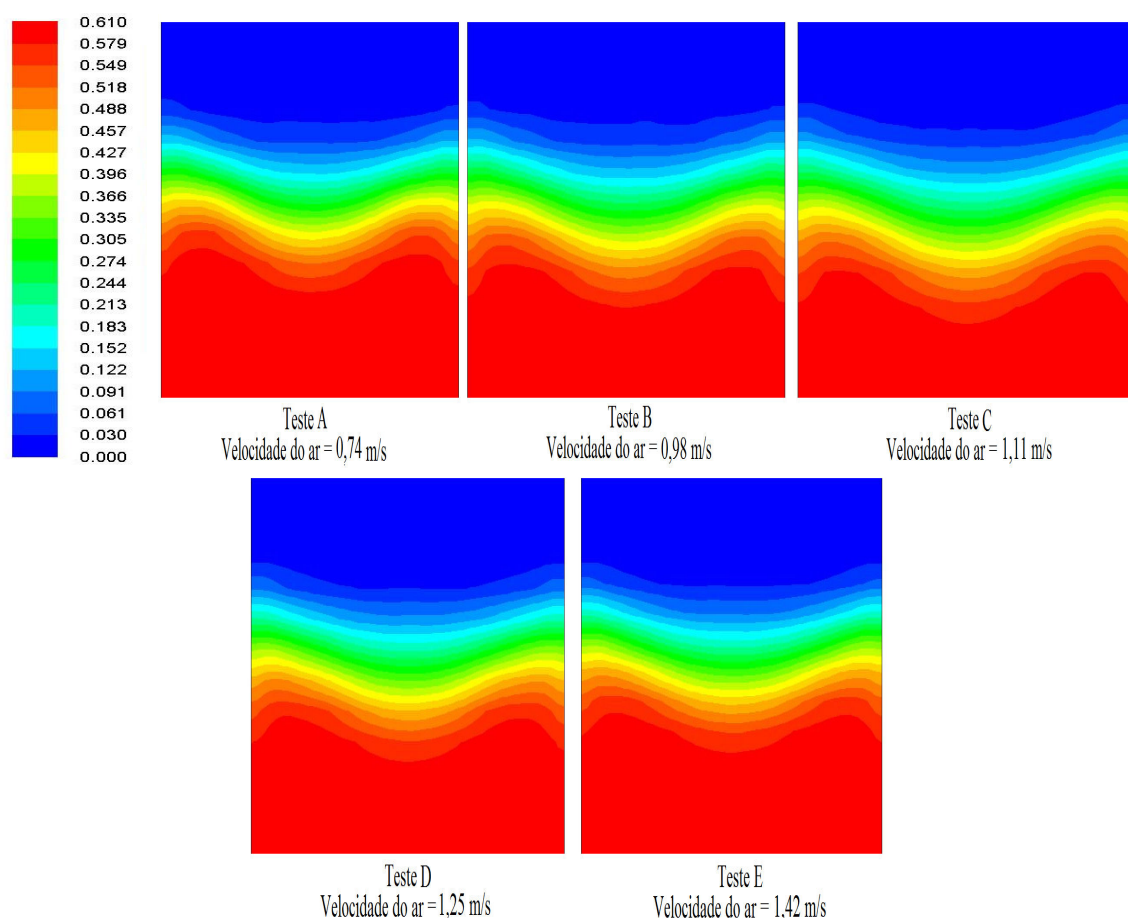


Figura 4.24: Perfil de fração de volume de sólidos.

#### 4.6.1 Perfil de Porosidade

Os resultados das simulações dos cinco testes para o perfil de porosidade, variando o coeficiente de especularidade, são apresentados a seguir para algumas posições (linhas) de análise ao longo do comprimento do secador.

As Figuras 4.25 e 4.26 apresentam os perfis da Linha 4 e 12 para os testes E e B, respectivamente. Pode ser observado, no teste E, que para a linha de análise 4, que se encontra na região inferior da entrada de ar do secador, há uma variação do perfil de porosidade com a aproximação da parede do secador. Verifica-se também, um efeito relacionado ao coeficiente de especularidade; para a simulação sem o coeficiente ( $=0$ ), há um efeito mais acentuado no perfil de porosidade, apesar da variação ser da ordem de 0,01 (1,67%); e, que com o aumento do coeficiente de especularidade o perfil se aproxima ao perfil de porosidade sem este coeficiente. Para o teste B, observa-se a influência da parede no perfil de porosidade, conforme apresentado na seção 2.6 desta tese; o perfil se torna amortecido na região central do leito. As variações dos perfis de porosidade são devidas à linha de análise, próxima à saída do ar do secador.

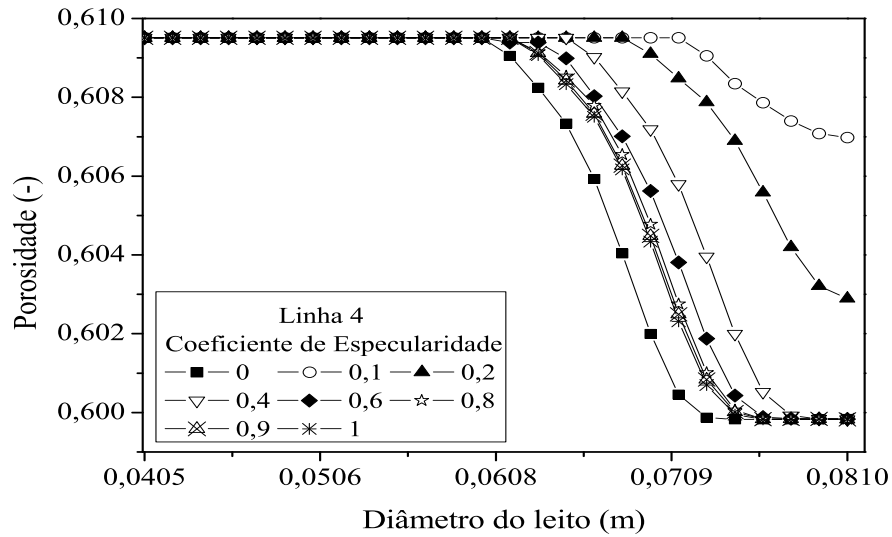


Figura 4.25: Perfis de porosidade para a linha 4 do Teste E.

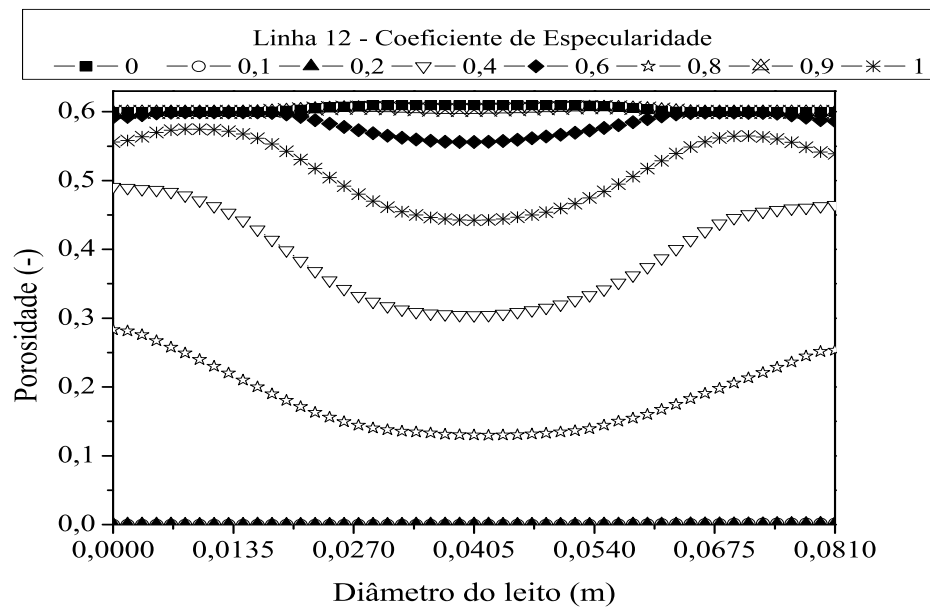


Figura 4.26: Perfis de porosidade para a linha 12 do teste B.

### 4.6.2 Perfil de Velocidade

Nesta seção são apresentados os perfis de velocidades do ar de secagem, para os cinco testes, e para as diferentes linhas de análise. De acordo com o método de obtenção dos dados experimentais da autora Souza (2001), verifica-se que nas linhas próximas à saída do ar do secador ocorre o ajuste aos dados experimentais dos perfis simulados de velocidade, conforme a posição radial.

As Figuras 4.27, 4.28 e 4.29, apresentam os perfis de velocidade do ar para as linhas 12, 7 e 13 dos Testes A, C e D, respectivamente. Na Figura 4.27, observa-se a variação em relação ao coeficiente de especularidade, conforme já discutido e o ajuste em relação aos dados experimentais. Os dados experimentais juntamente com os desvios destes, foram apresentados na segunda figura para os mesmos perfis de velocidade. De acordo com a linha de análise 12, próxima à saída do secador, os perfis de velocidade com coeficiente de especularidade iguais a 0,6, 0,9 e 1 apresentaram melhor ajuste aos dados experimentais.

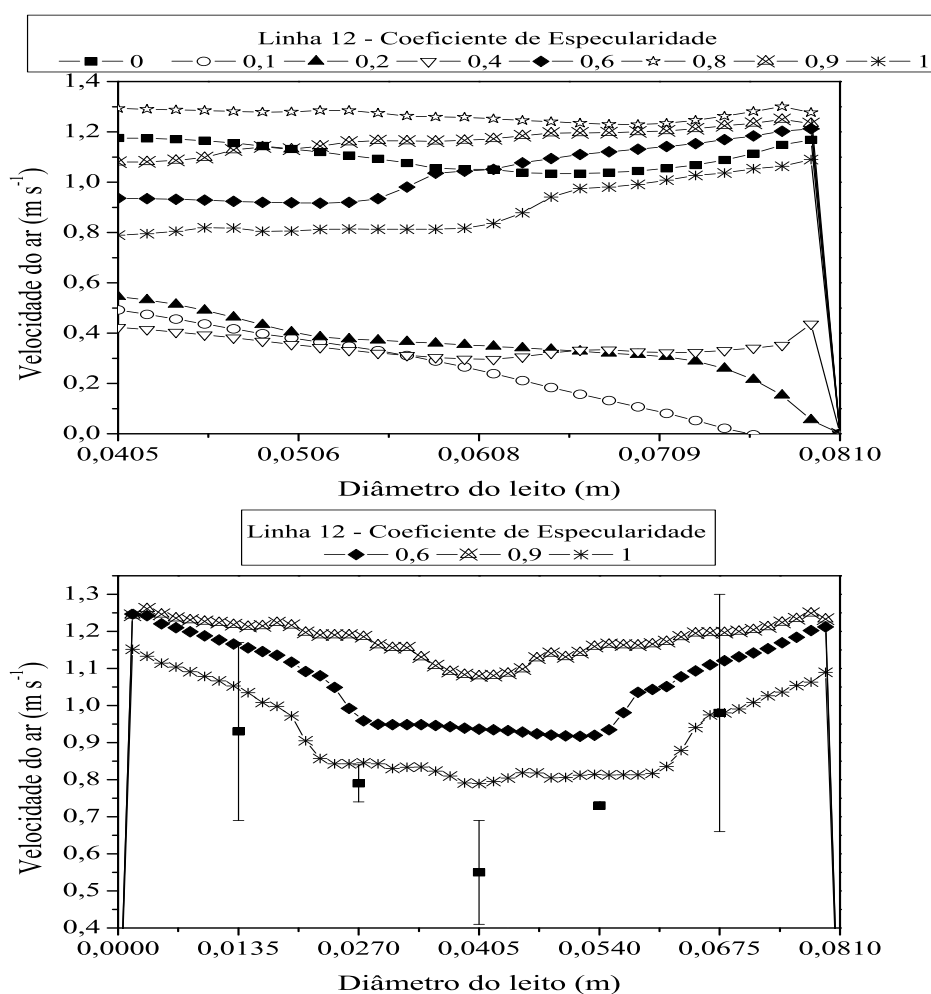


Figura 4.27: Perfis de velocidade do ar para a linha 12 do Teste A.

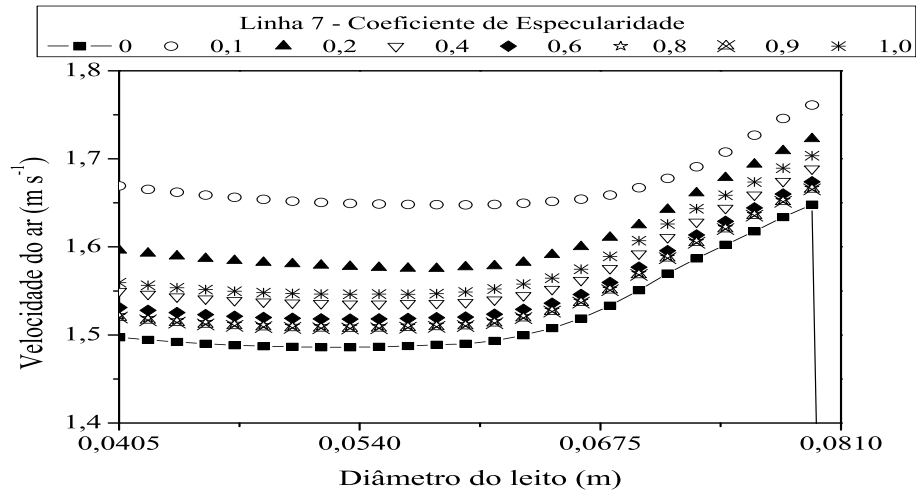


Figura 4.28: Perfis de velocidade do ar para a linha 7 do Teste C.

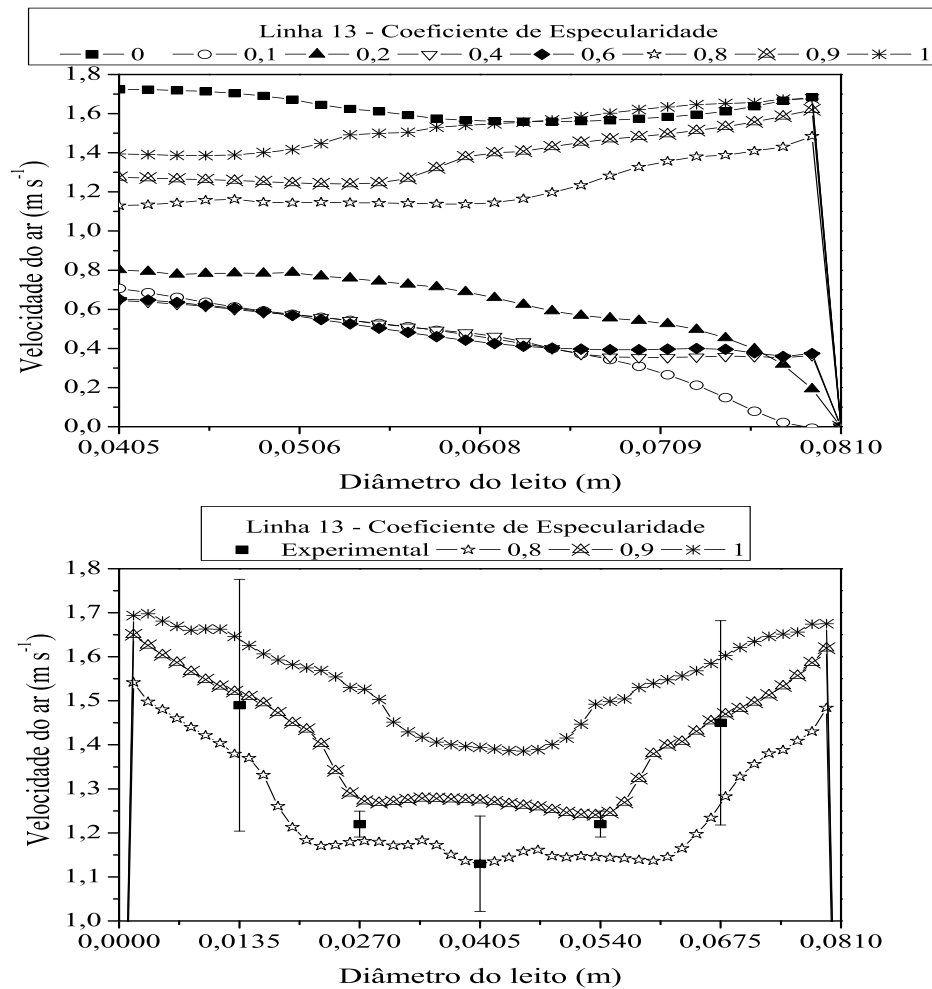


Figura 4.29: Perfis de velocidade do ar para a linha 13 do Teste D.

Para o teste C, cujos resultados são apresentados na Figura 4.28, observa-se a mesma variação em relação ao coeficiente de especularidade. Para o teste D, os resultados são apresentados na Figura 4.29. Pela linha de análise 13, na saída do secador, observa-se um ajuste satisfatório aos dados experimentais, pelos perfis de velocidade com coeficiente de especularidade iguais a 0,8, 0,9 e 1.

Nas simulações apresentadas, a variação do coeficiente de especularidade - que é uma medida da fração de colisões que transferem movimento à parede - influenciou nos perfis de porosidade e de velocidade, contribuindo para uma melhor adequação aos dados experimentais nos testes realizados. Os resultados apresentados mostram que para a situação em que a célula encontra-se com sólidos em escoamento, as regiões próximas à parede apresentam níveis superiores de velocidade. Este comportamento pode ser justificado devido à maior porosidade nesta região, conforme relatado em diversos trabalhos da literatura e observado nos resultados apresentados na seção 4.6.1.

Os perfis apresentados para o tempo de simulação igual a 10 s condizem com a observação de que os valores atingiram o estado estacionário, sendo portanto, correto comparar os dados experimentais com os dados aqui simulados. Observa-se que a partir deste estudo qualitativo, reforça-se o fato de que há uma variação no perfil de porosidade e velocidade do ar na secagem em leito deslizante.

## 4.7 Conclusões

De acordo com as simulações dos Modelos 1 a 5, pode ser verificado, tanto para o escoamento concorrente quanto para o contracorrente que os perfis foram melhor ajustados àqueles modelos que consideravam a propriedade calor específico do sólido ( $C_{ps}$ ) constante. Conforme apresentado, a equação utilizada para representar esta propriedade é função da umidade do sólidos, que consequentemente é uma função implícita da temperatura, enquanto que as outras propriedades são funções explícitas da temperatura. Este fator pode ter contribuído para os perfis aqui simulados.

Outra observação é que existe uma grande influência nos perfis de umidade e temperatura do sólido e do fluido quanto as considerações impostas pelos modelos, quanto à propriedades constantes, perfil de porosidade e de velocidade; fato que pode ser visualizado em todos os experimentos aqui apresentados, através da variação nos perfis simulados.

Deve ser enfatizado que para os estudos dos modelos 3 e 4, que levam em consideração o perfil de porosidade e de velocidade, foram apresentados nesta tese, apenas os resultados para a posição central do leito do secador. Em estudos realizados observa-se que os perfis sofrem influência em relação à aproximação da parede, conforme trabalhos da literatura (LIRA, 2005).

As simulações feitas no *software* FLUENT, alterando o coeficiente de especulari-

dade, mostrou ser adequada para a verificação da variação do perfil de porosidade e de velocidade do secador de leito deslizante contracorrente. As informações obtidas na saída do secador conforme técnica realizada em trabalhos da literatura, ajustaram-se de forma satisfatória aos dados experimentais de Souza (2001).

Com os estudos de fluidodinâmica computacional realizados, confirma-se o que já foi discutido na literatura, de que a hipótese de perfil plano de velocidade da fase fluida, no modelo a duas fases, não é válida na faixa de ar analisada.



---

---

# CAPÍTULO 5

---

## Análise da Qualidade das Sementes e do Desempenho da Secagem

Neste Capítulo são apresentados os resultados referentes ao estudo de simulação do modelo a duas fases (Modelo 5), para análise da qualidade das sementes de soja e do desempenho da secagem, para os secadores de leito deslizante com escoamentos concorrente, contracorrente e misto, com um e com múltiplos estágios. A otimização através do algoritmo de Evolução Diferencial é realizada para os escoamentos concorrente e contracorrente, visando encontrar as condições ótimas, para duas funções objetivo - maximização dos índices de qualidade e maximização da remoção de umidade.

### 5.1 Qualidade das Sementes

A qualidade de uma semente é composta por vários aspectos diferentes, que podem ser citados (GEORGE, 1999):

- Qualidade genética - refere-se a pureza do cultivar;

O controle rigoroso das gerações ou categorias das sementes juntamente com a implementação e monitoramento de procedimentos de certificação fornece dados

para a autenticidade do lote de sementes.

- Pureza física - relacionada com danos mecânicos e fissuras no tegumento, além de outras espécies de sementes;

O lote de sementes pode incluir as sementes puras, sementes de outras espécies (incluindo ervas daninhas) e contaminantes (organismos vivos, solo, etc.). As sementes puras podem estar inteiras, quebradas ou partidas, fissuradas, etc.

- Saúde da semente - refere-se à medida de agentes patogênicos e pragas presentes no lote;
- Viabilidade - refere-se ao potencial germinativo e subsequente produção de mudas do cultivar;

A análise é feita a partir de um lote de sementes de uma população específica, isto é, composta por uma população homogênea proveniente do mesmo estoque, do mesmo local e mesmo período de produção.

- Vigor - refere-se à somatória das propriedades que determina o nível de atividade e desempenho da semente durante a germinação e aparecimento da plântula;
- Teor de umidade - refere-se à porcentagem de umidade do lote de sementes.

### 5.1.1 Influência das Variáveis de Secagem na Qualidade das Sementes e na Remoção de Umidade

O estudo da influência das variáveis de secagem, iniciou-se com a análise das variáveis: velocidade intersticial do ar ( $V$ ), temperatura de entrada do ar ( $T_{f0}$ ), vazão de sólidos ( $Q_s$ ) e umidade relativa do ar de entrada ( $UR$ ), conforme trabalhos da literatura (FELIPE, 1999; LACERDA, 2002). A simulação do Modelo 5, descrito no Capítulo 3, buscou determinar, para as condições operacionais descritas na Tabela 4.1 (CELESTINO, 1998; SOUZA, 2001), os índices de qualidade das sementes.

Os parâmetros das equações apresentadas pelos autores Felipe (1999) e Lacerda (2002), são apresentadas nas Tabelas C.4 a C.6, para o escoamento concorrente e nas Tabelas C.10 a C.12, para o escoamento contracorrente do Apêndice C. As equações para os índices de qualidade foram obtidas pelos autores citados, para o comprimento de 64 cm para o secador concorrente e 52,8 cm para o secador contracorrente.

De forma, a obter melhores índices de qualidade e maior remoção de umidade das sementes de soja, o leito do secador foi dividido em quatro estágios de tamanhos iguais, conforme apresentado nas Figuras 5.1 e 5.2 para  $N$  estágios. Ar novo é introduzido em cada estágio, sendo que as condições de entrada do ar (temperatura e umidade) são iguais para cada estágio.

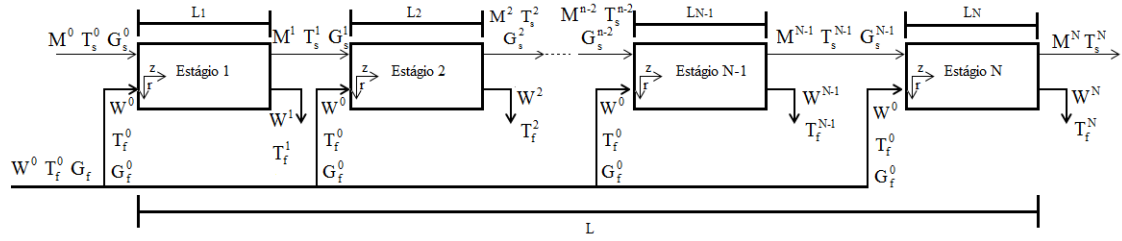


Figura 5.1: Esquema do secador concorrente de múltiplos estágios.

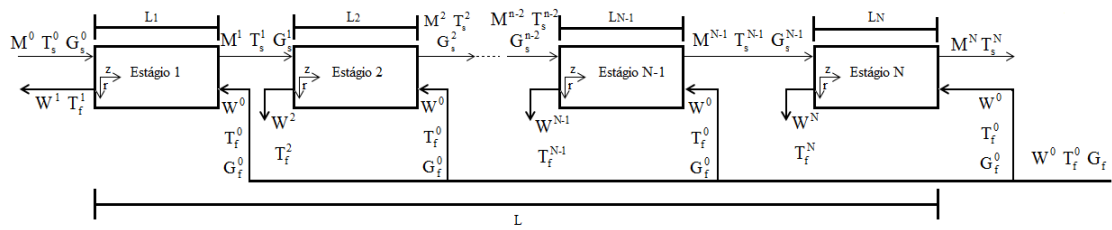


Figura 5.2: Esquema do secador contracorrente de múltiplos estágios.

O estudo dos índices de qualidade para secador de múltiplos estágios, iniciou-se com a aplicação das equações obtidas na literatura para cada estágio do secador. Foi observado que a utilização das equações desta forma, superestimava o efeito destas correlações, já que estas foram obtidas para um comprimento fixo e estava sendo extrapolado para até 4 vezes este tamanho. Assim, foi feito o estudo estatístico baseado em um ajuste linear nas respostas dos índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras.

Os valores das respostas de cada ajuste linear são apresentados nas Tabelas C.1 a C.3, para o escoamento concorrente e nas Tabelas C.7 a C.9 do Apêndice C, para o escoamento contracorrente. A partir da aplicação da metodologia do planejamento experimental (BOX et al., 1978) e da superfície de resposta (MYERS, 1976), foram feitos os tratamentos dos dados. O planejamento utilizado nos trabalhos da literatura e no presente trabalho, para o estudo da influência das variáveis do processo de secagem na qualidade das sementes, foi o planejamento composto central (PCC), levando a um número total de experimentos de 26, com duas réplicas no centro, conforme a matriz de planejamento apresentada na Tabela (5.1).

Para se obter um planejamento composto central ortogonal foi adotado um valor de  $\alpha$  igual a 1,4826, tornando a matriz de variância e covariância diagonal e os parâmetros estimados não são correlacionados entre si (BOX et al., 1978).

A Eq.(5.1) representa a forma de quantificar os efeitos isolados, de interações e os termos quadráticos relacionados as variáveis independentes, para cada resposta

Tabela 5.1: Matriz do PCC com quatro variáveis.

$X_1$	$X_2$	$X_3$	$X_4$	$Y_i$
-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	$Y_{16}$
$-\alpha$	0	0	0	$Y_{17}$
$\alpha$	0	0	0	$Y_{18}$
0	$-\alpha$	0	0	$Y_{19}$
0	$\alpha$	0	0	$Y_{20}$
0	0	$-\alpha$	0	$Y_{21}$
0	0	$\alpha$	0	$Y_{22}$
0	0	0	$-\alpha$	$Y_{23}$
0	0	0	$\alpha$	$Y_{24}$
0	0	0	0	$Y_{25}$
0	0	0	0	$Y_{26}$

estudada.

$$Y = \beta_0 + a x_1 + b x_2 + c x_3 + d x_4 + e x_1 x_2 + f x_1 x_3 + g x_1 x_4 + h x_2 x_3 +$$

$$i x_2 x_4 + j x_3 x_4 + l x_1^2 + m x_2^2 + n x_3^2 + p x_4^2 \quad (5.1)$$

Sendo:

$Y$  - a resposta estudada

$\beta$  - valor médio da resposta

$a, b, c, \dots, p$  - constantes ou parâmetros da equação

$x_1$  - velocidade do ar de secagem

$x_2$  - temperatura do ar de secagem

$x_3$  - vazão das sementes no leito

$x_4$  - umidade relativa do ar de secagem

As correlações obtidas apresentam as variáveis citadas anteriormente na forma adimensional, conforme os sistemas de equações (5.2) para o escoamento concorrente e (5.3) para o escoamento contracorrente.

$$x_1 = \frac{V(m\ s^{-1}) - 2}{0,5} x_2 = \frac{T_{f0}(^{\circ}C) - 48}{6} x_3 = \frac{Q_s(g\ min^{-1}) - 80}{20} x_4 = \frac{UR(\%) - 25}{3} \quad (5.2)$$

$$x_1 = \frac{V(m\ s^{-1}) - 1,6}{0,6} x_2 = \frac{T_{f0}(^{\circ}C) - 44}{6} x_3 = \frac{Q_s(g\ min^{-1}) - 80}{20} x_4 = \frac{UR(\%) - 25}{3} \quad (5.3)$$

A partir da equação original, representada neste caso pela Eq.(5.1), foi feita, para cada resposta estudada, uma análise de regressão múltipla através do método dos mínimos quadrados. Com os valores de  $t$  de Student, foi feita uma avaliação estatística da estimação dos parâmetros, de forma a eliminar aqueles com nível de significância superior a 10%, pois as variáveis relacionadas a estes podem ser consideradas irrelevantes.

Obtendo-se o coeficiente de correlação quadrático  $R^2$  e a comparação entre  $F$  calculado e  $F$  tabelado e realizada uma análise de resíduos, foi possível a constatação da significância da equação proposta. Desprezando-se os parâmetros não significativos, foi determinada, para cada resposta estudada, uma equação que representa os efeitos das variáveis escolhidas do processo nos índices de qualidade das sementes, podendo também prever a condição de secagem que resultaria em um produto com melhor qualidade. Os valores dos coeficientes e dos parâmetros das equações são apresentados no Apêndice C.

### 5.1.2 Equações para os Escoamentos Concorrente e Contracorrente

As correlações obtidas a partir do estudo estatístico para o escoamento concorrente foram obtidas por Felipe (1999), para um secador com 64,0 cm de altura e representam as formas matriciais das equações ajustadas para os índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras como funções das variáveis de secagem adimensionais, isto é, velocidade intersticial do ar ( $x_1$ ), temperatura de entrada do ar ( $x_2$ ), vazão de sólidos ( $x_3$ ) e umidade relativa do ar de entrada ( $x_4$ ). As equações para o escoamento contracorrente foram obtidas por Lacerda (2002) para um secador com 52,8 cm de altura.

### Germinação (Escoamento Concorrente)

Nesta regressão foram eliminados os parâmetros com nível de significância do teste t de Student superiores a 5%, sendo, portanto, as variáveis relacionadas a eles consideradas não relevantes. Com isso, desprezou-se o termo isolado da velocidade do ar e as interações velocidade/temperatura do ar, temperatura/umidade relativa do ar, entre outras.

Constata-se analisando a Tabela (C.4) que todas as variáveis estudadas influenciaram o poder germinativo das sementes, sendo que as variáveis que tiveram uma influência mais efetiva foram a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem e a vazão dos sólidos no leito. A combinação de baixos valores de temperatura do ar e de vazão das sementes, com umidade relativa do ar alta, resultou nos maiores valores dos índices de germinação, conforme descrito por Felipe (1999).

A estatística t de Student para os parâmetros apresentou bons resultados, sendo observados valores dos parâmetros sempre superiores aos seus respectivos desvios padrão. O valor do coeficiente de correlação entre 88 e 92% indica um adequado ajuste obtido dos dados experimentais na resposta germinação, frente à equação empírica proposta, para os secadores de até 6 estágios.

O resultado de F calculado ( $F_c$ ) foi superior ao tabelado ( $F_T$ ) para um nível de significância de 1%. Esta comparação pode ser interpretada através de um teste de hipótese. A hipótese de nulidade ( $H_0$ ) diz que o modelo não é significativo, ou seja, todos os parâmetros são iguais a zero. A hipótese alternativa ( $H_1$ ) afirma que o modelo é significativo. O resultado do teste F mostrou que se pode rejeitar  $H_0$  no nível de significância de 1%, ou seja, tem-se uma confiança de 99% que o modelo é significativo.

Para melhor ilustrar os efeitos das variáveis de processo na qualidade das sementes de soja com relação ao índice de germinação, é apresentada na Figura 5.3 a superfície de resposta que relaciona duas das variáveis que mais afetaram a germinação da soja ( $T_{f0}$  e  $Q_s$ ), considerando as demais variáveis no ponto central, ou seja, com seus valores médios. De acordo, com esta superfície de resposta, observa-se que para valores maiores de temperatura, há uma maior queda nos índices de germinação. Da mesma forma, conforme aumentam os valores de vazão dos sólidos, a queda na capacidade de germinação também aumenta.

A literatura afirma que temperaturas elevadas afetam as sementes, assim como, o aumento da vazão de sólidos pode ocasionar maior choque entre as sementes, diminuindo o poder germinativo das sementes. Com isso, justifica-se a aplicação da divisão do leito deslizante em estágios de forma a diminuir a influência destas variáveis na qualidade das sementes.

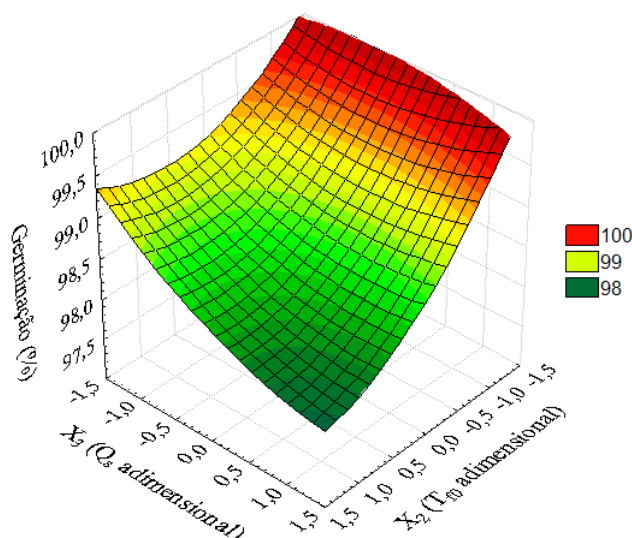


Figura 5.3: Superfície de resposta para o índice de germinação em função de  $T_{f0}$  e  $Q_s$  - Concorrente.

### Germinação (Escoamento Contracorrente)

Nesta regressão foram eliminados os parâmetros com nível de significância do teste t de Student superiores a 10%, sendo, portanto, as variáveis relacionadas a eles consideradas não relevantes. Com isso, desprezou-se o termo quadrático da umidade relativa do ar e as interações velocidade/temperatura do ar, vazão de sólidos/umidade relativa do ar, entre outras.

Constata-se analisando a Tabela (C.10) que todas as variáveis estudadas influenciaram o poder germinativo das sementes, sendo que as variáveis que tiveram uma influência mais efetiva foram a temperatura e a vazão de sólidos no leito. A combinação de baixos valores de temperatura do ar e de vazão das sementes, com umidade relativa do ar alta, resultou nos maiores valores dos índices de germinação, conforme descrito por Lacerda (2002).

A estatística t de Student para os parâmetros apresentou bons resultados, sendo observados valores dos parâmetros sempre superiores aos seus respectivos desvios padrão. Os valores do coeficiente de correlação acima de 94% indica um adequado ajuste obtido dos dados experimentais na resposta germinação, frente à equação empírica proposta, para os secadores de até 6 estágios. O resultado do teste F mostrou que se tem uma confiança de 99% de que o modelo é significativo.

Para melhor ilustrar os efeitos das variáveis de processo na qualidade das sementes de soja com relação ao índice de germinação, são apresentadas nas Figuras 5.4 e 5.5 as superfícies de resposta que relacionam dois pares de variáveis que afetaram a germinação da soja ( $T_{f0}$  e  $V$ ;  $Q_s$  e  $V$ ), considerando as demais variáveis no ponto central, ou seja, com seus valores médios. De acordo, com esta superfície de resposta,

observa-se que para valores menores de temperatura e velocidade do ar, há um aumento nos índices de germinação, assim como, ao se diminuir a vazão de sólidos e a velocidade do ar de secagem.

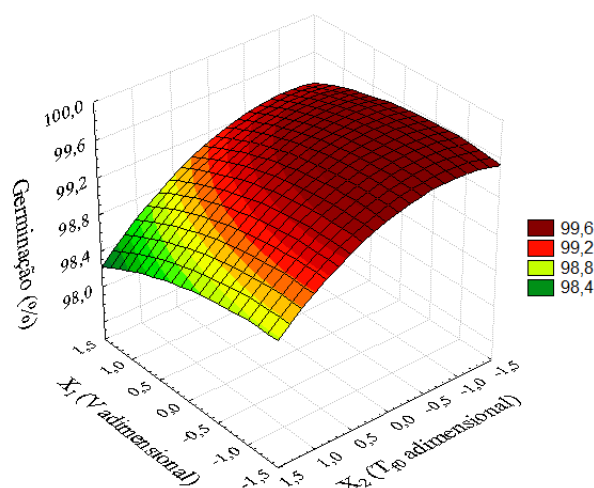


Figura 5.4: Superfície de resposta para o índice de germinação em função de  $V$  e  $T_{f0}$  - Contracorrente.

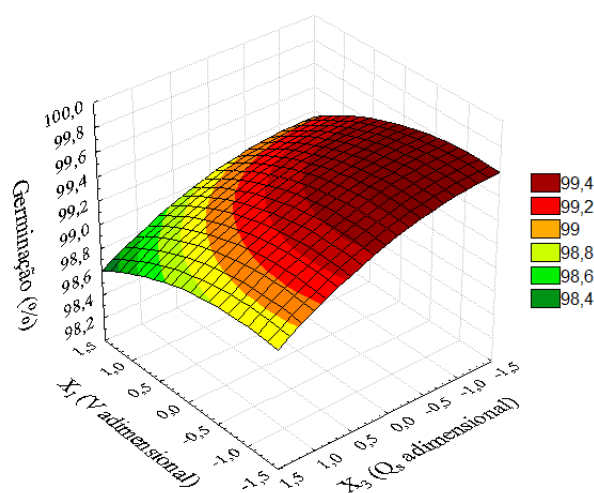


Figura 5.5: Superfície de resposta para o índice de germinação em função de  $V$  e  $Q_s$  - Contracorrente.

### Vigor (Escoamento Concorrente)

Os dados da Tabela (C.5) referem-se aos resultados da análise de regressão múltipla para os índices de vigor. Os parâmetros com nível de significância superiores a 10% no teste t de Student foram desprezados, pela irrelevância das variáveis relacionadas a este. Os resultados dos indicadores estatísticos: t de Student,  $R^2$  acima de 89% para

os secadores de até 6 estágios e  $F$  ( $F_c > F_T$ ), indicam o bom ajuste obtido na equação resultante para o vigor.

A Figura 5.6 mostra através de uma superfície de resposta os efeitos de duas variáveis na qualidade das sementes quanto aos índices de vigor. Nesta superfície são mostrados os efeitos de duas das variáveis mais efetivas nesta resposta (temperatura e umidade relativa do ar de secagem) considerando as demais constantes, nos seus níveis médios dentro da matriz de planejamento. Observa-se que, para umidade relativa do ar alta e menores temperaturas, foram encontrados índices de vigor mais elevados. Condições de secagem com valores baixos de temperatura do fluido e vazão dos sólidos e umidade relativa do ar elevada, fornecem os mais altos índices de vigor.

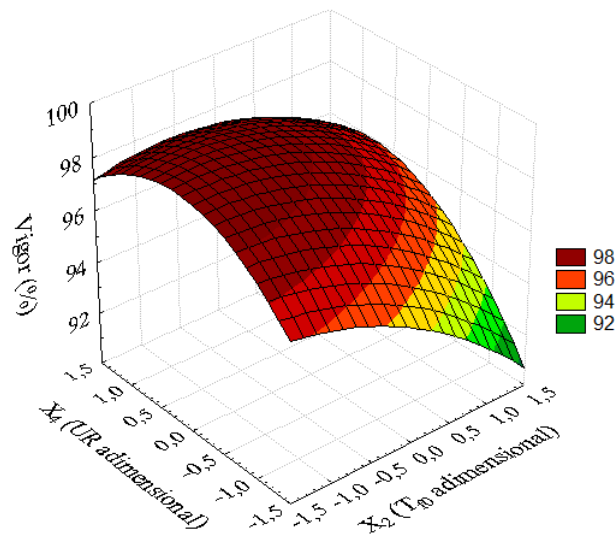


Figura 5.6: Superfície de resposta para o índice de vigor em função de  $UR$  e  $T_{f0}$  - Concorrente.

### Vigor (Escoamento Contracorrente)

Analisando os resultados mostrados na Tabela (C.11), observa-se que de alguma forma todas as variáveis tiveram a sua contribuição nos resultados dos testes de vigor, destacando-se a temperatura, umidade relativa do ar e a vazão dos sólidos no leito como as mais importantes.

Os resultados dos indicadores estatísticos:  $t$  de Student,  $R^2$  acima de 83% para os secadores de até 6 estágios e  $F$  ( $F_c > F_T$ ), indicam o bom ajuste obtido na equação resultante para o vigor. As Figuras 5.7 e 5.8 mostram através de superfícies de resposta os efeitos de dois pares de variáveis ( $UR$  e  $Q_s$ ;  $UR$  e  $T_{f0}$ ) na qualidade das sementes. Observa-se que, para umidade relativa do ar alta e menores temperaturas, assim como, altos valores de umidade e menores valores de vazão de sólidos, elevam o índice de vigor.

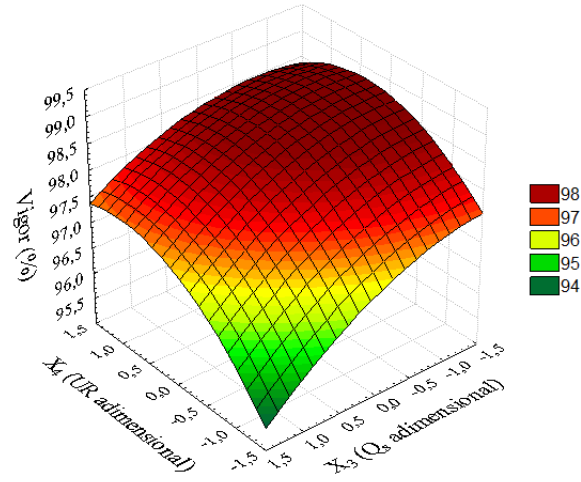


Figura 5.7: Superfície de resposta para o índice de vigor em função de  $UR$  e  $Q_s$  - Contracorrente.

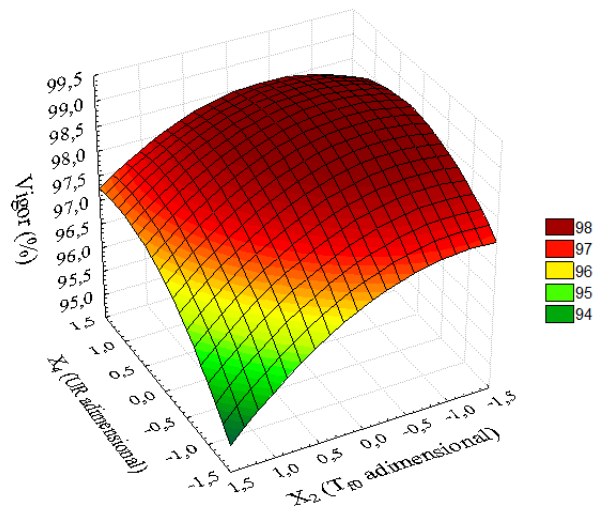


Figura 5.8: Superfície de resposta para o índice de vigor em função de  $UR$  e  $T_{f0}$  - Contracorrente.

### Sementes sem fissuras (Concorrente)

Os resultados da regressão múltipla e da análise estatística do índice de sementes sem fissuras, são apresentadas na Tabela (C.6). Nestes testes, foram eliminados os parâmetros não significativos (nível de significância no teste t de Student maior que 10%), e os resultados da análise estatística da regressão múltipla mostraram que houve ajustes adequados. Os valores do coeficiente de correlação  $R^2$  ficaram acima de 92% para os secadores de até 6 estágios, mostrando que 92% da variabilidade dos dados foram explicados pela equação empírica. O valor de F calculado foi superior ao F tabelado ( $F_c > F_T$ ), para um nível de significância de 1%, sendo, portanto, a equação significativa.

Todas as variáveis tiveram uma relativa influência nos resultados, no entanto, a velocidade, umidade relativa do ar e vazão dos sólidos no leito foram as que mais afetaram a resposta do índice de fissuras. A superfície de resposta dos índices de sementes sem fissuras em função das variáveis vazão das sementes e umidade relativa do ar, é apresentada na Figura 5.9, mostrando que os melhores resultados são obtidos para menores valores de vazão das sementes e maiores valores de umidade relativa.

Segundo Felipe (1999), vazões dos sólidos baixas provocam menos impactos entre as sementes, o que explica a redução nos danos físicos.

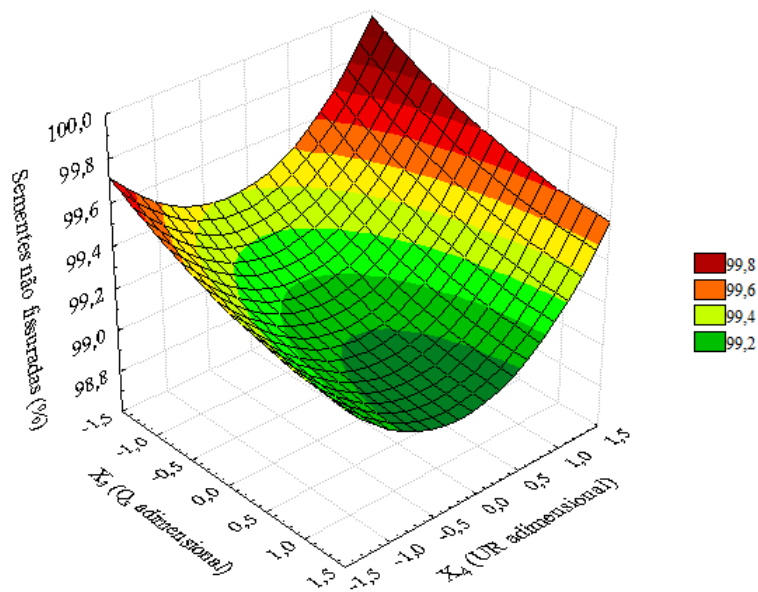


Figura 5.9: Superfície de resposta para o índice de sementes não fissuradas em função de  $UR$  e  $Q_s$  - Concorrente.

### Sementes sem fissuras (Contracorrente)

Os resultados da regressão múltipla e da análise estatística do índice de sementes sem fissuras, são apresentadas na Tabela (C.12). Nestes testes, foram eliminados os

parâmetros não significativos (nível de significância no teste t de Student maior que 10%), e os resultados da análise estatística da regressão múltipla mostraram que houve ajustes adequados. Os valores do coeficiente de correlação  $R^2$  ficaram acima de 93% para os secadores de até 6 estágios, mostrando que 92% da variabilidade dos dados foram explicados pela equação empírica. O valor de F calculado foi superior ao F tabelado ( $F_c > F_T$ ), para um nível de significância de 1%, sendo, portanto, a equação significativa.

Todas as variáveis tiveram uma relativa influência nos resultados. As Figuras 5.10 e 5.11, apresentam as superfícies de resposta dos índices de sementes sem fissuras em função de dois pares de variáveis ( $UR$  e  $Q_s$ ;  $V$  e  $Q_s$ ). As superfícies mostram que os melhores resultados são obtidos para baixos valores de vazão de sólidos e altos valores de umidade relativa, assim como para baixos valores de vazão de sólidos e altos valores de velocidade do ar.

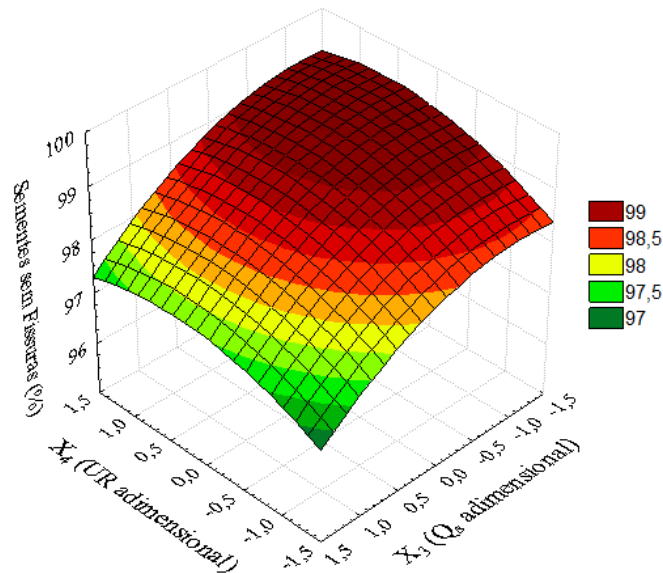


Figura 5.10: Superfície de resposta para o índice de sementes não fissuradas em função de  $UR$  e  $Q_s$  - Contracorrente.

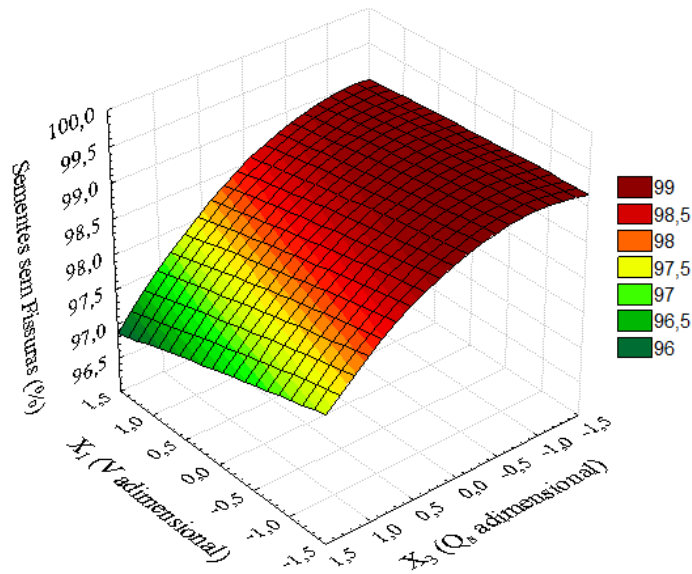


Figura 5.11: Superfície de resposta para o índice de sementes não fissuradas em função de  $V$  e  $Q_s$  - Contracorrente.

## 5.2 Resultados

### 5.2.1 Escoamento Concorrente

As Figuras (5.12) e (5.13) apresentam os resultados do índice de germinação para dois casos: com a equação obtida por Felipe (1999) (sem alterar a equação com o tamanho do leito) e com a modificação da equação de acordo com as análises estatísticas apresentadas na seção anterior. Observa-se para este índice que sem alterar a equação com o comprimento, ocorre uma redução mais acentuada dos valores de germinação com o aumento do número de estágios. Alterando as equações, observa-se, conforme justificativa já mostrada, que este efeito de superestimativa do índice de germinação foi eliminado. Verifica-se que os valores de germinação aumentaram de acordo com o número de estágios para cerca de 70% dos casos estudados, ficando sempre acima de 75%.

As Figuras (5.14) e (5.15) apresentam os resultados do índice de vigor. Sem alterar a equação com o comprimento, observa-se para este índice que ocorre uma redução mais acentuada com o aumento do número de estágios, chegando até níveis de 40%. Alterando as equações, os resultados mostram que os valores de vigor aumentaram de acordo com o número de estágios para acima de 70%. Os experimentos 19 a 27 não apresentam mudanças, mantendo seus valores no nível máximo. Este fato pode ser explicado pelas condições destes experimentos apresentarem valores de velocidade intersticial menores, ocasionando melhores índices de vigor.

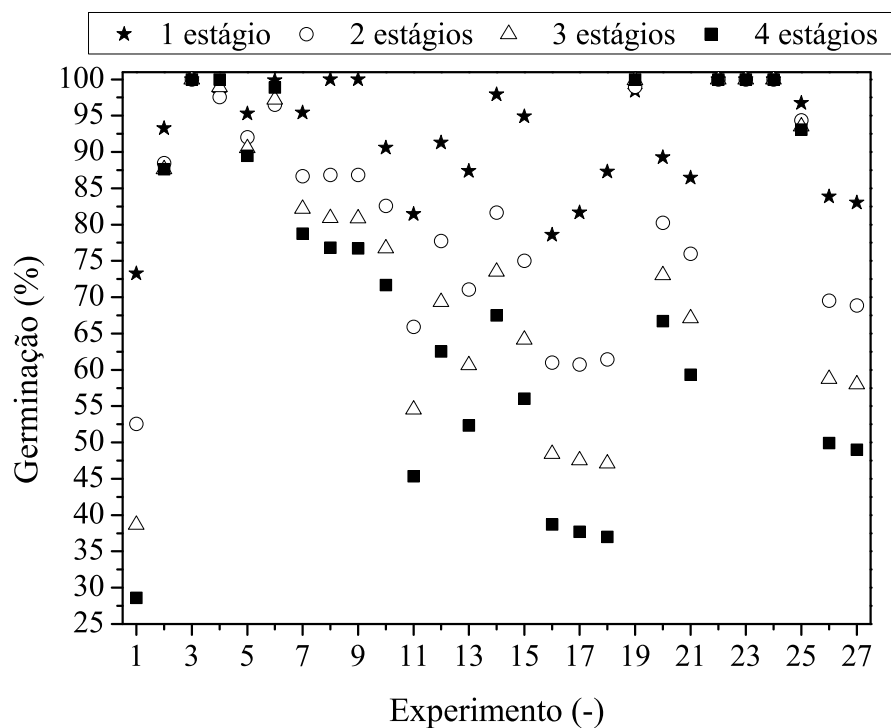


Figura 5.12: Equação do índice de germinação sem a variação com o tamanho do leito.

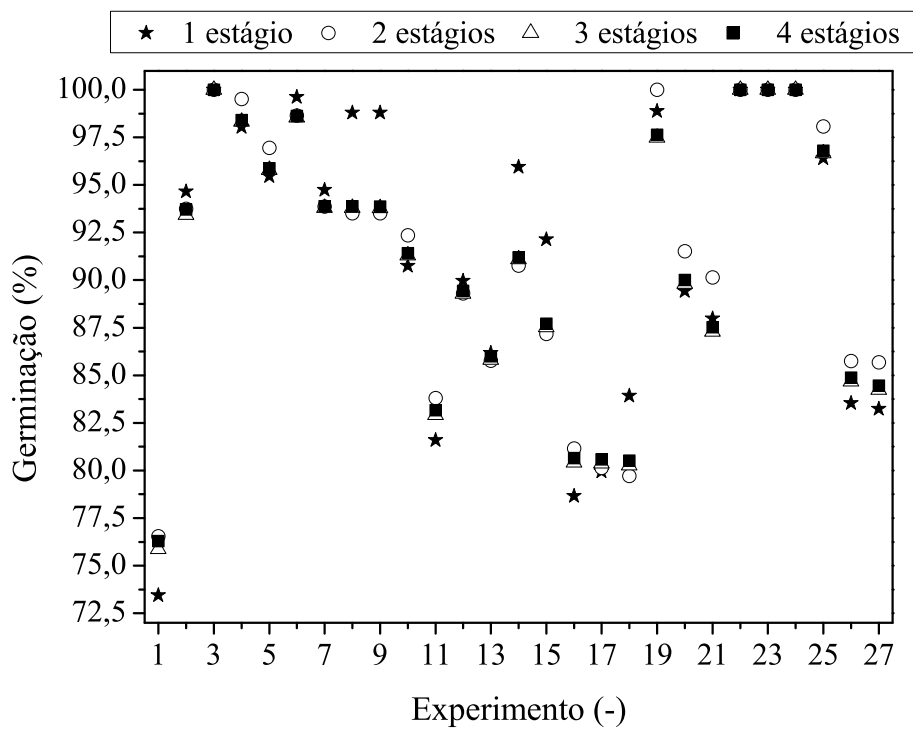


Figura 5.13: Equação do índice de germinação com a variação com o tamanho do leito.

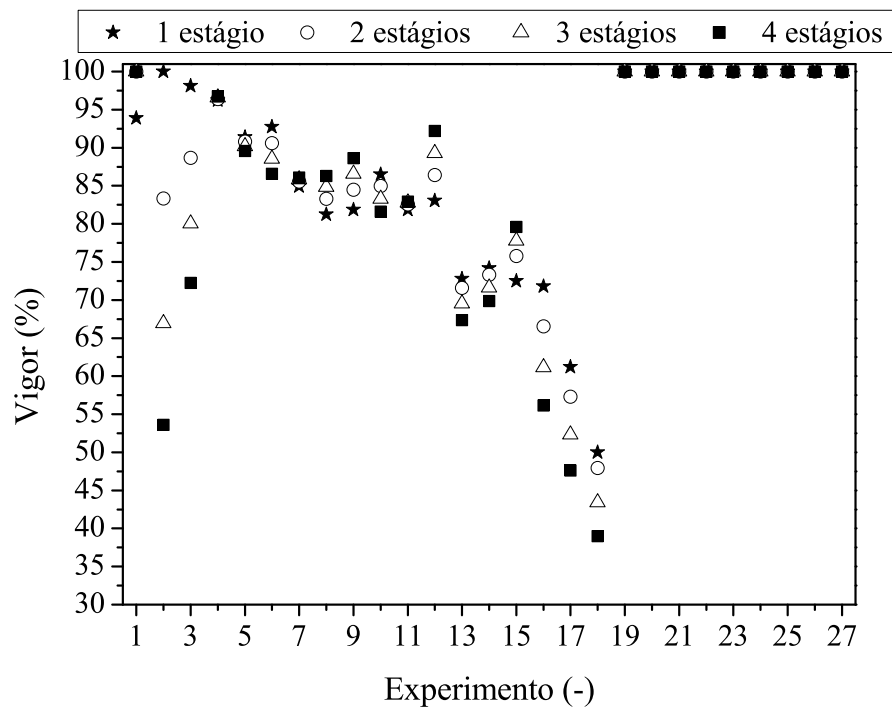


Figura 5.14: Equação do índice de vigor sem a variação com o tamanho do leito.

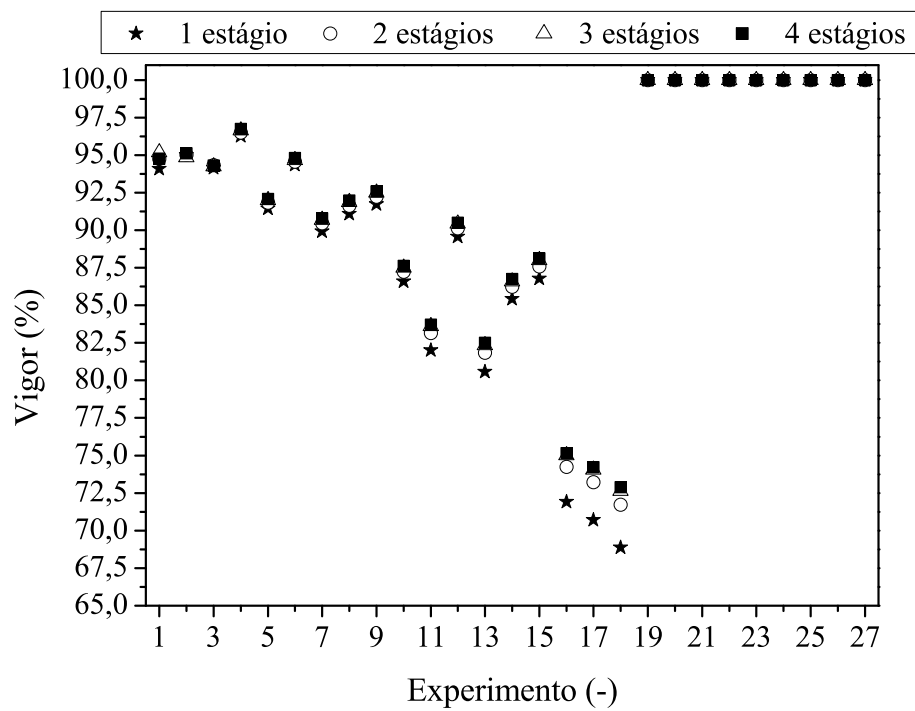


Figura 5.15: Equação do índice de vigor com a variação com o tamanho do leito.

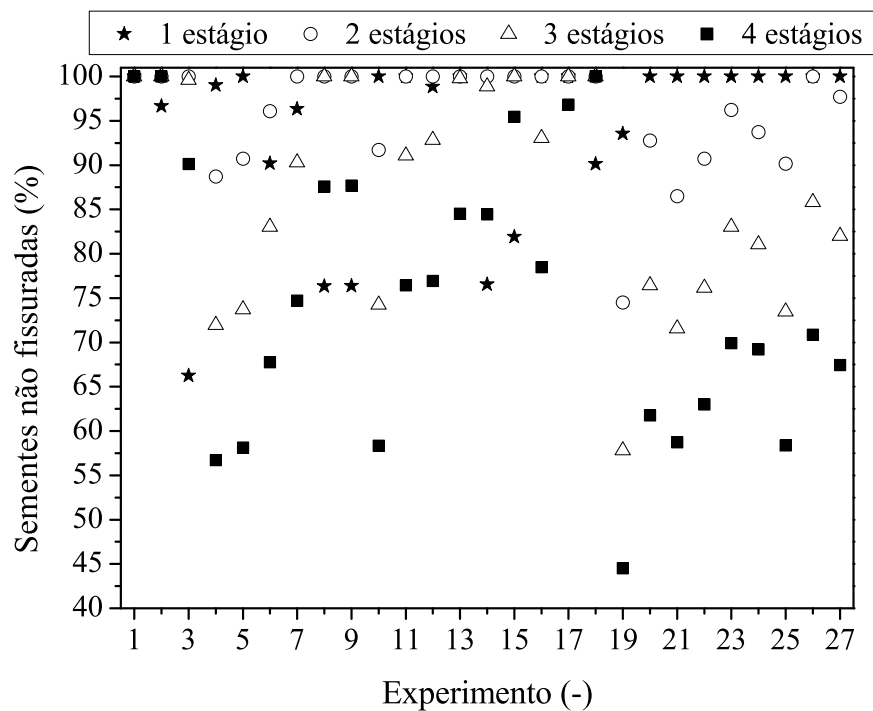


Figura 5.16: Equação do índice de sementes sem fissuras sem a variação com o tamanho do leito.

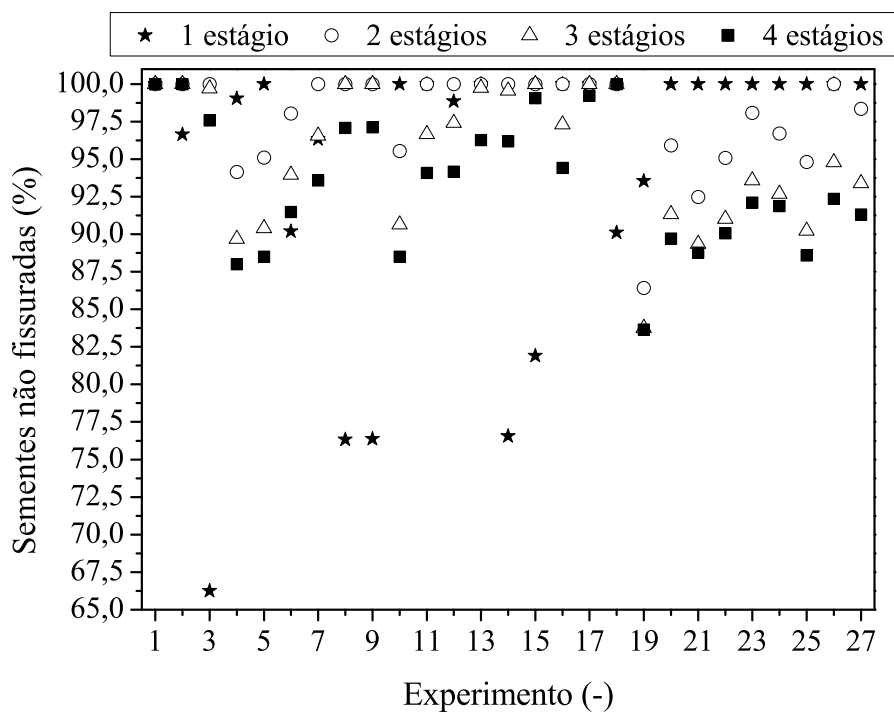


Figura 5.17: Equação do índice de sementes sem fissuras com a variação com o tamanho do leito.

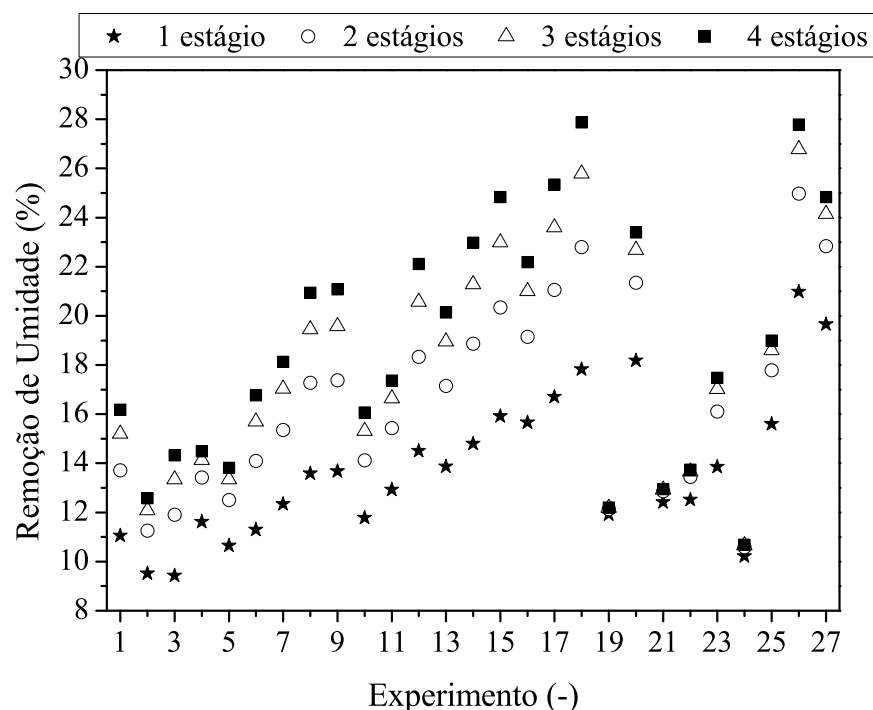


Figura 5.18: Remoção de umidade para o escoamento concorrente.

As Figuras (5.16) e (5.17) apresentam os resultados do índice de fissuras. Sem alterar a equação com o comprimento, observa-se para este índice que ocorre uma redução mais acentuada com o aumento do número de estágios, chegando até níveis de 45%. Alterando as equações, os resultados mostram que os valores de sementes sem fissuras aumentaram de acordo com o número de estágios para acima de 82%.

Os resultados de remoção de umidade são apresentados na Figura (5.18). Verifica-se que os valores aumentaram de acordo com o número de estágios, passando de 9% para até 28%. Pode-se concluir, com estes resultados que a divisão do comprimento do leito deslizante com escoamento concorrente, influencia nos índices de qualidade de forma satisfatória e no desempenho de secagem com maior efeito.

A divisão do leito em estágios, mantém a temperatura e a umidade do ar de secagem em níveis mais altos, pelo ar novo adicionado em cada seção ter as mesmas condições, porém as sementes se mantêm nestas condições em períodos menores, pois o comprimento do leito foi alterado. A alteração do fluxo mássico de ar, influencia na velocidade do ar de entrada a partir da sua divisão com o número de estágios, proporcionando valores mais baixos para esta variável. De acordo com as superfícies de resposta, foi verificado que umidade relativa alta propicia melhores índices de qualidade, assim como menores valores de velocidade do ar.

### 5.2.2 Perfis de Temperatura e Umidade do Escoamento Concorrente

Nesta seção são apresentados os perfis de temperatura e umidade do sólido e do fluido. As Figuras (5.19) e (5.20) mostram os perfis dos experimentos 8 e 15, respectivamente, para o secador de leito deslizante com 1, 2, 3 e 4 estágios. Pode ser observado nesses dois experimentos, a maior redução do teor de umidade das sementes.

A divisão em estágios, ocasiona um aumento gradativo da temperatura das sementes ao longo do comprimento total do secador, fato verificado no perfil de temperatura dos sólidos. De acordo com as características do secador com escoamento concorrente, citadas no Capítulo 2, como maior aproveitamento do calor transferido pelo gás, resultando em um produto com temperatura relativamente baixa, porém, menores taxas de transferência de umidade, são contornadas a partir do secador de múltiplos estágios. Esta divisão gera sementes de soja com temperatura ainda menores ao final da secagem, diminuindo o efeito da temperatura do ar de secagem na qualidade das sementes e, ainda assim, aumenta a remoção de umidade.

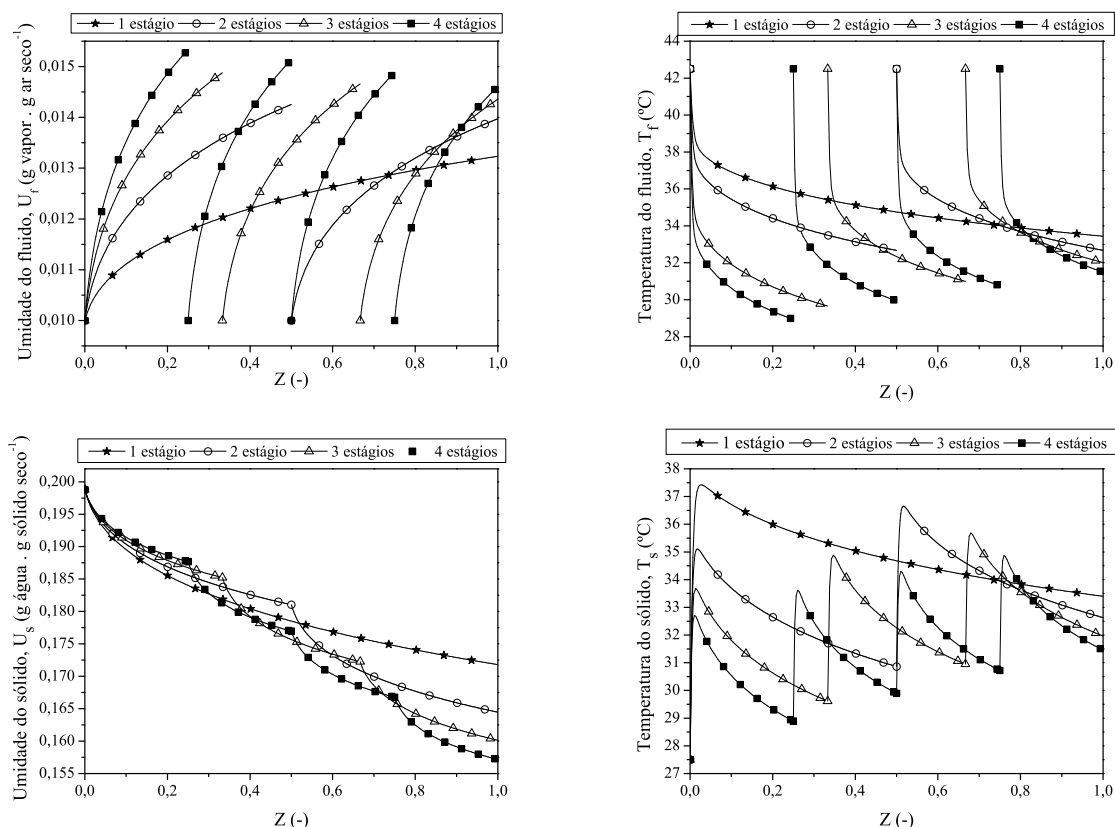


Figura 5.19: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 8.

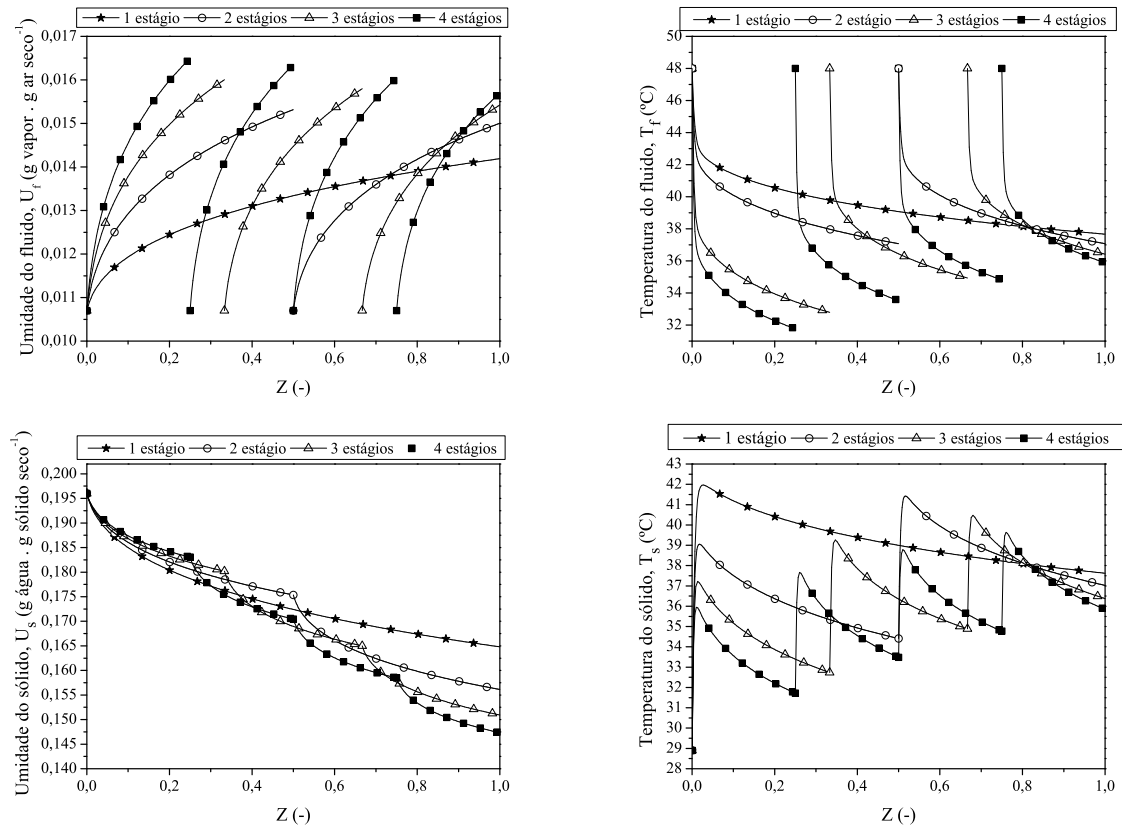


Figura 5.20: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 15.

### 5.2.3 Escoamento Contracorrente

As Figuras (5.21) e (5.22) apresentam os resultados do índice de germinação para os dois casos: com a equação obtida por Souza (2001) (sem alterar a equação com o tamanho do leito) e com a modificação da equação de acordo com as análises estatísticas apresentadas na seção anterior. Observa-se para este índice que alterando as equações, melhores valores são obtidos, comparando o secador de 1 estágio com o de 4 estágios. Verifica-se que os valores de germinação ficaram sempre acima de 88%, porém não houve alteração significativa comparando os secadores de múltiplos estágios.

As Figuras (5.23) e (5.23) apresentam os resultados do índice de vigor. Sem alterar a equação com o comprimento, observa-se para este índice que ocorre uma redução mais acentuada com o aumento do número de estágios, chegando até níveis de 10%. Alterando as equações, os resultados mostram que os valores de vigor aumentaram de acordo com o número de estágios para acima de 65%.

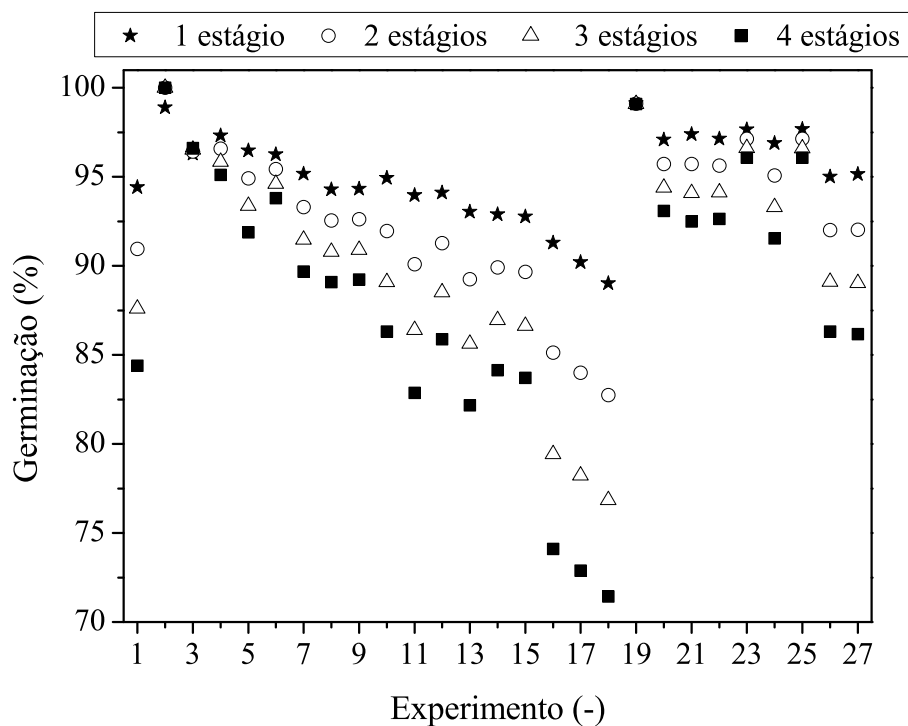


Figura 5.21: Equação do índice de germinação sem a variação com o tamanho do leito.

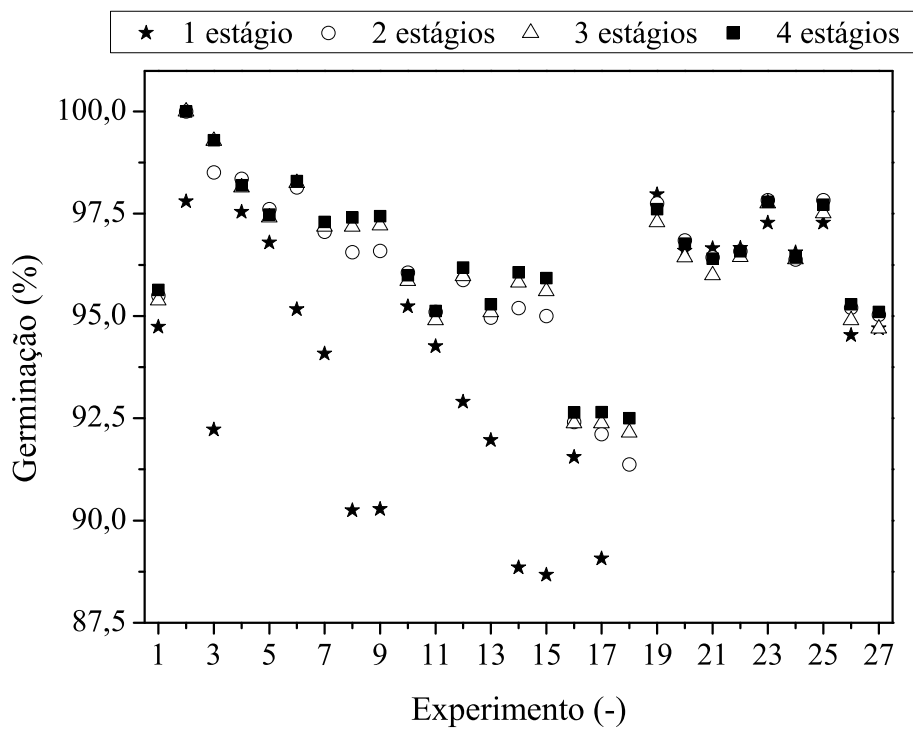


Figura 5.22: Equação do índice de germinação com a variação com o tamanho do leito.

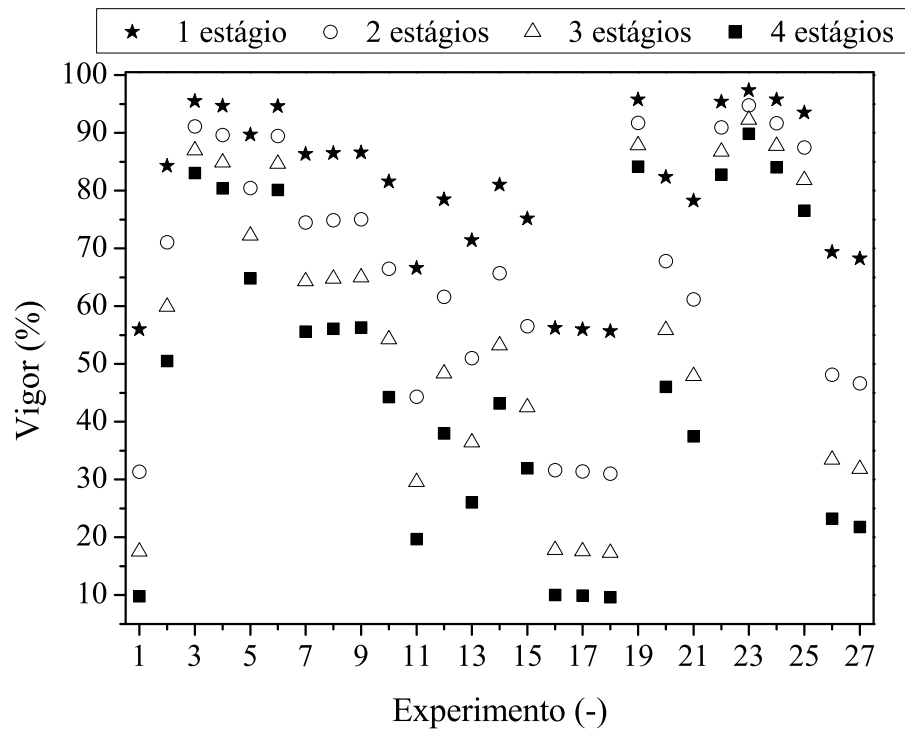


Figura 5.23: Equação do índice de vigor sem a variação com o tamanho do leito.

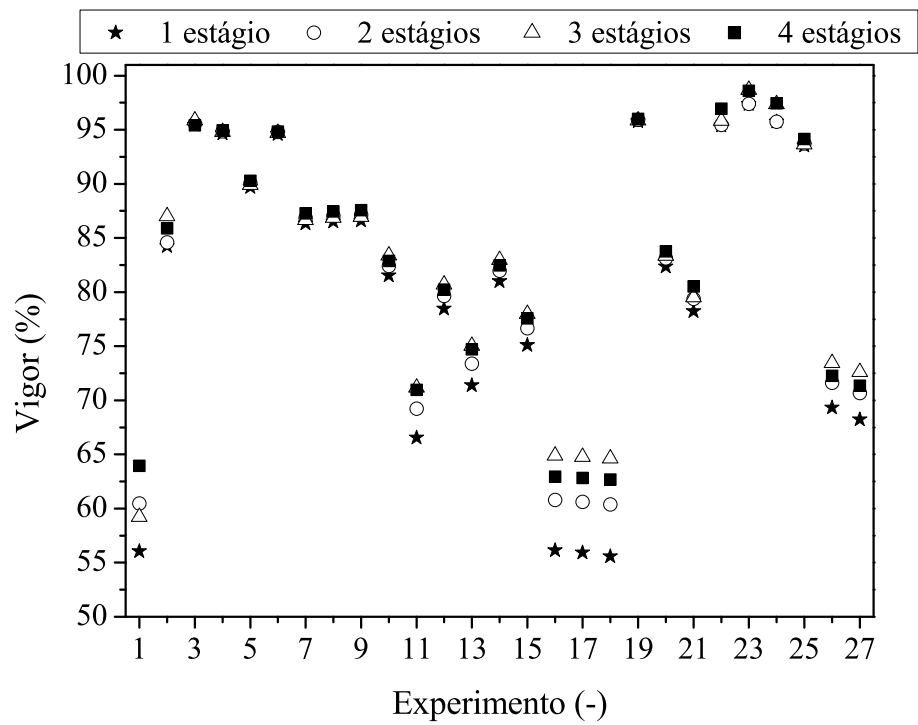


Figura 5.24: Equação do índice de vigor com a variação com o tamanho do leito.

Os resultados de remoção de umidade são apresentados na Figura (5.25). Verifica-se que os valores aumentaram de acordo com o número de estágios, para cerca de 70% dos experimentos analisados, atingindo até 19% de remoção. Em alguns casos, o aumento da remoção passou de 100%. Pode-se concluir, com estes resultados que a divisão do comprimento do leito deslizante com escoamento contracorrente, influencia no desempenho de secagem.

As Figuras (5.26) e (5.27) apresentam os resultados do índice de fissuras. Sem alterar a equação com o comprimento, observa-se para este índice que ocorre uma redução mais acentuada com o aumento do número de estágios, chegando até níveis de 35%. Alterando as equações, os resultados mostram que os valores de sementes sem fissuras aumentaram de acordo com o número de estágios para acima de 78%.

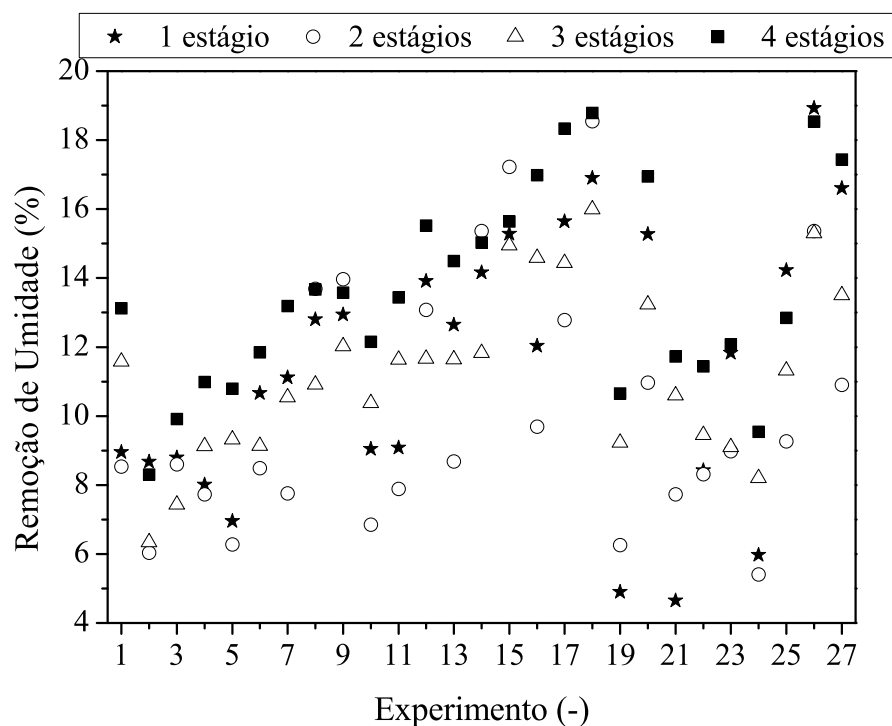


Figura 5.25: Remoção de umidade para o escoamento contracorrente.

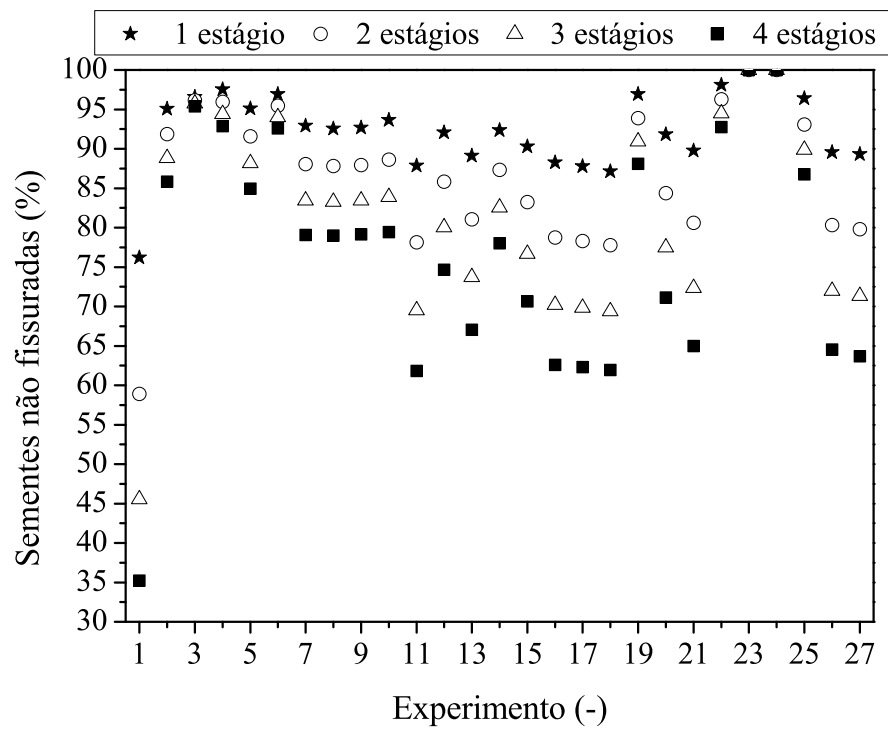


Figura 5.26: Equação do índice de sementes sem fissuras sem a variação com o tamanho do leito.

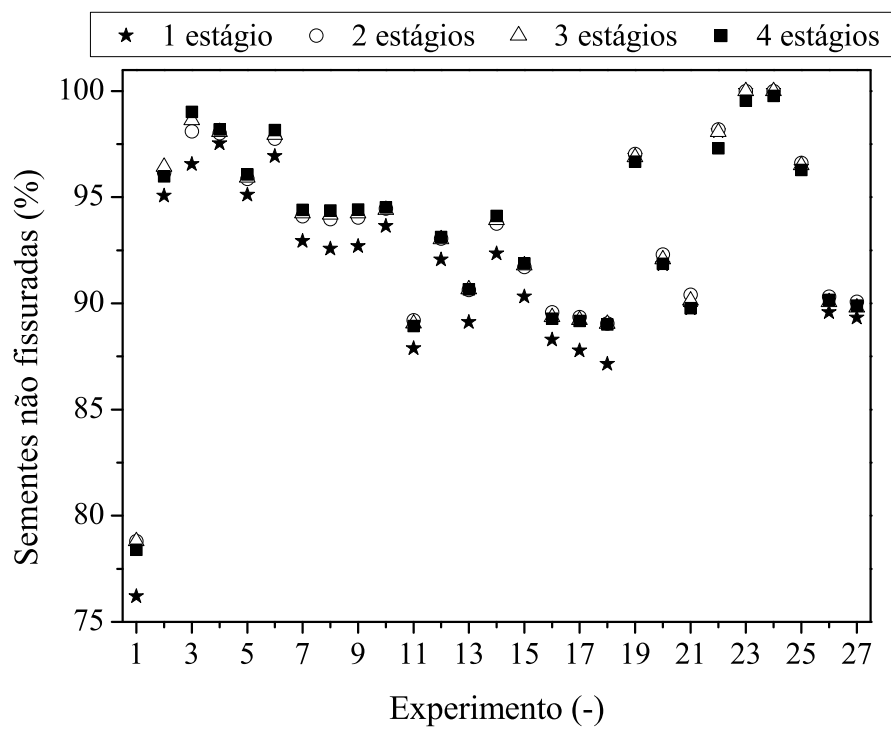


Figura 5.27: Equação do índice de sementes sem fissuras com a variação com o tamanho do leito.

### 5.2.4 Perfis de Temperatura e Umidade do Escoamento Contracorrente

As Figuras (5.28) e (5.29) mostram os perfis dos experimentos 1 e 5, respectivamente, para o secador de leito deslizante com 1, 2, 3 e 4 estágios. Pode ser observado nesses dois experimentos, a maior redução do teor de umidade das sementes.

São verificadas no experimento 1, temperatura de saída das sementes iguais a  $28^{\circ}\text{C}$ , para os secadores de múltiplos estágios, enquanto que para o experimento 5, são verificadas temperaturas de  $31^{\circ}\text{C}$  para o secador de 4 estágios e de  $35^{\circ}\text{C}$  para o secador de 2 estágios. Para o secador de 1 estágio, as sementes atingem temperaturas de  $37^{\circ}\text{C}$  e  $42^{\circ}\text{C}$ , para os experimentos 1 e 5, respectivamente.

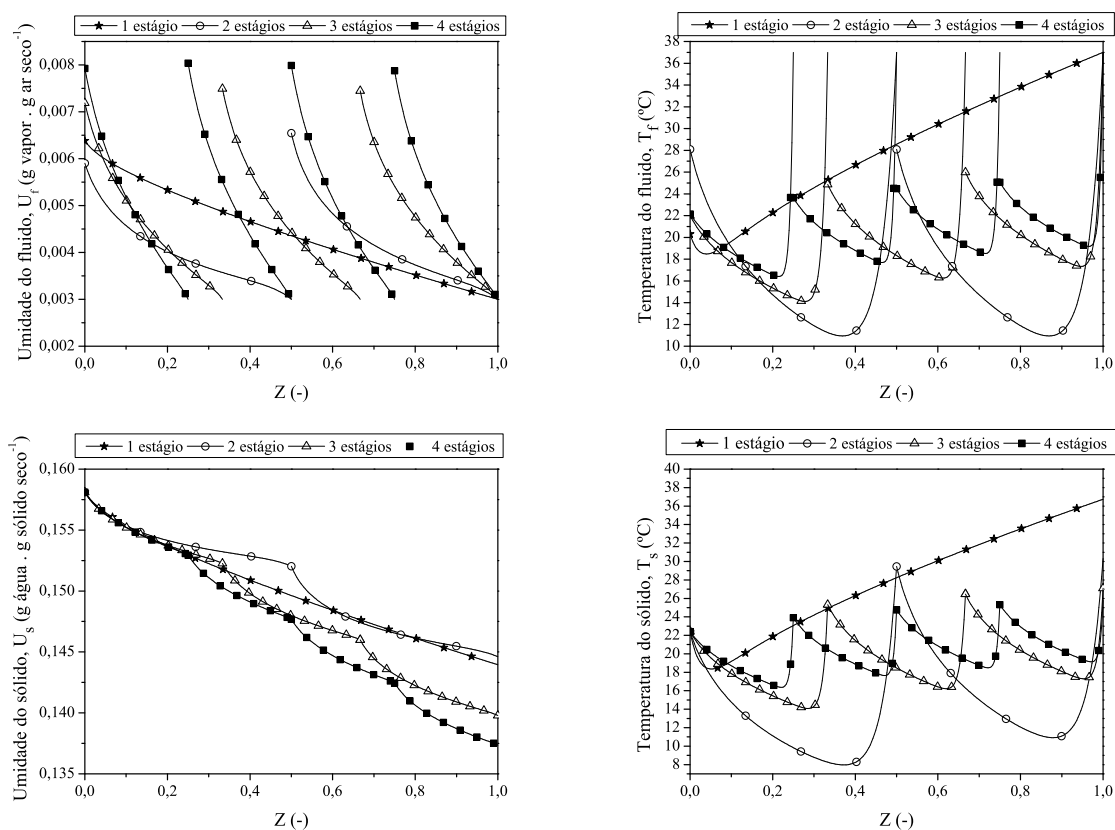


Figura 5.28: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 1.

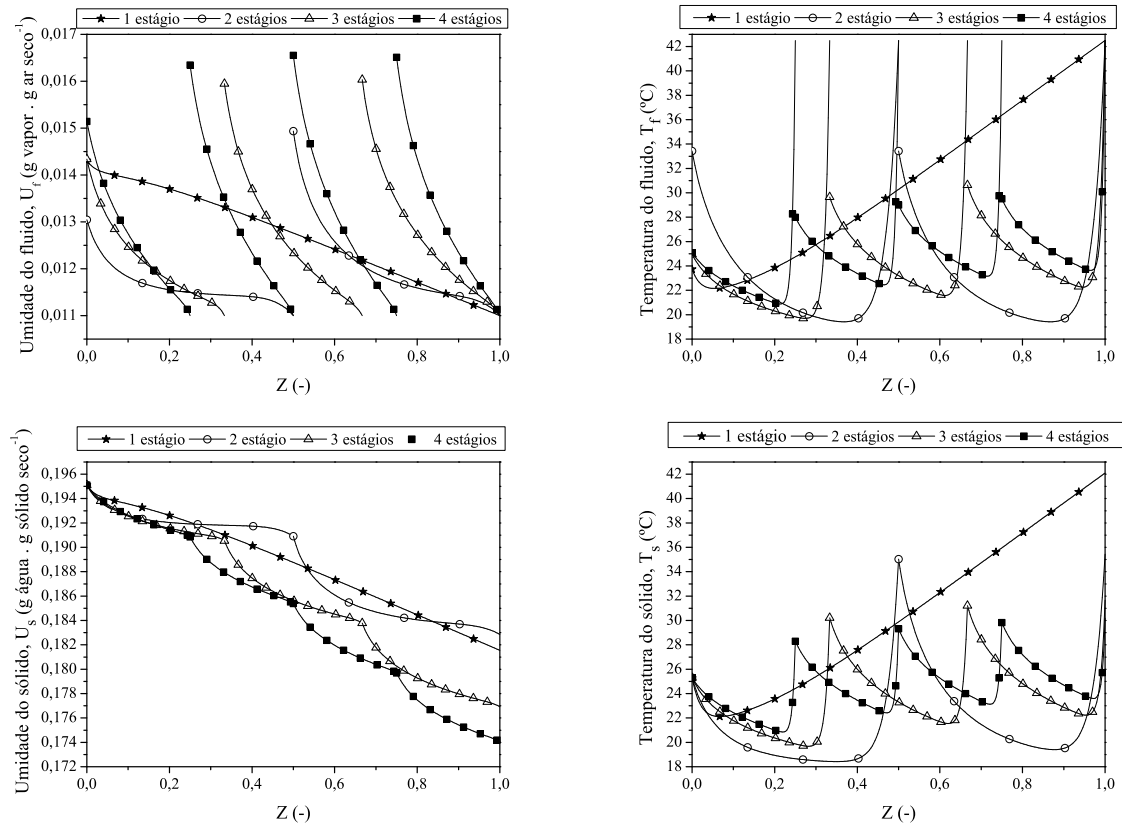


Figura 5.29: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 5.

Conforme observado para o escoamento concorrente, a divisão em estágios, ocasiona um aumento gradativo da temperatura das sementes ao longo do comprimento total do secador, fato verificado no perfil de temperatura dos sólidos. De acordo com as características do secador com escoamento contracorrente, citadas no Capítulo 2, o produto sai do secador com temperatura alta e maiores taxas de transferência de umidade comparadas com escoamento concorrente são atingidas. Estas características do secador de um estágio são alteradas com a divisão em estágios; gerando produtos com temperatura menores ao final da secagem, diminuindo o efeito da temperatura do ar de secagem na qualidade das sementes e, ainda assim, com taxas de remoção de umidade maiores do que as do secador de 1 estágio.

## 5.3 Otimização

Nesta seção são apresentados os resultados da otimização das condições operacionais através do algoritmo de Evolução Diferencial. A otimização se baseou em dois estudos: maximizar os índices de qualidade e maximizar a remoção de umidade com os índices de qualidade atuando como restrições. As formulações das funções objetivo

são apresentadas a seguir:

- Função Objetivo: maximizar os índices de qualidade.

$$J = (I_G + I_V + I_F)$$

sendo  $I$ , o índice de qualidade (germinação, vigor e sementes sem fissuras).

- Função Objetivo: maximizar a remoção de umidade.

$$J = \text{Remoção} + \text{penalidade}$$

$$\text{restrição(1): } 80 \leq I_G \leq 100$$

$$\text{restrição(2): } 80 \leq I_V \leq 100$$

$$\text{restrição(3): } 80 \leq I_F \leq 100$$

O limite inferior da região de busca é 80% para todas as restrições, por este valor ser aceitável para os índices de qualidade. Para os testes foram utilizados os seguintes parâmetros de configuração do otimizador:

- Número de membros da população:  $NP = 15$ ;
- Número máximo de iterações (gerações):  $itermax = 25$ ;
- Taxa de perturbação:  $F = 0.8$ ;
- Probabilidade de cruzamento:  $CR = 0.8$ ;
- Mecanismo de mutação: estratégia = 7.

Com estes parâmetros, o número de avaliações da função objetivo é igual a 390. Para o escoamento concorrente, as variáveis operacionais possuíam as seguintes faixas de validade:

- Velocidade do ar:  $1,5 \text{ m s}^{-1} < v < 2,74 \text{ m s}^{-1}$
- Temperatura do ar de entrada:  $39,1^\circ\text{C} < T_{f0} < 56,9^\circ\text{C}$
- Vazão de sólidos:  $50,3 \text{ g min}^{-1} < Q_s < 109,7 \text{ g min}^{-1}$
- Umidade relativa do ar de entrada:  $20,6\% < UR < 29,4\%$

Para o escoamento contracorrente, as faixas de validade das variáveis de otimização são:

- Velocidade do ar:  $0,7 \text{ m s}^{-1} < v_f < 2,5 \text{ m s}^{-1}$
- Temperatura do ar de entrada:  $35^\circ\text{C} < T_{f0} < 53^\circ\text{C}$
- Vazão de sólidos:  $34,0 \text{ g min}^{-1} < Q_s < 58,0 \text{ g min}^{-1}$
- Umidade relativa do ar de entrada:  $20,5\% < UR < 29,4\%$

A seguir são apresentados os resultados do estudo de otimização para o secador com escoamento concorrente e contracorrente de 1 e múltiplos estágios, para as duas funções objetivo já citadas.

### 5.3.1 Maximização dos Índices de Qualidade

#### Escoamento Concorrente

##### Único estágio

As Figuras (5.30) e (5.31) mostram os resultados do índice de germinação e vigor para os 27 experimentos realizados, comparando a simulação com a otimização do modelo. Verifica-se com a maximização dos índices de qualidade, que para todos os experimentos, os índices germinação e de vigor atingiram o valor máximo, assim como, os resultados do índice de sementes sem fissuras, apresentados na Figura (5.32).

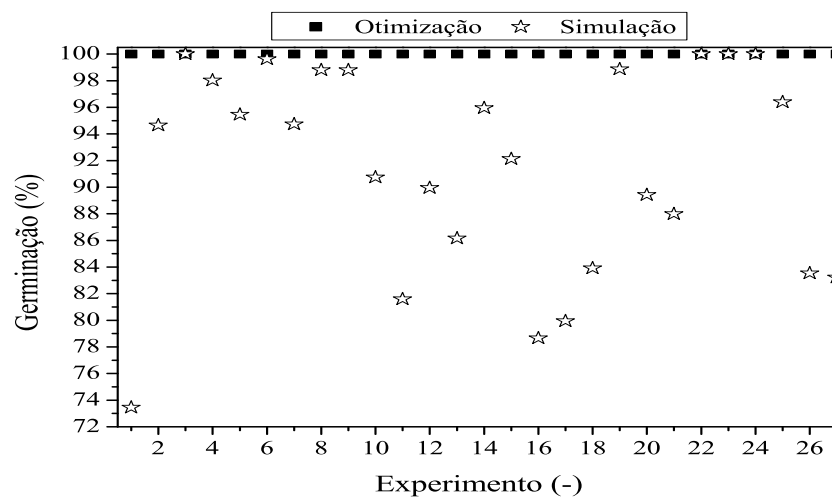


Figura 5.30: Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade.

Os resultados da remoção de umidade (Figura 5.33), mostram que na maximização da qualidade, a remoção atinge valores inferiores em relação aos valores de simulação.

Essas observações já eram esperadas, pois os melhores índices de qualidade são obtidos em condições de secagem mais amenas, como vazão de sólidos, temperatura e velocidade do fluido inferiores e umidade relativa do ar de secagem maiores do que os dados da simulação. As condições operacionais obtidas pela técnica de Evolução Diferencial são apresentadas na Tabela D.1, para a simulação e otimização.

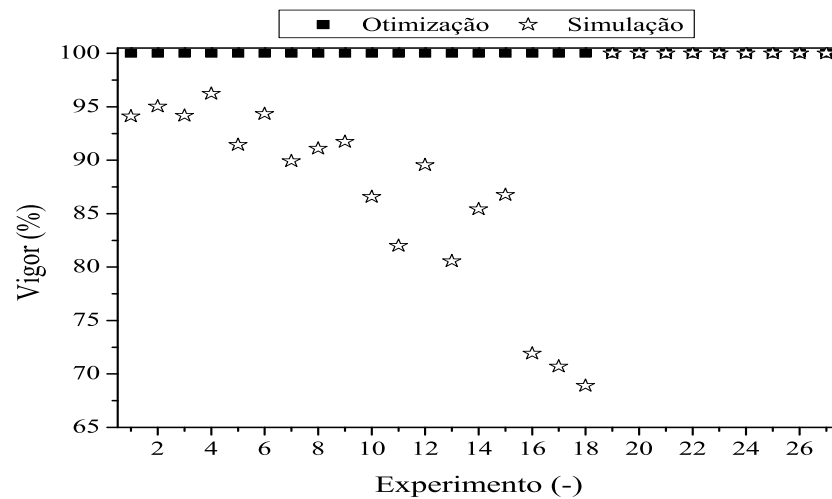


Figura 5.31: Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade.

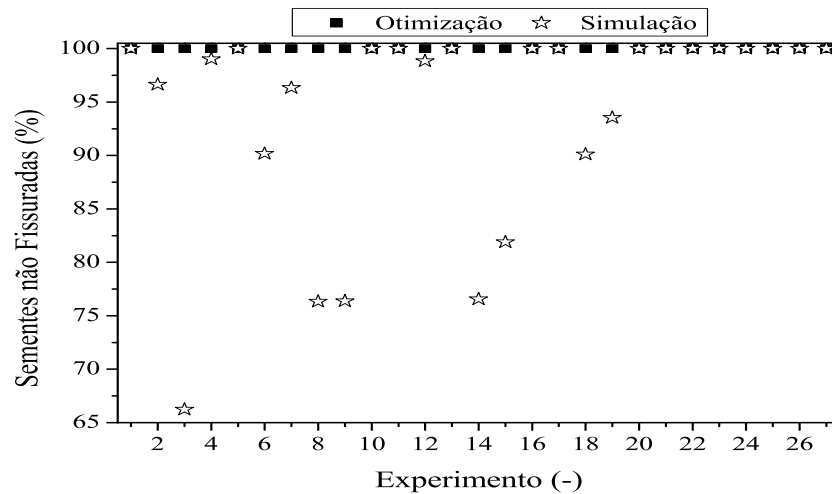


Figura 5.32: Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade.

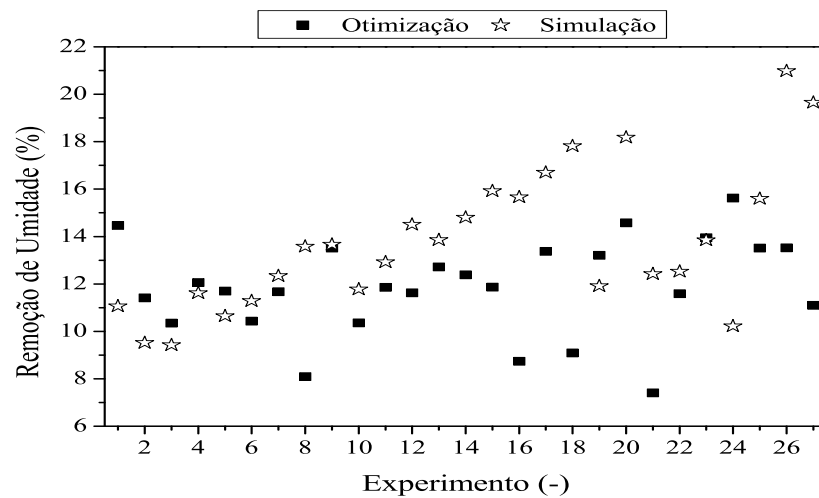


Figura 5.33: Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade.

### Múltiplos estágios

Para a otimização de um secador de múltiplos estágios, foi observado que o objetivo de se atingir valores ótimos para os índices de qualidade já haviam sido atingido para o secador de único estágio, portanto, os valores apresentados na seção anterior não foram alterados, conforme descrito na Tabela D.2, que apresenta as condições operacionais obtidas pela técnica de Evolução Diferencial, para a simulação e otimização.

## Escoamento Contracorrente

### Único estágio

As Figuras (5.34) e (5.35) mostram os resultados do índice de germinação e vigor, comparando a simulação com a otimização do modelo. Verifica-se com a maximização dos índices de qualidade, que para todos os experimentos, os índices germinação e de vigor atingiram valores superiores a 98%, assim como, para o índice de sementes sem fissuras, apresentados na Figura (5.36). As condições otimizadas demonstram que valores menores de vazão de sólidos e velocidade do ar conduzem a melhores índices, conforme apresentado nas superfícies de resposta.

Os resultados da remoção de umidade (Figura 5.37), mostram que na maximização da qualidade, a remoção atinge valores superiores em relação aos valores de simulação, para 75% dos casos estudados. As condições operacionais obtidas pela técnica de Evolução Diferencial são apresentadas na Tabela D.3, para a simulação e otimização.

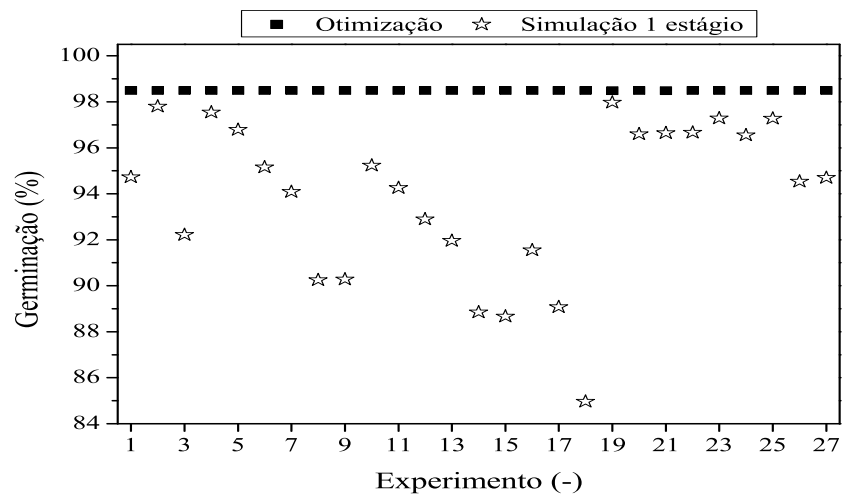


Figura 5.34: Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade.

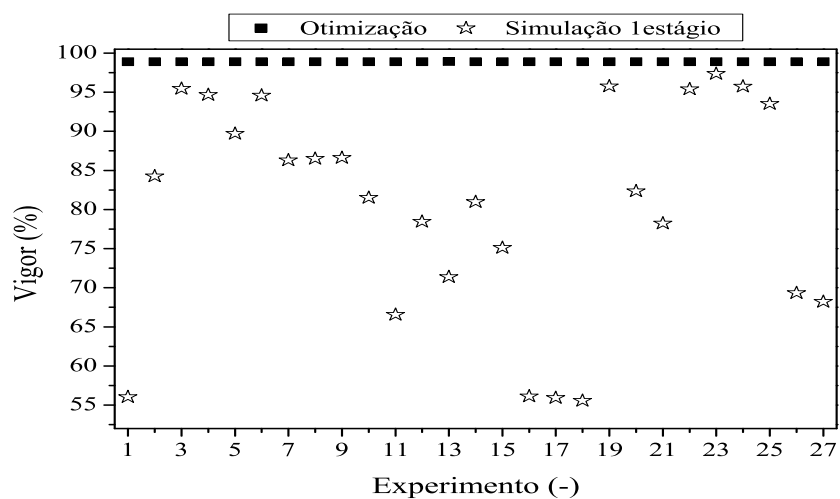


Figura 5.35: Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade.

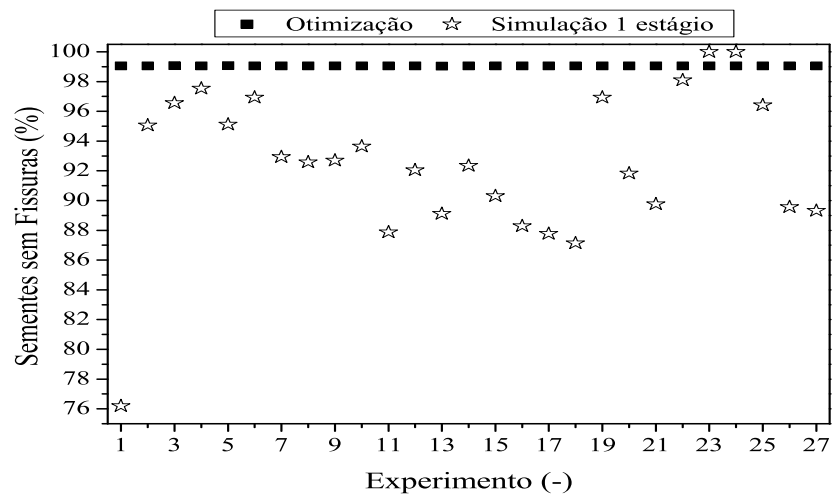


Figura 5.36: Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade.

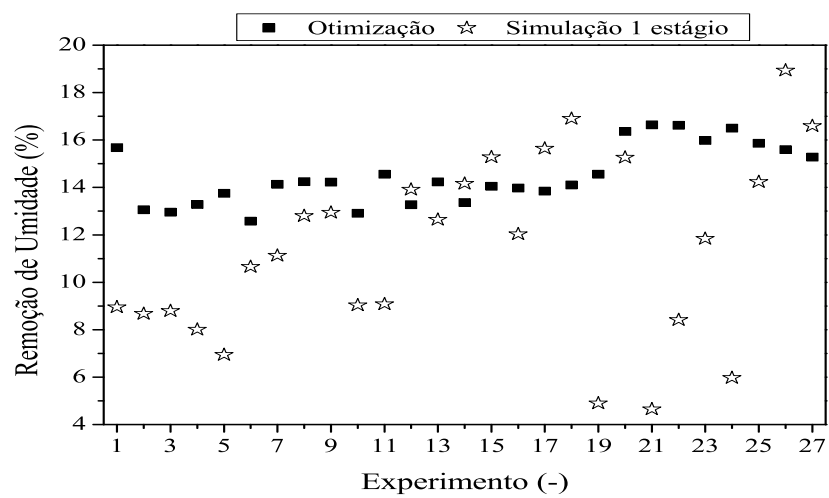


Figura 5.37: Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização dos índices de qualidade.

### Múltiplos estágios

Para a otimização de um secador de múltiplos estágios com escoamento contracorrente, foi verificado que os índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras mantiveram sem valores conforme a simulação de 1 estágio (Figuras 5.38, 5.39, 5.40). Pode ser observado na Tabela D.4, que apesar dos índices obtidos serem os mesmos obtidos durante a otimização de 1 estágio, as condições operacionais e o número de estágios foram diferentes, o que contribuiu para a melhoria dos valores de remoção de umidade (Figura 5.41). A remoção atingiu valores superiores a 16%, chegando a ser 100% maior para o experimento 24, quando comparado com o secador de 1 estágio.

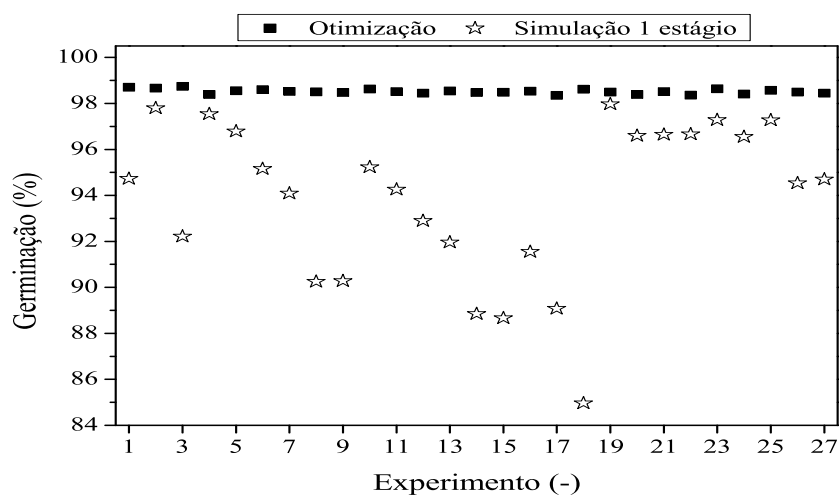


Figura 5.38: Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização dos índices de qualidade.

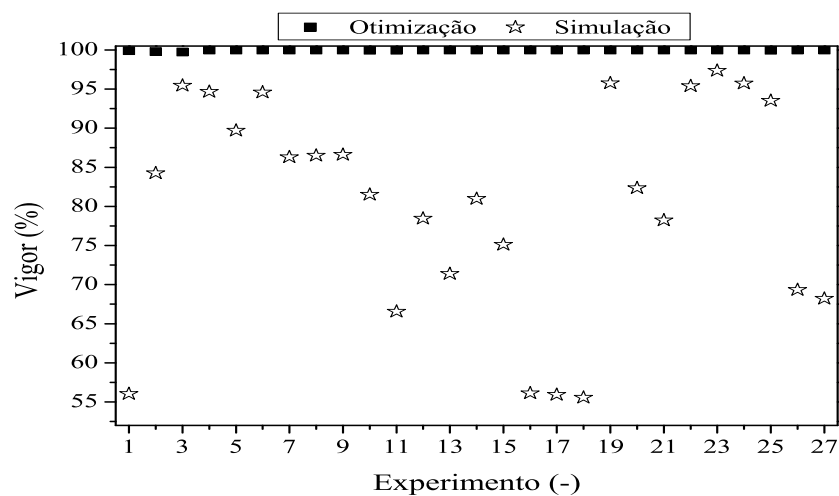


Figura 5.39: Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização dos índices de qualidade.

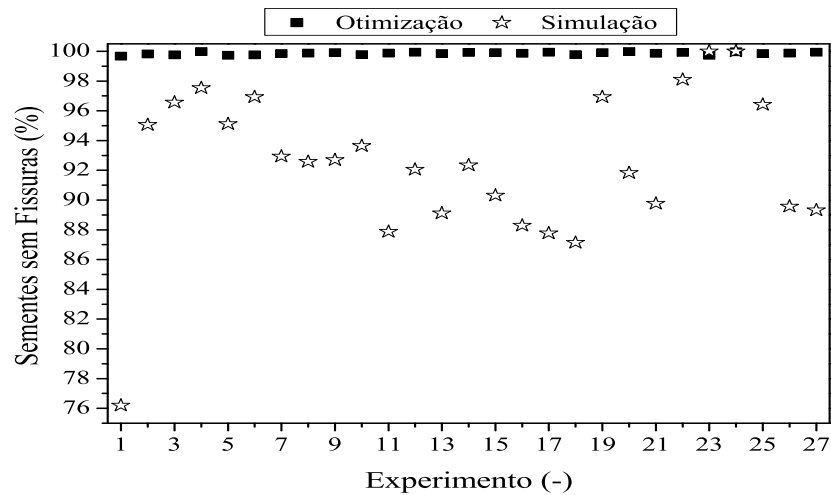


Figura 5.40: Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização dos índices de qualidade.

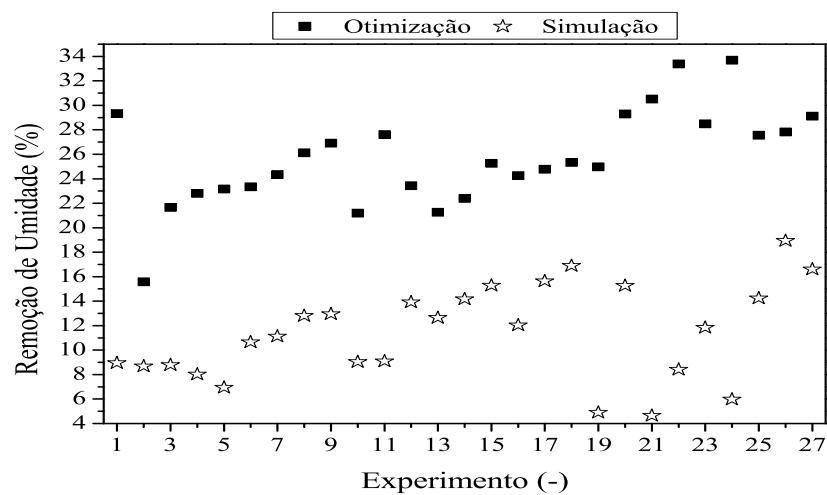


Figura 5.41: Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização dos índices de qualidade.

### 5.3.2 Maximização da Remoção de Umidade

#### Escoamento Concorrente

##### Único estágio

Os resultados do índice de germinação, vigor e de sementes sem fissuras, são apresentados nas Figuras (5.42, 5.43 e 5.44). Estes gráficos mostram que 78% dos 27

experimentos realizados, apresentaram índice de germinação superiores aos da simulação, com valores acima de 96%; índice de vigor acima de 85% e índice de sementes sem fissuras acima de 95%.

Os resultados da remoção de umidade (Figura 5.45), mostram que na maximização da remoção de umidade, houve um aumento significativo para os 27 experimentos, sendo que a remoção ficou acima de 19% para todos os experimentos. Observa-se que para alguns casos o aumento foi de 140%, comparando os resultados simulados com os otimizados. Essas observações, diferentemente da maximização da qualidade, geram condições de secagem que afetam a qualidade das sementes. Para evitar o abaixamento significativo dos índices de qualidade, as restrições foram impostas para que atingissem no mínimo valores de 80%, que são valores aceitáveis para a qualidade. Desta forma, com a técnica de Evolução Diferencial, a maximização da remoção de umidade das sementes foi atingida, mantendo os índices de qualidade em níveis satisfatórios para todos os experimentos realizados.

As condições operacionais obtidas pela técnica de Evolução Diferencial são apresentadas na Tabela D.5, para a simulação e otimização. Pode ser percebido que, valores maiores de temperatura do ar, seguido da redução da vazão dos sólidos e da velocidade do ar, com umidade relativa do ar de secagem superior aos dados da simulação, resultaram em condições ótimas de secagem.

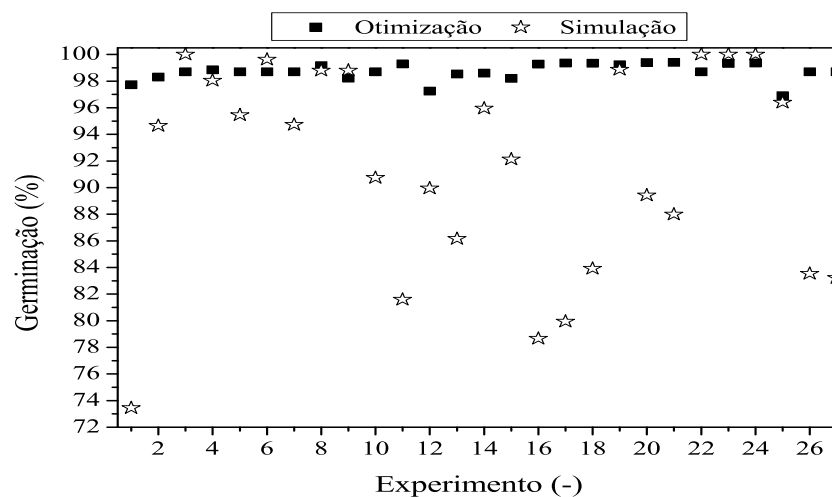


Figura 5.42: Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade.

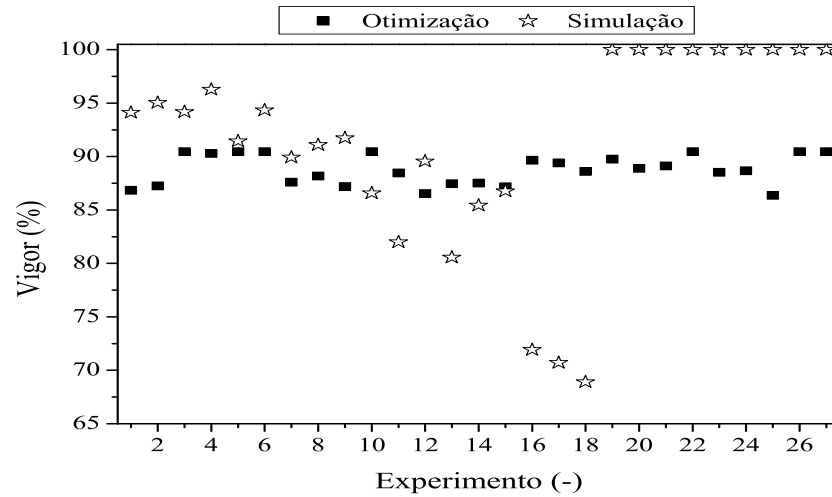


Figura 5.43: Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade.

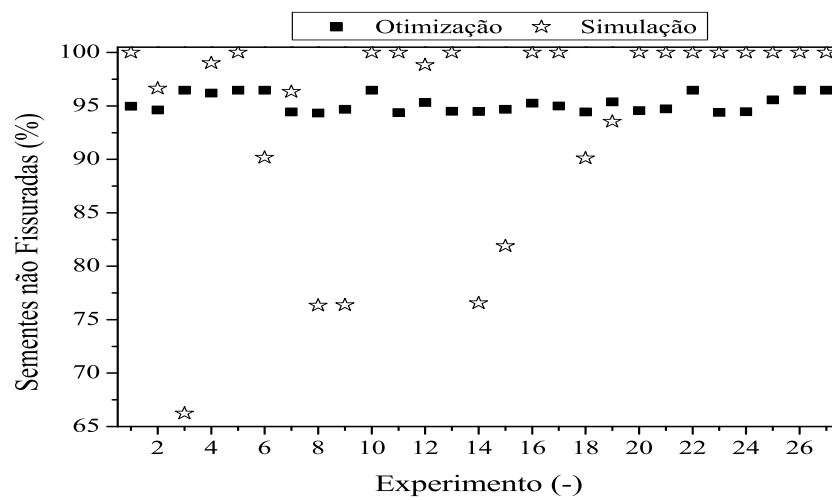


Figura 5.44: Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade.

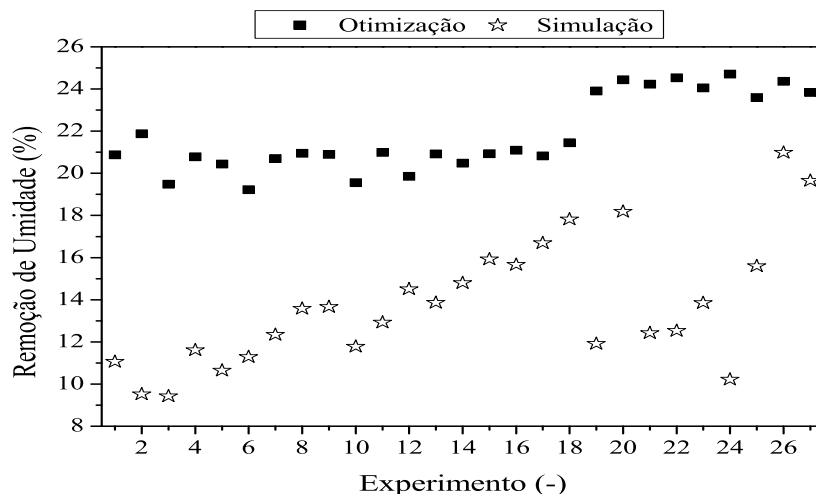


Figura 5.45: Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento concorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade.

### Múltiplos estágios

Os resultados para o secador concorrente de múltiplos estágios (Tabela D.5) mostram que houve alteração na umidade relativa e no número de estágios, quando comparado com a Tabela D.4. Estes valores contribuíram para o aumento da remoção de umidade, já que a técnica de se dividir o leito em estágios aumenta significativamente esta variável. Os resultados dos índices de qualidade se mantiveram conforme os resultados para o secador de único estágio. Os resultados da remoção de umidade (Figura 5.46), mostram que na maximização da qualidade, a remoção atinge valores acima de 32%, com diferenças significativas em relação aos valores de simulação.

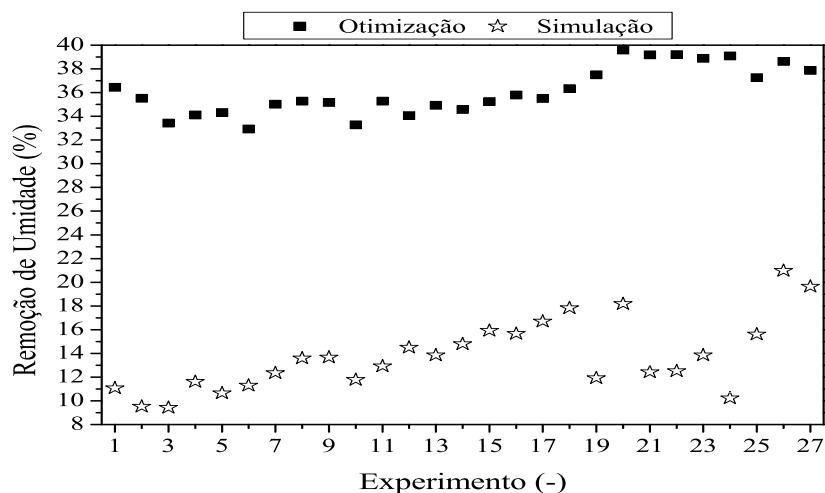


Figura 5.46: Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento concorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade.

### Escoamento Contracorrente

#### Único estágio

As Figuras (5.47) e (5.48) mostram os resultados do índice de germinação e vigor para os 27 experimentos realizados, comparando a simulação com a otimização do modelo. Verifica-se com a maximização da remoção de umidade, que para todos os experimentos, o índice de germinação atingiu a restrição no limite inferior, 80%, para todos os experimentos e o índice de vigor, valores acima de 95% para todos os experimentos, assim como os resultados do índice de sementes sem fissuras, apresentados na Figura (5.49).

Os resultados da remoção de umidade (Figura 5.50), mostram valores superiores a 22%. As condições operacionais obtidas pela técnica de Evolução Diferencial são apresentadas na Tabela D.7, para a simulação e otimização.

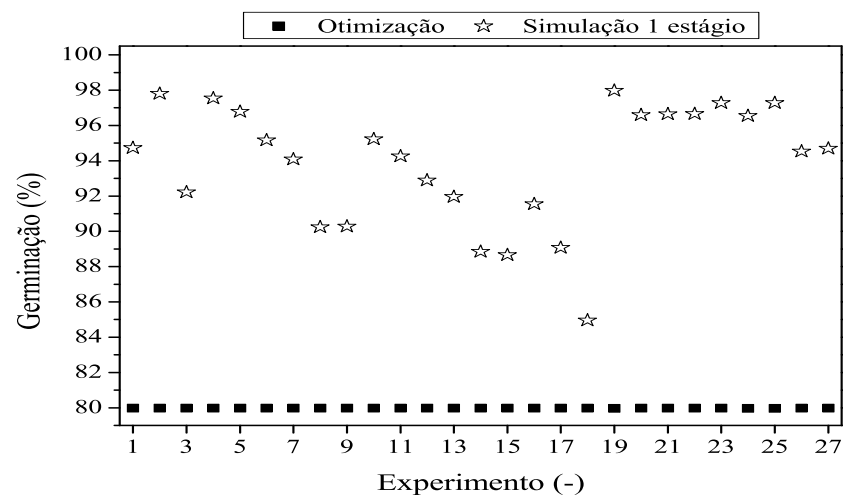


Figura 5.47: Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade.

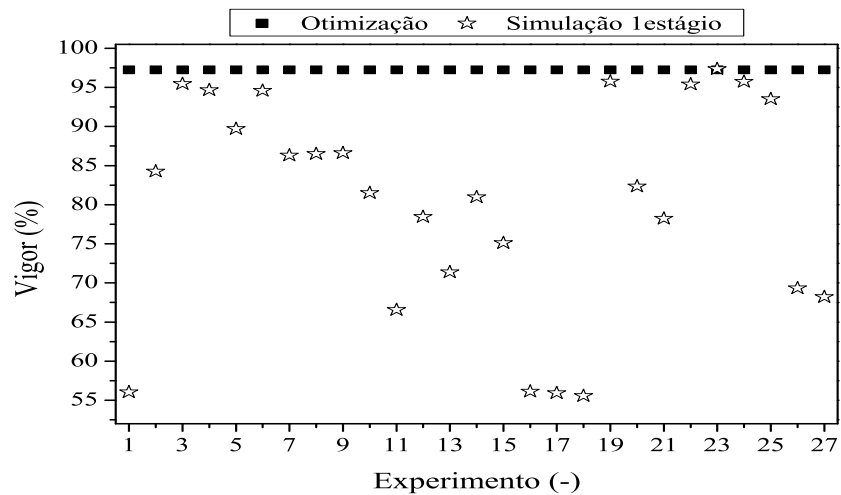


Figura 5.48: Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade.

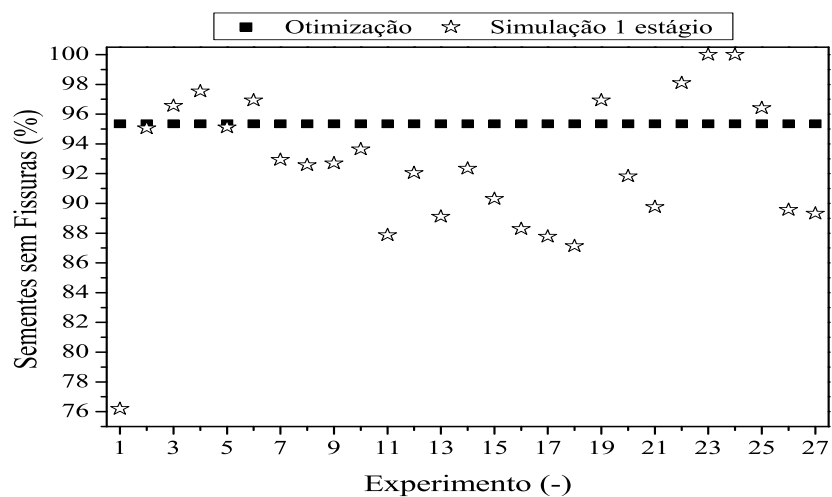


Figura 5.49: Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade.

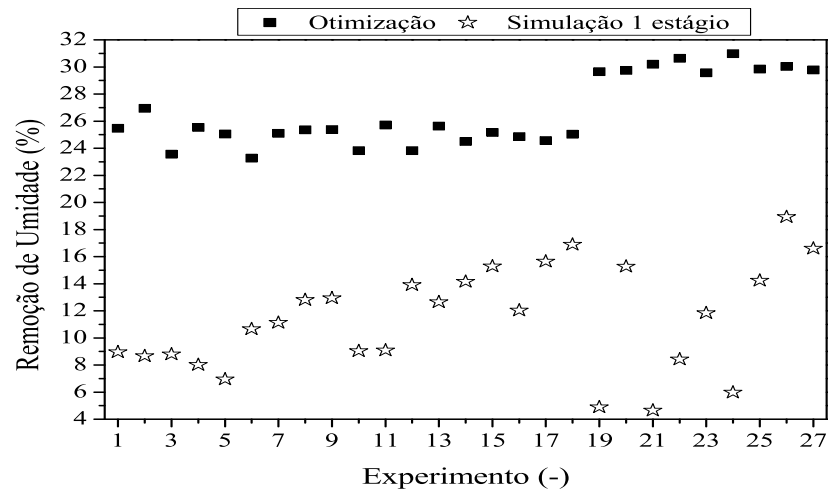


Figura 5.50: Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento contracorrente de 1 estágio - Maximização da remoção de umidade.

### Múltiplos estágios

Os resultados para o secador de múltiplos estágios são apresentados nas Figuras (5.51), (5.52) e (5.53), para os índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras, respectivamente. Os resultados mostram que com a divisão do leito em estágios, houve um aumento do índice de germinação, porém uma redução do índice de vigor, quando comparado ao secador de único estágio.

Os resultados da remoção de umidade (Figura 5.54), mostram que a remoção atinge valores superiores a 45%, acima dos valores ótimos conseguidos para o secador de único estágio. As condições operacionais obtidas pela técnica de Evolução Diferencial são apresentadas na Tabela D.8, para a simulação e otimização.

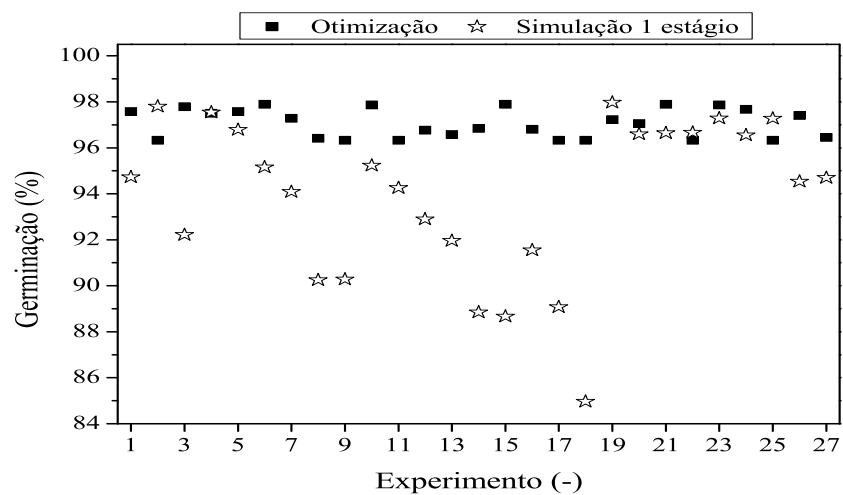


Figura 5.51: Resultados da otimização do índice de germinação para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade.

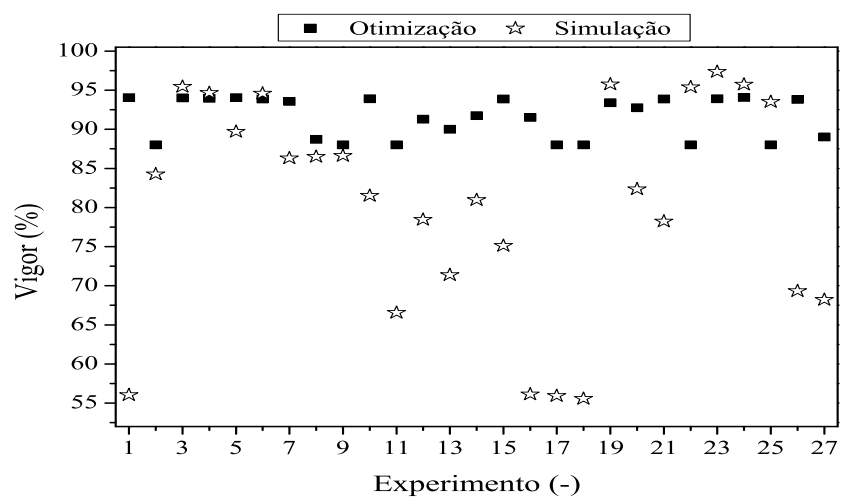


Figura 5.52: Resultados da otimização do índice de vigor para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade.

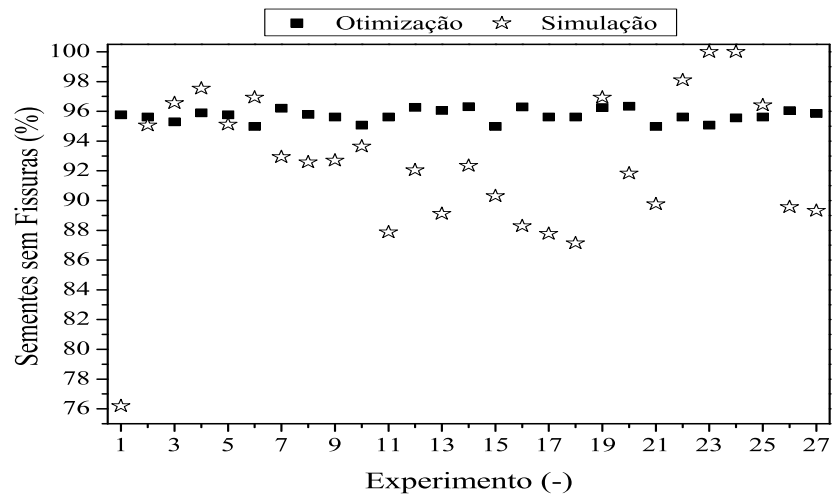


Figura 5.53: Resultados da otimização do índice de sementes sem fissuras para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade.

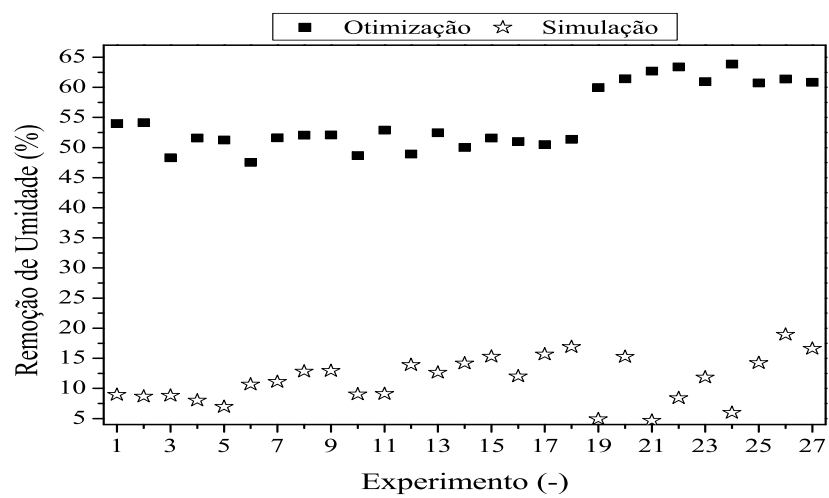


Figura 5.54: Resultados da otimização da remoção de umidade para o escoamento contracorrente de múltiplos estágios - Maximização da remoção de umidade.

## 5.4 Conclusões

Neste Capítulo foram apresentados os resultados referentes ao estudo da qualidade das sementes de soja, quanto aos índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras, e do desempenho de secagem. Os dados obtidos mostraram que a divisão do leito em estágios, gera índices satisfatórios e aumenta a remoção de umidade.

Para o escoamento concorrente, resultados da ordem de 70%, para a germinação e vigor; e 82% para o índice de sementes sem fissuras foram obtidos e se mostraram satisfatórios, aliados à remoção de umidade superior em relação ao aumento do número de estágios. Para o escoamento contracorrente, resultados da ordem de 92%, para a germinação, de 64% para o vigor e 77% para o índice de sementes sem fissuras foram obtidos.

No estudo da otimização do secador, através da técnica de leito deslizante, foi observado que para a função objetivo de maximização do índice de qualidade, as variáveis vazão de sólidos, temperatura e velocidade do fluido inferiores e umidade relativa do ar de secagem maiores do que os dados da simulação, resultaram em condições ótimas de secagem. Para a função objetivo de maximização da remoção de umidade, valores ótimos foram encontrados, ao se manter valores maiores de temperatura do ar, seguido da redução da vazão dos sólidos e da velocidade do ar, com umidade relativa do ar de secagem superior aos dados da simulação.

Por meio da técnica de evolução diferencial foi possível realizar a otimização do secador de leito deslizante com escoamento concorrente e contracorrente de um estágio e de múltiplos estágios, obtendo-se condições operacionais ótimas que maximizem os índices de qualidade ou a remoção de umidade. Por esse algoritmo, verifica-se que perfis de umidade e temperatura do sólido e do fluido podem ser obtidos a partir de simulações simples que geram informações para a construção e otimização de condições experimentais e de projetos de equipamentos.

---

---

# CAPÍTULO 6

---

## Conclusões e Sugestões

### 6.1 Conclusões

Esta tese teve como objetivos, analisar a modelagem, simulação e otimização da transferência de massa e energia entre o ar e sementes de soja em leito deslizante com escoamentos paralelos, buscando encontrar condições satisfatórias que promovam a manutenção da qualidade das sementes e melhores taxas de remoção de umidade. Além disso, a modelagem buscou ainda melhorar a concordância entre os modelos utilizados e os dados experimentais obtidos na literatura. Diante do contexto apresentado, e dos resultados obtidos, a seguir são apresentadas as conclusões.

A modelagem matemática generalizada para a obtenção de 5 modelos, que propunham a variação das propriedades físico-químicas ( $C_{pf}$ ,  $C_{pv}$ ,  $C_{pl}$  e  $C_{ps}$ ) constantes ou não, variação da porosidade do leito e do perfil de velocidade, forneceram dados importantes para a análise do modelo de secagem.

De acordo com as simulações dos Modelos 1 a 5, puderam ser verificados que ajustes satisfatórios aos dados experimentais foram obtidos em relação àqueles modelos que consideravam a propriedade calor específico do sólido ( $C_{ps}$ ) constante. Esta propriedade foi representada por uma equação que era função da umidade do sólido, enquanto que as outras propriedades eram funções da temperatura. Esta característica pode ter contribuído para os perfis aqui simulados.

De forma geral, observou-se uma grande influência quanto às propriedades físico-químicas, perfil de porosidade e de velocidade, nos perfis de umidade e temperatura do sólido e do fluido, para todos os experimentos realizados, confirmando que as hipóteses adotadas em cada modelo geram modificações significativas nos resultados de secagem.

A fluidodinâmica computacional mostrou-se de grande ajuda para a verificação do efeito da parede nos perfis de porosidade e velocidade do fluido. Os resultados obtidos ajustaram-se de forma satisfatória aos dados experimentais de Souza (2001). Com este estudo, pode-se confirmar que a suposição de perfil plano de velocidade da fase fluida, no modelo a duas fases, não é válida na faixa de ar analisada.

Em relação ao estudo da qualidade das sementes de soja, quanto aos índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras, e do desempenho de secagem, observou-se que a estratégia de transformar um secador de leito deslizante convencional em um secador de múltiplos estágios se mostrou bastante satisfatória em relação à elevação do potencial de secagem e manutenção da qualidade das sementes.

No estudo da otimização do secador, por meio da técnica de Evolução Diferencial foi possível realizar a otimização do secador de leito deslizante com escoamento concorrente e contracorrente de um e de múltiplos estágios, obtendo-se condições operacionais ótimas que maximizam os índices de qualidade ou a remoção de umidade. Os resultados apresentados mostraram que, para a função objetivo de maximização do índice de qualidade, as variáveis vazão de sólidos, temperatura e velocidade do fluido inferiores e umidade relativa do ar de secagem maiores do que os dados da simulação, resultaram em condições ótimas de secagem. Para a função objetivo de maximização da remoção de umidade, valores ótimos foram encontrados, ao se manter valores maiores de temperatura do ar, seguido da redução da vazão dos sólidos e da velocidade do ar, com umidade relativa do ar de secagem superior aos dados da simulação.

Assim, esta tese gerou dados de simulação e otimização que poderão ser utilizados para a melhoria dos modelos já apresentados na literatura e conseqüentemente, fornecer informações para a construção e melhoria de secadores, além de condições experimentais ótimas para o estudo da secagem em leito deslizante.

## 6.2 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Desenvolver equações para os índices de qualidade em relação ao comprimento de cada seção do secador;
- Realizar experimentos em secadores de leito deslizante com escoamentos concorrentes e contracorrentes, para a obtenção dos perfis de umidade e temperatura e qualidade das sementes. Além disso, considerar as condições operacionais otimizadas na execução dos experimentos de secagem;
- Estudar através da fluidodinâmica computacional o perfil de velocidade comparando os resultados com dados experimentais obtidos na secagem.

- Estudar o problema de otimização multi-objetivo.
- Obter equação para o calor específico do sólido em função da temperatura.



---

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHN, Y.; CHEN, H.; FAN, L.; WAN, C. A modified moving bed grain dryer. *IEEC Process Design and Development*, v. 3, n. 2, p. 96–100, 1963.
- AMIN. *Post harvest profile of soybean*. Março 2010. Disponível em: <<http://www.agmarknet.nic.in/soybean-profile.pdf>>.
- ASSIS, A.; LIRA, T.; MURATA, V. V.; BARROZO, M. Concurrent drying of soybean seeds: The effect of the radial air profile. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 22, n. 2, p. 311–318, 2005.
- AZIZIA, S.; HOSSEINIB, S.; MORAVEJIA, M.; AHMADIC, G. Cfd modeling of a spouted bed with a porous draft tube. *Particuology*, v. 8, n. 5, p. 415–424, 2010.
- BABU, B.; ANBARASU, B. Multi-objective differential evolution (mode): An evolutionary algorithm for multi-objective optimization problems. In: *Proceedings of International Symposium and 58<sup>th</sup> Annual Session of IChE*. [S.l.: s.n.], 2005. p. 1–16.
- BABU, B.; CHAKOLE, P.; MUBEEN, J. Multiobjective differential evolution (mode) for optimization of adiabatic styrene reactor. *Chemical Engineering Science*, v. 60, n. 12, p. 4822–4837, 2005.
- BANGA, J.; BALSACANTO, E.; MOLES, C.; ALONSO, A. Improving food processing using modern optimization methods. *Trends in Food Science & Technology*, v. 14, n. 4, p. 131–144, 2003.
- BARROZO, M. *Transferência de calor e massa entre o ar e sementes de soja em leito deslizante e escoamento*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, p.163, 1995.

- BARROZO, M.; FELIPE, C.; SARTORI, D.; FREIRE, J. Quality of soybean seeds undergoing moving bed drying: countercurrent and crosscurrent flows. *Drying Technology Journal*, v. 24(4), p. 415–422, 2006.
- BARROZO, M.; HENRIQUE, H.; SARTORI, D.; FREIRE, J. A study on the diffusional model applied to soybean drying. In: *Anais do V Congresso Latinoamericano de Transferência de Calor y Materia*. [S.l.: s.n.], 1994. v. 1, p. ib61–ib67.
- BENENATI, R.; BROSILOW, C. Void fraction distribution in beds of spheres. *AIChE Journal*, v. 8, p. 359–362, 1962.
- BENAMOUN, L.; BELHAMRI, A. Mathematical description of heat and mass transfer during deep bed drying: Effect of product shrinkage on bed porosity. *Applied Thermal Engineering*, v. 28, p. 2236–2244, 2008.
- BERGAMASCHI, P.; BONFIM, I. O método de otimização evolução diferencial: uma análise dos parâmetros - fator de perturbação e probabilidade de cruzamento. In: *Anais do II Simpósio de Matemática e Matemática Industrial*. [S.l.: s.n.], 2010. v. 1.
- BEWLEY, J.; BLACK, M. *Seeds: physiology and development and germination*. 2<sup>a</sup> ed. [S.l.]: Plenum Press, New York, 1994.
- BEY, O.; EIGENBERGER, G. Fluid flow through catalyst filled tubes. *Chemical Engineering Science*, v. 52, n. 8, p. 1365–1376, 1997.
- Biscaia Jr., E. *Apostila do Curso de Otimização*. 2007. I SEPEQ, Faculdade de Engenharia Química. Uberlândia, MG.
- Biscaia Jr., E.; VIEIRA, R. Heuristic optimization for consistent initialization of daes. *Computers and Chemical Engineering*, v. 24, p. 2183–2191, 2000.
- BOX, G.; WILSON, K. On the experimental attainment of optimum conditions. *J. Roy. Statist. Soc.*, v. 13, p. 1, 1951. Citado em MYERS, R. H.
- BOX, M.; HUNTER, W.; HUNTER, J. S. *Statistics for experimenters. An Introduction to design, data analysis and model building*. [S.l.]: John Wiley and Sons, 1978.
- BROOKER, D.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. *Drying Cereal Grains*. [S.l.]: The AVI Publishing Company, 1974.
- BRUCE, D. Simulation of multiple-bed concurrent-, counter-, and mixed-flow grain driers. *J. Agric. Engng. Res.*, v. 30, p. 361–372, 1984.
- BRUCE, D. M. A model of the effect of heated-air drying on the bread baking quality of wheat. *J. Agric. Engng. Res.*, v. 52, p. 53–76, 1992.
- BÉTTEGA, R.; CORRÊA, R. G.; FREIRE, J. Velocity profile in fixed beds: a study on the representativeness of the experimental measurement of downstream flow characteristics. *Drying Technology Journal*, v. 25, n. 7, p. 1175–1183, 2007.

- CALADO, V. *Modelagem e simulação de secadores em leitos fixo e deslizante*. Tese (Doutorado) — COPPE/UFRJ, 1993. Rio de Janeiro, RJ.
- CELESTINO, S. *Transferência de Calor e Massa em Leito Deslizante e Escoamentos Concorrentes: Secagem de Sementes de Soja*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 1998. P. 81.
- CHEN, C.; CLAYTON, J. The effect of temperature on sorption isotherms of biological materials. *Trans. of the ASAE*, v. 14(5), p. 927–929, 1971.
- CHUNG, D.; PFOST, H. Adsorption and desorption of water vapour by cereal grains and their products. part ii. *Trans. of the ASAE*, v. 10(4), p. 549–551, 1967.
- COURTOIS, F. Computer-aided design of corn dryers: a dynamic approach including quality prediction. *Journal of Drying Technology*, v. 13, n. 5-7, p. 1153–1165, 1995.
- COUTOIS, F.; LEBERT, A.; LASSERAN, J.; BIMBENET, J. Dynamic modelling and simulation of industrial corn dryers. *Computers and Chemical Engineering*, v. 17, p. S209–S214, 1993. Suppl.
- DELMAS, H.; FROMENT, G. A simulation model accounting for structural radial nonuniformities in fixed bed reactors. *Chemical Engineering Science*, v. 43, n. 8, p. 2281–2287, 1988.
- DUARTE, C. *Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica e recobrimento em leito de jorro*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia., 2006.
- EGEAA, J. A.; MARTÍB, R.; BANGAA, J. An evolutionary method for complex-process optimization. *Computers and Operations Research*, v. 37, n. 2, p. 315–324, 2010.
- ERGUN, S. Fluid flow through packed columns. *Chem. Eng. Prog.*, v. 48, n. 2, p. 89–94, 1952.
- ERRIGUIBLEA, A.; BERNADA, P. Simulation of convective drying of a porous medium with boundary conditions provided by cfd. *Chemical Engineering Research and Design*, v. 84, n. 2, p. 113–123, 2006.
- FAHIEN, R.; STANKOVICH, I. An equation for the velocity profile in packed columns. *Chemical Engineering Science*, v. 34, p. 1350–1354, 1979.
- FALCONE, M. *Estudo comparativo entre algoritmos genéticos e evolução diferencial para otimização de um modelo de cadeia de suprimento simplificada*. Dissertação (Mestrado) — Pontifícia Universidade Católica do Paraná, 2004.
- FAN, H.; LAMPINEN, J. A trigonometric mutation operation to differential evolution. *Journal of Global Optimization*, v. 27, n. 2, p. 105–129, 2003.

- FELIPE, C. *Influência das variáveis de processo na qualidade de sementes de soja submetidas à secagem em leito deslizante e escoamentos concorrentes*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia., 1999.
- FELIPE, C.; BARROZO, M. Drying of soybean seeds in a concurrent moving bed: heat and mass transfer and quality analysis. *Drying Technology Journal*, v. 21(3), p. 439–456, 2003.
- FIGUEIRA, C.; REIS, L.; MURATA, V.; BARROZO, M. Projeto ótimo de um secador de leito deslizante concorrente com divisão do suprimento do ar em estágios. In: *XXXIII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados - ENEMP*. Aracaju, SE: [s.n.], 2007.
- FIGUEIRA, C.; REIS, L.; MURATA, V. V. Projeto ótimo de um secador de leito deslizante modificado de sementes de soja. In: *VII Congresso Brasileiro de Engenharia Química de Iniciação Científica*. [S.l.: s.n.], 2007. São Carlos, SP.
- FLUENT. *User's guide*. [S.l.], 2006.
- FREIRE, J.; GUBULIN, J. *Tópicos especiais em sistemas particulados*. [S.l.]: Editora UFSCar, 1990. São Carlos.
- FURNAS, C. Flow of gases through beds of broken solids. In: *United States Department of Commerce, Bureau of Mines*. [S.l.]: Bulletin 307, 1929. p. 74–83.
- GARCIA, D. C.; BARROS, A. C. S. A.; PESKE, S. T.; MENEZES, N. L. A secagem de sementes. *Ciência Rural*, v. 34, p. 603–608, 2004.
- GARSDALE, J.; AL-DIBOUNI, M. Velocity-voidage relationships for fluidization and sedimentation. *I&EC Process Des. Dev.*, v. 16, p. 206–214, 1977.
- GEORGE, R. A. T. *Vegetable seed production*. 2nd. ed. [S.l.]: CABI Publishing, 1999.
- GIDASPOW, D.; BEZBURUAH, R.; DING, J. Hydrodynamics of circulating fluidized beds, kinetic theory approach. In: *In Fluidization VII, Proceedings of the 7th Engineering Foundation Conference on Fluidization*. [S.l.: s.n.], 1992. p. 75–82.
- GINER, S.; BRUCE, D. Mathematical modelling of grain drying in counter-flow beds: investigation of crossover of air and grains temperatures. p. 143–161, 1993.
- GINER, S.; BRUCE, D.; MORTIMORE, S. Two-dimensional simulation model of steady-state mixed-flow grain drying. part 1: The model. *J. Agric. Engng. Res.*, v. 71, p. 37–50, 1998.
- GINER, S.; ESTREBOU, C. Visual software (flux) for simulation of cross flow dryer performance and effect on quality. examples for wheat. In: *Proceedings of the 14th International Drying Symposium*. [S.l.: s.n.], 2004.

- GOMES, M.; SINNECKER, P.; TANAKA, R.; LANFER-MARQUEZ, U. Effect of harvesting and drying conditions on chlorophyll levels of soybean (*glycine max* l. merr). *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, v. 51, p. 1634–1639, 2003.
- GOVENDER, V.; AVELING, T. A. S.; KRITZINGER, Q. The effect of traditional storage methods on germination and vigour of maize (*zea mays* l.) from northern kwazulu-natal and southern mozambique. *South African Journal of Botany*, v. 74, p. 190–196, 2008.
- GRATON, L.; FRASER, H. Systematic packing of spheres with particular relation to porosity and permeability. *J. Geol.*, v. 43, p. 785–909, 1935.
- HENDERSON, J.; HENDERSON, S. A computational procedure for deep-bed drying analysis. *Journal of Agricultural Engineering Research*, v. 13, p. 87–95, 1968.
- HENDERSON, S. A basic concept of equilibrium moisture content. *Agricultural Engineering*, v. 33(2), p. 29–31, 1952.
- HIMMELBLAU, D.; RIGGS, J. *Engenharia Química - Princípios e Cálculos*. 7. ed. [S.l.: s.n.], 2006.
- HOLMBERG, H.; AHTILA, P. Comparison of drying costs in biofuels drying between multi-stage and single-stage drying. *Biomass and Bioenergy*, v. 26, p. 515–530, 2004.
- HUKILL, W. *Grain drying*. [S.l.]: In Storage of cereal grains., 1955. St. Paul, Minn.
- IBGE. *Indicadores IBGE - Estatística da Produção Agrícola*. [S.l.], 2011.
- IGUAZ, A.; ESNOZ, A.; MARTÍNEZ, G.; LÓPEZ, A.; VÍRSEDA, P. Mathematical modelling and simulation for the drying process of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of Food Engineering*, v. 59, p. 151–160, 2003.
- JAFARI, A.; ZAMANKHANA, P.; MOUSAVIA, S.; PIETARINENA, K. Modeling and cfd simulation of flow behavior and dispersivity through randomly packed bed reactors. *Chemical Engineering Journal*, v. 144, n. 3, p. 476–482, 2008.
- JAMALEDDINE, T.; RAY, M. Application of computational fluid dynamics for simulation of drying process: a review. *Drying Technology*, v. 28, p. 120–154, 2010.
- JIANG, Y.; KHADILKAR, M.; AL-DAHMAN, H.; DUDUKOVIC, M. Cfd modeling of multiphase flow distribution in catalytic packed reactors: scale down issues. *Catalyst Today*, v. 66, n. 2-4, p. 209–218, 2001.
- JOHNSON, G.; KAPNER, R. The dependence of axial dispersion on non-uniform flows in beds of uniform packing. *Chemical Engineering Science*, n. 11, p. 3329–3339, 1990.

- JOHNSON, P.; JACKSON, R. Frictional-collision constitutive relations for granular materials, with application to plane shearing. *J. Fluid Mech.*, v. 176, p. 67–93, 1987.
- KAPADI, M.; GUDI, R. Optimal control of fed-batch fermentation involving multiple feeds using differential evolution. *Process Biochemistry*, v. 39, n. 3, p. 1709–1721, 2004.
- KATZ, S. Best operating points for staged systems. *I&EC Fundamentals*, v. 1, n. 4, p. 226–240, 1962.
- KURIAKONSEA, R.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Computational fluid dynamics (cfD) applications in spray drying of food products. *Trends in Food Science & Technology*, v. 21, n. 8, p. 383–398, 2010.
- LACERDA, A. *Secagem em leito deslizante contracorrente: Análise da qualidade das sementes de soja*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2002.
- LACERDA, A.; LISBOA, M.; BARROZO, M. Heat and mass transfer in a counter-current moving bed dryer. *Applied Thermal Engineering*, v. 25, p. 2641–2652, 2005.
- LACERDA, A. F.; LISBOA, M.; OLIVEIRA, M.; BARROZO, M. Two-phase modelling and the quality of soybean seeds dried in a countercurrent moving bed drier. *Journal of Food Proc. Eng.*, v. 27, p. 432–448, 2004.
- LEGAWIEC, B.; ZIOLKOWSKI, D. Structure, voidage and effective thermal conductivity of solids within near wall region of beds packed with spherical pellets in tubes. *Chem. Engng. Science*, v. 49, p. 2513, 1994.
- LEVA, M.; GRUMMER, M. Pressure drop through packed tubes: prediction of voids in packed tubes. *Chem. Eng. Prog.*, v. 43, p. 713–718, 1947.
- LIA, J.; MASONB, D. Application of the discrete element modelling in air drying of particulate solids. *Drying Technology*, v. 20, n. 2, p. 255–282, 2002.
- LIRA, T. *Contribuição à modelagem da secagem em leito deslizante concorrente*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2005.
- LIRA, T.; BARROZO, M.; ASSIS, A. Concurrent moving bed dryer modelling: Sensitivity of physicochemical parameters and influence of air velocity profiles. *Applied Thermal Eng.*, v. 29, p. 892–897, 2009.
- Drying of soybean seeds in a countercurrent moving bed: The effect of the radial air profile*. 15th International Drying Symposium - IDS.

- LIRA, T.; MURATA, V. V.; BARROZO, M.; ASSIS, A. Effect of radial air profiles on a countercurrent moving bed drying. *Food and Bioproducts Processing*, v. 85, n. C3, p. 241–246, 2007.
- LOBATO, F. *Otimização Multi-objetivo para o Projeto de Sistemas de Engenharia*. Tese (Tese de Doutorado) — Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia, Brasil, Setembro 2008.
- LOBATO, F.; ARRUDA, E.; BARROZO, M.; Steffen Jr, V. Estimation of drying parameters in rotary dryers using differential evolution. *Journal of Physics Conference Series*, v. 1, n. 2, p. 1–8, 2008.
- LOBATO, F.; OLIVEIRA-FILHO, R.; DUARTE, M.; Steffen Jr, V. Estimação de parâmetros de um filtro adaptativo utilizado como ferramenta para controle de qualidade em linha de montagem de câmbios automotivos através da técnica de evolução diferencial. In: *V Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, Salvador - BA*. [S.l.: s.n.], 2008. p. 1–12.
- LOBATO, F.; OLIVEIRA-LOPES, L.; MURATA, V.; Steffen Jr, V. Evolução diferencial aplicada à solução de problemas de controle Ótimo com restrições de desigualdade. In: *X Encontro de Modelagem Computacional, CD-ROM, Nova Friburgo, Brasil. ISBN 978-85-85769-35-2*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–10.
- LOBATO, F.; Steffen Jr, V. Engineering system design with multi-objective differential evolution. In: *Proceedings in 19<sup>th</sup> International Congress of Mechanical Engineering - Cobem 2007, Brasília, Brazil*. [S.l.: s.n.], 2007. p. 1–10.
- LUIKOV, A. *Heat and mass transfer in capillary-porous bodies*. [S.l.]: Pergamon Press, London, 1966.
- LUN, C.; SAVAGE, S.; JEFFREY, D.; CHEPURNIY, N. Kinetic theories for granular flow: inelastic particles in couette flow and slightly inelastic particles in a general flow field. *J. Fluid Mech.*, v. 140, p. 223–256, 1984.
- MALISKA, C. *Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional*. 2. ed. [S.l.]: LTC, 2010.
- MANCINI, M. *Análise do desempenho de secadores de fluxos cruzados*. Dissertação (Mestrado) — COPPE/UFRJ, 1991. Rio de Janeiro, RJ.
- MANCINI, M.; MASSARANI, G.; JR., E. B. Transferência de massa na secagem de milho em secadores de camada espessa em leitos fixo e deslizante. *Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra.*, v. 21, n. 1, p. 121–129, 2002.
- MARIANI, V.; LIMA, A.; COELHO, L. Apparent thermal diffusivity estimation of the banana during drying using inverse method. *Journal of Food Engineering*, v. 85, n. 2, p. 569–579, 2008.

- MENSAH, J.; NELSON, G.; HAMDY, M.; RICHARD, T. A mathematical model for predicting soybean seedcoat cracking during drying. *Trans. of the ASAE*, v. 28, p. 580–591, 1985.
- MILLER, P.; WHITFIELD, R. The predicted performance of a mixed-flow grain drier. *J. Agric. Engng. Res.*, v. 30, p. 373–380, 1984.
- MIYASAKA, S.; MEDINA, J. C. *A soja no Brasil*. [S.l.: s.n.], 1981.
- MOHANA, V. C.; TALUKDAR, P. Three dimensional numerical modeling of simultaneous heat and moisture transfer in a moist object subject to convective drying. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 53, n. 21-22, p. 4638–4650, 2010.
- MURATA, V.; BARROZO, M. Modelagem e simulação da secagem de sementes de soja em leito deslizante com escoamentos concorrentes e contracorrentes. *Anais do XXIV ENEMP*, v. 1, p. 231–236, 1996. Uberlândia, MG.
- MYERS, R. *Response surface methodology*. [S.l.]: Ann Arbor, 1976.
- NAGLIATE, F.; BÉTTEGA, R.; CORRÊA, R. Determinação da fluidodinâmica do ar em leito fixo utilizando-se simulação numérica cfd. In: *XVIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. [S.l.: s.n.], 2010.
- NELLIST, M. E.; HUGHES, M. Physical and biological processes in the drying of seeds. *Seed Science and Tech*, v. 1, p. 613–643, 1973.
- NONHEBEL, G.; MOSS, A. *Drying of solids in the chemical industry*. [S.l.]: London, 1971.
- OLIVEIRA, G.; SARAMAGO, S. Estratégias de evolução diferencial aplicadas a problemas de otimização restritos. In: *15º POSMEC - Simpósio do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica*. [S.l.: s.n.], 2005.
- Oliveira Jr., A. B. *Estudo da transferência de calor e massa no processo de secagem em leito vibro-fluidizado*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2003.
- OSBORN, G.; WHITE, G. M.; SULAIMAN, A.; WELTON, L. Predicting equilibrium moisture proportions of soybeans. *Trans. of the ASAE*, v. 2109-2113, p. 32(6), 1989.
- PAPAGEORGIOU, J.; FROMENT, G. Simulation models accounting for radial voidage profiles in fixed-bed reactors. *Chemical Engineering Science*, v. 50, n. 19, p. 3043–3056, 1995.
- PARDE, S.; KAUSAL, R.; JAYAS, D. S.; WHITE, N. Mechanical damage to soybean seed during processing. *Journal of Stored Products Research*, v. 38, p. 385–394, 2002.

- PETZOLD, L.; CAMPBELL, S.; BRENNAN, K. *Numerical solution of initial-value problems in differential-algebraic equations*. [S.l.]: Elsevier Science Publishing Co., 1989.
- PFEIFER, A.; MURATA, V.; BARROZO, M. Simulação de um secador de leito deslizante de múltiplos estágios com fluxo de ar concorrente e análise da qualidade das sementes de soja. In: *XXXIV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados*. Campinas, SP: [s.n.], 2009.
- RAFIEE, S. et al. Thin layer drying properties of soybean (viliamz cultivar). *J. Agric. Science and Tech.*, v. 11, p. 289–300, 2009.
- RIDGWAY, K.; TARBUCK, K. Voidage fluctuations in randomly packed beds of spheres adjacent to container wall. *Chem. Engng. Science*, v. 23, p. 1147, 1968.
- RODRIGUES, M.; IEMMA, A. *Planejamento de Experimentos e Otimização de Processos*. [S.l.]: Cárita Editora, 2009.
- SAASTAMOINEN, J. Heat exchange between two coupled moving beds by fluid flow. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 47, p. 1535–1547, 2004.
- SALEM, A.; AHMADLOUIEDARABA, M.; GHASEMZADEHA, K. Cfd approach for the moisture prediction in spray chamber for drying of salt solution. *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, v. 17, n. 3, p. 527–532, 2011.
- SANTOS, K. *Estudo da fluidodinâmica do leito de jorro por CFD com malhas tridimensionais*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, MG, 2008.
- SARTORI, D. J. M. *Transferência de Calor em Leito Deslizante*. Tese (Doutorado) — COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 1986. Rio de Janeiro, RJ.
- SCHAEFFER, D. Instability in the evolution equations describing incompressible granular flow. *J. Diff. Eq.*, v. 66, p. 19–50, 1987.
- SFREDO, M. *Estudo da dispersão na secagem de frutos de café em secador de bandejas vibradas*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- SINNECKER, P.; BRAGA, N.; MACCHIONE, E.; LANFER-MARQUEZ, U. Mechanism of soybean (glycine max l. merrill) degreening related to maturity stage and postharvest drying temperature. *Postharv. Biol. and Tech.*, v. 38, p. 269–279, 2005.
- SMITH, J.; NESS, H. V.; ABBOTT, M. *Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química*. 5. ed. [S.l.]: LTC, 2000.
- SOUZA, A. *Estudo fluidodinâmico e de transferência de calor e massa em leito deslizante contracorrente*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2001.

- SOUZA, D.; VIEIRA, R.; PASSOS, M.; JR., E. B. Robust simulation of counterflow moving bed dryers. *Drying Technology Journal*, v. 23, p. 1925–1937, 2005.
- SRIVASTAVA, V.; JOHN, J. Deep bed grain drying modeling. *Energy Conversion and Management*, v. 43, p. 1689–1708, 2002.
- STORN, R.; PRICE, K. Differential evolution: a simple and efficient adaptive scheme for global optimization over continuous spaces. *International Computer Science Institute*, v. 12, n. 1, p. 1–16, 1995.
- STRUMILLO, C.; KUDRA, T. *Drying : Principles, Applications and Design*. [S.l.]: Gordon and Breach Science Publishers, 1986.
- SUBAGYO, N.; BROOKS, G. A new model of velocity distribution of a single-phase fluid flowing in packed beds. *Chemical Engineering Science*, v. 53, n. 7, p. 1375–1385, 1998.
- SYAMLAL, M.; ROGERS, W.; O'BRIEN, T. *MFIX Documentation: Volume 1*. Springfield, VA, 1993. Theory Guide.
- THOMPSON, T.; PEART, R.; FOSTER, G. Mathematical simulation of corn drying - a new model. *Trans. of the ASAE*, v. 11, p. 582–586, 1968.
- VALENÇA, G. *Secagem de grãos em fluxos contracorrentes e concorrentes*. Dissertação (Mestrado) — COPPE/UFRJ, 1999. Rio de Janeiro, RJ.
- VALENÇA, G.; MASSARANI, G. Avaliação de secadores em fluxo concorrentes e contracorrentes. *Anais do XXIV ENEMP*, v. 1, p. 225–230, 1996. Uberlândia, MG.
- Valença, G.; MASSARANI, G. Grain drying in countercurrent and concurrent gas flow - modelling, simulation and experimental tests. *Drying Technology Journal*, v. 18, n. 1&2, p. 447–455, 2000.
- VALLE, J. D. *Micromeritics*. [S.l.]: Pitman, 1948.
- VERNETTI, F. J. *Soja. Planta, Clima, Pragas, Moléstias e Invasoras*. [S.l.]: Fundação Cargill, 1983.
- VIEIRA, L. *Otimização dos processos de separação em hidrociclones filtrantes*. Tese (Doutorado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia, 2006.
- Vieira Neto, J. *Estudo experimental e de simulação da fluidodinâmica de um leito de jorro com tubo draft*. Dissertação (Mestrado) — Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia., 2007.
- VIEIRA, R.; Biscaia Jr., E. Direct methods for consistent initialization of dae systems. *Computers and Chemical Engineering*, v. 25, p. 1299–1311, 2001.

- VORTMEYER, D.; SCHUSTER, J. Evaluation of steady flow profiles in rectangular and circular packed beds by a variational method. *Chemical Engineering Science*, v. 38, p. 1691–1699, 1983.
- VORTMEYER, D.; WAGNER, P.; HAIDEGGER, E. The interaction between temperature and flow in wall-cooled catalytic fixed-bed reactors. *Chem. Engng. Science*, v. 47, p. 1325, 1992.
- WEN, C.; YU, Y. Mechanics of fluidization. *Chemical Engineering Prog. Symp. Series*, v. 62, p. 100–111, 1966.
- ZOTIN, F. *O efeito de parede em colunas de recheio*. Dissertação (Mestrado) — Universidade Federal de São Carlos, 1985.
- ZOTIN, F.; FREIRE, J. *Efeito de parede em colunas de recheio*. [S.l.]: Editora UFS-Car, 1986. São Carlos.
- ZOTIN, F.; SOUZA, R.; FREIRE, J. Efeito de parede no escoamento monofásico: perfil de porosidade radial. In: *Anais do XIII Encontro sobre escoamento em meios porosos*. [S.l.: s.n.], 1985. São Paulo.



---

---

# APÊNDICE A

---

## Equações Auxiliares

Área

$$A = \frac{(\pi R_{ds}^2)}{4}$$

Fluxo Mássico do Fluido

$$G_f = V\epsilon\rho\left(\frac{1}{1+U_{f0}}\right)$$

Fluxo Mássico do Sólido

$$G_s = \frac{Q_s}{A}\left(\frac{1}{1+U_{s0}}\right)$$

Densidade do fluido

$$\rho = 1, 2 \left( \frac{293,15}{T_f + 273,15} \right)$$

na qual  $T_f$  é dada em  $^{\circ}C$

### Velocidade do Sólido

$$V_s = \frac{G_s}{(1 - \epsilon) \rho}$$

### Coefficiente de transferência de calor

$$\begin{aligned} a &= \frac{6(1 - \epsilon)}{\phi d_p} \\ P_r &= \frac{Visc \cdot c_{pf}}{R_{kf}} \\ Re &= \frac{G_f \cdot d_p}{Visc} \\ h &= \frac{a P_r^{1/3} Re^b R_{kf}}{d_p} \end{aligned}$$

### Cálculo da energia consumida no processo

$$\begin{aligned} T_{ref}(C) &= 25 \\ ACPF(J/gC) &= 1,0467 \\ ALAMBDA(J/g) &= 2399,0364 \\ ACPV(J/gC) &= 1,1723 \\ H(J/g) &= ACPF \cdot T_{f0} + U_{f0} (ALAMBDA + ACPV \cdot T_{f0}) \\ H_{ref}(J/g) &= ACPF \cdot T_{ref} + U_{f0} \cdot (ALAMBDA + ACPV \cdot T_{ref}) \\ \Delta H(J/g) &= H - H_{ref} \\ Custo(kW) &= \frac{(G_f A \Delta H)}{1000} \end{aligned}$$

### Cálculo da remoção de umidade

$$R_{umidade} = \frac{U_{entrada} - U_{saída}}{U_{entrada}}$$

### Cálculo da umidade relativa do ar

$$P_{AO} = \frac{\exp\left(18,3036 - \frac{3816,44}{(T_s - 46,13)}\right)}{760}$$

$$P_{AB} = \frac{\left(\frac{28,97}{18,02}U_f\right)}{\left(1 + \left(\frac{28,97}{18,02}U_f\right)\right)} \left(\frac{695,1}{760}\right)$$

$$UR = \frac{P_{AB}}{P_{AO}}$$

### Cálculo da Umidade de Equilíbrio

$$R_{MEQ} = \left(\frac{-\exp(-6,72 \cdot 10^{-3} \cdot T_s + 3,02027)}{\log(UR)}\right)^{1/1,508}$$



---

---

# APÊNDICE B

---

## Dados Experimentais e Simulados de Temperatura e Umidade

Este Apêndice apresenta os gráficos dos dados experimentais e do modelo 5 simulado para o secador de 1 estágio. Os dados experimentais foram obtidos por Celestino (1998) para os experimentos 1-18, com escoamento concorrente e por Souza (2001) para os experimentos 19-27, com escoamento contracorrente.

### **B.1 Gráficos Dados Experimentais**

#### **B.1.1 Escoamento Concorrente**

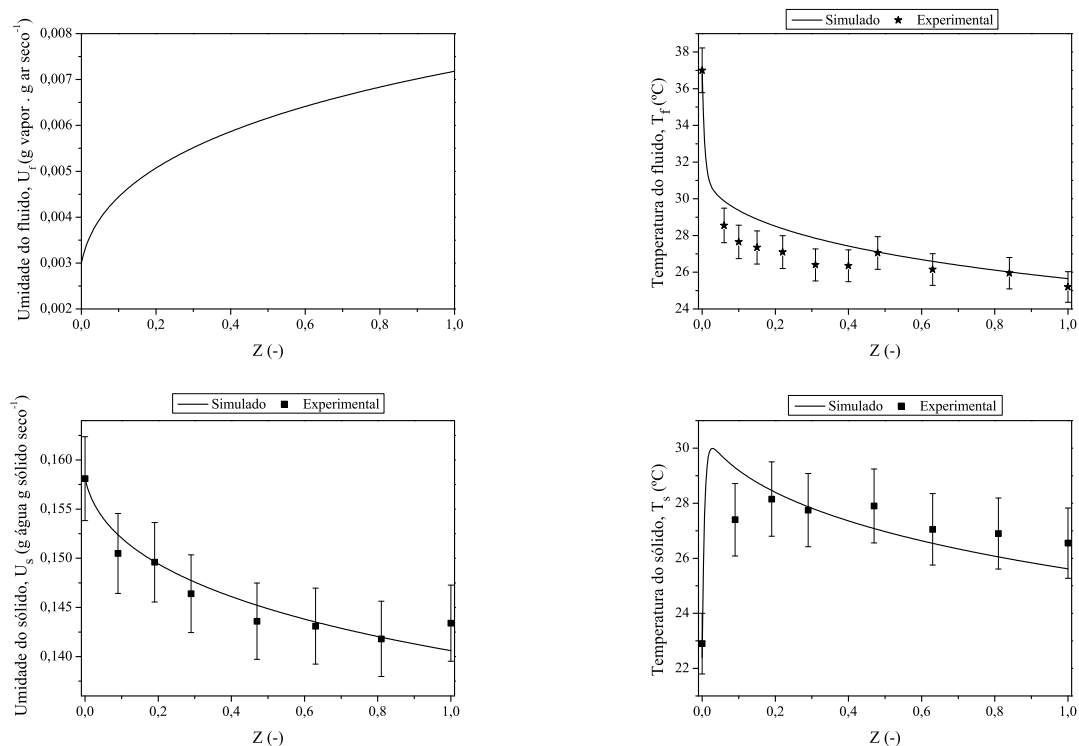


Figura B.1: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 1

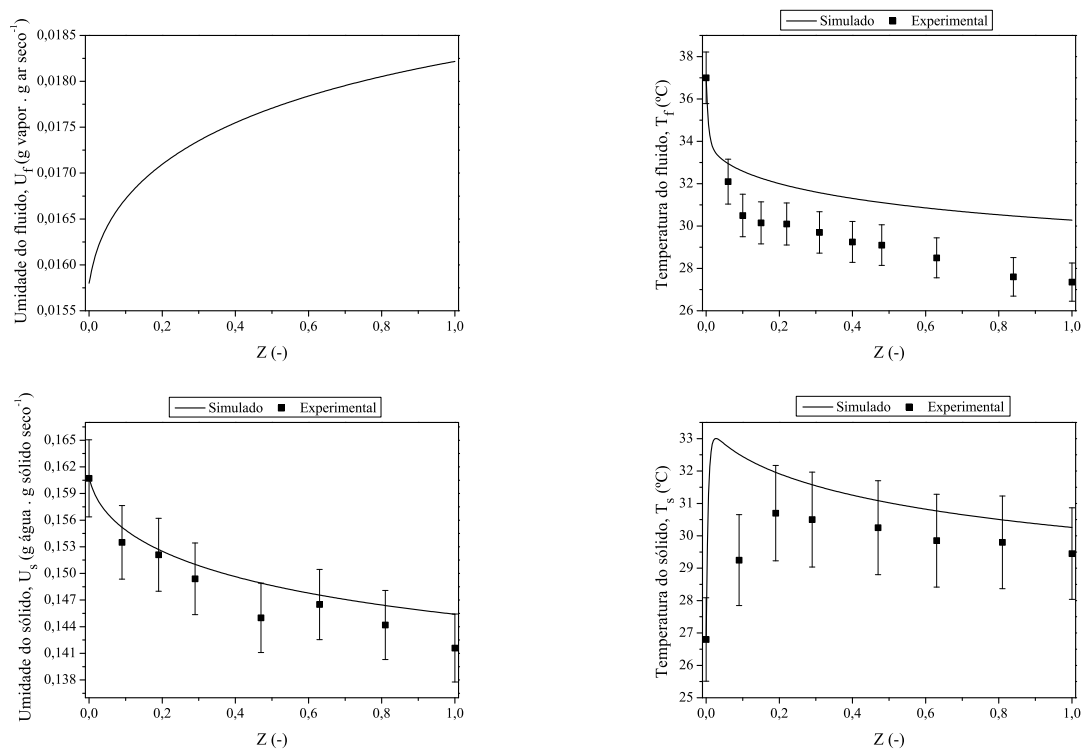


Figura B.2: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 2

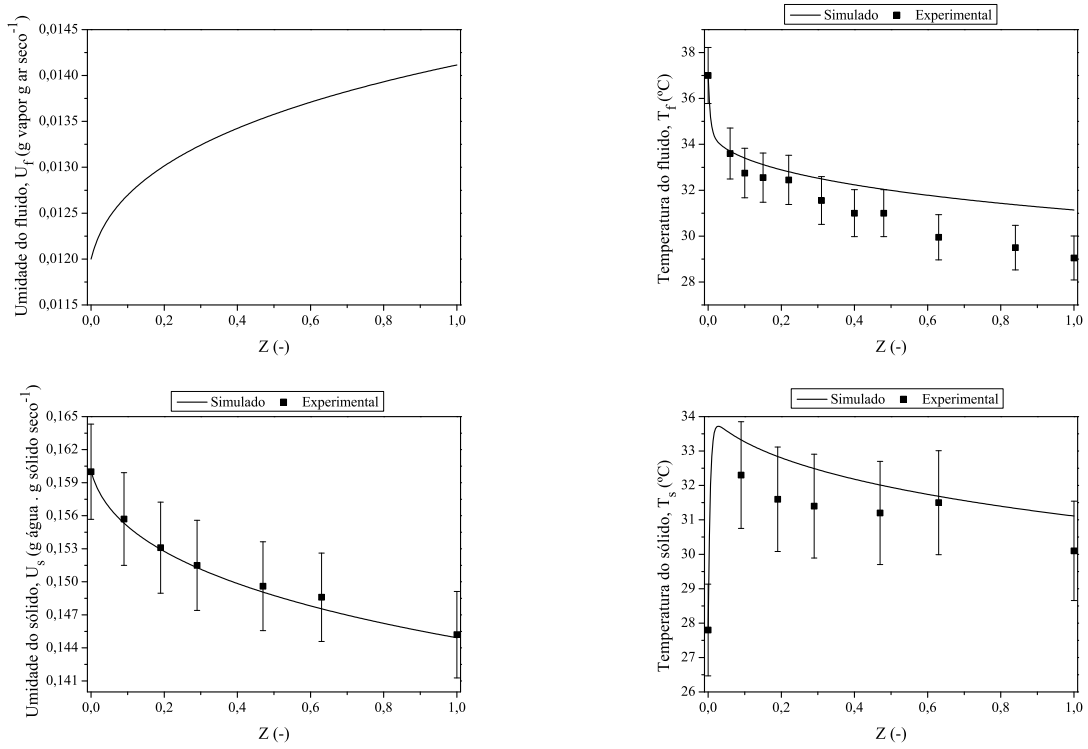


Figura B.3: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 3

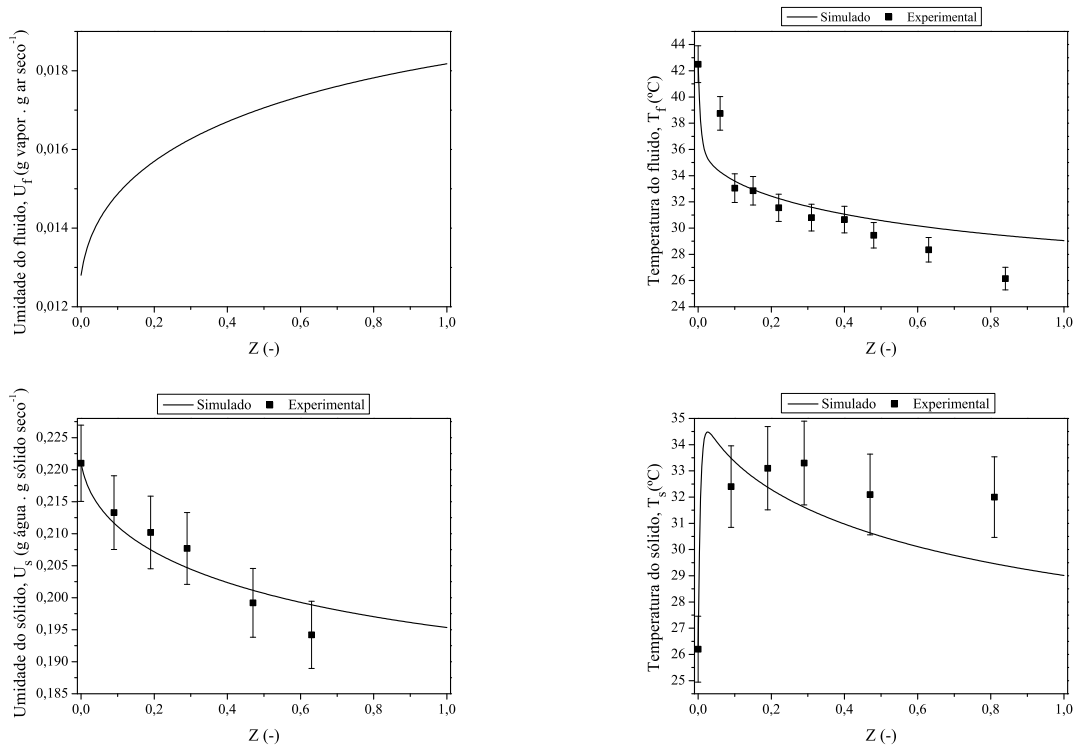


Figura B.4: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 4

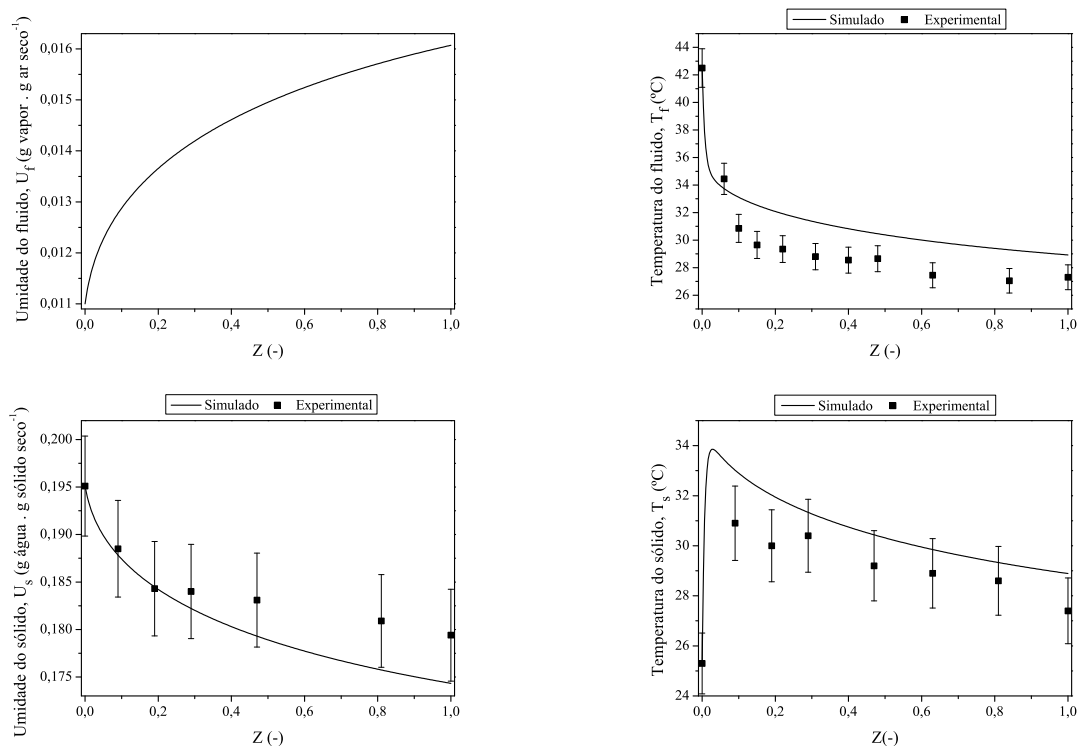


Figura B.5: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 5

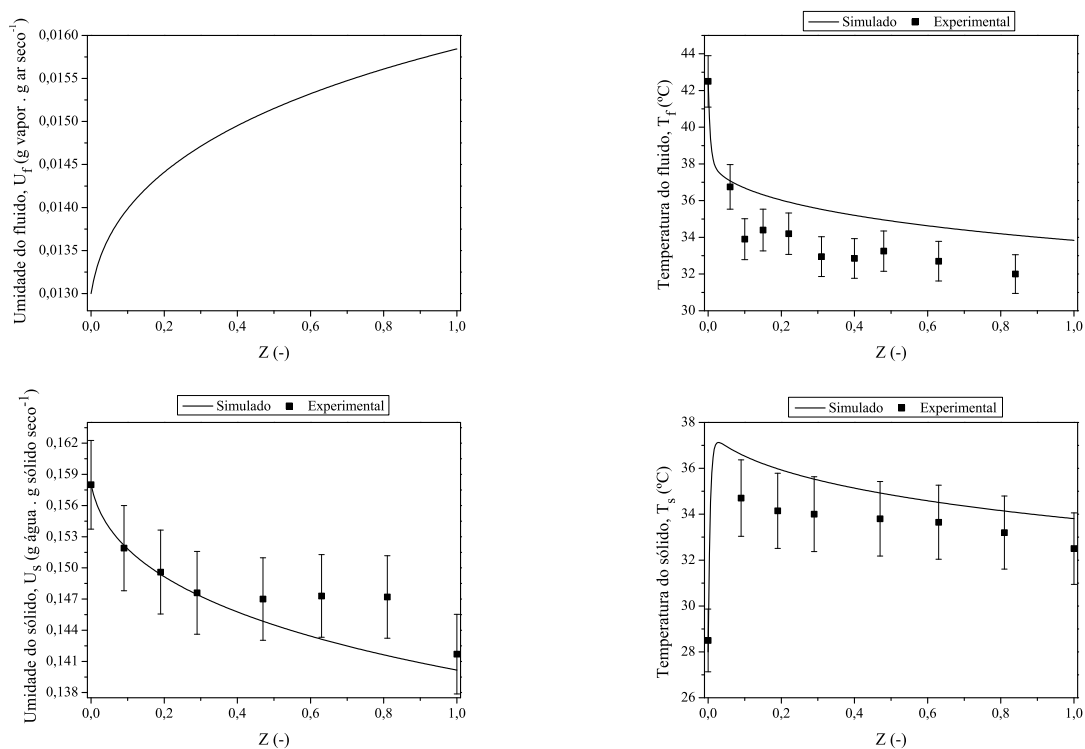


Figura B.6: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 6

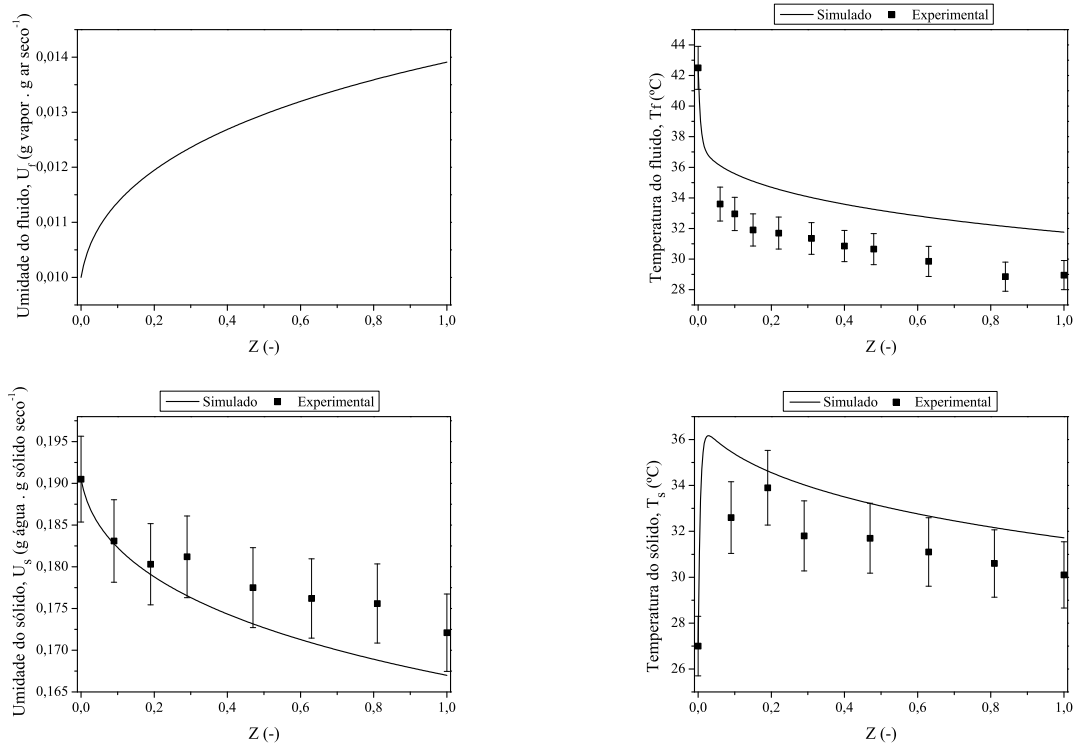


Figura B.7: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 7

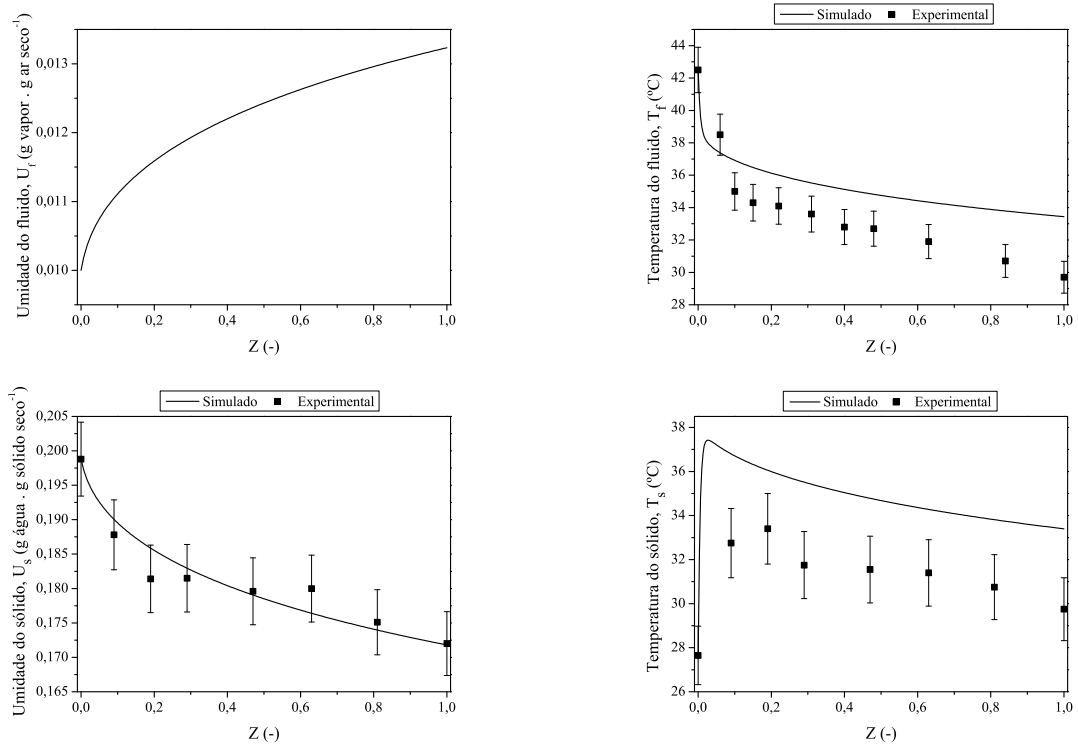


Figura B.8: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 8

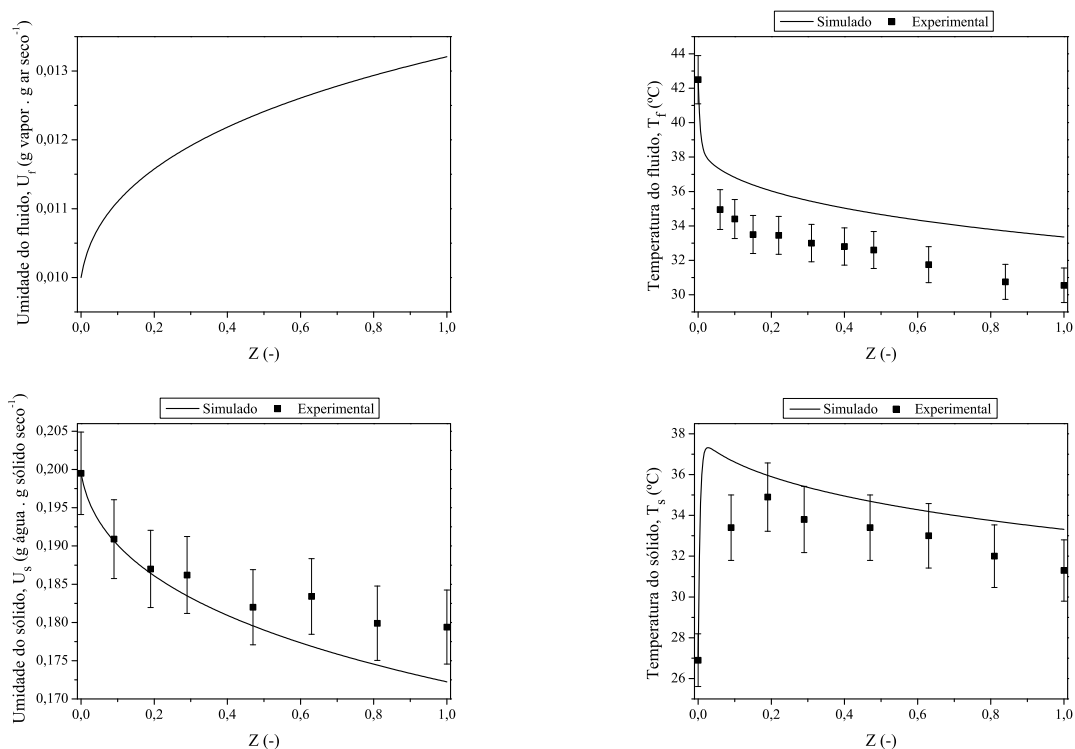


Figura B.9: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 9

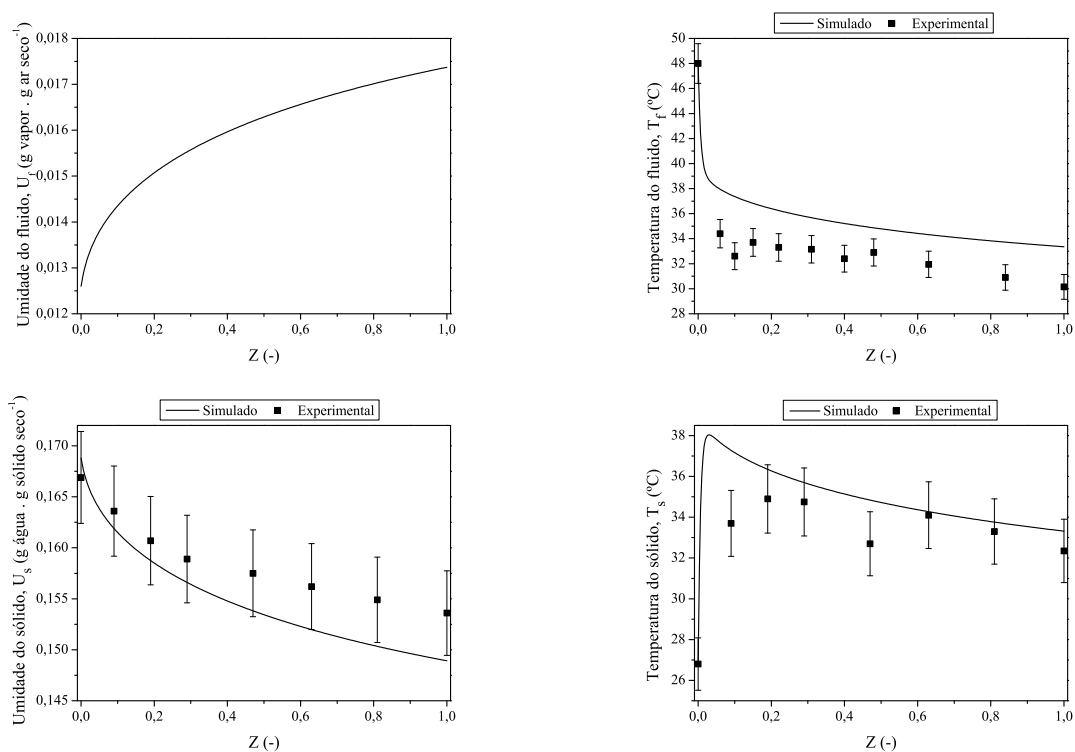


Figura B.10: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 10

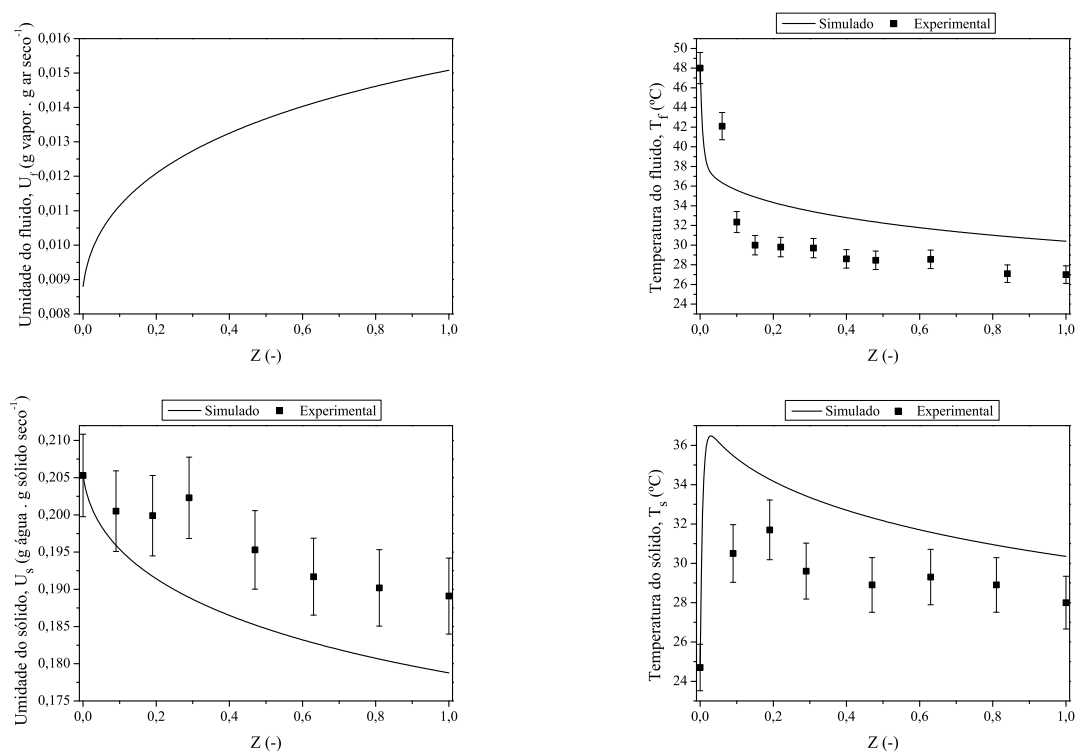


Figura B.11: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 11

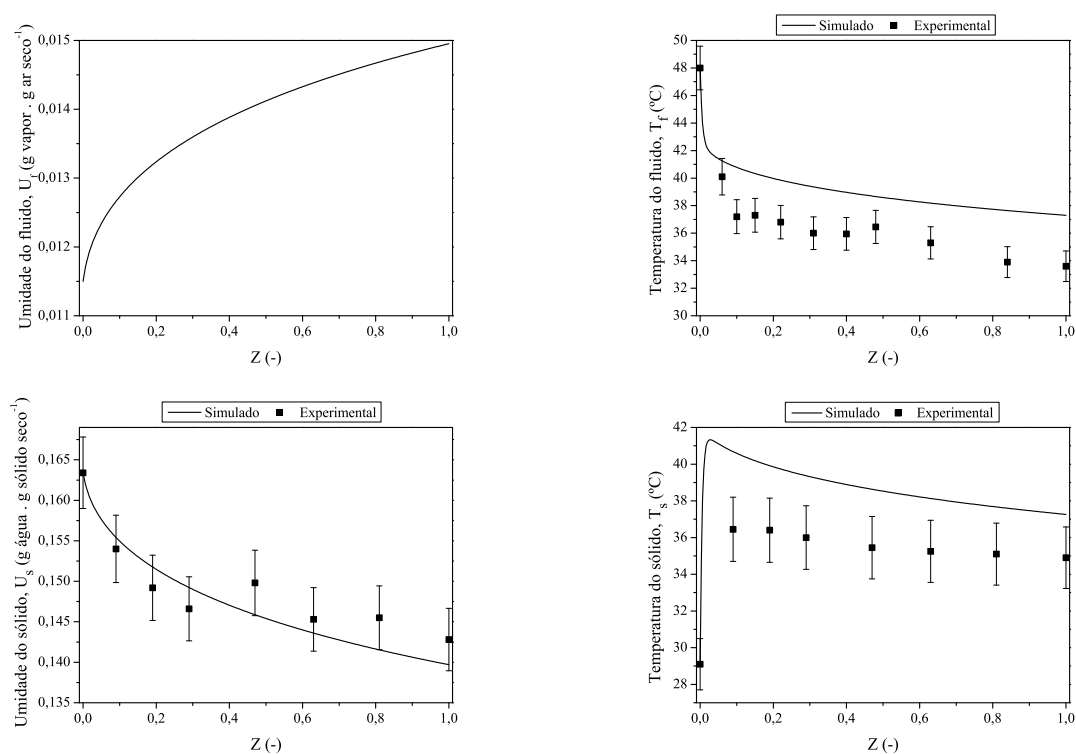


Figura B.12: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 12

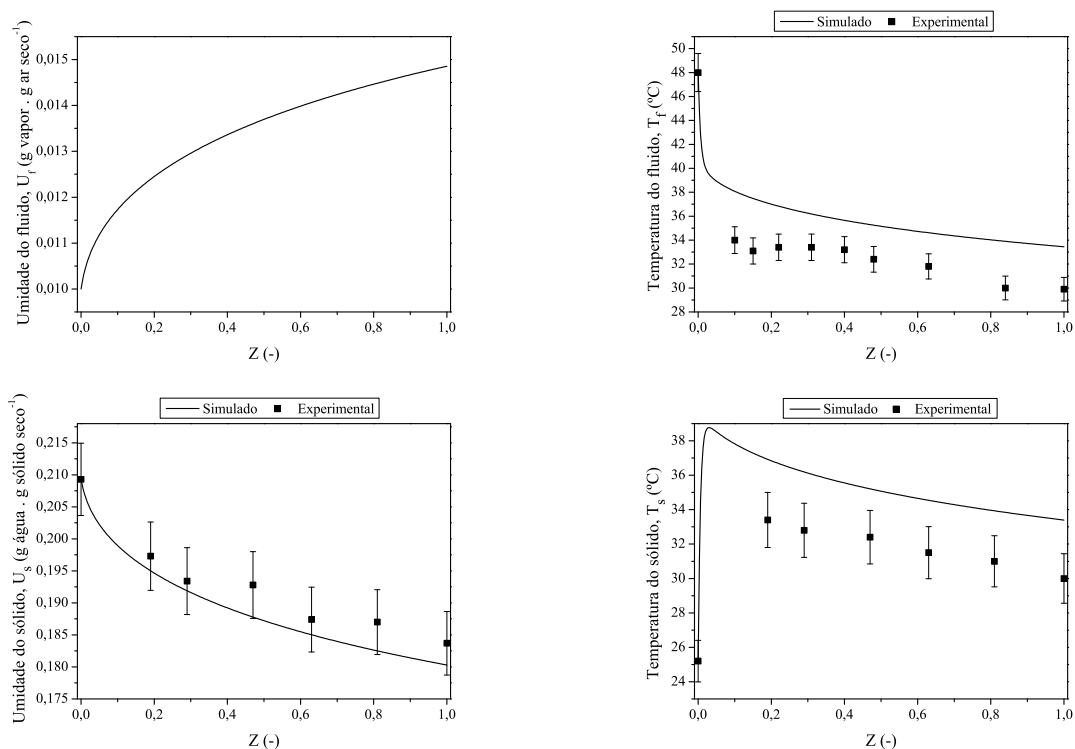


Figura B.13: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 13

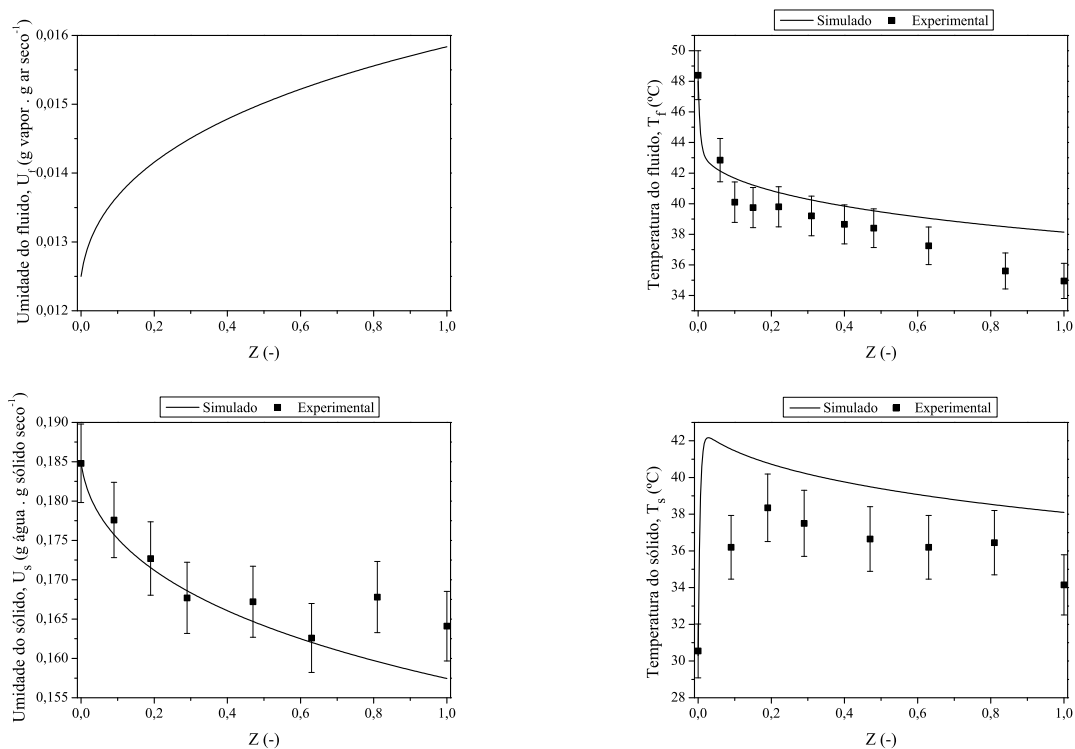


Figura B.14: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 14

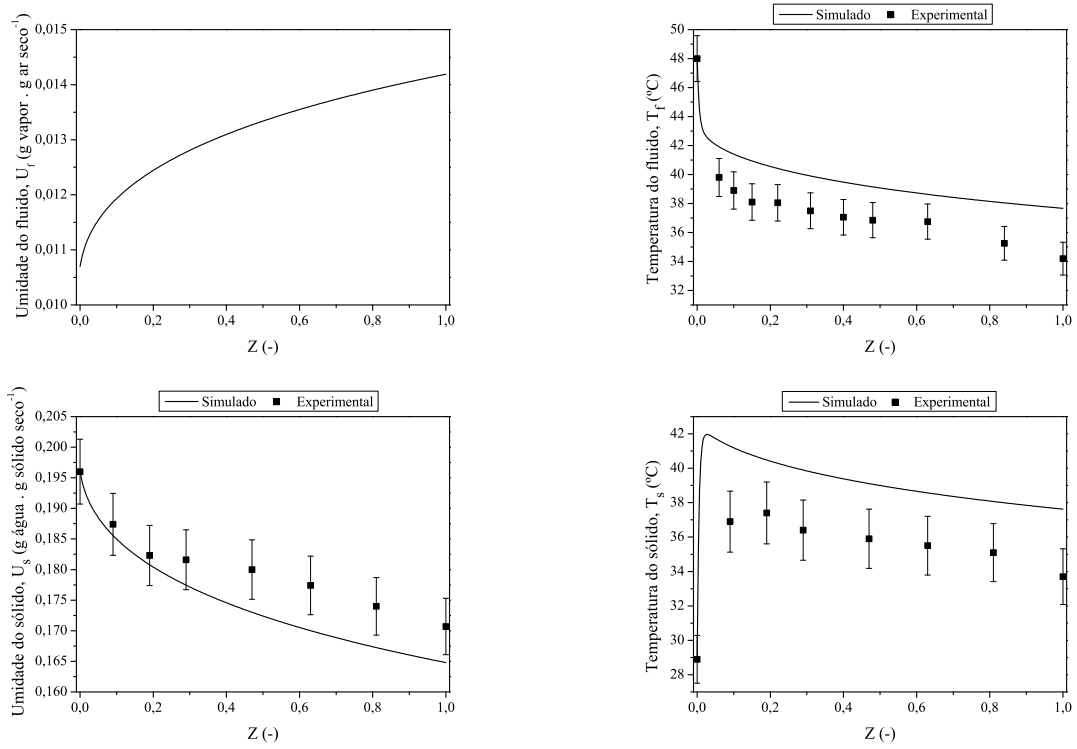


Figura B.15: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 15

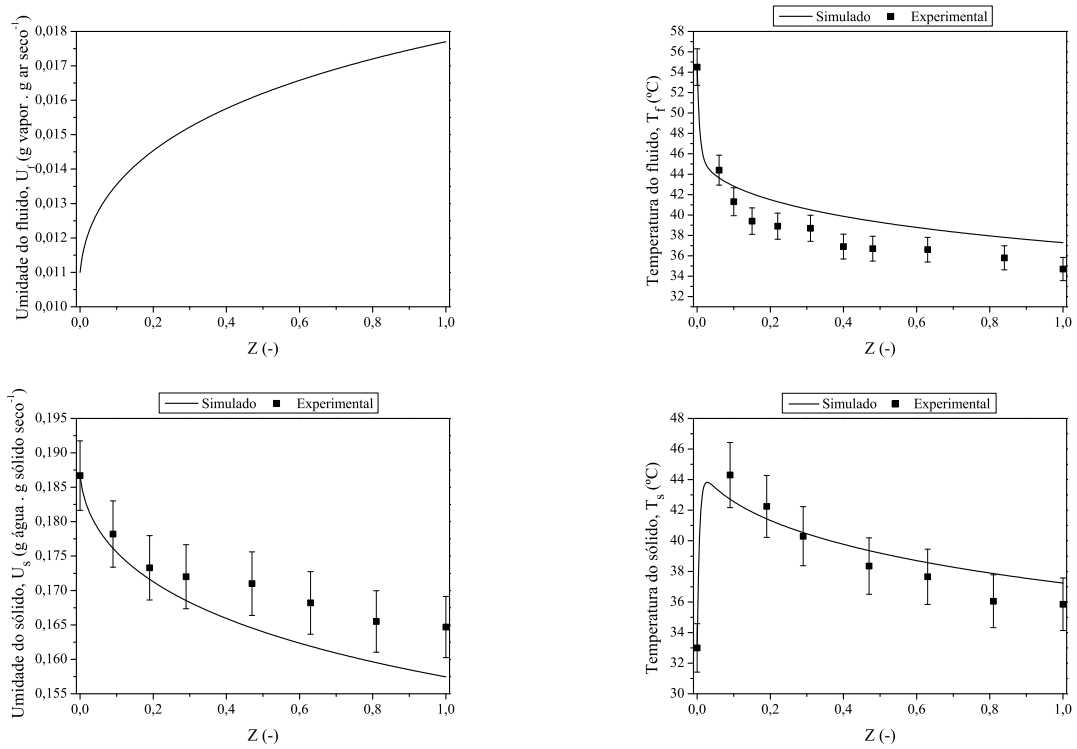


Figura B.16: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 16

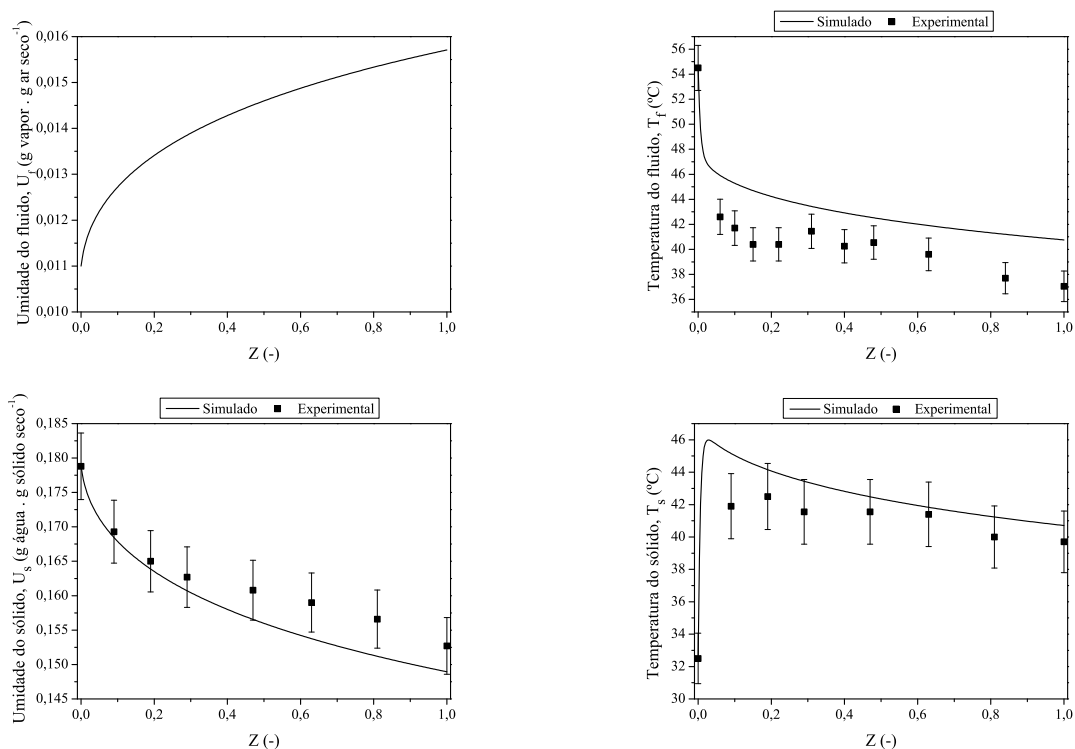


Figura B.17: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 17

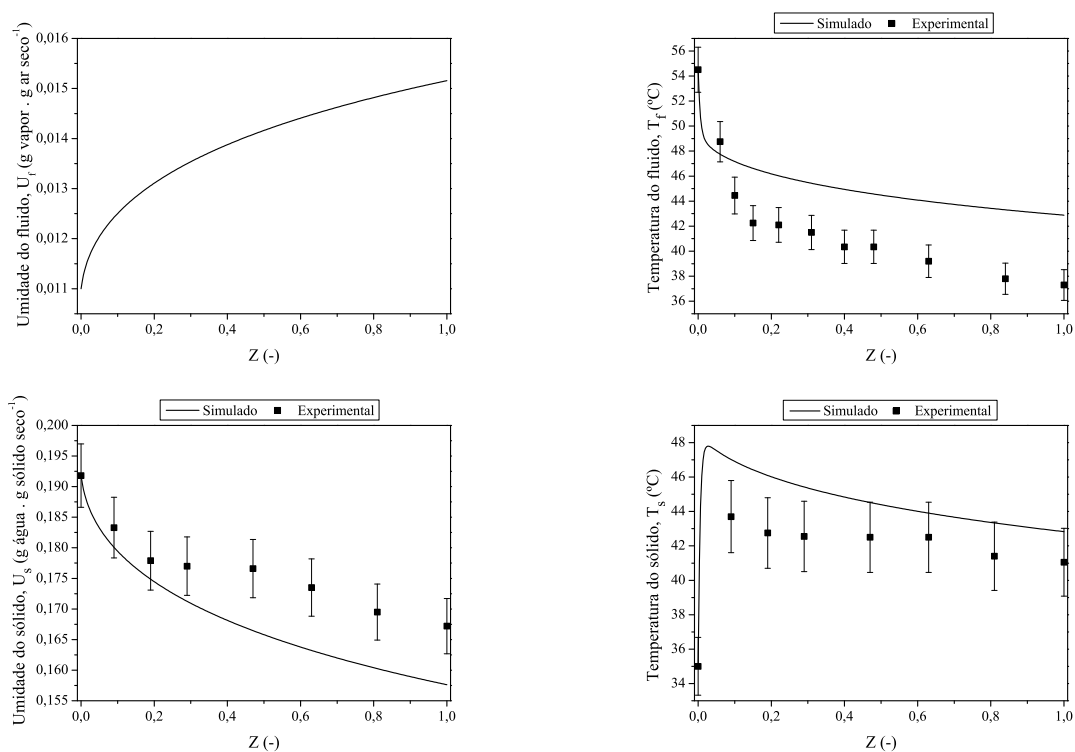


Figura B.18: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 18

## B.1.2 Escoamento Contracorrente

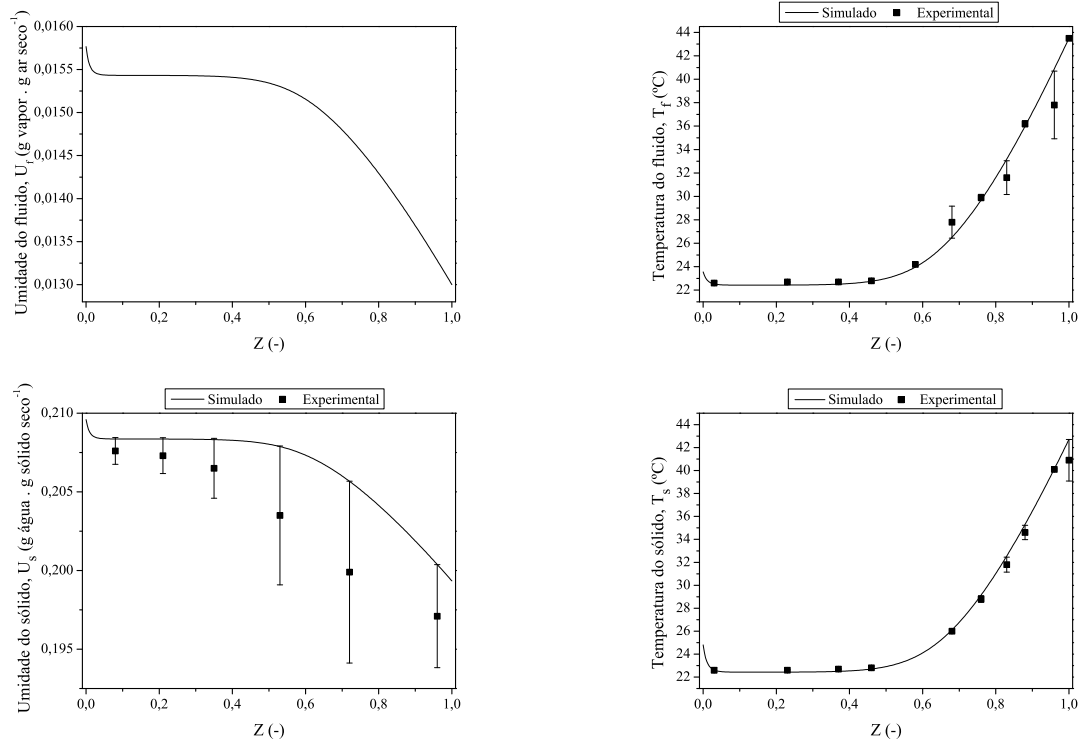


Figura B.19: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 19

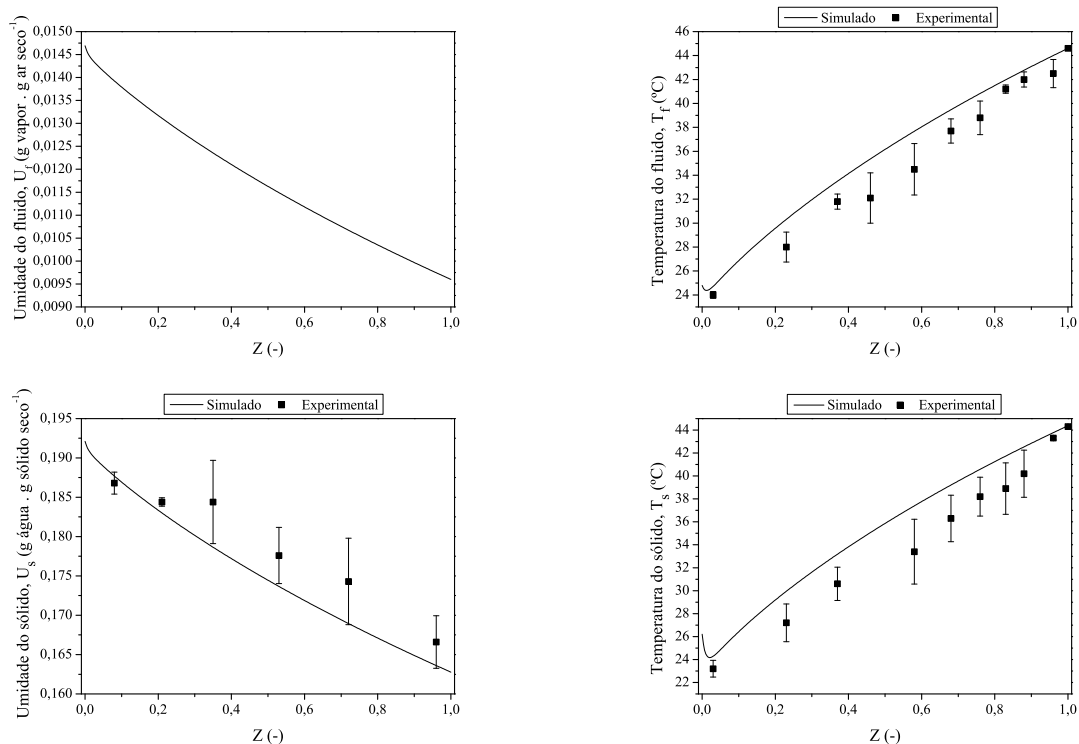


Figura B.20: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 20

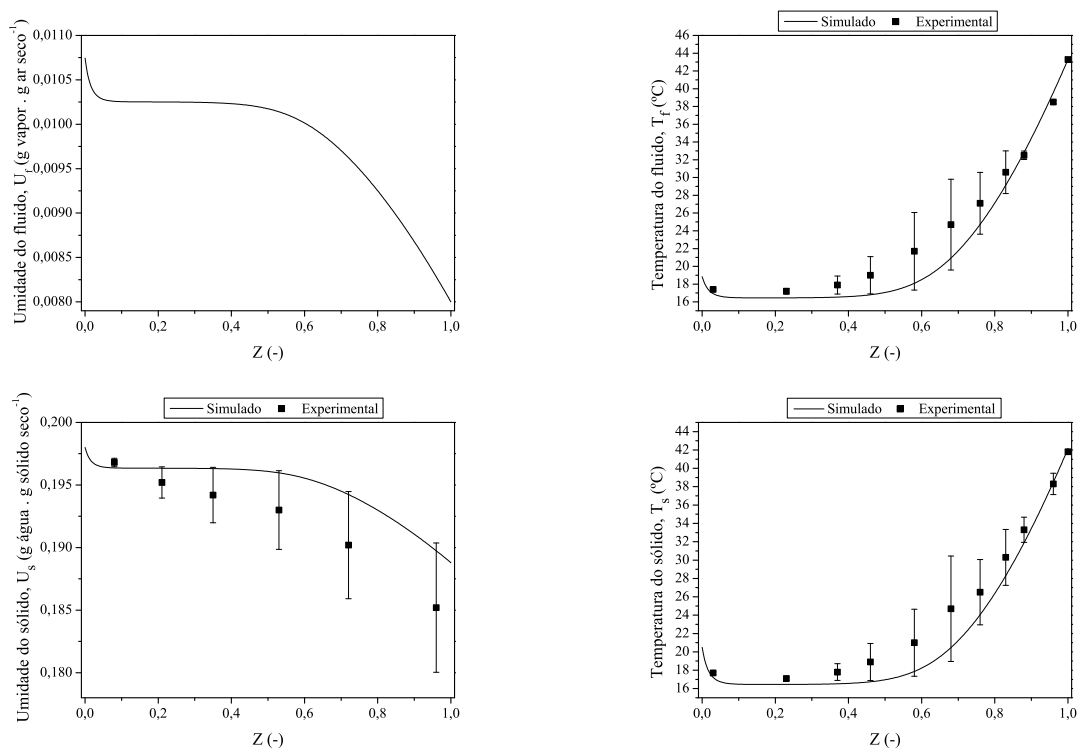


Figura B.21: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 21

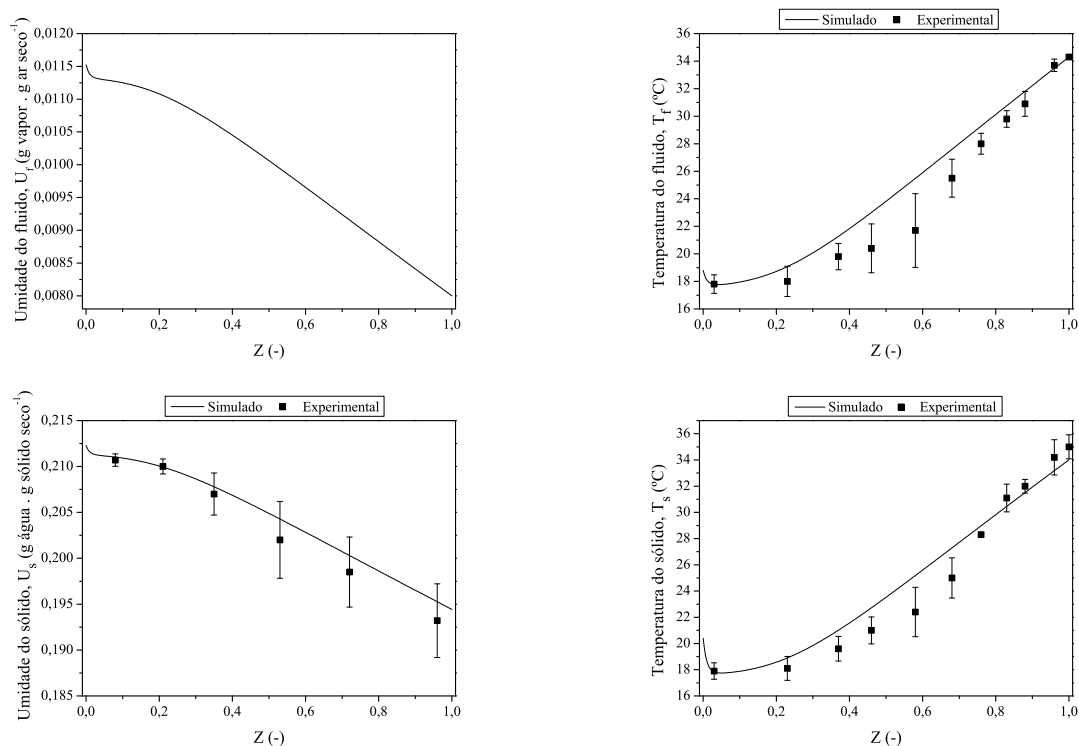


Figura B.22: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 22

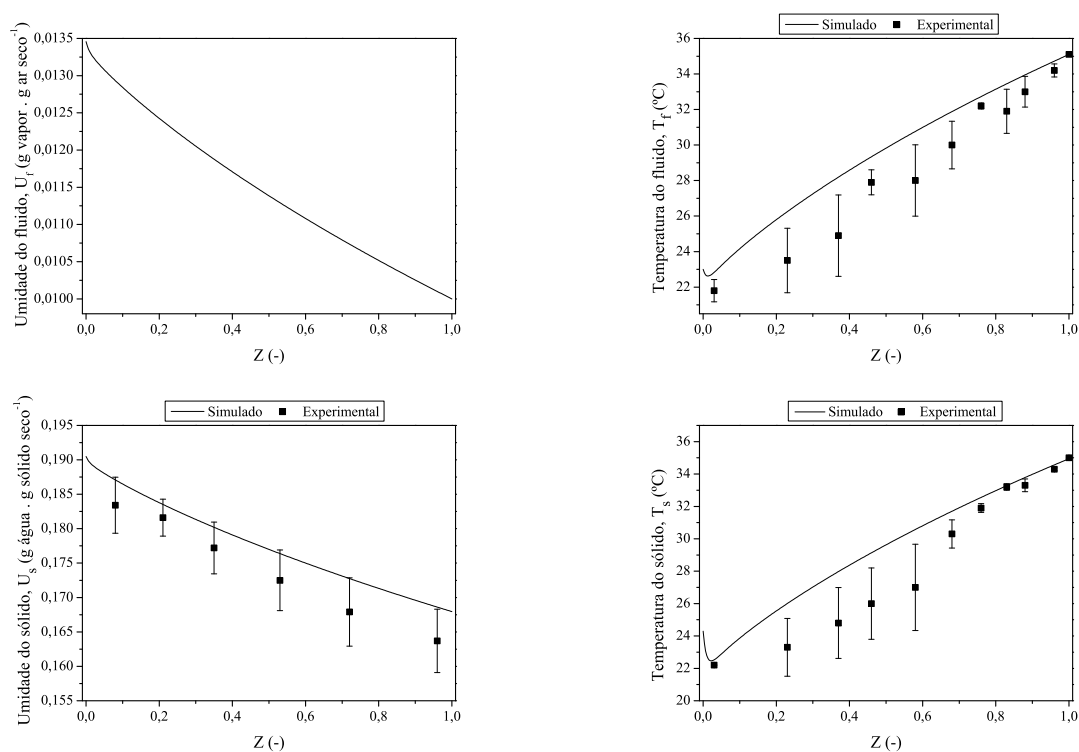


Figura B.23: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 23

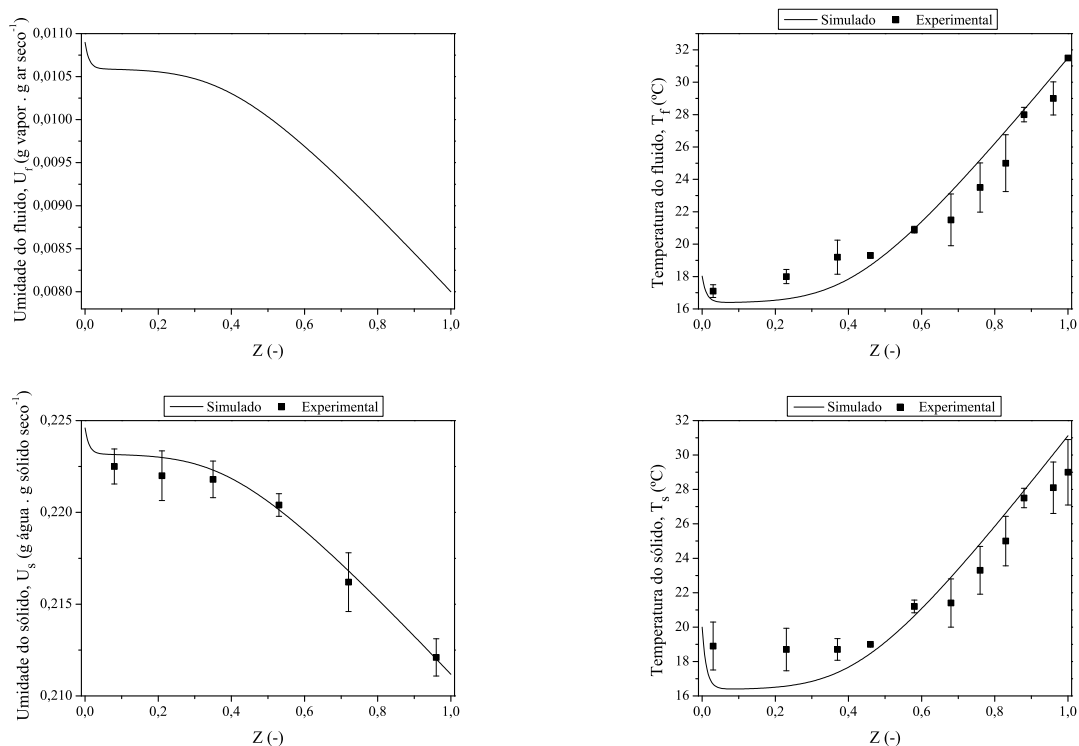


Figura B.24: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 24

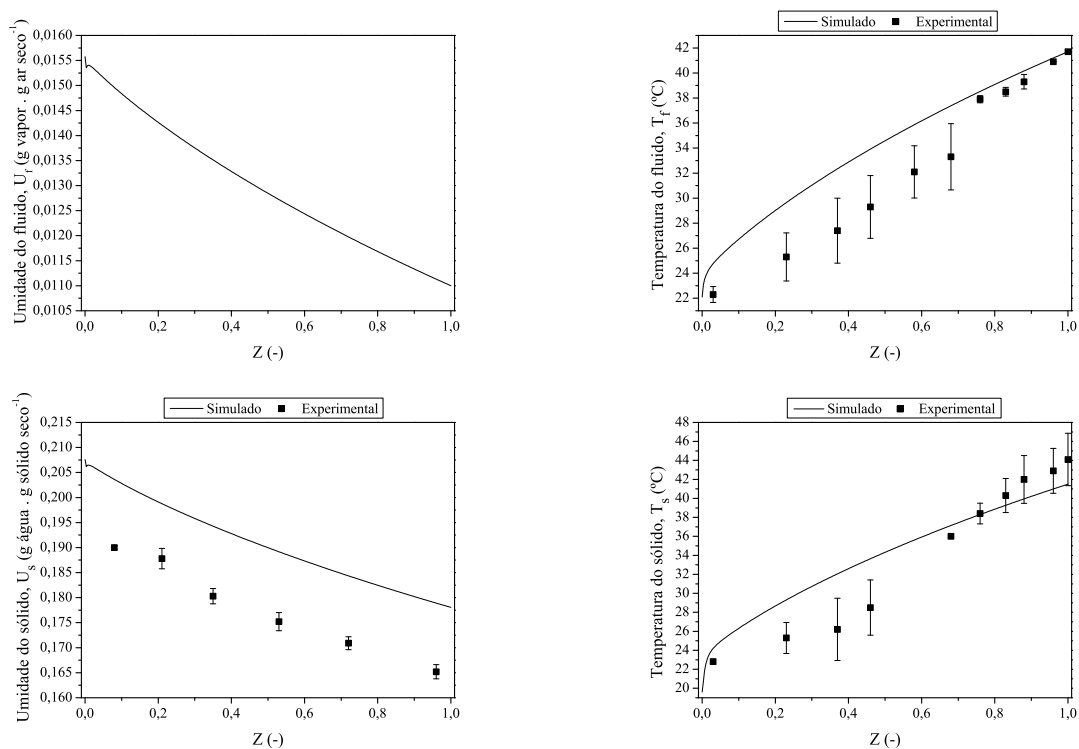


Figura B.25: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 25

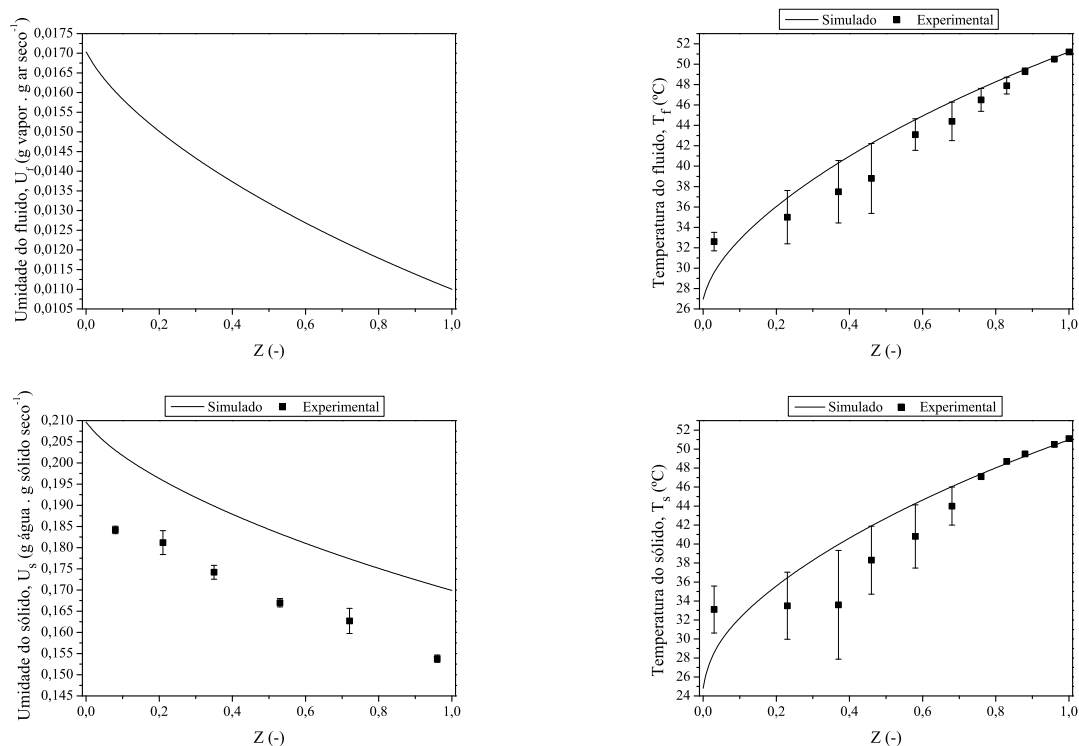


Figura B.26: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 26

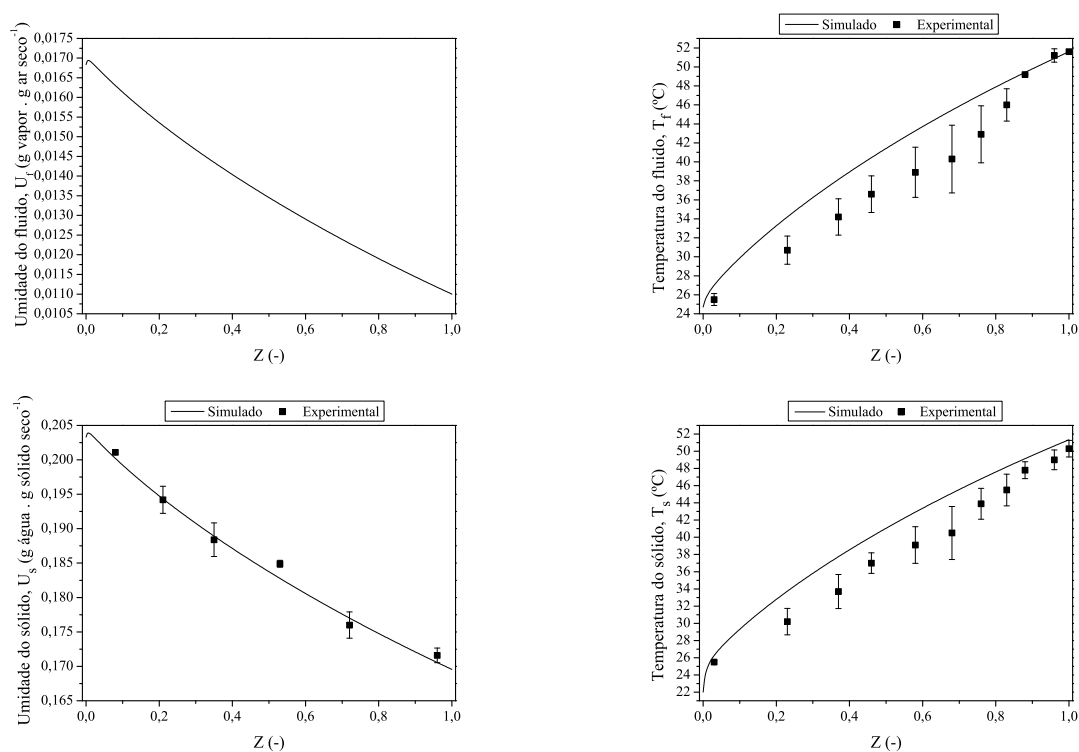


Figura B.27: Perfis de Umidade e Temperatura do Experimento 27



---

---

# APÊNDICE C

---

## Ajuste das Equações de Qualidade

Este Apêndice apresenta o ajuste linear das equações de qualidade para o escoamento concorrente e contracorrente. As tabelas apresentam as respostas dos índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras em relação ao comprimento de cada seção do secador de múltiplos estágios.

### C.1 Escoamento Concorrente

As Tabelas C.1 a C.3 apresentam os dados do escoamento concorrente para os índices de germinação, vigor e fissuras, respectivamente. Os valores dos parâmetros estatísticos são apresentados nas Tabelas C.4 a C.6.

Tabela C.1: Respostas do índice de germinação para o escoamento concorrente.

Experimento	L(cm)						
	64	32	26,4	21,33	16	12,8	10,67
1	98,0	99,0	99,2	99,3	99,5	99,6	99,7
2	98,8	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,8
3	96,0	98,0	98,4	98,7	99,0	99,2	99,3
4	97,5	98,8	99,0	99,2	99,4	99,5	99,6
5	98,7	99,4	99,5	99,6	99,7	99,7	99,8
6	98,7	99,4	99,5	99,6	99,7	99,7	99,8
7	95,7	97,9	98,2	98,6	98,9	99,1	99,3
8	96,0	98,0	98,4	98,7	99,0	99,2	99,3
9	99,5	99,8	99,8	99,8	99,9	99,9	99,9
10	99,5	99,8	99,8	99,8	99,9	99,9	99,9
11	98,0	99,0	99,2	99,3	99,5	99,6	99,7
12	98,5	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8
13	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
14	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
15	97,0	98,5	98,8	99,0	99,3	99,4	99,5
16	96,4	98,2	98,5	98,8	99,1	99,3	99,4
17	98,5	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8
18	98,0	99,0	99,2	99,3	99,5	99,6	99,7
19	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
20	97,0	98,5	98,8	99,0	99,3	99,4	99,5
21	99,0	99,5	99,6	99,7	99,8	99,8	99,8
22	97,0	98,5	98,8	99,0	99,3	99,4	99,5
23	95,0	97,5	97,9	98,3	98,8	99,0	99,2
24	97,0	98,5	98,8	99,0	99,3	99,4	99,5
25	97,8	98,9	99,1	99,3	99,5	99,6	99,6
26	98,0	99,0	99,2	99,3	99,5	99,6	99,7

Tabela C.2: Respostas do índice de vigor para o escoamento concorrente.

Experimento	L(cm)						
	64	32	26,4	21,33	16	12,8	10,67
1	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
2	94,2	97,1	97,6	98,1	98,6	98,8	99,0
3	88,9	94,5	95,4	96,3	97,2	97,8	98,2
4	84,0	92,0	93,4	94,7	96,0	96,8	97,3
5	88,3	94,2	95,2	96,1	97,1	97,7	98,0
6	87,0	93,5	94,6	95,7	96,8	97,4	97,8
7	80,8	90,4	92,1	93,6	95,2	96,2	96,8
8	80,4	90,2	91,9	93,5	95,1	96,1	96,7
9	97,0	98,5	98,8	99,0	99,3	99,4	99,5
10	95,0	97,5	97,9	98,3	98,8	99,0	99,2
11	86,5	93,3	94,4	95,5	96,6	97,3	97,8
12	89,9	95,0	95,8	96,6	97,5	98,0	98,3
13	94,7	97,4	97,8	98,2	98,7	98,9	99,1
14	92,6	96,3	96,9	97,5	98,2	98,5	98,8
15	92,0	96,0	96,7	97,3	98,0	98,4	98,7
16	95,8	97,9	98,3	98,6	99,0	99,2	99,3
17	91,0	95,5	96,3	97,0	97,8	98,2	98,5
18	94,6	97,3	97,8	98,2	98,7	98,9	99,1
19	96,3	98,2	98,5	98,8	99,1	99,3	99,4
20	81,9	91,0	92,5	94,0	95,5	96,4	97,0
21	99,0	99,5	99,6	99,7	99,8	99,8	99,8
22	97,4	98,7	98,9	99,1	99,4	99,5	99,6
23	79,1	89,6	91,4	93,0	94,8	95,8	96,5
24	93,0	96,5	97,1	97,7	98,3	98,6	98,8
25	91,0	95,5	96,3	97,0	97,8	98,2	98,5
26	91,0	95,5	96,3	97,0	97,8	98,2	98,5

Tabela C.3: Respostas do índice de sementes não fissuradas para o escoamento concorrente.

Experimento	L(cm)						
	64	32	26,4	21,33	16	12,8	10,67
1	98,8	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,8
2	97,0	98,5	98,8	99,0	99,3	99,4	99,5
3	97,9	99,0	99,1	99,3	99,5	99,6	99,7
4	96,5	98,3	98,6	98,8	99,1	99,3	99,4
5	97,8	98,9	99,1	99,3	99,5	99,6	99,6
6	96,8	98,4	98,7	98,9	99,2	99,4	99,5
7	97,4	98,7	98,9	99,1	99,4	99,5	99,6
8	94,8	97,4	97,9	98,3	98,7	99,0	99,1
9	99,5	99,8	99,8	99,8	99,9	99,9	99,9
10	96,0	98,0	98,4	98,7	99,0	99,2	99,3
11	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
12	96,5	98,3	98,6	98,8	99,1	99,3	99,4
13	98,8	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8	99,8
14	94,0	97,0	97,5	98,0	98,5	98,8	99,0
15	99,5	99,8	99,8	99,8	99,9	99,9	99,9
16	96,3	98,2	98,5	98,8	99,1	99,3	99,4
17	95,0	97,5	97,9	98,3	98,8	99,0	99,2
18	91,0	95,5	96,3	97,0	97,8	98,2	98,5
19	98,9	99,5	99,5	99,6	99,7	99,8	99,8
20	98,5	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8
21	98,5	99,3	99,4	99,5	99,6	99,7	99,8
22	95,7	97,9	98,2	98,6	98,9	99,1	99,3
23	97,2	98,6	98,8	99,1	99,3	99,4	99,5
24	99,5	99,8	99,8	99,8	99,9	99,9	99,9
25	97,5	98,8	99,0	99,2	99,4	99,5	99,6
26	97,8	98,9	99,1	99,3	99,5	99,6	99,6







## C.2 Escoamento Contracorrente

As Tabelas C.7 a C.9 apresentam os dados do escoamento contracorrente para os índices de germinação, vigor e fissuras, respectivamente. Os valores dos parâmetros estatísticos são apresentados nas Tabelas C.10 a C.12.

Tabela C.7: Respostas do índice de germinação para o escoamento contracorrente.

Experimento	L(cm)						
	52,8	32	26,4	17,6	13,2	10,56	8,8
1	98,4	99,0	99,2	99,5	99,6	99,7	99,7
2	97,0	98,2	98,5	99,0	99,3	99,4	99,5
3	97,1	98,2	98,6	99,0	99,3	99,4	99,5
4	95,8	97,5	97,9	98,6	99,0	99,2	99,3
5	97,4	98,4	98,7	99,1	99,4	99,5	99,6
6	97,1	98,2	98,6	99,0	99,3	99,4	99,5
7	94,4	96,6	97,2	98,1	98,6	98,9	99,1
8	92,8	95,6	96,4	97,6	98,2	98,6	98,8
9	98,8	99,3	99,4	99,6	99,7	99,8	99,8
10	98,0	98,8	99,0	99,3	99,5	99,6	99,7
11	98,0	98,8	99,0	99,3	99,5	99,6	99,7
12	96,7	98,0	98,4	98,9	99,2	99,3	99,5
13	98,4	99,0	99,2	99,5	99,6	99,7	99,7
14	97,5	98,5	98,8	99,2	99,4	99,5	99,6
15	95,7	97,4	97,9	98,6	98,9	99,1	99,3
16	94,2	96,5	97,1	98,1	98,6	98,8	99,0
17	98,6	99,2	99,3	99,5	99,7	99,7	99,8
18	96,9	98,1	98,5	99,0	99,2	99,4	99,5
19	99,0	99,4	99,5	99,7	99,8	99,8	99,8
20	94,8	96,8	97,4	98,3	98,7	99,0	99,1
21	98,6	99,2	99,3	99,5	99,7	99,7	99,8
22	96,9	98,1	98,5	99,0	99,2	99,4	99,5
23	96,6	97,9	98,3	98,9	99,2	99,3	99,4
24	99,3	99,6	99,7	99,8	99,8	99,9	99,9
25	97,7	98,6	98,9	99,2	99,4	99,5	99,6
26	98,0	98,8	99,0	99,3	99,5	99,6	99,7

Tabela C.8: Respostas do índice de vigor para o escoamento contracorrente.

Experimento	L(cm)						
	52,8	32	26,4	17,6	13,2	10,56	8,8
1	95,9	97,5	98,0	98,6	99,0	99,2	99,3
2	95,1	97,0	97,6	98,4	98,8	99,0	99,2
3	92,3	95,3	96,2	97,4	98,1	98,5	98,7
4	93,3	95,9	96,7	97,8	98,3	98,7	98,9
5	93,5	96,1	96,8	97,8	98,4	98,7	98,9
6	93,9	96,3	97,0	98,0	98,5	98,8	99,0
7	87,9	92,7	94,0	96,0	97,0	97,6	98,0
8	86,3	91,7	93,2	95,4	96,6	97,3	97,7
9	97,4	98,4	98,7	99,1	99,4	99,5	99,6
10	96,8	98,1	98,4	98,9	99,2	99,4	99,5
11	94,4	96,6	97,2	98,1	98,6	98,9	99,1
12	94,7	96,8	97,4	98,2	98,7	98,9	99,1
13	95,7	97,4	97,9	98,6	98,9	99,1	99,3
14	93,8	96,2	96,9	97,9	98,5	98,8	99,0
15	93,0	95,8	96,5	97,7	98,3	98,6	98,8
16	91,4	94,8	95,7	97,1	97,9	98,3	98,6
17	96,9	98,1	98,5	99,0	99,2	99,4	99,5
18	95,1	97,0	97,6	98,4	98,8	99,0	99,2
19	95,2	97,1	97,6	98,4	98,8	99,0	99,2
20	91,6	94,9	95,8	97,2	97,9	98,3	98,6
21	97,1	98,2	98,6	99,0	99,3	99,4	99,5
22	91,5	94,8	95,8	97,2	97,9	98,3	98,6
23	90,0	93,9	95,0	96,7	97,5	98,0	98,3
24	96,6	97,9	98,3	98,9	99,2	99,3	99,4
25	95,7	97,4	97,9	98,6	98,9	99,1	99,3
26	96,3	97,8	98,2	98,8	99,1	99,3	99,4

Tabela C.9: Respostas do índice de sementes não fissuradas para o escoamento concorrente.

Experimento	L(cm)						
	52,8	32	26,4	17,6	13,2	10,56	8,8
1	98,2	98,9	99,1	99,4	99,6	99,6	99,7
2	97,8	98,7	98,9	99,3	99,5	99,6	99,6
3	97,1	98,2	98,6	99,0	99,3	99,4	99,5
4	97,0	98,2	98,5	99,0	99,3	99,4	99,5
5	95,3	97,2	97,7	98,4	98,8	99,1	99,2
6	94,7	96,8	97,4	98,2	98,7	98,9	99,1
7	96,8	98,1	98,4	98,9	99,2	99,4	99,5
8	94,9	96,9	97,5	98,3	98,7	99,0	99,2
9	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0	100,0
10	99,2	99,5	99,6	99,7	99,8	99,8	99,9
11	97,8	98,7	98,9	99,3	99,5	99,6	99,6
12	97,2	98,3	98,6	99,1	99,3	99,4	99,5
13	97,8	98,7	98,9	99,3	99,5	99,6	99,6
14	96,3	97,8	98,2	98,8	99,1	99,3	99,4
15	95,7	97,4	97,9	98,6	98,9	99,1	99,3
16	94,7	96,8	97,4	98,2	98,7	98,9	99,1
17	98,3	99,0	99,2	99,4	99,6	99,7	99,7
18	97,8	98,7	98,9	99,3	99,5	99,6	99,6
19	98,4	99,0	99,2	99,5	99,6	99,7	99,7
20	97,4	98,4	98,7	99,1	99,4	99,5	99,6
21	99,0	99,4	99,5	99,7	99,8	99,8	99,8
22	94,9	96,9	97,5	98,3	98,7	99,0	99,2
23	96,3	97,8	98,2	98,8	99,1	99,3	99,4
24	97,9	98,7	99,0	99,3	99,5	99,6	99,7
25	97,8	98,7	98,9	99,3	99,5	99,6	99,6
26	98,0	98,8	99,0	99,3	99,5	99,6	99,7









---

---

# APÊNDICE D

---

## Condições Operacionais Otimizadas

Este Apêndice apresenta as condições operacionais otimizadas para o escoamento concorrente e contracorrente. São apresentados os resultados das funções objetivo conforme descritos no Capítulo 5 (maximização dos índices de qualidade e maximização da remoção de umidade).

### D.1 Maximização dos Índices de Qualidade

As tabelas apresentam os valores de  $T_{f0}$ ,  $Q_s$ ,  $V$  e  $UR$ , obtidos através da técnica de Evolução Diferencial e através da Simulação de um estágio e de múltiplos estágios, para a maximização dos índices de germinação, vigor e sementes sem fissuras.

As Tabelas D.1 e D.3 apresentam os dados para as variáveis operacionais, para os escoamentos concorrente e contracorrente, respectivamente, de apenas um estágio. Para a simulação considerando múltiplos estágios, as Tabelas D.2 e D.4 apresentam os resultados encontrados para os escoamentos concorrente e contracorrente, respectivamente.

Tabela D.1: Resultados da otimização com função objetivo de maximizar os índices de qualidade, para o escoamento concorrente de 1 estágio.

Experimento	Otimização				Simulação			
	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$
1	39,10	50,30	1,94	25,99	37,00	75,46	2,00	7,11
2	39,10	50,30	1,88	26,56	37,00	74,50	3,00	36,70
3	39,10	50,30	1,26	29,40	37,00	88,08	4,00	28,04
4	39,10	50,30	1,66	24,67	42,50	67,87	2,00	22,24
5	39,10	54,89	1,72	26,86	42,50	77,56	2,00	19,17
6	39,10	50,30	1,45	28,12	42,50	73,48	3,00	22,58
7	39,10	50,30	1,26	29,40	42,50	79,01	3,00	17,45
8	39,10	108,80	1,78	29,40	42,50	76,43	4,00	17,45
9	39,10	50,30	1,90	25,29	42,50	75,12	4,00	17,45
10	39,10	50,30	1,35	28,30	48,00	73,19	2,00	16,50
11	39,10	50,30	1,26	29,11	48,00	74,71	2,00	11,59
12	39,10	50,30	1,51	27,63	48,00	66,39	3,00	15,08
13	39,10	50,30	1,61	25,08	48,00	79,41	3,00	13,15
14	39,10	50,30	1,67	25,07	48,00	75,40	4,00	16,37
15	39,10	50,30	1,26	29,40	48,00	69,94	4,00	14,05
16	39,10	105,86	1,67	29,40	54,50	69,64	2,00	10,48
17	39,20	50,30	1,75	27,72	54,50	71,43	3,00	10,48
18	39,10	109,70	1,72	29,40	54,50	74,23	4,00	10,48
19	39,14	50,30	1,73	25,39	43,50	38,30	0,90	21,43
20	39,10	50,30	1,58	26,62	44,60	43,49	1,59	15,03
21	39,10	109,70	1,56	29,40	43,30	45,08	0,95	13,43
22	39,10	55,10	1,26	28,87	34,30	44,45	1,36	21,84
23	39,10	56,28	1,91	26,11	35,10	47,19	1,90	26,03
24	39,10	50,30	1,89	25,50	31,50	47,78	1,31	25,58
25	39,10	50,30	1,84	25,99	41,70	46,04	1,85	19,99
26	39,10	54,46	1,73	24,50	51,20	45,10	1,90	12,31
27	39,10	50,30	1,26	29,40	51,60	44,12	1,64	12,07

Tabela D.2: Resultados da otimização com função objetivo de maximizar os índices de qualidade, para o escoamento concorrente de N estágios.

Experimento	Otimização					Simulação			
	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$	$N_{est}$	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$
1	39,10	50,30	1,94	25,99	1	37,00	75,46	2,00	7,11
2	39,10	50,30	1,88	26,56	1	37,00	74,50	3,00	36,70
3	39,10	50,30	1,26	29,40	1	37,00	88,08	4,00	28,04
4	39,10	50,30	1,66	24,67	1	42,50	67,87	2,00	22,24
5	39,10	54,89	1,72	26,86	1	42,50	77,56	2,00	19,17
6	39,10	50,30	1,45	28,12	1	42,50	73,48	3,00	22,58
7	39,10	50,30	1,26	29,40	1	42,50	79,01	3,00	17,45
8	39,10	108,80	1,78	29,40	1	42,50	76,43	4,00	17,45
9	39,10	50,30	1,90	25,29		142,50	75,12	4,00	17,45
10	39,10	50,30	1,35	28,30	1	48,00	73,19	2,00	16,50
11	39,10	50,30	1,26	29,11	1	48,00	74,71	2,00	11,59
12	39,10	50,30	1,51	27,63	1	48,00	66,39	3,00	15,08
13	39,10	50,30	1,61	25,08	1	48,00	79,41	3,00	13,15
14	39,10	50,30	1,67	25,07	1	48,00	75,40	4,00	16,37
15	39,10	50,30	1,26	29,40	1	48,00	69,94	4,00	14,05
16	39,10	105,86	1,67	29,40	1	54,50	69,64	2,00	10,48
17	39,20	50,30	1,75	27,72	1	54,50	71,43	3,00	10,48
18	39,10	109,70	1,72	29,40	1	54,50	74,23	4,00	10,48
19	39,14	50,30	1,73	25,39	1	43,50	38,30	0,90	21,43
20	39,10	50,30	1,58	26,62	1	44,60	43,49	1,59	15,03
21	39,10	109,70	1,56	29,40	1	43,30	45,08	0,95	13,43
22	39,10	55,10	1,26	28,87	1	34,30	44,45	1,36	21,84
23	39,10	56,28	1,91	26,11	1	35,10	47,19	1,90	26,03
24	39,10	50,30	1,89	25,50	1	31,50	47,78	1,31	25,58
25	39,10	50,30	1,84	25,99	1	41,70	46,04	1,85	19,99
26	39,10	54,46	1,73	24,50	1	51,20	45,10	1,90	12,31
27	39,10	50,30	1,26	29,40	1	51,60	44,12	1,64	12,07

Tabela D.3: Resultados da otimização com função objetivo de maximizar os índices de qualidade, para o escoamento contracorrente de 1 estágio.

Experimento	Otimização				Simulação			
	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$
1	40,70	40,98	1,80	7,11	37,00	75,46	2,00	7,11
2	40,73	40,88	1,80	36,70	37,00	74,50	3,00	36,70
3	40,69	41,08	1,80	28,04	37,00	88,08	4,00	28,04
4	40,71	41,10	1,80	22,24	42,50	67,87	2,00	22,24
5	40,68	41,01	1,80	19,17	42,50	77,56	2,00	19,17
6	40,71	41,06	1,80	22,58	42,50	73,48	3,00	22,58
7	40,71	40,96	1,80	17,45	42,50	79,01	3,00	17,45
8	40,73	40,95	1,80	17,45	42,50	76,43	4,00	17,45
9	40,71	40,90	1,80	17,45	42,50	75,12	4,00	17,45
10	40,70	41,02	1,80	16,50	48,00	73,19	2,00	16,50
11	40,73	40,91	1,80	11,59	48,00	74,71	2,00	11,59
12	40,70	41,03	1,80	15,08	48,00	66,39	3,00	15,08
13	40,76	40,92	1,80	13,15	48,00	79,41	3,00	13,15
14	40,70	41,04	1,80	16,37	48,00	75,40	4,00	16,37
15	40,73	40,96	1,80	14,05	48,00	69,94	4,00	14,05
16	40,70	41,01	1,80	10,48	54,50	69,64	2,00	10,48
17	40,71	41,04	1,80	10,48	54,50	71,43	3,00	10,48
18	40,70	41,00	1,80	10,48	54,50	74,23	4,00	10,48
19	40,71	40,85	1,80	21,43	43,50	38,30	0,90	21,43
20	40,73	40,90	1,80	15,03	44,60	43,49	1,59	15,03
21	40,68	40,91	1,80	13,43	43,30	45,08	0,95	13,43
22	40,71	40,91	1,80	21,84	34,30	44,45	1,36	21,84
23	40,70	41,01	1,80	26,03	35,10	47,19	1,90	26,03
24	40,72	40,95	1,80	25,58	31,50	47,78	1,31	25,58
25	40,71	40,92	1,80	19,99	41,70	46,04	1,85	19,99
26	40,72	40,92	1,80	12,31	51,20	45,10	1,90	12,31
27	40,72	40,92	1,80	12,07	51,60	44,12	1,64	12,07

Tabela D.4: Resultados da otimização com função objetivo de maximizar os índices de qualidade, para o escoamento contracorrente de N estágios.

Experimento	Otimização					Simulação			
	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$	$N_{est}$	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$
1	37,83	41,72	1,00	28,26	4	37,00	75,46	2,00	7,11
2	37,47	43,39	0,89	28,15	6	37,00	74,50	3,00	36,70
3	37,94	46,53	1,11	27,21	6	37,00	88,08	4,00	28,04
4	36,57	42,17	1,07	27,89	5	42,50	67,87	2,00	22,24
5	37,41	40,83	0,96	28,17	6	42,50	77,56	2,00	19,17
6	37,57	42,45	1,18	27,84	6	42,50	73,48	3,00	22,58
7	37,18	43,10	1,05	27,63	5	42,50	79,01	3,00	17,45
8	37,09	43,35	1,14	27,60	5	42,50	76,43	4,00	17,45
9	37,00	42,95	1,18	27,71	5	42,50	75,12	4,00	17,45
10	37,63	43,98	1,04	27,49	5	48,00	73,19	2,00	16,50
11	37,16	43,98	1,20	27,46	4	48,00	74,71	2,00	11,59
12	36,83	43,54	1,16	27,54	5	48,00	66,39	3,00	15,08
13	37,25	43,33	0,95	27,63	5	48,00	79,41	3,00	13,15
14	36,93	43,20	1,07	27,65	4	48,00	75,40	4,00	16,37
15	36,97	43,14	1,12	27,67	5	48,00	69,94	4,00	14,05
16	37,18	42,93	1,07	27,75	5	54,50	69,64	2,00	10,48
17	37,33	43,84	1,00	27,58	6	54,50	71,43	3,00	10,48
18	37,59	43,18	1,10	27,66	5	54,50	74,23	4,00	10,48
19	37,00	43,30	1,08	27,60	4	43,50	38,30	0,90	21,43
20	36,57	42,17	1,07	27,89	5	44,60	43,49	1,59	15,03
21	37,11	42,90	1,01	27,73	6	43,30	45,08	0,95	13,43
22	37,36	43,52	1,00	27,65	6	34,30	44,45	1,36	21,84
23	37,69	42,67	1,00	27,80	5	35,10	47,19	1,90	26,03
24	36,70	43,04	1,20	27,69	5	31,50	47,78	1,31	25,58
25	37,27	43,68	1,06	27,60	6	41,70	46,04	1,85	19,99
26	37,11	44,00	1,11	27,31	5	51,20	45,10	1,90	12,31
27	36,84	43,00	1,15	27,70	6	51,60	44,12	1,64	12,07

## D.2 Maximização da Remoção de Umidade

As tabelas apresentam os valores de  $T_{f0}$ ,  $Q_s$ ,  $V$  e  $UR$ , obtidos através da técnica de Evolução Diferencial e através da Simulação de um estágio e de múltiplos estágios, para a maximização da remoção de umidade.

As Tabelas D.5 e D.7 apresentam os dados para as variáveis operacionais, para os escoamentos concorrente e contracorrente, respectivamente, de apenas um estágio. Para a simulação considerando múltiplos estágios, as Tabelas D.6 e D.8 apresentam os resultados encontrados para os escoamentos concorrente e contracorrente, respectivamente.

Tabela D.5: Resultados da otimização com função objetivo de maximizar a remoção de umidade, para o escoamento concorrente de 1 estágio.

Experimento	Otimização				Simulação			
	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$
1	56,90	50,30	2,74	21,64	37,00	75,46	2,00	7,11
2	56,90	50,30	2,74	22,52	37,00	74,50	3,00	36,70
3	56,90	50,30	2,74	29,40	37,00	88,08	4,00	28,04
4	56,90	50,30	2,74	29,07	42,50	67,87	2,00	22,24
5	56,90	54,89	2,74	29,40	42,50	77,56	2,00	19,17
6	56,90	50,30	2,74	29,40	42,50	73,48	3,00	22,58
7	56,90	50,30	2,74	23,28	42,50	79,01	3,00	17,45
8	56,90	50,30	2,74	24,53	42,50	76,43	4,00	17,45
9	56,90	50,30	2,74	22,39	42,50	75,12	4,00	17,45
10	56,90	50,30	2,74	29,40	48,00	73,19	2,00	16,50
11	56,90	50,30	2,74	25,14	48,00	74,71	2,00	11,59
12	56,90	50,30	2,74	20,99	48,00	66,39	3,00	15,08
13	56,90	50,30	2,74	22,97	48,00	79,41	3,00	13,15
14	56,90	50,30	2,74	23,10	48,00	75,40	4,00	16,37
15	56,90	50,30	2,74	22,36	48,00	69,94	4,00	14,05
16	56,90	50,30	2,74	27,68	54,50	69,64	2,00	10,48
17	39,20	50,30	2,74	27,16	54,50	71,43	3,00	10,48
18	56,90	50,30	2,74	25,46	54,50	74,23	4,00	10,48
19	39,14	50,30	2,74	27,90	43,50	38,30	0,90	21,43
20	56,90	50,30	2,74	26,05	44,60	43,49	1,59	15,03
21	56,90	50,30	2,74	26,55	43,30	45,08	0,95	13,43
22	56,90	50,30	2,74	29,40	34,30	44,45	1,36	21,84
23	56,90	50,30	2,74	25,27	35,10	47,19	1,90	26,03
24	56,90	50,30	2,74	25,58	31,50	47,78	1,31	25,58
25	56,90	50,30	2,74	20,60	41,70	46,04	1,85	19,99
26	56,90	54,46	2,74	29,40	51,20	45,10	1,90	12,31
27	56,90	50,30	2,74	29,40	51,60	44,12	1,64	12,07

Tabela D.6: Resultados da otimização com função objetivo de maximizar a remoção de umidade, para o escoamento concorrente de N estágios.

Experimento	Otimização					Simulação			
	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$	$N_{est}$	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$
1	56,90	50,30	2,74	20,60	6	37,00	75,46	2,00	7,11
2	56,90	50,30	2,74	27,39	6	37,00	74,50	3,00	36,70
3	56,90	50,30	2,74	27,98	6	37,00	88,08	4,00	28,04
4	56,90	50,30	2,74	20,60	6	42,50	67,87	2,00	22,24
5	56,90	50,30	2,74	22,53	6	42,50	77,56	2,00	19,17
6	56,90	50,30	2,74	27,54	6	42,50	73,48	3,00	22,58
7	56,90	50,30	2,74	25,19	6	42,50	79,01	3,00	17,45
8	56,90	50,30	2,74	25,06	6	42,50	76,43	4,00	17,45
9	56,90	50,30	2,74	29,40	6	42,50	75,12	4,00	17,45
10	56,90	50,30	2,74	29,40	6	48,00	73,19	2,00	16,50
11	56,90	50,30	2,74	29,40	6	48,00	74,71	2,00	11,59
12	56,90	50,30	2,74	20,60	6	48,00	66,39	3,00	15,08
13	56,90	50,30	2,74	29,40	6	48,00	79,41	3,00	13,15
14	56,90	50,30	2,74	20,60	5	48,00	75,40	4,00	16,37
15	56,90	50,30	2,74	27,55	6	48,00	69,94	4,00	14,05
16	56,90	50,30	2,74	22,94	6	54,50	69,64	2,00	10,48
17	56,90	50,30	2,74	24,08	6	54,50	71,43	3,00	10,48
18	56,90	50,30	2,74	29,40	6	54,50	74,23	4,00	10,48
19	56,90	50,30	2,74	20,60	5	43,50	38,30	0,90	21,43
20	56,90	50,30	2,74	28,91	6	44,60	43,49	1,59	15,03
21	56,90	50,30	2,74	20,60	5	43,30	45,08	0,95	13,43
22	56,90	50,30	2,74	28,90	6	34,30	44,45	1,36	21,84
23	56,90	50,30	2,74	29,40	5	35,10	47,19	1,90	26,03
24	56,90	50,30	2,74	27,53	6	31,50	47,78	1,31	25,58
25	56,90	50,30	2,74	20,60	6	41,70	46,04	1,85	19,99
26	56,90	50,30	2,74	22,86	6	51,20	45,10	1,90	12,31
27	56,90	50,30	2,74	22,56	6	51,60	44,12	1,64	12,07

Tabela D.7: Resultados da otimização com função objetivo de maximizar a remoção de umidade, para o escoamento contracorrente de 1 estágio.

Experimento	Otimização				Simulação			
	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$
1	53,00	34,00	5,79	7,11	37,00	75,46	2,00	7,11
2	53,00	34,00	5,79	36,70	37,00	74,50	3,00	36,70
3	53,00	34,00	5,79	28,04	37,00	88,08	4,00	28,04
4	53,00	34,00	5,79	22,24	42,50	67,87	2,00	22,24
5	53,00	34,00	5,79	19,17	42,50	77,56	2,00	19,17
6	53,00	34,00	5,79	22,58	42,50	73,48	3,00	22,58
7	53,00	34,00	5,79	17,45	42,50	79,01	3,00	17,45
8	53,00	34,00	5,79	17,45	42,50	76,43	4,00	17,45
9	53,00	34,00	5,79	17,45	42,50	75,12	4,00	17,45
10	53,00	34,00	5,79	16,50	48,00	73,19	2,00	16,50
11	53,00	34,00	5,79	11,59	48,00	74,71	2,00	11,59
12	53,00	34,00	5,79	15,08	48,00	66,39	3,00	15,08
13	53,00	34,00	5,79	13,15	48,00	79,41	3,00	13,15
14	53,00	34,00	5,79	16,37	48,00	75,40	4,00	16,37
15	53,00	34,00	5,79	14,05	48,00	69,94	4,00	14,05
16	53,00	34,00	5,79	10,48	54,50	69,64	2,00	10,48
17	53,00	34,00	5,79	10,48	54,50	71,43	3,00	10,48
18	53,00	34,00	5,79	10,48	54,50	74,23	4,00	10,48
19	53,00	34,00	5,79	21,43	43,50	38,30	0,90	21,43
20	53,00	34,00	5,79	15,03	44,60	43,49	1,59	15,03
21	53,00	34,00	5,79	13,43	43,30	45,08	0,95	13,43
22	53,00	34,00	5,79	21,84	34,30	44,45	1,36	21,84
23	53,00	34,00	5,79	26,03	35,10	47,19	1,90	26,03
24	53,00	34,00	5,79	25,58	31,50	47,78	1,31	25,58
25	53,00	34,00	5,79	19,99	41,70	46,04	1,85	19,99
26	53,00	34,00	5,79	12,31	51,20	45,10	1,90	12,31
27	53,00	34,00	5,79	12,07	51,60	44,12	1,64	12,07

Tabela D.8: Resultados da otimização com função objetivo de maximizar a remoção de umidade, para o escoamento contracorrente de N estágios.

Experimento	Otimização					Simulação			
	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$	$N_{est}$	$T_{f0}$	$Q_s$	$V$	$UR$
1	53,00	34,00	1,00	27,62	6	37,00	75,46	2,00	7,11
2	53,00	34,00	1,00	20,50	6	37,00	74,50	3,00	36,70
3	53,00	34,00	1,00	28,78	6	37,00	88,08	4,00	28,04
4	53,00	34,00	1,00	27,19	6	42,50	67,87	2,00	22,24
5	53,00	34,00	1,00	27,61	6	42,50	77,56	2,00	19,17
6	53,00	34,00	1,00	29,40	6	42,50	73,48	3,00	22,58
7	53,00	34,00	1,00	25,93	6	42,50	79,01	3,00	17,45
8	53,00	34,00	1,00	20,96	6	42,50	76,43	4,00	17,45
9	53,00	34,00	1,00	20,50	6	42,50	75,12	4,00	17,45
10	53,00	34,00	1,00	29,24	6	48,00	73,19	2,00	16,50
11	53,00	34,00	1,00	20,50	6	48,00	74,71	2,00	11,59
12	53,00	34,00	1,00	22,98	6	48,00	66,39	3,00	15,08
13	53,00	34,00	1,00	21,90	6	48,00	79,41	3,00	13,15
14	53,00	34,00	1,00	23,43	6	48,00	75,40	4,00	16,37
15	53,00	34,00	1,00	29,40	6	48,00	69,94	4,00	14,05
16	53,00	34,00	1,00	23,20	6	54,50	69,64	2,00	10,48
17	53,00	34,00	1,00	20,50	6	54,50	71,43	3,00	10,48
18	53,00	34,00	1,00	20,50	6	54,50	74,23	4,00	10,48
19	53,00	34,00	1,00	25,60	6	43,50	38,30	0,90	21,43
20	53,00	34,00	1,00	24,61	6	44,60	43,49	1,59	15,03
21	53,00	34,00	1,00	29,40	6	43,30	45,08	0,95	13,43
22	53,00	34,00	1,00	20,50	6	34,30	44,45	1,36	21,84
23	53,00	34,00	1,00	29,24	6	35,10	47,19	1,90	26,03
24	53,00	34,00	1,00	28,17	6	31,50	47,78	1,31	25,58
25	53,00	34,00	1,00	20,50	6	41,70	46,04	1,85	19,99
26	53,00	34,00	1,00	26,64	6	51,20	45,10	1,90	12,31
27	53,00	34,00	1,00	21,17	6	51,60	44,12	1,64	12,07