



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE TERMOFLUIDODINÂMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE SECAGEM DE URUCUM
(*Bixa orellana* L.) EM LEITO FIXO**

Lênio José Guerreiro de Faria

**Campinas
1998**



**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: ENGENHARIA DE PROCESSOS**

**ANÁLISE EXPERIMENTAL DO PROCESSO DE SECAGEM DE URUCUM
(*Bixa orellana* L.) EM LEITO FIXO**

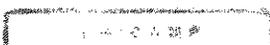
**Autor: Lênio José Guerreiro de Faria
Orientador: Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha**

Tese de Doutorado apresentada à Faculdade de Engenharia Química como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Doutor em Engenharia Química.

Campinas - SP

Dezembro/1998

6698066



Ficha Catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade Estadual de Campinas -
BAE

F 224a Faria, Lênio José Guerreiro de

Análise Experimental do Processo de Secagem de Urucum (*Bixa de orellana* L.) em Leito Fixo. Lênio José Guerreiro de Faria. -
Campinas, SP, 1998.

274 f

Orientador: Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Campinas -
Faculdade de Engenharia Química.

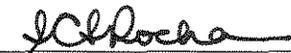
1. SECAGEM 2. ISOTERMAS DE DESSORÇÃO 3.
URUCUM 4. CALOR ISOSTÉRICO DE SORÇÃO 5. SECADOR
DE LEITO FIXO I. Rocha, Sandra Cristina dos Santos II.
Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia
Química III. Título.

Esta versão corresponde a redação final da Tese de Doutorado em Engenharia Química defendida pelo Engenheiro Lênio José Guerreiro de Faria e aprovado pela Comissão Julgadora em 18 de dezembro de 1998



Profª. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha - Orientadora

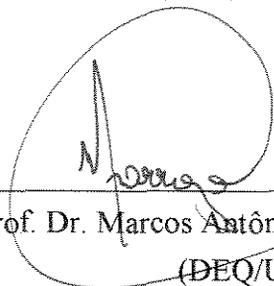
Tese de Doutorado defendida e aprovada em 18 de dezembro de 1998 pela banca examinadora
constituída pelos professores doutores:



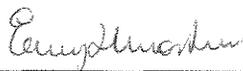
Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha
(Orientadora, DTF/FEQ/UNICAMP)



Profa. Dra. Maria Elena Santos Taqueda
(DEQ/EPUSP)



Prof. Dr. Marcos Antônio de Souza Barrozo
(DEQ/UFU)



Profa. Dra. Enny Therezinha Martucci
(FEA/UNICAMP)



Prof. Dr. Kil Jin Park
(FEAGRI/UNICAMP)

AGRADECIMENTOS

À Profa. Dra. Sandra Cristina dos Santos Rocha, pela orientação ética, dedicação, apoio e principalmente pela amizade e confiança depositada em todo o decorrer deste trabalho.

À Cristiane Costa pela constante presença, incentivo e carinho em todas as etapas deste trabalho, inestimável auxílio na execução dos ensaios, troca de idéias e no tratamento dos dados experimentais, além da esmerada digitação de todo o material da tese.

À Profa. Dra. Maria Elena Santos Taqueda pelas críticas, discussões e sugestões apresentadas durante o desenvolvimento deste trabalho e pelos inestimáveis conhecimentos transmitidos.

À Profa. Maria Aparecida Silva pela criteriosa revisão e sugestões apresentadas na monografia do exame de qualificação ao doutorado.

Ao Eng. Victor Paulo de Oliveira pelas valiosas informações prestadas, apoio e amizade, além do fornecimento das amostras selecionadas de sementes de urucum utilizadas neste trabalho.

À Enga. Lilian Maria Leal Costa pela amizade, apoio e cooperação na aquisição dos dados experimentais de secagem.

Ao Prof. Dr. Roberto de Freitas Neves pelo auxílio prestado nas ilustrações fotográficas e ao Eng. e amigo Edinaldo Cunha pela colaboração na obtenção de micrografias eletrônicas de sementes de urucum.

À CAPES pela bolsa concedida e ao Programa Pobreza e Meio Ambiente na Amazônia - POEMA, convênio 056/96 DAIMLER-BENZ/FADESP/UFPA, pelo suporte financeiro.

Ao Departamento de Engenharia Química da UFPA pela liberação e ao DTF/FEQ/UNICAMP pela oportunidade.

Aos colegas do Laboratório de Engenharia de Produtos Naturais do DEQ/UFPA pela amizade e apoio.

A minha família pela compreensão, carinho e incentivo em todas as fases deste trabalho.

Belém, 28 de novembro de 1998.

RESUMO

Analisa-se a secagem de sementes de urucum (*Bixa orellana* L.), cultivar Piave Vermelha, e estima-se as condições ótimas do processo de modo a minimizar as perdas de corante e obter teores finais de umidade das sementes em níveis adequados à sua conservação e manutenção de qualidade, em função de variáveis operacionais do processo de secagem convectiva em leito fixo. Avalia-se o comportamento termodinâmico das sementes durante o processo de dessorção de umidade através do método estático, utilizando-se soluções aquosas saturadas, no intervalo de 15 a 80°C em ambientes com umidades relativas na faixa de 7 a 75%, com os parâmetros de interesse determinados através do modelo de GAB e da linearização da equação de Clausius-Clapeyron. Constata-se que as sementes de urucum podem ser conservadas com maior estabilidade em ambientes com umidade relativa 60% no intervalo de temperaturas estudado. A quantificação da influência das variáveis de entrada do processo nos teores finais de umidade e bixina das sementes e a identificação do ponto ótimo é realizada através de técnicas de planejamento fatorial fracionário, metodologia de superfícies de resposta, análise canônica e função desejabilidade. Verifica-se que o conteúdo de umidade final das sementes pode ser estimado por um modelo polinomial de segunda ordem em função da temperatura e vazão mássica do ar e do tempo de secagem; e que o teor final de bixina é influenciado significativamente apenas pelo tempo de secagem, sendo descrito adequadamente por um modelo linear.

ABSTRACT

The drying of annatto seeds (*Bixa orellana* L.), type Red Piave, was studied in a fixed bed dryer. The optimal conditions were obtained to minimize the bixin losses and to obtain the final moisture content of the seeds in the adequate levels for conservation and quality maintenance. The bixin and the final moisture contents were studied as a function of the operational variables of the drying process. The thermodynamic behavior of the seeds during the process of moisture desorption was verified by the static gravimetric method, using saturated salt solutions to maintain atmospheres with relative humidities in the range from 7 to 75%, at temperatures between 15 and 80°C. GAB model was used to fit the experimental data and the three parameters of GAB equation were evaluated. The Clausius-Clapeyron equation was applied to obtain the net isosteric heats of sorption, using the desorption isotherm's data. It was verified that the annatto seeds can be conserved with higher stability in atmospheres with relative humidity of 60% in the range of temperatures studied. The quantification of the influences of the inlet variables of the process in the final moisture and bixin contents of the seeds and the identification of the optimal point for the process was accomplished by techniques of fractional factorial design, response surface methodology, canonical analysis and desirability function. It was verified that the final moisture content of the seeds can be estimated by a second order polynomial model as a function of the air temperature and mass flow rate and of the drying time; and that the final bixin content is significantly influenced only by the process time, being described appropriately by a linear model.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	ix
LISTA DE TABELAS	xv
NOMENCLATURA	xix
CAPÍTULO 1. INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO 2. REVISÃO DA LITERATURA	5
2.1 URUCUM	5
2.1.1 Informações gerais sobre a planta e o fruto	5
2.1.2 Extração de corantes de urucum	9
2.1.3 Beneficiamento do urucum, caracterização e secagem de suas sementes e degradação do corante	20
2.1.4. Propriedades dos extratos de urucum	37
2.1.5 Utilização do corante de urucum	44
2.1.6 Mercado do urucum e perspectivas.....	48
2.1.7 Estabilidade dos corantes de urucum	52
2. 2 SECAGEM	55
2.2.1 Conceito e importância	55
2.2.2 Características gerais da secagem	57
2.2.3 Aspectos gerais sobre a secagem de biomateriais	59
2.2.4 Secadores de leito fixo	60
2.2.5 Modelos matemáticos para a secagem de biomateriais em leito fixo	64
2.2.6 Trabalhos sobre a secagem de biomateriais em leito fixo	67
2.3 EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO	72
2.3.1 Divisão e fixação da umidade nos grãos	72
2.3.2 Sorção de umidade	74
2.3.3 Atividade de água	74
2.3.4 Isotermas de sorção	75
2.3.5 Modelos de equilíbrio higroscópico	77
2.3.5.1 O modelo matemático de GAB	78
2.3.6. Calor isostérico de sorção	80
2.3.7 Determinação experimental de isotermas de sorção	81
2.4 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E METODOLOGIA DE SUPERFÍCIES DE RESPOSTA	83
CAPÍTULO 3. MATERIAIS E MÉTODOS	89
3.1 MATÉRIA PRIMA	89
3.1.1 Identificação e Procedência	89

3.1.2 Caracterização Química	90
3.1.3 Operações de pré-processamento	91
3.1.4 Análises preliminares	91
3.1.5 Caracterização física	91
3.2 MEDIDAS EXPERIMENTAIS NO PROCESSO DE SECAGEM.....	92
3.2.1 Determinação das massas e temperaturas das sementes.....	92
3.2.2 Determinação da vazão mássica do ar de entrada.....	92
3.2.3 Métodos de análise de bixina	93
3.2.4 Obtenção das isotermas de dessecção	96
3.2.5 Ajuste do modelo de GAB	98
3.2.6 Determinação dos calores isostéricos líquidos e isotermas de sorção	98
3.3 EQUIPAMENTO PARA A SECAGEM EM LEITO FIXO.....	99
3.3.1 Modo operacional e método de medição das variáveis no equipamento.....	102
3.4 PROJETO EXPERIMENTAL	105
3.4.1 Projeto Fatorial Fracionário	105
3.4.2 Metodologia de superfícies de resposta	106
3.4.2.1 Análise de modelos de 2ª ordem	109
CAPÍTULO 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	112
4.1 Resultados da caracterização química do material.....	112
4.2 Resultados da caracterização física do material	113
4.3 Dessecção de umidade do urucum	113
4.4 Resultados do modelo de GAB ajustado.....	118
4.5 Calores isostéricos de sorção para sementes de urucum	120
4.6 Análise dos dados de secagem obtidos através do planejamento fatorial fracionário	122
4.6.1 Resultados para a variável de resposta X_f (teor de umidade final das sementes).....	123
4.6.1.1 Estimativa dos efeitos.....	123
4.6.1.2 Análise de variância (ANOVA)	124
4.6.1.3 Gráfico de barras (diagrama de Pareto)	124
4.6.1.4 Gráfico dos efeitos individuais.....	125
4.6.1.5 Gráfico em papel de probabilidade normal	126
4.6.2 Resultados para a variável de resposta B_f (conteúdo final de bixina).....	127
4.7 Análise dos dados de secagem através da Metodologia de Superfícies de Resposta	129
4.8 Otimização do processo de secagem	146
4.9 Análise da cinética de secagem das sementes de urucum	149
CAPÍTULO 5. CONCLUSÕES	161
ANEXO A: Corridas experimentais de secagem de sementes de urucum, conforme o projeto fatorial fracionário (corridas iniciais - primeira fase de experimentos)	164

ANEXO B: Corridas experimentais de secagem de sementes de urucum, segundo a metodologia de superficies de resposta (corridas finais - segunda fase de expeerimentos)	207
ANEXO C: Teores de bixina e degradação do corante para o projeto fatorial fracionário desenvolvido na primeira fase dos experimentos	248
ANEXO D: Teores de bixina e degradação do corante para a metodologia de superficies de resposta desenvolvido na segunda fase dos experimentos	250
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	252

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Frutos de urucum	8
Figura 2. Cápsula (cachopas) de urucum abertas	9
Figura 3. Sementes de urucum	9
Figura 4. Imagem da sementes seccionada de urucum	10
Figura 5. Esquema de acidificação do extrato alcalino do corante das sementes de urucum	12
Figura 6. Processo de extração de bixina utilizando óleo comestível como solvente	13
Figura 7. Processo de extração de pigmentos do urucum, por meio de álcool etílico	14
Figura 8. Processo de extração de corante de urucum por meio de soluções alcalinas	14
Figura 9. Fluxograma para obtenção de norbixina em pó, utilizando KOH.....	16
Figura 10. Fluxograma para obtenção de norbixina e bixina em pó, utilizando solução alcoólica de NH_4OH	17
Figura 11. Reações químicas para a obtenção de bixina/norbixina, utilizando solução alcoólica de NH_4OH	18
Figura 12. Exposição das sementes de urucum ao sol	21
Figura 13. Operação de descachopamento das sementes de urucum	22
Figura 14. Colheita das sementes de urucum	23
Figura 15. Curva de secagem de urucum por microondas	37
Figura 16. Eliminação de m-xileno e formação de C_{17} e C_{18} (pigmentos amarelos) na degradação térmica de bixina e metilbixina	52
Figura 17. Estrutura do pigmento amarelo (C_{17}) formado da degradação térmica da bixina.	53
Figura 18. Estruturas estereoquímicas de isômeros do C_{17}	54
Figura 19. Fotodegradação de bixina em sementes de urucum	54
Figura 20. Secador de leito fixo normalmente utilizado em centrais de beneficiamento e secagem	60
Figura 21. Secador de grãos em camada fixa, normalmente utilizado em fazendas	61
Figura 22. Sistema de secagem em leito fixo (escala de laboratório)	61
Figura 23. Câmara de secagem em leito fixo (escala de laboratório)	62
Figura 24. Esquema de um secador de leito fixo (camada espessa)	62
Figura 25. Representação esquemática do modo de fixação da água no grão com indicação aproximada dos limites entre os diferentes tipos de água para milho a 15°C	73
Figura 26. Formas características das isotermas de sorção	77
Figura 27. Determinação de isotermas de sorção com gás inerte, por método dinâmico	82
Figura 28. Detalhe do recipiente e do suporte contendo amostra	97
Figura 29. Recipiente com amostra para determinação de umidade de equilíbrio.....	97
Figura 30. Esquema da seção de acoplamento entre a umidade básica e o leito fixo	99
Figura 31. Leito em aço inoxidável contendo amostras	100
Figura 32. Esquema do protótipo do secador de leito fixo desenvolvido neste trabalho.....	101

Figura 33. Aspecto do leito de sementes de urucum	102
Figura 34. Isoterma de dessorção de semente de urucum a 15°C.....	114
Figura 35. Isoterma de dessorção de semente de urucum a 35°C.....	115
Figura 36. Isoterma de dessorção de semente de urucum a 40°C.....	115
Figura 37. Isoterma de dessorção de semente de urucum a 80°C.....	116
Figura 38. Efeito da temperatura na dessorção de sementes de urucum	118
Figura 39. Comportamento do calor isostérico integral de dessorção com teor de umidade de sementes de urucum, cultivar piave vermelha	120
Figura 40. Isósteres obtidos da relação de Clausius-Clapeyron entre a_w e T para sementes de urucum cultivar piave vermelha	121
Figura 41. Calor isostérico líquido de sorção para sementes de urucum, cultivar piave vermelha	121
Figura 42. Gráfico de barras dos efeitos individuais e combinados para resposta X_f	125
Figura 43. Efeitos principais para resposta X_f	125
Figura 44. Gráfico em papel de probabilidade dos efeitos padronizados para X_f	126
Figura 45. Gráfico de probabilidade dos efeitos padronizados para B_f	129
Figura 46. Reprodutibilidade da cinética de secagem, no ponto central do projeto experimental desenvolvido na segunda fase	133
Figura 47. Superfície de resposta para X_f em função de x_1 e x_2 para $x_3 = 0$	135
Figura 48. Curvas de nível para X_f em função de x_1 e x_2 para $x_3 = 0$	135
Figura 49. Superfície de resposta para X_f em função de x_1 e x_3 para $x_2 = 0$	136
Figura 50. Curvas de nível para X_f em função de x_1 e x_3 para $x_2 = 0$	136
Figura 51. Superfície de resposta para X_f em função de x_2 e x_3 para $x_1 = 0$	137
Figura 52. Curvas de nível para X_f em função de x_2 e x_3 para $x_1 = 0$	137
Figura 53. Comparação entre valores preditos e experimentais para X_f	140
Figura 54. Distribuição dos resíduos para a resposta X_f	140
Figura 55. Superfície de resposta para B_f em função de x_1 e x_2 para $x_3 = 0$	143
Figura 56. Curvas de nível para B_f em função de x_1 e x_2 para $x_3 = 0$	143
Figura 57. Degradação de bixina em função do tempo de secagem	144
Figura 58. Comparação entre os valores preditos e experimentais para B_f	145
Figura 59. Distribuição dos resíduos para a resposta B_f	146
Figura 60. Contornos para X_f em função de x_1 e x_2 com indicação da região ótima	147
Figura 61. Contornos para B_f em função de x_1 e x_2 com indicação da região ótima	147
Figura 62. Curvas de secagem característica (corrida 15)	150
Figura 63. Curva de taxa de secagem (corrida 15)	150
Figura 64. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 15)	150
Figura 65. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 15)	151
Figura 66. Ajuste ao modelo linear (corrida 15)	151
Figura 67. Ajuste ao modelo de Page (corrida 15)	151
Figura 68. Curva de secagem (corrida 6)	154

Figura 69. Curva de taxa de secagem (corrida 6)	155
Figura 70. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 6)	155
Figura 71. Ajuste ao modelo linear (corrida 6)	155
Figura 72. Ajuste ao modelo de Page (corrida 6)	156
Figura 73. Influência da temperatura no perfil de umidade de urucum	158
Figura 74. Influência da temperatura na taxa de secagem de urucum	158
Figura 75. Influência da temperatura no perfil da taxa de secagem com o tempo para urucum	158
Figura 76. Influência da vazão mássica no perfil de umidade de urucum	159
Figura 77. Influência da vazão mássica na taxa de secagem de urucum	159
Figura 78. Influência da vazão mássica no perfil da taxa de secagem com o tempo para urucum	159
Figura 79. Influência do tempo de secagem no perfil de umidade de urucum	160
Figura 80. Influência do tempo de secagem na taxa de secagem de urucum	160
Figura 81. Influência do tempo no perfil da taxa de secagem com o tempo para urucum	160
Figura A1.1. Curva de secagem (corrida 1)	165
Figura A1.2. Curva de taxa de secagem (corrida 1)	166
Figura A1.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 1)	166
Figura A1.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 1)	166
Figura A2.1. Curva de secagem (corrida 2)	167
Figura A2.2. Curva de taxa de secagem (corrida 2)	168
Figura A2.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 2)	168
Figura A2.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 2)	168
Figura A3.1. Curva de secagem (corrida 3)	169
Figura A3.2. Curva de taxa de secagem (corrida 3)	170
Figura A3.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 3)	170
Figura A3.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 3)	170
Figura A4.1. Curva de secagem (corrida 4)	171
Figura A4.2. Curva de taxa de secagem (corrida 4)	172
Figura A4.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 4)	172
Figura A4.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 4)	172
Figura A5.1. Curva de secagem (corrida 5)	173
Figura A5.2. Curva de taxa de secagem (corrida 5)	174
Figura A5.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 5)	174
Figura A5.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 5)	174
Figura A6.1. Curva de secagem (corrida 6)	175
Figura A6.2. Curva de taxa de secagem (corrida 6)	176
Figura A6.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 6)	176
Figura A6.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 6)	176
Figura A7.1. Curva de secagem (corrida 7)	177

Figura A7.2. Curva de taxa de secagem (corrida 7)	178
Figura A7.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 7)	178
Figura A7.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 7)	178
Figura A8.1. Curva de secagem (corrida 8)	179
Figura A8.2. Curva de taxa de secagem (corrida 8)	180
Figura A8.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 8)	180
Figura A8.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 8)	180
Figura A9.1. Curva de secagem (corrida 9)	181
Figura A9.2. Curva de taxa de secagem (corrida 9)	182
Figura A9.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 9)	182
Figura A9.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 9)	182
Figura A10.1. Curva de secagem (corrida 10)	183
Figura A10.2. Curva de taxa de secagem (corrida 10)	184
Figura A10.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 10)	184
Figura A10.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 10)	184
Figura A11.1. Curva de secagem (corrida 11)	185
Figura A11.2. Curva de taxa de secagem (corrida 11)	186
Figura A11.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 11)	186
Figura A11.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 11)	186
Figura A12.1. Curva de secagem (corrida 12)	187
Figura A12.2. Curva de taxa de secagem (corrida 12)	188
Figura A12.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 12)	188
Figura A12.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 12)	188
Figura A13.1. Curva de secagem (corrida 13)	189
Figura A13.2. Curva de taxa de secagem (corrida 13)	190
Figura A13.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 13)	190
Figura A13.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 13)	190
Figura A14.1. Curva de secagem (corrida 14)	191
Figura A14.2. Curva de taxa de secagem (corrida 14)	192
Figura A14.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 14)	192
Figura A14.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 14)	192
Figura A15.1. Curva de secagem (corrida 15)	193
Figura A15.2. Curva de taxa de secagem (corrida 15)	194
Figura A15.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 15)	194
Figura A15.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 15)	194
Figura A16.1. Curva de secagem (corrida 16)	195
Figura A16.2. Curva de taxa de secagem (corrida 16)	196
Figura A16.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 16)	196
Figura A16.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 16)	196
Figura A17.1. Curva de secagem (corrida 17)	197

Figura A17.2. Curva de taxa de secagem (corrida 17)	198
Figura A17.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 17)	198
Figura A17.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 17)	198
Figura A18.1. Curva de secagem (corrida 18)	199
Figura A18.2. Curva de taxa de secagem (corrida 18)	200
Figura A18.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 18)	200
Figura A18.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 18)	200
Figura A19.1. Curva de secagem (corrida 19)	201
Figura A19.2. Curva de taxa de secagem (corrida 19)	202
Figura A19.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 19)	202
Figura A19.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 19)	202
Figura A20.1. Curva de secagem (corrida 20)	203
Figura A20.2. Curva de taxa de secagem (corrida 20)	204
Figura A20.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 20)	204
Figura A20.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 20)	204
Figura A21.1. Curva de secagem (corrida 21)	205
Figura A21.2. Curva de taxa de secagem (corrida 21)	206
Figura A21.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 21)	206
Figura A21.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 21)	206
Figura B1.1. Curva de secagem (corrida 1)	209
Figura B1.2. Curva de taxa de secagem (corrida 1)	209
Figura B1.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 1)	209
Figura B2.1. Curva de secagem (corrida 2)	211
Figura B2.2. Curva de taxa de secagem (corrida 2)	211
Figura B2.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 2)	211
Figura B3.1. Curva de secagem (corrida 3)	213
Figura B3.2. Curva de taxa de secagem (corrida 3)	213
Figura B3.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 3)	213
Figura B4.1. Curva de secagem (corrida 4)	215
Figura B4.2. Curva de taxa de secagem (corrida 4)	215
Figura B4.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 4)	215
Figura B5.1. Curva de secagem (corrida 5)	217
Figura B5.2. Curva de taxa de secagem (corrida 5)	217
Figura B5.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 5)	217
Figura B6.1. Curva de secagem (corrida 6)	219
Figura B6.2. Curva de taxa de secagem (corrida 6)	219
Figura B6.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 6)	219
Figura B7.1. Curva de secagem (corrida 7)	221
Figura B7.2. Curva de taxa de secagem (corrida 7)	221
Figura B7.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 7)	221

Figura B8.1. Curva de secagem (corrida 8)	223
Figura B8.2. Curva de taxa de secagem (corrida 8)	223
Figura B8.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 8)	223
Figura B9.1. Curva de secagem (corrida 9)	225
Figura B9.2. Curva de taxa de secagem (corrida 9)	225
Figura B9.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 9)	225
Figura B10.1. Curva de secagem (corrida 10)	227
Figura B10.2. Curva de taxa de secagem (corrida 10)	227
Figura B10.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 10)	227
Figura B11.1. Curva de secagem (corrida 11)	229
Figura B11.2. Curva de taxa de secagem (corrida 11)	229
Figura B11.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 11)	229
Figura B12.1. Curva de secagem (corrida 12)	231
Figura B12.2. Curva de taxa de secagem (corrida 12)	231
Figura B12.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 12)	231
Figura B13.1. Curva de secagem (corrida 13)	233
Figura B13.2. Curva de taxa de secagem (corrida 13)	233
Figura B13.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 13)	233
Figura B14.1. Curva de secagem (corrida 14)	235
Figura B14.2. Curva de taxa de secagem (corrida 14)	235
Figura B14.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 14)	235
Figura B15.1. Curva de secagem (corrida 15)	237
Figura B15.2. Curva de taxa de secagem (corrida 15)	237
Figura B15.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 15)	237
Figura B16.1. Curva de secagem (corrida 16)	239
Figura B16.2. Curva de taxa de secagem (corrida 16)	239
Figura B16.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 16)	239
Figura B17.1. Curva de secagem (corrida 17)	241
Figura B17.2. Curva de taxa de secagem (corrida 17)	241
Figura B17.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 17)	241
Figura B18.1. Curva de secagem (corrida 18)	243
Figura B18.2. Curva de taxa de secagem (corrida 18)	243
Figura B18.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 18)	243
Figura B19.1. Curva de secagem (corrida 19)	245
Figura B19.2. Curva de taxa de secagem (corrida 19)	245
Figura B19.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 19)	245
Figura B20.1. Curva de secagem (corrida 20)	247
Figura B20.2. Curva de taxa de secagem (corrida 20)	247
Figura B20.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 20)	247

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Teores de bixina em alguns tipos cultivados no Estado do Pará	7
Tabela 2. Teores de bixina e umidade de cultivares da Zona Bragantina, Estado do Pará	8
Tabela 3. Degradação de bixina em processo de estocagem	23
Tabela 4. Classificação das sementes de urucum	24
Tabela 5. Proposta de classificação das sementes de urucum conforme a qualidade	24
Tabela 6. Condições operacionais dos ensaios de secagem de sementes de urucum em leito de jorro	26
Tabela 7. Caracterização físico-química das sementes de urucum reportada na literatura. ...	29
Tabela 8. Composição química das sementes de urucum	32
Tabela 9. Teor de bixina em função da temperatura e tempo de secagem em estufa	35
Tabela 10. Condições operacionais de corridas efetuadas com cultivares Peruana e Piave Vermelha.....	36
Tabela 11. Degradação de bixina pela secagem em leito de jorro e leito fixo	36
Tabela 12. Usos de corantes de urucum em alimentos	46
Tabela 13. Usos do extrato de urucum em alimentos	47
Tabela 14. Consumo e produção de sementes de urucum no mercado internacional	49
Tabela 15. Produção e área colhida de urucum nas Mesoregiões do Estado do Pará	50
Tabela 16. Produção de urucum por região no Brasil - estimativa - 1997	50
Tabela 17. Modelos matemáticos de isotermas de sorção	78
Tabela 18. Distribuição da produção de urucum na Fazenda Ahité.....	90
Tabela 19. Análises químicas, métodos e referências	90
Tabela 20. Propriedades termofísicas do urucum, métodos e referências	92
Tabela 21. Umidade de equilíbrio geradas por soluções aquosas saturadas	96
Tabela 22. Variáveis de entrada e respectivos níveis para o projeto fracionário de experimentos	105
Tabela 23. Matriz de experimentos para o projeto fracionário	106
Tabela 24. Variáveis mantidas fixas na segunda fase dos experimentos	108
Tabela 25. Valores codificados e originais para as variáveis utilizadas no planejamento da metodologia de superfícies de resposta	108
Tabela 26. Matriz de experimentos da segunda fase dos ensaios	109
Tabela 27. Composição centesimal média das sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha usadas neste trabalho	112
Tabela 28. Propriedades físicas de sementes de urucum, cultivar piave vermelha, utilizadas neste trabalho	113
Tabela 29. Dessorção de umidade de sementes de urucum a 15, 35, 40 e 80°C	114
Tabela 30. Comportamento higroscópico das sementes de urucum usadas neste trabalho ...	117
Tabela 31. Constantes características do modelo GAB para sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha	119

Tabela 32. Parâmetros termodinâmicos do modelo GAB para sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha	119
Tabela 33. Matriz de experimentos do projeto fatorial fracionário com os respectivos resultados das variáveis de resposta.....	122
Tabela 34. Estimativa dos efeitos para a variável de resposta Xf	123
Tabela 35. Análise de variância para a variável de resposta Xf	124
Tabela 36. Efeitos ordenados e pontos de probabilidade Pb, para resposta Xf.....	126
Tabela 37. Estimativa dos efeitos para a variável de resposta Bf, de sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha	127
Tabela 38. Análise de variância para a variável de resposta Bf	128
Tabela 39. Efeitos ordenados e pontos de probabilidade Pb ,para resposta Bf	129
Tabela 40. Condições experimentais e resultados da metodologia de superfícies de resposta utilizadas na segunda fase	130
Tabela 41. Efeitos estimados para Xf, na segunda fase dos experimentos	131
Tabela 42. ANOVA para Xf, na segunda fase dos experimentos	132
Tabela 43. Coeficientes de regressão para Xf, na segunda fase dos experimentos	132
Tabela 44. Efeitos estimados para Bf, na segunda fase dos experimentos	141
Tabela 45. ANOVA para Bf, na segunda fase dos experimentos	141
Tabela 46. Coeficientes de regressão para Bf, na segunda fase dos experimentos	142
Tabela 47. Escala de valores de desejabilidade (dj ou Dj)	148
Tabela 48. Restrições nas variáveis de resposta para a localização do ponto ótimo	148
Tabela 49. Ajuste do conteúdo de umidade das sementes de urucum com o tempo, para os períodos à taxa de secagem constante e decrescente, utilizando as equações da reta e de Page, para a primeira fase dos experimentos	152
Tabela 50. Condições experimentais e faixa de resultados da secagem de sementes de urucum, para a segunda fase dos experimentos	153
Tabela 51. Ajuste do conteúdo de umidade das sementes de urucum com o tempo, para os períodos à taxa de secagem constante e decrescente, utilizando as equações da reta e de Page, para a segunda fase dos experimentos	156
Tabela A1. Condições de secagem (corrida 1)	165
Tabela A2. Condições de secagem (corrida 2)	167
Tabela A3. Condições de secagem (corrida 3)	169
Tabela A4. Condições de secagem (corrida 4)	171
Tabela A5. Condições de secagem (corrida 5)	173
Tabela A6. Condições de secagem (corrida 6)	175
Tabela A7. Condições de secagem (corrida 7)	177
Tabela A8. Condições de secagem (corrida 8)	179
Tabela A9. Condições de secagem (corrida 9)	181
Tabela A10. Condições de secagem (corrida 10)	183
Tabela A11. Condições de secagem (corrida 11)	185

Tabela A12. Condições de secagem (corrida 12)	187
Tabela A13. Condições de secagem (corrida 13)	189
Tabela A14. Condições de secagem (corrida 14)	191
Tabela A15. Condições de secagem (corrida 15)	193
Tabela A16. Condições de secagem (corrida 16)	195
Tabela A17. Condições de secagem (corrida 17)	197
Tabela A18. Condições de secagem (corrida 18)	199
Tabela A19. Condições de secagem (corrida 19)	201
Tabela A20. Condições de secagem (corrida 20)	203
Tabela A21. Condições de secagem (corrida 21)	205
Tabela B1.1. Condições experimentais de secagem para corrida 1 (final)	208
Tabela B1.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 1 (final)	208
Tabela B2.1. Condições experimentais de secagem para corrida 2 (final)	210
Tabela B2.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 2(final)	210
Tabela B3.1. Condições experimentais de secagem para corrida 3 (final)	212
Tabela B3.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 3 (final)	212
Tabela B4.1. Condições experimentais de secagem para corrida 4 (final)	214
Tabela B4.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 4 (final)	214
Tabela B5.1. Condições experimentais de secagem para corrida 5 (final)	216
Tabela B5.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 5 (final)	216
Tabela B6.1. Condições experimentais de secagem para corrida 6 (final)	218
Tabela B6.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 6 (final)	218
Tabela B7.1. Condições experimentais de secagem para corrida 7 (final)	220
Tabela B7.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 7 (final)	220
Tabela B8.1. Condições experimentais de secagem para corrida 8 (final)	222
Tabela B8.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 8 (final)	222
Tabela B9.1. Condições experimentais de secagem para corrida 9 (final)	224
Tabela B9.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 9 (final)	224
Tabela B10.1. Condições experimentais de secagem para corrida 10 (final)	226
Tabela B10.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 10 (final)	226

Tabela B11.1. Condições experimentais de secagem para corrida 11 (final)	228
Tabela B11.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 11 (final)	228
Tabela B12.1. Condições experimentais de secagem para corrida 12 (final)	230
Tabela B12.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 12 (final)	230
Tabela B13.1. Condições experimentais de secagem para corrida 13 (final)	232
Tabela B13.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 13 (final)	232
Tabela B14.1. Condições experimentais de secagem para corrida 14 (final)	234
Tabela B14.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 14 (final)	234
Tabela B15.1. Condições experimentais de secagem para corrida 15 (final)	236
Tabela B15.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 15 (final)	236
Tabela B16.1. Condições experimentais de secagem para corrida 16 (final)	238
Tabela B16.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 16 (final)	238
Tabela B17.1. Condições experimentais de secagem para corrida 17 (final)	240
Tabela B17.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 17 (final)	240
Tabela B18.1. Condições experimentais de secagem para corrida 18 (final)	242
Tabela B18.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 18 (final)	242
Tabela B19.1. Condições experimentais de secagem para corrida 19 (final)	244
Tabela B19.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 19 (final)	244
Tabela B20.1. Condições experimentais de secagem para corrida 20 (final)	246
Tabela B20.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 20 (final)	246
Tabela C1. Análise de bixina e degradação do corante durante a primeira fase de experimentos	249
Tabela D1. Análise de bixina e degradação do corante durante a segunda fase de experimentos	251

NOMENCLATURA

- a - área superficial dos sólidos por unidade de volume do leito, m^2/m^3
 A - área superficial exposta à secagem, m^2
 a, b - constantes (Equações 37 e 38)
 A, B, C, D - amostra de sementes de urucum
 A, B, C, D, E - variáveis codificadas (primeira fase dos experimentos)
 Ab- absorvância, adimensional
 a_i - coeficiente de atividade da espécie i, adimensional
 a_w - atividade de água, adimensional
 B - teor de bixina, %bs
 b_o, b_i, b_{ii}, b_{ij} - coeficientes de regressão constantes (Equação 25)
 C - constante de Guggenheim, adimensional
 C_o, C_1 - parâmetros (Equação 17)
 C_p - calor específico, $cal/g.^{\circ}C$
 \mathcal{D} - coeficiente de difusão de massa, m^2/s
 D - diâmetro, m
 d - metade da diferença entre níveis (Equação 26)
 D_j - desejabilidade global, adimensional
 d_j - desejabilidade individual, adimensional
 d_p - diâmetro da partícula, m
 D_s - distância do ponto estacionário ao ponto central
 e - componente de erro aleatório
 E - coeficiente específico de extinção, adimensional
 F - estatística de Fisher, adimensional
 f - função (Equação 24)
 f_i^o - fugacidade do solvente puro, adimensional
 f_i - fugacidade do solvente, adimensional
 fA, fB, fC - amostras de sementes de urucum frescas
 f_D - fator de diluição, adimensional
 g - aceleração normal da gravidade, m/s^2
 G - vazão mássica do gás, kg/s
 h - coeficiente de transferência de calor, $W/m^2.^{\circ}C$
 H - entalpia, kJ/kg
 Hg - entalpia do gás, kJ/kg
 H_L - altura do leito, m
 H_1 - calor de condensação do vapor d'água, kJ/mol
 H_m - calor de sorção da monocamada, kJ/mol
 H_n - calor de sorção da multicamada, kJ/mol

H_s - entalpia do sólido, kJ/kg

H_v - entalpia do vapor úmido, J/kg

ΔH_C - diferença entre calores de sorção da monocamada e multicamada, kJ/mol

ΔH_K - diferença entre calor de condensação do vapor d'água e o calor de sorção da multicamada, kJ/mol

ΔH_v - entalpia de vaporização da água, kJ/kg

i - número de ordem

j - comprimento de onda, nm

K - constante (modelo GAB)

k - número de variáveis independentes ou fatores

k, k_1, k_2 - parâmetros empíricos, adimensional

K_o, K_1 - parâmetros (Equação 18)

K_p - coeficiente convectivo de transferência de massa, m/s

K_y - coeficiente de transferência de massa, kg/m²s

L_e - comprimento de entrada, m

m - massa, g

$m(t)$ - massa total de sólidos úmidos em função do tempo, g

N - nitrogênio

n - parâmetro empírico, adimensional

n_α - número de experimentos referentes a porção axial do planejamento

n_c - número de observações repetidas no centro do planejamento

n_f - número de experimentos referentes a porção fatorial do planejamento

N_{or} - teor de norbixina, %bs

N_T - número total de ensaios

P - desvio médio relativo, %

p - pressão parcial da água na fase vapor, Pa

P_b - probabilidade acumulada, adimensional

PEC - parâmetro de entrada controlável

PENC - parâmetro de entrada não controlável

p_o - pressão de vapor da água pura, Pa

P_r - probabilidade, adimensional

PR - tipo cultivado Peruana

PS - parâmetro de saída

PV - tipo cultivado Piave Vermelha

ΔP - variação de pressão, mm H₂O

Q - vazão volumétrica, m³/s

Q_{st} - calor isostérico integral de sorção, kJ/mol

q_{st} - calor isostérico líquido de sorção, kJ/mol

R - coeficiente de correlação

R - constante dos gases, J/molK

Re - número de Reynolds, adimensional
 r - raio, m
 R^2 - coeficiente de determinação
 r_c - raio dos capilares, m
 S - área da seção transversal, m^2
 t - tempo, min
 T - temperatura, °C
 T_g - temperatura do gás, °C
 T_s - temperatura do sólido, °C
 UR - umidade relativa, %
 V - volume da amostra, mL
 VEC - variável de entrada controlável
 v_g - velocidade do gás, m/s
 v_h - volume específico do ar úmido, m^3/kg_{as}
 VR - variável de resposta
 VS - variável de saída
 W - taxa de secagem, $mg/cm^2 \cdot min$
 $W_1, W_2, W_3 \dots W_k$ - variáveis independentes na forma canônica
 W_{cr} - taxa de secagem para o período ante-crítico, $mg/cm^2 \cdot min$
 W_r - razão de taxa de secagem, adimensional
 X - teor de umidade, %bs
 $X(t)$ - teor de umidade em função do tempo, %bs
 x_1, x_2, x_3 - variáveis codificadas (segunda fase dos experimentos)
 x_{1s}, x_{2s}, x_{3s} - coordenadas do ponto estacionário
 X_e - teor de umidade de equilíbrio, %bs
 X_f - teor de umidade final, %bs
 X_i - teor de umidade inicial, %bs
 X_m - conteúdo de umidade equivalente para uma monocamada, %bs
 X_r - razão de umidade do sólido, adimensional
 X_{rc} - razão de umidade do sólido para o período pós-crítico, adimensional
 \hat{Y} - valor predito da variável de resposta
 \hat{Y}_s - resposta predita no ponto estacionário
 Y - razão de umidade do ar, kg/kg_{as}
 y - variável dependente (Equação 24)

subscritos

ap - aparente
 as - ar seco

bs - base seca
bu - base úmida
cr - estado crítico
e - estado de equilíbrio
f - final
i - condição inicial
m - valor médio
mf - mínima fluidização
s - bulbo seco
ss - sólido seco
u - bulbo úmido
1 - entrada
2 - saída

letras gregas

α - valor do espaçamento axial
 θ - ângulo de contato do líquido nos poros
 ϕ - esfericidade, adimensional
 ε - porosidade, adimensional
 σ - tensão superficial, N/m
 λ - autovalores ou raízes características
 φ - degradação de bixina, %
 ξ - níveis das variáveis independentes
 μ - número de efeitos principais e interações
 η - número de experimentos
ve - valor experimental
vp - valor predito
 ρ_a - massa específica do ar ambiente, kg/m^3
 ρ_g - massa específica do gás, kg/m^3
 ρ_l - massa específica do líquido, kg/m^3
 ρ_s - massa específica do sólido, kg/m^3

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

A tendência atualmente demonstrada pelo mercado internacional em restringir o uso de corantes artificiais em alimentos, aliada à exigência dos consumidores por produtos naturais também na indústria farmo-cosmética (NOTHENBERG, 1997), aumentou o interesse de pesquisadores e da indústria pelas matérias primas naturais, vegetais em particular, fornecedoras de corantes. Nesse aspecto, as sementes de urucum (*Bixa orellana* L.) se destacam como uma importante matéria prima encontrada no país para a obtenção de corantes, devido principalmente às suas características de produto natural, não tóxico, elevado poder tintorial e amplo espectro de cores.

O Brasil se apresenta como um país produtor de urucum tendo atualmente as maiores áreas plantadas nos Estados de São Paulo, Pará, Paraná, Bahia e Paraíba, concentrando-se a indústria processadora de corantes na região sudeste, principalmente em São Paulo. O comércio anual de sementes de urucum é estimado em 7000 toneladas, dos quais cerca de 20 a 30% destinam-se à exportação *in natura*, 15% à fabricação de corantes e 55 a 60% das sementes são comercializadas no mercado interno na forma de “colorífico”, o que representa em média 20.000 a 25.000 toneladas desse produto (GHIRALDINI, 1991; OLIVEIRA, 1998).

Essa produção garante bons faturamentos do mercado de urucum e de seus derivados, tanto interna como externamente. Uma projeção do faturamento do mercado de corantes e produtos do urucum no Brasil, pode ser feita a partir dos preços efetivamente pagos pela semente de urucum de boa qualidade no final de 1991, que era de US\$0,80 a US\$1,00 por kilograma (preço CIF). No Estado do Pará, o preço pago ao produtor por kilograma de semente, em função do teor de corante nela contido, foi de US\$0,60 a US\$0,70 na safra do 1º semestre de 1992 (KATO e FALESI, 1992). No Nordeste, o preço por kilograma de sementes recebido pelos produtores tem variado de US\$0,60 a US\$1,20 nos últimos 4 anos (SÃO JOSÉ, 1992). Atualmente, os preços praticados oscilam entre R\$ 0,60 a R\$ 1,00, por kilograma de sementes contendo pelo menos 2,1% de bixina (OLIVEIRA, 1998). Dependendo da qualidade das sementes e do teor de bixina, seu corante de maior interesse, hoje um bom produtor consegue comercializar o kilograma da semente de urucum a R\$1,00 (KISS, 1998).

A forma de comercialização de sementes em função da qualidade, principalmente teor de corante e conteúdo de umidade adequado à conservação, estimula o produtor a obter sementes de melhor qualidade, tornando o país mais competitivo no mercado internacional. O Brasil atualmente figura como 3º exportador mundial de sementes de urucum, perdendo para o Peru e Kenya, porém, a reputação qualitativa do produto brasileiro no mercado internacional é considerada ruim (OHASHI *et al.*, 1992).

As pesquisas básicas na área de melhoramento genético e citogenético, ainda incipientes, visando o aumento da qualidade e produtividade do urucuzeiro, tendem a tornar o produto competitivo no mercado internacional. Porém, de pouco adiantará os esforços no campo agrônômico se os tratamentos que receber o produto na fase de pós-colheita ou de pré-processamento, forem inadequados e contribuirão para a redução dos padrões de qualidade das sementes fornecidas pela planta.

Dentre as operações de pré processamento, que incluem o beneficiamento, secagem e armazenagem; a secagem representa uma etapa muito importante, que deve ser conduzida cuidadosamente a fim de se manter os padrões desejáveis de qualidade, principalmente teor de bixina mínimo de 2,5% e umidade abaixo de 10% bu nos produtos finais. Devido a complexidade inerente de se trabalhar com produtos naturais, o desenvolvimento do processo de secagem e a quantificação das relações entre as variáveis operacionais de entrada e as respostas, devem ser realizados mediante métodos estatísticos apropriados, com os quais é possível analisar adequadamente os efeitos das variáveis estudadas.

A bixina é o carotenóide em maior concentração nas sementes de urucum, entretanto, esse pigmento apresenta instabilidade, podendo degradar-se quando sujeito a certas condições de temperatura, luz e de tempo de exposição durante o processo de secagem. Assim, o processo de secagem tem uma influência decisiva na qualidade das sementes obtidas, sendo ainda pouco estudado e realizado atualmente de forma rudimentar e inadequada pela grande maioria dos produtores.

Outra fase do pré-processamento também importante é a armazenagem das sementes, que se mantidas em condições propícias ao crescimento de microorganismos, principalmente fungos, que possivelmente se desenvolvem durante a armazenagem, podem gerar perdas de qualidade do material, inviabilizando total ou parcialmente sua utilização como fonte de corantes naturais. Neste aspecto, torna-se de vital importância o conhecimento do comportamento higroscópico das sementes, sujeitas à diferentes condições de temperatura e umidade, pois os grãos terão seu conteúdo de umidade alterado, entrando em equilíbrio com as condições ambientais do local de armazenagem. Essas mudanças na umidade do produto, podem inibir ou induzir o crescimento de microorganismos. O conhecimento pleno da umidade de equilíbrio das sementes nas diversas condições do ambiente, torna-se bastante útil no controle da qualidade do material armazenado.

As relações existentes entre o teor de umidade de equilíbrio das sementes de urucum e a umidade relativa do ambiente, são obtidas à temperatura constante (isotermas), em função dos processos de adsorção ou dessorção de umidade. Como no processo de secagem a umidade está sendo removida do produto, as isotermas de dessorção têm maior relevância (DAUD, SARKER e TALIB, 1996). No caso de sementes de urucum as isotermas de dessorção são essenciais para o controle da matéria prima, pois a mesma chega a passar sete meses estocada nas indústrias processadoras, antes das operações para remoção dos corantes (OLIVEIRA, 1998).

O pigmento (bixina) localiza-se na camada externa que encobre as sementes, que corresponde a aproximadamente 6% da massa total destas, sendo portanto suscetível à perdas pela movimentação das mesmas.

Portanto, não é aconselhável que o processo de secagem seja conduzido em leitos móveis, devido à prejudicial atrição entre as sementes (perda de material corante), ou através de energia solar, devido à forte instabilidade à incidência de luz direta que o corante apresenta, ou ainda à altas temperaturas. Dessa forma, a secagem artificial controlada em secador de leito fixo poderá ser uma alternativa viável para se reduzir o conteúdo de umidade das sementes até um valor adequado para sua conservação e comercialização, procurando-se manter praticamente inalterada a concentração e a quantidade de bixina fornecida originalmente pela planta. Torna-se importante também o conhecimento das condições seguras de armazenagem, estabelecendo os teores ótimos de umidade das sementes para que seja minimizada a influência do ambiente, inibindo assim o crescimento de fungos, em função das condições de temperatura e umidade do meio.

Dessa forma, o objetivo geral deste trabalho é analisar o processo de secagem do urucum em leito fixo, tendo ainda como objetivos específicos principais :

- a) Desenvolver um protótipo de secador de leito fixo, com instrumentação adequada, capaz de fornecer dados de cinética de secagem convectiva para sementes de urucum;
- b) Verificar a influência, individual e/ou combinada, das variáveis operacionais temperatura de secagem, vazão mássica do ar, tempo de processamento, carga de sementes e umidade inicial das sementes, nos teores finais de umidade e bixina no processo de secagem de urucum, cultivar Piave Vermelha;
- c) Quantificar as influências das variáveis operacionais mais significativas do processo de secagem, nos teores de umidade e bixina do produto final;
- d) Observar a possível degradação da bixina durante o processo de secagem em leito fixo, nas condições operacionais estabelecidas no planejamento dos experimentos;
- e) Obter experimentalmente isotermas de dessorção para temperaturas na faixa de 15 a 80°C e ajustá-las ao modelo GAB (Guggenheim, Anderson, de Boer), estimar os teores de umidade da monocamada molecular e demais parâmetros de interesse inerentes ao modelo, e utilizá-los na determinação das condições adequadas de umidade e temperatura para a segura armazenagem das sementes de urucum;
- f) A partir dos dados de higroscopicidade, calcular os calores isostéricos de sorção líquidos e integrais, e com isto prever a energia necessária para a retirada de água das sementes de urucum em diversos teores de umidade, em função da temperatura;
- g) Avaliar a influência da temperatura na dessorção de sementes de urucum entre 15 e 80°C;

- h) Determinar experimentalmente propriedades físicas e químicas das sementes de urucum, do tipo cultivar Piave Vermelha, de interesse para a caracterização deste material;
- i) Com base na Metodologia de Superfícies de Resposta, propor a otimização estatística do processo de secagem de sementes de urucum em leito fixo, em função das variáveis estatisticamente significativas para as respostas teores finais de umidade e de bixina.

CAPÍTULO 2

REVISÃO DA LITERATURA

Na primeira parte deste capítulo é apresentada uma pesquisa bibliográfica a respeito da cultura do urucum, especificamente abordando os assuntos: generalidades sobre a planta e o fruto incluindo aspectos botânicos, beneficiamento e secagem, como também aspectos gerais sobre extração de corantes das sementes do fruto, propriedades dos extratos, estabilidade dos corantes, utilização e mercado. Trabalhos sobre genética, melhoramento, clima e solo, propagação, preparo do terreno e plantio, tratos culturais, pragas, fungos associados, sistemas de cultivo e formação de mudas, que constituem assuntos comuns a serem abordados, principalmente em se tratando de uma cultura carente de informações, foram preteridos por não estarem diretamente relacionados com o tema em questão.

Em seguida, são abordados os conceitos de secagem e sua importância para o processamento, transporte e armazenamento de produtos agrícolas. Aspectos referentes à cinética de secagem e às características dos trabalhos sobre secagem de produtos agrícolas em leito fixo, estão também indicados.

O assunto equilíbrio higroscópico é apresentado, tratando-se dos possíveis tipos de umidade presentes nos grãos, do fenômeno de sorção de umidade e dos métodos experimentais de obtenção de isotermas de sorção, da influência da temperatura, como também da descrição matemática dessas isotermas por modelos existentes na literatura.

Concluindo, trata-se sucintamente dos métodos de análise estatística aplicada, com ênfase nos projetos fatoriais de experimentos e na metodologia de superfícies de resposta, citando-se os trabalhos mais recentes sobre a aplicação dessas técnicas na secagem de materiais biológicos.

2.1. URUCUM

2.1.1. Informações gerais sobre a planta e o fruto

O urucuzeiro (*Bixa Orellana* L.)¹ é uma planta de cultura pré-colombiana, com ocorrência em toda a América Tropical, da qual os povos primitivos retiravam um corante vermelho para ser usado em ornamentação, protetor solar e contra picadas de insetos (FALESI *et al.*, 1991).

Consiste em um arbusto pertencente à família *bixaceae*, conhecido no Brasil desde época do descobrimento (ANDRADE, 1926; PINTO, 1995) mas ainda pouco estudado em níveis biológicos, agrônomo e industrial (SOUZA *et al.*, 1991). A escassez de informações científicas

¹ Nome dado em homenagem a Francisco Orellana, considerado o primeiro homem branco a descer navegando o rio Amazonas (PINTO, 1995).

sobre o urucum, faz com que a cultura desta bixácea ainda seja geralmente desenvolvida de modo empírico, embora haja grande interesse dos produtores rurais, devido às potencialidades que o corante de urucum apresenta (FALESI *et al.*, 1991).

O urucuzeiro é uma planta rústica e perene, denominada popularmente de urucum ou urucu, no Brasil, "annatto" nos países de língua inglesa; "achiote" nos de língua espanhola, e "rocou" nos francofônicos. O termo urucu significa vermelho, na língua tupi. A planta é, atualmente, cultivada no Brasil desde abaixo do trópico de Capricórnio até a linha do Equador (CANTO *et al.*, 1991) e com seu congênera, *Bixa arborea* Huber, compreende o único gênero da família bixácea com uma espécie cultivada e várias silvestres (FEREIRA e FALESI, 1991). Devido à fácil fecundação e germinação das sementes, apresenta uma diversificação muito grande no que se refere aos períodos de brotação, floração e frutificação.

CASTRO, CALZAVARA e MOTA (1989) afirmam que a produção do urucuzeiro é bastante variável estando na dependência das condições do solo, idade da planta e tratamentos culturais executados no decorrer do ano. Segundo dados de produção, uma planta adulta pode produzir de 4 a 5 kg/ano o que na concentração recomendada (460 plantas por hectare), significa uma produção de 1840 a 2300 kg/ha de sementes secas.

De acordo com CANTO *et al.* (1991), o urucuzeiro apresenta uma vida útil aproximada de 30 anos, com uma produção média de 3 kg de grãos/pé/ano, variando de 1 a 12 kg de grãos/pé/ano.

A planta possui porte mais ou menos elevado, chegando a atingir 4 metros de altura, folhas cordiformes e normalmente grandes, de coloração verde ou violácea, flores grandes hermafroditas de coloração branca, rósea e lilás e cacho formado por cápsulas das mais diferentes formas (FALESI, 1987). Apresenta raiz pivotante e vigorosa, caule lenhoso com ramificação simpodial, a inflorescência é em forma agrupada, disposta em panícula na parte terminal do ramo. O fruto é capsular invertido contendo espinhos moles, denominados, correntemente, entre os produtores, de cachopas. Segundo CANTO *et al.* (1991), a polinização é feita por auto-fecundação ou cruzada, por meio do vento e insetos, favorecendo a ocorrência de uma grande diversidade de características fenotípicas e influenciando, o que é de grande importância, a forma e o número de sementes por fruto e o teor de bixina nas sementes.

A identificação dos tipos ou variedades dos urucuzeiros é feita pelas cápsulas. As cápsulas podem ter dois, três ou mesmo quatro carpelos; forma ovóide, alongada, bico de calango, bico de pato ou achatada; com pouco, médio ou muitos pelos; coloração verde, vermelha, amarela, carmim e verde-amarela, além de outros matizes (KATO *et al.*, 1991).

De acordo com FALESI (1987), o número de sementes localizadas dentro das cápsulas é variável, encontrando-se de 6 até 98 sementes, estas últimas encontradas em uma cápsula quadricarpelar. No entanto, o número médio de sementes está em torno de 45 (DUARTE, BOVI e MAIA, 1989; CANTO, 1991).

A coloração das sementes varia desde o vermelho intenso (maior teor de corante) até róseo-claro (menor teor de corante). A influência da coloração das cápsulas de urucum no teor

de bixina foi verificada por FALESI *et al.* (1991), que constataram maiores teores de corante nas sementes contidas em cápsulas vermelhas (2,45 e 5,00%) do que nas cápsulas verdes (1,60 a 4,64%), analisando nove tipos cultivadas no Estado do Pará.

FERREIRA e FALESI (1989) apresentaram uma descrição sumarizada e teores de bixina de quatro seleções botânicas nativas do Estado do Pará, denominadas em função de sua aparência e/ou procedência: Pastelão (5,15%), Verdinha (4,66%), Branca (2,59%) e Jari (2,85%). A Jari, devido à procedência de Monte Dourado - PA, local onde se acha implantado o Projeto Jari; a Pastelão, devido ao maior volume de cápsulas em relação as demais, e as sementes ocuparem somente cerca de metade do volume da cápsula, lembrando pastéis. A Verdinha, pela cápsula ser de pequena dimensão e a coloração ser verde uniforme; enquanto que a Branca, por apresentar coloração clara, não sendo nem verde nem vermelha, como ocorre na maioria das cápsulas de urucum conhecidas.

FALESI e KATO (1992) apresentaram ainda teores de bixina desses e de outros tipos cultivados na região, analisados no Centro Nacional de Pesquisa de Tecnologia Agroindustrial de Alimentos - CTAA/EMBRAPA, conforme dados contidos na Tabela 1; esses teores foram obtidos pelo método de clorofórmio¹ e estão em base seca.

Tabela 1. Teores de bixina em alguns tipos cultivados no Estado do Pará

Tipo	Procedência	Umidade (%)	Teor de Bixina (%)	
			Úmida	Seca
Piave Gigante	Iguarapé-Açu/PA	12,07	6,00	6,90
Bico de Pato	Iguarapé-Açu/PA	10,47	5,75	6,40
CPAF/Amapá	Cerrado/AP	10,32	5,47	6,12
Dico Bento I	Iguarapé-Açu/PA	12,49	4,77	5,45
Peruana/Ronald	Belém/PA	7,81	4,78	5,40
Pastelão	Iguarapé-Açu/PA	8,75	4,70	5,15
Piave Vermelha	Iguarapé-Açu/PA	11,68	4,34	5,00
Dico Bento II	Iguarapé-Açu/PA	13,57	4,18	4,84
Abe	S. Fco. Pará/PA	11,51	4,27	4,83
Ramal do Prata	Iguarapé-Açu/PA	10,50	4,25	4,74
Verdinha	Iguarapé-Açu/PA	10,78	4,17	4,66
Piave Verde	Iguarapé-Açu/PA	9,25	4,22	4,65
Dico Bento III	Iguarapé-Açu/PA	13,39	3,90	4,50
Wagner	Iguarapé-Açu/PA	12,25	0,92	1,60

Fonte: FALESI e KATO (1992)

A concentração de bixina, principal corante do urucum, varia, principalmente, com o tipo de planta, solo, clima e tratos culturais. Podem ser encontradas sementes com menos de 1% de bixina e até com mais de 5% deste corante.

Num estudo para a identificação de vegetais produtores de corantes existentes na flora amazônica, NAZARÉ *et al.* (1996) forneceram informações sobre a qualidade de progênies de

¹ Ver descrição deste método no ítem 3.2.3

urucum, com relação à produção do corante bixina, para ensaios de melhoramento genético, conduzidos pelo CPATU/EMBRAPA, com 36 amostras selecionadas de cultivares produtoras de corantes, nos municípios de Capitão Poço e Tracuateua, ambos no Estado do Pará. O teor de bixina do material produzido em duas safras, foi analisado através do método de KOH¹, encontrando-se concentrações em base seca desde 1,81% até 7,32%, com elevado número de amostras apresentando teores de bixina acima de 3%. Nestes ensaios, o conteúdo de umidade das sementes variou de 5,82% a 17,64%.

NAZARÉ *et al.* (1996) também analisaram teores de bixina e umidade de amostras de cultivares de urucum, plantadas em áreas de produtores instalados na Zona Bragantina do Estado do Pará, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2. Teores de bixina e umidade de cultivares da Zona Bragantina, Estado do Pará

Cultivar	Umidade (%)	Bixina (%bu)	Bixina (%bs)
Jari 1	8,80	2,46	2,71
Branca	8,76	2,36	2,59
Americana	9,66	0,60	0,66
Uncaria	9,66	0,61	0,68
Pastelão	8,75	4,70	5,15
CPATU	7,21	4,92	5,40
Jari 2	8,88	2,47	2,71
Wagner	8,19	1,52	1,65
Sta. Izabel 1	13,23	3,02	3,48
Sta. Izabel 2	14,25	3,60	4,20

Fonte: NAZARÉ *et al.*, 1996

As Figuras 1, 2 e 3 mostram aspectos gerais do fruto, das cápsulas e das sementes de urucum.

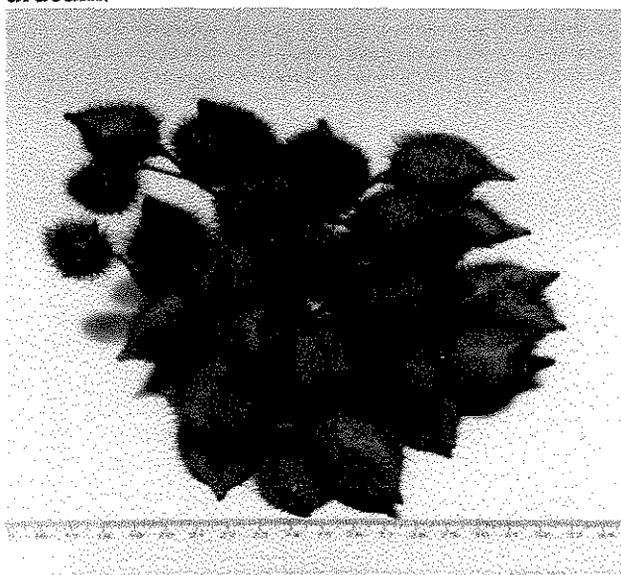


Foto: R.F. Neves



Foto: L.J. Faria

Figura 1. Frutos de urucum

¹ Ver descrição deste método no ítem 3.2.3

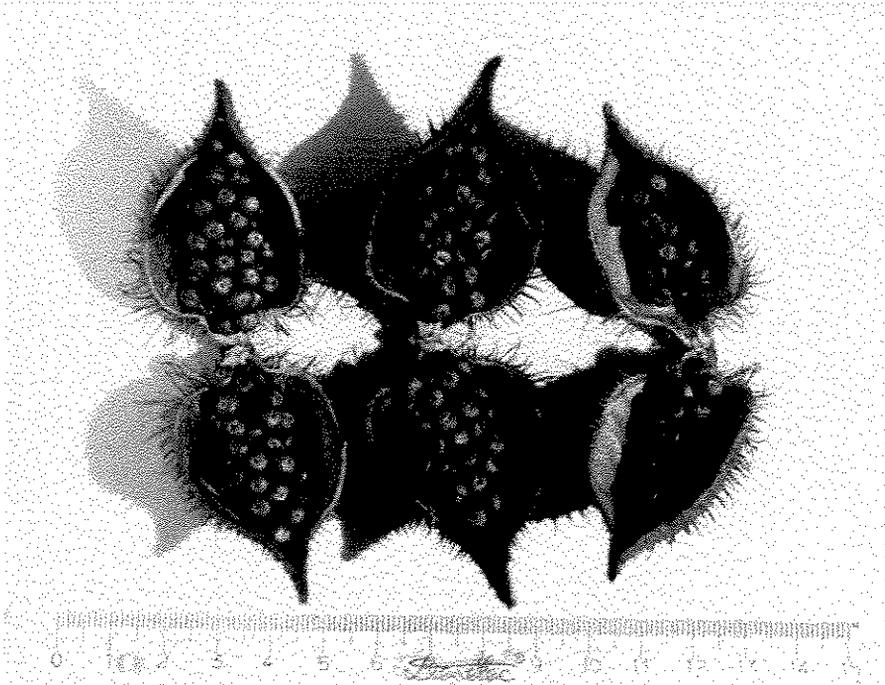


Foto: R. F. Neves

Figura 2. Cápsulas (cachopas) de urucum abertas

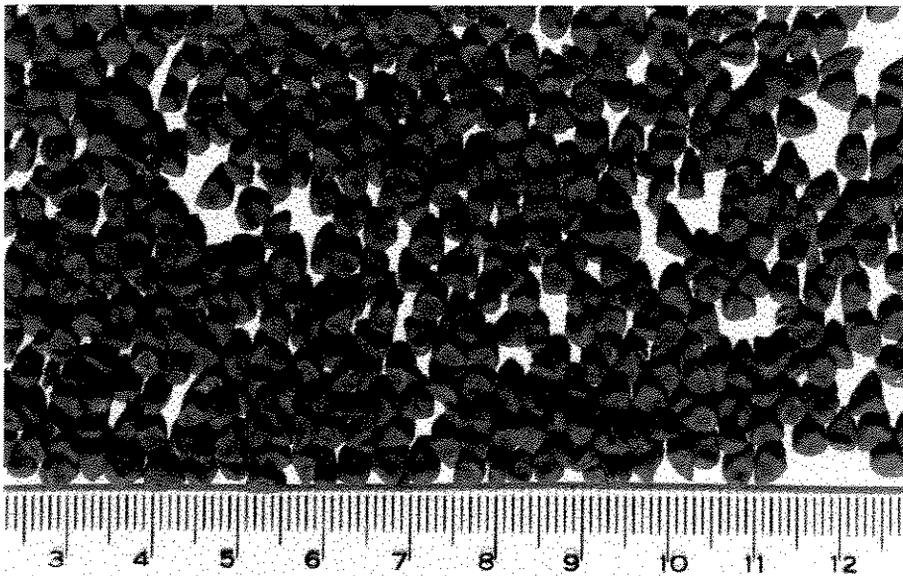


Foto: R. F. Neves

Figura 3. Sementes de urucum

2.1.2. Extração de corantes de urucum

O pigmento corante do urucum está localizado na superfície do pericarpo da semente, ou seja, na sua porção mais externa. É constituído por vários carotenóides, predominando a bixina, e se encontra aderido à superfície da semente por meio de uma resina. A

Figura 4 consiste numa fotomicrografia eletrônica¹ de uma semente de urucum, seccionada ao meio, da cultivar Piave Vermelha utilizada neste trabalho. Pelo exame cuidadoso desta figura observa-se papilas cobrindo a parte superior da semente aderida à camada mais externa e que se constitui no material corante, contendo o pigmento bixina.

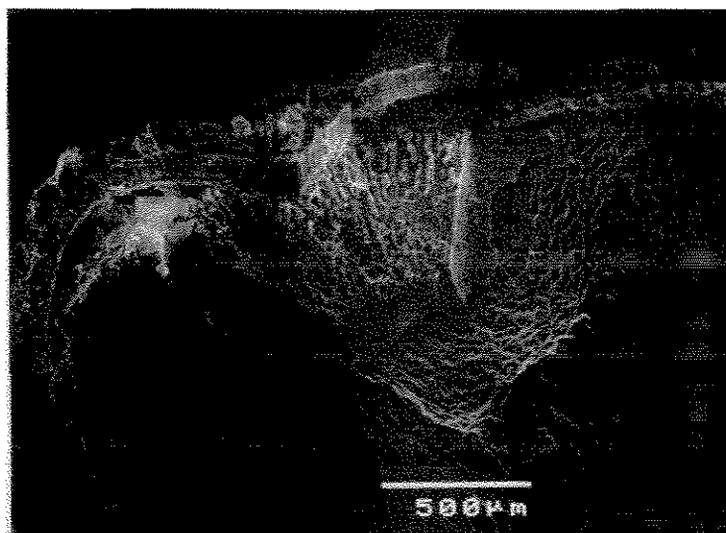


Figura 4. Imagem da semente seccionada de urucum

Essa característica, segundo CANTO *et al.* (1991), facilita o processo de extração ao permitir que se opere com os grãos inteiros, sem necessidade de trituração, o que simplifica as etapas posteriores do processo em que é feita a separação entre grãos e extratos.

Os índios brasileiros extraíam os pigmentos por meio da maceração dos grãos em água, tendo como resultado uma massa corante. Esse processo artesanal predominou por longo tempo, sendo a massa corante comercializada envolta em folha de bananeira; a imersão dos grãos, triturados ou não, era feita em água quente, seguida de evaporação (CANTO *et al.* 1991).

Conforme citações de ANDRADE (1926) nossos indígenas extraíam dois corantes das sementes, de cores vermelha e amarela. Estudos posteriores demonstraram se tratar de bixina e orellina, sendo este último solúvel em água, etanol e éter. Os nativos, instintivamente, utilizavam as propriedades dos dois corantes; usando a orellina quando colocavam as sementes de urucum imersas em grandes quantidades de água, para pintar de amarelo fios, palhas, penas e cerâmica. Serviam-se das sementes inteiras para a elaboração de gravuras de cor vermelha, onde na massa integral ou misturada a gorduras animais, predominava o corante lipossolúvel bixina.

Vale ressaltar a diferença existente entre corante e pigmento; pigmentos correspondem a uma classe de corantes, mas, ao contrário destes, os pigmentos não são solúveis no meio de aplicação. Contudo, de acordo com WEINTZ (1993), a agregação dos corantes ou pigmentos não é tão simples; existem vários exemplos para corantes de difícil solubilidade ou pigmentos parcialmente solúveis. Assim, trataremos a bixina e outros corantes extraídos das sementes de

¹ Obtida com microscópio eletrônico de varredura, modelo JSM-5400LV, marca JEOL, a 20KV e aumento de 500X.

urucum indistintamente como corantes ou pigmentos, dependendo do meio onde o mesmo se encontra.

Em termos de aplicação tecnológica, os corantes, devido à sua solubilidade, permitem uma distribuição homogênea sobre fibras vegetais ou sintéticas, e por isso são mais utilizados para tingimento. A área de aplicação dos pigmentos fica restrita às lacas e tintas para pintura (WEINTZ, 1993). Uma aplicação tecnológica dos pigmentos gerados por oxidação, existentes no Jenipapo (*Genipa americana*) verde, na elaboração de revestimento orgânico de superfícies (tintas e vernizes), visando sua utilização na indústria automotiva, é encontrada em OLIVEIRA (1997), o qual concluiu que este pigmento não é recomendado para esta aplicação devido às instabilidades e as variações que induz nos filmes onde é adicionado.

Os carotenóides constituem-se num grande grupo especial de compostos orgânicos denominados “terpenos”, constituídos por hidrocarbonetos isoméricos de fórmula $C_{10}H_{16}$, facilmente encontrados em plantas e animais. São pigmentos amarelos, alaranjados e vermelhos, com suas cores provenientes do grande número de duplas ligações conjugadas que apresentam (ALLINGER *et al.*, 1976). A bixina, é o carotenóide natural em maior concentração na semente de urucum, e o mais importante componente obtido a partir da extração direta das sementes, mecanicamente, com óleos vegetais ou com solventes orgânicos.

De acordo com SCOTTER (1995), o corante principal do urucum é o apo-carotenóide 9’cis-bixina, um éster monometílico do ácido dicarboxílico 9’cis-norbixina.

Segundo PRESTON e RICKARD (1980), mais de 80% do pigmento encontrado no urucum é bixina na forma *cis*, sendo que a extração a quente desse corante com óleos vegetais promove a formação de produtos de degradação com tonalidades amareladas, possibilitando seu emprego em alimentos que necessitem dessa coloração.

CARVALHO (1989) afirma que soluções alcalinas como hidróxido de sódio ou de potássio transformam a bixina em um sal que, nesta forma, é comercializado. Isto permite seu uso em alimentos contendo baixos teores de óleo, ampliando a faixa de utilização dos corantes de urucum.

Conforme informações de CARVALHO (1991), a acidificação do extrato alcalino das sementes de urucum, esquematizada na Figura 5, possibilita a precipitação da norbixina, que após separação é comercializada. De acordo com CARVALHO (1990), a norbixina apresenta características similares à bixina, como solubilidade e poder corante. Os processos de extração de corantes de urucum variam desde o uso de óleos vegetais e solventes orgânicos, até processos puramente mecânicos.

INGRAN e FRANCIS (1969) citam dois métodos para a extração da bixina. O primeiro consiste na produção de uma massa de pigmento que é subsequentemente purificado por precipitação e técnicas de recristalização para obter-se bixina pura. O segundo se refere à produção do corante alimentício por extração deste a partir da semente seca à temperaturas próximas a 125 °C com óleo vegetal, propileno glicol ou outro solvente disponível.

Foram realizadas em ACHIOTE [19--] uma série de ensaios com o objetivo de determinar o solvente mais adequado para a extração do corante de urucum. Utilizando água, hidróxido de sódio e álcool etílico, conclui-se que a extração com este último, produz material com coloração compatível à natural e com melhor rendimento no processo.

OROZCO (1973) descreveu dois métodos de extração utilizando-se sementes de urucum frescas e úmidas. No primeiro, com propano, obteve rendimento de 8% em peso em relação à semente seca. O segundo método, utilizando solução aquosa de hidróxido de amônio aquecido em recipientes abertos, propiciou rendimento cinco vezes maior em relação ao anterior.

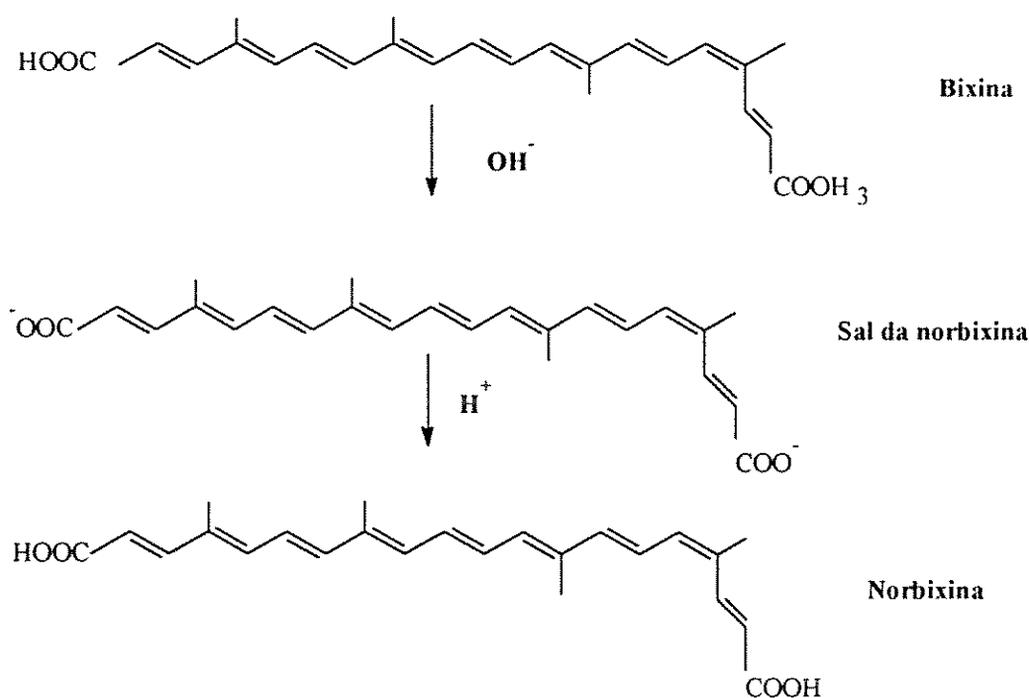


Figura 5. Esquema da acidificação do extrato alcalino do corante das sementes de urucum.

CARRERA (1977) trabalhou com dois métodos de extração de corantes de sementes de urucum: lixiviação com água potável e com hidróxido de sódio. No processo com água potável, utilizando agitação e temperaturas de 21, 40 e 60°C, obteve rendimento máximo de 13% em relação à semente seca. No processo de extração utilizando soda cáustica em contra-corrente, o rendimento foi maior, pois foram extraídos 81,2% do corante contido na semente, contra 61,5% obtido na lixiviação com água potável.

A bixina apresenta a propriedade de ser lipossolúvel e portanto sujeita à extração com alguns solventes orgânicos. Entretanto, esse processo está limitado pela utilização de um solvente

que seja compatível com o emprego do produto final. Para a utilização do corante na alimentação, restringe-se o uso de uma série de solventes, devido à toxicidade de seus resíduos.

CARVALHO (1990) apresentou dois fluxogramas da extração do corante de urucum. Um deles, utiliza solvente orgânico que apresenta a propriedade de solubilizar a bixina e outro utiliza solvente alcalino para a obtenção de norbixato e norbixina. De acordo com o autor, o etanol usado como solvente na extração de corantes do urucum, apresentou a propriedade de solubilizar apenas o material que prende o pigmento à semente, deixando a bixina parcialmente livre para a separação. Estes métodos permitiram a obtenção de um produto sólido com concentração de bixina que varia de 10% a 50%.

CANTO *et al.* (1991) apresentaram fluxogramas dos processos de extração de pigmentos de urucum utilizando óleo comestível, solvente orgânico e soluções alcalinas, os quais estão esquematizados nas Figuras 6, 7 e 8, respectivamente.

Na extração da bixina por óleo comestível, os grãos de urucum são, inicialmente, pesados e colocados em recipiente extrator provido de agitador, juntamente com um óleo comestível, como por exemplo o de soja; finda a operação de extração, o material resultante é peneirado para a separação do óleo, agora rico em pigmentos, dos grãos já esgotados. O óleo enriquecido é aquecido e filtrado, obtendo-se o corante isento de impurezas físicas, na forma predominante de bixina dissolvida em óleo.

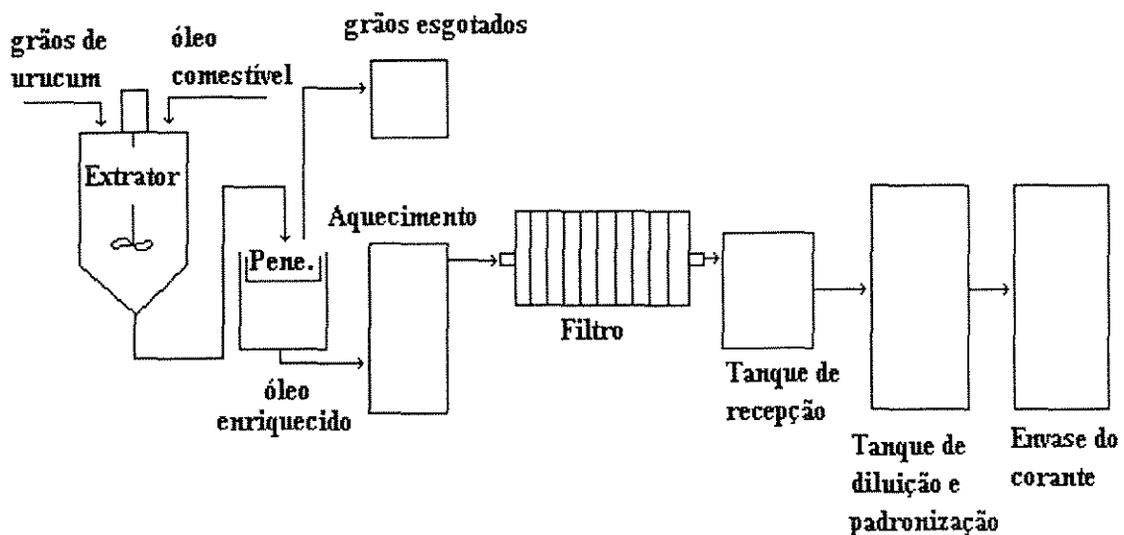


Figura 6. Processo de extração de bixina utilizando óleo comestível como solvente

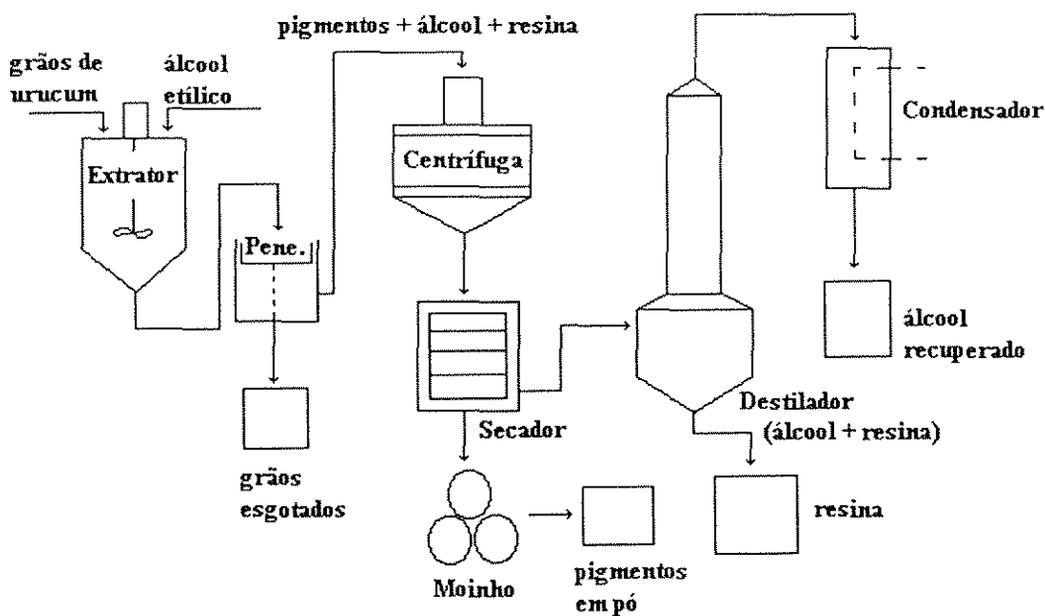


Figura 7. Processo de extração de pigmentos do urucum, por meio de álcool etílico.

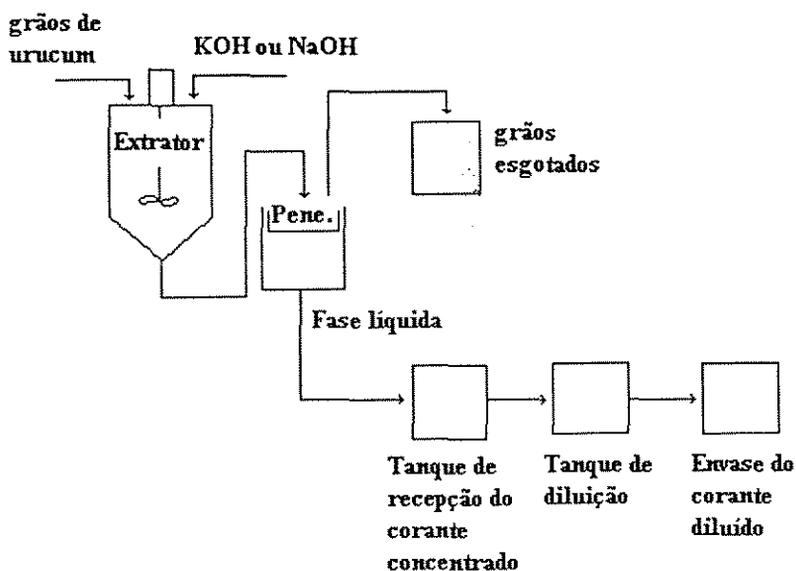


Figura 8. Processo de extração de corante de urucum por meio de soluções alcalinas.

No fluxograma do processo utilizando solvente orgânico é apresentado a extração com etanol que, segundo CARVALHO (1990), apresenta a propriedade de solubilizar parte do material resinoso aderente entre os pigmentos e os grãos, facilitando a extração.

Na extração do corante de urucum por meio de solução alcalina, os grãos são, inicialmente, pesados e colocados, juntamente com a solução alcalina (NaOH ou KOH), em

equipamento extrator provido de agitador; permanecendo por um tempo determinado sob agitação. Após a extração, os grãos são separados por meio de peneira fina. A fase líquida, representada pelo corante líquido concentrado, vai para um tanque de recepção; daí, segue para o tanque de diluição; o corante diluído a um nível de concentração compatível com o uso que a ele vai ser dado é envasado em recipientes que o protejam da luz.

PÓVOA (1992), avaliou a eficiência da extração do corante de urucum com etanol a 95%, água, óleo de soja e KOH 0,5%, analisando o teor de pigmentos na semente antes e após a extração com cada solvente. Concluiu que os melhores solventes extratores foram o etanol e o KOH, com os quais obteve, aproximadamente, 98% de extração dos pigmentos da semente. O corante obtido com óleo de soja apresenta-se mais puro, sendo constituído em cerca de 92,6% por apenas pigmento e óleo.

A extração dos corantes totais contidos nas sementes de urucum foi realizada por BAHLKAR e DUBASH (1983) através de vários métodos utilizando diferentes solventes orgânicos, soluções aquosas de carbonato de potássio e hidróxido de sódio, como também por meio de remoção dos pigmentos utilizando agentes abrasivos e água. Após otimizarem as condições de extração, os autores concluíram que o melhor método foi o da extração com solução de clorofórmio e etanol na proporção de 25:75 em volume, o qual propiciou um rendimento de 76% expresso como corantes totais.

O valor de 76% acima mencionado, foi criticado por PRENTICE-HERNANDEZ e RUSIG (1992) quando afirmaram que este rendimento, embora elevado, não representa adequadamente a avaliação do rendimento de extração de corante do urucum, já que é importante o mesmo estar expresso em termos de bixina, pois o poder corante total do urucum é baseado no teor do princípio ativo corante, que é a bixina. Além disso, os autores ressaltaram que solventes como o clorofórmio não estão incluídos na relação de substâncias permitidas na indústria de alimentos, e por isso métodos que os utilizam são bastantes restritivos. Assim, PRENTICE-HERNANDEZ e RUSIG (1992) utilizaram etanol para obter corante de urucum em pó. Partindo de sementes com conteúdos iniciais de bixina de 1,88% e 2,35%, produziram um concentrado com teor de 65,47% de bixina, com rendimento de 4,33% expresso em bixina, para as sementes com maior teor deste corante.

Trabalhando com o mesmo solvente, etanol, PENNA Jr. e FARIA (1995) estudaram a influência de variáveis isoladas e combinadas no processo de extração de corantes totais contidos nas sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha. Observam que a temperatura, a relação entre as massas de semente e solvente e a combinação de ambas, foram as variáveis mais influentes no rendimento do processo. Concluíram que o tempo não teve significância após 40 minutos de extração, sendo obtido o rendimento máximo de 18%, em corantes totais, utilizado-se 80°C e 40 minutos de tempo de processo, para uma relação de 1:3 em volume, entre sementes e etanol.

A precipitação ácida é um processo que tem sido empregado para a purificação dos extratos de urucum e como meio de concentração para se obter pigmentos em pó. Com esta finalidade PIMENTEL (1995) produziu corantes de urucum em pó utilizando o processo de

precipitação ácida para pré-concentração dos pigmentos. Os extratos foram obtidos com solução extratora de hidróxido de potássio 0,1N e de hidróxido de amônio 0,52N em etanol a 58%. Os extratos de urucum obtidos em solução de amônia e etanol apresentaram maiores teores de pigmentos, correspondendo a 24,91%; 23,05% e 22,75%; respectivamente, para produtos nas formas líquida, pasta e em pó, todos expressos como bixina em base seca. Os fluxogramas contidos nas Figuras 9 e 10 ilustram os dois processos de extração realizados por PIMENTEL (1995).

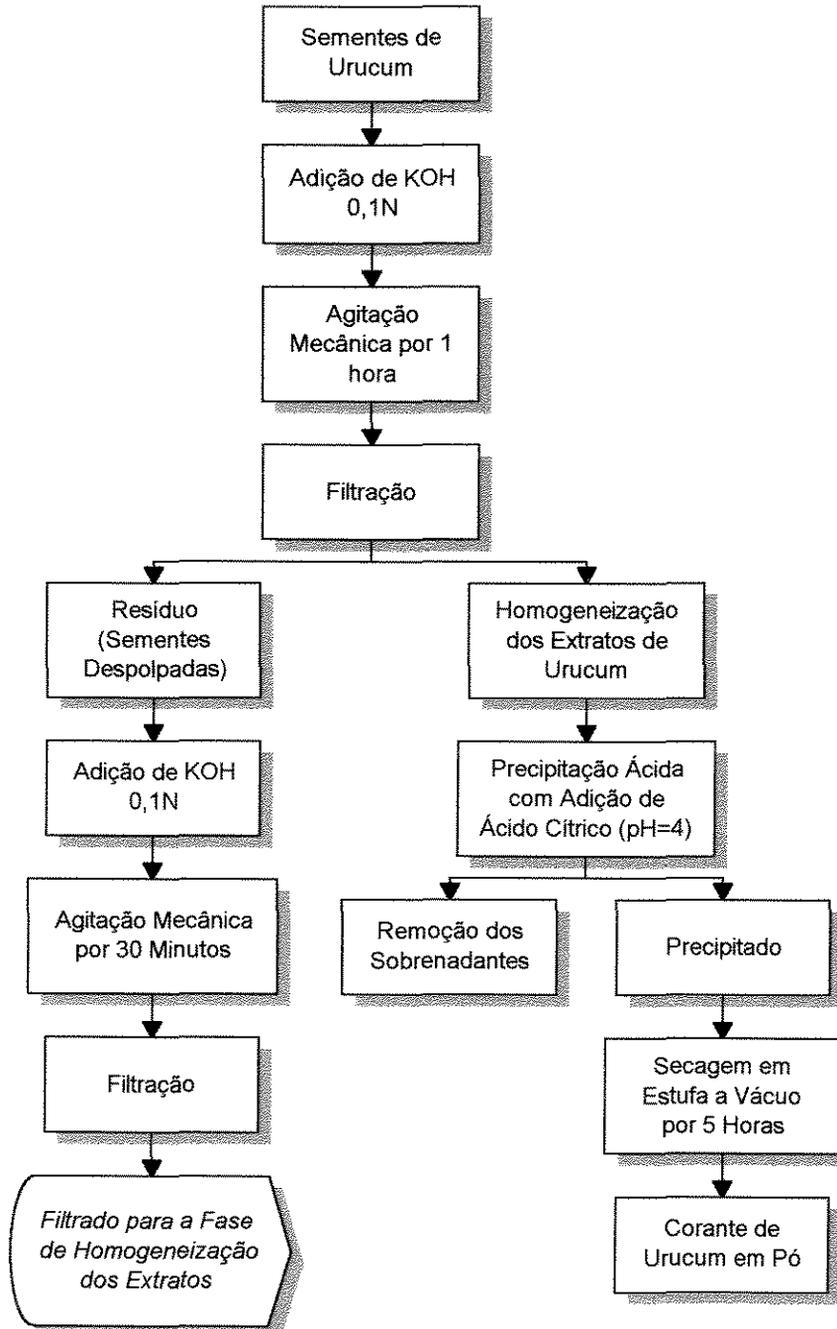


Figura 9. Fluxograma para a obtenção de norbixina em pó, utilizando KOH

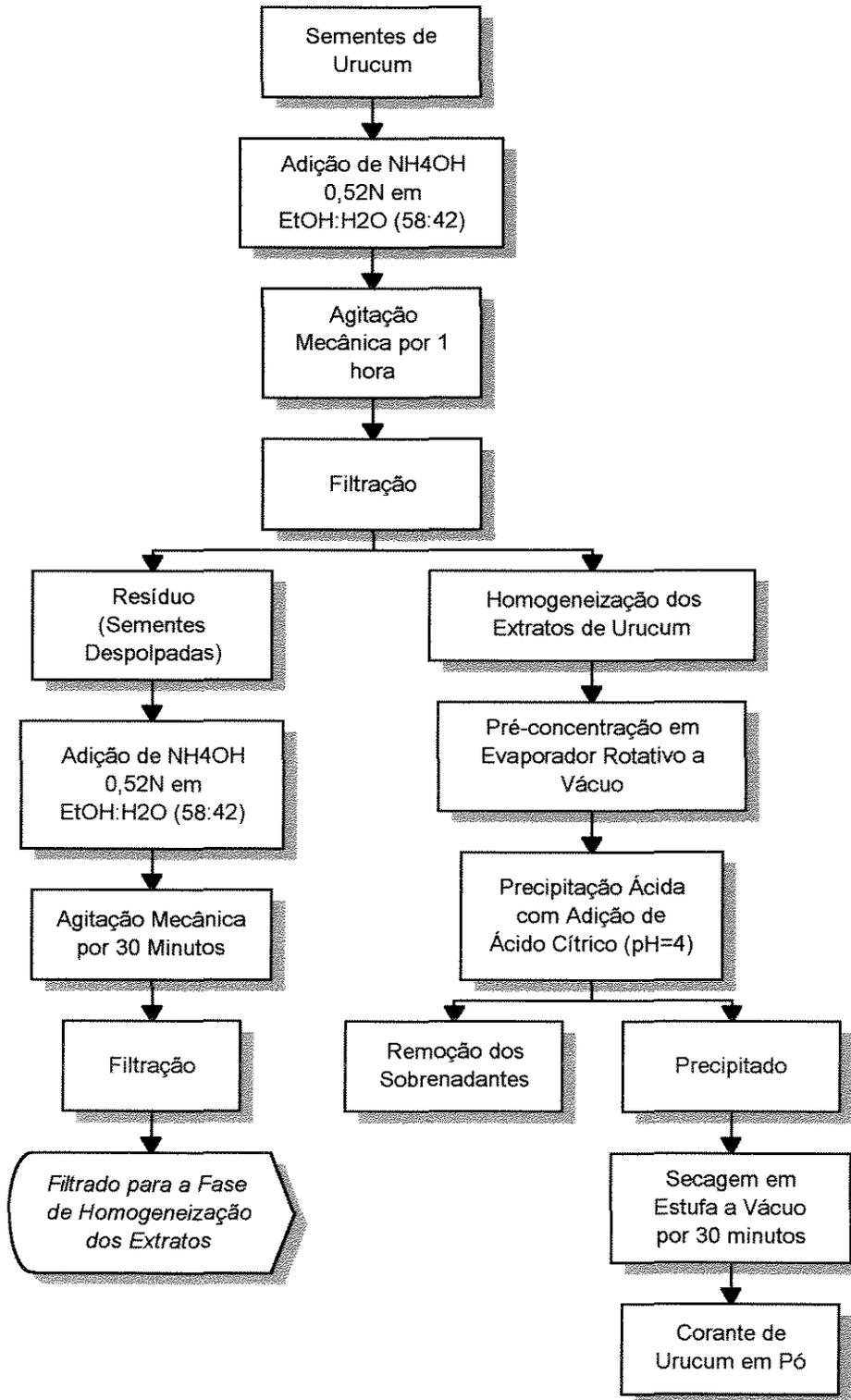


Figura 10. Fluxograma para obtenção de norbixina e bixina em pó, utilizando solução alcoólica de NH_4OH

Na Figura 11 encontram-se esquematizadas as reações químicas que ocorrem durante o processo de obtenção de bixina e norbixina, quando se utiliza soluções alcoólicas de hidróxido de amônio (PIMENTEL, 1995).

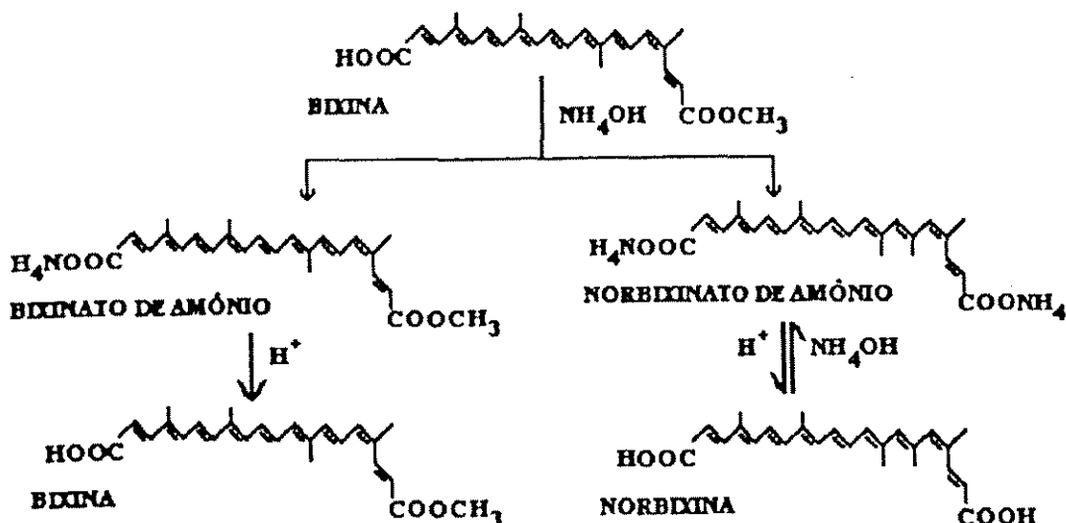


Figura 11. Reações químicas para obtenção de bixina e norbixina, utilizando-se solução alcoólica de NH₄OH

Além dos processos de extração por solventes, a bixina também pode ser extraída por processos puramente mecânicos, que consistem, geralmente, de técnicas físicas simples que promovem a raspagem ou o atrito entre os grãos visando a separação de sua camada externa que contém o corante, o qual é obtido na forma predominante de bixina. Esses processos estão, ainda, em fase de aperfeiçoamento e, de uma forma geral, os produtos assim obtidos, atualmente, apresentam baixos teores de bixina (CANTO *et al.*, 1991; CARVALHO, 1989).

GUIMARÃES, BARBOSA e MASSARANI (1989), através da simples movimentação das sementes de urucum em leito de jorro cônico, extraíram mecanicamente a bixina, obtendo 20% em massa deste corante, estimando em cerca de 6h o tempo para a sua completa remoção da superfície da semente.

CARVALHO (1990) cita um sistema de separação por raspagem, onde o material externo da semente de urucum é extraído por uma escova de nylon em movimento circular. As sementes ficam sobre uma tela e o pigmento é coletado na parte inferior do equipamento. O autor informa que a camada que encobre a semente de urucum representa cerca de 6% do peso da semente, dos quais aproximadamente 2% é devido à bixina. Portanto, o produto de uma extração mecânica, onde além de toda a parte externa participam também pedaços da semente, apresenta baixos teores de bixina, geralmente entre 10% a 30%.

Uma dificuldade encontrada no processo de extração mecânica dos corantes totais, conforme observações de CANTO *et al.* (1991), deriva da forma do grão de urucum, o qual apresenta, em geral, superfície com reentrâncias de difícil acesso mecânico, onde se aloja parte dos pigmentos. Há, porém, urucuzeiros cujos frutos apresentam grãos arredondados, com esfericidade próximo de 1 e sem reentrâncias, os quais permitem melhores rendimentos na extração de bixina por processo mecânico.

De acordo com informações de CARVALHO (1989), têm sido empregadas enzimas que permitem a extração da bixina da semente de urucum em meio aquoso. O método, apesar de ser ainda dispendioso, apresenta a mesma vantagem da extração com gás supercrítico, ou seja, obtenção de bixina isenta de contaminação por solventes orgânicos.

Tendo como objetivos a remoção mecânica da camada delgada de corante que reveste a semente de urucuzeiro e a comparação entre sistemas aerados e não aerados, BARRETO, JAEGER e MASSARANI (1989) realizaram ensaios para obtenção de bixina utilizando leito de jorro cônico, betoneira comum, sistema vibratório e moinho de bolas. Para uma mesma partida de grãos e um tempo de operação de 10 horas, constataram que, a princípio, a betoneira e o moinho de bolas oferecem melhores resultados que o leito de jorro, o qual produz pó com umidades e teores de bixina ligeiramente abaixo dos sistemas não aerados.

MASSARANI, PASSOS e BARRETO (1992) obtiveram um concentrado de pigmentos de urucum utilizando uma unidade de leito fixo de jorro não convencional, analisando a influência de parâmetros dinâmicos do escoamento em leitos cônicos e com tubo central. Com base nos altos teores de bixina obtidos concluíram que o processo pode ser técnica e comercialmente viável para a produção deste corante em pó, pois combina em uma só unidade, a atrição e a secagem das sementes garantindo a qualidade do produto final.

Em trabalho recentes, PASSOS *et al.* (1997) realizaram uma otimização dos parâmetros geométricos, dinâmicos e de secagem do processo de extração mecânica de bixina concentrada em pó através de leito de jorro cônico com tubo interno, conforme processo proposto anteriormente nos trabalhos de MASSARANI e colaboradores (BARRETO, JAEGER e MASSARANI, 1989; GUIMARÃES, BARBOSA e MASSARANI, 1989; MASSARANI, PASSOS e BARRETO, 1992).

O modo como as variáveis temperatura, relação entre massa de sementes e de solvente e o tempo influenciam no rendimento da extração de corantes totais, utilizando extrator com agitação e refluxo, foi reportado por PENNA Jr; MENDEZ e FARIA (1994), onde observou-se o efeito significativo da temperatura e da relação entre massas de sementes e solvente. Os experimentos foram estatisticamente planejados, utilizando-se o etanol como solvente, visando aplicações do produto obtido na indústria de alimentos.

Com o objetivo de aprimorar os procedimentos analíticos com os corantes de urucum, PARACAMPO, BENTES e SERRUYA (1994) realizaram estudos comparativos de métodos de extração com solventes, utilizando diclorometano, clorofórmio e uma combinação de ambos na proporção 2:3, respectivamente. Observaram que os parâmetros tempo de contato, natureza e quantidade de solvente e o meio de filtração, influenciam significativamente o rendimento de extração de bixina. Constataram que o uso de celite facilita o contato entre o solvente e a amostra e melhora bastante o processo de extração. Concluíram que o solvente diclorometano propicia rendimento de extração semelhante ao obtido com clorofórmio, com a vantagem de ser menos tóxico que este.

BATISTA, STRINGHETA e GOMES (1994) avaliaram as variáveis operacionais do processo de extração de norbixina utilizando soluções de KOH. Concluíram que o rendimento da extração é influenciado pela concentração da solução alcalina, proporção de sementes e solução, número de extração, pH e também pelo método de preparo do extrato a ser processado em “spray dryer” para a obtenção de norbixina em pó.

Seguindo as idéias de MASSARANI, PASSOS E BARRETO (1992); ALSINA, ALMEIDA e SILVA (1994) estudaram a fluidodinâmica do leito de jorro com misturas de grãos de urucum de diâmetros médios diferentes. Após a utilização de várias relações entre a massa inicial de pó e a massa de grãos, a análise dos resultados demonstrou uma influência significativa da presença dos finos sobre as curvas características, com uma diminuição da diferença de pressão máxima (ΔP) e um aumento no ΔP de jorro mínimo, com o aumento da quantidade relativa de pó.

As crescentes restrições à presença de solventes orgânicos em corantes naturais têm levado pesquisadores e empresários a procurar métodos de extração e de purificação mais “limpos”, dentre os quais destacam-se o processo de extração por fluidos pressurizados, especialmente o que utiliza CO₂ supercrítico. Esta técnica tem se mostrado vantajosa para a extração de princípios de matérias primas naturais de alto valor comercial, resultando produtos de alta qualidade, conforme indicam os trabalhos contidos em MEIRELES (1994) e MEIRELES (1997).

Com relação a aplicação para extração de bixina com fluidos pressurizados, CANTO *et al.* (1991) informam que a empresa dinamarquesa Christian Hansen, líder mundial no mercado de corantes naturais, efetua estudos experimentais com esta metodologia, sem contudo ter publicado os resultados sobre a viabilidade técnica e/ou econômica do processo. Por outro lado, CHAO *et al.* (1991) extraíram os pigmentos totais contidos em sementes de urucum utilizando CO₂ supercrítico com diferentes pressões e temperaturas, e identificaram extratos contendo principalmente bixina, norbixina e geranilgeraniol. Constataram que o maior rendimento de extração dos pigmentos totais e de bixina de alta pureza, é obtido à pressão de 310 bar¹ e 60°C. Pelo exame comparativo dos resultados encontrados por esses autores, observa-se que a quantidade de pigmentos totais extraídos nas condições ótimas representam apenas 10% do total de pigmentos extraídos por método convencional, utilizando-se uma mistura de clorofórmio e etanol na proporção de 1:3, à mesma temperatura e com 1h de operação.

2.1.3. Beneficiamento do urucum, caracterização e secagem de suas sementes e degradação do corante

Estão citados na literatura vários processos de secagem de urucum que incluem, desde a secagem natural direta dos cachos ou das sementes em lonas estendidas no solo, em pisos de asfalto ou cimento; processos utilizando secadores solares e processos envolvendo a secagem

¹ 1 bar = 0,1 MPa \approx 1 atm

artificial através de ar aquecido pela queima de combustíveis ou por meio de resistências elétricas, até a secagem dielétrica utilizando energia de microondas.

FALESI (1987) afirma que o método de secagem natural direta, torna-se inadequado, devido à possível contaminação por animais domésticos existentes no local, podendo causar até contaminação grave. Esse método é ilustrado na Figura 12, na qual observa-se as sementes expostas à incidência solar direta sobre lona em terreiro próximo à zona de plantio.



Foto: L. J. Faria

Figura 12. Exposição das sementes de urucum ao sol

De acordo com FALESI (1987), no beneficiamento propriamente dito, os cachos secos são colocados em máquinas denominadas descachopadeiras, que variam desde o mais empírico método de batção até equipamentos mais sofisticados. Essas máquinas beneficiam de 1500 até 2000 kg de urucum em 10 horas de operação, sendo utilizada no Estado do Pará uma similar mais simplificada, porém eficiente, para debulhar cereais, pimenta-do-reino e urucum. O rendimento médio com o urucum, segundo o autor, é de 400 kg em 8 horas de operação. A Figura 13 mostra a operação de descachopamento e obtenção de sementes de urucum.

Após o descachopamento, as sementes são colocadas para secar por um período superior a 24 horas em ambiente sombreado. Em seguida, após realizado um processo de aeração, as sementes isentas de resíduos são ensacadas para armazenamento. A umidade das sementes deve estar compreendida entre 10% a 12% bu, para se evitar o desenvolvimento de fungos e da fermentação.

Conforme informações de OLIVEIRA (1998), no período chuvoso, compreendido entre os meses de janeiro e agosto na região Bragantina, no nordeste do Estado do Pará, as sementes armazenadas com teores de umidade acima de 8% bu, iniciam um processo de aquecimento e

começam a fermentar. Observa-se então uma rápida perda do teor de bixina, inclusive continuamente, nos extratos preparados com este material. As sementes, nesta situação, ficam mais oleosas dificultando sua industrialização. Estes fatos ocorrem também com material acima de 12% no período de estiagem, que vai desde setembro até dezembro, nesta região do Estado.

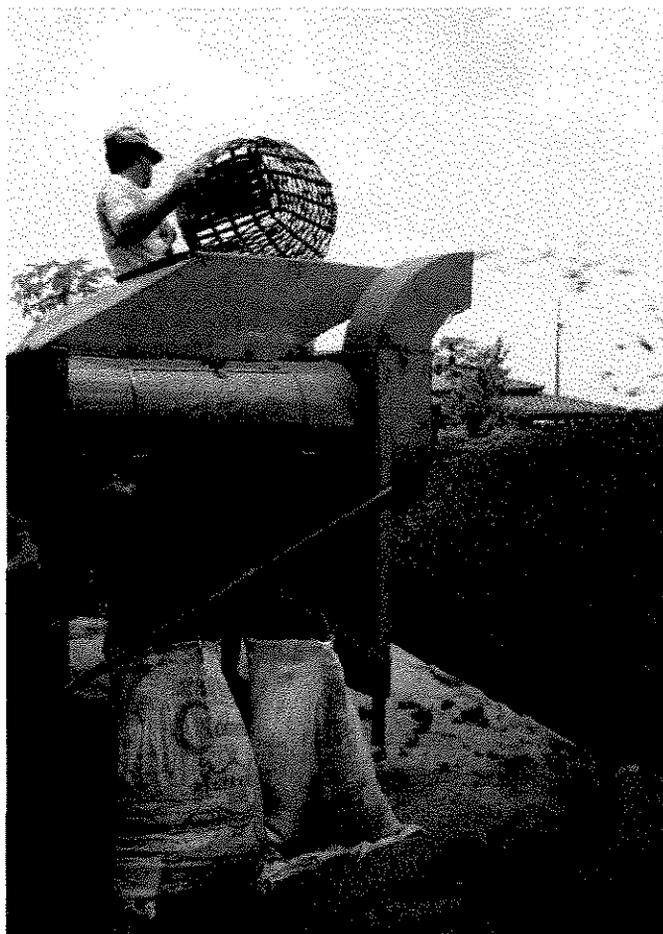


Foto: L. J. Faria

Figura 13. Operação de descachopamento das sementes de urucum

Desta forma, não se tomando as devidas precauções, ou seja, reduzindo-se conteúdo de umidade das sementes de urucum adequadamente, implica numa perda de qualidade e conseqüentemente de preço do produto. OLIVEIRA (1998) afirma que constatado o desenvolvimento de fungos e da fermentação, os produtores regionais costumam colocar as sementes novamente ao sol, o que contribui para uma perda de peso indevida diminuindo ainda mais o teor de bixina.

OLIVEIRA e GHIRALDINI (1990) recomendam que após a colheita, os cachos devem ser colocados próximos à planta, ou espalhados nas entrelinhas para a pré-secagem, e somente depois, submetidos ao processo de beneficiamento, conforme é mostrado na Figura 14.

Outro modo citado pelos autores consiste em colher e armazenar os frutos em galpões, antes do beneficiamento, para que se complete a secagem do cacho. Ressaltam ainda a

importância de não se fazer a secagem das sementes ao sol, em terreiros ou lonas, devido à perda de qualidade e de quantidade de pigmentos que este procedimento proporciona.



Foto: L. J. Faria

Figura 14. Colheita das sementes de urucum

Para ressaltar a importância da secagem e do armazenamento na qualidade de sementes de urucum, FALESI e KATO (1992) realizaram um teste preliminar colhendo em meses diferentes e armazenando o material de uma determinada plantação de urucum, comparando os teores de bixina encontrados com os de uma amostra recém-colhida e beneficiada. A Tabela 3 indica a perda nos teores de bixina à medida que o material permanece armazenado. Todas as análises foram realizadas em março de 1988.

Tabela 3. Degradação de bixina em processo de estocagem

Período de colheita das sementes	Bixina* (%)
Abril de 1987	0,53
Junho de 1987	1,31
Novembro de 1987	2,45
Março de 1988 (recém-colhida)	2,50

Fonte: FALESI e KATO (1992)

* Método de determinação : CHCl_3

Para a retirada de sementes dos frutos torna-se necessário o beneficiamento em máquinas apropriadas, onde as sementes são libertadas da placenta e separadas das impurezas e das matérias estranhas, devendo ser envasadas, segundo OLIVEIRA e GHIRALDINI (1990), em sacos de 50 kg, de aniagem ou de polipropileno trançado, limpo e resistente. De acordo com os autores, o ensacamento é recomendável para evitar-se o manuseio que ocorreria se as sementes

fossem armazenadas a granel, o que comprometeria, também, a qualidade e quantidade de pigmento que se desprenderia do pericarpo da semente.

De acordo com FALESÍ e KATO (1992), o beneficiamento dos grãos tem sido no sentido de se obter um produto final (grãos) com o teor de corante próximo ao existente originalmente no fruto. O desconhecimento de processos adequados pelos produtores regionais neste segmento da cultura é, segundo os autores, o principal responsável pela produção de grãos com baixo teor de bixina, embora, na maioria das vezes, o tipo cultivado possua, em condições naturais, bixina em concentrações bem acima do exigido pelos importadores.

OLIVEIRA e GHIRALDINI (1990) apresentaram uma classificação preliminar para fins comerciais das sementes desidratadas de urucum contendo sua polpa vermelha, conforme indicada na Tabela 4.

Tabela 4. Classificação das sementes de urucum

Fatores de Qualidade	Classes		
	Tipo 1	Fora de especificação	
		Tipo 2	Tipo 3
Umidade	< 10%	10 a 14%	> 14%
Teor de bixina	> 2,5%	2,0 a 2,5 %	< 1,8%
Impurezas	< 5%	≤ 5%	> 5%
Matéria estranha	ausente	ausente	ausente

Fonte: OLIVEIRA e GHIRALDINI (1990)

Para efeito dos padrões a serem adotados, considera-se:

- a) **Umidade:** quantidade de água contida na amostra, %;
- b) **Teor de pigmento:** concentração de pigmento existente no pericarpo da semente (bixina), %;
- c) **Odor:** cheiro típico desejado, aromático e penetrante;
- d) **Impurezas:** detritos do próprio produto, como talos e folhas;
- e) **Matérias estranhas:** grãos ou sementes de outros vegetais, além de corpos estranhos de qualquer natureza, que não sejam oriundos do produto e nem nocivos à saúde humana;
- f) **Mofo:** bolor proveniente de fermentação do produto provocado por fungos e/ou bactérias.

Uma proposta de normalização de identidade, qualidade, apresentação e embalagem do urucum para comercialização interna, foi apresentada ao Ministério da Agricultura por RASERA (1991), na qual as sementes de urucum são classificadas em dois tipos e definidas com os limites máximos de tolerância de umidade, teor de pigmentos, impurezas, matérias estranhas e os defeitos (fermentadas, mofadas, brotadas, chochas, descoloridas, carunchadas, danificadas e quebradas), de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5. Proposta de classificação das sementes de urucum conforme a qualidade

Tipo	Umidade	Teor de pigmentos (min.)	Impurezas	Matérias estranhas	Grãos avariados
1	10,0 %	2,5 %	3,0 %	0,0%	1,0%
2	12,0%	1,8 %	5,0 %	0,5 %	2,0%

Fonte: Ministério da Agricultura (proposta de normalização) - RASERA (1991)

Quando os percentuais excederem os limites especificados na Tabela 5, o urucum será classificado como abaixo do padrão.

As sementes serão desclassificadas quando apresentarem uma ou mais das seguintes características, sendo proibida a sua comercialização para o consumo: mau estado de conservação, odor estranho ao produto, substâncias nocivas à saúde e presença de insetos vivos.

De acordo com INGRAM e FRANCIS (1969), os frutos devem ser secados naturalmente sobre esteiras ou telas, protegidos das chuvas e do sereno noturno, sendo suficiente de 4 a 10 dias para completar a secagem, podendo-se então abrir as cápsulas para a retirada das sementes e posterior acondicionamento. Os autores recomendam que a secagem do pigmento cru obtido no processo de extração seja feita utilizando cloreto de cálcio em equipamento a vácuo.

CARRERA (1977) comenta a literatura sobre os sistemas de secagem e observa que alguns autores não recomendam a secagem do urucum diretamente ao sol, devido à degradação que a bixina apresenta em contato com raios ultravioleta e estabelece que a secagem rápida na temperatura de 60°C em secador a convecção forçada produz material com qualidade satisfatória.

Com o objetivo de melhor controlar as condições do processo de secagem do urucum, MURILLO (1983) utilizou dois tipos de secadores artificiais: secador de ar aquecido por convecção natural e secador de circulação forçada de ar quente, ambos com calefação à base de lenha. No primeiro secador, as temperaturas de entrada e saída foram 75°C e 69°C, respectivamente. O tempo de secagem oscilou entre 6 a 8 horas para uma massa inicial de 90 kg de semente fresca, para obter uma massa final de 26 kg de semente seca, com um consumo de 0,5 m³ de lenha por turno de 8 horas. No segundo secador, o ar foi insuflado através de um soprador movido eletricamente à vazão de 6000 m³/h, sendo a temperatura média no equipamento 70 °C ± 5 °C, para um tempo de secagem de 16 a 20 horas. A capacidade deste secador foi de 367,5 kg de sementes frescas, com um rendimento de 28% e consumo de 1 m³ de lenha por turno de 20 horas. O autor recomenda que a temperatura do ar de secagem nos secadores utilizados deva estar entre 65 °C e 75 °C, para obter-se um rendimento médio de semente seca de 28% a 30% em relação à semente fresca, e umidade final de 14%.

PINHEIRO, SILVA e ALSINA (1990) secaram sementes de urucum utilizando um leito de jorro com tubo central adaptado às condições propícias ao processo, visando minimizar a degradação térmica da bixina. Foi observado que a secagem ocorre com uma considerável perda de umidade nos primeiros 20 minutos, reduzindo-se até aproximadamente 75% do seu valor inicial, ao término do processo. A umidade inicial das sementes utilizadas variou de 6,0% a 34,6%, base seca, e a temperatura do ar na entrada de 50 a 80 °C, para cargas de 10 e 50 kg de sementes. Os autores observaram que nestas condições de operação, a concentração do corante não se altera significativamente, não havendo portanto degradação apreciável de bixina mesmo a 80°C. Constatou-se também que as taxas de secagem aumentam com o aumento da temperatura. Observaram que o processo apresenta controle de transferência difusional interna e que o aumento da umidade implica um aumento na difusividade efetiva, indicando que um coeficiente de difusão variável seria adequado para descrever o fenômeno.

Os dados obtidos por PINHEIRO, SILVA e ALSINA (1990) estão sumarizados na Tabela 6.

Tabela 6. Condições operacionais dos ensaios de secagem de sementes de urucum em leito de jorro

Tg (°C)	Xi (%bs)	Q (m ³ /h)	m (kg)	B _i (%bs)	B _r (%bs)
59,5	7,0	161,6	10	1,59	1,37
55,7	7,4	161,6	10	1,14	1,09
68,5	9,2	161,6	10	1,68	1,68
71,2	31,5	161,6	10	2,82	2,50
54,0	10,1	161,1	10	2,60	2,30
54,2	34,6	161,6	10	2,50	2,30
53,7	9,5	146,9	10	1,76	1,75
54,1	18,6	146,9	10	1,76	1,75
53,3	7,1	161,6	10	1,35	1,15
52,2	6,6	161,6	50	1,42	1,47
80,8	15,1	161,6	10	-	-
63,5	19,5	161,6	10	1,30	1,15
80,1	6,0	161,1	10	-	-

Fonte: PINHEIRO, SILVA e ALSINA (1990)

Esses resultados concordam em parte com as observações experimentais de MASSARANI, PASSOS e BARRETO (1992), utilizando equipamento similar.

Visando equacionar e analisar o coeficiente de difusão e a umidade de equilíbrio das sementes de urucum em função da temperatura de secagem e da umidade das sementes, MENEZES e PASSOS (1995) utilizaram ensaios em camada fina fluidizada umidificando o material para simular as condições de colheita. Analisando os parâmetros de secagem obtidos através de dados experimentais, concluíram que o coeficiente de difusão da água contida nas sementes é independente da umidade inicial da mesmas. Este resultado não foi verificado no trabalho de SILVA e ALSINA (1994), sobre o mecanismo da secagem de urucum em leito de jorro, os quais constataram que o processo segue o modelo difusivo com a difusividade efetiva estimada a partir do modelo, variando proporcionalmente em função da temperatura e da umidade inicial das sementes.

Dando continuidade ao estudo do processo de secagem de sementes de urucum em leito de jorro, ALSINA e colaboradores (SILVA e ALSINA, 1991; SILVA, MARIZ e ALSINA, 1992; SILVA e ALSINA, 1994), comprovando os resultados anteriores, verificaram que a secagem ocorre predominantemente no período de taxa decrescente com controle interno à transferência de massa, que a reumidificação do material não influencia no comportamento das curvas de secagem e que esse processo de remoção de umidade é mais rápido quando comparado com a secagem em leito fixo, devido ao maior contato do ar de aquecimento com as partículas no leito de jorro.

Trabalhando com leito de jorro, MASSARANI, PASSOS E BARRETO (1992) observaram que a máxima temperatura da semente de urucum e do ar de entrada, para preservar o teor inicial de bixina, em uma hora de operação, pode ser estimada em 60°C e 114°C, respectivamente.

O mesmo foi verificado por PASSOS *et al.* (1997) para a temperatura do leito de semente, contudo, recomenda-se nesse trabalho que a temperatura de entrada do ar não exceda 70°C, mesmo para equipamentos sem o tubo interno, para que seja mantida a qualidade das sementes de urucum processadas em termos da concentração de corante.

Utilizando sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha com 10% bs de umidade inicial, PENNA Jr. (1993) realizou comparações entre processos de secagem convectiva em leito lixo e secagem dielétrica utilizando fonte de emissão de radiação infra-vermelha. Verificou através da análise das curvas de secagem obtidas nos dois secadores, que a secagem ocorre no período de velocidade decrescente, não sendo identificado nenhuma alteração de cor, estado físico, odor e consistência nas sementes durante os processos. Concluiu que o secador infra-vermelho é mais vantajoso pois propicia menos tempo de secagem para se atingir a mesma umidade final do produto.

BARONCELI *et al.* (1997) avaliaram a degradação térmica da bixina no processo de secagem de sementes de urucum em leito de jorro. Analisaram a variação dos teores deste corante através de cromatografia líquida de alta eficiência (CLAE), de amostras coletadas a cada 15 minutos, para um período total de 5 horas de secagem a 50°C. Verificaram que as perdas de bixina nessas condições são insignificantes, quando comparadas à degradação térmica sofrida pelo material em condições intensivas de secagem no mesmo equipamento, utilizando ar de entrada a 105°C e 24 horas de processamento.

Na produção industrial de corante em pó, o secador por atomização (spray dryer) vem sendo utilizado em larga escala, devido a sua eficiência de secagem e reduzido tempo de processamento; o que é desejável, em se tratando de materiais termosensíveis. Em razão disso, PIMENTEL (1995) avaliou as perdas de extratos de urucum com diferentes concentrações de sólidos totais, obtidas por meio de adição de maltodextrina e evaporação a vácuo. Utilizando equipamento em escala de laboratório, foi produzido um corante hidrossolúvel em pó, a partir do extrato de sementes de urucum, previamente tratadas com KOH. Operando na faixa de 189 a 193°C para entrada e 90 a 95°C à saída e vácuo na entrada de 4 kPa, com cerca de 20 minutos de processamento, o autor verificou que as perdas de norbixina decrescem com o aumento da concentração de sólidos no extrato e que o rendimento da secagem aumenta progressivamente até concentrações de 20% de sólidos totais. Na utilização dos extratos pré-concentrados a vácuo para a obtenção de corante de urucum em pó, foram verificadas perdas consideráveis de norbixina, em razão da degradação do pigmento em evaporador rotativo e na secagem. Na aplicação dos extratos pré-concentrados com maltodextrina, verificou-se que as perdas de norbixato são mínimas e restritas ao processo de atomização, o que torna essa opção mais viável para indústria

de extrato seco de urucum hidrossolúvel, especialmente quando atende à indústria de gelados comestíveis, conforme informações de ALMEIDA (1991).

A caracterização físico-química das sementes de urucum, necessária à condução dos processos de beneficiamento e secagem, bem como a metodologia de medição, estão reportados na literatura, conforme dados condensados na Tabela 7. A composição química de sementes de urucum encontradas na literatura, exceto teor de bixina e umidade, está sumarizada na Tabela 8, em grande parte analisada pelos métodos da AOAC (1975).

Tabela 7. Caracterização físico-química das sementes de urucum reportada na literatura

Propriedade (unidade)	Valores	Procedência	Tipo Cultivado	Método de determinação experimental	Referências
dp (cm)	0,340 0,332 0,346 0,343 0,340 0,350 0,342	Minas/ Rio de Janeiro Rio de Janeiro Nordeste Sudeste Pará Pará Minas Gerais	não identificado não identificado não identificado não identificado Peruana Piave Vermelha não identificado	Picnometria de comparação a ar Picnometria com 700 partículas Esfera de igual volume Esfera de igual volume Esfera de igual volume Esfera de igual volume Picnometria (tolueno) e medição direta (200 partículas)	PINHEIRO, SILVA e ALSINA (1990) BARRETO, JAEGER e MASSARANI (1989) SILVA (1991) SILVA (1991) CASTRO e FARIA (1992) CASTRO e FARIA (1992) MENEZES e PASSOS (1995)
ρ_{ap} (g/cm ³)	0,701 0,666 0,662 0,713 0,708	Minas/ Rio de Janeiro Nordeste Sudeste Pará Pará	não identificado não identificado não identificado Peruana Piave Vermelha	Picnometria de comparação a ar Picnometria Picnometria Picnometria Picnometria	PINHEIRO, SILVA e ALSINA (1990) SILVA (1991) SILVA (1991) CASTRO e FARIA (1992) CASTRO e FARIA (1992)
ρ_s (g/cm ³)	1,277 1,487 1,471 1,271 1,310 1,552 1,550 1,549	Minas Gerais Nordeste Sudeste Minas Gerais Rio de Janeiro Pará Minas Gerais Pará	não identificado não identificado não identificado não identificado não identificado Peruana não identificado Piave Vermelha	não especificado Picnometria de comparação a ar Picnometria de comparação a ar Picnometria (tolueno) Picnometria a 8% de umidade Picnometria (água) Picnometria de comparação a ar Picnometria (água)	PASSOS <i>et al.</i> (1997) SILVA (1991) SILVA (1991) MENEZES e PASSOS (1995) BARRETO, JAEGER e MASSARANI (1989) CASTRO e FARIA (1992) PINHEIRO, SILVA e ALSINA (1990) CASTRO e FARIA (1992)

Tabela 7. Caracterização físico-química das sementes de urucum reportada na literatura (continuação)

Propriedade (unidade)	Valores	Procedência	Tipo Cultivado	Método de determinação experimental	Referências
ϵ (adim.)	0,541	Minas/ Rio de Janeiro	não identificado	Picnometria de comparação a ar	PINHEIRO, SILVA e ALSINA (1990) SILVA (1991) SILVA (1991) CASTRO e FARIA (1992) CASTRO e FARIA (1992)
	0,552	Nordeste	não identificado	Picnometria de comparação a ar	
	0,550	Sudeste	não identificado	Picnometria de comparação a ar	
	0,540	Pará	Peruana	Picnometria (água)	
	0,543	Pará	Piave Vermelha	Picnometria (água)	
ϵ_{mf} (adim.)	0,415	Minas Gerias	não identificado	não especificado	PASSOS <i>et al.</i> (1997)
ϕ (adim.)	0,697	Nodeste	não identificado	Razão de diâmetros (d_{ci}/d_{cc})	SILVA (1991) SILVA (1991) MENEZES e PASSOS (1995) BARRETO, JAEGER e MASSARANI (1989)
	0,720	Sudeste	não identificado	Razão de diâmetros (d_{ci}/d_{cc})	
	0,860	Minas Gerais	não identificado	relação entre geometria e diâmetro	
	0,640	Rio de Janeiro	não identificado	Permeamtria com ar	
Xi (% bs)	9,76	São Paulo	não identificado	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991) PASSOS <i>et al.</i> (1997) SILVA (1991) SILVA (1991) CASTRO e FARIA (1992) CASTRO e FARIA (1992) OLIVEIRA (1991) BARRETO, JAEGER e MASSARANI (1989) ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980) ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980) ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	10,30	Minas Gerais	não identificado	estufa a 105°C por 24h	
	18,86	Nordeste	não identificado	estufa a 105°C por 24h	
	18,51	Sudeste	não identificado	estufa a 105°C por 24h	
	6,91	Pará	Peruana	estufa a 105°C até peso constante	
	7,82	Pará	Piave Vermelha	estufa a 105°C até peso constante	
	8,00	Pará	Peruana	não especificado	
	12,80	Rio de Janeiro	não identificado	estufa a 105°C por 24h	
	11,92	São Paulo	Vermelha ²	estufa a 105°C	
	9,30	São Paulo	Vermelha ³	estufa a 105°C	
11,81 ¹	São Paulo	Vermelha ⁴	estufa a 105°C		

¹ Amostra parcialmente seca a 40°C em estufa² Comercial³ Seca⁴ Fresca

Tabela 7. Caracterização físico-química das sementes de urucum reportada na literatura (continuação)

Propriedade (unidade)	Valores	Procedência	Tipo Cultivado	Método de determinação experimental	Referências
Cp (cal/g°C)	0,500	Sudeste	não identificado	misturas calorimétricas	SILVA (1991)
	0,513	Nordeste	não identificado	misturas calorimétricas	SILVA (1991)
Bi (% bs)	1,646	Nordeste	não identificado	método do clorofômio	SILVA (1991)
	2,088	Sudeste	não identificado	método do clorofômio	SILVA (1991)
	1,95	Pará	Peruana	método do KOH	CASTRO e FARIA (1992)
	3,03	Pará	Piave Vermelha	método do KOH	CASTRO e FARIA (1992)
	3,68	Pará	Peruana	método do KOH	OLIVEIRA (1991)
	4,65	Pará	Piave Verde	método do clorofômio	FALESI <i>et al.</i> (1991)
	2,03	Rio de Janeiro	não identificado	método do clorofômio	BARRETO, JAEGER e MASSARANI (1989)
	1,48	São Paulo	Vermelha ¹	método FAO/WHO	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	1,21	São Paulo	Vermelha ²	método FAO/WHO	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
2,30	São Paulo	Vermelha ³	método FAO/WHO	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)	

¹ Comercial² Seca³ Fresca

Tabela 8. Composição química de sementes de urucum

Componentes	Composição	Procedência	Tipo Cultivado	Referência
Lípidios	3,66 %	não especificado	não especificado	SILVA (1991)
Proteínas (%N x 6,25)	10,88 %	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
	10,27 %	não especificado	não especificado	SILVA (1991)
	12,82 %	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	13,12 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	12,13 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
Cinzas	5,20 %	não especificado	não especificado	SILVA (1991)
	6,92 %	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	5,73 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	5,44 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	4,60 %	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
Extrato Etéreo	5,22 %	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	6,84 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	8,84 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	4,80 %	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
Carboidratos Totais	47,90 %	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	47,41 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	39,91 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	57,38 %	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
Fibra Bruta	12,58 %	São Paulo	Vermelha ¹	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
	13,85 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	13,12 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	18,48 %	São Paulo	não especificado	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
Açúcares Totais	9,76 %	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	13,89 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	8,05 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)

¹ Comercial² Seca³ Fresca

Tabela 8. Composição química de sementes de urucum (continuação)

Componentes	Composição	Procedência	Tipo Cultivado	Referência
Amido	13,17 %	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	11,58 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	11,45 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
Pentosanas	11,35 %	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	11,36 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	14,97 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
Tanino	0,34 %	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	0,33 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	0,91 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
Pectina (pectato de cálcio)	0,35 %	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	0,55 %	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	0,23 %	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
α -caroteno β -caroteno	68 mg/kg	São Paulo	Vermelha ¹	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	75 mg/kg	São Paulo	Vermelha ²	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
	113 mg/kg	São Paulo	Vermelha ³	ANGELUCI, ARIMA, KUMAGAI (1980)
Vitamina B ₂ (riboflavina)	0,1 mg/kg	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
Vitamina C (ácido ascórbico)	51,6 mg/kg	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
Vitamina PP	126,5 mg/kg	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
Fósforo	0,35 %	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
	0,70 %	Pará	Piave Vermelha	FERREIRA e FALESI (1991)
	0,73 %	Pará	Wagner	FERREIRA e FALESI (1991)
	0,81 %	Pará	Borges	FERREIRA e FALESI (1991)

¹ Comercial² Seca³ Fresca

Tabela 8. Composição química de sementes de urucum (continuação)

Componentes	Composição	Procedência	Tipo Cultivado	Referência
Cálcio	0,24 %	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
	0,19 %	Pará	Piave Vermelha	FERREIRA e FALESI (1991)
	0,23 %	Pará	Wagner	FERREIRA e FALESI (1991)
	0,29 %	Pará	Borges	FERREIRA e FALESI (1991)
Magnésio	0,27 %	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
	0,29 %	Pará	Piave Vermelha	FERREIRA e FALESI (1991)
	0,30 %	Pará	Wagner	FERREIRA e FALESI (1991)
	0,33 %	Pará	Borges	FERREIRA e FALESI (1991)
Ferro	24,00 mg/kg	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
	61,21 mg/kg	Pará	Piave Vermelha	FERREIRA e FALESI (1991)
	80,96 mg/kg	Pará	Wagner	FERREIRA e FALESI (1991)
	26,01 mg/kg	Pará	Borges	FERREIRA e FALESI (1991)
Manganês	18,70 mg/kg	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
	64,22 mg/kg	Pará	Piave Vermelha	FERREIRA e FALESI (1991)
	26,90 mg/kg	Pará	Wagner	FERREIRA e FALESI (1991)
	44,26 mg/kg	Pará	Borges	FERREIRA e FALESI (1991)
Zinco	4,90 mg/kg	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
	18,21 mg/kg	Pará	Piave Vermelha	FERREIRA e FALESI (1991)
	21,74 mg/kg	Pará	Wagner	FERREIRA e FALESI (1991)
	25,37 mg/kg	Pará	Borges	FERREIRA e FALESI (1991)
Sódio	9 mg/kg	São Paulo	não especificado	CARVALHO, CARVALHO e MANTOVANI (1991)
Potássio	2,59 %	Pará	Piave Vermelha	FERREIRA e FALESI (1991)
	1,88 %	Pará	Wagner	FERREIRA e FALESI (1991)
	2,20 %	Pará	Borges	FERREIRA e FALESI (1991)
Nitrogênio	1,88 %	Pará	Piave Vermelha	FERREIRA e FALESI (1991)
	2,13 %	Pará	Wagner	FERREIRA e FALESI (1991)
	2,32 %	Pará	Borges	FERREIRA e FALESI (1991)
Cobre	3,30 mg/kg	Pará	Piave Vermelha	FERREIRA e FALESI (1991)
	10,74 mg/kg	Pará	Wagner	FERREIRA e FALESI (1991)
	4,96 mg/kg	Pará	Borges	FERREIRA e FALESI (1991)

Com resultados contraditórios em relação às recomendações da literatura sobre os efeitos da incidência solar direta na estabilidade dos carotenóides, DUARTE, BOVI e MAIA (1989) estudando os efeitos da secagem no teor de bixina de sementes de urucum, constataram que no processo de secagem direta ao sol, não há nenhuma diminuição no teor de bixina. Entretanto, efetuando a secagem em estufa a temperaturas de 50, 100 e 150 °C, durante 1, 2 e 3 horas, verificaram uma acentuada queda no teor de bixina em todos os períodos quando no tratamento a 150°C. Os dados obtidos pelos autores para a secagem em estufa, estão apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Teor de bixina em função da temperatura e tempo de secagem em estufa

Temperatura (°C)	Tempo de secagem (h)		
	1	2	3
50	2,74 *	2,59	2,46
100	2,59	2,39	2,41
150	1,28	0,40	0,27

DUARTE, BOVI e MAIA (1989)

* Teor de bixina (%)

CASTRO (1991) realizou um estudo de sensibilidade paramétrica experimental das variáveis operacionais do processo de secagem de sementes de urucum. Utilizando um protótipo de secador de leito fixo, concluiu que este sistema é adequado para a secagem proposta e que a intensidade de secagem aumenta com a temperatura e com a vazão do ar e diminui com a altura do leito de sementes.

CASTRO e FARIA (1992) estudaram a estabilidade térmica da bixina no processo de secagem de urucum em leito fixo de dois tipos cultivados: Peruana (PR) e Piave Vermelha (PV). Concluíram que o teor de bixina não sofre degradação apreciável até temperaturas de 73 °C e que as sementes não possuem umidade superficial. O processo foi conduzido até o produto atingir à umidade de equilíbrio, situação observada no tempo de 4h e 8h para as temperaturas do ar de 73°C e 45°C, respectivamente. Na Tabela 10 estão indicadas as condições operacionais das corridas experimentais realizadas pelos autores.

SILVA (1991) estudou a secagem em leito de jorro e em leito fixo de sementes de urucum provenientes das regiões nordeste e sudeste do Brasil; concluiu que as curvas de secagem obtidas têm praticamente o mesmo comportamento em relação ao efeito da vazão do ar, ou seja, dela independem. Constatou ainda que a reumidificação do produto não causa efeito no comportamento da secagem.

Na operação em leito de jorro com tubo centrado, esse autor verificou que a variação do comprimento deste não produz efeito nas curvas de secagem obtidas. Nos dois casos estudados, a secagem ocorria no período de taxa decrescente, com a resistência interna à transferência de umidade controlando o processo. Através da análise comparativa dos resultados experimentais, SILVA (1991) observou que a secagem em leito de jorro foi ligeiramente superior à secagem em leito fixo, a partir da primeira hora de operação, para todas as condições operacionais realizadas.

Segundo o autor, o melhor desempenho do secador de leito de jorro é atribuído à maior transferência de calor e massa que ocorre no interior deste secador.

Tabela 10. Condições operacionais de corridas efetuadas com cultivar Peruana e Piave Vermelha

Corrida	1	2	3	4	5	6	7	8
Ar de Secagem								
Tg (°C)	73	45	73	45	45	45	45	45
Q (L/s)	56	56	56	56	128	128	128	128
UR (%)	15	50	15	50	54	54	54	54
Sementes de Urucum								
Tipos	PR	PV	PV	PR	PV	PR	PV	PR
T _{si} (°C)	28	27	28	30	29	28	28	29
T _{sf} (°C)	50	41	56	41	41	36	45	45
X _i (%)	7,9	10	10	7,9	10	7,9	10	7,9
X _f (%)	4,4	7,8	6,7	6,9	6,5	6,4	7,6	6,5
B _i (%)	2,2	3,0	3,0	2,2	3,0	2,2	3,1	2,2
B _f (%)	1,9	3,0	3,0	2,0	3,0	2,1	3,0	2,1
H _L (mm)	5	5	5	5	5	5	10	10

Fonte: CASTRO e FARIA (1992)

Com o objetivo de comparar a degradação causada nas sementes de urucum pela secagem em leito de jorro e em leito fixo, SILVA (1991) realizou duas experiências a diferentes temperaturas, não sendo verificada perda considerável no teor de bixina nos dois processos, como mostra a Tabela 11.

Tabela 11. Degradação de bixina pela secagem em leito de jorro e leito fixo

Temperatura (°C)	Leito				
	Jorro			Fixo	
	inicial (%)	final (%)	pó (%)	inicial (%)	final (%)
50	1,902*	1,769	3,450	1,470	1,371
65	1,371	1,238	1,131	1,371	1,061

Fonte: SILVA (1991)

* Teor de Bixina

Trabalhando na secagem dielétrica de produtos agrícolas, PINHO, FARIA e CASTRO (1992), utilizando um forno de microondas doméstico adaptado, estudaram o processo de secagem de sementes de urucum. Através da análise dos resultados obtidos, concluíram que é possível se obter altas taxas de secagem em menor intervalo de tempo, em comparação com processos convencionais de secagem convectiva. A Figura 15 mostra uma curva de secagem típica, utilizando-se sementes do tipo cultivar Piave Vermelha com umidade inicial 10,34 %bs, e uma potência média de 350 W. Observaram que as sementes não possuíam umidade superficial e que a umidade de equilíbrio do material foi atingida, decorridos cerca de 5 minutos após o início

da secagem. Nesse trabalho, os autores não consideraram a possível variação da concentração de bixina nas sementes utilizadas.

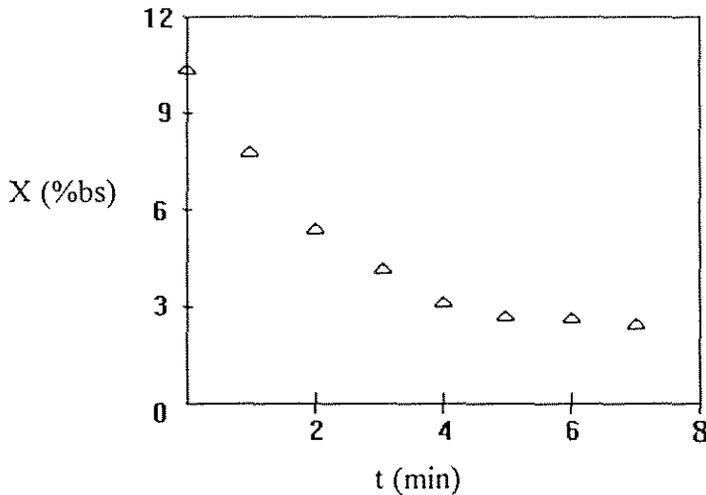


Figura 15. Curva de Secagem de urucum por microondas

Dando continuidade ao estudo da secagem de sementes de urucum através da energia de microondas, CASTRO, FARIA e PINHO (1994) utilizaram um protótipo de secador constituído de um aplicador do tipo cavidade com potência nominal variável na faixa de 0 a 9 kW em passo de 900W através da combinação de 10 magnetrons comuns, desenvolvido por CASTRO (1994). A influência do aplicador na concentração de bixina foi quantificada experimentalmente. O rendimento do processo foi avaliado, tomando-se por base a quantidade de umidade removida pela energia total consumida, para as condições em que não ocorre degradação térmica apreciável do corante. Analisando os dados, concluíram, a princípio, pela aplicabilidade técnica deste processo na redução de umidade das sementes de urucum para conservação e utilização na extração de corantes.

2.1.4. Propriedades dos extratos de urucum

Os extratos de urucum são corantes vegetais lipossolúveis ou hidrossolúveis, obtidos pela remoção da camada externa das sementes de *Bixa orellana* L. através de processos químicos ou mecânicos. Em função da forma de extração empregada, podem ser obtidos os seguintes extratos (SATO *et al.*, 1992; GHIRALDINI, 1989):

- a) **Bixina**: principal componente colorido da extração lipossolúvel. É um éster monometílico da norbixina, a qual é produzida através da hidrólise deste éster.
- b) **Norbixina**: principal componente colorido da extração alcalina aquosa. O extrato é obtido por hidrolização da bixina, durante a extração.

- c) **Norbixato de sódio ou de potássio:** extrato salino produzido quando as sementes são tratadas com soluções de NaOH ou KOH em temperaturas abaixo de 70°C, resultando em um extrato hidrossolúvel. Este produto é considerado como um aditivo sintético para alimentos, por ser composto de norbixina e um álcali.
- d) **Extrato concentrado de urucum:** corantes na forma bruta extraída, normalmente utilizando-se solventes orgânicos, visando obter concentrações elevadas de bixina, chegando-se a valores de 20 a 80% deste corante.
- e) **Pigmento bruto:** pó obtido por extração mecânica das sementes.

Os extratos de urucum podem ser apresentados na forma de pós, pastas, suspensões ou soluções, e a eles não poderá ser atribuída atividade vitamínica. Apresentam coloração na faixa do amarelo-alaranjado ao castanho-avermelhado e não sofrem restrições quanto ao seu emprego em alimentos pela maioria da legislação mundial de saúde pública, devido às suas características de produto natural (SATO *et al.* 1992).

NAZÁRIO (1991) apresenta e comenta a legislação brasileira sobre aditivos químicos para alimentos, onde se inserem os corantes naturais, que constituem um numeroso grupo de produtos, constituídos por:

- a) **Matérias primas naturais:** partes comestíveis de vegetais e animais, sucos de plantas e outras.
- b) **Extratos de matérias primas:** corantes extraídos por solventes diversos, evaporados, concentrados ou dessecados.
- c) **Substâncias corantes extraídas e purificadas:** não há ainda uma definição precisa para “corante natural” que seja aceita por todos. Entretanto, SATO *et al.* (1992) consideram “corante natural” todo pigmento ou corante inócuo extraído de substância vegetal ou animal.

A comissão de controle e normalização de substâncias corantes do governo Alemão (COLOURS for foods, 1988) em conjunto com organismos internacionais de controle de aditivos para alimentos, definem o termo “corantes” (colourants) como o nome coletivo para todas as substâncias que dão cor, enquanto que “substâncias corantes” (dyestuffs) são corantes de origem puramente orgânica. “Pigmentos” são definidos como corantes parcialmente insolúveis de origem orgânica ou inorgânica e “alimento corante” (food colourant) equivale à “corante para alimento”.

A legislação brasileira não impõe limite para o uso de urucum como corante, contudo, a comissão Internacional do *Codex Alimentarius* prevê um certo limite para aplicação em certos óleos e gorduras comestíveis (SATO *et al.*, 1992). Os corantes permitidos no Brasil constituem cinco diferentes classes com os respectivos códigos de rotulagem:

- Naturais - C. I
- Artificiais - C. II
- Sintéticos idênticos aos naturais - C. III
- Inorgânicos - C. IV
- Caramelos - C. V

Analisando a legislação brasileira sobre corantes naturais, LORENA (1989) verificou que a mesma é bastante liberal, permitindo o uso de praticamente todas as substâncias recomendadas

pelo *Codex Alimentarius*, seguindo a tendência mundial em liberar ao máximo a utilização dos corantes naturais e restringir os artificiais.

TAKAHASHI (1987) descreve os extratos lipossolúvel, hidrossolúvel e o pigmento puro como:

- a) Extrato de urucum lipossolúvel: apresenta cor vermelha escura a castanho-avermelhado, quando concentrado; matiz amarelo-esverdeado em concentrações moderadas e um líquido amarelo em concentrações baixas.
- b) Extrato de urucum hidrossolúvel: apresenta cor castanho-avermelhada a castanho.
- c) Pigmento puro: pó vermelho escuro.

Os dados sobre os extratos e propriedades dos corantes de urucum listados a seguir, são coletados da literatura (COLOURS for foods, 1988; TAKAHASHI, 1987; NAKAMURA, 1991) com base nas recomendações de comitês e organismos internacionais de controle de aditivos para alimentos e de saúde pública tais como: *Codex Alimentarius*, Comitê para Alimentos (SCF-Europa), Comissão de Substâncias Corantes (VCH-Alemanha), Comitê Associado de Especialistas em Aditivos para Alimentos (JECFA) da FAO/WHO, Agência Internacional para pesquisa do Câncer (IARC), Conselho Nacional de Saúde do Ministério da Saúde (CNS/MS-Brasil), Compêndio da legislação de alimentos da Associação Brasileira da Indústria de Alimentos - (ABIA) e Monografia de Corantes Naturais para Fins Alimentares, Padrões de Identificação e Qualidade (Instituto Adolfo Lutz-Brasil).

- Classe: carotenóide
- Ocorrência: parte externa das sementes do fruto de *Bixa orellana* L.
- Produção: extração das sementes de urucum *Bixa orellana* L.
 sinteticamente por oxidação do licopeno
- Sinonímia: urucum, urucu, anatto, terra orella, *Bixa orellana*, roucou, rocou, achiote.
- Nomes com números indexados:
 - C.I. (1975) nº75.120
 - EEC E 160b
 - EG nº E160b
 - L - Orange 4 (lista de alimentos)
 - C - Orange 12 (lista de cosméticos)
 - C. I. Natural Orange
 - Bixina
 - Bissina
 - Norbixina (L - Orange 4)
 - Chem. Abstr. Reg. Serial nº 6983-79-5
- Nome químico (bixina):

18-metoxycarbonil - 3,7,12,16 - tetrametil (1,3,5,7,8,11,13,15,17)- monodecanóido ácido (IUPAC)

6,6'- Diapo - ψ , ψ - carotenodioico ácido, monometiléster, 9-cis (Chem. Abstr.)

- Composição:

O extrato de urucum lipossolúvel contém diversos componente coloridos, sendo o principal a bixina, que pode estar presente sob as forma *cis* e *trans*, como também seus produtos de degradação térmica. A coloração deste extrato diluído é amarelo e concentrado é vermelho-escuro. O extrato de urucum hidrossolúvel contém como componente colorido principal, a norbixina, na forma de sal de sódio ou potássio. Podem estar presentes também, as formas *cis* e *trans*.

- Fórmulas químicas:

Bixina $C_{25}H_{30}O_4$

Norbixina $C_{24}H_{28}O_4$

- Peso molecular:

Bixina 394,51 kg/kmol

Norbixina 380,48 kg/kmol

- Ponto de fusão (bixina):

198°C

(acima de 300°C - norbixina)

- ADI - Ingestão Diária Aceitável:

SCF - 1975: 0 - 1,5 mg/kg p.c. (como soma de bixina e norbixina)

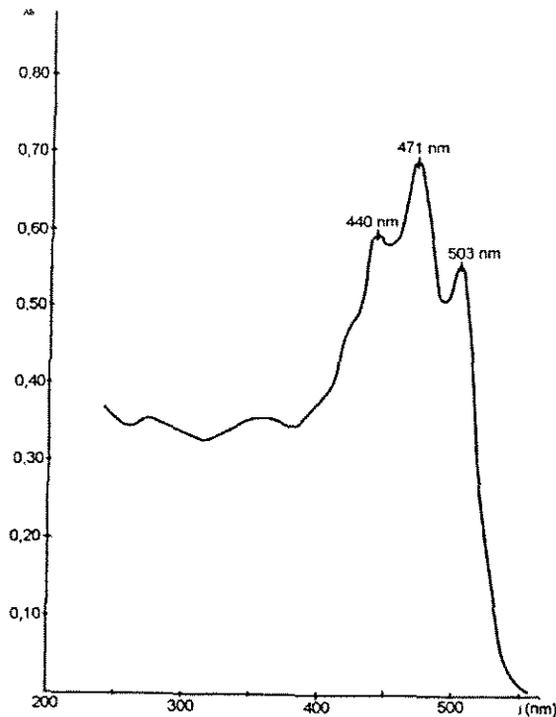
1979: 0 - 2,5 mg/kg p.c. (para extratos de urucum)

JECFA/WHO - 1974: 0 - 1,25 mg/kg p.c. (para extratos de urucum)

1982: 0 - 0,65 mg/kg p.c. (baseado em bixina)¹

¹ Referência atual

- Espectro da Bixina (extrato lipossolúvel diluído em clorofórmio):



- Teor de pureza:

O extrato de urucum lipossolúvel deve conter no mínimo 0,1% de carotenóides totais expressos como bixina, e o hidrossolúvel deve conter no mínimo 0,2% de carotenóides totais expressos como norbixina. Pigmento bruto em pó extraído com solvente, deve conter no mínimo 95% de carotenóides totais, calculados como bixina ou nobixina.

- Solubilidade:

- Extrato lipossolúvel: solúvel em acetona, soluções alcalinas aquosas e clorofórmio; pouco solúvel em etanol e propileno glicol e insolúvel em água.
- Extrato hidrossolúvel (norbixato de sódio ou de potássio): solúvel em água, pouco solúvel em etanol e insolúvel em acetona, clorofórmio, ésteres, óleos e gorduras.
- Bixina: insolúvel em água, parcialmente solúvel em etanol e moderadamente solúvel em óleos vegetais.
- Norbixina: solúvel em ácido acético glacial e insolúvel em água, etanol, propileno glicol, óleos e gorduras.

- Reações coloridas:

Os extratos de urucum fornecem, quando em contato com o ácido sulfúrico concentrado, coloração azul, devido à bixina ou azul-esverdeado, devido à norbixina.

- Estabilidade (dos extratos de urucum, nobixina e bixina):

- a) Temperatura: boa (pouca variação de cor durante o tratamento térmico, em alimentos). O extrato lipossolúvel é estável até 100°C, moderadamente estável entre 100°C e 125°C e instável acima 125°C.
- b) Luz: moderada (boa estabilidade à luz em produtos proteicos: queijos, massas, cereais e produtos de salsicharia embalados a vácuo)
- c) pH: ruim
 - pH 1 a 3 : vermelho-alaranjado
 - pH 3 a 7 : laranja/tangerina
 - pH 7 a 10: amarelo-alaranjado

A norbixina precipita em pH inferior a 7, em produtos predominantemente líquidos, como refrescos e sucos. Quanto a estabilidade à temperatura e mudança de pH é ligeiramente superior a bixina (extrato lipossolúvel).

Bixina: Luz - moderada

Temperatura - moderada, ocorrendo isomerização durante a estocagem

álcalis - ocorre hidrólise

ácidos e frutas ácidas - boa

- Combinação com outros corantes naturais:

Os extratos de urucum misturados com outros corantes naturais, fornecem várias tonalidades de cores.

A combinação com carmim de cochonilha, nas formas lipo e hidrossolúveis, é utilizada quando se deseja uma maior variação da tonalidade amarela.

Cores vermelhas podem ser obtidas quando os extratos de urucum são misturados com carmin, beterraba vermelha ou antocianinas. Uma cor marrom é obtida pela mistura de urucum e clorofila.

- Apresentação:

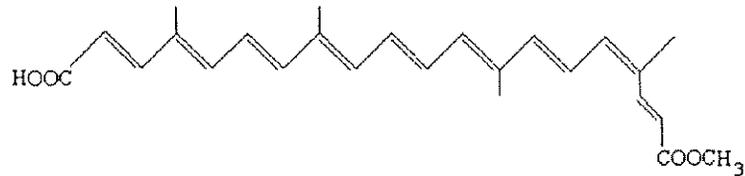
Pós, pastas, suspensões e soluções.

- Rotulagem:

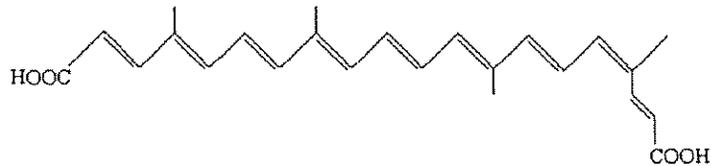
Os extratos de urucum lipossolúveis e hidrossolúveis devem trazer no rótulo o teor de carotenóides expressos como bixina e norbixina, respectivamente. Nos dois casos, deverão ser acrescentadas as substâncias adicionadas como veículo e não poderão ser atribuídas atividades pró-vitamina A.

- Fórmulas Estruturais:

Bixina:



Norbixina:



- Espectrofotometria:

Extrato lipossolúvel diluído com clorofórmio: absorvância máxima a 439 nm, 470 nm e 501 nm.

Extrato hidrossolúvel diluído com água: absorvância máxima a 453 nm e 483 nm.

Bixina: absorvância máxima a 417nm e 503nm em clorofórmio.

- Limites máximos de contaminantes:

Arsênico: 3 mg/kg

Chumbo: 10 mg/kg

Metais pesados em Pb: 40 mg/kg

- Resíduos máximos provenientes de solventes:

Diclorometano: 30 mg/kg

Triclorometano: 50 mg/kg

Acetona: 30 mg/kg

Isopropanol: 50 mg/kg

Metanol: 50 mg/kg

Hexano: 25 mg/kg

É possível estimar propriedades físicas e químicas de compostos orgânicos conhecendo-se apenas a estrutura molecular, empregando-se métodos adequados em função da família da substância analisada. Uma seleção de métodos de contribuição de grupos foi realizada por SILVA e CABRAL (1997) para estimar algumas propriedades físico-químicas da bixina e norbixina, extraídas de sementes de urucum, obtendo-se bons resultados para predição da densidade e do volume críticos desses componentes.

2.1.5. Utilização do corante de urucum

De acordo com CARRERA (1977), a principal utilização do corante de urucum é na indústria de alimentos, podendo também ser utilizado na medicina, em cosméticos, e na indústria em geral. Recentemente, têm-se aplicado com sucesso os extratos aquosos de sementes de urucum na redução das taxas de colesterol e de triglicérides em seres humanos (SAÚDE, 1997).

ARAUJO (1991) afirma que o uso do urucum em alimentos foi introduzido no Brasil em receitas culinárias pelos espanhóis e portugueses que o utilizavam em pratos típicos. A autora organiza um quadro onde enumera o consumo de colorífico¹ em algumas regiões do país e conclui que este produto é mais popular na região nordeste com uma participação de 87% na forma de corante nas especiarias, na área compreendida entre os Estados do Ceará até Alagoas. Atualmente o consumo anual de colorífico na região norte e nordeste é de aproximadamente 500g por pessoa (OLIVEIRA, 1998).

Segundo CANCELLA (1991) o urucum é selecionado como corante para conservas de carne por sua inocuidade e coloração atrativa, abrangendo tonalidades que vão desde o amarelo ao laranja-avermelhado, enquadrando-se perfeitamente dentro das exigências legais. De acordo com o autor, não se conhece na literatura científica nada que restrinja o seu uso. O corante de urucum aplicado em embutidos defumados (linguiças e paios), e em cozidos (mortadelas, salsichas e salsichões), é obtido das sementes do urucuzeiro, principalmente sob a forma de extrato lipossolúvel por métodos tecnológicos adequados. O autor, porém, faz uma ressalva e esclarece que o corante natural de urucum não é aplicado diretamente na massa dos produtos, e sim na superfície ou nos revestimentos de embutidos cozidos.

No que se refere ao mercado de massas alimentícias, CISNEROS (1991) informa que os corantes a base de urucum são comercializados puros ou sob a forma de misturas com extratos de cúrcuma, β -caroteno ou vitamina A.

LOURENÇO NETO (1991) pesquisou o emprego de corantes em queijo, verificando que o uso de corantes neste produto remonta há mais de 100 anos. Segundo o autor, a adição do corante na fabricação de queijo tem como finalidade tornar o produto mais atraente, porém, em casos específicos, o corante é imprescindível para a produção de determinados queijos, a partir de leites que não contêm carotenóides. O autor especifica a quantidade de corante de urucum empregada na fabricação de alguns tipos de queijo no Brasil.

¹ Muitas vezes confundido com “colorau”. De acordo com a legislação em vigor, “colorífico” é o produto constituído pela mistura de fubá ou farinha de mandioca com urucum em pó ou extrato oleoso de urucum adicionado ou não de sal e óleos comestíveis (ARAUJO, 1992; ZAMBINI, ATUI e ALVES, 1995). O condimento colorau ou páprica, de acordo com SILVEIRA (1942), é definido como uma denominação genérica aplicada ao produto da moagem dos frutos vermelhos maduros e secos de diversas espécies de *Capsicum*, particularmente *Capsicum annum* L. e *Capsicum longrum*, privados total ou parcialmente de placentas, talos e hastes.

CARRERA (1977) cita também outros alimentos (manteiga, azeites comestíveis, farinhas, chocolates) e outros produtos que empregam o urucum como corante, e comenta que na medicina é utilizado como repelente para insetos.

ALMEIDA (1991) relaciona algumas vantagens e desvantagens do uso do corante de urucum em gelados comestíveis, citando como vantagens: usado há muito tempo sem danos à saúde (segurança); melhor aceito pelo consumidor (natural); confere cores suaves, dando aspecto mais natural. E como desvantagens: estabilidade baixa ao calor; instabilidade à mudança de pH; e estabilidade baixa em presença de luz (principalmente em produtos líquidos). O autor destaca, porém, a impossibilidade da substituição imediata dos corantes artificiais pelos corantes de urucum, uma vez que a produção não é suficiente para atender à demanda do mercado, além da existência de alguns problemas com a tecnologia de produção, poder tintorial, metodologia analítica padronizada e confiável e custo.

GRADIM (1991), pesquisou a aplicação de urucum em produtos de higiene, proteção solar e outras formas cosméticas. No entanto, constatou que essa prática, bem como o volume de material empregado, são diminutos devido a situações adversas quanto à sua estabilidade, compatibilidade e reais benefícios quanto ao seu uso. Concluiu que a utilização desta matéria-prima poderá ser sensivelmente dinamizada, caso suas propriedades sejam associadas a outros elementos da química de síntese, resultando em sinergias seguras, de resultado estético exigido pelo mercado.

CIMA [19--] estudou a formulação de bronzeadores em base hidrossolúvel utilizando extrato natural de urucum, obtendo coloração ideal sob o ponto de vista estético. Em todos os testes, o extrato natural do urucum demonstrou possuir excelentes propriedades para filtrar os raios solares. O extrato de urucum em maior concentração, tanto em base hidrossolúvel como em base lipossolúvel, diminuiu a incidência no aparecimento de manchas e ceratoses senis em indivíduos com mais de 30 anos e com tendências a essas anomalias.

ALENCAR (1975) utilizou o corante de urucum na preparação das seguintes formas cosméticas: shampoo, batom, creme bronzeador, creme evanescente, creme capilar, loção após barba, óleo bronzeador e pó facial. Os resultados encontrados para o corante de urucum extraído com álcool etílico, acetona e clorofórmio se incorporaram perfeitamente nos produtos cosméticos experimentados, com as tonalidades das cores dos produtos tendo maior estabilidade em temperatura ambiente.

A aplicação do corante de urucum na indústria foi estudada por CARRERA (1977), que verificou sua utilização no tingimento de fibras naturais, corante para madeira, cera para pisos, vernizes para móveis e betume para sapatos, como também observou seu uso como ração animal.

De um modo geral, os corantes de urucum podem ter as seguintes aplicações não alimentícias:

- Remédios (líquidos e sólidos).
- Corantes, vernizes e ceras para madeira.
- Tingimento de tecidos, couros e fibras em geral.

- Coloração de carnes.
- Cromatografia de tela, película e filme.
- Cosméticos (bronzeadores e loções)
- Óleos vegetais hidrogenados.
- Ceras para assoalhos e calçados.

Algumas aplicações dos corantes de urucum na indústria alimentícia estão sumarizadas na Tabela 12 e 13.

Tabela 12. Usos de corantes urucum em alimentos

Princípio Ativo	Apresentação	Principais Aplicações
0,35 - 1,12% Norbixina	Líquido hidrossolúvel	Salsichas, queijos, iogurtes, sorvetes, extrusados
0,23% Bixina	Líquido oleossolúvel (solução)	Manteigas, extrusados, recheios de biscoitos
3,0 a 10,0% Bixina	Líquido oleossolúvel (suspensão)	Margarinas, coloríficos, extrusados
1,0% Norbixina	Pó hidrossolúvel (maltodextrina)	Sobremesas em pó, bebidas lácteas em pó, produtos de panificação
20% Bixina	Pó microencapsulado	Bebidas, misturas em pó, confeitos, extrusados

Fonte: CHR HANSEN Ind. e Com. Ltda. - Valinhos - SP.

Tabela 13. Usos do Extrato de urucum em alimentos

Extrato	Forma	Pigmento	Concentração ¹	Tonalidades de cor	Aplicações
Lipossolúvel	Líquido	Bixina	Baixa	Amarelo	Massas, recheios e coberturas de doces e molhos
	Líquido	Bixina	Baixa	Amarelo-alaranjado	Margarina, cremes vegetais, queijos, recheios e coberturas de doces e molhos
	Líquido	Bixina	Alta	Laranja-avermelhado	Sopas, molhos, temperos e coloríficos
Solúveis em água e emulsões	Líquido	Norbixina	Baixa	Amarelo-alaranjado	Massas, sorvetes, bebidas, iogurtes e queijos
	Líquido	Norbixina	Moderada	Laranja	Margarina, cremes vegetais, queijos, bebidas, iogurtes e sorvetes
	Líquido	Norbixina	Baixa	Amarelo claro	Massas, sorvetes, bebidas, iogurtes e doces
Hidrossolúvel	Líquido	Norbixina	Moderada	Laranja-amarelado	Salsichas e embutidos, cereais, biscoitos e queijos
	Líquido	Norbixina	Alta	Laranja	Iogurtes, sorvetes, bebidas, doces, misturas para bolos.
	Pó	Norbixina	Alta	Laranja	Massas, sopas e temperos
	Pó	Norbixina	Alta	Laranja	Sorvetes, misturas secas e cereais
Colorífico	Pó	Bixina	Baixa	Laranja	Uso doméstico
	Pó	Bixina	Moderada	Laranja-avermelhado	Temperos e sopas

¹ Baixa: 0,1% a 0,5%; Moderada: 0,6% a 2,4%; Alta: 2,5% a 6,0%

Fonte: LIOTECNICA INDÚSTRIA E COMÉRCIO LTDA. São Paulo - SP

2.1.6. Mercado do urucum e perspectivas

Segundo CARRERA (1977), a tendência mundial de se evitar a utilização de corantes artificiais na preparação de alimentos favorece a utilização do urucum, pelas suas características inerentes de corante natural de origem vegetal, inócuo e de composição não cancerígena.

MELLO e LIMA (1990) dizem que as indústrias, por força das restrições estabelecidas através de legislação mais rigorosa, têm de forma tímida, recorrido aos produtos naturais para a substituição dos corantes artificiais. Ressalta-se que essa substituição é mais intensa em países de maior desenvolvimento econômico, como é o caso dos países europeus, principalmente levando-se em conta sua unificação, e nos Estados Unidos da América.

SÃO JOSÉ e SOUZA (1991), em pesquisa realizada para a Sociedade Brasileira de Corantes Naturais, observaram que os preços pagos aos produtores têm variado em função da oferta e da procura de grãos. Pesquisaram os preços pagos aos produtores pelas indústrias de corantes e agroindústrias de "colorífico" desde o início de 1991, e verificaram que estes sofreram uma variação de US\$ 0,7 a US\$ 1,2/kg de grãos.

De acordo com esses autores, o mais importante para se manter um mercado de urucum competitivo no cenário mundial é fazer com que os produtores melhorem sua produtividade, e, especialmente, a qualidade dos grãos. GHIRALDINI (1991) fez uma projeção do faturamento do mercado de corantes e produtos do urucum no Brasil para o 2º semestre de 1991, levando em conta os preços pagos efetivamente pela semente de urucum de boa qualidade, sendo estimado valores de US\$ 800,00 a US\$ 1000,00 por tonelada. De acordo com o autor, o mercado de extratos concentrados e de grãos para exportação movimentaram, no ano de 1991, um total de aproximadamente US\$ 1.400.000,00.

LIMA (1991) fez uma pesquisa sobre o mercado de urucum em vários países destacando o Brasil e o Peru. No Brasil, o urucum já vem sendo cultivado há vários anos, sendo as regiões com grandes áreas de cultivo a Norte, Nordeste e Sudeste, onde estão localizados os principais Estados produtores, tais como: Acre, Pará, Bahia, Ceará, Paraíba, Piauí, Rio de Janeiro e São Paulo. Por meio de estimativas, verificou que no Brasil produz-se cerca de 8.000 a 9.000 toneladas por ano de grãos de urucum, os quais destinam-se principalmente ao mercado interno na fabricação de coloríficos e corantes, sendo uma pequena parcela exportada.

LIMA (1991) verificou ainda que as indústrias extratoras produzem cerca de 9 tipos de corantes de urucum, que são destinados ao mercado interno, na aplicação em indústrias alimentícias, conforme citado anteriormente neste trabalho. O autor estimou que o mercado brasileiro de bixina e norbixina esteja em torno de 17 toneladas por ano (substância 100% pura), ressaltou porém, que o urucum é exportado na forma *in natura* e devido ao baixo percentual de bixina nos grãos, não consegue penetrar em condições favoráveis nos principais mercados consumidores. Assim mesmo, as exportações brasileiras de urucum durante os últimos anos, sofreram elevações razoáveis, tanto em quantidade como no preço.

Nos outros países Sul-Americanos, esse autor verificou que o mercado é pouco significativo devido à baixa produção de grãos de urucum, mesmo quando possuem condições agroecológicas favoráveis. Neste caso, o grão de urucum é produzido e destinado basicamente à demanda requerida pelas indústrias locais, com eventual exportação para outros países consumidores do produto como matéria-prima.

De acordo com SATO *et al.* (1992), o potencial de mercado para corante de origem natural depende em grande parte do desenvolvimento de pesquisas para o estabelecimento de processos otimizados de extração, visando obter produtos com a qualidade exigida pela indústria. Através da análise de dados de pesquisas realizada sobre corantes para o setor de alimentos, os autores constataram que grande parte da pesquisa básica e aplicada nesta área, está direcionada ao estudo do urucum como corante natural para o mercado interno. Verificaram também uma tendência das empresas de maior porte entrarem em toda a cadeia da produção de corantes naturais, ou seja, produção da matéria-prima, processamento e comercialização do produto final, como forma de garantir a qualidade dos produtos e evitar grandes flutuações de preço.

Segundo GHIRALDINI (1994), o mercado de sementes e extratos de urucum a nível mundial, fora o mercado de países produtores e também consumidores como o Brasil, Peru e Kenya, está avançando em aproximadamente 9000 toneladas ao ano, com tendência a se manter estável nos próximos 5 anos. Verificou que na Europa, os produtos corantes derivados do urucum têm bastante aceitação em razão do seu baixo preço, boa estabilidade e solubilidade comparada aos outros corantes naturais consumidos naquele continente. Conforme informações do autor, o consumo e produção estimada de urucum no mercado internacional estão indicados na Tabela 14.

Tabela 14. Consumo e produção de sementes de urucum no mercado internacional

Região/País	Consumo anual (t de sementes ou extrato em t de sementes equivalente)	Produção anual (t)
Estados Unidos	3340	-
Reino Unido	1100	-
França	830	-
Outros Países da CEE	700	-
Países do Leste Europeu	130	-
Japão	1920	-
Canadá	215	-
Brasil	3500	4300
Peru	50	3500
Kenya	20	2800
Resto da América Latina	100	1500
Resto do mundo	925	730

Em pesquisa recente, MASCARENHAS *et al.* (1997) constataram que a produção de corante destinado à indústria de alimentos vem crescendo, à medida em que novos produtos

coloridos são elaborados. Informam que atualmente existem no Brasil 35 empresas produtoras de corantes, dos quais 54% são produtoras de corantes naturais, com destaque para os corantes de urucum, como os mais produzidos.

O censo agropecuário realizado pelo IBGE no biênio 1995/1996 dos produtos da lavoura permanente, segundo a Mesoregiões do Estado do Pará, para urucum, está indicado na Tabela 15.

Tabela 15. Produção e área colhida e urucum nas Mesoregiões do Estado do Pará.

Mesoregião	Quantidade (t)		Área colhida (ha)
	Colhida	Vendida	
Baixo Amazonas	61	53	183
Marajó	9	0	5
Metropolitana de Belém	35	35	35
Nordeste paraense	358	333	665
Sudeste paraense	105	92	204
Sudoeste paraense	192	188	372
Total	760	701	1464

Fonte: IBGE (1996)

A produção brasileira de urucum em 1997, estimada por região, está demonstrada na Tabela 16, conforme informações de OLIVEIRA (1998).

Tabela 16. Produção de urucum por Região no Brasil - Estimativa - 1997

Região	Quantidade (t)
São Paulo	2000
Pará	800
Paraná	600
Bahia	500
Paraíba	400
Minas Gerais	300
Espírito Santo	200
Rio de Janeiro	100
Pernambuco	100
Goiás - Mato Grosso - Mato Grosso do Sul	300
Rio Grande do Norte - Ceará - Piauí	300
Maranhão - Amazonas - Tocantins	300
Rondônia - Roraima - Amapá	200
Brasil (total)	6100

Fonte: Agroindustrial Biotropical Ltda. - Pará

Os preços das sementes de urucum praticados no mercado nacional, oscilam entre R\$ 0,60/kg a R\$ 1,00/kg, sendo que as empresas não estão comprando sementes com teores abaixo

de 2,1% de bixina (OLIVEIRA, 1998). No mercado externo os preços variam de US\$ 550,00/t (Kenya) e US\$ 620,00/t (Peru), preços CIF, porto de Santos-SP.

No Brasil, atualmente, o destino da produção de sementes de urucum está na aplicação de 55% a 60% em colorífico e 40 a 45% na produção de corante (OLIVEIRA, 1998).

De acordo com OLIVEIRA (1998) e SBCN (1996), o mercado para sementes de urucum está em franca expansão, com a demanda por este produto crescente em todo o mundo, na condição de principal corante natural para aditivação em alimentos. Contudo, salientam que a exemplo de experiências anteriores (final da década de 80), a super oferta do produto torna-se prejudicial para todos os envolvidos com esta cultura.

CANTO *et al.*(1991) informam que a concentração da produção de urucum está localizada nos Estados da Paraíba, Ceará, Minas Gerais, Rio de Janeiro e Pará. Até 1996 a produção era estruturada em moldes artesanais e em grande parte concebida e praticada como cultura de subsistência. Surgiram então, em quase todos os Estados, plantios comerciais de maior porte, empregando-se técnicas mais adequadas de produção, colheita, beneficiamento e conservação dos grãos, especialmente no Estado de São Paulo.

A área difusora de tecnologia em São Paulo, localiza-se na região de São José do Rio Preto. No Pará, o núcleo de tecnificação da cultura está se desenvolvendo no município de São Francisco do Pará, pela empresa Agroindustrial Biotropical Ltda., filiada a Há-la do Brasil.

No Brasil, o comércio de sementes de urucum está estimado em aproximadamente 7.000 toneladas por ano. Deste total, estima-se que 1000 t/ano são transformados em extratos de pigmentos ou comercializados como sementes *in natura*; 2.000 t/ano são utilizadas para produção de corantes propriamente ditos, a maioria hidrossolúveis, e 4000 t/ano são transformados em coloríficos (CANTO *et al.*, 1991).

Os grãos de urucum foram comercializados nas safras de 1995 a preços que variaram de R\$1,00 a R\$1,80/kg de grãos. Os preços médios praticados em 1995 foram ligeiramente inferiores àqueles observados nas safras de 1993 e 1994. No ano de 1996, os preços permaneceram estáveis e similares ao que se praticou em 1995.

O aumento da demanda nacional e internacional de corantes de urucum depende da sua utilização, principalmente pelas indústrias de alimentos e de cosméticos. De acordo com KATO e FALESI (1992), o Brasil e em especial a Amazônia, tem condição de atender a esta expansão de demanda, pois têm-se encontrado os mais elevados teores de bixina nas sementes de urucum. Assim, os autores recomendam que deve-se ter a preocupação de gerar tecnologia para o seu cultivo racional com o objetivo de melhorar a produtividade e qualidade do produto.

Contudo, os autores alertam que a cultura do urucum deve ser encarada como outra que apresenta perspectivas de bons negócios e não como a salvadora da lavoura e lembrar também que existem outros países com condições edafoclimáticas para cultivar o urucuzeiro e que os seus frutos já têm excelente reputação quanto a qualidade no mercado internacional.

2.1.7 Estabilidade dos corantes de urucum

Os carotenóides formam o maior e mais importante grupo de pigmentos naturais, sendo encontrados praticamente em todo o reino vegetal e animal. De acordo com ISLER (1971), sua produção anual na natureza é estimada em mais de 100 milhões de toneladas, dentre os quais se encontra a bixina e seus produtos de degradação.

A utilização de carotenóides como corantes para alimentos, restringe-se na sensibilidade que estes produtos apresentam quando submetidos ao contato com oxigênio, luz e catalisadores metálicos. Além disso, não são hidrossolúveis e têm custo comparativo mais elevado em relação aos corantes azo (-N=N-). Mesmo assim, CARVALHO (1991) observa que, devido a sua característica de corantes naturais, aliada às funções fisiológicas que apresentam, os carotenóides continuam sendo os corantes naturais mais usados na indústria alimentícia.

Segundo SIMPSON (1985), os carotenóides são alterados ou parcialmente destruídos por ácidos, usualmente estáveis em bases, fragmentados pela ação de algumas enzimas e sensíveis à exposição de luz. Geralmente estáveis às operações de tratamento térmico, mas degradam rapidamente nos processos usuais de desidratação devido à oxidação e às reações de isomerização. A perda de bixina é verificada também na literatura sobre secagem de sementes de urucum, conforme apresentado anteriormente neste trabalho.

Na separação e análise da bixina e de outros pigmentos contidos nas sementes de urucum, bem como do conteúdo de bixina e de pigmentos totais existentes em produtos corantes de urucum, as informações da literatura têm demonstrado que a bixina é muito sensível à luz, sofrendo, quando não tomados os devidos cuidados, rápida decomposição fotoquímica e oxidativa (McKEOWN, 1961; McKEOWN e MARK, 1962; REITH e GIELEN, 1971; ROUSEFF, 1988).

Um pigmento amarelo formado durante a degradação térmica de bixina a 125°C em processos de extração de corantes para alimentos à base de urucum, foi separado e caracterizado por McKEOWN (1963). O autor propôs um mecanismo para a sua formação a partir da bixina e metilbixina e identificou também a presença de m-xileno como outro produto da degradação térmica desses dois carotenóides, conforme as reações principais, apresentadas na Figura 16.

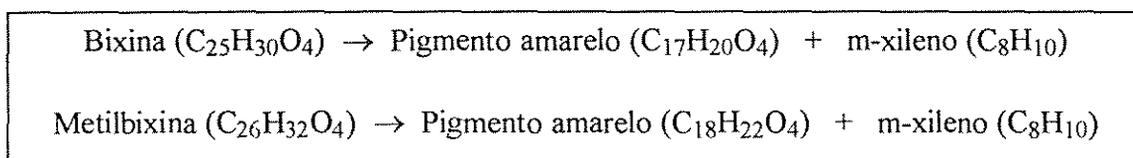


Figura 16. Eliminação de m-xileno e formação de C₁₇ e C₁₈ (pigmentos amarelos) na degradação térmica de bixina e metilbixina

Este pigmento amarelo, segundo o autor, corresponde a um éster monometílico de um ácido dimetil-tetradecaheptaenodióico, assimétrico.

Em trabalho posterior, McKEOWN (1965), examinando a fórmula estrutural da bixina, constatou que os seguintes produtos aromáticos podem ser formados pela degradação térmica, em altas temperaturas: tolueno, m-xileno, o-xileno, ácido m-toluico e ácido m-tolueno metil éster, sendo entretanto, confirmado o m-xileno como maior produto da aromatização. Nesse trabalho, o autor isolou o pigmento amarelo (C₁₇) produzido pela ação da temperatura sobre a bixina, como sendo o ácido 13-carbometoxi-4,8-dimetiltridecahexaenóico, com estrutura esquematizada na Figura 17.

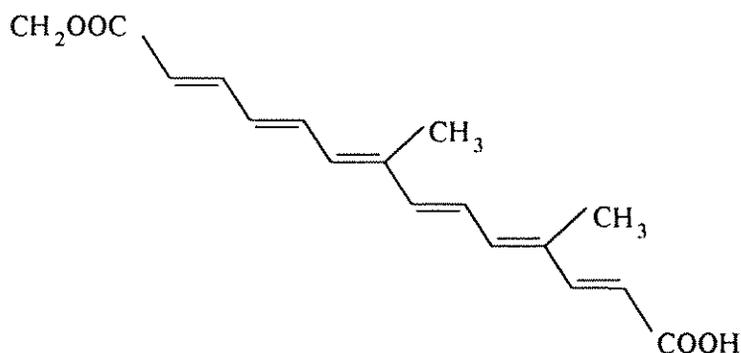


Figura 17. Estrutura do pigmento amarelo (C₁₇) formado da degradação térmica da bixina

Confirmando a pesquisas sobre a degradação da bixina nos extratos lipossolúveis de urucum, COULSON (1980) afirmou que esses extratos são instáveis sob condições oxidativas e a perda do teor de bixina é acelerado pela luz e catalisada por metais. Uma ampla faixa de antioxidantes, incluindo o ácido ascórbico, tocoferóis e polifenóis, ajudam a inibir a degradação oxidativa, segundo o autor. Observou também que o pigmento possui moderada estabilidade ao calor e uma surpreendente estabilidade ao ar, quando comparado a outros carotenóides. Constatou ainda que o contato com dióxido de enxofre pode causar descoloração e que as características da estabilidade dos extratos de urucum hidrossolúveis são similares às dos lipossolúveis.

Recentemente, trabalhando com técnicas e equipamentos mais modernos, SCOTTER (1995) preparou, isolou e purificou o principal produto da degradação da 9^o-cis-bixina, componente lipossolúvel de maior concentração dos corantes para alimentos. Os dados obtidos confirmaram a existência do produto de degradação amarelo, o dimetil éster C₁₇, conforme estabelecido por McKEOWN (1963) e McKEOWN (1965). Entretanto, o autor observou que este composto se apresenta em diferentes configurações estereoquímicas quando em solução, e pode ser suscetível à hidrólise, formando uma variedade de substâncias análogas à bixina e norbixina. Esses resultados o levaram a apresentar uma criteriosa revisão dos mecanismos da degradação térmica da bixina.

A Figura 18 mostra diversas estruturas estereoquímicas possíveis para o C₁₇, principalmente da degradação térmica da 9^o-cis-bixina, segundo SCOTTER (1995).

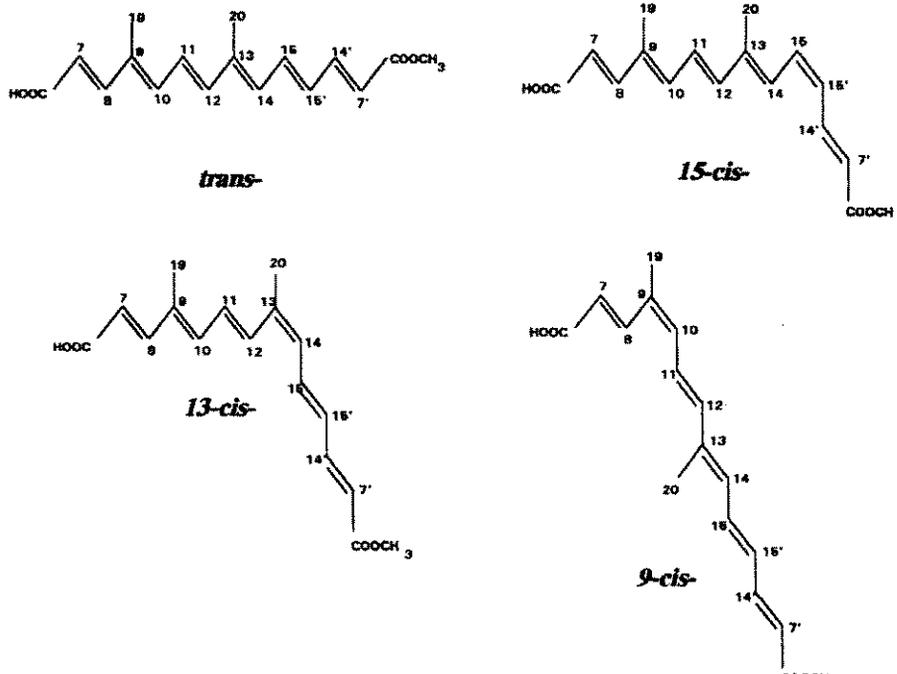


Figura 18: Estruturas estereoquímicas de isômeros do C₁₇

Em trabalhos sobre fotodegradação de bixina em sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha, submetidas à incidência direta de luz incandescente - 120W e infra-vermelha - 250W (PENNA Jr., SILVA e FARIA, 1995) e por luz ultra-violeta - 25W (PONTE, SILVA e PENNA Jr., 1996), foi verificada uma redução nas concentrações deste corante em todos os tratamentos realizados, destacando-se a perda drástica de bixina, submetida à incidência de radiação infra-vermelha, conforme indicado na Figura 19.

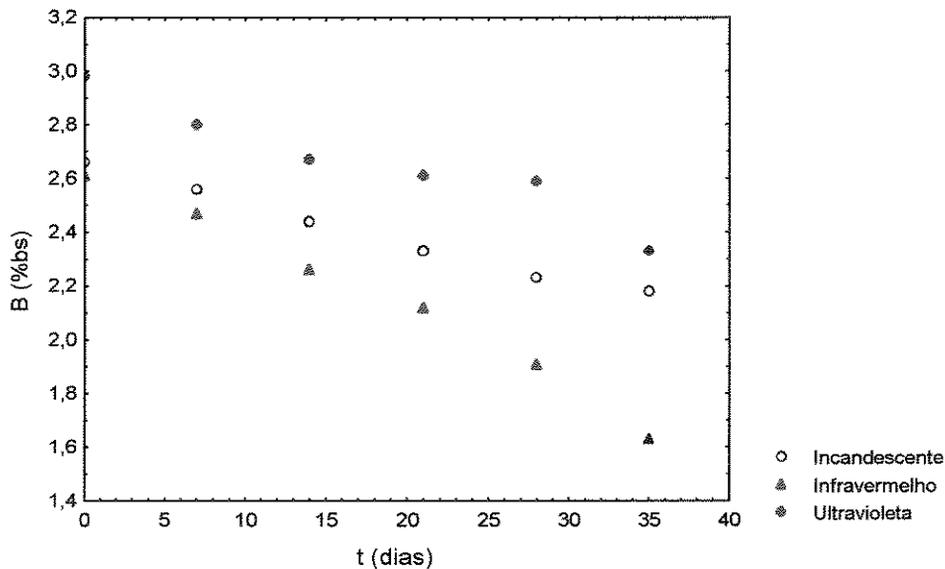


Figura 19. Fotodegradação de bixina em sementes de urucum

Esses autores concluíram que o processo de fotodegradação da bixina segue um modelo linear, independente da radiação utilizada, sugerindo que os produtos de degradação deste corante não atuam como catalisadores da reação.

A análise da literatura a respeito da estabilidade de corantes de urucum demonstra que a maioria das pesquisas estão direcionadas aos extratos lipossolúveis, contendo principalmente a bixina. Contudo, PIMENTEL (1995) estudou a estabilidade do extrato alcalino norbixato de potássio, em presença e ausência de luz e oxigênio, com e sem adição de maltodextrina ao corante. Com base nos valores de redução de absorvância apresentados pelo extrato nos diferentes ambientes estudados, concluiu que a luz é o principal agente destrutivo do pigmento, com perdas de até 80%.

NAJAR, BOBBIO e BOBBIO (1988) estudaram a influência da luz e do ar, na presença e ausência de pró e antioxidantes, nos teores de bixina em extratos lipossolúveis de urucum obtidos por extração com clorofórmio. Verificaram o forte efeito destrutivo da luz na coloração dos extratos e demonstraram a eficiência de antioxidantes como inibidores das transformações induzidas à bixina nos ensaios realizados. Alertam para o fato de se evitar a presença de substâncias promotoras de radicais livres em extratos de urucum, como o peróxido de benzoíla, devido à rápida perda de cor que proporciona, através de mecanismos oxidativos.

A influência da atividade de água sobre a estabilidade de extratos de urucum foi analisada por GLÓRIA, VALE e BOBBIO (1995), durante armazenagem a 21°C, em um sistema modelo de celulose microcristalina, na presença e ausência de luz e ar. As amostras foram armazenadas após atingirem umidades de equilíbrio em ambientes com atividade de água compreendida entre 0,33 e 0,97; obtidas através de soluções salinas saturadas. Os autores observaram que a degradação da bixina, para todas as condições testadas, obedece a uma reação de primeira ordem. Comparando os tempos de meia-vida (dias), obtidos pelos autores em todos os tratamentos, notaram que a bixina era mais estável para valores de atividades de água intermediários e altos, que correspondem à faixa de 0,75 a 0,97. Concluíram que a bixina é muito sensível à luz; entretanto, constataram que os efeitos combinados de ar e luz são os mais prejudiciais à estabilidade do pigmento, para toda a faixa de atividades de água estudada.

2.2. SECAGEM

2.2.1. Conceito e importância

No estudo da secagem, a primeira dificuldade que surge refere-se à própria definição do termo. Em geral, os textos sobre Engenharia Química definem a secagem como “uma operação unitária através da qual água, ou qualquer outro líquido, é removido de um material”; alertando para o fato de que o conceito é amplo e engloba outras operações unitárias de separação de líquidos, que não se enquadram no estudo da secagem de sólidos (McCABE, SMITH e

HARRIOTT, 1993; GEANKOPLIS, 1993; TREYBAL, 1980; BLACKADDER e NEDDERMAN, 1982; FOUST *et al.*, 1980; BADGER e BANCHERO, 1964).

Definições apropriadas de secagem, nas quais o termo é tratado como “uma operação de eliminação de pequenas quantidades de água, ou umidade, de um material sólido, através da evaporação utilizando energia térmica”, é consenso na maioria dos textos específicos sobre secagem (KNEULE, 1976; KEEY, 1972; KEEY, 1978; KEEY, 1992; NONHEBEL e MOSS, 1971; MUJUMDAR, 1987). A exceção se faz com textos de COOK e DUMONT (1991) e de STRUMILLO e KUDRA (1986), que não definem objetivamente o que é secagem, e de DASCALESCU (1969), que conceitua o termo especificamente como “a ação pela qual elimina-se a umidade absorvida dos poros e capilares das substâncias porosas, das quais grande número pertence à classe dos colóides”.

Um conceito mais preciso é dado por VAN'T LAND (1991), onde o termo secagem é definido como sendo “uma operação unitária na qual uma separação líquido/sólido é efetuada com um fornecimento de calor, com a separação resultando da evaporação do líquido”. O autor ressalta que embora na maioria dos casos a água seja o líquido a ser removido, a evaporação de solvente também pode ser tratada como um processo de secagem.

Porém OKADA *et al.* (1987), no intuito de evitar que esta operação unitária seja confundida com outros processos de separação de líquidos, que sejam puramente mecânicos (centrifugação, prensagem, filtração) ou físico-químicos (evaporação, desumidificação, extração, absorção, osmose), definem a secagem mais precisamente como sendo “a remoção de água, ou qualquer outro líquido, de um material sólido, na forma de vapor, para uma fase gasosa insaturada, através de um mecanismo de vaporização térmica, numa temperatura inferior à de ebulição”.

A segunda e maior dificuldade para o estudo desta operação unitária, reside no fato de que a mesma consiste num fenômeno complexo, simultâneo e geralmente acoplado, de transferência de quantidade de movimento, calor e massa, em sistemas sólidos particulados. O processo de secagem, na concepção de MUJUMDAR (1987), é uma mistura de ciência, tecnologia e arte, ou conhecimento baseado em extensivas observações experimentais, e permanecerá assim, pelo menos num futuro previsível.

De acordo com COOK e DUMONT (1991), a operação de secagem torna-se complicada por envolver um considerável número de operações de Engenharia Química, tais como: vaporização, fluxos de fluidos e de calor, difusão, transporte de sólidos e de fluidos, filtração, mistura, psicrometria, combustão, cristalização, fluidização e separação por tamanho; como também operações características de manuseio de sólidos, principalmente moagem e classificação.

Muitos materiais são processados no estado líquido, contudo, grande parte da indústria em geral e em especial a de materiais biológicos, trabalha com classes de produtos que necessitam estar com teor de umidade reduzida, em níveis geralmente muito abaixo dos quais seriam obtidos em processos de eliminação de água, não incluídos no conceito de secagem. Esses produtos,

segundo COOK e DUMONT (1991), incluem geralmente polímeros, alimentos, fármacos, produtos agrícolas, corantes e vários outros produtos químicos, orgânicos e inorgânicos.

A razão principal para se realizar a secagem de biomateriais, consiste numa forma de manutenção da qualidade do produto, com a conservação de suas propriedades físico-químicas pelo abaixamento da concentração de água, para teores em que não exerça papel biológico, inibindo dessa forma a ação de agentes de deterioração, principalmente microrganismos. De acordo com CHEFTEL, CHEFTEL e BESANÇON (1977), nos alimentos desidratados, devido à baixa atividade de água, não pode haver a proliferação de microrganismos, cessando então a maioria das reações químicas e enzimáticas de alteração.

De um modo geral, as razões da secagem, e alguns exemplos específicos de sua importância, são dados por COOK e DUMONT (1991), destacando-se a preservação (muitos materiais deterioram-se na presença de umidade, mas permanecem inalterados por longos períodos quando embalados secos) e redução de peso e volume para tornar o transporte e embalagem economicamente mais vantajosos. Outros objetivos inerentes da secagem são: permitir uma armazenagem a longo prazo do produto, concentrar suas substâncias para mudar ou melhorar o sabor e agregar valor ao produto.

Dessa forma, verifica-se que a operação de secagem não é trivial e vários fatores podem afetar o rendimento do processo, assim como da qualidade do produto durante a remoção da umidade. Segundo BARBOSA-CÁNOVAS e VEGA-MERCADO (1996), as mudanças físicas e químicas que ocorrem durante a secagem podem melhorar certas características desejáveis do produto, mas podem também contribuir para a redução dos nutrientes e propriedades organolépticas do material tratado, se o processo de secagem não for adequadamente conduzido.

Em geral, de acordo com MUJUMDAR (1992), a tendência da tecnologia de secagem continua a ser direcionada no sentido de se obter principalmente alta eficiência energética, aumento das taxas de secagem e com isso projetar secadores mais compactos, controle otimizado do processo e melhor qualidade do produto.

2.2.2. Características Gerais da Secagem

O comportamento geral do processo de secagem com base nos processos simultâneos de transferência de calor e massa e a classificação dos mecanismos pelos quais ocorre a retirada de umidade dos materiais sólidos, está bem descrito na literatura (SHERWOOD, 1929a; SHERWOOD, 1929b; KEEY, 1972; PERRY e CHILTON, 1973; FOUST *et al.*, 1980; STRUMILLO e KUDRA, 1986; MENON e MUJUMDAR, 1987; GEANKOPLIS, 1993).

A secagem de um sólido utilizando ar, envolve a vaporização do líquido contido no sólido seguido da remoção do vapor pela corrente de ar, ocorrendo então dois processos fundamentais e simultâneos: transferência de calor para evaporar o líquido e transferência de massa, na forma de líquido ou vapor no interior, e na forma de vapor a partir da superfície do

sólido. A cinética de secagem do material é função das variáveis que governam a velocidade desses processos.

De acordo com SHERWOOD (1929b), os mecanismos gerais da secagem são:

- Evaporação do líquido na superfície do sólido; resistência à difusão interna de líquido pequena, comparada à resistência para remover o vapor da superfície.
- Evaporação na superfície do sólido; resistência à difusão interna de líquido grande, comparada a resistência para remover o vapor da superfície.
- Evaporação no interior do sólido; resistência à difusão interna de líquido grande, comparada à resistência total para remover o vapor.

A pesquisa sobre a forma de secagem num sólido pode ser baseada nesses mecanismos, cujo controle pode se dar pelas condições internas de migração de umidade, consequência de gradientes de concentração que dependem das características do sólido, ou, pela influência das condições externas sobre a velocidade de secagem do material, principalmente a temperatura, umidade, fluxo e direção do ar, se o mesmo for o agente de secagem utilizado, e a forma física do material e as condições em que se encontra o leito de sólidos no secador.

O fluxo interno do líquido para a superfície ocorre por diversos mecanismos, em função da estrutura do sólido, sendo possíveis a difusão em sólidos homogêneos e contínuos; fluxo capilar em sólidos granulares e porosos; escoamento provocado por contração ou por gradiente de pressão; fluxo por gravidade; e, no caso do processo por contato direto com superfícies aquecidas em secadores por condução, escoamento provocado por seqüências de vaporização e recondensação da umidade na superfície exposta.

A velocidade na qual o líquido evapora de um sólido sob um dado conjunto de condições, normalmente não pode ser prevista teoricamente. Para se verificar a influência das condições externas no processo de secagem, deve-se então recorrer à experiência, com o material na forma apropriada e para determinadas condições de processo, e se obter inicialmente dados relacionados aos teores de umidade do sólido e ao tempo de secagem. A partir desses dados, podem ser construídas curvas de secagem, que são representações gráficas do conteúdo de umidade livre contra o tempo; e curvas de taxa de secagem, derivadas das primeiras, e indicam a variação do fluxo de água no material em função de sua umidade livre ou do tempo.

Com os valores do decréscimo da massa do sólido úmido com o tempo, durante o processo em condições constantes, os teores de umidade do material em base seca e úmida e a taxa de secagem em base seca, podem ser estimados pelas Equações 1, 2 e 3, respectivamente,

$$X_{bs}(t) = \left(\frac{m(t) - m_{ss}}{m_{ss}} \right) \quad (1)$$

$$X_{bu}(t) = \left(\frac{m(t) - m_{ss}}{m_i} \right) \quad (2)$$

$$W = - \frac{m_{ss}}{A} \frac{dX}{dt} \quad (3)$$

nas quais m representa a variação média da massa de sólidos durante o processo, m_{ss} , a massa sólido seco, obtida posteriormente por método direto de análise, e m_i a massa dos sólidos no início da operação. Graficando-se os valores experimentais de $X_{b,s}$ contra o tempo e de W contra $X_{b,s}$, obtém-se curvas típicas, denominadas curvas de secagem e de taxa de secagem, respectivamente.

O comportamento geral dos perfis de teor de umidade dos sólidos, taxa de secagem e de temperatura do ar e de sólidos durante a secagem convectiva, em função dos períodos característicos do processo de secagem, está bem discutido em STRUMILLO e KUDRA (1986) e em GEANKOPLIS (1993). Os efeitos dos parâmetros de secagem sobre a taxa de secagem é observado por STRUMILLO e KUDRA (1986) através de um modelo simplificado, considerando que todo o calor fornecido para promover a secagem de um sólido esférico é consumido na evaporação da umidade. Com um balanço de energia, mostra que a taxa de secagem é diretamente proporcional à temperatura e velocidade do gás e inversamente proporcional ao diâmetro da partícula, parâmetro este que influencia mais significativamente a taxa de secagem.

2.2.3. Aspectos gerais sobre a secagem de biomateriais

Os biomateriais, produtos agrícolas e alimentos, de um modo geral, representam uma das principais fontes alimentícias para o homem. Porém, apesar da importância desses produtos para a dieta humana e de todos os custos envolvidos, constata-se a existência de grandes perdas, devido ao uso de técnicas inadequadas de secagem e armazenamento.

O secador utilizado na redução de umidade desses materiais é um dispositivo que utiliza basicamente ar ambiente e uma fonte térmica natural (solar) ou artificial (resistências elétricas, queima de combustíveis sólidos), para se obter um escoamento de ar aquecido com a finalidade de remover água do produto a ser secado. Nesse processo, há principalmente o envolvimento dos mecanismos de transferência de calor e massa, sendo geralmente utilizada a técnica de secagem em leito fixo com camada espessa.

A secagem artificial de produtos agrícolas é impulsionada pela crescente produção e pelas vantagens, inerentes a esse tipo de técnica, principalmente a possibilidade de controle efetivo do processo e a não dependência das condições climáticas locais, o que implica na obtenção de produtos de melhor qualidade. A secagem artificial permite baixar rapidamente o teor de água desses materiais colhidos úmidos (forragens, frutas, cereais, oleaginosas) e evitar as alterações características dos produtos a granel fortemente hidratados (respiração ou oxidação dos glicídios, fermentações intracelulares, desenvolvimento de bactérias ou fungos, geralmente acompanhados de aquecimento natural).

Pouco tempo após sua colheita, o produto seco pode assim se conservar nas condições ambientais de estocagem, geralmente após tratamento de aeração. Apesar de seu custo relativamente mais elevado, a secagem artificial tem prevalecido, em certos casos, sobre a secagem natural, devido às vantagens técnicas e econômicas que apresenta.

Uma abordagem detalhada sobre a secagem de produtos agrícolas é dada em BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL (1974); PARRY (1985) e CENKOWSKI, JAYAS e PABIS (1993), enquanto a desidratação de alimentos, é descrita nos textos de OKOS *et al.* (1992); BRUIN e LUYBEN (1980) e BARBOSA-CÁNOVAS e VEGA-MERCADO (1996).

2.2.4. Secadores de leito fixo

O leito fixo é um dos sistemas de contato sólido-fluido de concepção mais simples na área de meios porosos e um dos mais utilizados na indústria química, seja como reator de leito catalítico, como adsorvedor, trocador de calor e secador, principalmente de produtos agrícolas, motivo pelo qual vários trabalhos enfocando esse tipo de secador são comumente encontrados no âmbito da engenharia agrícola.

O equipamento utilizado na secagem de sólidos em leito fixo consiste essencialmente de um aquecedor do agente de secagem, normalmente ar ambiente, um soprador para forçar o escoamento desse ar, distribuído através de um dispositivo adequado, através de uma camada de material estática sobre uma base de sustentação. Normalmente o equipamento é dotado de instrumentação capaz de indicar e controlar a vazão e a temperatura do ar, como também de indicar a umidade de entrada e saída do secador. Na Figura 20 está ilustrado um equipamento de secagem em leito fixo normalmente utilizado em centrais de beneficiamento e secagem nas regiões rurais (silos secadores). A Figura 21 mostra o esquema de um secador de grãos em camada fixa, geralmente utilizado em fazendas, projetado e construído por SILVA e LACERDA FILHO (1990) da Universidade Federal de Viçosa.

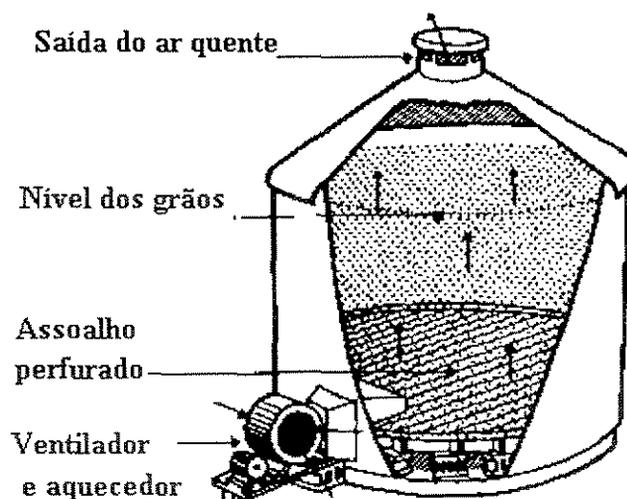
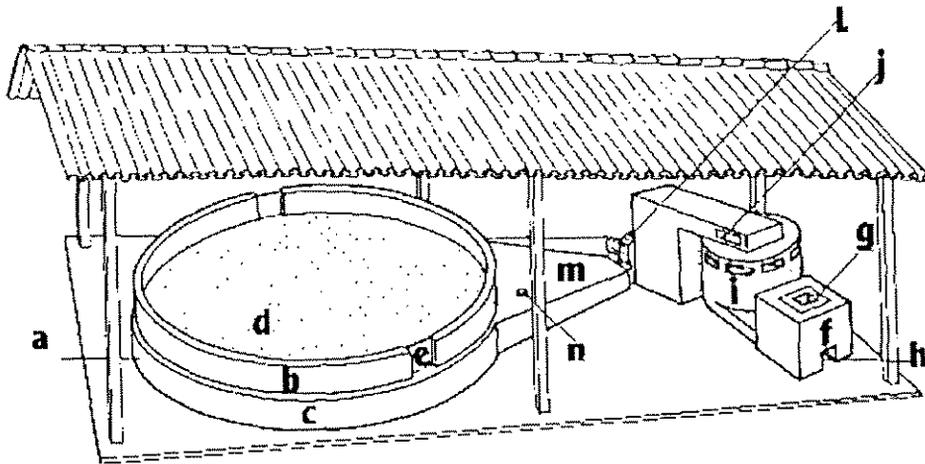


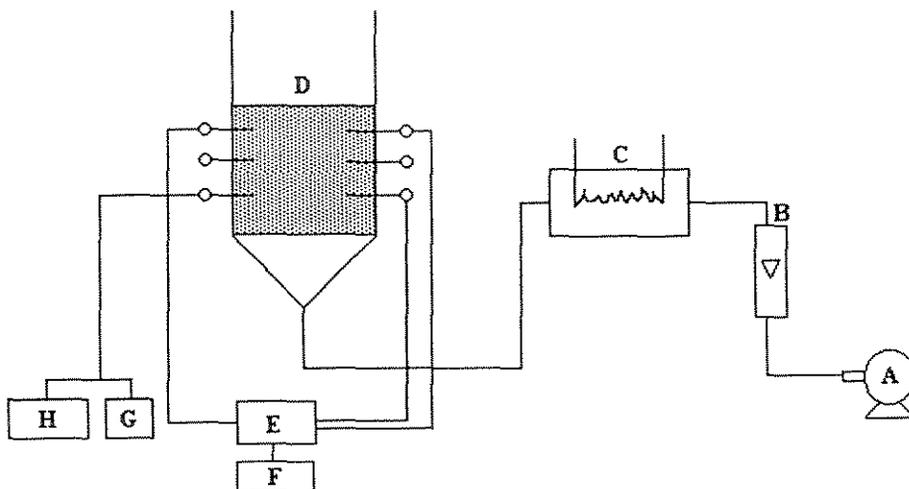
Figura 20. Secador de leito fixo normalmente utilizado em centrais de beneficiamento e secagem



a - tanque secador, b- câmara de secagem, c- câmara plenum, d- chapa perfurada, e- janela, f- fôrnilha, g- abertura para queima de lenha, h- abertura para limpeza, i- ciclone, j- janela, l-soprador, m- expansão gradual, n- termômetro.

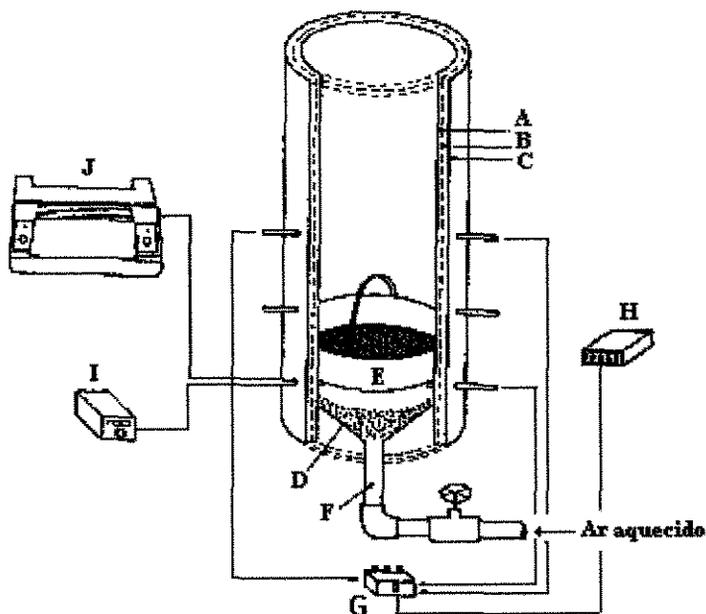
Figura 21. Secador de grãos em camada fixa, normalmente utilizado em fazendas

Nas Figuras 22 e 23 estão esquematizadas, respectivamente, o sistema e a câmara de secagem em leito fixo, em escala de laboratório, utilizada por SILVA (1991) na secagem de urucum, os quais contêm os elementos essenciais para a indicação, alteração e controle das variáveis operacionais inerentes ao processo de secagem.



A- compressor radial, B- rotâmetro, C- aquecedor de ar, D- câmara de secagem, E- chave seletora, F- milivoltímetro digital, G- controlador de temperatura e H- registrador.

Figura 22. Sistema de secagem em leito fixo (escala de laboratório)



A- coluna de aço galvanizado, B- câmara de amianto (1,5 cm), C- espuma de poliuretano (1 cm), D- distribuidor tronco-cônico, E- suporte de alumínio contendo a amostra, F- tubulação galvanizada de 2", G- chave seletora, H- multivoltímetro digital, I- controlador de temperatura, J- registrador .

Figura 23. Câmara de secagem em leito fixo (escala de laboratório)

No processo de secagem descontínua, ou em batelada, as condições dentro do secador variam em função da posição e do tempo, tanto do material úmido quanto do agente de secagem, o que conduz à dificuldades adicionais para a estimativa dos parâmetros de secagem durante a operação, tornando a análise mais difícil do que no processo de secagem contínua. Um desses processos em batelada, constitui-se no secador com circulação permeante de ar através de uma camada estacionária de sólidos, conhecido como secador de leito fixo, esquematizado na Figura 24, com a indicação da distribuição de temperatura do sólido e do ar e das zonas de secagem ao longo do secador.

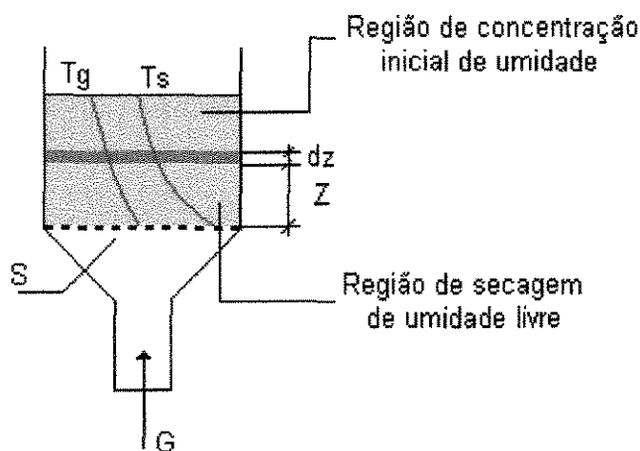


Figura 24. Esquema de um secador de leito fixo (camada espessa)

O secador de leito fixo foi estudado teoricamente por KEEY (1978) e experimentalmente por BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL (1974), aplicando este sistema para a secagem de produtos agrícolas.

Um procedimento adequado de cálculo é dado a seguir, com base nos balanços de massa e energia conforme as condições verificadas em STRUMILLO e KUDRA (1986) e PAKOWSKI e MUJUMDAR (1987).

Para o secador adiabático ilustrado na Figura 24, a equação para o balanço de umidade para a região de secagem de umidade não ligada, de espessura dz , na direção da taxa de ar no intervalo de tempo dt tem a forma,

$$-\rho_s(1-\varepsilon)SdzdX - \rho_g\varepsilon SdzdY = Gdt dY \quad (4)$$

que rearranjada, torna-se:

$$-\rho_s(1-\varepsilon)\frac{\partial X}{\partial t} - \rho_g\varepsilon\frac{\partial Y}{\partial t} = \frac{G}{S}\frac{\partial Y}{\partial z} \quad (5)$$

Da mesma forma obtém-se a Equação 6, representativa do balanço de energia,

$$-\rho_s(1-\varepsilon)\frac{\partial H_s}{\partial t} - \rho_g\varepsilon\frac{\partial H_g}{\partial t} = \frac{G}{S}\frac{\partial H_g}{\partial z} \quad (6)$$

As equações cinéticas de transferência de calor e massa podem ser representadas por:

$$-\rho_s(1-\varepsilon)\frac{\partial H}{\partial t} = ha(T_g - T_s) - aH_v K_y(Y_e - Y) \quad (7)$$

$$-\rho_s(1-\varepsilon)\frac{\partial X}{\partial t} = aK_y(Y_e - Y) \quad (8)$$

De acordo com PAKOWSKI e MUJUMDAR (1987), o termo contendo $\frac{\partial X}{\partial t}$ na Equação 5 pode ser negligenciado frente ao gradiente de umidade dos sólidos, constituindo-se dessa forma numa simplificação desta equação, que passa então a ser representada por:

$$-\rho_s(1-\varepsilon)\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{G}{S}\frac{\partial Y}{\partial z} \quad (9)$$

A equação da taxa de transporte de umidade pode ser escrita como,

$$-\rho_s(1-\varepsilon)SdzdX = aSWdzdt \quad (10)$$

e reescrita na forma:

$$-\rho_s(1-\varepsilon)\frac{\partial X}{\partial t} = aW \quad (11)$$

Esse sistema de equações pode ser resolvido numericamente para dadas condições de contorno.

CALADO (1993) apresenta um estudo detalhado dos modelos matemáticos existentes na literatura para a secagem em leito fixo para camada fina e espessa, com ênfase na análise e simulação do processo através do modelo matemático de duas fases baseado na teoria das misturas, na qual considera-se o ar e os sólidos úmidos como uma mistura multicomponente.

2.2.5 Modelos matemáticos para a secagem de biomateriais em leito fixo

Devido às diferenças existentes entre o comportamento da secagem de um sólido individual e de uma camada de sólidos, os modelos matemáticos para o processo de secagem em leito fixo podem ser divididos em duas seções principais: secagem em camada delgada e secagem em camada espessa.

Vários mecanismos físicos têm sido propostos para descrever a transferência de umidade em sólidos (BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1974), destacando-se:

- Difusão de líquido, devido ao gradiente de concentração;
- Difusão de vapor, devido ao gradiente de pressão;
- Movimento de líquido, devido à forças capilares;
- Fluxo de líquido e vapor, devido a diferenças de pressão total, causado pela pressão externa, concentração, alta temperatura e capilaridade;
- Escoamento por efusão (escoamento de Knudsen), que ocorre quando o caminho livre das moléculas de vapor é da ordem do diâmetro dos poros (mecanismo importante para condição de alto vácuo);
- Movimento de líquido, devido à força gravitacional, normalmente negligenciada, desde que não influencie na secagem do produto;
- Difusão superficial, praticamente desprezível.

Considerando que os processos de transferência de calor, massa e pressão ocorrem simultaneamente, LUIKOV (1966) desenvolveu um modelo matemático, baseado na termodinâmica dos processos irreversíveis e nos mecanismos citados anteriormente, que descreve a secagem no interior do meio poroso. Muitas soluções aproximadas e métodos numéricos têm sido utilizados para resolver o sistema de equações não lineares propostos por LUIKOV (1966),

os quais incluem algumas variações de métodos clássicos, como os das diferenças finitas e elementos finitos, métodos da camada limite e de aproximação variacional. Uma solução utilizando a moderna técnica da transformada integral generalizada (GITT) aplicada à secagem de sólidos é apresentada por RIBEIRO e LOBO (1998). Entretanto, o sistema de equações que compõem o modelo de Luikov pode ser simplificado e aplicado na secagem de produtos agrícolas com baixas umidades (grãos), altas umidades (frutas, vegetais) e em outros produtos (têxteis, minerais, gelatinas, sabão), conforme os trabalhos de HUSSAIN *et al.* (1972) e SODHA *et al.* (1987).

Na análise da secagem de grãos, BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL (1974) realizam uma simplificação da equação de difusão em coordenadas esféricas para prever a secagem de vários materiais, empregando somente o primeiro termo da equação para calcular a taxa de secagem dos produtos. Segundo estes autores, duas razões principais contribuem para que as equações de secagem baseadas na teoria da difusão não representem com precisão o comportamento da secagem de grãos: a escolha inadequada das condições de contorno nas soluções das equações, e, a incorreta consideração de que a difusividade de massa e a constante de secagem são independentes do conteúdo de umidade; evidenciando que uma condição mais realista seria a do tipo convectivo,

$$\mathcal{D} \frac{\partial X}{\partial r} \Big|_{r=r_0} = K_p (X_s - X_{s_e}) \quad (12)$$

onde K_p representa o coeficiente convectivo de transferência de massa e X_s o conteúdo de umidade superficial do grão. Para K_p finito, o conteúdo de umidade superficial do grão não alcança o equilíbrio instantaneamente no início do processo de secagem, como é sugerido nos modelos baseados em equações teóricas e semi-empíricas.

Soluções da equação de difusão, utilizando condições de contorno do tipo convectivo (Equação 12) podem ser encontradas em livros textos de transferência de calor, como por exemplo em INCROPERA e DE WITT (1990).

As equações puramente empíricas tem-se mostrado como boas opções para a predição do processo de secagem, devido aos melhores resultados apresentados para a secagem de cereais dentro das condições operacionais para as quais foram estabelecidas. Várias equações deste tipo foram desenvolvidas para prever a secagem de grãos; THOMPSON *et al.* (1968) propuseram um modelo para a secagem de milho, BECKER (1959) para trigo, BAKSHI e SINGH (1980) para arroz e ROA e MACEDO (1976) apresentaram uma equação para a secagem de feijão em camada delgada.

A secagem de um grão individualmente ou de uma só camada de grãos não altera as condições do ar significativamente. Entretanto, quando os grãos são colocados dentro de um secador formando camadas espessas, o ar que passa através dessas camadas se modifica. Sua temperatura diminui ao ceder calor sensível para os grãos e sua umidade aumenta ao receber a

água evaporada do produto, conseqüentemente, seu potencial de secagem diminui. Um modelo matemático que possa simular o processo nessa situação deve conter equações que calculem todas as variações de temperatura e umidade, tanto para o produto como para o ar.

HUKILL (1955) desenvolveu uma expressão analítica para determinar o teor de umidade do grão relacionando-a com a altura da camada de grãos e com o tempo de secagem, desprezando o calor sensível dos grãos e admitindo que a temperatura do ar de secagem decresce exponencialmente à medida que o ar vai passando através da massa de sólidos.

THOMPSON *et al.* (1968) desenvolveram um modelo para a previsão da influência das condições do ar de secagem, dos fluxos de ar e de grãos, da espessura da camada e do teor de umidade inicial do produto no processo de secagem. Nesse estudo, os autores dividiram o processo contínuo de secagem em vários pequenos processos, simulando-os através de cálculos consecutivos das trocas que ocorrem durante pequenos incrementos de tempo. Uma aplicação desse modelo, para soja, foi realizada por DALPASQUALE e PEREIRA (1991). Em trabalho recente, CAVALCANTI MATA e MENEGALLI (1997) aplicam o modelo de Thompson com sucesso na secagem de feijão em leito fixo, adicionando equações para equilíbrio higroscópico, calor latente de vaporização da água, calor específico do produto e aferindo a equação para camada delgada.

Um modelo para a secagem de sólidos baseado nas leis de transferência de calor e massa, foi desenvolvido por BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974). Esse modelo, de acordo com BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL (1974), é aplicável à secagem em camada espessa de todos os grãos e cereais. Uma comprovação disto foi realizada por ROA e MACEDO (1976), através da aplicação deste modelo na secagem de feijão "carioca".

O modelo de BAKKER-ARKEMA *et al.* (1974) fornece resultados mais precisos e tem aplicação mais geral por se basear nas leis de transferência de calor e massa entre o ar e o produto. Recentemente, CALÇADA, BISCAIA Jr. e MASSARANI (1996) propuseram um modelo para a secagem em leito fixo, que leva em conta a condensação de parte do vapor d'água, com a formação de água líquida na corrente de ar de secagem, incluindo relações psicrométricas no conjunto de equações da modelagem de duas fases, eliminando-se o problema numérico que ocorre durante o período em que o ar atinge o ponto de orvalho dentro do secador.

Pela análise da literatura específica, verifica-se que as equações de secagem puramente empíricas são boas opções para a predição do processo de secagem, dentro das condições operacionais para as quais foram estabelecidas. O problema maior está na correta determinação dos coeficientes de transferência de calor e massa e das propriedades físicas dos produtos a secar.

2.2.6. Trabalhos sobre a secagem de biomateriais em leito fixo

A literatura sobre a secagem em leito fixo, tanto em camada espessa como em camada delgada é extensa. As citações a seguir tratam do processo de secagem contendo abordagem experimental de materiais biológicos, obedecendo a sequência:

autor (ano)

biomaterial secado

resumo

SABBAH et al. (1979)

Soja

Verificaram a influência da inversão do fluxo do ar na homogeneidade do produto final. Constataram que, através da inversão do ar de secagem, o produto resultante torna-se bem mais homogêneo.

COUTINHO (1982)

Soja

Estudou a modelagem e a expressão para a taxa local de secagem. Concluiu que o modelo obtido representava bem o período à taxa constante, necessitando aumentar o tempo de simulação para se verificar o período à taxa decrescente.

SINÍCIO (1983)

Raspas de mandioca

Determinou empiricamente uma equação de secagem em camadas finas, com base em dados da literatura, para uso na faixa de temperatura de 27 a 50°C e umidade 18 a 85%. Concluiu que a equação é satisfatória, podendo ser introduzida em modelos matemáticos para simulação da secagem do material utilizado.

CORREA et al. (1983)

Café

Realizaram uma adaptação do modelo de Hukill originalmente proposto para milho, através da inclusão de equações de equilíbrio higroscópico, secagem em camada delgada e para o calor latente de vaporização, específicas para o produto. Concluíram que o modelo de Hukill não descreve satisfatoriamente o processo de secagem, pois não prevê o reumedecimento do produto.

SOKHANSANJ (1984)**milho, arroz, trigo**

Estudou a simulação da secagem de grãos com respeito à conservação de energia e qualidade do produto. O autor apresentou uma revisão dos modelos baseados nos princípios de transferência de calor e massa. Usou a estratégia de apresentar primeiro um balanço para obter as equações gerais e depois particularizá-las a leitos estacionários e em movimento (correntes paralelas, contra-corrente e fluxo cruzado)

GUNTHER *et al.* (1984)**Pasta Celulósica**

Realizaram um estudo preliminar da secagem em leito fixo de laboratório. Concluíram que as curvas de secagem dependem da temperatura e velocidade do ar de secagem, da umidade inicial do material e da altura do leito; e que o modelo que melhor representa o fenômeno é o da capilaridade.

KAMEOKA *et al.* (1986)**Arroz**

Apresentaram um novo modelo matemático para a secagem de arroz em camada espessa. Uma comparação entre valores calculados e experimentais mostrou uma máxima diferença entre o conteúdo de umidade e a temperatura do ar de 2,5% e 10%, respectivamente.

SINGH, NARAIN e SRIVASTAVA (1986)**arroz em casca**

Estudaram a secagem em camada delgada. Constataram que a secagem do leito pode ser aproximada através do modelo da difusão.

SOBRAL (1987)**sangue bovino incorporado em proteína texturizada de soja**

Estudou a cinética de secagem em leito fluidizado e em leito fixo. No leito fixo, verificou a influência da temperatura e da umidade inicial, empregando fluxos de ar em torno de $1,8 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$, concluindo que esses parâmetros têm efeitos significativos no processo de secagem. Constatou que o efeito da temperatura aumenta com a redução da umidade inicial. Para os dois sistemas de secagem, observou que o processo ocorria no período de velocidade decrescente. Para representar as curvas de secagem, o autor utilizou a equação empírica de Page, obtendo ajustes com coeficientes de correlação acima de 0,98.

CENKOWSKI, MUIR e JAYAS (1990)**canola e cevada**

Modificaram um modelo para secador contínuo de fluxos cruzados e o usaram para simular o processo em secador de leito fixo. Os resultados gerados pelo modelo adaptado foram comparados com dados experimentais, obtendo-se, ao findar a secagem, desvios na faixa de 1°C e 0,5% bs na temperatura do ar e na umidade do produto (canola), respectivamente. O modelo também foi aplicado, comparando-se dados experimentais de outros autores, para a secagem de cevada, obtendo-se boa concordância entre os resultados experimentais e os da simulação.

SILVA e LACERDA FILHO (1990)**milho, feijão, arroz, soja, café, feno, mandioca, cebola, alho**

Desenvolveram um secador para operar na secagem em lotes de vários produtos agrícolas, bastante simples, podendo ser construído e utilizado em fazendas. Informam que o secador opera independente das condições climáticas, apresentando uma eficiência de secagem semelhante a muitos secadores de alto custo encontrados no mercado brasileiro. O secador é descrito em detalhes, sendo também fornecidos os parâmetros de secagem em função da natureza do produto e sua finalidade.

SILVA (1991)**urucum**

Estudou a secagem em leito de jorro e em leito fixo. Observou que a intensidade da secagem em leito fixo é ligeiramente inferior à realizada em leito de jorro, com ambas ocorrendo no período à taxa decrescente. Com relação à degradação térmica, constatou que não há perda considerável de bixina. Concluiu também que a reumidificação do produto não causa efeito no comportamento da secagem.

RUMSEY (1991)**nozes**

Estudou a variação do conteúdo de umidade em um secador de leito fixo. Apresentou um modelo matemático com abordagem global para a simulação da secagem do material contendo diferentes teores de umidade. O autor realizou comparações com outros modelos (incluindo o de BROOKER, BAKKER-ARKEMA e HALL, 1974) e com dados experimentais. Concluiu que o modelo é satisfatório e pode ser utilizado para a secagem de produtos com diferentes conteúdos de umidade iniciais.

DALPASQUALE e PEREIRA (1991)**soja**

Estudaram a secagem com ar ambiente em camadas do produto com 2,5m de altura. Os resultados foram usados para ajustar o modelo de Thompson às condições de clima tropical, através de uma equação de secagem em camada fina. O calor latente de vaporização do material foi incluído no balanço de energia. Obtiveram excelentes resultados com o modelo proposto.

CASTRO e FARIA (1992)**urucum**

Estudaram a estabilidade térmica da bixina no processo de secagem de duas variedades, Peruana e Piave Vermelha. Concluíram que o teor de bixina não sofreu degradação apreciável até temperaturas de 73 °C e que as sementes não possuíam umidade superficial.

TECHASENA, LEBERT e BINBENET (1992)**cubos de cenoura**

Desenvolveram um modelo para a secagem em camada delgada, junto com as equações de balanço de transferência de calor e massa para o ar e o produto. Um outro modelo para o secador de leito fixo em camada espessa foi obtido, considerando-o como uma série de camadas delgadas superpostas. Os modelos foram utilizados para simular a secagem, obtendo-se boas concordâncias com os dados experimentais, exceto para a temperatura de saída do ar, para a qual os valores calculados foram mais altos do que os valores experimentais. Concluíram que esta diferença está relacionada à complexidade de certos fenômenos que ocorrem durante o processo e que não foram considerados nos modelos.

TELIS-ROMERO, GABAS , RIZZATTO (1995)**Uvas Itália e Rubi**

Estudaram a cinética de secagem em função de pré-tratamentos químicos permitidos pela legislação brasileira, com o objetivo de aumentar o coeficiente de difusão de umidade, reduzindo o tempo de secagem sem perder a qualidade do produto. Observaram que o pré-tratamento com soluções aquosas de NaOH resultava na redução do tempo de secagem devido à solubilização do material ceroso e da destruição parcial da casca. No entanto, concluíram que o tratamento com solução alcalina contendo ácido oléico aumentava consideravelmente a taxa de secagem, sendo este o pré-tratamento químico mais eficiente de todos os ensaios realizados.

LIMA (1995)**Feijão**

Realizou uma comparação entre os processos com leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado, em escala de laboratório, avaliando comparativamente a influência da carga de sólidos, teor de umidade inicial dos grãos e temperatura do ar de secagem. Levando também em

consideração parâmetros energéticos para os três secadores analisados, constatou que o secador de leito fixo apresentou melhor desempenho; contudo a análise não foi significativa para indicar, a princípio, este secador como o mais adequado para o processamento deste material.

SOUZA, ARNOSTI Jr., SARTORI (1996)

Sementes de *Brachiasia brizantha*

Estudaram a cinética da secagem e observaram que na espessura do leito 0,01m caracterizava-se a camada fina. Constataram a existência de três períodos de secagem e que a constante de secagem sofreu influência diferenciada das variáveis velocidade e temperatura do ar, para cada um desses períodos, predominando, no entanto, a influência do efeito difusivo no segundo e terceiro período de secagem.

LOPES-FILHO e VIEIRA (1996)

Cará

Apresentaram as variações das propriedades do material durante o processo de secagem, conduzido a 45, 55 e 65°C, com o tubérculo submetido a pré-tratamento com metabissulfito de sódio a 2%, visando inibir o escurecimento enzimático. Conforme é típico nos biomateriais, verificaram que o teor de umidade do produto decrescia exponencialmente com o tempo para todas as condições operacionais. Observaram que a massa específica real apresentava relação quadrática e a massa específica aparente aumentava linearmente com o teor de umidade, não sendo, no entanto, influenciadas pela temperatura do ar de secagem. Observaram que a porosidade do leito diminuía linearmente com o aumento do teor de umidade e que os volumes reais e aparentes apresentavam comportamento inverso, mas que também não eram influenciados pela temperatura.

PARK e BROD (1997)

Cocos

Realizaram comparações entre secadores operando com fluxos de ar paralelo e permeante através do leito fixo de sólidos em temperaturas de 50, 60 e 70°C para velocidades do ar 0,5 e 1 m/s, tomando por base a determinação das difusividades efetivas, taxas de secagem e energia de ativação utilizando um modelo tipo Arrhenius. De acordo com o esperado, as difusividades efetivas aumentaram com a temperatura e velocidade para os dois secadores, indicando a influência dessas variáveis na cinética de secagem. Devido ao menor tempo de operação alcançado para se atingir a umidade desejada, recomendam o secador em leito fixo vertical com circulação permeante, para a secagem de produtos biológicos.

ALSINA, ARAGÃO E MONTEIRO (1997)**Algaroba (*Prosopis juliflora*)**

Estudaram a cinética da secagem visando a obtenção de uma equação de camada delgada, necessária ao projeto e otimização de unidades industriais. Trabalhando com temperaturas e velocidades do ar variando, respectivamente, entre 60 e 90°C e 0,1 a 1,5 m/s, verificaram que o efeito da temperatura foi mais importante para a redução considerável dos tempos de secagem do material. Utilizaram a solução da segunda lei de Fick para estimar o coeficiente de difusão de umidade.

LÓPEZ *et al.* (1997)**Malte**

Apresentaram uma modelagem matemática para a secagem do produto em camada espessa, com a determinação experimental das constantes de secagem com o ar em várias condições de temperatura e umidade. O modelo foi validado para unidades em escala industrial, propiciando uma economia de aproximadamente 5,5% em combustíveis e 7,5% em energia elétrica, quando foi utilizado recirculação de ar, o qual era transportado para fora durante as 6 horas finais do processo de secagem, provocando um significativo decréscimo no fluxo de ar durante este período.

YOSHIDA (1997)**Milho superdoce**

Estudou a cinética de secagem em leito com camada fina, analisando o efeito das variáveis temperatura, velocidade e umidade relativa do ar de entrada na taxa de secagem. Observou que a temperatura foi a variável de maior influência na secagem dos grãos, e o modelo exponencial com dois termos, o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

2.3. EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO**2.3.1. Divisão e Fixação da Umidade nos Grãos**

A água participa ativamente na formação dos produtos agrícolas. No estado úmido, o grão é um produto heterogêneo, coloidal, pouco inchado, pela ausência de vasos capilares e espaços intercelulares. Quando a água é retirada por meio da secagem, o grão inicialmente elástico, torna-se quebradiço. Os fisiologistas de cereais determinaram que a água no grão se apresenta sob quatro tipos diferentes, em função da natureza das ligações físico-químicas existentes entre os componentes da matéria e as moléculas de água, correspondentes aos diferentes níveis de hidratação do produto, segundo observações de LASSERAN (1978).

O primeiro tipo de água é constituído por uma camada monomolecular de água ligada a certos agrupamentos moleculares da matéria biológica, fortemente polarizadas, como o grupo das hidroxilas.

A água do segundo tipo é representada por uma camada polimolecular de água, vindo fixar-se sobre a camada monomolecular precedente. Essas diferentes camadas moleculares, ligadas à matéria por meio de ligações eletromagnéticas, chamadas forças de Van der Waals, constituem água pseudo-líquida, não solvente, sem papel biológico e fortemente adsorvida.

Esses dois tipos de água correspondem a níveis de hidratação relativamente baixos. Na secagem, essa água não é retirada, o que não é de interesse, uma vez que ela é totalmente inerte sob o ponto de vista biológico.

O terceiro tipo de água que se encontra nos grãos é constituída de água líquida sob tensão osmótica. Trata-se de água solvente, que retém diferentes substâncias dissolvidas nas células tais como: açucares, ácidos, amido e sais. Esse tipo de água fracamente adsorvida tem papel biológico e pode permitir reações enzimáticas, bem como o desenvolvimento de fungos.

A água do terceiro tipo ou água osmótica, não apresenta dificuldade para ser evaporada, e é em grande parte retirada pela secagem. Todavia, em razão da espessura dos grãos, a migração deste tipo de água no interior do produto, no momento da secagem, é causada por diferenças de pressão osmótica de célula para célula. Em vista disso, defronta-se com um problema de difusão de água por ocasião da evaporação das últimas quantidades de umidade, tendo em vista que as paredes celulares semipermeáveis constituem uma espécie de obstáculo ao escoamento da água.

O quarto tipo de água é constituído por água de impregnação, denominada "água livre". Esse tipo de água é também solvente e sua presença no grão colhido a granel torna-o inapto para a conservação. A água de impregnação é bastante móvel e evapora-se facilmente por ocasião da secagem.

A Figura 25 dá uma representação esquemática do modelo de fixação de água no grão, de acordo com LASSERAN (1978).

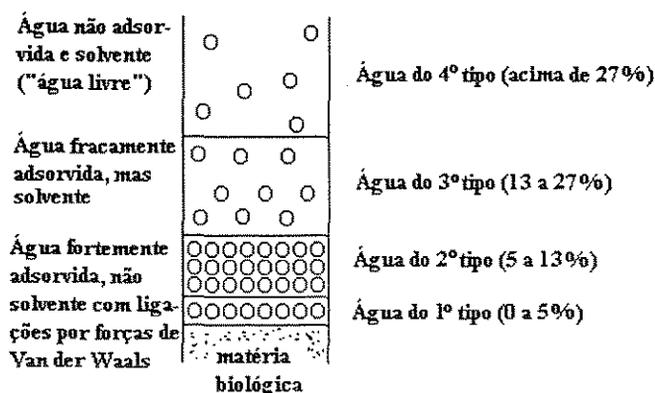


Figura 25. Representação esquemática do modo de fixação da água no grão com indicação aproximada dos limites entre os diferentes tipos de água, para milho a 15° C.

2.3.2. Sorção de Umidade

Conforme o exposto anteriormente, a água está adsorvida, isto é, mantida nos grãos por forças de atração molecular, ou ligada firmemente à substância adsorvedora. O termo geral sorção, é usado para denotar a interação água-substância adsorvedora. Os termos adsorção e dessorção são usados especialmente para indicar o processo de ganhar ou perder água pelo processo de sorção.

A classificação dos tipos de água presentes nos grãos é meramente uma divisão em categorias usuais. Segundo PEREIRA e QUEIROZ [19--], deve-se ter em mente que sistemas coloidais, tal como os grãos, os quais são constituídos de várias substâncias e possuem uma estrutura organizada, ocorrem muitos tipos de água ligada, na faixa entre a água livre e aquela quimicamente ligada.

Ao colocar-se um produto biológico em ar ambiente com uma determinada temperatura e umidade relativa constantes, haverá equilíbrio higroscópico quando as pressões parciais do vapor d'água no ar e na superfície do grão se igualarem. Quando o grão está em equilíbrio higroscópico com o ar que o envolve, ocorre troca recíproca de umidade (água) entre o ar e o grão, porque não há diferença de pressão parcial de vapor entre a umidade da superfície do grão e a do ar.

2.3.3 Atividade de Água

A água contida em materiais biológicos, como sementes, interage com os vários componentes não aquosos e associa-se à moléculas das substâncias constituintes, em diversas intensidades, que podem ser descritas pela atividade de água (a_w). Este termo foi desenvolvido para levar em conta essas interações e para ser um indicador mais preciso da suscetibilidade de alteração dos alimentos (FENNEMA, 1993), e mostrar a relação entre o produto e a umidade relativa de equilíbrio com o ambiente (VAN DEN BERG e BRUIN, 1981).

De acordo com LABUZA (1968) a atividade de água pode ser definida pela Equação 13,

$$a_w = \frac{p}{p_0} \quad (13)$$

na qual p corresponde à pressão parcial da água, na fase vapor, sobre a amostra e p_0 é a pressão de vapor da água pura, à mesma temperatura. A Equação 13 é uma aproximação da relação do coeficiente de atividade original desenvolvido por LEWIS *et al.* (1961), expresso pela Equação 14, onde f_i e f_i^0 são as fugacidades do solvente e do solvente puro, respectivamente.

$$a_i = \frac{f_i}{f_i^0} \quad (14)$$

À baixas pressões, em torno de 1 atm, a diferença entre $\frac{f_i}{f_i^0}$ e $\frac{p}{p_0}$ é muito pequena e justifica-se a definição de a_w em termos da relação entre pressões parciais (VAN NESS e ABBOT, 1982; FENNEMA, 1993).

A atividade de água também está relacionada com a umidade relativa de equilíbrio, através da Equação 15 (LABUZA, 1968):

$$a_w = \frac{UR_e}{100} \quad (15)$$

2.3.4. Isotermas de Sorção

Define-se umidade de equilíbrio como sendo o teor de umidade de um material higroscópico depois de exposto a um ambiente em condições de temperatura e umidade relativa controladas, após um período de tempo prolongado. Pode-se dizer, ainda, que o material está higroscópicamente em equilíbrio com o ambiente em que se encontra quando a tensão de vapor d'água correspondente à umidade do material for igual à tensão de vapor d'água do ar ambiente. Para cada espécie e/ou variedade de material, a tensão de vapor tem um valor característico de acordo com a temperatura e o teor de umidade do material.

A importância da obtenção de dados experimentais de equilíbrio higroscópico dos produtos agrícolas é bem conhecida. Tendo-se em vista a importância desse conceito, nas inúmeras aplicações no campo da secagem, na armazenagem e no manuseio dos produtos agrícolas, têm-se empregado esforços para a obtenção de equações que expressem o teor de umidade de equilíbrio para cada produto, como uma função da umidade relativa e temperatura do ar.

A utilidade dessas equações são múltiplas; PEREIRA e QUEIROZ [19--], destacam: a) as variações contínuas de temperatura e umidade do ar em contato com os produtos armazenados ocasionam mudanças no teor de umidade de equilíbrio. Em pesquisas a respeito de armazenagem, freqüentemente é necessário calcular esse teor de umidade por meio dessas equações; b) nos cálculos de secagem, independente do sistema de secagem empregado, os valores do teor de umidade e equilíbrio devem ser determinados. Vale ressaltar, ainda, a importância do conhecimento dessas equações de equilíbrio higroscópico, para os cálculos da entalpia de vaporização da água dos produtos biológicos nos processos de secagem.

Os valores de teor de umidade de equilíbrio dos produtos biológicos dependem, principalmente, da temperatura e da umidade relativa do ar, como também do próprio produto. A maturidade fisiológica e o histórico do produto, assim como a maneira pela qual o equilíbrio foi obtido (adsorção ou dessorção), também influenciam na umidade de equilíbrio.

As isotermas de sorção de umidade consistem na representação gráfica do teor de umidade de um produto, geralmente expressa em massa de água em relação à matéria seca, em função da sua atividade de água. As informações resultantes destas curvas tornam-se úteis nos processos de concentração e secagem de alimentos, pois a maior ou menor facilidade de eliminação da umidade está relacionada à atividade de água e com a estabilidade (FENNEMA, 1993).

De acordo com KAREL (1975), uma isoterma de sorção é simplesmente uma curva que relaciona o teor de umidade de equilíbrio de um produto *versus* a umidade relativa do ar ou atividade de água do produto, para uma determinada condição de temperatura. Encontram-se na literatura diversos exemplos de isotermas de sorção, obtidas para os mais variados tipos de produtos. IGLESIAS e CHIRIFE (1982) apresentam uma ampla coleção de isotermas de sorção obtidas experimentalmente, compiladas da literatura.

O teor de umidade de equilíbrio de um material higroscópico, para determinada condição de temperatura e umidade relativa, depende do caminho utilizado para atingir a condição de equilíbrio. Assim, para uma mesma umidade relativa, pode haver duas isotermas, denominadas isotermas de adsorção e de dessorção, obtidas em função das condições experimentais iniciais. Isso porque o material pode estar com teor de umidade menor ou maior que a umidade de equilíbrio para as condições do ambiente. Esse fenômeno é denominado histerese. As isotermas geralmente têm formato sigmoidal e, segundo TEIXEIRA NETO (1987), a isoterma de dessorção apresenta valores de umidades de equilíbrio superiores aos da isoterma de adsorção. Não há ainda na literatura uma explanação conclusiva a respeito do fenômeno de histerese. Diversas teorias têm sido formuladas para explicar o fenômeno. NGODDY e BAKKER-ARKEMA (1975) apresentam uma revisão das teorias existentes até então, que explica a histerese por um mecanismo de formação de menisco no processo de adsorção e desaparecimento do mesmo durante a dessorção. CHUNG e PFOST (1967) explicam o fenômeno com base na contração de volume que ocorre durante a dessorção de umidade no processo de secagem. Isto é, a redução de volume do produto acarreta diminuição de pontos de ligação disponíveis para ligações d'água com as moléculas das substâncias, o que resulta em histerese. A teoria do "tinteiro" desenvolvida por RAO (1941) supõe os capilares como corpos largos com prolongamentos estreitos. Na adsorção, o capilar não se enche completamente até que uma atividade correspondente ao seu maior raio seja alcançada. Durante a dessorção, o seu menor raio, controla o esvaziamento do poro, de modo que a atividade de água é reduzida consideravelmente.

As curvas características das isotermas de sorção, representadas na Figura 26, são classificadas, segundo BRUNAUER, EMMET e TELLER (1938), nas seguintes formas principais:

Tipo I: Isoterma tipo Langmuir, caracteriza uma adsorção pura em camada monomolecular.

Tipo II: Isoterma característica de formação de múltiplas camadas de moléculas de adsorbato sobre a superfície do sólido. Frequentemente encontrada para sólidos não porosos (HINES e MADDOX, 1985), sendo típica para produtos alimentícios.

Tipo III: Embora similar ao tipo II, são raramente observadas em sólidos não porosos. Seu formato sugere também adsorção em camada polimoleculares.

Tipo IV e Tipo V: Refletem a condensação capilar, quando a pressão de saturação do vapor do adsorbato é atingida.

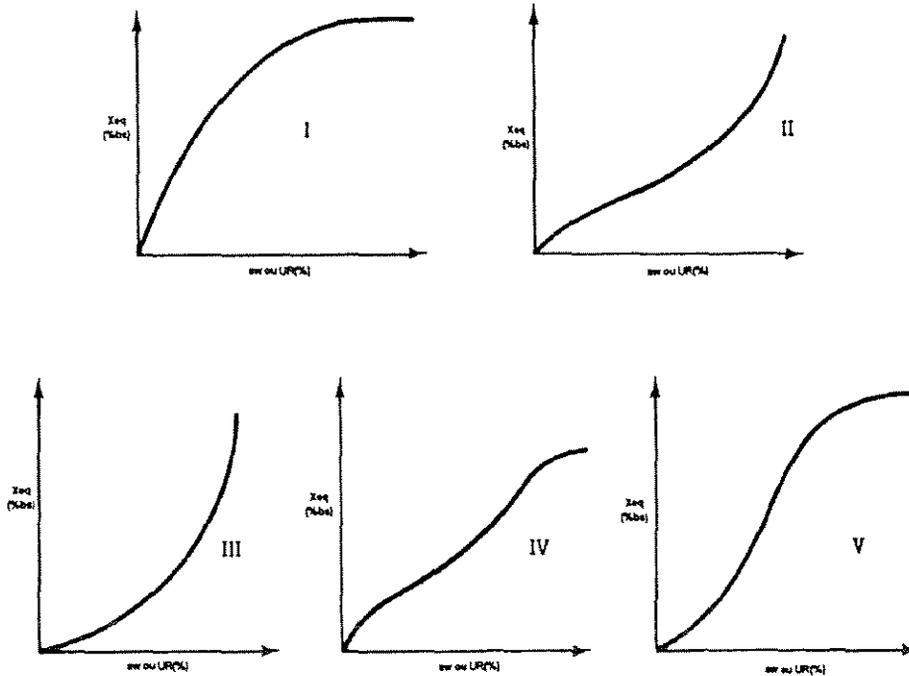


Figura 26. Formas características das isotermas de sorção

2.3.5. Modelos de equilíbrio higroscópico

Diversos modelos teóricos, semi-empíricos e empíricos têm sido propostos para expressar o teor de umidade de equilíbrio de grãos. Analisando-se os trabalhos publicados nesta área, conclui-se que, de um modo geral, nenhum modelo teórico desenvolvido é capaz de prever exatamente o teor de umidade de equilíbrio de grãos em todas as faixas de temperatura e umidade relativa. Além disso, apenas alguns modelos levam em consideração a temperatura como parâmetro.

Modificações nas equações dos modelos têm sido apresentadas na literatura e, neste caso, a faixa de validade é aumentada. A Tabela 17 mostra alguns dos modelos mais comuns de isotermas de sorção, segundo FORTES e OKOS (1980).

De acordo com PEREIRA e QUEIROZ [19--], a equação de Kelvin somente é aplicada para as umidades relativas superiores a 95%, e a equação de Langmuir não se aplica a produtos alimentícios. A equação BET e a versão apresentada por Rounsley permitem estimar a

contribuição de água adsorvida em relação ao total de água ligada. As equações de BET, Harkins-Jura e Rounsley fornecem resultados aceitáveis somente para valores de umidades relativas inferiores a 30%. Segundo KNEULE (1976), a equação de Langmuir é válida até o momento em que a superfície se recobre com uma camada monomolecular simples e a equação de BET é aplicável somente no intervalo $0 < a_w < 0,35$.

A equação de Henderson e a de Chung-Pfost são, de acordo com PEREIRA e QUEIROZ [19--], as que melhor expressam o teor de umidade de equilíbrio de grãos para faixas mais amplas de temperatura e umidade relativa. Entretanto, modificações empíricas melhoraram consideravelmente essas equações, tornando-as aplicáveis em intervalos mais amplos de temperatura e umidade relativa. Como por exemplo, podemos citar as equações modificadas de Henderson e de Chung-Pfost, para as quais, encontram-se na literatura valores dos parâmetros para diversos produtos agrícolas (ASAE, 1985).

Tabela 17. Modelos matemáticos de isotermas de sorção

Equação ⁽¹⁾	Autor (ano)
$a_w = \exp\left(-\frac{2\sigma \cos \theta}{r_c \rho_l R T}\right)$	Kelvin (1871)
$\frac{X_e}{X_m} = \frac{k a_w}{1 + k a_w}$	Langmuir (1918)
$\frac{X_e}{X_m} = \frac{k a_w}{(1 - a_w)(1 - a_w + k a_w)}$	BET ⁽²⁾ (1938)
$a_w = \exp\left(k_1 - \frac{k_2}{X_e^2}\right)$	Harkins-Jura (1944)
$a_w = \exp\left[-\frac{k_1}{RT} \left(\frac{X_e}{X_m}\right)^{k_2}\right]$	Halsey (1948)
$1 - a_w = \exp\left[-(k_1 T X_e)^{k_2}\right]$	Henderson (1952)
$\frac{X_e}{X_m} = \frac{k a_w}{1 + (k - 1) a_w} \frac{1 - a_w^n}{1 - a_w}$	Rounsley (1961)
$\ln a_w = -\frac{k_1}{RT} \exp(-k a_w)$	Chung and Pfost (1967)

⁽¹⁾ k, k₁, k₂ e n são parâmetros empíricos; X_m é o conteúdo de umidade equivalente para uma monocamada e a_w é a atividade de água.

⁽²⁾ BRUNAUER, S. E.; EMMETT, B. H.; TELLER, E.

2.3.5.1. O modelo matemático de GAB

Vários modelos empíricos e semi-empíricos têm sido propostos para descrever matematicamente a relação entre o conteúdo de umidade de equilíbrio com a atividade de água de produtos alimentícios (BOQUET, CHIRIFE e IGLESIAS, 1978; BOQUET, CHIRIFE e

IGLESIAS, 1979; TOLEDO, 1991). Dentre eles, o modelo tri-paramétrico de GAB (Guggenheim, Anderson, de Boer) tem sido utilizado em vários alimentos com bons resultados e sua equação representativa é recomendada pelo projeto Europeu COST'90 sobre propriedades físicas de alimentos (WOLF *et al.*, 1984; MAROULIS, TSAMI, MARINOS-KOURIS, 1988; FARIA e ROCHA, 1997).

A equação GAB, aplicável na faixa de $0 < a_w < 0,90$ é escrita normalmente na forma,

$$X = \frac{X_m C K a_w}{[(1 - K a_w)(1 - K a_w + C K a_w)]} \quad (16)$$

onde X representa o conteúdo de umidade de equilíbrio do material em base seca; e X_m , C e K são constantes características; a primeira correspondente ao teor de umidade na monocamada e as demais estão relacionadas a efeitos térmicos de sorção na monocamada e na multicamada, respectivamente (MYHARA, TAYLOR e AL-BULUSHI, 1996). As constantes C e K são expressas pelas relações:

$$C = C_0 \exp C_1 = C_0 \exp\left(\frac{\Delta H_c}{RT}\right) \quad (17)$$

$$K = K_0 \exp K_1 = K_0 \exp\left(\frac{\Delta H_k}{RT}\right) \quad (18)$$

nas quais T é a temperatura absoluta e R representa a constante universal dos gases¹, sendo ΔH_c e ΔH_k funções do calor de sorção dadas por,

$$\Delta H_c = H_m - H_n \quad (19)$$

$$\Delta H_k = H_1 - H_n \quad (20)$$

onde H_m e H_n são os calores de sorção da monocamada e da multicamada, respectivamente. H_1 representa o calor de condensação do vapor d'água pura.

De acordo com CHIRIFE *et al.* (1992), a equação da isoterma de GAB é uma extensão do modelo bi-paramétrico de BET (Brunauer, Emmett, Teller), considerando as modificações das propriedades do sorbato na região de multicamada, através da introdução do terceiro parâmetro, K. Segundo MAROULIS, TSAMI, MARINOS-KOURIS (1988), os melhores ajustes a dados experimentais para alimentos, têm sido obtidos a partir de uma regressão não-linear da Equação 16.

¹ R = 8,314 J/mol.K



2.3.6 Calor isostérico de sorção

A influência que a temperatura exerce sobre a atividade de água dos alimentos, para um dado teor de umidade, pode ser descrita pela equação de Clausius-Clapeyron, na forma:

$$\frac{d \ln a_w}{d(1/T)} = -\frac{q_{st}}{R} \quad (21)$$

Segundo TSAMI (1991), dos métodos existentes para se avaliar o calor isostérico líquido de sorção (q_{st}), o que requer o conhecimento das isotermas de sorção é o mais preciso, quando utilizado em combinação com a equação de Clausius-Clapeyron, para a solução gráfica da Equação 21. O calor isostérico integral de sorção pode ser estimado através da Equação (22),

$$Q_{st} = q_{st} + \Delta H_v \quad (22)$$

onde ΔH_v é a entalpia de vaporização da água, em função da temperatura.

Este procedimento é utilizado por vários pesquisadores no cálculo dos calores isotéricos de sorção para produtos biológicos (SANCHES, *et al.* 1996; PARK, *et al.* 1996; MAROULIS, TSAMI, MARINOS-KOURIS, 1988; AYROSA e PITOMBO, 1996; SUÁREZ, AGUERRE, VIOLLAZ, 1983). Em trabalhos recentes utilizando esta metodologia, FARIA, ROCHA e COSTA (1998) e COSTA, FARIA e MAIA (1998), analisaram o comportamento termodinâmico de sementes de urucum (*Bixa orellana* L.) e pimenta longa (*Piper hispidinervium* C. DC.) durante o processo de dessorção de umidade, respectivamente.

A solução da Equação 21, pode ser obtida graficando-se valores de $\ln a_w$ contra $1/T$, onde os valores do calor isostérico líquido de sorção são calculados com base no coeficiente angular das retas geradas para cada valor constante de umidade das amostras. Os calores isostéricos integrais de sorção podem ser calculados pela Equação 22 considerando a entalpia de vaporização da água na temperatura média de trabalho.

Os calores isostéricos de sorção de umidade para as sementes de urucum, em função da temperatura, podem também ser calculados através da integração da equação de Clausius-Clapeyron (VAN DEN BERG e BRUIN, 1981), resultando em:

$$\ln \left(\frac{a_{w_1}}{a_{w_2}} \right) = -\frac{q_{st}}{R} \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_2} \right) \quad (23)$$

Os valores de a_{w_1} e a_{w_2} para T_1 e T_2 , são determinados através das isotermas de dessorção obtidas experimentalmente.

2.3.7 Determinação experimental de isotermas de sorção

As isotermas de sorção consistem na representação gráfica da umidade relativa de equilíbrio, ou da pressão parcial de vapor de um produto, em função de seu teor de umidade à uma determinada temperatura.

Existem na literatura vários métodos analíticos que permitem o levantamento desse histórico de relações entre a umidade relativa e o teor de umidade de um produto, sempre em condições de temperatura constante. Para efeito de simplificação, TEIXEIRA NETO (1987) divide esses métodos, segundo o princípio de medição, em duas categorias: a) Métodos onde se mede a pressão parcial de vapor, ou umidade relativa de equilíbrio, de amostras do produto com teor de umidade previamente conhecido; e b) Métodos onde se mede o teor de umidade do produto em situação de equilíbrio a diferentes umidades relativas. KNEULE (1976), classifica esta última categoria como métodos de aproximação gravimétrica, podendo ser estático ou dinâmico.

Enquadram-se na primeira categoria de métodos, aqueles em que a pressão parcial de vapor do produto é medida manometricamente, ou aqueles em que a umidade relativa de equilíbrio é medida diretamente por sensores (higrômetro elétrico, célula de ponto de orvalho, psicrômetro, higrômetro de cabelo).

Na segunda categoria de métodos estão aqueles em que se efetua a determinação do teor de umidade das amostras após o equilíbrio, geralmente, gravimetricamente (método estático). Nestes casos, os ambientes com diferentes umidades relativas para equilíbrio das amostras são preparados em dessecadores ou frascos herméticos. A umidade relativa do ambiente pode ser dada por diferentes tipos de soluções salinas, ácido sulfúrico em várias concentrações, ou por outras substâncias, como glicerol. Dá-se geralmente preferência às soluções saturadas de sais, uma vez que permitem a manutenção da umidade relativa constante com maior facilidade, pois mesmo que absorvam ou percam umidade, a umidade relativa do ambiente não se altera, desde que as soluções ainda estejam saturadas.

Existem na literatura dados de umidade relativa em função da temperatura para várias soluções saturadas de sais, destacando-se os trabalhos de GREENSPAN (1977), YOUNG (1967), WEXLER e HASEGAWA (1954) e KITIC *et al.* (1986). Detalhes sobre a preparação de soluções salinas saturadas e de soluções de ácido sulfúrico, para serem utilizadas inclusive como padrões na calibração de instrumentos de medida de atividade de água, são fornecidos por JARDIM (1987).

Embora o método dos dessecadores seja muito trabalhoso e demorado, devido à simplicidade do instrumental que exige e, principalmente, à reprodutibilidade dos resultados que fornece quando adequadamente utilizado, é bastante comum na prática. Este método consiste em se colocar pequenas quantidades de amostras do produto em análise num recipiente (dessecador ou similar), no interior do qual, a umidade do ar e a temperatura se mantêm constantes. Quando se estabelece o equilíbrio, após certo intervalo de tempo, entre o conteúdo de umidade da amostra

e o ambiente do recinto onde se encontra, a massa da amostra deixa de variar. Determina-se então o teor de umidade da amostra e se obtêm, dessa forma, um ponto da isoterma de sorção (PENA, 1994).

À temperatura ambiente e para umidades do ar elevadas (acima de 85%), os tempos para se atingir o equilíbrio são altos, podendo chegar a várias semanas. Nestas condições, para produtos biológicos, ocorrem modificações de estrutura e aparecimento de mofo, antes que seja alcançado o estado de equilíbrio. Visando diminuir a duração do ensaio, tem-se proposto métodos dinâmicos de fluxo contínuo. O método dinâmico consiste essencialmente em forçar o ar, com umidade relativa e temperatura controladas, a passar pela amostra até que não ocorra variação de massa da mesma. Dessa forma, se atinge o estado de equilíbrio higroscópico num período de tempo inferior àquele necessário quando se utiliza o método estático (dessecadores), nas mesmas condições de temperatura e umidade relativa (KNEULE, 1976; STRUMILLO e KUDRA, 1986).

No método dinâmico descrito por KNEULE (1976), em vez de ar, se opera com uma corrente de gás inerte, para se evitar influências oxidantes, conforme o esquema representado na figura 27. Uma corrente de nitrogênio, procedente de um recipiente pressurizado, **a**, se dirige com o auxílio de um distribuidor, **b**, a diversos frascos de lavagem, **c**, contendo soluções salinas saturadas. Devido aos tubos de vidros porosos destes frascos, se chega a alcançar uma distribuição a mais fina possível, de forma que se mantenha a porcentagem de umidade correspondente a cada solução salina. O balão de vidro, **d**, serve de recipiente estabilizador, no qual podem se depositar as gotas de líquido suscetíveis de serem arrastadas eventualmente. A amostra do produto examinado se encontra no tubo em U, **e**.

Um método dinâmico similar é apresentado por STRUMILLO e KUDRA (1986), no qual o fluxo de ar com umidade controlada pode ser obtido borbulhando-o em soluções salinas saturadas, ou através da mistura do ar saturado com uma corrente de ar seco. Uma aplicação recente deste método é realizada por ESPINOSA, CUBILLO e MARTÍNEZ (1998), na obtenção de isotermas de dessorção sementes de *Azadirachta indica* A. Juss.



Figura 27. Determinação de isotermas de sorção, com gás inerte, por método dinâmico

2.4. PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS E METODOLOGIA DE SUPERFÍCIES DE RESPOSTA

Um experimento constitui-se numa série de testes nos quais são realizados propositalmente variações nos parâmetros de controle do processo ou de uma operação industrial, com o objetivo de observar e identificar as variações na resposta. Assim, segundo CARPINETTI (1996), através de experimentos estatisticamente planejados, pode-se determinar:

- quais as variáveis, ou fatores, do processo são mais influentes no(s) parâmetro(s) de resposta de interesse, o qual se constitui na variável dependente ou item de controle;
- os níveis de ajuste das variáveis do processo influentes na resposta, de modo que a variabilidade do parâmetro de resposta seja mínimo;
- os níveis de ajuste das variáveis influentes do processo, de modo que o valor do resultado seja próximo do valor nominal;
- os níveis de ajuste das variáveis influentes na resposta, de modo que o efeito das variáveis não controláveis¹ seja reduzido.

Vários exemplos podem ser encontrados na literatura sobre as melhores combinações entre variáveis e seus níveis, visando a otimização do processo ou da qualidade dos produtos (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978; AKHNAZAROVA e KAFAROV, 1982; MONTGOMERY, 1991; CLARKE e KEMPSON, 1997; BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS, 1995; MANSON, GUNST e HESS, 1989). Duas das técnicas usuais no planejamento, ou organização dos experimentos, são os Experimentos Fatoriais e os Experimentos Fatoriais Fracionários. Para a análise dos dados, usa-se geralmente os Testes de Hipótese e o quadro de análise de variância (ANOVA)².

Os experimentos fatoriais são especialmente utilizados quando se deseja estudar o efeito na variável de resposta, da combinação de vários fatores de controle. Um caso de projeto fatorial é o 2^k , onde k representa o número de variáveis, ou fatores, e o 2 o número de níveis, ou valores e qualidade que estas k variáveis podem assumir. No caso de projetos fatoriais completos exigirem um grande número de combinações de testes experimentais, utiliza-se os projetos fatoriais fracionários, onde são desprezados os efeitos de mais alta ordem, que, na prática, não influenciam significativamente a variável de resposta, podendo então ser descartados, diminuindo consideravelmente o número de experimentos, o que é desejável economicamente.

Os experimentos fracionários, de acordo com BOX, HUNTER e HUNTER (1978) e WERKEMA e AGUIAR (1996), são muito empregados nos estágios iniciais de experimentação, quando há um número muito grande de fatores a serem pesquisados; sendo portanto, desejável avaliar, de forma mais superficial e com o mínimo de tempo e custos, os efeitos de um considerável número de fatores sobre a variável de resposta. Neste tipo de situação, é freqüente que apenas alguns fatores exerçam efeitos significativos sobre a resposta. Dessa forma, o objetivo

¹ definida como covariável (“covariate”) em MANSON, GUNST E HESS (1989).

² um acrônimo de “Analysis of Variance”

principal do experimento é a identificação destes fatores, os quais devem ser analisados de forma mais detalhada nas etapas seguintes do estudo, visando determinar a condição ótima do processo, que conduza à obtenção de um valor ideal para a variável de resposta.

Uma das técnicas de otimização muito utilizada é a metodologia de superfícies de resposta (MSR)², a qual baseia-se no emprego de planejamentos fatoriais e tem sido utilizada na modelagem de muitos processos tecnológicos e industriais (BOX e DRAPER, 1987; KHURI e CORNELL, 1987).

A metodologia de superfícies de resposta consiste de um grupo de técnicas usadas no estudo empírico de relações entre uma ou mais variáveis de entrada e a resposta (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978). É uma técnica de otimização baseada no emprego de planejamentos fatoriais, estabelecida inicialmente por BOX e WILSON (1951), e utilizada desde então com sucesso na modelagem de diversos processos químicos (BRUNHARA, BRUNS e KIECKBUSH, 1996; CHUNG *et al.*, 1996; ANDRADE, ROCHA Filho e TAQUEDA, 1998; TAQUEDA, COSTA e FARIA, 1998; COSTA e FARIA, 1998).

De acordo com MONTGOMERY (1991), este conjunto de técnicas matemáticas e estatísticas, são úteis para a modelagem de problemas nos quais a resposta a ser otimizada é influenciada por várias variáveis. A superfície de resposta constitui-se na representação geométrica obtida quando a variável dependente é graficada em função de uma ou mais variáveis de entrada quantitativas. Considerando-se que n funções matemáticas, f_k ($k = 1, 2 \dots n$) existem para cada uma das variáveis de resposta, y_k , em termos de m variáveis de entrada, ξ_i ($i = 1, 2 \dots m$), representadas por:

$$y_k = f_k (\xi_1, \xi_2, \dots \xi_m) \quad (24)$$

onde $\xi_1, \xi_2, \xi_3 \dots \xi_m$ denotam as variáveis independentes, ou fatores, de interesse.

A exata representação matemática desta função (f_k) é desconhecida ou muito complexa. Entretanto, esta função pode ser representada por um polinômio de segundo grau ou modelo quadrático, na forma da Equação 25, como uma aproximação da verdadeira função f_k , geralmente para que seja possível a obtenção de uma estimativa mais precisa da condição ideal de operação de um processo,

$$y_k = b_{k0} + \sum_{i=1}^k b_{ki} x_i + \sum_{i=1}^k b_{kii} x_i^2 + \sum_{i=1}^{k-1} \sum_{j=i+1}^k b_{kij} x_i x_j + e \quad (25)$$

onde b_{k0} , b_{ki} , b_{kii} e b_{kij} representam os coeficientes de regressão constantes e x_i , ($i = 1, 2, \dots, k$), são as variáveis independentes codificadas, relacionadas linearmente a ξ_i conforme Equação 26,

² ou RSM, sigla em Inglês para "Response Surfaces Methodology"

$$x_i = \frac{\xi_i - \xi_i^o}{d_i} \quad (26)$$

na qual ξ_i é o valor real da variável de entrada em unidades originais, ξ_i^o o valor central¹ em unidades originais, e d_i representa a metade diferença entre os valores dos níveis baixo e alto de ξ_i . O termo ϵ_i constitui-se num componente de erro aleatório.

Os projetos compostos, os quais consistem de projetos fatoriais completos ou de uma fração do projeto fatorial, são detalhados em BOX e DRAPER (1987) e em KHURI e CORNELL (1987).

As formas mais frequentes das superfícies de resposta dadas por modelos polinomiais de segunda ordem, estão ilustrados em BOX, HUNTER e HUNTER (1978). A identificação do tipo de superfície e da condição ótima de operação do processo pode ser obtida através do procedimento conhecido como análise canônica, que transforma o modelo quadrático em um novo sistema de coordenadas. A metodologia utilizada na redução de modelos quadráticos para a forma canônica visando a otimização de problemas está descrita em COCHRAN e COX (1957), AKHNAZAROVA e KAFAROV (1982) e em MONTGOMERY (1991).

O projeto de engenharia e a eficiente operação dos equipamentos e do processo de secagem são geralmente baseados em experimentos em planta piloto com o material em estudo, numa certa faixa de condições operacionais.

Segundo RAOUZEOS e SARAVACOS (1984), no método clássico de experimentos, os parâmetros (variáveis independentes) de um processo de secagem são variados um de cada vez, mantendo-se os demais constantes, sendo a correspondente resposta (variável dependente) estimada por um método de medidas adequado. Essa abordagem apresenta a desvantagem de requerer grande número de ensaios experimentais no caso de experimentos multivariados, além de apresentar limitações nas conclusões, em consequência dos efeitos e de possíveis interações de vários parâmetros.

O planejamento estatístico de experimentos e a análise de variância proporcionam um vantajoso método para avaliação dos efeitos e interações das variáveis operacionais mais importantes do processo de secagem de vários materiais. A metodologia de superfícies de resposta é comumente empregada na análise de dados experimentais de secagem, resultando na otimização do processo.

Uma aplicação destas técnicas na compreensão dos fenômenos de transferência de massa que ocorrem na desidratação osmótica em soluções concentradas, foi realizada por SAUREL *et al.* (1994a) utilizando tecidos de maçãs frescas, empregando metodologia de superfícies de resposta. O estudo foi completado em SAUREL *et al.* (1994b) para o caso de tecidos congelados de maçãs, utilizando o mesmo procedimento estatístico.

¹ média entre os valores do nível baixo e do nível alto da variável original ξ_i .

GUERRERO, ALZAMORA E GERSCHENSON (1996) otimizaram um processo de preservação da qualidade de purê de banana baseado nas superfícies de resposta, visando minimizar as mudanças na coloração durante a armazenagem do produto por até 4 meses. Através de um modelo polinomial de segunda ordem, foi possível estabelecer os valores ótimos das variáveis operacionais de entrada (concentração de bissulfito de sódio, temperatura de armazenamento e tratamento térmico após embalagem) para a manutenção da qualidade do produto final.

As técnicas de planejamento fatorial e metodologia de superfícies de resposta têm sido empregadas para a otimizar a operação de secagem, minimizando o número de experimentos, em sua maioria trabalhosos e dispendiosos, permitindo a otimização do processo e melhorando a qualidade dos produtos finais.

As citações a seguir exemplificam alguns trabalhos sobre a aplicação da análise estatística em processos de secagem visando sua otimização, e obedecem a sequência:

autor (ano)

biomaterial secado

resumo

RAOUZEOS e SARAVACOS (1984)

Geléia de amido (amido de milho e glucose)

Utilizaram dois projetos fatoriais completos, sendo um 3^3 (sem glucose) e outro 3^4 (com todas as variáveis iniciais), totalizando 54 e 93 corridas, respectivamente. As variáveis iniciais e suas respectivas faixas de variação foram: temperatura, T (30°C - 50°C); conteúdo de umidade inicial, Xi (81%bu - 91%bu); espessura da amostra, L (2mm - 6mm) e conteúdo de glucose, C (0 %sólidos - 50 %sólidos). A variável de resposta estudada foi o tempo de secagem necessário para a amostra atingir conteúdo de umidade final igual a 30%bu. O processo foi conduzido em túnel de secagem em escala de laboratório (leito fixo), com a velocidade do ar mantida a 2m/s, sendo a perda de massa do material medida continuamente em balança acoplada ao sistema de secagem. Foram propostos dois modelos polinomiais para o tempo, um para cada projeto fatorial, em função das variáveis significativas. A análise de variância para os dados experimentais demonstrou a ordem de significância dos efeitos principais (L, T, C, Xi), revelou a influência das interações binárias (TL, XiL, CL, CT, TXi), e que as interações de ordem superior não possuíam significância estatística. A aplicação de análise de regressão resultou na obtenção de dois polinômios (um para cada projeto) os quais podem ser usados para estimar o tempo de secagem em função dos efeitos correspondentes (principais e interações) estatisticamente significativos.

ZAKHIA, BOHUON e COLLIGNAN (1995)

Peixe (tilápia)

A modelagem da cinética de secagem de peixe usando uma combinação de metodologia de superfícies de resposta e modelos difusionais, foi desenvolvida através de um projeto composto

central de 3 fatores e 5 níveis (com 3 repetições no ponto central) totalizando 17 corridas experimentais. As variáveis independentes e seus valores extremos foram: temperatura de secagem (38°C - 70°C); umidade relativa (15% - 55%) e velocidade do ar de secagem (1,1m/s - 3,5m/s). As variáveis dependentes foram: tempo de secagem para a amostra atingir uma umidade final igual a 15,8 %bu; coeficiente de difusão aparente e coeficiente convectivo de transporte de massa. Utilizaram um secador convectivo de leito fixo com controle efetivo das variáveis operacionais. A perda de massa era determinada continuamente em balança de precisão 0,1g, sendo os dados transmitidos para um computador de processo. A cinética da secagem foi expressa em termos da taxa de secagem *versus* conteúdo de umidade. O modelo polinomial resultante do projeto experimental descreve adequadamente os efeitos no tempo de secagem e no coeficiente aparente de difusão em diferentes condições de secagem, predizendo com boa aproximação os dados experimentais dentro da faixa estudada. Concluíram que a combinação das duas metodologias (modelo difusional e metodologia de superfícies de resposta) fornecem um bom método de predição de tempos de secagem.

MADAMBA (1997)

Alho

Visando a otimização do processo de secagem de fatias de alho em camada delgada, realizou um projeto composto central de 4 fatores e 2 níveis (com 3 repetições no ponto central) totalizando 27 corridas experimentais. As variáveis iniciais utilizadas e suas respectivas faixas foram: temperatura, T (50°C - 90°C); umidade relativa, UR (8% - 24%); velocidade do ar, v (0,5m/s - 1,0m/s) e espessura do material, L (2mm - 4 mm). As variáveis de resposta foram: valor CIE¹; índice óptico (IO); razão de reidratação (RR) e conteúdo de umidade final (Xf), como importantes atributos de qualidade do produto desidratado. Com o intuito de encontrar as condições ótimas de secagem, utilizou a metodologia de superfícies de resposta e propôs um modelo polinomial de segunda ordem, o qual foi estatisticamente significativo para CIE e IO, enquanto que os modelos para RR e Xf demonstraram não ter influência. Verificou que as condições ótimas de secagem foram obtidas para 70°C e material com 2mm de espessura, com os valores preditos próximos dos valores experimentais das respostas. A análise de variância revelou que T e L afetaram significativamente (ao nível de 90% de confiança) CIE, IO e RR. Concluiu que os efeitos das variáveis v, UR não foram estatisticamente significativos.

ASOTA (1997)

Soja

Estudou a qualidade mecânica de duas variedades de soja em relação a parâmetros de secagem, utilizando 2 projetos compostos centrais ortogonais em 2 blocos cada, 5 níveis (com 16

¹ Commission Internationale de l'Eclairage: sistema padronizado de medição e especificação de cor, baseado em triestímulos (tom, croma e luminosidade).

repetições no ponto central), totalizando 32 corridas experimentais. Com o objetivo de reduzir o conteúdo de umidade de 20%bu para 10%bu, utilizou secador de leito fixo, sendo o material disposto em cesto telado com aproximadamente 5cm de altura. As variáveis independentes e respectivos limites para os dois blocos foram: temperatura (48°C - 164°C) e tempo de secagem (26h - 94h). A variável dependente foi a percentagem de quebra (teste de resistência mecânica à compressão). Através de modelos polinomiais obtidos por meio da metodologia de superfícies de resposta, concluiu que as características mecânicas da soja são afetadas significativamente pela temperatura e tempo de secagem e que a soja com características mecânicas aceitáveis, pode ser obtida após a secagem na faixa de 50°C a 80°C para tempos de secagem inferiores a 10h, ou para secagem abaixo de 50°C e tempos superiores a 60h.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 MATÉRIA PRIMA

3.1.1 Identificação e Procedência

A escolha das amostras do material em estudo recai em sementes oriundas de plantações racionais de um mesmo local, que tenham recebido os mesmos tratos culturais e que sejam comprovadamente do mesmo tipo cultivar, para com isto minimizar a influência desses fatores na concentração inicial de bixina, visando ter-se um material mais homogêneo em termos dessa concentração e especificamente caracterizado.

A matéria prima utilizada são sementes de urucum (*Bixa Orellana* L.), tipo cultivar Piave Vermelha, fornecidas pela empresa Agroindustrial Biotropical Ltda. do Grupo dinamarquês CHR HANSEN, sediada no município paraense da Zona Bragantina, São Francisco do Pará, nordeste do Estado, a qual possui uma fazenda de cultivo racional de urucuzeiros e atua nas áreas de produção e exportação de grãos e corantes de urucum e fornece material para extração de corantes às indústrias processadoras da região sudeste brasileira.

A cultivar utilizada neste trabalho, proveniente da Fazenda Ahitê¹ da referida empresa, é plantada com espaçamento 7x3m e 7x2,5m com adubação quadrimestral usando 150g de monofosfato de amônio e 100g de cloreto de potássio, sendo adicionado 200g de calcário dolomítico a cada 3 anos.

Com relação aos tratos culturais, é realizada uma poda a cada 2 anos, retirada de “erva de passarinho” duas vezes por ano, limpeza (roça mecânica) três vezes por ano, roçadas manuais duas vezes por ano, aplicação de herbicidas (mecânica e manual) uma vez por ano e eventualmente controle de pragas e doenças (OLIVEIRA, 1998).

A distribuição mensal da produção de urucum na referida fazenda é apresentada na Tabela 18, na qual observa-se um maior volume de colheita na época da estiagem, compreendida entre junho e novembro na zona Bragantina do Estado do Pará, avaliada no período de 1989 a 1997.

As sementes utilizadas neste trabalho foram colhidas nas safras do segundo semestre de 1996 e 1997, mais precisamente nos meses de agosto e outubro, respectivamente.

¹ Urucum, na língua dos índios Parecis (ANDRADE, 1926).

Tabela 18. Distribuição da produção de urucum na Fazenda Ahitê

Meses	Produção (%)
Junho	15,5
Julho	11,9
Agosto	16,6
Setembro	6,5
Outubro	15,9
Novembro	12,3
Dezembro	8,5
Janeiro	2,0
Fevereiro	1,0
Março	0,9
Abril	3,1
Mai	5,8

Fonte: Agroindustrial Biotropical Ltda.

De acordo com OLIVEIRA (1998) o tipo cultivar Piave Vermelha representa cerca de 15% da produção da fazenda, ocupando uma área plantada de 135 ha.

3.1.2. Caracterização Química

Foram realizadas algumas análises químicas para se determinar a composição centesimal dos principais componentes das sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha, efetuadas por métodos padronizados. O conteúdo de umidade, proteínas, cinzas e lipídios, são baseados nos métodos analíticos do Instituto Adolfo Lutz. O teor de carboidratos é estimado por diferenças, e a concentração de bixina pelo método do KOH descrito neste capítulo no item 3.2.3. As análises efetuadas e as referências metodológicas estão indicadas na Tabela 19.

Tabela 19. Análises químicas, métodos e referências.

Análise	Referência
Umidade	Aquecimento direto em estufa a 105°C. Norma Analítica 4.5.1 (INSTITUTO Adolfo Lutz, 1985).
Proteína	Método Kjeldahl (N x 6,25). Norma Analítica 4.12 (INSTITUTO Adolfo Lutz, 1985).
Cinzas	Resíduo por incineração em mufla a 550°C. Norma Analítica 4.6 (INSTITUTO Adolfo Lutz, 1985).
Lipídios	Extração por solvente em aparelho Soxhlet. Norma Analítica 4.10 (INSTITUTO Adolfo Lutz, 1985).

3.1.3. Operações de pré-processamento

Os experimentos foram realizados com sementes de urucum adequadamente colhidas e por ocasião da safra do produto (ver Tabela 18), dentro da metodologia adotada pelo sistema de produção.

As sementes chegaram ao laboratório em sacos de 30 kg dentro de 24 horas após a colheita, sem terem recebido qualquer pré-tratamento, a não ser o descachopamento (retirada mecânica das cápsulas) e leve aeração. Foram então submetidas aos processos de limpeza e classificação, utilizando-se aeração, peneiramento e inspeção visual. Após isso, foram acondicionadas em sacos de 2 kg de papel Kraft, envolvidas em sacos plásticos e armazenadas em freezer a -5°C e 85% de umidade relativa, para posterior processamento.

Para a primeira fase dos experimentos, conforme o planejamento fatorial fracionário, as amostras sofreram pré-secagem de 40 minutos a 60°C e vazão do ar de secagem de 36×10^{-3} kg/s, com o objetivo de simular diferentes níveis para a variável teor inicial de umidade das sementes. Através deste procedimento, conseguia-se os níveis mais baixos do conteúdo de umidade de entrada das sementes *in natura*.

3.1.4. Análises Preliminares

Do material recebido são retiradas amostras, em triplicatas, para as análises preliminares de teor de umidade e conteúdo de bixina, realizados pelo método da estufa a $105^{\circ}\text{C} \pm 1^{\circ}\text{C}$ por 24h e pelo método do KOH, respectivamente. Tais procedimentos visam estabelecer apenas um controle do material recebido do produtor, com o intuito de manter-se a homogeneidade e a qualidade da matéria prima. Com o objetivo de se verificar a influência das condições da armazenagem prévia das sementes de urucum no comportamento da secagem, foram realizados alguns ensaios com as sementes *in natura*, nas mesmas condições operacionais das corridas experimentais estabelecidas pelo planejamento estatístico, não havendo diferenças significativas entre os comportamentos característicos das curvas de secagem obtidas.

3.1.5 Caracterização Física

O conhecimento das propriedades termofísicas das sementes utilizadas é fundamental para o estudo deste material, principalmente na modelagem do processo de secagem. Como informação complementar deste estudo, são determinadas experimentalmente as seguintes propriedades: massas específicas aparente e real, diâmetro, esfericidade e capacidade calorífica, como também a porosidade do leito de sementes.

Os métodos empregados na medida de cada propriedade de interesse e as respectivas referências, estão indicados na Tabela 20.

Tabela 20. Propriedades termofísicas do urucum, métodos e referências

Propriedade	Método	Referência
Diâmetro médio	Técnica de Peneiramento	McCABE; SMITH; HARRIOTT (1993)
Esfericidade	Razão entre diâmetros dos círculos inscritos e circunscritos ao contorno da projeção da partícula.	PEÇANHA e MASSARANI (1986)
Massa específica aparente	Picnometria	KEEY (1992)
Massa específica real	Picnometria de comparação (tolueno)	KEEY (1992)
Porosidade do leito	Relação entre massas específicas real e aparente	KEEY (1992)
Capacidade calorífica	Misturas calorimétricas	ALVARADO e MORENO (1987)

O diâmetro foi estimado como o diâmetro médio de Sauter, considerando-se o diâmetro da partícula (sementes de urucum) igual ao diâmetro médio de abertura das malhas das peneiras do sistema padrão Tyler, conforme a metodologia de análise granulométrica por peneiramento.

3.2. MEDIDAS EXPERIMENTAIS NO PROCESSO DE SECAGEM

3.2.1 Determinação das massas e temperaturas das sementes

As massas das sementes a serem processadas, são determinadas experimentalmente em balança eletrônica Gehaka - modelo BG 8000 com precisão de 0,1g. Suas temperaturas antes e depois da secagem, são medidas calorimetricamente em bulbo térmico isolado, contendo um sensor tipo K, com indicador de temperatura em °C modelo Salvterm 700K-Salcas. A massa de sólido seco, após a secagem em leito fixo, necessário ao cálculo dos teores de umidade e de taxa de secagem em base seca, é determinada diretamente em estufa com circulação de ar forçada, a $105 \pm 1^\circ\text{C}$ por 24 horas. Utiliza-se a estufa secadora-esterilizadora Fabbe com regulador de temperatura, estável na faixa de 80 a 200°C .

3.2.2 Determinação da vazão mássica do ar de entrada

A determinação da vazão mássica do ar de entrada no leito é obtida conhecendo-se as velocidades do escoamento de ar no tubo de acoplagem do leito de vidro à unidade básica de secagem através da medida com tubo de Pitot (ver Figura 37). Após a verificação do perfil de velocidade do ar na seção transversal do tubo, para cada condição experimental, fixa-se o tubo de

Pitot na região indicativa da velocidade média do escoamento. As velocidades médias do ar (v_g) são obtidas diretamente através da leitura da diferença de pressão (ΔP) dadas em mm H₂O, pelo micromanômetro MDC FC001 - Fuerness controls Ltda - England, escalas variáveis de -30 a 30 mmH₂O e -100 a 100 mmH₂O, conforme metodologia recomendada em CHEREMISINOFF (1979) e MUNSON, YOUNG, OKIISHI (1997), utilizando a equação:

$$v_g = \sqrt{\frac{2\Delta P}{\rho_g}} \quad (27)$$

De acordo com a distância entre a redução gradual da seção quadrada para a circular e a localização do tubo de Pitot, estaríamos ainda no limite da região de entrada, conforme a Equação 28 para o adimensional de comprimento de entrada (MUNSON, YOUNG e OKIISHI, 1997):

$$\frac{L_e}{D} = 4,4(Re)^{1/6} \quad (28)$$

A faixa para o comprimento de entrada com os dados experimentais deste trabalho é de 1,41 a 1,85m para as vazões de 0,007 e 0,036 kg/s, respectivamente. Verifica-se que com os valores fornecidos pela Equação 28 não se atinge a região de escoamento plenamente desenvolvido, para o qual a velocidade do ar seria função apenas do raio do tubo, pois a distância da redução gradual ao ponto de medida de velocidades é de apenas 70cm. Contudo, pelo perfil de velocidade experimental obtido, constata-se a eficiência do direcionador de fluxo colocado no tubo de acoplamento à saída da redução gradual, conforme ilustrado na Figura 30.

A determinação da vazão mássica é realizada por meio da equação

$$G = \rho_g v_g S \quad (29)$$

onde S é a área da seção circular perpendicular ao fluxo e ρ_g , dado pela Equação 30, representa a massa específica do ar úmido em função do volume específico (v_h) e da razão de umidade do ar (Y), estimadas numericamente através das subrotinas de cálculo de propriedades psicrométricas do ar úmido *Psi.bas* e *Winpsi*, desenvolvidos respectivamente por FARIA (1986) e PENNA Jr. (1994), para cada ponto de estado, dado pelas leituras de T_s e T_u fornecidas por psicrômetros instalados à entrada e saída do leito de sementes (ver Figuras 32 e 33).

$$\rho_g = \frac{1+Y}{v_h} \quad (30)$$

3.2.3. Métodos de Análise de Bixina

Com o objetivo de se padronizar no país uma metodologia de análise das sementes de urucum, foi criado um grupo de estudos durante o I Seminário de Corantes Naturais para

Alimentos¹, que conseguiu uniformizar as metodologias existentes e apresentar os resultados no II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos². Foram então estabelecidos dois métodos para a determinação do teor de bixina em grãos de urucum: Método do Clorofórmio e Método do KOH. O primeiro método utiliza clorofórmio em sementes moídas e o segundo utiliza solução de KOH em sementes inteiras, conforme descrição a seguir:

Método do KOH

Pesar com precisão de mg, cerca de 25g de amostra em um erlenmeyer de 500mL. Adicionar 150mL de solução de KOH a 5% fervente. Aquecer até ebulição mantendo-a por um minuto. Esfriar em água corrente. Filtrar através de lã de vidro para um balão volumétrico de 1000mL e lavar o resíduo com 100 mL de água destilada. Repetir o processo de lavagem por mais sete vezes. Completar o volume com água destilada. Retirar uma alíquota de 2mL desta solução e transferir para um balão volumétrico de 1000mL, completando-o com solução de KOH a 0,5%. Fazer a leitura em espectrofotômetro a 453nm, em célula de 1 cm de percurso óptico, usando como branco a solução de KOH a 0,5%.

A concentração de norbixina é encontrada usando o coeficiente específico de extinção:

$$E_{1\text{cm}}^{1\%} = 3473$$

O teor de norbixina encontrado multiplicado pelo fator 1,037 é igual ao teor de bixina na amostra.

Método do Clorofórmio:

Amostrar 100g de sementes e moer em um moinho de facas ou equivalente. Pesar com precisão de mg, cerca de 2g da semente moída e transferir para um erlenmeyer de 300 mL. Adicionar 100 mL de clorofórmio e agitar vigorosamente durante 3 minutos. Filtrar através de lã de vidro, recebendo o filtrado em balão volumétrico de 250 mL. Retornar o resíduo e a lã de vidro e reextrair com 50 mL de clorofórmio. Filtrar através de lã de vidro, recebendo o filtrado no mesmo balão volumétrico. Repetir o procedimento de extração com mais 50 e 30 mL de clorofórmio ou até a completa extração dos pigmentos. Completar o volume com clorofórmio. Retirar uma alíquota de 10 mL e diluir com clorofórmio em balão volumétrico de 100 mL.

Traçar o espectro de absorvância de 350 a 550 nm, em espectrofotômetro, em célula de 1 cm de percurso óptico. Fazer a leitura a 470 nm, usando clorofórmio como branco.

A concentração de bixina é encontrada usando:

$$E_{1\text{cm}}^{1\%} = 2826$$

¹ Realizado em Campinas - SP, ITAL, 1988.

² Realizado em Campinas - SP, ITAL, 1991.

É observado por YABIKU e TAKAHASHI (1991) que o método utilizando solução de KOH apresenta sempre resultados inferiores em relação ao método que utiliza clorofórmio. Também foi observado que essa variação entre os dois métodos é constante, sendo, portanto, possível de ser corrigido com a introdução de um fator de correção.

Esse fator de correção foi estabelecido através de análises realizadas por dez laboratórios participantes, a nível nacional, em cinco amostras de sementes de urucum, pelos dois métodos em questão. O fator de correção final foi 1,1601. Assim, deve-se multiplicar por 1,1601 o teor de bixina encontrado pelo método do KOH para se equiparar ao teor de bixina obtido pelo método do clorofórmio.

O método utilizado neste trabalho para a determinação dos teores iniciais e finais de bixina durante o processo de secagem é o método do KOH, pela sua precisão e por necessitar de menor quantidade de amostra.

Para a determinação do conteúdo final de bixina após a secagem em leito fixo, eram coletadas cerca de 60g de sementes ao término de cada corrida experimental para as análises, em duplicatas, dos teores de corantes existentes. Essa massa retirada do leito era proporcionalmente computada em função da umidade perdida pelas sementes remanescentes, na determinação da massa de sólido seco, para não haver descaracterização na obtenção dos dados experimentais. Nos anexos C e D estão tabelados os valores desses teores e a percentagem de degradação sofrida pela bixina durante o processo de secagem em leito fixo.

Verifica-se que os teores de bixina das sementes utilizadas na primeira fase dos experimentos possuía valor mais elevado do que os encontrados na fase final do trabalho. Este fato pode estar relacionado com a época de colheita das sementes, que foram realizadas em diferentes safras, com intervalo de aproximadamente 1 ano entre elas.

O coeficiente de extinção, $E_{1cm}^{1\%}$, é comumente utilizado e corresponde à extinção de 1 % de solução em 1 cm de percurso óptico em um dado comprimento de onda.

A quantidade de bixina em percentagem, em função da absorção lida em espectrofotômetro, pode ser estimada pela Equação 31:

$$B_i (\%) = \frac{Ab f_D V}{m_{SS} E} 1,037 \quad (31)$$

na qual: Ab = absorbância, adim; f_D = fator de diluição (500), adim.; V = volume inicial do extrato (1000mL); E = Coeficiente específico de extinção (3473), adim.; m_{SS} = massa da amostra seca (g); 1,037 = fator de conversão

Na análise da amostra, a concentração de bixina é determinada medindo-se a absorbância, Ab, em cubeta de 1 cm de percurso óptico, levando-se em conta o volume inicial do extrato, V (mL) e todas as diluições efetuadas, para que a leitura da absorbância seja feita no intervalo de 0 a 1. A medida da absorbância é realizada em espectrofotômetro GBC 916 UV/Vis.

3.2.4 Obtenção das Isotermas de Dessorção

As amostras de sementes, para a realização dos ensaios de equilíbrio higroscópico visando a construção das isotermas de dessorção, são retiradas do ambiente sob refrigeração em condições controladas, o qual propicia excelente conservação do material e um teor de umidade inicial adequado para a obtenção experimental dos pontos de equilíbrio, dispensando processos adicionais de reumidificação.

As isotermas de dessorção são determinadas pelo método de aproximação gravimétrica estático, através da exposição das sementes a ambientes com umidades relativas controladas por meio de soluções salinas saturadas, a dadas temperaturas (GAL, 1975; PENA, RIBEIRO e GRANDI; 1995). São utilizados frascos de vidro de 500 mL, contendo 80 mL de soluções saturadas, gerando ambientes com umidades relativas na faixa de 5 a 79%, conforme indicado na Tabela 21.

Tabela 21. Umidades de equilíbrio geradas por soluções aquosas saturadas.

Substâncias	Temperatura (°C)	Umidade Relativa de Equilíbrio (%)	Referência
NaOH	15	9,59	GREENSPAN (1977)
	35	6,92	GREENSPAN (1977)
	40	6,26	GREENSPAN (1977)
LiCl	15	11,30	GREENSPAN (1977)
	35	11,25	GREENSPAN (1977)
	40	11,21	GREENSPAN (1977)
	80	10,51	GREENSPAN (1977)
CH ₃ COOK	15	23,40	GREENSPAN (1977)
	35	23,00	ROCKLAND (1960)
	40	23,00	ROCKLAND (1960)
MgCl ₂ .6H ₂ O	15	33,30	GREENSPAN (1977)
	35	32,05	GREENSPAN (1977)
	40	31,60	GREENSPAN (1977)
	80	26,05	GREENSPAN (1977)
K ₂ CO ₃	15	43,20	GREENSPAN (1977)
	35	41,50	YOUNG (1967)
	40	40,00	ROCKLAND (1960)
NaNO ₂	15	66,50	YOUNG (1967)
	35	62,80	YOUNG (1967)
	40	61,50	CARR e HARRIS (1949)
NaCl	15	74,13	GREENSPAN (1977)
	35	74,87	GREENSPAN (1977)
	40	74,68	GREENSPAN (1977)
	80	76,29	GREENSPAN (1977)
LiBr	80	5,20	GREENSPAN (1977)
NaBr	80	51,43	GREENSPAN (1977)
NaNO ₃	80	65,22	GREENSPAN (1977)
KCl	80	78,90	GREENSPAN (1977)

As amostras são colocadas em pequenos recipientes de polietileno e introduzidos em um suporte adequado nos frascos de 500 mL, de modo a ficarem suspensas. Amostras de $1 \pm 0,05\text{g}$ de sementes de urucum são pesadas, em triplicata, utilizando-se balança analítica Chyo modelo 200L. Os frascos são acondicionados em estufa incubadora para DBO¹ - Quimis, modelo 315.D16, faixa de trabalho (0 a 50°C), precisão $\pm 0,3^\circ\text{C}$; a $15 \pm 0,3^\circ\text{C}$; $35 \pm 0,3^\circ\text{C}$ e $40 \pm 0,3^\circ\text{C}$ e em estufas termostatzadas de esterelização e secagem a $80 \pm 1^\circ\text{C}$ (modelo De Léo, faixa de 20 a 120°C, precisão $\pm 1^\circ\text{C}$). Uma representação esquemática do recipiente com o suporte contendo a amostra e o arranjo experimental utilizado na obtenção das umidades de equilíbrio, estão indicados nas Figuras 28 e 29, respectivamente.

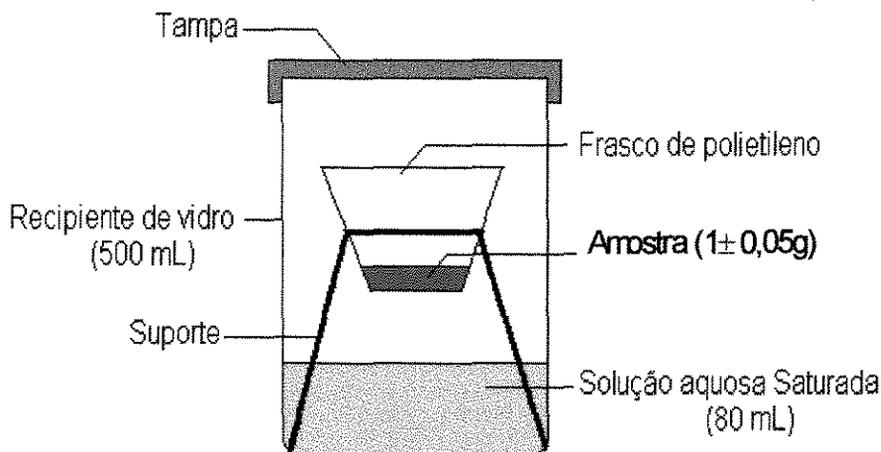


Figura 28. Detalhe do recipiente e do suporte contendo a amostra

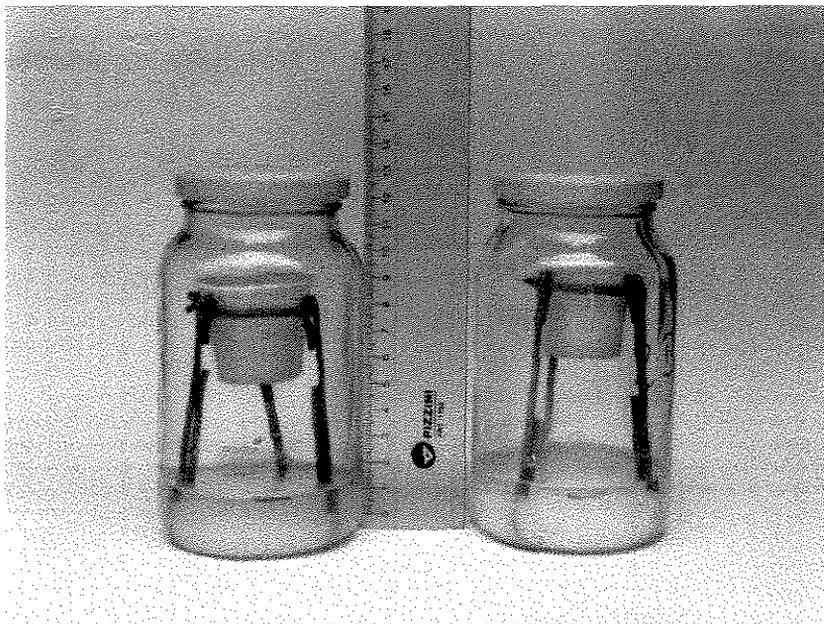


Foto: R. F. Neves

Figura 29. Recipiente com amostra para determinação de umidade de equilíbrio

¹ Demanda Bioquímica de Oxigênio.

O processo é acompanhado através de determinações sucessivas da massa das amostras em intervalos de 48h, até o equilíbrio, alcançado quando ocorre a constância no valor das massas para três pesagens consecutivas. Durante esse período, é realizada uma inspeção visual das amostras, com o propósito de verificar possíveis alterações, principalmente crescimento de fungos e/ou escurecimento das sementes.

Após alcançado o equilíbrio, o conteúdo de umidade de equilíbrio das amostras é determinado em estufa a vácuo (Fanem, modelo 099 EV) a 65°C e 650mmHg, até massa constante.

3.2.5. Ajuste do Modelo GAB

Os dados experimentais das isotermas de dessecção de sementes de urucum a 15°C, 35°C, 40°C e 80°C são ajustadas ao modelo de GAB (Equação 16) e suas constantes características determinadas através da técnica de regressão não-linear, utilizando-se o aplicativo Statistica® (Statsoft, Inc.-USA) versão 5.0 através do método Quasi-Newton. Os critérios usados para se avaliar a excelência do ajuste são os valores do coeficiente de regressão e o desvio médio relativo, P, dado pela Equação 32:

$$P = \frac{100}{\eta} \sum_{i=1}^{\eta} \frac{|ve - vp|}{vp} \quad (32)$$

na qual η representa o número de experimentos, ve e vp são os valores experimentais e preditos, respectivamente. De acordo com AGUERRE, SUAREZ, VIOLLAZ (1989) e MATOS e ANADÓN (1995) um bom ajuste, para fins práticos, deve ser considerado para valores de $P \leq 10\%$.

3.2.6 Determinação dos Calores Isostéricos Líquidos e Integrais de Sorção

Os resultados para os calores líquidos de sorção de sementes de urucum cultivar Piave vermelha, foram obtidos através dos resultados da linearização da equação de Clausius-Clapeyron (Equação 21), com os valores de q_{st} resultantes da multiplicação dos coeficientes angulares das retas de inclinação ($-q_{st}/R$) obtidas para cada valor de temperatura e umidade relativa gerada pelo modelo de GAB, pelo valor da constante universal dos gases R, conforme mencionado no item 2.3.6. De posse dos valores de q_{st} , os calores integrais, Q_{st} , são estimados pela Equação 22, conhecendo-se o valor médio da entalpia de vaporização da água pura, para a faixa de temperatura de interesse.

3.3 EQUIPAMENTO PARA A SECAGEM EM LEITO FIXO

A condução do processo de secagem experimental das sementes de urucum é realizada através de um protótipo de secador de leito fixo projetado e construído neste trabalho, tendo como base uma unidade adaptada capaz de movimentar e aquecer o ar, fabricada pela P. A. Hilton Ltda. - England. Este equipamento básico consiste de um duto de 25,4 cm de seção quadrada, contendo um soprador centrífugo com controle de velocidade do rotor, capaz de movimentar o ar até o leito de sólidos, com variação de sua velocidade. Compõe o sistema, dois pares de resistências elétricas de 2 kW e 1kW cada, distribuídos ao longo da unidade, as quais propiciam o aquecimento do ar utilizado como agente de secagem.

Adaptado a esta unidade, encontra-se o secador de leito fixo, acoplado por meio de redução gradual com mudança da seção quadrada para circular com 7,5 cm de diâmetro interno e 1,35 m de comprimento, construída em aço inoxidável e isolada termicamente com fibra de vidro, com angulação de 90°, raio curto, conforme ilustrado na Figura 30.

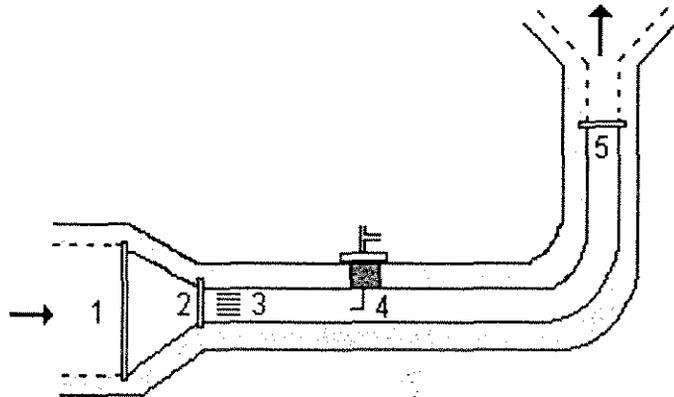


Figura 30. Esquema da seção de acoplamento entre a unidade básica e o leito fixo

- 1 - Seção de saída da unidade básica (quadrada, lado = 25,4 cm)
- 2 - Redução gradual com mudança de seção (circular, diâmetro = 7,5 cm)
- 3 - Direcionadores de fluxo
- 4 - Encaixe do tubo de Pitot
- 5- Acoplamento à base do leito.
- direção do escoamento do ar
- isolamento térmico (fibra de vidro) com proteção externa de alumínio corrugado.

O corpo do leito secador é constituído em vidro pirex, contendo dispositivos para medidas de temperatura de entrada e saída do ar, como também para amostragem de ar para avaliação de suas propriedades psicrométricas, as quais variam ao permear o leito de sementes. O equipamento dispõe de um cesto cilíndrico telado, construído em aço inoxidável, no interior do qual são depositadas as sementes de urucum, ficando então sujeitas ao contato do ar de secagem, através do leito a partir de sua base e pelas laterais do dispositivo (Figura 31).

Este cesto, que constitui-se no leito propriamente dito, possui diâmetro interno 12,5 cm e altura 25,5 cm e uma capacidade volumétrica total de 3,13 litros. No momento das corridas experimentais, fica suspenso no interior do corpo cilíndrico de vidro, conectado à uma balança eletrônica Gehaka BG 8000 com sensibilidade 0,1g, a qual indica continuamente o decréscimo da massa do material no decorrer do processo de secagem.

Completam o arranjo experimental, um exaustor colocado lateralmente próximo à balança, com o objetivo de arrefecimento do ar de secagem à saída, para que o mesmo não aqueça em demasia a base da balança, a qual se encontra parcialmente protegida do calor por um anteparo de madeira.



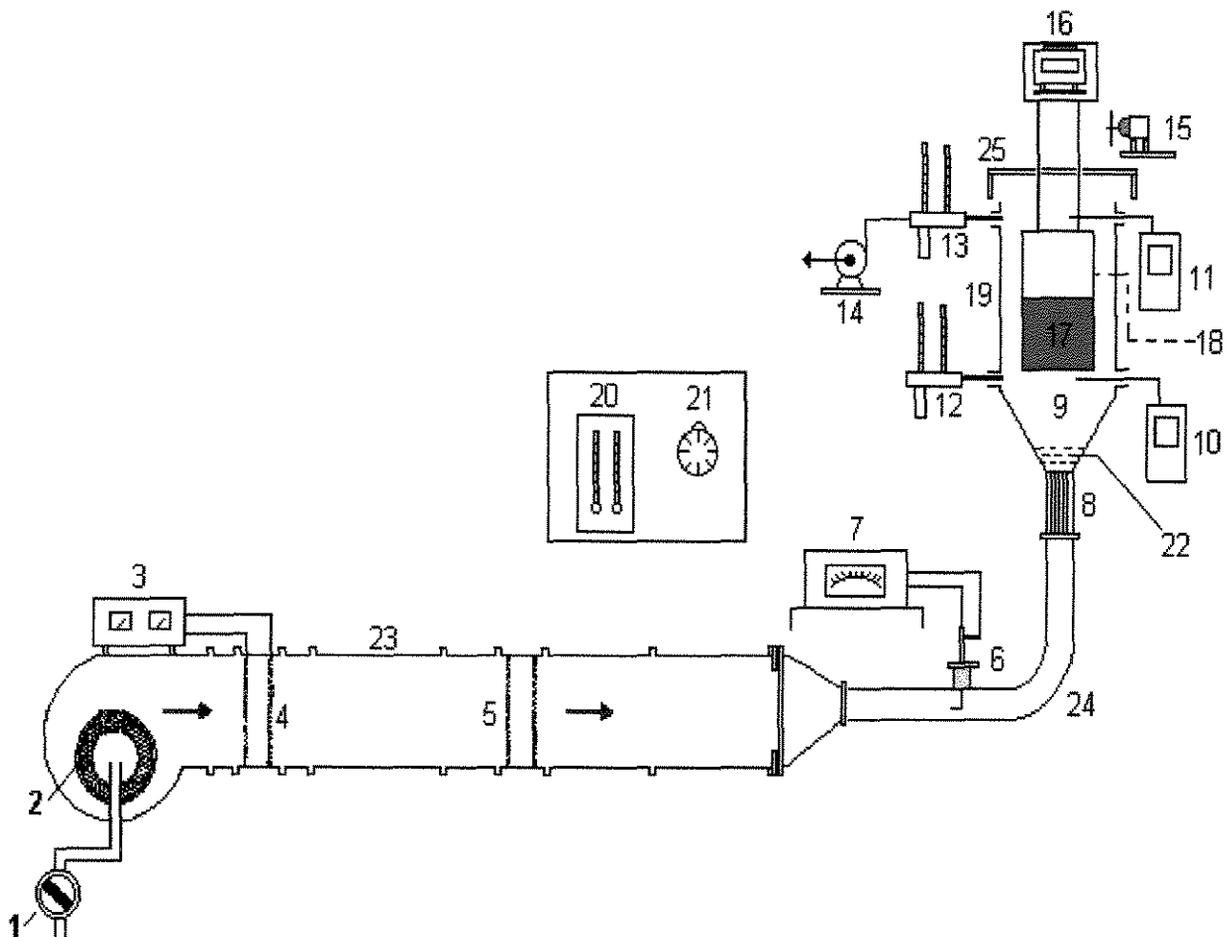
Foto: R. F. Neves

Figura 31. Leito em aço inoxidável contendo amostras

A instrumentação do protótipo consiste em um tubo de Pitot engastado na tubulação de aço inoxidável acoplado ao micromanômetro anteriormente especificado, utilizado para a indicação da velocidade e da vazão mássica do ar de entrada; e de dois sensores de temperatura constituídos por termopares tipo K (cobre-constantan) com indicadores em °C, necessários para indicar as temperaturas de entrada e saída do ar de secagem.

A aplicação de psicrômetros para a determinação das propriedades psicrométricas do ar em processos de secagem está recomendado em ROCHA e FARIA (1992). Desta forma, na entrada e saída do leito, a unidade dispõe de dois psicrômetros construídos neste trabalho conforme recomendações da ASHRAE (1996) com a finalidade de medir as variações das propriedades psicrométricas do ar de secagem. O psicrômetro à saída do leito está conectado a uma bomba de vácuo modelo Marconi/MA-058, com pressão negativa de 700 mmHg, succionando o ar de saída, de modo a manter uma velocidade adequada ($> 5\text{m/s}$) ao passar pela mecha úmida, para que o termômetro indique sua temperatura de bulbo úmido com um erro mínimo (WEXLER e BROMBACHER, 1951).

As condições ambientais antes, no decorrer e após o processo, são monitoradas através de termômetros de máxima e mínima (Incoterm), e através de termohigrômetro modelo Sundo, 4463HT, faixa de trabalho 0 a 40°C e 0 a 100% de umidade relativa. O arranjo experimental completo está esquematizado na Figura 32.



- | | |
|--|-------------------------------------|
| 1 - controle de velocidade do soprador | 14 - bomba de vácuo |
| 2 - soprador centrífugo | 15 - exaustor |
| 3 - controlador de potência | 16 - balança eletrônica de precisão |
| 4 - par de resistências de 2 kW | 17 - camada de sementes |
| 5 - par de resistências de 1 kW | 18 - cesto (leito) |
| 6 - tubo de Pitot | 19 - corpo do leito secador |
| 7 - micromanômetro | 20 - termômetro de máxima e mínima |
| 8 - distribuidor de ar | 21 - termohigrômetro |
| 9 - câmara plenum | 22 - telas difusoras de ar |
| 10 - medidor de temperatura do ar de entrada | 23 - unidade básica de secagem |
| 11 - medidor de temperatura do ar de saída | 24 - seção de acoplamento ao leito |
| 12 - psicrômetro (Ts e Tu à entrada) | 25 - anteparo |
| 13 - psicrômetro (Ts e Tu à saída) | → fluxo de ar |

Figura 32. Esquema do protótipo do secador de leito fixo desenvolvido neste trabalho

A Figura 33 mostra um aspecto do leito de sementes de urucum durante uma corrida experimental.

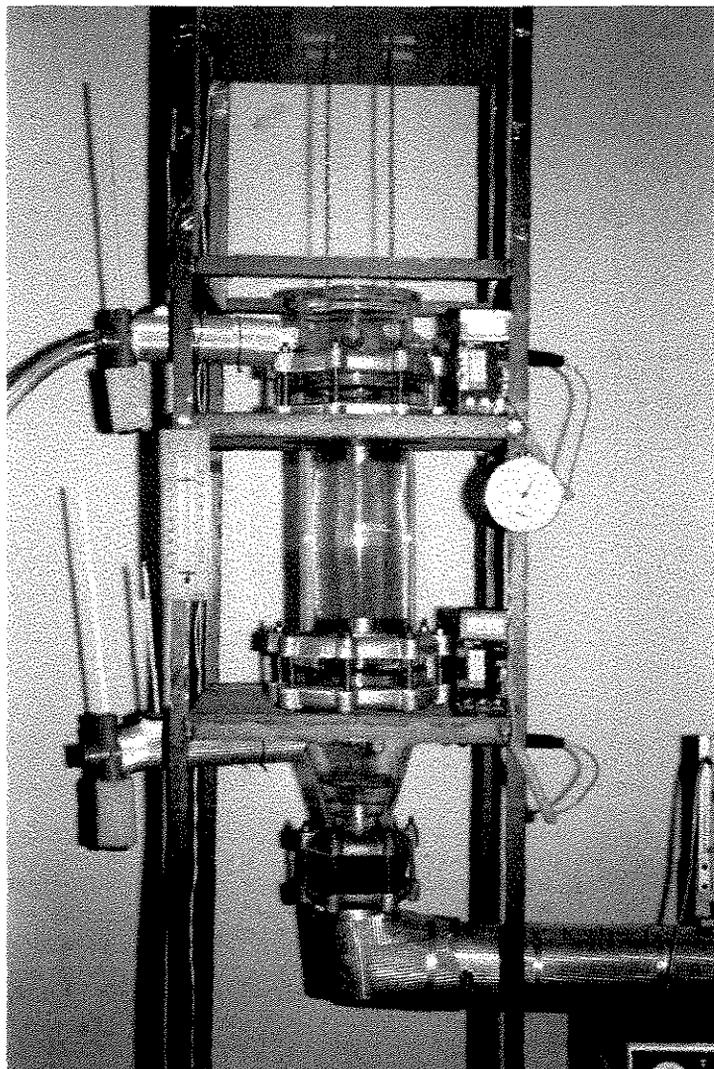


Foto: R. F. Neves

Figura 33. Aspecto do leito de sementes de urucum

3.3.1. Modo operacional e método de medição das variáveis no equipamento

O modo de operação do protótipo de secador e o método de medição das variáveis operacionais na condução do processo de secagem do material está descrito a seguir, tomando por base a Figura 32.

Ar fresco é admitido no protótipo, insuflado pelo soprador [2], com o controle da vazão realizado por meio de um transformador [1] que permite a variação da velocidade do rotor do soprador. A velocidade média e a vazão mássica do ar são determinadas através do tubo de Pitot [6], em função da queda de pressão indicada no micromanômetro [7].

O ar de entrada é então aquecido até a temperatura conveniente, conforme os limites especificados no planejamento de experimentos para cada corrida. O aquecimento pode ser obtido através dos pares de resistências elétricas de 2kW [4] ou dos pares de resistências de 1kW

[5] os quais podem ser acionados individualmente ou em conjunto, para se obter as temperaturas desejadas de entrada lidas no medidor [10]. O ajuste fino da temperatura é obtido pelo controlador de potência [3] acoplado às resistências elétricas de 2kW [4]. À saída do leito, a temperatura do ar é indicada no medidor [11], sendo arrefecido pelo exaustor [15], para que a elevação da temperatura abaixo da balança [16] não altere a leitura da massa. A razão de umidade e demais propriedades psicrométricas do ar na entrada e saída do leito, são obtidas a partir da leitura das temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido nos psicrômetros [12] e [13], utilizando-se subrotinas para o cálculo numérico das propriedades termodinâmicas do ar úmido (FARIA, 1986; FARIA e CASTRO, 1991; PENNA Jr., 1994), considerando-se que o processo ocorra à pressão de 101,325 kPa (1 atm).

O ar, passando através das telas [22] para uniformização do fluxo e em condições propícias para promover a secagem do material, flui então através do leito fixo de sólidos [17]. Estes, dispostos em camada espessa dentro do cesto telado [18], recebem o fluxo de ar ascendente com uma vazão adequada para não haver movimentação do leito.

Os teores iniciais de bixina do material utilizado são determinados conforme o método de análise do KOH descrito anteriormente. As curvas de secagem são obtidas experimentalmente, com base na determinação do decréscimo da massa do material com o tempo, utilizando-se a balança [16] com precisão de 0,1g e cronômetro, para uma dada condição de experimento. As curvas de taxa de secagem são obtidas por derivação dos dados experimentais de conteúdo de umidade *versus* tempo.

As experiências são realizadas descontinuamente (batelada), sendo coletadas amostras de sementes ao final da secagem, com o objetivo de se determinar a variação da concentração de bixina e de temperatura. A massa de sólido seco é obtida diretamente em estufa a 105 °C durante 24 h. A temperatura inicial e final dos sólidos, é medida calorimetricamente, utilizando-se termopares tipo K, acoplados a milivoltímetro digital. As propriedades psicrométricas do ar fresco são determinadas a partir da leitura da umidade relativa e temperatura de bulbo seco indicadas no termohigrômetro [21]. A variação de temperatura ambiente durante o decorrer do experimento são indicadas no termômetro de máxima e mínima [20]. Para o cálculo da área do leito de sementes expostas à secagem, considera-se a área lateral do leito (área lateral do cilindro), tomando-se as alturas da sementes, de acordo com cada condição experimental, somando-se ainda as áreas circulares de entrada e saída perpendiculares ao fluxo de ar, em função do raio interno do leito (cesto), conforme a Equação 33:

$$A = 2\pi r^2 + 2\pi r H_L \quad (33)$$

onde:

r = raio do leito (6,25 cm)

H_L = altura do leito de sementes, cm.

As curvas de secagem, de taxas de secagem e as curvas características (X_r versus t , X_{rc} versus t , W_r versus X_r e W_r versus X_{rc}) são construídas a partir dos dados do perfil de perda de massa em função do tempo obtidos diretamente no processo de secagem, utilizando as equações:

$$X(\%bs) = \left(\frac{m(t) - m_{ss}}{m_{ss}} \right) 100 \quad (1)$$

$$W = - \frac{m_{ss}}{A} \frac{dX}{dt} \quad (3)$$

$$W_r = \frac{W}{W_{cr}} \quad (34)$$

$$X_r = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (35)$$

$$X_{rc} = \frac{X - X_e}{X_{cr} - X_e} \quad (36)$$

Para a determinação das curvas de taxas de secagem (taxa de secagem em função do teor de umidade e taxa de secagem em função do tempo), a quantificação da derivada $\left(\frac{dX}{dt} \right)$ foi obtida ajustando-se os dados experimentais da curva de secagem (X versus t) às equações da reta e de Page (PAGE, 1949), dadas respectivamente pelas Equações 37 e 38, de acordo com o comportamento da relação entre o teor de umidade do material e o tempo ser linear ou não.

$$X = a + bt \quad (37)$$

$$X = e^{-at^b} \quad (38)$$

Nestas equações, a e b são constantes obtidas no ajuste dos modelos. As umidades de equilíbrio para cada condição experimental foram determinadas com base nas isotermas de dessorção ajustadas ao modelo GAB, em função do estado psicrométrico do ar de entrada.

3.4. PROJETO EXPERIMENTAL

3.4.1 Projeto Fatorial Fracionário

Na secagem convectiva em leito fixo efetuada neste trabalho, a razão de umidade do ar é um parâmetro não controlável, podendo somente ser medida através de psicrômetros instalados no leito ou por termohigrômetro localizado no ambiente próximo ao equipamento.

As variáveis controláveis, que a princípio podem ter relevância no comportamento da secagem do material são as relacionadas ao ar (temperatura e vazão mássica), aos sólidos (teor inicial de umidade, carga ou altura do leito) e ao processo (tempo de secagem).

As sementes de urucum secadas devem manter teores de umidade e bixina finais compatíveis com os padrões e qualidade do produto. São geralmente armazenadas na planta industrial para posteriormente serem processadas para a obtenção de corantes. Assim, tomam-se a princípio estas como variáveis de resposta e verifica-se quais as variáveis iniciais isoladas e/ou combinadas que têm significância estatística nas respostas consideradas.

Após uma primeira análise, é possível realizar-se a otimização do processo com as variáveis de entrada selecionadas de maior efeito para as respostas, através da Metodologia de Superfícies de Resposta.

A análise do processo é inicialmente realizada através do Projeto Fatorial Fracionário, 2^{5-1} com resolução V (cinco). As variáveis de entrada selecionadas para o experimento e seus respectivos níveis estão listados na Tabela 22. A análise completa com as cinco variáveis de entrada consideradas geraria $2^5 = 32$ experimentos; dessa forma optou-se, por questões econômicas, pelo processo fracionário o que não compromete as conclusões a respeito da influência dos fatores operacionais na variável de resposta.

Tabela 22. Variáveis de entrada e respectivos níveis para o projeto fracionário de experimentos

Variáveis Originais (notação)	Variáveis Codificadas	Níveis	
		Baixo (-)	Alto (+)
Temperatura do ar (Tg)	A	40°C	80°C
Vazão mássica do ar (G)	B	14x10 ⁻³ kg/s	36 x10 ⁻³ kg/s
Tempo de secagem (t)	C	2 h	4 h
Carga de sementes (m)	D	0,5 kg	1 kg
Teor inicial de umidade das sementes (Xi)	E	33,2 %bs	42,2 %bs

O Projeto Fracionário 2^{5-1} conduz a apenas 16 corridas experimentais com o gerador **E = ABCD**, para uma mesma amostra, realizadas de forma aleatória. São realizadas 5 repetições aleatoriamente, totalizando 21 corridas, com objetivo de aumentar os graus de liberdade para melhor estimar o erro (BOX, HUNTER e HUNTER, 1978). A matriz de experimentos original, com os valores das variáveis de resposta (Xf: conteúdo de umidade final das sementes, %bs e Bf: teor de bixina final, %bs), está sumarizada na Tabela 23.

Tabela 23. Matriz de experimentos para o projeto fracionário

Corridas	A	B	C	D	E	Xf	Bf
01	-	-	-	-	+	Xf ₁	Bf ₁
02	+	-	-	-	-	Xf ₂	Bf ₂
03	-	+	-	-	-	Xf ₃	Bf ₃
04	+	+	-	-	+	Xf ₄	Bf ₄
05	-	-	+	-	-	Xf ₅	Bf ₅
06	+	-	+	-	+	Xf ₆	Bf ₆
07	-	+	+	-	+	Xf ₇	Bf ₇
08	+	+	+	-	-	Xf ₈	Bf ₈
09	-	-	-	+	-	Xf ₉	Bf ₉
10	+	-	-	+	+	Xf ₁₀	Bf ₁₀
11	-	+	-	+	+	Xf ₁₁	Bf ₁₁
12	+	+	-	+	-	Xf ₁₂	Bf ₁₂
13	-	-	+	+	+	Xf ₁₃	Bf ₁₃
14	+	-	+	+	-	Xf ₁₄	Bf ₁₄
15	-	+	+	+	-	Xf ₁₅	Bf ₁₅
16	+	+	+	+	+	Xf ₁₆	Bf ₁₆
17	-	+	-	+	+	Xf ₁₇	Bf ₁₇
18	-	-	-	+	-	Xf ₁₈	Bf ₁₈
19	+	-	+	+	-	Xf ₁₉	Bf ₁₉
20	+	+	-	-	+	Xf ₂₀	Bf ₂₀
21	-	-	-	-	+	Xf ₂₁	Bf ₂₁

A interpretação dos resultados é baseada na análise de variância, e no gráfico em papel de probabilidade normal, gerados pelo aplicativo Statgraphics® (Statistical Graphics Corporation - USA), versão 5.0, após o conhecimento das variáveis de resposta, obtidas experimentalmente.

3.4.2. Metodologia de Superfícies de Resposta

A técnica de superfícies de resposta é empregada na otimização de processos que apresentam um considerável número de variáveis de entrada capazes de influenciar as respostas e permite a identificação dentre esses fatores, os que mais afetam as variáveis de controle do processo em análise.

A estratégia desta metodologia consiste em selecionar modelos nos quais as respostas possam ser expressas em função das variáveis independentes envolvidas no processo. Uma boa estimativa dos erros experimentais e das curvaturas das superfícies é obtida com a realização de ensaios com replicatas no ponto central, que corresponde à valores médios entre os níveis inferiores e superiores das variáveis de entrada consideradas. A análise estatística dos dados obtidos neste trabalho é realizada com base em ajustes à modelos polinomiais de 2ª ordem, a partir de um planejamento fatorial composto central rotacional de 3 fatores, com precisão uniforme, conforme descrito em KHURI e CORNELL (1987).

De acordo com esses autores, o número total de ensaios, N_T , pode ser dado pela Equação 39,

$$N_T = n_f + n_\alpha + n_c \quad (39)$$

onde n_c representa o número de observações repetidas no centro do planejamento [$n_c = (0, 0, 0, \dots, 0)$] e o número de experimentos referentes às porções fatorial do planejamento (n_f) e axial (n_α), são dadas por

$$n_f = 2^k \quad (40)$$

$$n_\alpha = 2k \quad (41)$$

onde k é o número de variáveis independentes ou fatores.

Para o planejamento experimental possuir precisão uniforme¹, o número de repetições no ponto central deve ser estimado aproximadamente pela Equação 42, para o caso de $k=3$:

$$n_c = 0,8385 \left(\sqrt{n_f} + 2 \right)^2 - n_f - n_\alpha \quad (42)$$

O planejamento central composto pode ter a propriedade de rotabilidade², bastando para isto calcular o valor do espaçamento axial, α , através da equação:

$$\alpha = n_f^{1/4} \quad (43)$$

Desta forma, o planejamento central composto com três fatores ($k=3$) utilizado neste trabalho, para possuir as propriedades de precisão uniforme e rotabilidade, deve ter $n_f = 8$; $n_\alpha = 6$; $n_c = 6$ e $\alpha = \pm 1,68$; perfazendo um total de 20 corridas experimentais ($N_T = 20$).

Para se obter modelos estatísticos capazes de prever adequadamente os conteúdos finais de umidade e bixina de sementes de urucum, em função das variáveis mais significativas para o processo de secagem em leito fixo, é desenvolvido um planejamento estatístico com base na Metodologia de Superfícies de Resposta tomando-se como variáveis de entrada a temperatura e vazão mássica do ar e o tempo de secagem.

O processo é conduzido mantendo-se fixas duas variáveis de entrada consideradas no experimento anterior, conforme indicado na Tabela 24. Apesar da variável teor inicial de umidade

¹ Quando a variância de \hat{Y} no centro do planejamento for igual a variância de \hat{Y} a uma distância unitária do centro do planejamento (WERKEMA e AGUIAR, 1996).

² Se o desvio padrão da resposta predita \hat{Y} for constante em todos os pontos que estiverem à mesma distância do centro do planejamento (MONTGOMERY, 1996).

das sementes ter apresentado influência estatística nas repostas, não foi selecionada para a segunda etapa em virtude da mesma se comportar como uma covariável, ou seja, não é possível controlá-la de modo a mantê-la em dois níveis iniciais constantes. A variável independente massa de sementes de urucum não foi selecionada para a segunda etapa do experimento, devido não apresentar influência significativa nas respostas consideradas na primeira fase dos experimentos, conforme tratado na discussão dos resultados.

Tabela 24. Variáveis mantidas fixas na segunda fase dos experimentos

Variáveis Originais	Valores
Carga de sementes	1000 g
Teor de umidade inicial das sementes	$21,62 \pm 0,27$ %bs

O valor do conteúdo inicial de umidade médio das sementes de urucum constantes da Tabela 24 foi obtido a partir dos teores iniciais de umidade das 20 corridas experimentais da segunda fase de experimentos, onde as amostras permaneciam em condições constantes de temperatura e umidade relativa por um tempo conveniente, tal que proporcionasse uma homogeneidade em seus teores de umidade iniciais, o que pode ser comprovado pelo baixo erro padrão apresentado.

Na Tabela 25 estão representadas as variáveis e os respectivos níveis utilizados na otimização do processo de secagem de sementes de urucum, utilizando secador de leito fixo, com base na metodologia de superfícies de resposta.

Tabela 25. Valores codificados e originais para as variáveis utilizadas no planejamento da metodologia de superfícies de resposta

Variáveis Originais (notação)	Variáveis Codificadas	Unidades	Níveis				
			-1,68	-1	0	+1	+1,68
Temperatura do ar (Tg)	x_1	°C	26	40	60	80	94
Tempo de secagem (t)	x_2	min	199	240	300	360	401
Vazão mássica do ar (G)	x_3	kg/s	0,007	0,013	0,0215	0,030	0,036

As corridas com a metodologia de superfícies de resposta são desenvolvidas de acordo com a matriz de experimentos indicada na Tabela 26.

O objetivo principal nesta etapa consiste em ajustar um modelo de 2ª ordem capaz de representar o relacionamento existente entre os experimentos realizados numa região centrada nas condições operacionais atuais, verificadas durante o processo de secagem na primeira etapa do planejamento.

Tabela 28. Matriz de experimentos da segunda fase dos experimentos

Corridas	x_1	x_2	x_3	Xf (%bs)	Bf (%bs)
01	-	-	-	Xf ₁	Bf ₁
02	+	-	-	Xf ₂	Bf ₂
03	-	+	-	Xf ₃	Bf ₃
04	+	+	-	Xf ₄	Bf ₄
05	-	-	+	Xf ₅	Bf ₅
06	+	-	+	Xf ₆	Bf ₆
07	-	+	+	Xf ₇	Bf ₇
08	+	+	+	Xf ₈	Bf ₈
09	$-\alpha$	0	0	Xf ₉	Bf ₉
10	$+\alpha$	0	0	Xf ₁₀	Bf ₁₀
11	0	$-\alpha$	0	Xf ₁₁	Bf ₁₁
12	0	$+\alpha$	0	Xf ₁₂	Bf ₁₂
13	0	0	$-\alpha$	Xf ₁₃	Bf ₁₃
14	0	0	$+\alpha$	Xf ₁₄	Bf ₁₄
15	0	0	0	Xf ₁₅	Bf ₁₅
16	0	0	0	Xf ₁₆	Bf ₁₆
17	0	0	0	Xf ₁₇	Bf ₁₇
18	0	0	0	Xf ₁₈	Bf ₁₈
19	0	0	0	Xf ₁₉	Bf ₁₉
20	0	0	0	Xf ₂₀	Bf ₂₀

A análise estatística dos experimentos visando encontrar um modelo representativo para os teores finais de bixina e umidade é realizada utilizando os aplicativos Statgraphics® (Statistical Graphics Corporation - USA) e Statistica® (Statsoft, Inc. - USA)

3.4.2.1 Análise de modelos de 2ª ordem

As caracterizações do ponto estacionário e das superfícies de resposta, descritas através de modelos polinomiais quadráticos são realizadas da seguinte maneira. Quando se está na proximidade do ponto ótimo do experimento, um modelo de 2ª ordem para a resposta \hat{Y} é adequado para uma estimativa mais precisa da condição inicial de operação do processo.

Os níveis do ponto para otimizar a resposta predita \hat{Y} podem ser obtidos de suas derivadas parciais em função de cada variável independente x_1, x_2, \dots, x_k , através da Equação 44,

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_1} = \frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_2} = \dots = \frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_k} = 0 \quad (44)$$

cuja solução simultaneamente das k equações resultantes fornece um ponto de coordenadas $x_{1s}, x_{2s}, \dots, x_{ks}$ denominado ponto estacionário, o qual pode representar um ponto de mínima ou

máxima resposta, como também um minimax ou ponto de sela (MONTGOMERY, 1991). A metodologia para a solução geral e a localização do ponto estacionário e do correspondente valor da resposta neste ponto, a partir de um modelo polinomial de 2ª ordem, está descrito em KHURI e CORNELL (1987) e em BOX e DRAPER (1987).

Uma vez encontradas as coordenadas do ponto estacionário, torna-se necessário caracterizar a superfície de resposta nas vizinhanças imediatas deste ponto, com o objetivo de elucidar se esta região corresponde a um mínimo, máximo ou minimax (sela) e verificar a relativa sensibilidade da resposta às variáveis de entrada. Isso pode ser realizado através da transformação do modelo proposto para um novo sistema de coordenadas com a origem no ponto estacionário, efetuando-se uma rotação dos eixos deste sistema até torná-los coincidentes com os eixos principais da superfície de resposta proposta com base nos dados experimentais, resultando numa expressão do tipo:

$$\hat{Y} = \hat{Y}_s + \lambda_1 W_1^2 + \lambda_2 W_2^2 + \dots + \lambda_k W_k^2 \quad (45)$$

na qual os W_i ($i = 1, 2, \dots, k$) correspondem às variáveis independentes transformadas e λ_i ($i = 1, 2, \dots, k$) são constantes, conhecidas como autovalores ou raízes características da matriz simétrica ($k \times k$) de diagonal principal formada pelos coeficientes quadráticos puros e os demais elementos pela metade dos valores dos outros coeficientes do modelo proposto, conforme especificado em MONTGOMERY (1991).

A Equação 45 corresponde a uma forma canônica do modelo e representa a mesma função do modelo polinomial de 2ª ordem. A natureza da superfície de resposta pode ser determinada a partir do ponto estacionário e do sinal e magnitude dos autovalores λ_i . Se todos forem negativos, então a superfície corresponde a um máximo, ao passo que se os autovalores no ponto estacionário forem todos positivos a superfície é um mínimo. Se todos os λ_i não possuírem o mesmo sinal, então o ponto estacionário caracteriza um ponto de sela na superfície de resposta ajustada pelo modelo.

Os cálculos necessários à localização do ponto estacionário, predição da resposta no ponto estacionário e determinação dos autovalores, λ_i , e seus correspondentes autovetores, podem ser efetuados analiticamente ou numericamente com auxílio dos programas computacionais *Matlab*® ou *Mathematica*®.

A natureza da superfície de resposta descrita conforme a metodologia acima é válida quando o ponto estacionário localiza-se dentro da região experimental, caso contrário, torna-se arriscado tentar concluir sobre a natureza da superfície de resposta em um ponto muito afastado deste. A distância do ponto estacionário ao centro do experimento (ponto central), em unidades de projeto, pode ser estimado pela Equação 46:

$$D_S = \left(\sum_{i=1}^k x_{is}^2 \right)^{1/2} \quad (46)$$

onde x_{is} ($i=1,2,\dots,k$) representa as coordenadas do ponto estacionário. Se as coordenadas do ponto estacionário estiverem próximas do ponto central, o qual acarreta valores de D_s não muito afastados da unidade, uma forma canônica do tipo indicado pela Equação 45, onde são eliminados os termos lineares e cruzados do modelo quadrático, torna-se adequada para a compreensão da superfície de resposta. Esse método é denominado de *forma canônica B* por BOX e DRAPER (1987).

A determinação de um ponto ótimo, em função de restrições nas variáveis de entrada, pode ser conseguida através do conceito de desejabilidade global, D_j , conforme descrito em AKHNAZAROVA e KAFAROV (1982).

O conceito de desejabilidade global é útil quando se deseja otimizar processos onde estão envolvidas mais de uma variável de resposta. As respostas obtidas são transformadas e interpretadas em termos de aceitabilidade, numa escala adimensional que varia de 0 (indesejável) a 1 (ótimo alcançável), conforme os critérios estabelecidos por AKHNAZAROVA e KAFAROV (1982); onde d_j consiste na desejabilidade individual para cada resposta analisada e D_j corresponde à desejabilidade global, calculada pela média geométrica entre os vários valores de d_j . A otimização numérica pode ser obtida através de programas computacionais específicos disponíveis no mercado, como por exemplo o aplicativo *Design Expert*®.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

São apresentados e discutidos os resultados obtidos de caracterização química e física e da análise do comportamento higroscópico das sementes de urucum, além dos ensaios iniciais e finais de secagem, com base no planejamento estatístico de experimentos e na metodologia de superfície de resposta. Através da aplicação de técnicas estatísticas de otimização, é delimitada a região e estabelecido o ponto ótimo de operação, de modo a obter-se sementes secas com qualidade desejável para conservação e obtenção de corantes.

4.1 Resultados da caracterização química do material

Os resultados da análise química das sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha, utilizada nos ensaios finais de secagem e na higroscopicidade, estão indicados na Tabela 27. Constituem valores médios de ensaios realizados em triplicata, com as indicações do erro padrão em relação à estimativa da média, e do coeficiente de variação¹, os quais dão uma idéia da precisão dos experimentos.

Tabela 27. Composição centesimal média das sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha, usadas neste trabalho

Constituintes	Composição (%)	Coefficiente de variação (%)
Umidade	21,40 ± 0,86	6,98
Proteína	8,85 ± 0,12	2,27
Cinzas	3,76 ± 0,04	1,77
Lipídios	1,21 ± 0,02	2,19
Carboidratos (*)	64,78 ± 0,89	2,37

(*) Obtido por diferença

Observa-se que os valores encontrados estão ligeiramente abaixo da faixa de concentração de composição centesimal dados na literatura, indicadas na Tabela 8; a não ser o valor de carboidratos, que foi determinado por diferença, e está um pouco acima da faixa dos teores indicados na Tabela 8, os quais também foram estimados por diferenças, não incluindo, porém, os teores de açúcares e amido, que são determinados analiticamente. O teor de umidade inicial das sementes utilizadas neste trabalho encontra-se em níveis mais elevados do que os valores da Tabela 8, provavelmente em virtude das condições de armazenagem do material (-5°C, 85% UR) propiciarem teores de umidade de equilíbrio diferentes daqueles.

¹ obtido pela relação entre as estimativas do desvio padrão e da média, multiplicado por 100.

Verifica-se com base nos valores dos coeficientes de variação, que os ensaios tiveram baixa variação ficando abaixo do limite de 10% para medidas experimentais com produtos agrícolas (GOMES, 1990).

4.2 Resultados da caracterização física do material

Estão indicados na Tabela 28 os resultados dos ensaios físicos realizados com as sementes de urucum usadas neste trabalho, contendo parâmetros estatísticos indicativos da precisão dos ensaios, conforme visto no item anterior. De um modo geral, os valores das propriedades situam-se dentro da faixa normalmente encontrada na literatura, sumarizada na Tabela 8, havendo naturalmente pequenas diferenças em função das características inerentes às variedades de sementes.

Tabela 28. Propriedades físicas de sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha, utilizadas neste trabalho.

Propriedade (unidade)	Valor médio \pm erro padrão	Coefficiente de variação (%)
Diâmetro (mm)	3,524 \pm 0,021	1,05
Massa específica aparente (g/cm ³)	0,631 \pm 0,007	2,81
Massa específica real (g/cm ³)	1,638 \pm 0,007	1,51
Esfericidade (adim.)	0,817 \pm 0,011	8,69
Porosidade do leito (adim.)	0,46 \pm 0,01	4,52
Calor específico (J/g°C)	1,643 \pm 0,091	9,63

Exceto os ensaios para a estimativa da esfericidade das sementes, realizadas com 40 amostras, os demais foram efetuadas em triplicatas. Observa-se também boa precisão nos ensaios, com base nos valores dos erros padrões e dos baixos coeficientes de variação encontrados.

4.3 Dessorção de umidade do urucum

Na Tabela 29 estão indicados os dados do conteúdo de umidade de equilíbrio das sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha, nas temperaturas 15, 35, 40 e 80°C, nos ambientes com umidades relativas constantes, geradas pelas soluções saturadas, cobrindo aproximadamente a faixa de 5 a 79% de umidade relativa, correspondendo a região de atividade de água entre 0,052 e 0,789.

Tabela 29. Dessorção de umidade de sementes de urucum a 15, 35, 40 e 80°C

15°C		35°C		40°C		80°C	
aw	Xe (%bs)						
0,0959	4,02	0,0692	3,96	0,0626	2,84	0,052	1,05
0,113	4,32	0,1125	4,04	0,1121	3,39	0,1051	1,62
0,234	6,06	0,230	5,11	0,230	4,35	0,2605	2,417
0,333	7,00	0,3205	6,30	0,316	5,43	0,5143	4,12
0,432	8,63	0,415	7,83	0,400	6,77	0,6522	5,45
0,665	13,32	0,628	11,21	0,615	10,74	0,7629	10,36
0,7413	16,32	0,7487	17,62	0,7468	15,9	0,789	13,14

Nas Figuras 34, 35, 36 e 37 podem ser visualizadas as isotermas de dessorção de umidade, para as temperaturas de 15, 35, 40 e 80°C, construídas com base nos dados experimentais da Tabela 29.

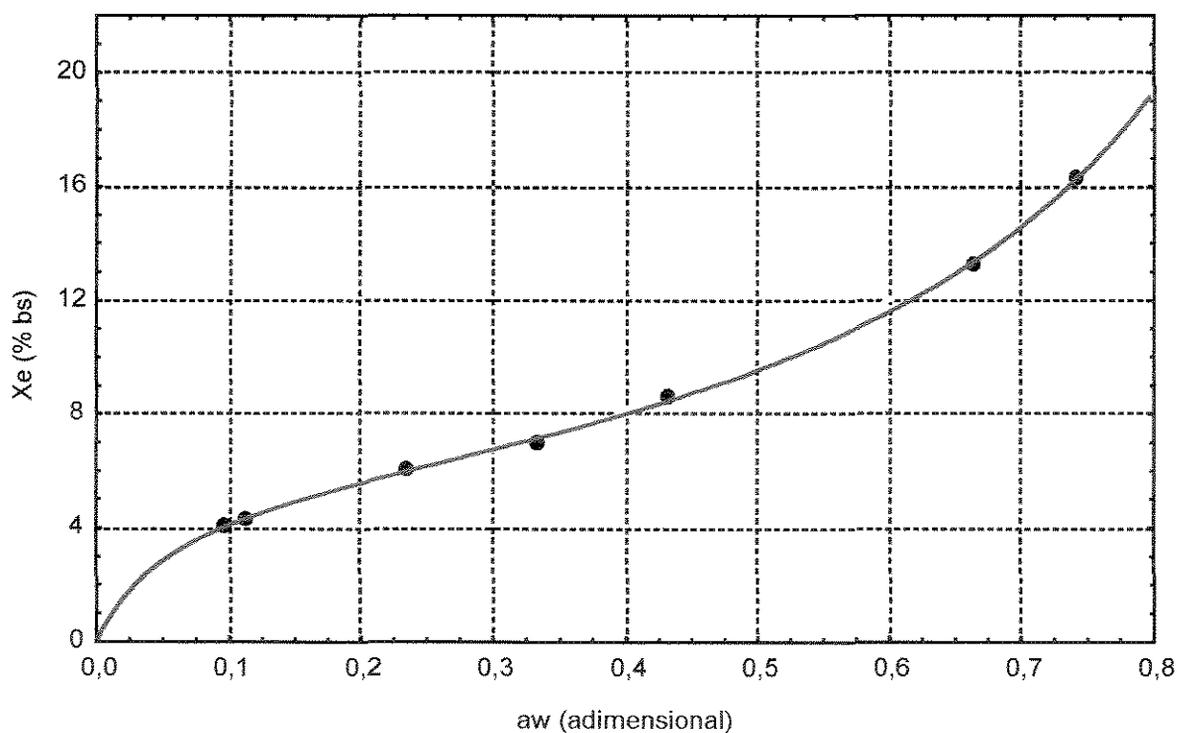


Figura 34. Isoterma de dessorção de sementes de urucum a 15°C. (• experimental, — modelo de GAB)

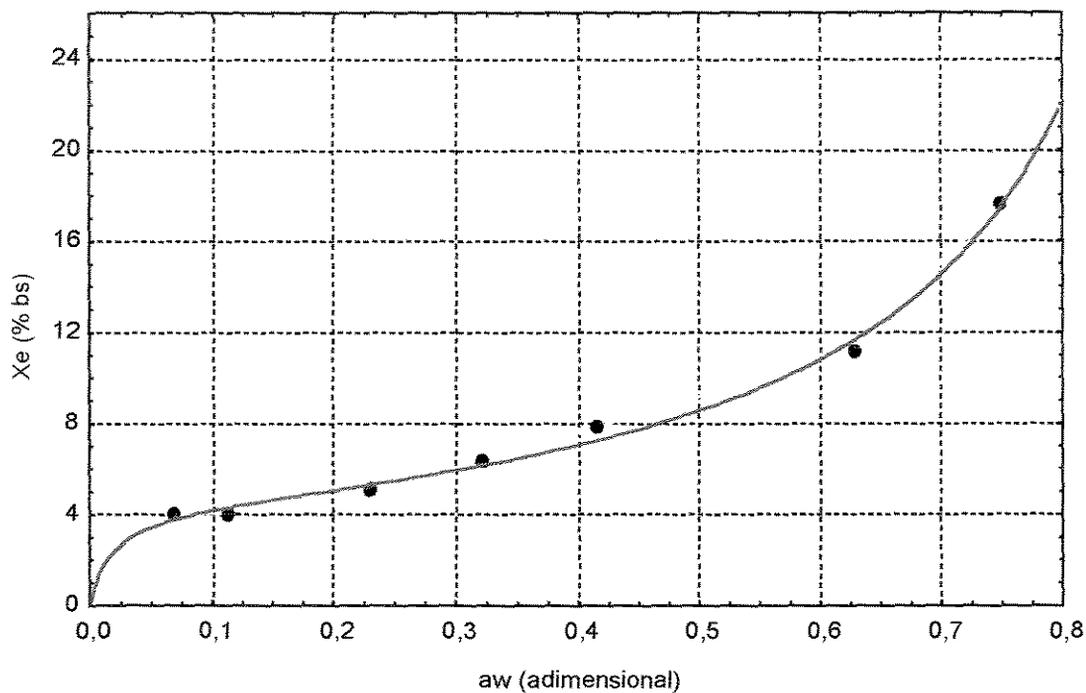


Figura 35. Isotherma de desorção de sementes de urucum a 35°C. (• experimental, — modelo de GAB)

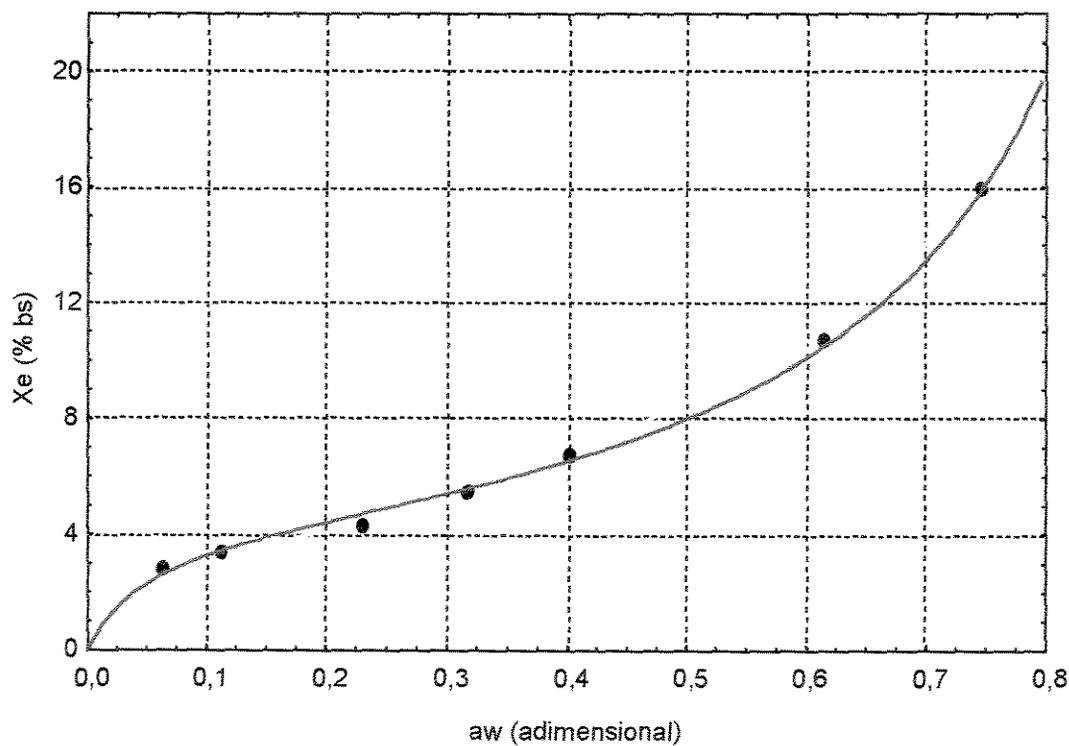


Figura 36. Isotherma de desorção de sementes de urucum a 40°C. (• experimental, — modelo de GAB)

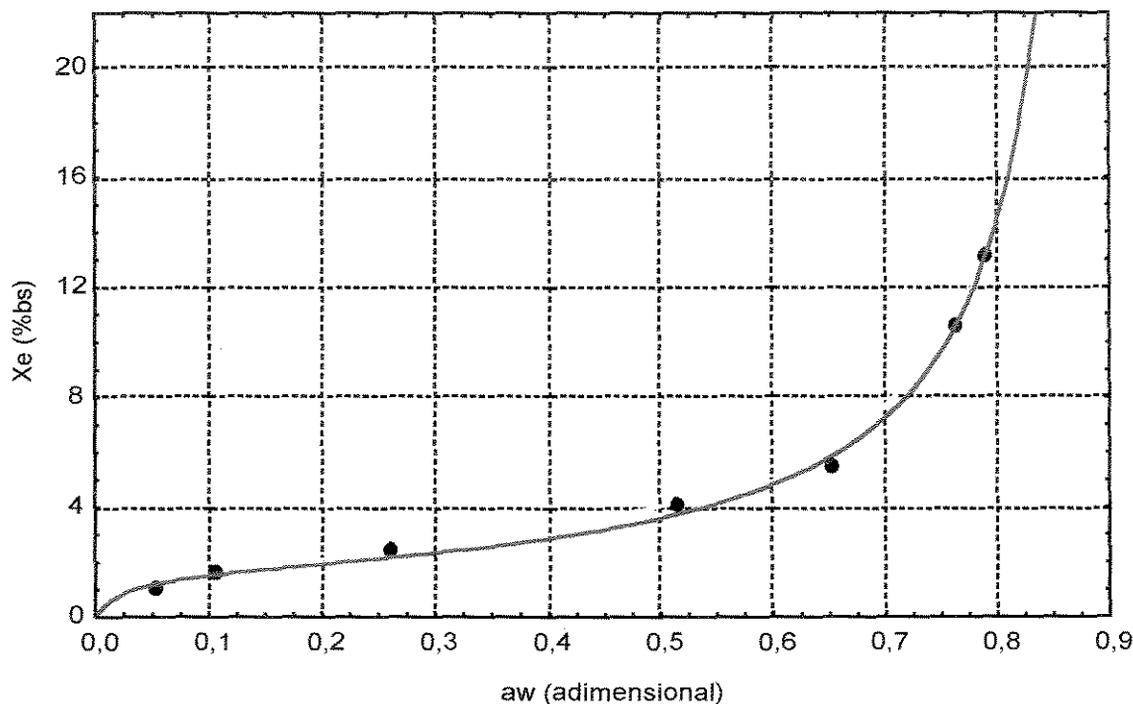


Figura 37. Isoterma de desorção de sementes de urucum a 80°C. (• experimental, — modelo de GAB)

Observa-se que as isotermas possuem forma sigmoide, correspondendo ao tipo II, de acordo com a teoria de BET (BRUNAUER, EMMETT, TELLER, 1938). As linhas cheias correspondem às curvas de ajuste dos pontos experimentais ao modelo GAB. A partir de valores de umidade relativa 60% ou de atividade de água 0,6 verifica-se um acentuado comportamento exponencial das curvas para todas as temperaturas testadas, indicando que a partir desses valores, um pequeno aumento na umidade relativa do ambiente propicia um considerável acréscimo na umidade de equilíbrio das sementes, pondo em risco a qualidade do produto armazenado em locais com UR além desse limite.

Esse comportamento é mais evidente na isoterma a 80°C, que pode ser entendido supondo-se uma maior dissolução de açúcares contido no produto, acelerada pela temperatura mais elevada. Este fato é observado também por MYHARA, TAYLOR e AL-BULUSHI (1996) e TSAMI (1991), para ameixas, figos, tâmaras, groselha, passas e damascos; sendo típico de produtos agrícolas e alimentos contendo teores elevados de açúcares.

Neste caso, para ambientes a 60% de umidade relativa, os teores de umidades de equilíbrio para as sementes de urucum indicados pelas isotermas de desorção, situam-se entre 5% e 11,5%bs, para a faixa de temperatura utilizada. Verifica-se, no entanto, que para temperaturas usuais de armazenamento (15 a 35°C) a 60% ou 0,6 de atividade de água, que corresponde a umidades relativas médias, as isotermas a 15°C e 35°C fornecem valores máximos em torno de 11,5 %bs, ou 10,3 %bu, para o conteúdo de umidade de equilíbrio do material, o que está em concordância com os níveis mínimos de umidade do produto ($\leq 10\%bu$), segundo as

normas de qualidade proposta para classificação das sementes de urucum (RASERA, 1991). Visto que esse valor de atividade de água ($a_w=0,6$) é suficiente para inibir todo o crescimento microbiano e ainda manter as condições de umidade desejáveis no produto (FENNEMA, 1993; MYHARA, TAYLOR e AL-BULUSHI, 1996), os resultados experimentais deste trabalho confirmam que, para a manutenção da qualidade, as sementes devem ser acondicionadas em ambientes com umidade máximas de 60%, entre 15 e 80°C, podendo-lhes atribuir a classificação tipo 1, desde que observadas as demais condições estipuladas na Tabela 5.

Para o produtor regional, essa indicação torna-se interessante, pois a qualidade das sementes podem ser mantidas no período pós-colheita, inclusive em sistemas simples de armazenagem das próprias regiões produtoras do nordeste do Estado do Pará, sem problema de deterioração por fungos, resultante da influência da umidade, desde que o teor de umidade do material seja mantido no limite de 10 %bu, considerando que a temperatura média local situa-se no intervalo de 35°C a 40°C (média de 37,5°C). Um resumo das observações sobre o comportamento higroscópico das sementes de urucum, com base no modelo de GAB ajustado aos dados experimentais deste trabalho, é fornecido na Tabela 30.

Tabela 30. Comportamento higroscópico das sementes de urucum usadas neste trabalho

Condição higroscópica		Temperaturas do ambiente (°C)			
		15	35	40	80
Ambiente com UR = 60%	Xe (%bs)	11,5	11,0	10,0	5,0
	Xe (%bu)	10,3	9,9	9,1	4,8
Sementes com Xe = 11 %bs	UR do ambiente (%)	52,5	60,0	62,5	76,3
Ambiente com UR = 80%	Xe (%bs)	19,0	22,0	20,0	14,0
	Xe (%bu)	16,0	18,0	16,7	12,3

Constata-se pelos dados da Tabela 30 que as sementes de urucum podem ser conservadas com maior estabilidade em ambientes com umidade relativa 60% ($a_w=0,6$) para todo o intervalo de temperatura utilizado; além do que, nestas condições o teor de umidade de equilíbrio das sementes mantém-se em torno de 10%bu, o que é desejável para os padrões de qualidade do material.

Observa-se também, que para manter-se a umidade de equilíbrio das sementes em torno de 11%bs (9,9 %bu) os níveis de umidade relativa do ambiente devem ser os indicados na Tabela 30, em função das temperaturas do meio; sendo entretanto no máximo 76,3% o valor da umidade relativa admitida para o intervalo de temperatura indicado. Contudo, os níveis de umidade relativa das regiões produtoras do Estado do Pará são elevados, em torno de 80% ($a_w=0,8$), prejudicial a boa conservação do material. Observa-se que para este valor de umidade relativa, a armazenagem do material à temperatura ambiente (média entre 35 e 40°C), implicaria em sementes de urucum com teores de umidade de equilíbrio média entre 16,7 e 18,0%bu, o que estaria fora das especificações de sementes tipo 1, com sérias ameaças à sua estabilidade, por estar em condições

propícias ao desenvolvimento de microorganismos. Os resultados para os teores de umidade de equilíbrio das sementes à umidade relativa de 80% são estimados através de extrapolações, utilizando as curvas representativas do modelo de GAB ajustado, conforme indicam as Figuras 33 a 36.

A influência da temperatura no comportamento do processo de dessecção de umidade é ilustrado na Figura 38. Nota-se o efeito do aumento da temperatura em toda a faixa de atividades de água estudada; com isto, ocorre um decréscimo no teor de umidade de equilíbrio quando a temperatura aumenta, a um valor de a_w constante. Este é um comportamento típico de muitos produtos de origem vegetal (SANCHES *et al.*, 1996; MYHARA, TAYLOR, AL-BULUSHI, 1996; MAROULIS, TSAMI, MARINOS-KOURIS, 1988).

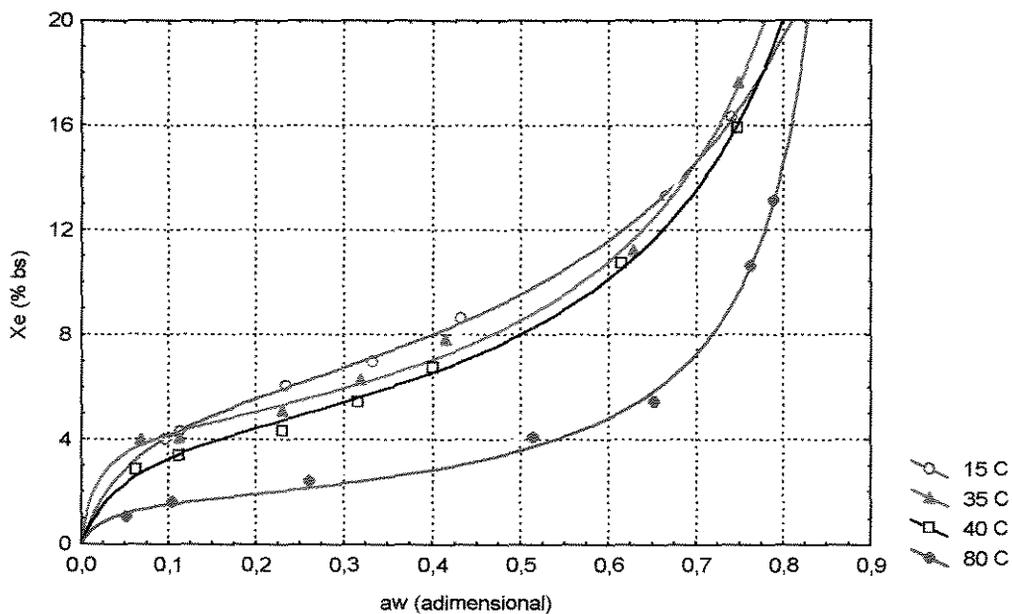


Figura 38. Efeito da temperatura na dessecção de sementes de urucum

4.4 Resultados do modelo de GAB ajustado

Na Tabela 31 são mostrados os valores das constantes características (X_m , C e K) do modelo GAB, bem como as estatísticas P e R . As constantes são obtidas por ajuste não linear direto, por substituição das Equações 18 e 17 na Equação 16. Os valores de X_m encontrados para as sementes de urucum a 15, 35, 40 e 80°C são: 5,60; 4,32; 4,27 e 1,65 %bs, respectivamente. Nesses níveis de umidade, o produto poderia ser conservado por longos períodos (BRUNAUER, EMMETT, TELLER, 1938).

A faixa de atividades de água correspondentes aos valores de X_m são: (0 - 0,225) para 15°C; (0 - 0,15) para 35°C; (0 - 0,20) para 40°C e (0 - 0,10) para 80°C, que são as zonas para as

quais têm-se a região de umidade fortemente adsorvida, onde a água não atua como solvente, comportando-se como parte integrante do sólido. Nestas regiões, a entalpia de vaporização da água é muito maior do que a da água pura (FENNEMA, 1993).

Tabela 31. Constantes características do modelo GAB para sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha

T (°C)	Xm (%bs)	C	K	\mathcal{R}	P (%)
15	5,602	20,316	0,896	0,9998	0,48
35	4,323	59,481	1,007	0,9976	3,11
40	4,274	20,262	0,987	0,9988	3,22
80	1,646	36,579	1,109	0,9984	4,89

As isotermas resultantes do modelo de GAB estão representadas nas Figuras 34, 35 e 36 e 37, para as respectivas temperaturas de 15°C, 35°C, 40°C e 80°C. Os valores de P e \mathcal{R} indicam o excelente ajuste da Equação 16 aos dados experimentais deste trabalho.

Na Tabela 32 estão indicados os demais parâmetros do ajuste do modelo GAB. Os valores de Hm e Hn são determinadas pelas Equações 19 e 20 considerando-se o calor de condensação do vapor d'água H₁ igual a 43 kJ/mol, que corresponde ao valor médio entre as temperaturas 15 e 80°C.

Tabela 32. Parâmetros termodinâmicos do modelo GAB para sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha

T (°C)	Co	Cl	Ko	Kl	ΔH_c (kJ/mol)	ΔH_k (kJ/mol)	Hn (kJ/mol)	Hm (kJ/mol)
15	6,551	1,134	1,181	-0,276	2,715	-0,661	43,661	46,376
35	0,863	4,233	1,735	-0,544	10,839	-1,393	44,393	55,233
40	1,598	2,540	1,677	-0,530	6,610	-1,379	44,379	50,989
80	0,460	4,376	1,137	-0,025	12,843	-0,073	43,073	55,916

Os valores de Xm decrescem com a temperatura, conforme constatado por PARK *et al.* (1996) e PALIPANE e DRISCOLL (1992). Os valores das constantes C e K não apresentam comportamento definido com a temperatura. Os valores para a constante de correção da multicamada K estão na mesma ordem de grandeza dos valores comumente encontrados em trabalhos com biomateriais (MAROULIS, TSAMI, MARINOS-KOURIS, 1988; SANCHEZ *et al.*, 1996).

Os valores de ΔH_c , que representam a diferença de entalpias entre a monocamada e a multicamada, no processo de dessorção de umidade, variam entre 2,715 kJ/mol a 12,843 kJ/mol, e como era de se esperar são positivos, devido à forte interação exotérmica do vapor d'água com os sítios de sorção primários nas sementes de urucum.

A remoção de umidade através de evaporação requer energia para superar a entalpia de vaporização da água pura (seta em azul), mais uma parcela para vencer as forças de ligação internas da umidade ao material. Esta energia requerida é geralmente maior à medida em que o teor de umidade diminui, conforme indicado na Figura 39, para o calor isostérico integral de dessorção.

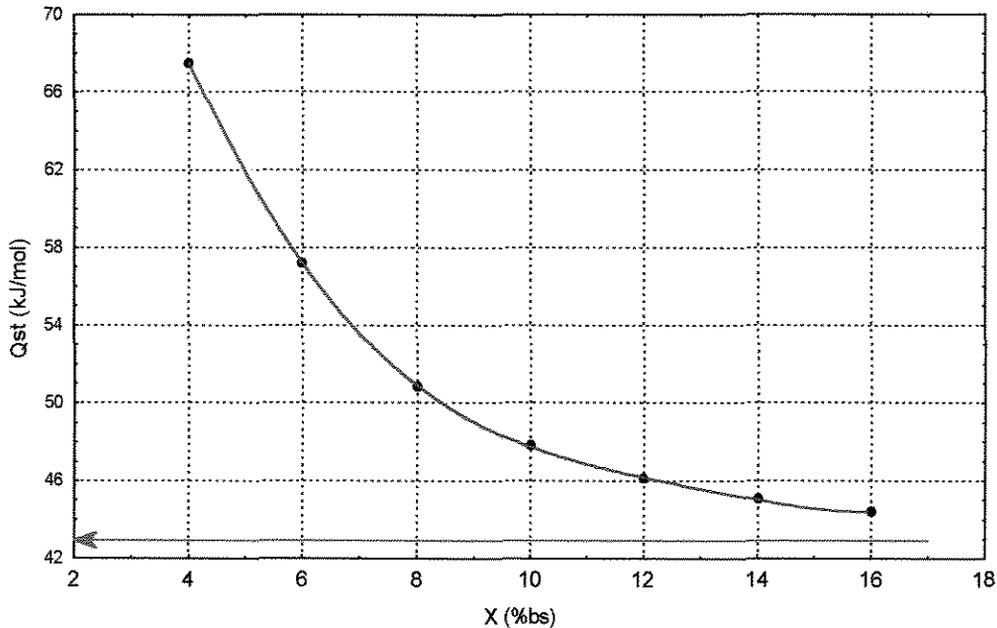


Figura 39. Comportamento do calor isostérico integral de dessorção com o teor de umidade de sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha

Desta forma, os valores de ΔH_c indicam que existe uma forte ligação entre os sólidos e a camada monomolecular de água, maior que entre a monocamada e a multicamada molecular de umidade. O mesmo é observado por MYHARA, TAYLOR, AL-BULUSHI (1996) no estudo higroscópico de tâmaras.

Os pequenos valores negativos para ΔH_k , correspondem a um calor de sorção na multicamada ligeiramente superior ao calor de condensação da água, conforme encontrado por MAROULIS, TSAMI, MARINOS-KOURIS (1988), na aplicação do modelo de GAB a frutas secas. Para as sementes de urucum deste trabalho, os valores de ΔH_k estão na faixa de -0,073 kJ/mol a -1,393 kJ/mol.

4.5 Calores isostéricos de sorção para sementes de urucum

Os valores dos calores isostéricos líquidos de dessorção de umidade para as sementes de urucum, cultivar Piave vermelha, são calculados com base na linearização da equação Clausius-Clapeyron (Equação 21), conforme os isósteres indicados na Figura 49, nas temperaturas de 15, 35, 40 e 80°C, para conteúdos de umidade do material variando de 4 %bs a 16 %bs. As relações entre temperaturas e atividades de água são obtidas do modelo ajustado de GAB.

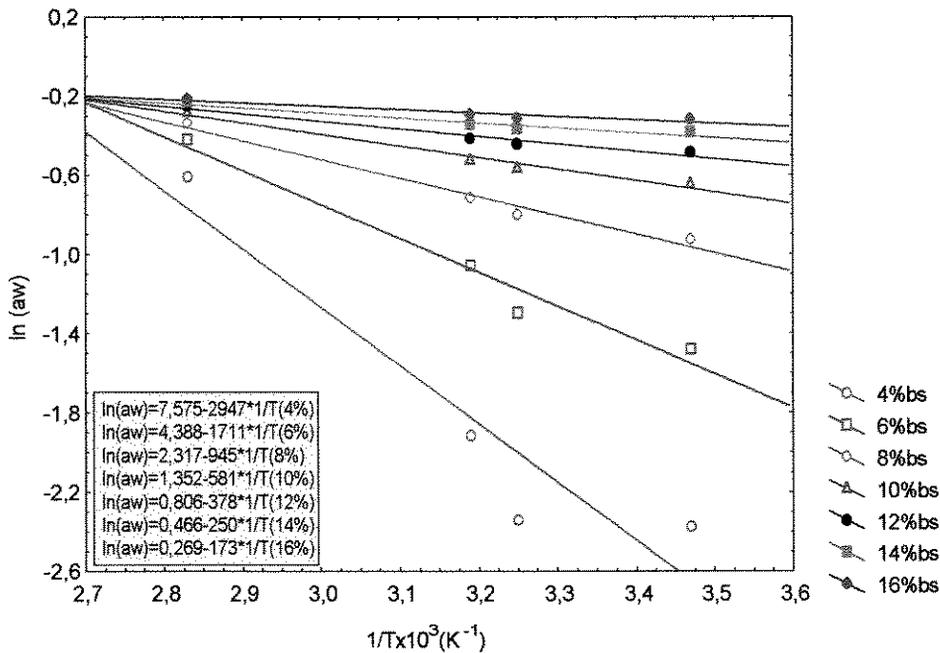


Figura 40. Isósteres obtidos da relação de Clausius-Clapeyron entre a_w e T para sementes de urucum cultivar Piave vermelha

Constata-se uma diminuição da inclinação das retas representativas com o aumento da umidade do produto, resultando um decréscimo nos valores do calor isostérico líquido de sorção correspondente ao conteúdo de umidade da amostra.

Com o aumento da temperatura de 15°C para 80°C, há um decréscimo nos valores de a_w para a faixa de teores de umidades testadas. Isso implica na diminuição do calor isostérico líquido de sorção, quando a umidade aumenta de 4 %bs para 16 %bs na abscissa do gráfico representativo, indicado na Figura 41. Para essa faixa, a variação encontrada para q_{st} é de 24,50 kJ/mol a 1,44 kJ/mol, respectivamente.

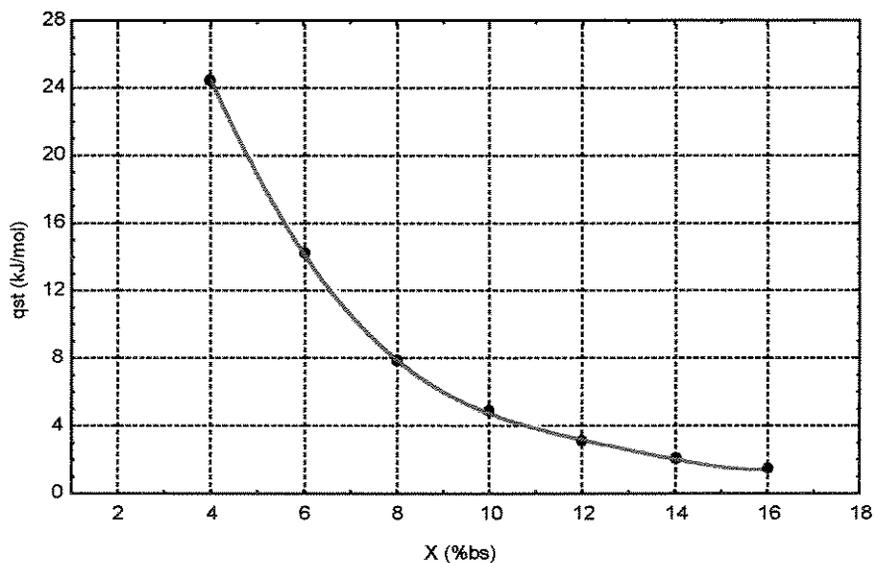


Figura 41. Calor isostérico líquido de sorção para sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha

Verifica-se um aumento acentuado no calor isostérico de sorção com a diminuição do teor de umidade, indicando a elevação na energia de interação entre o sorbato e os sítios de sorção. Observa-se também, pelo exame da Figura 41, que para se alcançar o conteúdo de umidade seguro para armazenamento das sementes, ou seja, 10 %bs, deve-se dispor de 5 kJ/mol além da energia necessária para evaporar a água ($\Delta H_v = 43$ kJ/mol), totalizando 48 kJ/mol.

4.6. Análise dos dados de secagem através do planejamento fatorial fracionário

A Tabela 33 corresponde à matriz de experimentos com as variáveis de entrada originais, contendo o resultado das variáveis de resposta, gerada através do Projeto Fatorial Fracionário 2^{5-1} com 5 repetições aleatórias para melhor estimar o erro. As corridas foram realizadas de forma randomizada, visando minimizar os erros experimentais. Vale ressaltar que os valores constantes na coluna da variável de entrada X_i consistem de valores médios, de modo que o valor da corrida 01 não corresponde a um processo de umidificação, como pode parecer.

Tabela 33. Matriz de experimentos do planejamento fatorial fracionário, com os respectivos resultados das variáveis de resposta

Corridas	Tg (°C)	G x 10 ³ (kg/s)	t (min)	m (g)	X _i (%bs)	X _f (%bs)	B _f (%bs)
01	40	14	120	500	33,2	37,06	3,76
02	80	14	120	500	42,2	13,01	3,48
03	40	36	120	500	42,2	20,78	3,34
04	80	36	120	500	33,2	13,32	3,36
05	40	14	240	500	42,2	18,23	3,55
06	80	14	240	500	33,2	12,29	2,76
07	40	36	240	500	33,2	18,53	3,43
08	80	36	240	500	42,2	10,06	3,17
09	40	14	120	1000	33,2	13,46	2,87
10	80	14	120	1000	42,2	29,39	3,89
11	40	36	120	1000	42,2	23,12	2,75
12	80	36	120	1000	33,2	17,81	3,03
13	40	14	240	1000	42,2	34,96	3,43
14	80	14	240	1000	33,2	11,94	2,55
15	40	36	240	1000	33,2	19,69	3,51
16	80	36	240	1000	42,2	14,14	3,58
17	40	36	120	1000	42,2	24,85	3,75
18	40	14	120	1000	33,2	21,76	3,53
19	80	14	240	1000	33,2	12,85	3,20
20	40	14	120	500	33,2	20,10	3,61
21	80	36	120	500	42,2	10,03	3,30

4.6.1 Resultados para a variável de resposta Xf (teor de umidade final das sementes)

4.6.1.1. Estimativa dos efeitos

Os efeitos para a variável de resposta Xf são apresentados na Tabela 34, desprezando-se as interações entre as variáveis maiores que dois, com os parâmetros sendo estimados com 5 graus de liberdade.

Tabela 34. Estimativa dos efeitos para a variável de resposta Xf

Efeitos	Valores estimados +/- erro
A: Tg	-8,69234 +/- 1,35298
B: G	-4,71734 +/- 1,35298
C: t	-3,79991 +/- 1,34771
D: m	3,64368 +/- 1,33465
E: Xi	6,62266 +/- 1,35298
AB	1,36734 +/- 1,35298
AC	-1,95009 +/- 1,34771
AD	3,03132 +/- 1,33465
AE	-3,06766 +/- 1,35298
BC	0,864759 +/- 1,35743
BD	0,0013166 +/- 1,33465
BE	-6,64751 +/- 1,34161
CD	1,86389 +/- 1,32684
CE	-1,72524 +/- 1,35743
DE	2,08632 +/- 1,33465
Grande média	19,4312 +/- 0,670803

Observa-se na Tabela 34, em primeira análise, que exceto as combinações binárias de variáveis **AB**, **BC** e **BD**, ou seja, (**TgG**), (**Gt**) e (**Gm**), as demais têm significância estatística pois seus efeitos comparativos ao desvio são maiores, evidenciando que estes efeitos não ocorrem simplesmente devido a erros operacionais durante a execução dos experimentos.

A princípio, os dados da Tabela 34 fornecem uma boa indicação de que as variáveis **t** (**C**) e **m** (**D**) poderiam ser mantidas como parâmetros (fixadas num valor adequado)¹ nos futuros ensaios de otimização deste processo. Além disso, observa-se que as interações binárias de maior significância, são aquelas que envolvem as variáveis de maior efeito, **Tg** (**A**), **G** (**B**) e **Xi** (**E**), não seria, portanto, desprezada nenhuma variável significativa contida nessas interações, caso as variáveis **C** e **D** fossem fixadas.

¹ Menor valor de tempo (t = 199min) e m = 1000g, conforme indicado na Tabela 24.

4.6.1.2 Análise de variância (ANOVA)

A Tabela 35 apresenta a análise de variância, e mostra a probabilidade que cada efeito possui de ser considerado estatisticamente significativo para a variável de resposta, ou seja, de estar fora da região de aceitação de hipótese nula, situação na qual os efeitos não são considerados apenas ruído ou erros aleatórios e sim efeitos significativos. Nesse aspecto, constata-se pela Tabela 35, que as variáveis **Tg**, **G**, **Xi** e a combinação entre **G** e **Xi** (combinação **BE**), são as que apresentam a menor probabilidade de estarem dentro do limite de aceitação da hipótese nula (sem significância), quando comparadas com as demais com uma confiança em torno de 99% (nível de significância 0,01). Isto é evidenciado pela ordem de grandeza dos valores numéricos da coluna de probabilidade (Pr). Para essas variáveis, os valores estimados para o teste F são maiores que os valores tabelados, sendo dessa forma rejeitada a hipótese nula.

Tabela 35. Análise de Variância para a variável de resposta Xf

Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Teste (F)	Probabilidade (Pr)
A: Tg	352,838973	1	352,83897	41,28	0,0014
B: G	103,919528	1	103,91953	12,16	0,0175
C:t	67,958018	1	67,95802	7,95	0,0371
D:m	63,713802	1	63,71380	7,45	0,0413
E:Xi	204,818399	1	204,81840	23,96	0,0045
AB	8,730801	1	8,73080	1,02	0,3586
AC	17,897873	1	17,89787	2,09	0,2076
AD	44,097589	1	44,09759	5,16	0,0723
AE	43,945974	1	43,94597	5,14	0,0727
BC	3,469334	1	3,46933	0,41	0,5586
BD	0,000008	1	0,00001	0,00	0,9993
BE	209,872735	1	209,87274	24,55	0,0043
CD	16,869256	1	16,86926	1,97	0,2191
CE	13,808774	1	13,80877	1,62	0,2597
DE	20,888761	1	20,88876	2,44	0,1788
Erro total	42,742296	5	8,54846	-	-

4.6.1.3. Gráfico de barras (diagrama de Pareto)

O gráfico de barras, ou de Pareto, confirma a maior significância dos efeitos individuais e combinados das variáveis indicadas anteriormente, conforme ilustrado na Figura 42, onde os efeitos individuais e combinações binárias estatisticamente significativas para Xf estão à direita da reta vertical indicativa do limite de rejeição da hipótese nula.

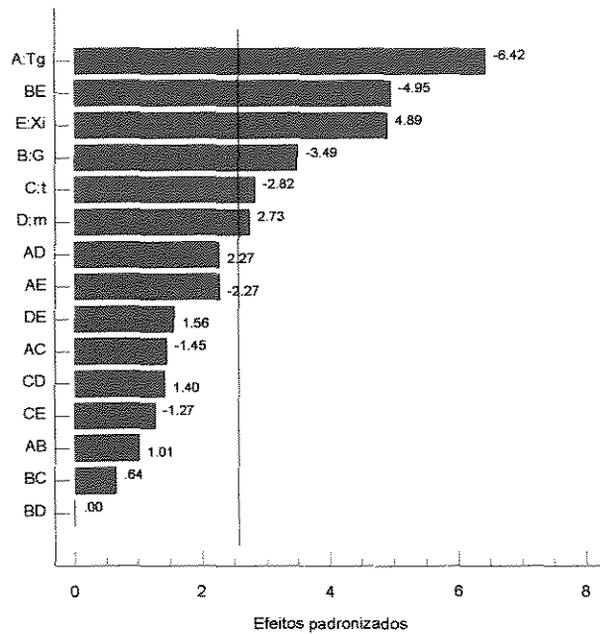


Figura 42. Gráfico de barras dos efeitos individuais e combinados para a resposta Xf

4.6.1.4. Gráfico dos efeitos individuais

A Figura 43 indica os efeitos das variáveis isoladas, evidenciando a influência que exercem na variável de resposta, aumentando ou diminuindo seu valor, quando essas variáveis de entrada passam do nível mais baixo (-) para o mais alto (+). Verifica-se que quantitativamente, a temperatura do ar e a umidade inicial das sementes de urucum são as variáveis mais significativas, seguidas de **G**, **m** e **t**. Com base na inclinação das retas representativas, verifica-se que o teor de umidade final é minimizado quando aumenta-se a **Tg**, **G** e **t**; ao passo que Xf tende a aumentar proporcionalmente com **m** e **Xi**; o que está de acordo com o comportamento esperado pela teoria, para o caso de processos parcialmente controlados por condições externas.

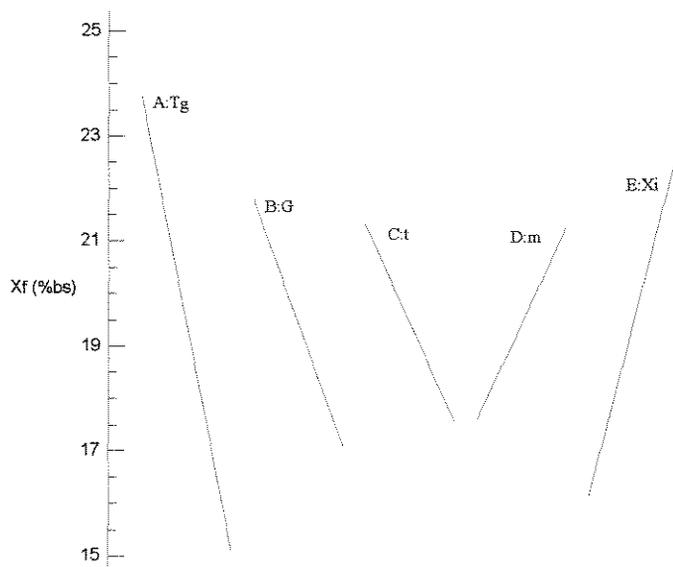


Figura 43. Efeitos principais para a resposta Xf

4.6.1.5. Gráfico em papel de probabilidade normal

A Figura 44 representa o gráfico em papel de probabilidade normal dos efeitos estimados, tomando-se por base os dados contidos na Tabela 36, conforme metodologia descrita em BOX, HUNTER e HUNTER (1978). O cálculo da probabilidade acumulada é realizado através da Equação 47, na qual i representa o número de ordem e μ os efeitos principais e interações ($\mu=15$). Os efeitos, aproximados para duas casas decimais, provêm dos valores dos efeitos estimados (Tabela 34).

$$P_b = \frac{100(i - 1/2)}{\mu} \tag{47}$$

Tabela 36. Efeitos ordenados e pontos de probabilidade P_b , para a resposta X_f .

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Efeitos	-8,69	-6,65	-4,72	-3,80	-3,07	-1,95	-1,73	$1,32 \times 10^{-3}$	0,86	1,37	1,86	2,09	3,03	3,64	6,62
E.P	-6,44	-4,96	-3,49	-2,81	-2,27	-1,44	-1,28	$9,92 \times 10^{-3}$	0,63	1,01	1,40	1,57	2,28	2,74	4,90
I.E	A:Tg	BE	B:G	C:t	AE	AC	CE	BD	BC	AB	CD	DE	AD	D:m	E:Xi
$P_b(\%)$	3,33	10,0	16,67	23,33	30,00	36,67	43,33	50,00	56,67	63,33	70,00	76,67	83,33	90,00	96,67

I.E - identificação dos efeitos

E.P - Efeitos padronizados (efeitos estimados dividido pelo erro)

$P_b(\%)$ - Probabilidade acumulada

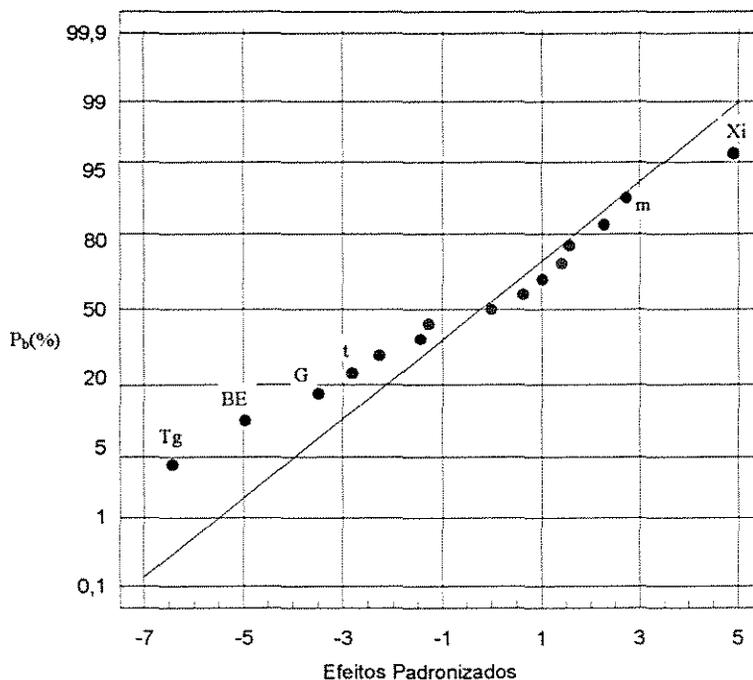


Figura 44. Gráfico em papel de probabilidade normal dos efeitos padronizados para X_f

Observando a Figura 44 nota-se que os pontos centrais do gráfico se ajustam muito bem a uma reta cuja interseção com a probabilidade acumulada (P_b) de 50% ocorre praticamente sobre o ponto zero do eixo das abscissas (efeitos padronizados). Esse fato confirma que realmente se

pode considerar esses pontos como pertencentes a uma população normal de média zero, ou seja, os efeitos apresentados por eles não possuem qualquer significado físico para a resposta X_f , constituindo-se apenas em erros aleatórios cometidos durante o processo de secagem. Isto sugere que os verdadeiros valores desses efeitos são zero, confirmando dessa forma a aceitação da hipótese nula.

Pelo que foi discutido, somente as variáveis T_g , G , X_i e a combinação binária $G X_i$ são estatisticamente significativas para o conteúdo final de umidade X_f . Devido ao afastamento da reta, esses pontos certamente não são provenientes da mesma distribuição de que vieram os pontos centrais, devendo então ser interpretados como efeitos realmente significativos.

Desta forma, constata-se a veracidade da suposição inicial de que as variáveis m e t não possuem efetiva significância para a resposta em questão, podendo então, se for conveniente, serem mantidas constantes, num valor técnica e economicamente adequado, por ocasião da otimização dessa resposta no processo de secagem de sementes de urucum.

4.6.2. Resultados para a variável de resposta B_f (conteúdo final de bixina)

As Tabelas dos efeitos estimados, considerando-se desprezíveis as interações maiores que dois (Tabela 37), bem como a respectiva análise de variância (Tabela 38), indicam que as variáveis isoladas T_g , G , X_i , m e t ou suas combinações binárias, não têm efeito significativo no teor de bixina final das sementes de urucum, nas condições operacionais praticadas neste trabalho, conforme os valores dos parâmetros estatísticos F e Pr , e das grandezas dos erros apresentados.

Tabela 37. Estimativa dos efeitos para a variável de resposta B_f , de sementes de urucum, cultivar Piave Vermelha

Efeitos	Valores estimados +/- erro
A: T_g	-0,162152 +/- 0,200876
B: G	-0,0309016 +/- 0,200876
C: t	-0,113448 +/- 0,200093
D: m	0,00396004 +/- 0,198154
E: X_i	0,166598 +/- 0,200876
AB	0,0571516 +/- 0,200876
AC	-0,222802 +/- 0,200093
AD	0,15479 +/- 0,198154
AE	0,08466516 +/- 0,200876
BC	0,300856 +/- 0,201535
BD	0,02104 +/- 0,198154
BE	-0,0340061 +/- 0,199186
CD	0,116086 +/- 0,196994
CE	-0,141644 +/- 0,201535
DE	0,21354 +/- 0,198154
Grande média	3,34425 +/- 0,0995932

Tabela 38. Análise de Variância para a variável de resposta Bf

Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Teste (F)	Probabilidade (Pr)
A: Tg	0,12278529	1	0,1227853	0,65	0,4644
B: G	0,00445930	1	0,0044593	0,02	0,8853
C:t	0,06057385	1	0,0605738	0,32	0,6010
D:m	0,00007526	1	0,0000753	0,00	0,9850
E:Xi	0,12961193	1	0,1296119	0,69	0,4531
AB	0,01525320	1	0,0152532	0,08	0,7903
AC	0,23363214	1	0,2336321	1,24	0,3161
AD	0,11498411	1	0,1149841	0,61	0,4780
AE	0,03346372	1	0,0334637	0,18	0,6952
BC	0,41992496	1	0,4199250	2,23	0,1957
BD	0,00212443	1	0,0021244	0,01	0,9206
BE	0,00549228	1	0,0054923	0,03	0,8729
CD	0,06543558	1	0,0654356	0,35	0,5873
CE	0,09307969	1	0,0930797	0,49	0,5207
DE	0,21883187	1	0,2188319	1,16	0,3304
Erro total	0,94216660	5	0,1884333	-	-

Entretanto, a análise da Tabela 37 permite constatar que, mesmo sem ter efeito estatisticamente significativo na variável de resposta, o aumento da temperatura do ar e do tempo de secagem, sugerem uma tendência de reduzir a concentração final de bixina, e que a combinação dessas duas variáveis também contribuem para a diminuição de Bf, o que está de acordo com as informações sobre a instabilidade térmica do pigmento. Porém, observa-se também uma tendência positiva com relação aos teores finais de bixina, ao aumentar o valor da umidade inicial das sementes (variável Xi). Esse fato pode estar relacionado ao maior tempo em que o sólido fica com temperatura próxima à temperatura de bulbo úmido do ar; pois com maior teor inicial de umidade, existe uma maior possibilidade de parte considerável da secagem ocorrer no período de velocidade constante, contribuindo então para uma perda menor do corante por degradação térmica.

Portanto, com relação a esta variável de resposta (Bf), conclui-se que para os níveis das variáveis operacionais da secagem consideradas, não há perda apreciável de bixina, ou seja, que fique abaixo dos limites de concentração que comprometam a qualidade das sementes. O teor inicial médio deste pigmento para a cultivar Piave Vermelha no início das corridas foi 4,7%_{bs}, e a mínima concentração resultante após a secagem foi de 2,55%_{bs}, acima dos 2,5% proposto para semente de qualidade tipo 1 e também dentro das exigências atuais das empresas compradoras de sementes. Esse valor foi obtido na corrida 10, com os maiores valores de Tg, t, G e com o menor valor de Xi, o que está de acordo com as estimativas do planejamento estatístico e com as características de instabilidade do corante existente no material. Assim, pode ser observado através da análise da Figura 45, obtida com base na Tabela 39, que não há influências significativas de nenhuma das variáveis de entrada ou de suas combinações, na variável de resposta Bf, dentro dos limites estudados neste trabalho, sendo então aceita a hipótese nula.

Tabela 39. Efeitos ordenados e pontos de probabilidade Pb, para a resposta Bf

i	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
Efeitos	-0,22	-0,16	-0,14	-0,11	-0,034	-0,031	0,039	0,021	0,057	0,085	0,116	0,155	0,167	0,21	0,30
E.P	-1,1	-0,8	-0,7	-0,55	-0,17	-0,155	0,197	0,106	0,285	0,425	0,592	0,783	0,835	1,06	1,5
I.E	AC	A:Tg	CE	C:t	BE	B:G	D:m	BD	AB	AE	CD	AD	E:Xi	DE	BC
Pb(%)	3,33	10,0	16,67	23,33	30,00	36,67	43,33	50,00	56,67	63,33	70,00	76,67	83,33	90,00	96,67

I.E - identificação dos efeitos

E.P - Efeitos padronizados (efeitos estimados dividido pelo erro)

Pb (%) - Probabilidade acumulada

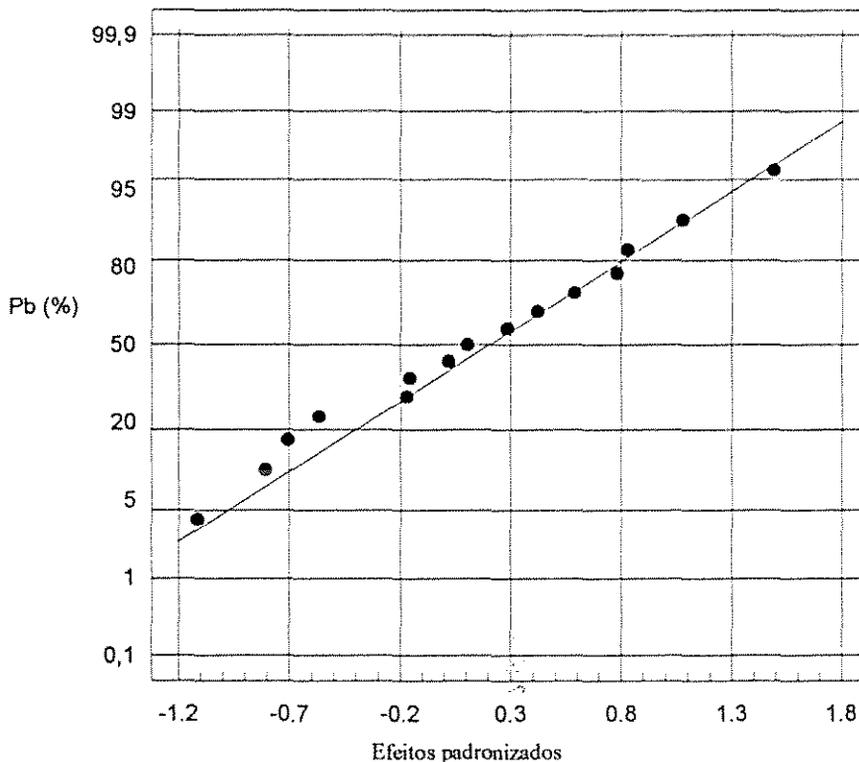


Figura 45. Gráfico de probabilidade dos efeitos padronizados para Bf

4.7 Análise dos dados de secagem através da Metodologia de Superfícies de Resposta

Na Tabela 40 estão representadas as variáveis originais e codificadas e seus respectivos níveis, com os valores das respostas obtidas no procedimento de otimização da secagem de sementes de urucum conforme projeto experimental constituído de planejamento fatorial (corridas 1 a 8), planejamento composto central (corridas 9 a 14) e replicatas no ponto central (corrida 15 a 20).

Tabela 40. Condições experimentais e resultados da metodologia de superfícies de resposta utilizada na segunda fase

Corridas	Variáveis codificadas			Variáveis originais			Variáveis de resposta	
	x_1	x_2	x_3	Tg (°C)	t (min)	G (kg/h)*	Xf(%bs)	Bf(%bs)
01	-	-	-	40	240	46,8	15,84	3,00
02	+	-	-	80	240	46,8	11,28	2,79
03	-	+	-	40	360	46,8	17,83	2,32
04	+	+	-	80	360	46,8	7,70	2,56
05	-	-	+	40	240	108,0	13,10	2,56
06	+	-	+	80	240	108,0	9,22	3,00
07	-	+	+	40	360	108,0	12,78	2,50
08	+	+	+	80	360	108,0	6,51	2,76
09	-1,68	0	0	26	300	77,4	16,16	2,69
10	+1,68	0	0	94	300	77,4	6,75	2,67
11	0	-1,68	0	60	199	77,4	11,10	2,87
12	0	+1,68	0	60	401	77,4	10,07	2,54
13	0	0	-1,68	60	300	25,2	15,15	2,59
14	0	0	+1,68	60	300	129,6	10,76	2,50
15	0	0	0	60	300	77,4	11,35	2,30
16	0	0	0	60	300	77,4	11,27	2,90
17	0	0	0	60	300	77,4	11,36	2,74
18	0	0	0	60	300	77,4	10,65	2,75
19	0	0	0	60	300	77,4	11,90	2,65
20	0	0	0	60	300	77,4	11,29	2,84

* Por conveniência, as unidades da variável de entrada x_3 (G) correspondente à vazão mássica do ar de secagem, foram mudadas de kg/s para kg/h.

Os efeitos estimados das variáveis isoladas e de suas combinações binárias mostradas na Tabela 41 indicam que, a princípio, somente a combinação x_1x_1 não teria efeito significativo para a resposta Xf, devido este efeito apresentar valor menor que o erro. Observa-se também que o aumento dos níveis inferior para o superior das variáveis isoladas x_1 , x_2 e x_3 , propicia um decréscimo na variável de resposta, sendo mais evidente com a variável x_1 (Tg), por possuir um efeito mais significativo.

Tabela 41. Efeitos Estimados para X_f , na segunda fase dos experimentos

Efeitos	Valores estimados +/- erro
x_1 : Tg	- 5,95534 +/- 0,215057
x_2 : t	- 0,930263 +/- 0,215057
x_3 : G	- 2,69799 +/- 0,215057
$x_1 x_2$	- 1,99 +/- 0,280986
$x_1 x_3$	1,135 +/- 0,280986
$x_2 x_3$	- 0,36 +/- 0,280986
$x_1 x_1$	0,147576 +/- 0,209351
$x_2 x_2$	- 0,467602 +/- 0,209351
$x_3 x_3$	1,20823 +/- 0,209351
Grande média	11,3002 +/- 0,162069

Para a determinação da significância estatística dos efeitos das variáveis de entrada na resposta teor final de umidade das sementes de urucum, X_f , com mais propriedade, é realizada uma análise de variância conforme indicado na Tabela 42. A Tabela mostra os efeitos das variáveis de secagem sobre a resposta na forma linear, quadrática e com termos cruzados, que podem ser avaliados com base nas estatísticas F e Pr.

Pelo exame da Tabela 42 verifica-se que as variáveis de entrada x_1 (Tg), x_3 (G) e as combinações $x_1 x_2$ (Tgt) e $x_3 x_3$ (G^2) são estatisticamente significativas em um nível de significância menor que 0,5%; x_2 (t) e $x_1 x_3$ (TgG) a um nível de significância menor que 1% e a combinação $x_2 x_2$ (t^2) pode afetar a resposta a um nível de significância menor que 10%. As demais combinações não são estatisticamente significativas para a resposta X_f . Neste trabalho serão considerados como estatisticamente significativos os efeitos das variáveis com nível de significância de até 10%.

O teste de falta de ajuste indicado na Tabela 42, consiste em uma medida da falha que o modelo pode apresentar ao predizer as respostas obtidas com base nos dados experimentais e o coeficiente R^2 representa a proporção de variabilidade em torno da média que é explicada ou descrita pela equação de regressão. Assim, verifica-se que para o modelo polinomial de 2ª ordem proposto não há evidência de falta de ajuste, já que o valor de F calculado ($F_{5,5} = 2,37$) é menor que o valor de F tabelado ($F_{5,5} = 5,05$) ao nível de 95% de confiança.

O valor do coeficiente de determinação R^2 indica que 98,43% de variância é explicada pela regressão de um máximo de 99,53% de variação explicável, obtida em função das médias quadráticas total e devido à falta de ajuste, conforme BARROS NETO, SCARMINIO e BRUNS (1995). Devido a alta proporção de variabilidade explicada para a resposta X_f , o modelo de 2ª ordem proposto é adequado para a descrição do processo e pode predizer com segurança as variações nos teores de umidade finais das sementes de urucum sujeitas à secagem convectiva em leito fixo, em função das variáveis estatisticamente significativas.

Tabela 42. ANOVA para Xf, na segunda fase dos experimentos

Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Teste F	Probabilidade (Pr)
x ₁ : Tg	121,08912	1	121,08912	766,84	0,0000
x ₂ : t	2,95463	1	2,95463	18,71	0,0075
x ₃ : G	24,85268	1	24,85268	157,39	0,0001
x ₁ x ₂	7,92020	1	7,92020	50,16	0,0009
x ₁ x ₃	2,57645	1	2,57645	16,32	0,0099
x ₂ x ₃	0,25920	1	0,25920	1,64	0,2563
x ₁ x ₁	0,07847	1	0,07847	0,50	0,5195
x ₂ x ₂	0,78777	1	0,78777	4,99	0,0758
x ₃ x ₃	5,25951	1	5,25951	33,31	0,0022
Falta de ajuste	1,86878	5	0,37376	2,37	0,1831
Erro Puro	0,78953	5	0,15791	-	-
Total (Correlação)	168,850255	19	-	-	-

$$R^2 = 0,9843$$

Tabela 43. Coeficientes de regressão para Xf, na segunda fase dos experimentos

Parâmetros	Coeficientes
Constante	11,3002
x ₁ : Tg	-2,97767
x ₂ : t	-0,465131
x ₃ : G	-1,349
x ₁ x ₂	-0,995
x ₁ x ₃	0,5675
x ₂ x ₃	-0,18
x ₁ x ₁	0,0737879
x ₂ x ₂	0,233801
x ₃ x ₃	0,604114

As curvas ilustradas na Figura 46 mostram os perfis dos teores de umidade adimensional *versus* tempo de secagem, obtidos experimentalmente, para as seis repetições no ponto central do planejamento experimental utilizado para o estudo do processo de secagem das sementes de urucum, desenvolvido na segunda etapa de ensaios. Nota-se que existe boa reprodutibilidade no ponto central do experimento, onde as variáveis de entrada originais têm os valores indicados na Tabela 40 correspondentes ao código zero.

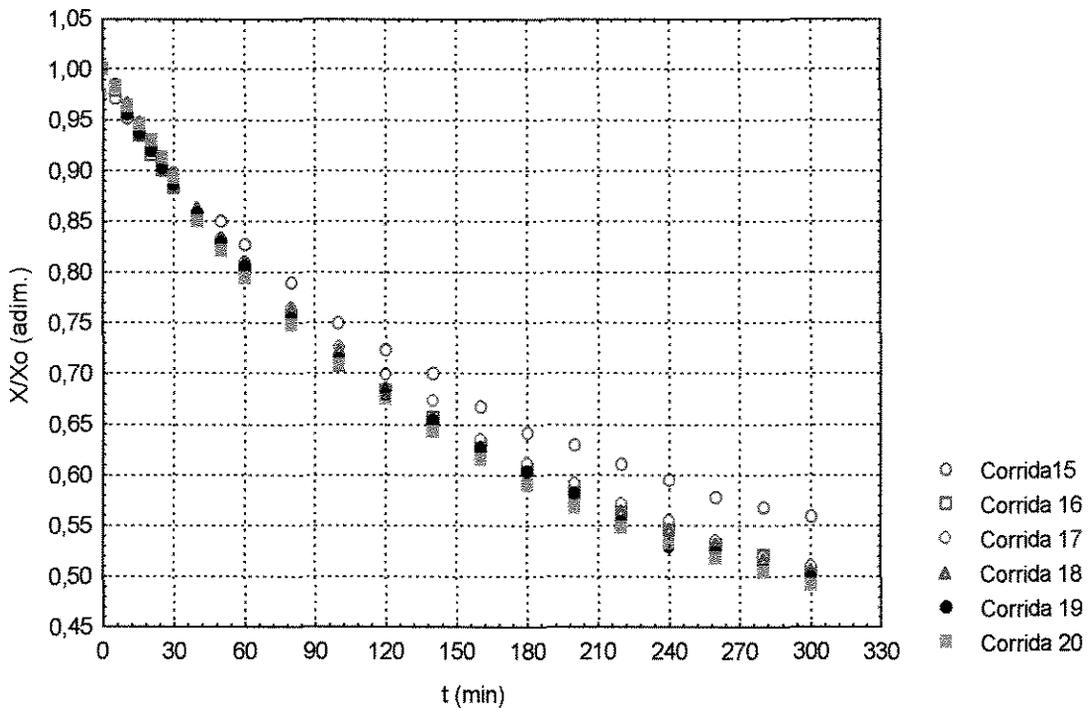


Figura 46. Reprodutibilidade da cinética de secagem, no ponto central do projeto experimental desenvolvido na segunda fase

Os resultados da análise de regressão múltipla com a indicação dos respectivos coeficientes das variáveis de entrada e suas combinações estão indicadas na Tabela 43. Com base nesta análise propõe-se o modelo estatístico de 2ª ordem conforme polinômio representado na Equação 25, utilizando somente os coeficientes e a variáveis codificada, estatisticamente significativas para a resposta X_f , dado pela Equação 48:

$$\hat{Y} = 11,3002 - 2,97767x_1 - 0,465131x_2 - 1,349x_3 - 0,995x_1x_2 + 0,5675x_1x_3 - 0,233801x_2^2 + 0,604114x_3^2 \quad (48)$$

A Equação 52 descreve o modelo para a estimativa do conteúdo de umidade final de sementes de urucum, cultivar Piave vermelha, em função das variáveis originais T_g (°C), t (min) e G (kg/h), a partir das relações entre as variáveis independentes dadas pelas Equações 49, 50 e 51, com base na Equação 26:

$$x_1 = \frac{T_g - 60}{20} \quad (49)$$

$$x_2 = \frac{t - 300}{60} \quad (50)$$

$$x_3 = \frac{G - 77,4}{30,6} \quad (51)$$

$$Xf = 13,372 + 0,028Tg + 0,081t - 0,2G - 0,00083Tgt + 0,00093TgG - 0,000065t^2 + 0,00065G^2 \quad (52)$$

A análise do modelo é realizada então, de acordo com os procedimentos constantes no item 3.4.2.1.

A temperatura e a vazão do ar de secagem e o tempo de processamento mostraram exercer considerável influência na redução do conteúdo de umidade das sementes de urucum. A observação dos resultados e a análise estatística indicam que um aumento nos valores de **Tg**, **t** e **G**, provocam uma sensível diminuição no valor de **Xf**, favorecendo o processo de secagem.

Para melhor visualização do ponto ótimo de operação, construiu-se as superfícies de resposta e as correspondentes curvas de níveis ou contornos em função das variáveis codificadas, utilizando-se o aplicativo *Statistica*®. São graficados no eixo z a resposta **Xf** (%bs) e nos eixos x e y duas variáveis de interesse, mantendo-se a outra no ponto estacionário, ou seja, atribuindo-lhe os valores x_{1s} , x_{2s} e x_{3s} , de acordo com a situação. Note que, embora as coordenadas desses gráficos variem do limite de -2 a +2, as curvas obtidas devem ser interpretadas dentro do limite de -1,68 a +1,68, de acordo com a parte axial do planejamento adotado.

Desse modo, as Figuras 47 e 48 representam respectivamente a superfície de resposta e os contornos, descritos pela Equação 48 para a resposta **Xf** em função de x_1 (**Tg**) e x_2 (**t**), mantendo-se x_3 (**G**) fixo no ponto estacionário ($x_3 = 0,7728$). De modo análogo, as Figuras 49, 50, 51 e 52 indicam as superfícies de respostas e as respectivas curvas de níveis para a resposta **Xf** em função das variáveis codificadas indicadas nesses gráficos.

Avaliando-se as superfícies de respostas e os contornos indicados nas Figuras 47 a 52 percebe-se com clareza que realmente as condições que propiciam a diminuição de **Xf** e portanto favorecem o processo, correspondem aos valores mais elevados das variáveis x_1 , x_2 e x_3 .

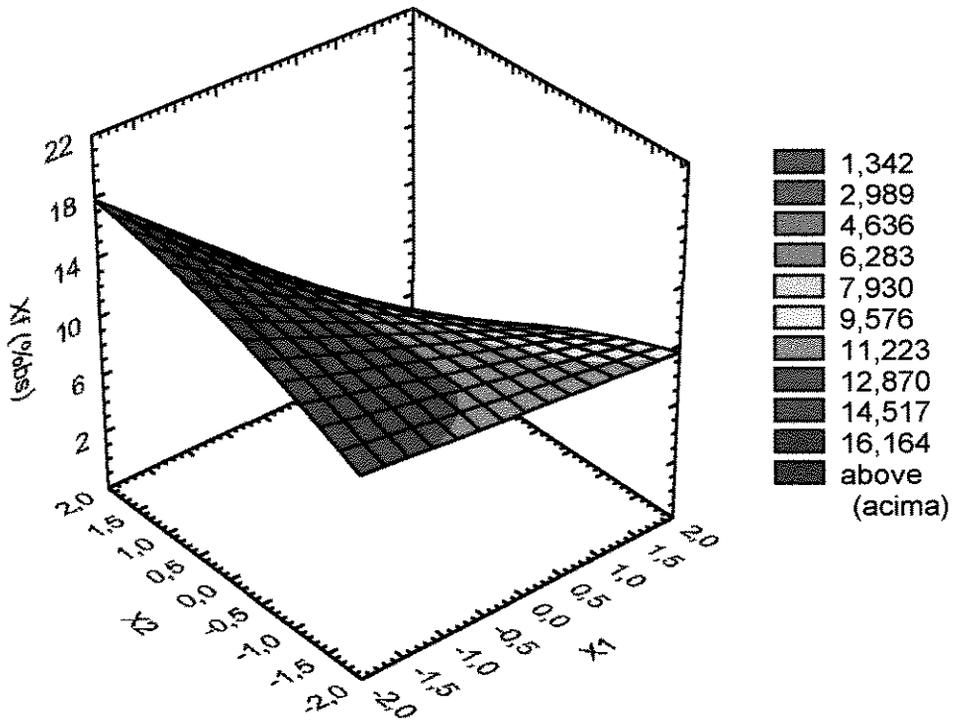


Figura 47. Superfície de resposta para X_f em função de x_1 e x_2 para $x_3 = 0,7728$

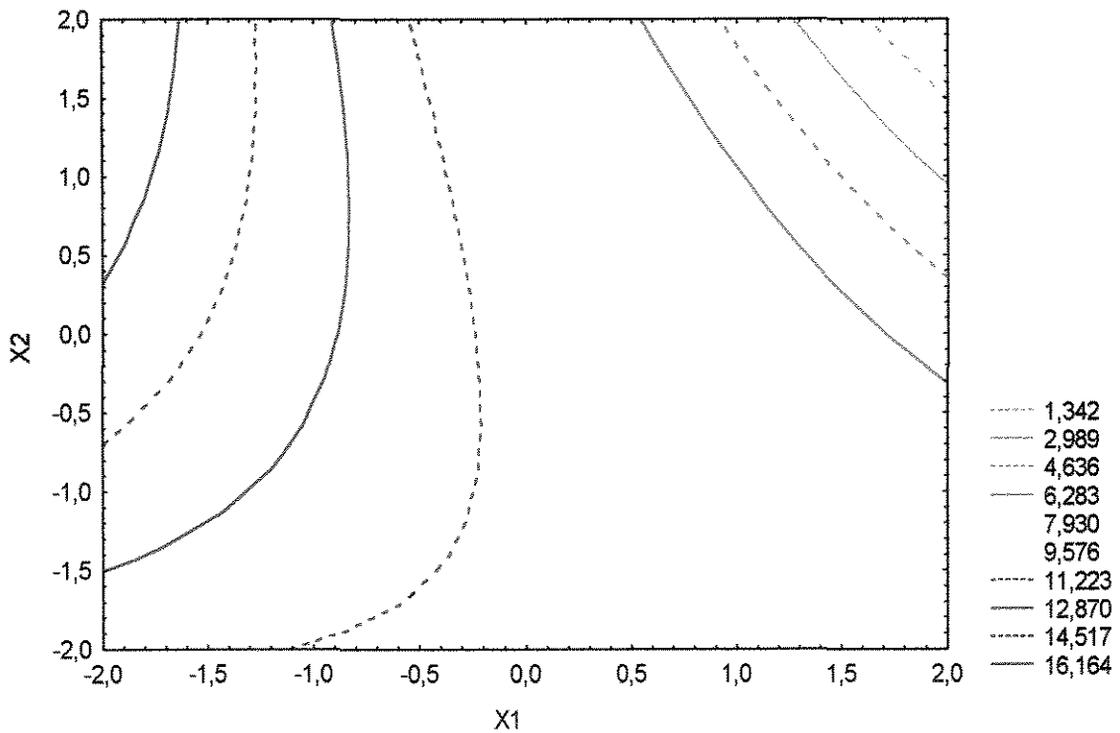


Figura 48. Curvas de nível para X_f em função de x_1 e x_2 para $x_3 = 0,7728$

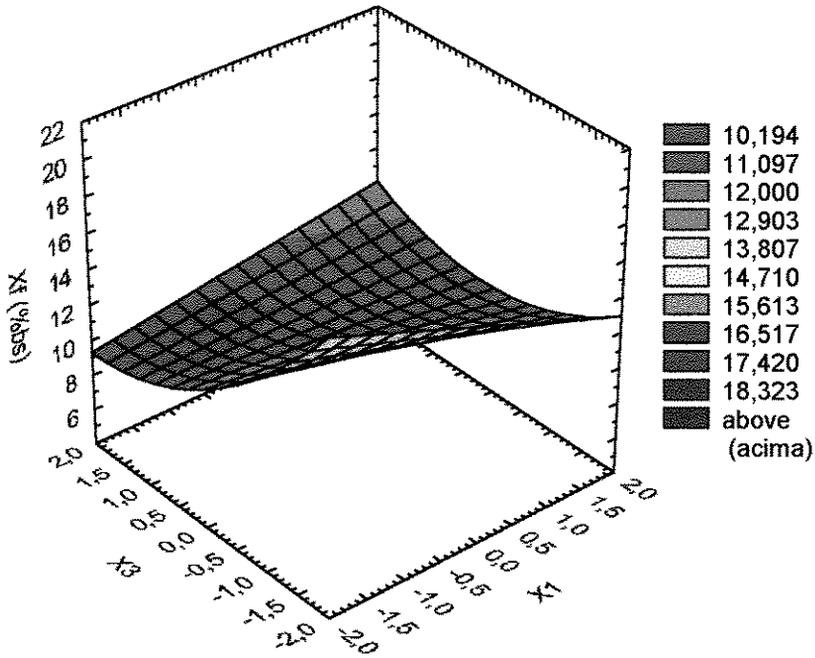


Figura 49. Superfície de resposta para X_f em função de x_1 e x_3 para $x_2 = -2,5518$

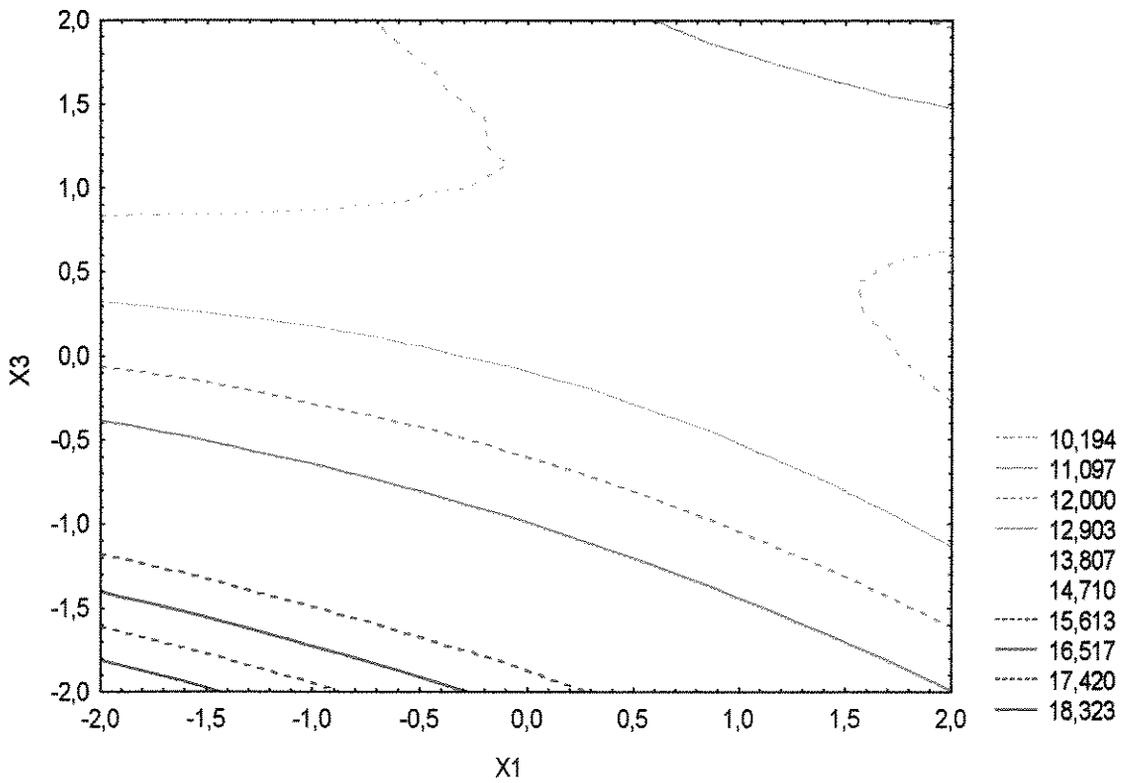


Figura 50. Curvas de nível para X_f em função de x_1 e x_3 para $x_2 = -2,5518$

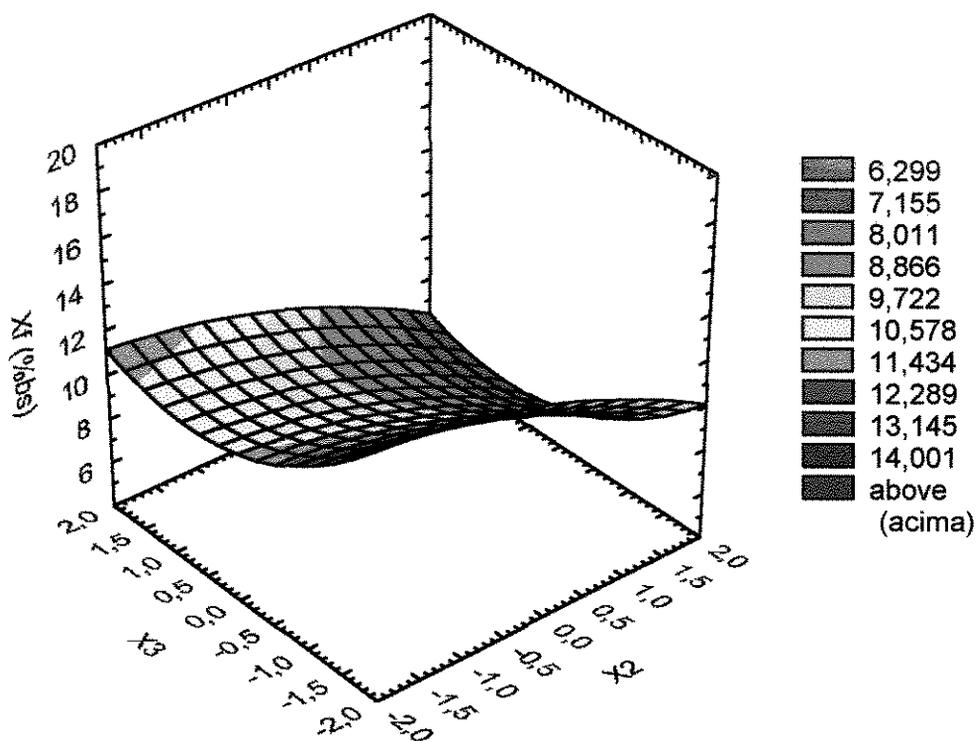


Figura 51. Superfície de resposta para X_f em função de x_2 e x_3 para $x_1 = 0,7317$

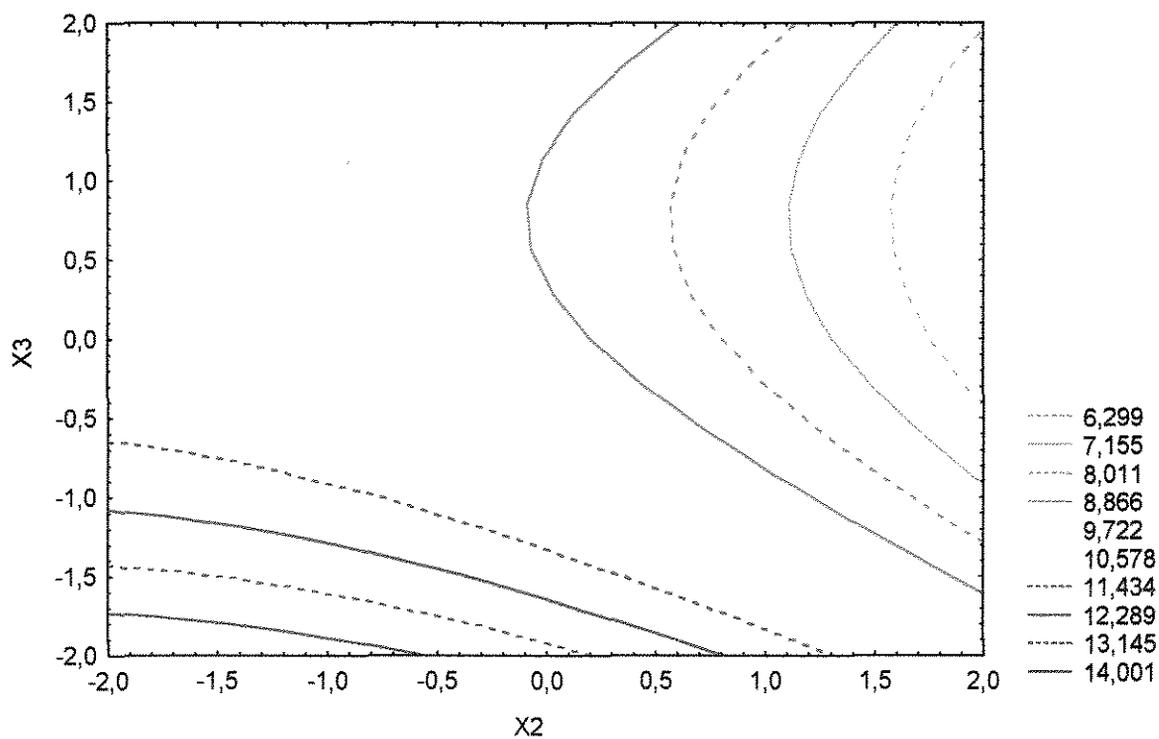


Figura 52. Curvas de nível para X_f em função de x_2 e x_3 para $x_1 = 0,7317$

A determinação das coordenadas do ponto estacionário, bem como o correspondente valor da resposta neste ponto e as características das superfícies de resposta obtidas para o teor de umidade das sementes, são efetuadas com base na metodologia descrita no item 3.4.2.1. Partindo-se da equação quadrática do modelo dado pela Equação 48, temos:

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_1} = -2,97767 - 0,995x_2 + 0,5675x_3 \quad (53)$$

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_2} = -0,465131 - 0,995x_1 - 0,467602x_3 \quad (54)$$

$$\frac{\partial \hat{Y}}{\partial x_3} = -1,349 + 0,5675x_1 + 1,208228x_3 \quad (55)$$

Resolvendo simultaneamente esse sistema de equações, encontra-se as coordenadas do ponto estacionário x_{1s} , x_{2s} e x_{3s} e o correspondente valor de \hat{Y}_s através da substituição desses pontos na Equação 48:

$$x_{1s} = 0,7317$$

$$x_{2s} = -2,5518$$

$$x_{3s} = 0,7728$$

$$\hat{Y}_s = 10,2829$$

Com a localização desta coordenada, é possível a determinação da natureza das superfícies de resposta nas vizinhanças imediatas deste ponto através da análise canônica, descrita anteriormente. Assim, através da Equação 46, estima-se a distância do ponto estacionário (x_{1s} , x_{2s} , x_{3s}) ao ponto central:

$$Ds = \sqrt{(0,7317)^2 + (-2,5518)^2 + (0,7728)^2} = 2,765$$

indicando que se encontram relativamente próximos, o que permite transformar o modelo proposto para uma forma canônica do tipo apresentado na Equação 45, para uma melhor compreensão da natureza das superfícies em análise.

Dividindo-se por 2 os termos das Equações 53, 54 e 55 e calculando os autovalores e os correspondentes autovetores para esse sistema de equações, com auxílio do aplicativo *Mathematica*®, temos:

Autovalores

$$\lambda_1 = 0.7613$$

$$\lambda_2 = -0.6536$$

$$\lambda_3 = 0.2627$$

Autovetores:

$$[0,4708; -0,2354; 0,8502]$$

$$[0,6382; 0,7563; -0,1440]$$

$$[0,6091; -0,6104; -0,5063]$$

Desta maneira, se obtém a equação canônica, na forma:

$$\hat{Y} = 10,2829 + 0,7613W_1^2 - 0,6536W_2^2 + 0,2627W_3^2 \quad (56)$$

com as relações lineares das coordenadas iniciais representadas pelas equações:

$$W_1 = 0,4708x_1 - 0,2354x_2 + 0,8502x_3 - 0,7356 \quad (57)$$

$$W_2 = 0,6382x_1 + 0,7563x_2 - 0,1440x_3 + 0,0463 \quad (58)$$

$$W_3 = 0,6091x_1 - 0,6104x_2 - 0,5063x_3 - 0,7297 \quad (59)$$

onde W_1 , W_2 e W_3 representam as variáveis independentes na forma canônica.

Verifica-se pelo sinal e magnitude dos autovalores (λ_1 e λ_3 positivos e λ_2 negativos) que o ponto estacionário corresponde a um minimax ou ponto de sela, o que já estava evidenciado, em primeira análise, pelo formato das superfícies de respostas obtidas e principalmente pelo comportamento das curvas de nível. A Equação canônica (Equação 56) indica que o valor da resposta predita no centro do experimento é 10,2829; ou seja, teor de umidade de sementes de 10,28 %bs.

As magnitudes (módulos) dos autovalores λ_1 , λ_2 e λ_3 , que são os respectivos coeficientes de W_1 , W_2 e W_3 na equação canônica indicam que a altura da superfície de resposta predita muda mais rapidamente ao longo do eixo W_1 do que ao longo do eixo W_2 , e que a resposta muda menos ainda na direção do eixo W_3 , ao se afastar do ponto estacionário. Isto demonstra que a ordem de sensibilidade relativa da variável de resposta em consequência de alterações nas variáveis de entrada associadas às direções W_1 , W_2 , W_3 é $x_1 > x_2 > x_3$, ou em variáveis originais: $T_g > t > G$.

Os elementos do autovetor associados com o autovalor λ_3 (0,6091, -0,6104, -0,5063) e que representam os coeficientes da Equação 59, sugerem que no deslocamento ao longo do eixo

W_3 , o valor das variáveis x_1 (Tg) e x_2 (t) são em algum momento compensatórios, onde um aumento em x_1 poderá ser contrabalançado por um decréscimo em x_2 .

A Figura 53 mostra a comparação entre os valores experimentais e os calculados através do modelo polinomial para a resposta X_f . Conforme a aglomeração de pontos bem próximos à reta representativa, verifica-se um excelente ajuste entre os valores observados e os preditos. A distribuição dos resíduos de maneira aleatória verificado na Figura 54, indica que o modelo proposto é adequado, não havendo portanto inconsistência entre os valores da resposta estimados e os experimentais.

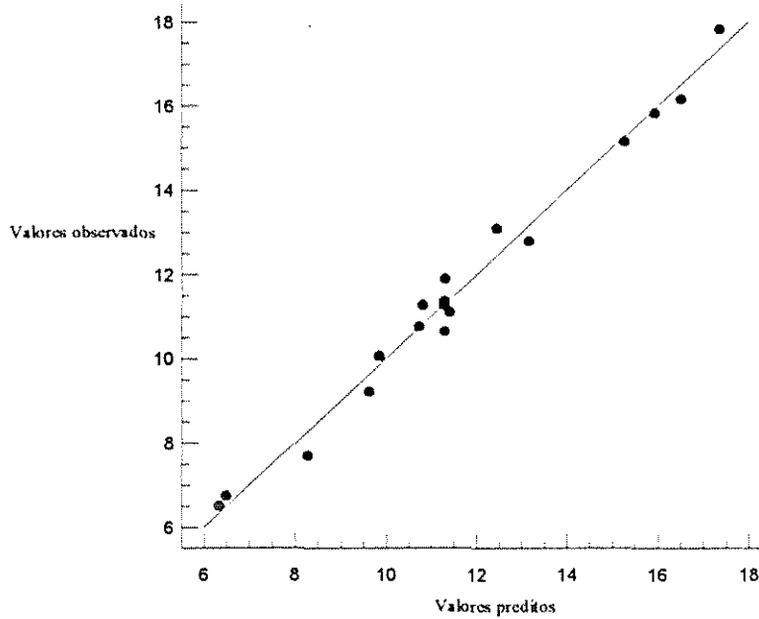


Figura 53. Comparação entre valores preditos e experimentais para X_f

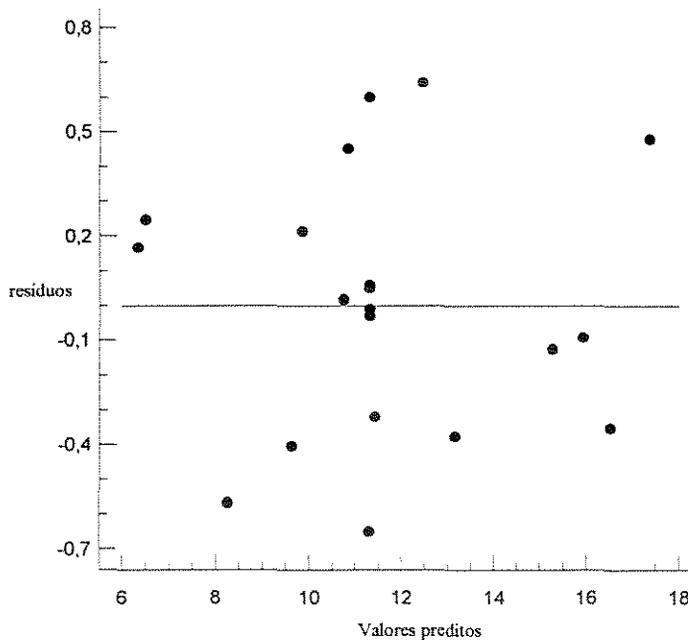


Figura 54. Distribuição dos resíduos para a resposta X_f

Pelo exame das grandezas dos efeitos estimados das variáveis de entrada para a variável de resposta conteúdo final de bixina, Bf, mostradas na Tabela 44, constata-se que, em primeira análise, somente o tempo de secagem possui valor do efeito superior ao erro. A análise de variância confirma que somente o tempo de secagem possui realmente significado estatístico para Bf, ao nível de 10% de confiança (Tabela 45).

Verifica-se ainda, ao se examinar a Tabela 45, que não há evidência de falta de ajuste pois F calculado igual a 0,46 é bem menor do que o valor da razão F tabelado ao nível de 95% de confiança, $F_{5,5} = 5,05$. Neste caso, o coeficiente de determinação R^2 indica que o modelo consegue explicar 55,28% da variabilidade, num total máximo explicável de 69,37%.

Tabela 44. Efeitos Estimados para Bf, na segunda fase dos experimentos

Efeitos	Valores estimados +/- erro
Grande média	2,69518 +/- 0,0867353
x_1 : Tg	0,10198 +/- 0,115094
x_2 : t	-0,258476 +/- 0,115094
x_3 : G	$-1,9946 \times 10^{-4}$ +/- 0,115094
$x_1 x_2$	0,0675 +/- 0,150377
$x_1 x_3$	0,1675 +/- 0,150377
$x_2 x_3$	0,1525 +/- 0,150377
$x_1 x_1$	$7,69283 \times 10^{-3}$ +/- 0,11204
$x_2 x_2$	0,0253703 +/- 0,11204
$x_3 x_3$	-0,0877658 +/- 0,11204

Tabela 45. ANOVA para Bf, na segunda fase dos experimentos

Efeitos	Soma dos Quadrados	Graus de Liberdade	Quadrado médio	Teste F	Probabilidade (Pr)
x_1 : Tg	0,0355075	1	0,0355075	0,79	0,4252
x_2 : t	0,2281047	1	0,2281047	5,04	0,0747
x_3 : G	0,0000001	1	0,0000001	0,00	0,9987
$x_1 x_2$	0,0091125	1	0,0091125	0,20	0,6769
$x_1 x_3$	0,0561125	1	0,0561125	1,24	0,3160
$x_2 x_3$	0,0465125	1	0,0465125	1,03	0,3571
$x_1 x_1$	0,0002132	1	0,0002132	0,00	0,9486
$x_2 x_2$	0,0023190	1	0,0023190	0,05	0,8321
$x_3 x_3$	0,0277523	1	0,0277523	0,61	0,4769
Falta de ajuste	0,1039402	5	0,0207880	0,46	0,7932
Erro Puro	0,2261333	5	0,0452267	-	-
Total (Correlação)	0,73805500	19	-	-	-

$$R^2 = 0,5528$$

Tabela 46. Coeficientes de regressão para Bf, na segunda fase dos experimentos

Parâmetros	Coeficientes
Constante	2,69518
x_1 : Tg	0,0509899
x_2 : t	-0,129238
x_3 : G	$-9,97298 \times 10^{-5}$
$x_1 x_2$	0,03375
$x_1 x_3$	0,08375
$x_2 x_3$	0,07625
$x_1 x_1$	$3,84641 \times 10^{-3}$
$x_2 x_2$	0,0126852
$x_3 x_3$	-0,0438829

Utilizando somente a constante e o coeficiente da variável x_2 (t), dados na Tabela 46 e obtidos da análise de regressão, é proposto o modelo linear expresso através da Equação 60, em função da variável codificada,

$$\hat{Y} = 2,69518 - 0,1292x_2 \quad (60)$$

e da Equação 61 em função da variável original,

$$Bf = 3,35 - 0,0022t \quad (61)$$

determinada através da relação entre x_2 e t dada pela Equação 50, onde t está em min.

A superfície de resposta para Bf e as respectivas curvas de nível, mostradas nas Figuras 55 e 56 em função de x_1 e x_2 , indicam que o teor de bixina é praticamente independente da temperatura de secagem para a faixa estudada e fortemente dependente do tempo de processamento. Esse resultado confirma as afirmações da literatura sobre a maior importância dos efeitos indesejáveis que o tempo de exposição da bixina à luz e oxigênio acarretam sobre a estabilidade deste corante.

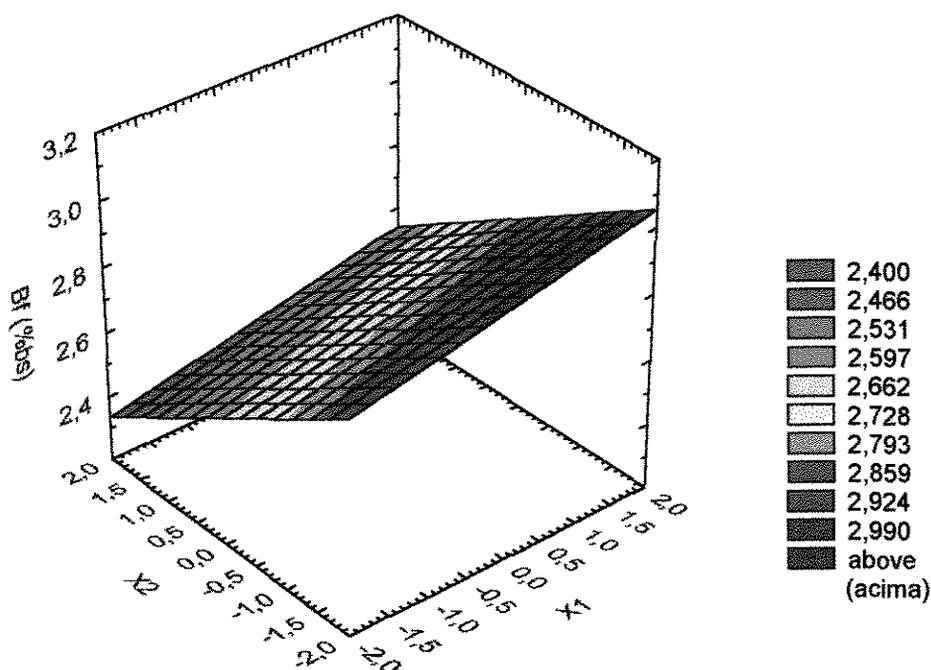


Figura 55. Superfície de resposta para Bf em função de x_1 e x_2 .

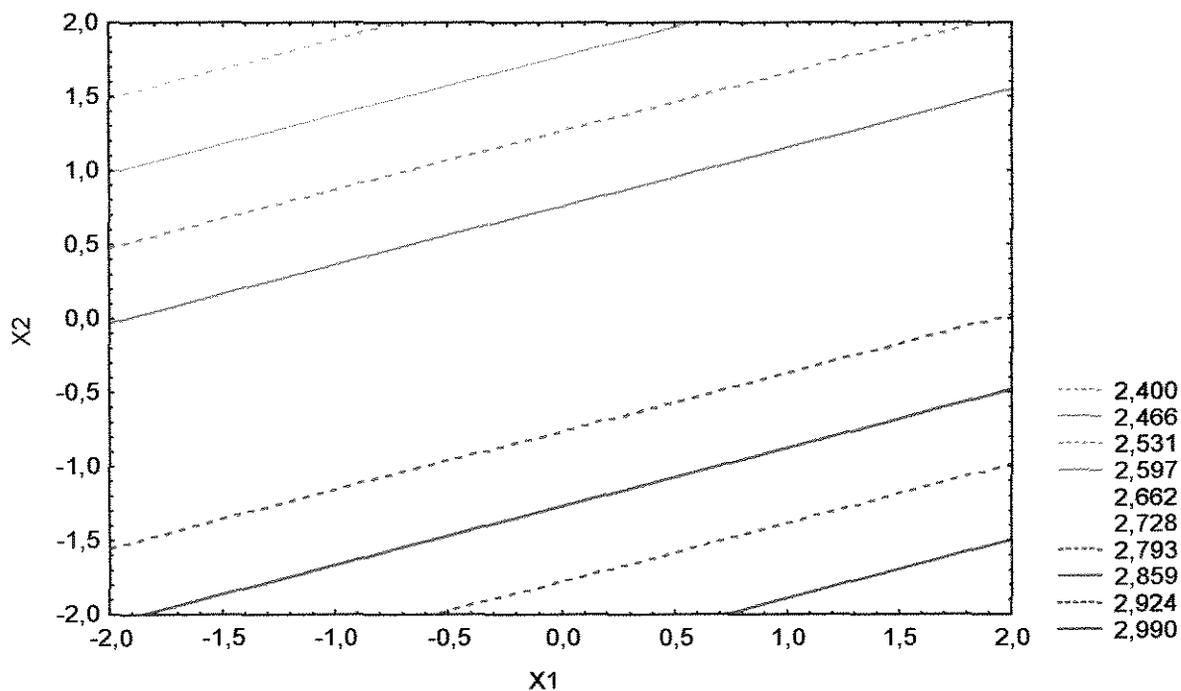


Figura 56. Curvas de nível para Bf em função de x_1 e x_2 .

Entretanto, considerando-se o limite mínimo de 2,5 %bs para a concentração de bixina exigida na classificação de sementes tipo 1, observa-se que para toda a faixa das variáveis operacionais Tg e G, valores abaixo do limite mínimo de Bf só chegaram a ser atingidos em duas corridas experimentais, mesmo assim, seus valores foram acima dos 2,1%bs necessários à comercialização do produto. O intervalo de variação de Bf, obtido experimentalmente foi de 2,30 a 3,00 %bs, correspondendo à uma degradação de 27,22 a 5,06%, dada pela Equação 62.

$$\varphi = \left(1 - \frac{B_f}{B_i}\right) 100 \quad (62)$$

onde B_i representa o teor inicial médio de bixina, igual a 3,16 %bs. Observa-se que a máxima degradação permitida para que não seja atingido valores de bixina abaixo de 2,1 %bs é 33,54%, para as condições deste trabalho.

A Figura 57 representa o modelo para a degradação de bixina, φ , em função do tempo de secagem, t , em minutos, para a faixa de temperatura 26 a 94°C e vazão do ar 25,2 a 129,6 kg/h.

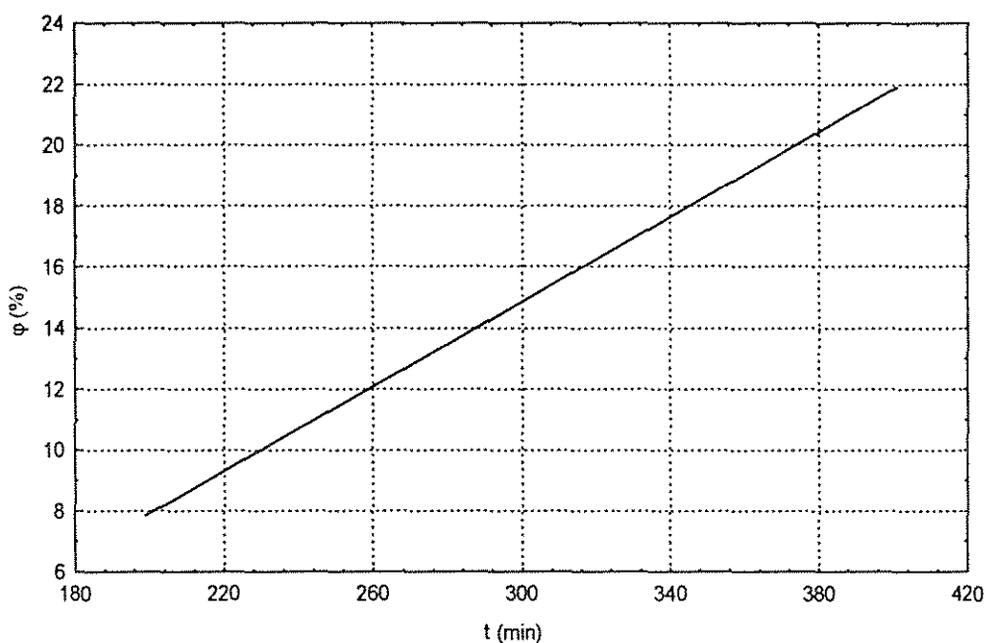


Figura 57. Degradação de bixina em função do tempo de secagem

Deste gráfico, pode-se verificar que a degradação máxima permitida para este material ter classificação, ou seja, cerca de 21%, é atingida em aproximadamente 386 minutos, situação na qual o valor limite mínimo de 2,5 %bs é alcançado.

As Figuras 55 e 56 ilustram as superfícies de respostas e as curvas de nível para Bf, construídas a partir de um modelo linear que também inclui o coeficiente da variável x_1 (Tabela 46), alocando-se as variáveis x_1 (temperatura) e x_2 (tempo) nos eixos x e y, respectivamente.

Pelo exame dessas figuras, observa-se que as condições das variáveis temperatura e tempo de secagem que mais inibem a degradação da bixina são: tempos baixos ($x_2 < -1$) e temperaturas de secagem de moderadas a altas ($x_1 > 0$), conforme as condições operacionais praticadas neste trabalho. Mas, de modo geral, constata-se que a variável mais influente é x_2 , pois examinando-se os contornos indicados na Figura 56, nota-se que para tempos curtos de secagem ($x_2 < -1,4$) o teor final de bixina praticamente independe do valor da temperatura (x_1), mantendo-se na faixa perfeitamente aceitável de 2,80 a 2,92 %bs, que corresponde a uma degradação do corante de apenas 11,4 a 7,6%, em relação ao teor inicial de 3,16 %bs. Essa constatação de que se pode trabalhar com tempos curtos e altas temperaturas de secagem (até o limite de $x_1 = +1,68$), favorece em demasia o processo de secagem de sementes de urucum com elevados teores iniciais de bixina, sendo essencial para a manutenção da qualidade e posterior processamento do produto.

A comparação entre os valores experimentais e calculados através do modelo linear para Bf, ilustrada na Figura 58, mostra a existência de um ajuste razoável entre os valores observados e os preditos.

A Figura 59 representa a distribuição aleatória dos resíduos, mostrando a ausência de um comportamento tendencioso, indicando que o modelo matemático representa adequadamente as variações da concentração final de bixina em função do tempo de secagem, por uma relação linear, não havendo dessa forma inconsistência entre os valores observados e os calculados matematicamente.

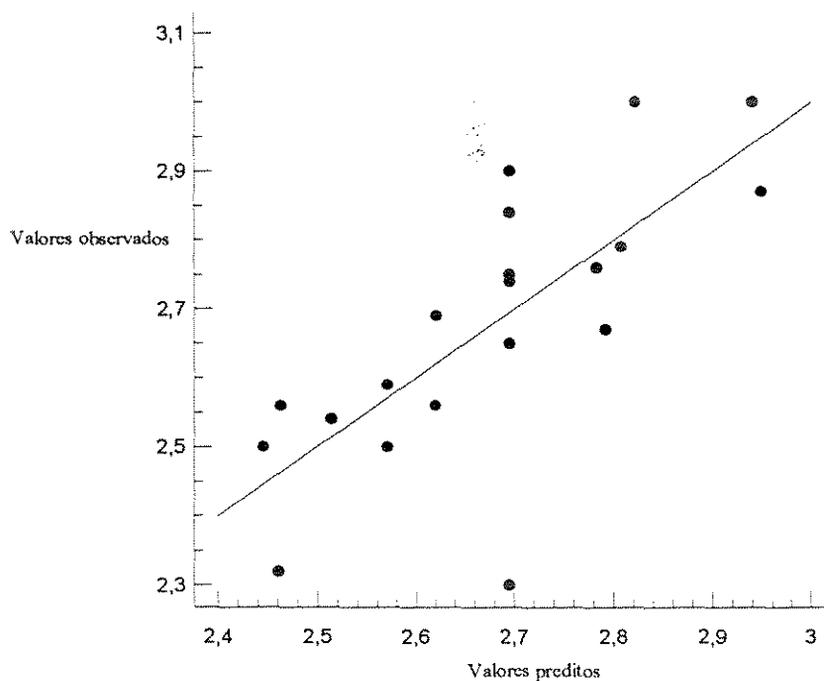


Figura 58. Comparação entre valores preditos e experimentais para Bf

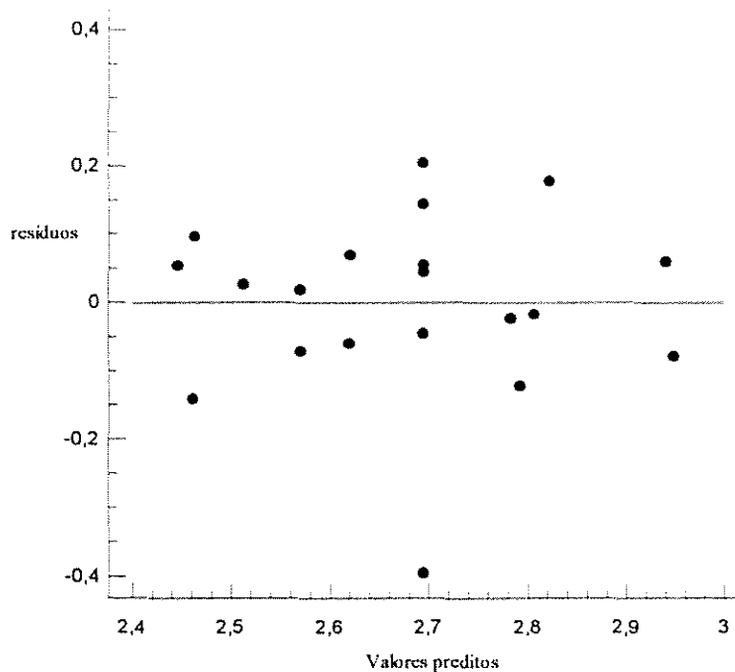


Figura 59. Distribuição dos resíduos para a resposta Bf

4.8 Otimização do processo de secagem

Através da metodologia de superfícies de resposta discutida anteriormente é possível determinar as condições operacionais em função das variáveis de interesse para o processo e alcançar um valor ótimo para a variável de resposta considerada. Entretanto, quando se deseja otimizar mais de uma variável de resposta deve-se verificar se, em certas situações, o ótimo para uma resposta não inviabiliza técnica ou economicamente o processo, ou não corresponda ao valor ótimo para as outras respostas estudadas.

Assim, a identificação da região ótima para as respostas Xf e Bf consideradas neste trabalho, é realizada através da análise e da visualização das curvas de níveis correspondentes às duas respostas em questão, com a identificação das faixas de condições operacionais de Tg, t e G que possam corresponder ao ótimo para ambas as respostas.

As Figuras 60 e 61 exibem os contornos para as respostas Xf e Bf, em função das variáveis x_1 (Tg) e x_2 (t), para $x_3 = 0,7728$ ($G = 101,05$ kg/h). Mantendo-se fixa a vazão mássica do ar de secagem no ponto estacionário, as partes sombreadas das curvas de nível para Xf e Bf denotam as regiões onde o processo pode ser adequadamente conduzido, visando obter teores de umidade entre aproximadamente 5 e 10 %bs e concentrações de bixina superiores a 2,86%bs (degradação menor que 10%). Uma superposição dos contornos indicaria que as faixas de temperatura e tempo de secagem devem ser compreendidas entre 76 e 94°C e de 199 a 270 min, respectivamente.

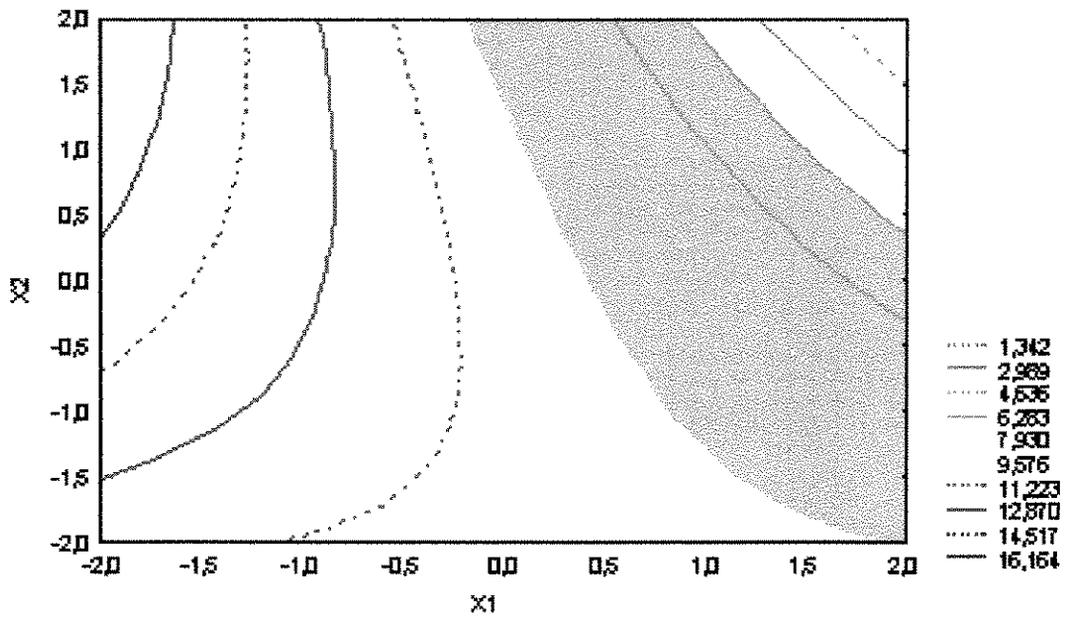


Figura 60. Contornos para X_f em função de x_1 e x_2 com indicação da região ótima

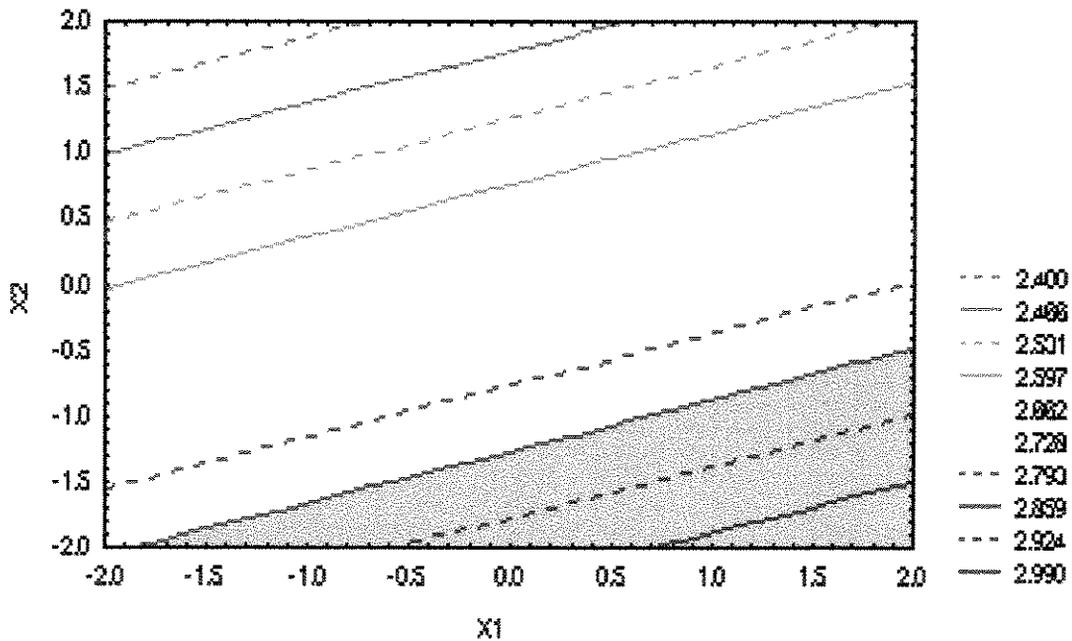


Figura 61. Contornos para B_f em função de x_1 e x_2 com indicação da região ótima

Na Tabela 47 estão indicados os critérios de aceitabilidade para as respostas obtidas, propostas por AKHNAZAROVA e KAFAROV (1982), e que serão utilizados para a determinação do ponto ótimo do processo de secagem, em função de restrições nas variáveis operacionais de entrada.

Tabela 47. Escala de valores de desejabilidade (d_j ou D_j)

Faixa (d_j ou D_j)	Descrição da resposta
0,80 a 1,00	aceitável e excelente
0,63 a 0,80	aceitável e bom
0,37 a 0,63	aceitável porém pobre
0,20 a 0,37	faixa limite de aceitação
0,00 a 0,20	inaceitável

Observa-se que o ideal corresponde a valores de D_j o mais próximo possível de 1,00. O cálculo da função D_j é realizado com base na metodologia descrita em AKHNAZAROVA e KAFAROV (1982), com as seguintes restrições nas variáveis de resposta X_f e B_f :

X_f : valores compreendidos entre 4 e 10%bs ($4\%bs < X_f < 10\%bs$)

B_f : valores maiores que 2,84 %bs (mínimo 2,84 %bs)

Os valores limites para o conteúdo final de umidade compreende o mínimo em torno do valor médio do teor de umidade na monocamada, para a faixa de 35 a 80°C determinados neste trabalho, e o máximo de 10 %bs, visando além da conservação do material, a qualidade, pela classificação tipo 1. O limite mínimo de 2,84 %bs para o teor final de bixina, foi escolhido de modo a manter a estabilidade do corante em relação ao teor inicial, com no máximo 10% de degradação.

A otimização numérica foi realizada com o auxílio do aplicativo *Design Expert*®, obtendo-se o valor 0,8732 para a função desejabilidade global, D_j . Esse valor é considerado aceitável e excelente, conforme a classificação contida na Tabela 47. O ponto ótimo obtido para as variáveis codificadas foi: $x_1 = 1,68$, $x_2 = -1,68$ e $x_3 = -0,8918$. Valores que correspondem a $T_g = 94^\circ\text{C}$, $t = 199$ min e $G = 50$ kg/h, atendendo às restrições impostas na Tabela 48. Com esses valores, se estabelece o ponto ótimo para as variáveis de entrada, obtendo-se neste ponto $X_f = 10\%bs$ e $B_f = 2,98\%bs$, que corresponde a uma degradação de apenas 5,7% em relação ao teor inicial de bixina.

Tabela 48. Restrições nas variáveis de resposta para a localização do ponto ótimo

Variáveis de Resposta (%bs)	Restrição	Objetivo
Conteúdo final de umidade (X_f)	$X_f < 10\%bs$	minimizar
Conteúdo final de bixina (B_f)	$B_f > 2,84\%bs$	maximizar

4.9 Análise da cinética de secagem das sementes de urucum

Na execução do planejamento fatorial fracionário, realizado na primeira fase da análise do processo, foram obtidos dados experimentais de cinética da secagem de sementes de urucum, que associados aos resultados do comportamento higroscópico deste material, permitiram a construção das curvas características de secagem e de taxa de secagem, representadas no anexo A, pelas Figuras A1.1 a A21.4, com base nos dados existentes nas Tabelas A1 a A21.

A característica geral dessas curvas é a indicação de um período à taxa de secagem constante para todas as corridas experimentais. Esse fato não está de acordo com os dados cinéticos de secagem de urucum em leito fixo, estabelecidos por SILVA (1991) e por CASTRO e FARIA (1992). Acredita-se que a existência de um período ante-crítico evidenciado na secagem de sementes de urucum efetuada neste trabalho, deva-se aos teores iniciais de umidade mais elevados (25,6 %bs a 58,2 %bs) do que os da matéria prima utilizada por SILVA (1991), que situa-se na faixa de 18 %bs a 32,5 %bs e de CASTRO e FARIA (1992), o qual cobria o intervalo de 7,9 %bs a 10 %bs.

Da análise das primeiras 21 corridas experimentais (16 originais e 5 repetições), observa-se que o maior tempo gasto no processo para se atingir a umidade final do produto, decorre no período pós-crítico, onde a taxa de secagem é decrescente, não sendo atingido, em nenhuma corrida experimental, o teor de umidade de equilíbrio das sementes. A faixa de conteúdo final de umidade foi de 10 a 37%bs, que são altas para a segura armazenagem do material, indicando que os valores das variáveis operacionais deveriam ser modificados, para que fossem atingidos teores de umidades finais mais baixos. Os valores de umidade final aceitáveis de 10,06 %bs e 10,03 %bs foram obtidos nas corridas 8 e 21 respectivamente, nas condições de secagem mais favoráveis, com a temperatura de 80°C e vazão mássica do ar 0,036 kg/s (129,6 kg/h), que corresponde aos níveis máximos de **T_g** e **G**, a partir de sementes com teores de umidade iniciais em torno de 30%bs.

Pelo exame das curvas características de taxa de secagem e com os valores das umidades de equilíbrio estimadas para as condições operacionais à 40 e 80°C através do modelo de GAB, verifica-se que os teores de umidade crítica variam desde 18,65 %bs até 48,60 %bs, com valores de taxas de secagem constantes na faixa de 0,50 mg/cm².min a 8,61 mg/cm².min. A considerável variação neste parâmetro decorre da grande faixa de variação da umidade inicial das sementes, as quais não puderam ser mantidas em dois valores constantes conforme exige o planejamento dos experimentos.

A Figura 62 (Anexo: Figura A15.1) ilustra uma curva de secagem típica obtida na primeira fase dos experimentos. Através de ajustes ao modelo linear para os pontos alinhados de *X versus t* e ao modelo de Page (PAGE, 1949) da parte não linear, obtém-se curvas características de taxa de secagem, ilustradas na Figuras 63 (Anexo: Figura A15.2) e 64 (Anexo: Figura A15.3). A Figura 65 (Anexo: Figura A15.4) indica a curva característica da taxa de secagem para o período pós-crítico e as Figuras 66 e 67 mostram os ajustes aos modelos linear e de Page.

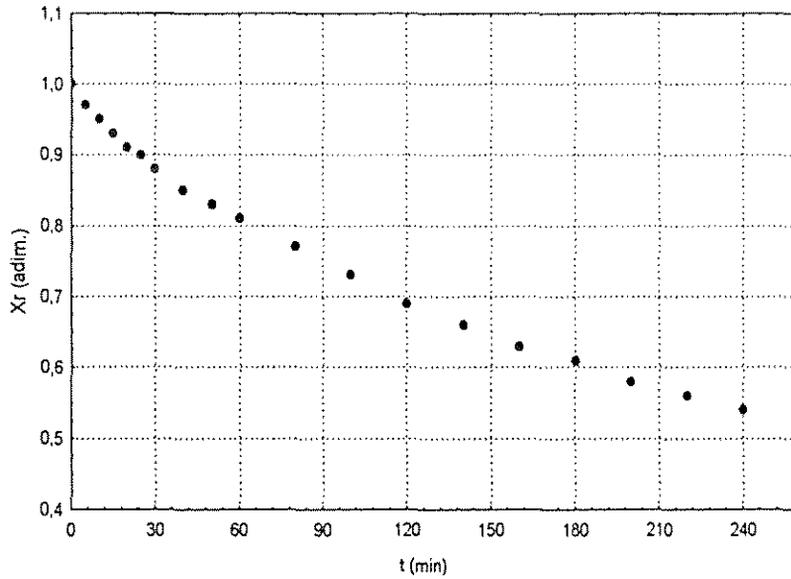


Figura 62. Curva de secagem característica (corrida 15)

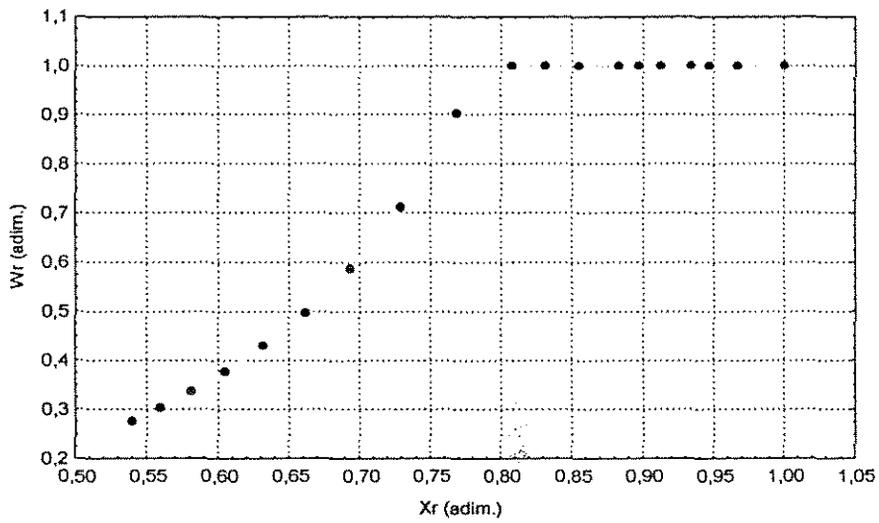


Figura 63. Curva de taxa de secagem (corrida 15)

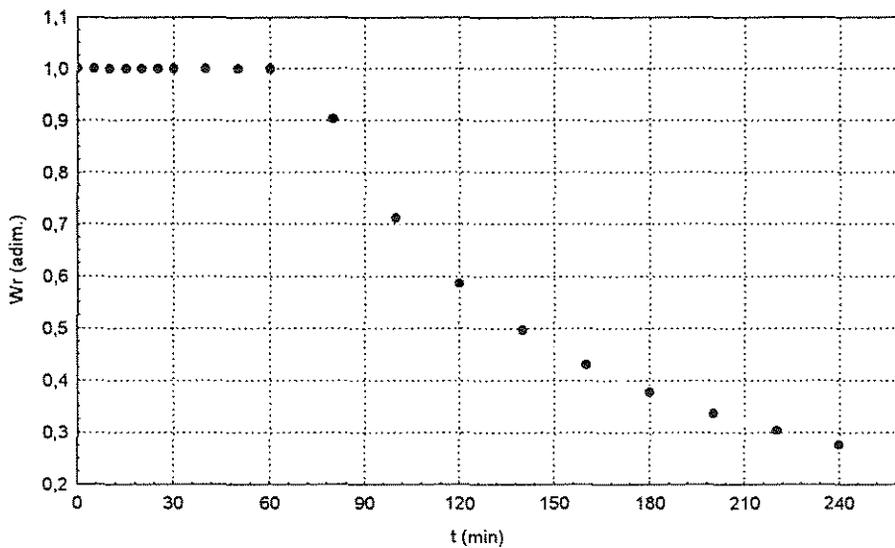


Figura 64. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 15)

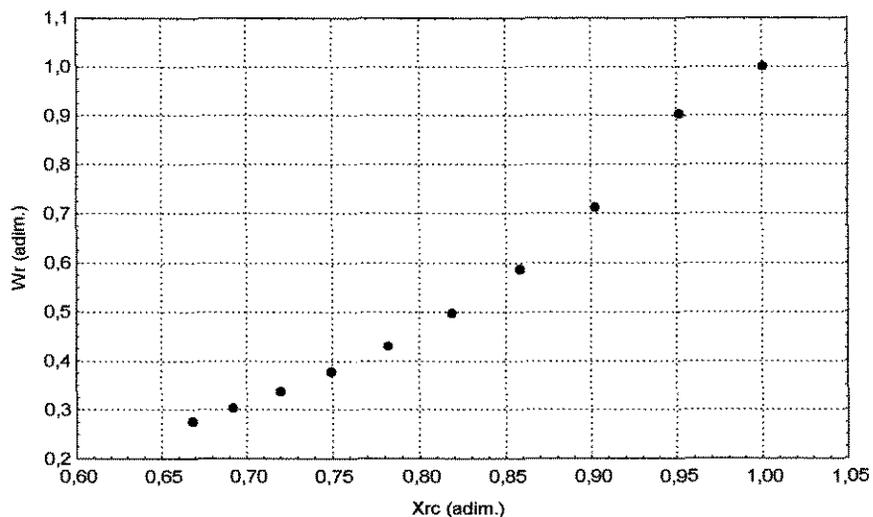


Figura 65. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 15)

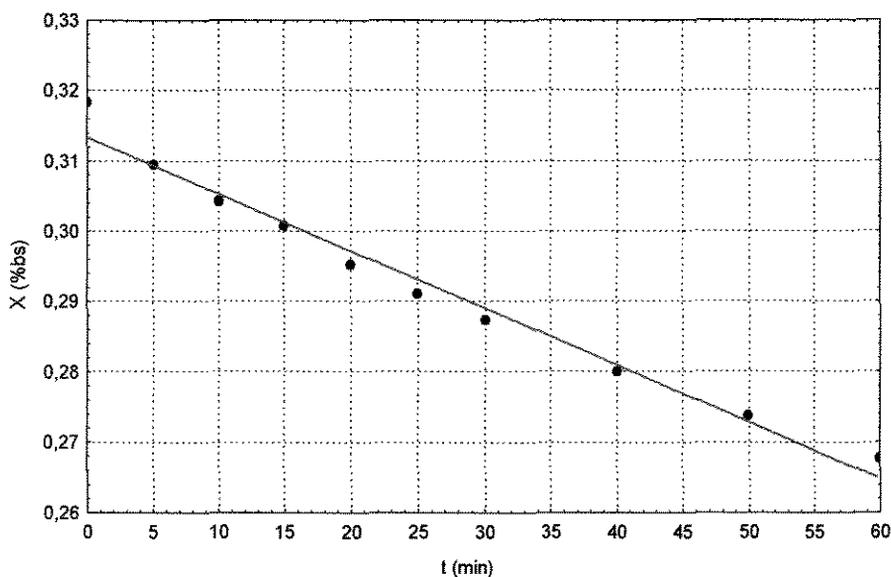


Figura 66. Ajuste ao modelo linear (• experimental, — modelo) (corrida 15)

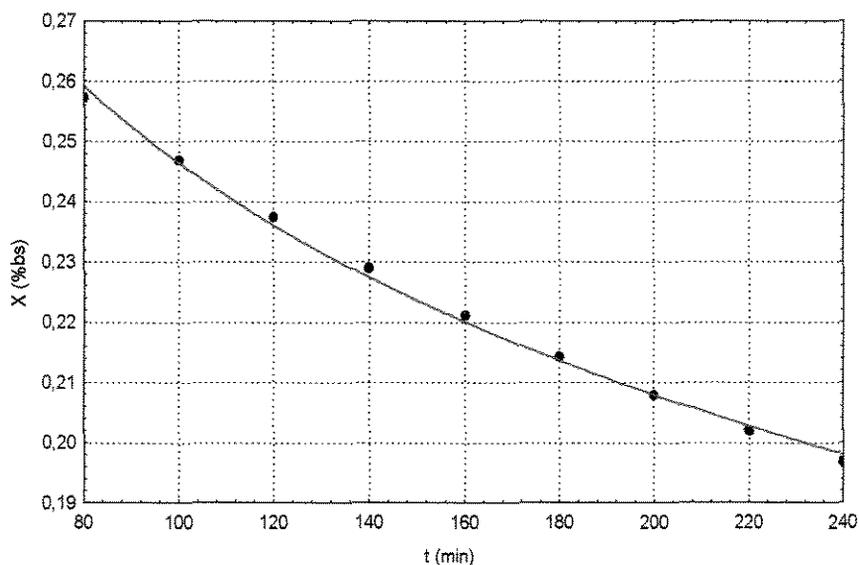


Figura 67. Ajuste ao modelo de Page (• experimental, — modelo) (corrida 15)

Nesta corrida, realizada com a vazão máxima (0,036 kg/s), maior carga de sementes (1500g) e temperatura mínima (40°C), para um tempo mínimo de secagem de 240 minutos (4h); resultaram em teores finais de umidade e bixina de 19,66 %bs e 3,51 %bs, respectivamente. O valor final do teor de bixina, equivale a um decréscimo de 15,83% em relação ao valor inicial do teor (médio) de bixina encontrados nas amostras utilizadas na primeira fase dos experimentos (4,7%bs).

Os valores de X_{cr} e W_{cr} são 25,79%bs e 3,46 mg/cm².min, respectivamente. Os valores das constantes e dos coeficientes de correlação, R , obtidos no ajuste do teor de umidade das sementes de urucum com o tempo, para os períodos de secagem à taxa constante e decrescente, na primeira fase dos experimentos, estão indicados na Tabela 49. Pelos valores de R constata-se o excelente ajuste dos modelos aos pontos experimentais.

Tabela 49 - Ajuste do conteúdo de umidade das sementes de urucum com o tempo, para os períodos à taxa de secagem constante e decrescente, utilizando as equações da reta e de Page, para a primeira fase dos experimentos

Corridas	X = a + bt			X = exp (- kt ⁿ)		
	a	b	R	k	n	R
01	0,5173	-0,0014	0,9985	0,3608	0,2192	0,9974
02	0,3127	-0,0046	0,9971	0,8654	0,1793	0,9995
03	0,3300	-0,0019	0,9952	0,7633	0,1511	0,9999
04	0,3050	-0,0047	0,9998	0,9239	0,1655	0,9981
05	0,3058	-0,0008	0,9840	0,5811	0,1953	0,9986
06	0,5358	-0,0032	0,9963	0,1092	0,5434	0,9984
07	0,4635	-0,0029	0,9979	0,3786	0,2760	0,9978
08	0,3412	-0,0061	0,9971	0,8275	0,1905	0,9966
09	0,3700	-0,0028	0,9964	0,3131	0,3897	0,9989
10	0,4138	-0,0013	0,9987	0,4883	0,1917	0,9994
11	0,5863	-0,0066	0,9996	0,3048	0,3438	0,9526
12	0,3153	-0,0020	0,9940	0,7079	0,1848	0,9981
13	0,4625	-0,0006	0,9955	0,3748	0,1875	0,9988
14	0,4366	-0,0088	0,9984	0,7171	0,1876	0,9827
15	0,3135	-0,0008	0,9899	0,6547	0,1651	0,9983
16	0,4407	-0,0033	0,9960	0,3545	0,3070	0,9969
17	0,3373	-0,0011	0,9951	0,7495	0,1288	0,9989
18	0,2553	-0,0005	0,9959	1,1791	0,05367	0,9938
19	0,2563	-0,0010	0,9992	0,8410	0,1576	0,9879
20	0,2811	-0,0051	0,9809	1,0176	0,1721	0,9986
21	0,2755	-0,0008	0,9970	0,8599	0,1296	0,9968

As corridas experimentais que fazem parte da segunda fase dos experimentos, correspondem à otimização do processo pela metodologia de superfícies de resposta, estão ilustradas através das curvas de secagem e de taxa de secagem no apêndice B. Nas Tabelas B1 a B20 estão indicadas as condições experimentais de cada ensaio, e as curvas representativas da cinética encontram-se ilustradas nas Figuras B1.1 a B20.3.

As variações de parâmetros importantes para a análise do processo e para a cinética da secagem de urucum estão sumarizadas na Tabela 50, conforme observações experimentais da segunda etapa de ensaios.

Tabela 50. Condições experimentais e faixa de resultados da secagem de sementes de urucum, para a segunda fase de ensaios

Variáveis e Parâmetros do processo (unidade)	Faixa de variação (min. - máx.)	Natureza da variável ou parâmetro de processo
Tg ₁ (°C)	26 - 94	VEC
Tg ₂ (°C)	24 - 72	VS
t (min)	199 - 401	VEC
G (kg/h)	25,2 - 129,6	VEC
X _i (%bs)	20,03 - 23,98	PEC
X _f (%bs)	6,75 - 17,83	VR
X _{cr} (%bs)	15,12 - 21,42	VS
X _e (%bs)	1,51 - 8,88	VS
W _{cr} (mg/cm ² .min)	0,14 - 1,80	VS
Y ₁ (g/kg as)	12,2 - 20,3	PENC
Y ₂ (g/kg as)	13,7 - 25,9	PS
Tu ₂ (°C)	20,5 - 40,0	PS
Ts _i (°C)	21,5 - 26,8	PEC
Ts _f (°C)	22,0 - 68,0	PS
B _f (%bs)	2,30 - 3,00	VR

VS: variável de saída; VR: variável de resposta; VEC: variável de entrada controlável; PEC: parâmetro de entrada controlável; PENC: parâmetro de entrada não controlável, PS: parâmetro de saída

Pelo exame dos dados contidos na Tabela 50 verifica-se que o intervalo de umidade crítica ficou bem mais estreito, implicando que sementes com umidade maiores que 15,12 a 21,42%bs devem possuir um período ante-crítico com taxa de secagem constante, variando na faixa de 0,14 a 1,80 mg/cm².s. Constata-se que os valores de W_{cr} (constantes) para a primeira fase dos experimentos foi bem mais elevado, em função da faixa mais ampla de teores de umidade existentes na matéria prima trabalhada inicialmente. Estes fatos demonstram a importância do controle na umidade inicial das sementes, que neste caso foi bem mais efetivo, mantendo-se os teores no estreito intervalo de 20,03% a 23,98 %bs, com valor médio estimado de 21,62 ± 0,27%bs.

Outro fato interessante é a temperatura máxima alcançada pelas sementes de urucum ao final da secagem, 68°C; que está abaixo dos 70°C propalado por alguns pesquisadores, como temperatura limite para que sejam mantidas inalteradas várias propriedades de interesse em produtos naturais, inclusive estabilidade de cor. Isto sugere que, de alguma forma este valor máximo de Ts_f pode ter contribuído para a boa estabilidade da bixina verificada em todos os

experimentos e, conseqüentemente, da baixíssima influência (estatisticamente insignificante) da temperatura de secagem em Bf, dentro do intervalo estudado.

Os teores de umidade finais das sementes nesta fase foram bem menores do que os encontrados nos primeiros experimentos, inclusive alcançando-se o teor desejado, em torno de 10%bs, em 12 corridas experimentais, sob diferentes condições operacionais.

Analisando-se a faixa de temperatura de saída do ar, o intervalo de temperatura de saída das sementes e a faixa de valores alcançados de temperatura de bulbo úmido do ar de secagem à saída, pode-se admitir que o processo de secagem convectiva em leito fixo utilizado neste trabalho, se comportou como adiabático.

Da mesma forma que as curvas construídas com os dados da primeira etapa dos experimentos, a característica geral da cinética de secagem das sementes de urucum utilizadas na fase complementar do projeto experimental também foi de apresentar-se como um processo parcialmente controlado por condições externas, mesmo numa faixa de umidades iniciais menores.

As Figuras 68 (Anexo: Figura B6.1), 69 (Anexo: Figura B6.2), e 70 (Anexo: Figura B6.3) ilustram o aspecto geral das curvas obtidas nesta fase complementar da mesma maneira como foram geradas as curvas de taxa de secagem da primeira etapa, contudo sem as curvas características, devido não se ter construído isotermas de dessorção nas temperaturas de 26°C e 94°C, não se tendo portanto as correspondentes umidades de equilíbrio para essas condições. O excelente ajuste aos modelos linear e de Page podem ser visualizados nas Figuras 71 e 72. Os valores das constantes dos modelos e da estatística R^2 são dados na Tabela 51.

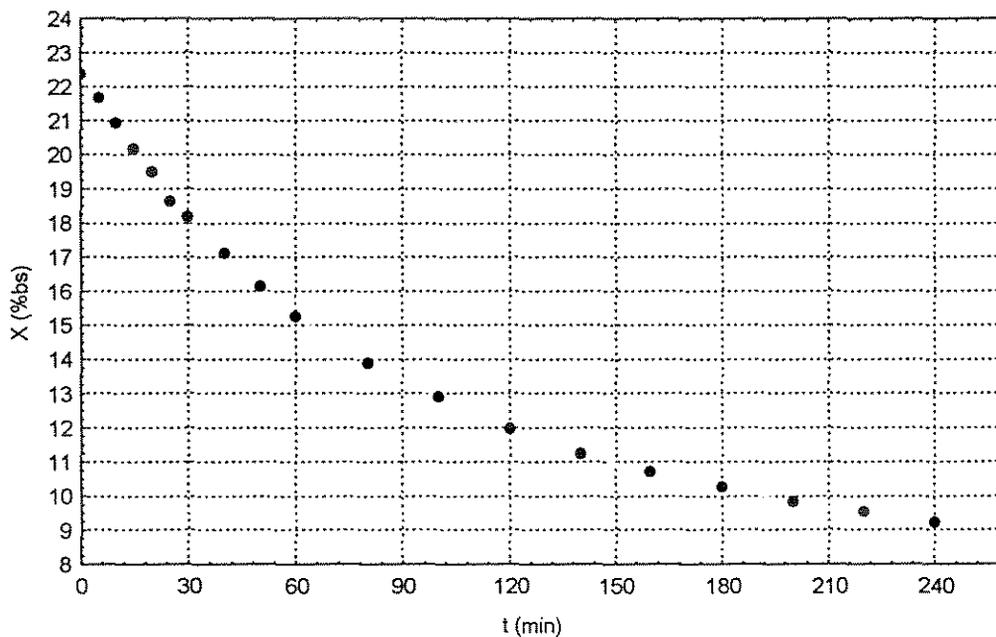


Figura 68. Curva de secagem (corrida 6)

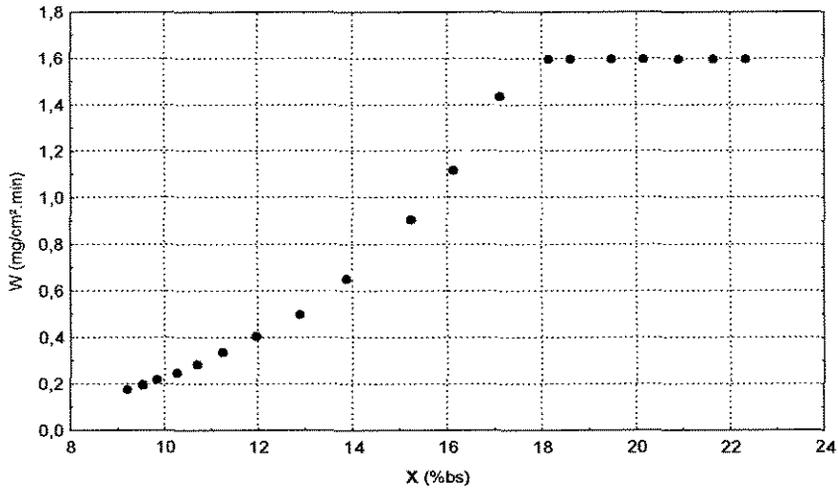


Figura 69. Curva de taxa de secagem (corrida 6)

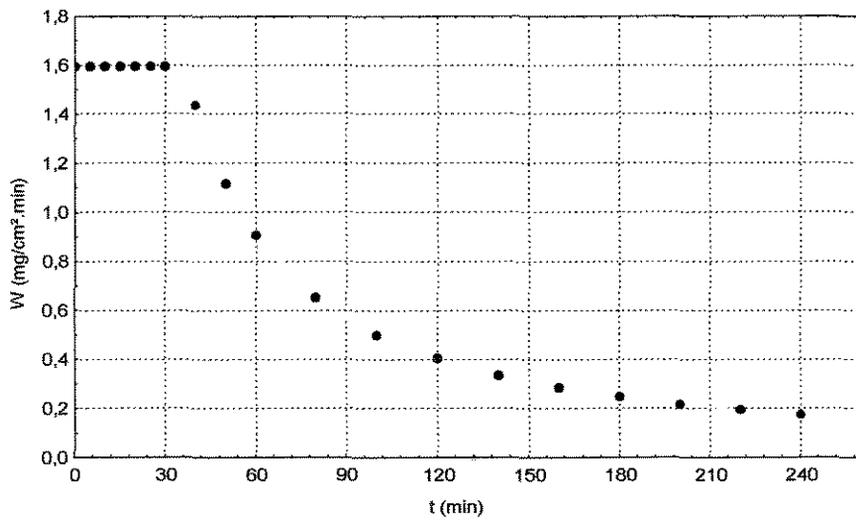


Figura 70. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 6)

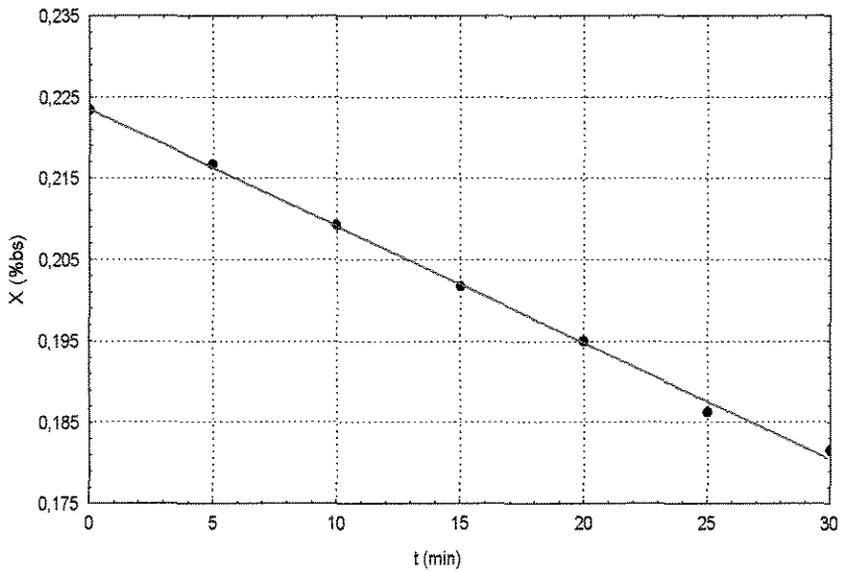


Figura 71. Ajuste ao modelo linear (• experimental, — modelo) (corrida 6)

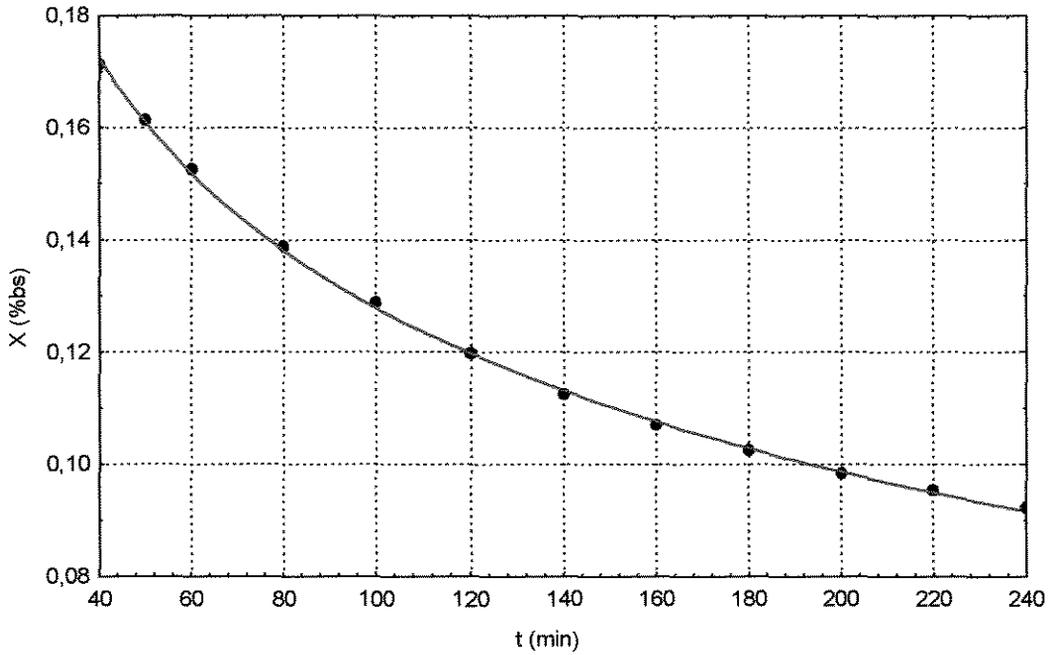


Figura 72. Ajuste ao modelo de Page (• experimental, — modelo) (corrida 6)

Tabela 51. Ajuste do conteúdo de umidade das sementes de urucum com o tempo, para os períodos à taxa de secagem constante e decrescente, utilizando as equações da reta e de Page, para a segunda fase dos experimentos

Corridas	X = a + bt			X = exp (- kt ⁿ)		
	a	b	R	k	n	R
01	0,2136	-0,0003	0,989	1,0662	0,0995	0,998
02	0,1994	-0,0006	0,996	0,9497	0,1506	0,997
03	0,2386	-0,0003	0,997	0,9978	0,0920	0,992
04	0,1994	-0,0006	0,999	0,7135	0,1263	0,999
05	0,2047	-0,0004	0,995	0,9798	0,1330	0,998
06	0,2235	-0,0014	0,999	0,9360	0,1709	0,999
07	0,2097	-0,0004	0,997	1,0306	0,1177	0,999
08	0,2051	-0,0016	0,994	1,0240	0,1679	0,999
09	0,1998	-0,0001	0,996	-	-	-
10	0,2137	-0,0015	0,997	0,8699	0,1988	0,998
11	0,2266	-0,0008	0,991	0,8637	0,1621	0,997
12	0,2112	-0,0007	0,991	0,9190	0,1524	0,999
13	0,2064	-0,0002	0,999	1,0373	0,1045	0,998
14	0,2198	-0,0011	0,994	1,0726	0,1293	0,999
15	0,1997	-0,0006	0,987	1,0130	0,1341	0,998
16	0,2213	-0,0007	0,995	0,8998	0,1544	0,998
17	0,2202	-0,0007	0,994	0,8707	0,1599	0,997
18	0,2099	-0,0007	0,998	0,9181	0,1562	0,999
19	0,2365	-0,0008	0,994	0,8124	0,1687	0,997
20	0,2292	-0,0008	0,998	0,8513	0,1647	0,999

Os valores bem próximos da unidade encontrados para o coeficiente de correlação R , demonstram o excelente ajuste dos modelos aos dados de X versus t , dando portanto total confiabilidade às curvas de taxa de secagem obtidas por derivação dos dados das curvas de secagem experimentais.

As influências que as variáveis de entrada T_g , t e G propiciam na variável de resposta X_f já foi descrito anteriormente, verificando-se que um aumento em seus valores, provoca uma diminuição do conteúdo final de umidade das sementes. Isto está de acordo com a teoria sobre a característica geral do processo de secagem (STRUMILLO e KUDRA, 1986). Os efeitos que estas variáveis acarretam no comportamento dos perfis de umidade e de taxa de secagem, podem ser visualizados nas Figuras 73, 74 e 75 (correspondendo às corridas 9, 10 e 16 da segunda fase) para a influência da temperatura de secagem; nas Figuras 76, 77 e 78 (correspondendo às corridas 13, 14 e 15 da segunda fase) para os efeitos da vazão mássica do ar e nas Figuras 79, 80 e 81 (correspondendo às corridas 11, 12 e 18 da segunda fase) para a influência do tempo de processamento das sementes.

As corridas que demonstram a influência das variáveis de entrada T_g , t e G no comportamento da distribuição de umidade das sementes em função do tempo e demais relações próprias da cinética de secagem, foram escolhidas tomando-se os dois valores extremos de cada variável e seu valor médio, que no planejamento experimental correspondem aos códigos -1,68; 0 e +1,68; de modo que a cada variação de uma delas, as outras duas variáveis permanecem constantes no ponto central.

Verifica-se que nas maiores temperaturas e vazões mássicas do ar, as sementes secam mais rapidamente mantendo taxas mais elevadas em todo o período de secagem. Pelo exame das curvas de taxa de secagem em função do tempo, nota-se que a vazão só tem influência no período ante-crítico, demonstrando que a partir desse ponto (umidade crítica) o processo passa a ser controlado por condições internas.

As curvas representativas dos efeitos do tempo, demonstram a menor influência relativa que esta variável apresenta no conteúdo de umidade de sementes de urucum. O comportamento dessas curvas indica também a alta reprodutibilidade dos dados experimentais coletados durante o processo.

Observa-se que uma das curvas (corrida 9 - Figuras 74 e 75), correspondendo à temperatura mais baixa do ar de secagem ($T_g = 26^\circ\text{C}$), indica que o processo foi realizado totalmente no período ante-crítico, ou à velocidade (taxa) de secagem constante. Para este caso o conteúdo final de umidade alcançado foi de 16,16%, sendo eliminado somente 33,3 g de água, de um total de 167,8 g contidas nas sementes, correspondendo a apenas 19,85% de redução de umidade, demonstrando que até este limite, o tipo de umidade contida no material ainda é superficial.

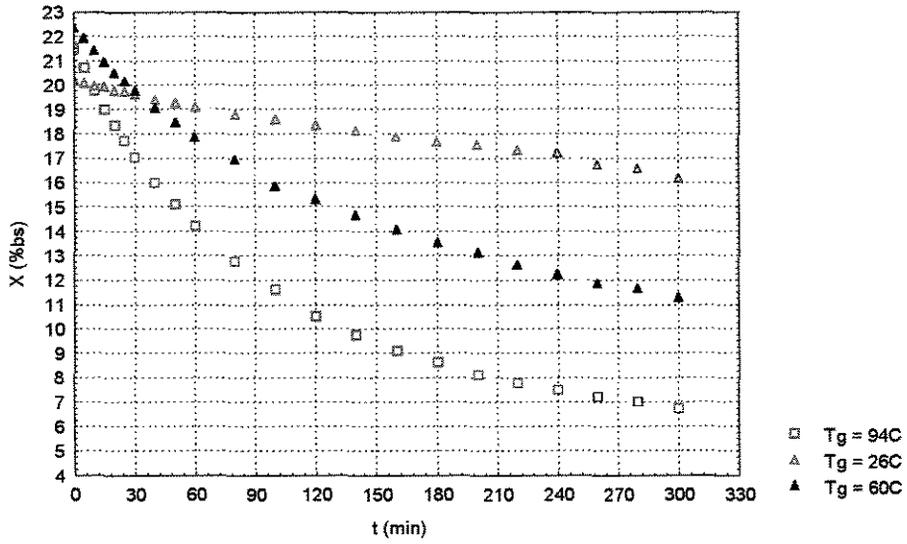


Figura 73. Influência da temperatura no perfil de umidade de urucum

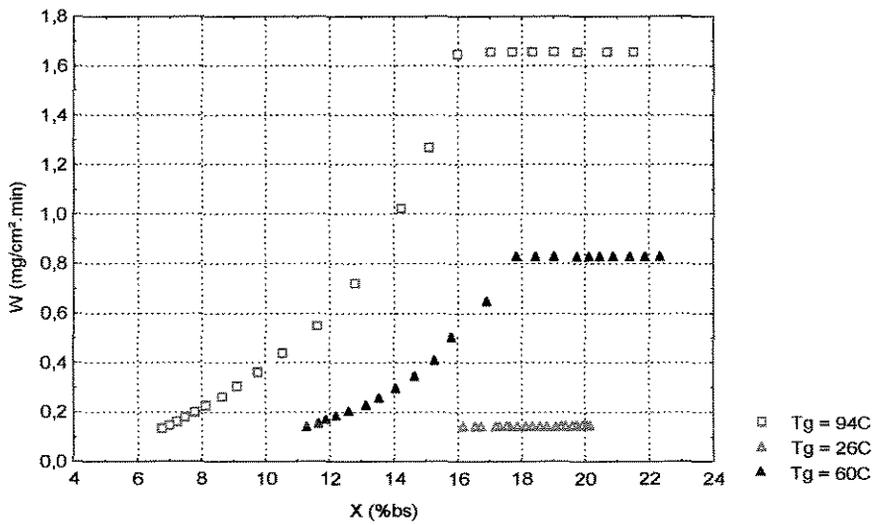


Figura 74. Influência da temperatura na taxa de secagem de urucum

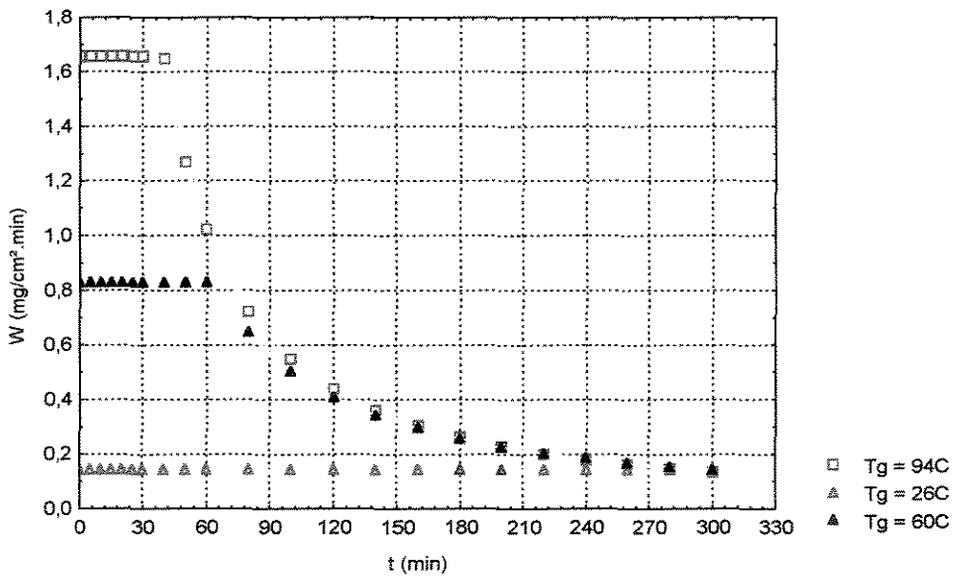


Figura 75. Influência da temperatura no perfil da taxa de secagem com o tempo para urucum

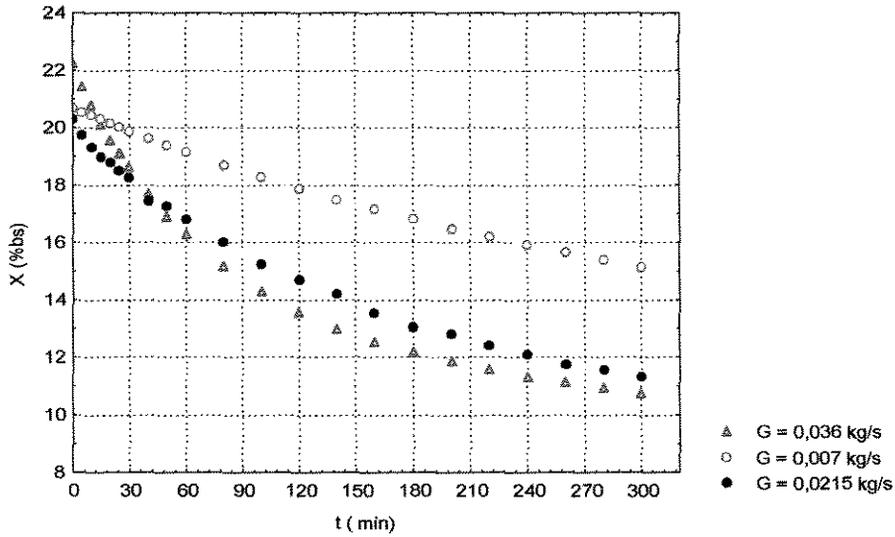


Figura 76. Influência da vazão mássica no perfil de umidade de urucum

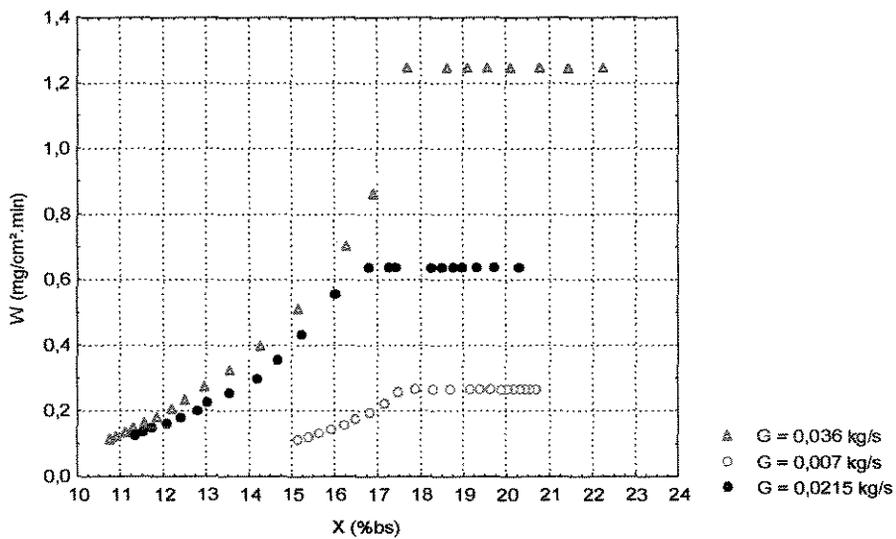


Figura 77. Influência da vazão mássica na taxa de secagem de urucum

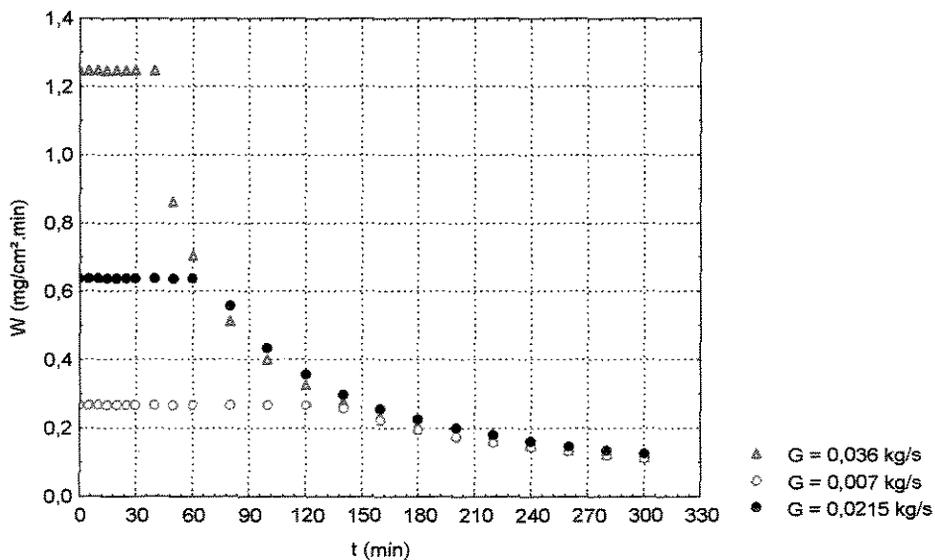
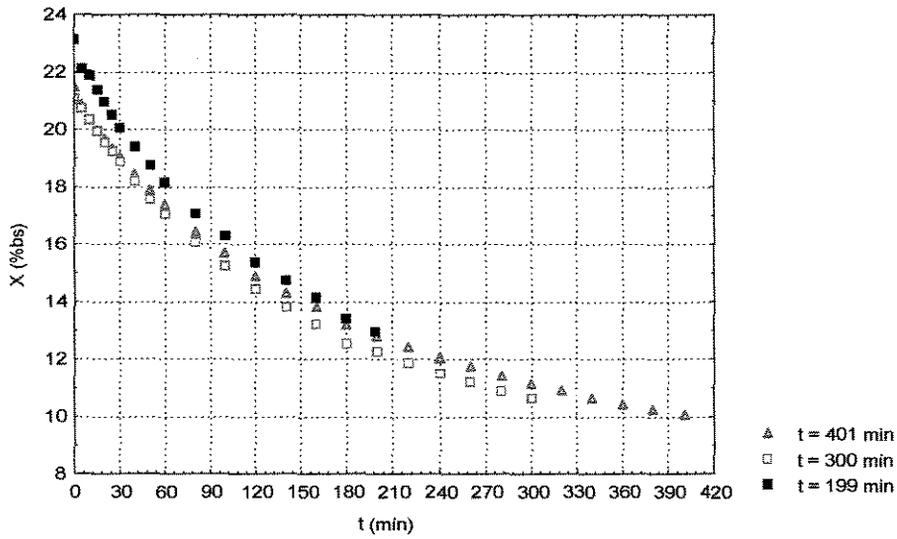
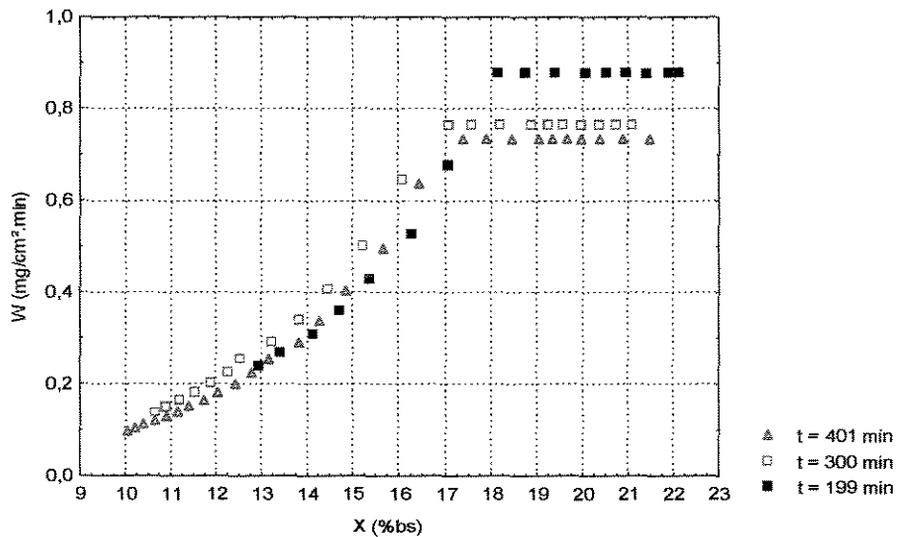


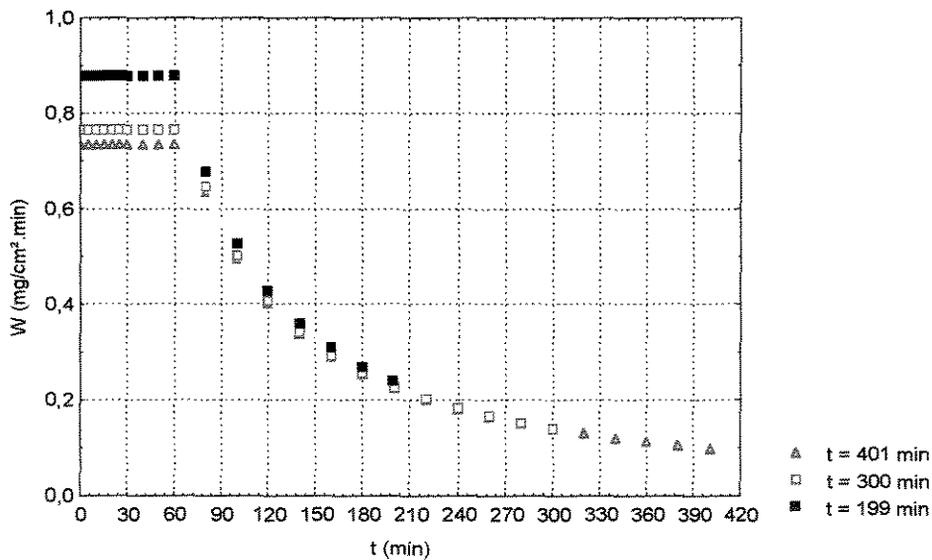
Figura 78. Influência da vazão mássica no perfil da taxa de secagem com o tempo para urucum



Figuras 79. Influência do tempo de secagem no perfil de umidade de urucum



Figuras 80. Influência do tempo de secagem no perfil de taxa de secagem de urucum



Figuras 81. Influência do tempo no perfil da taxa de secagem com o tempo para urucum

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

O protótipo de secador de leito fixo utilizado no desenvolvimento deste trabalho se mostrou adequado e com instrumentação apropriada para o fornecimento dos dados necessários à análise do processo de secagem de sementes de urucum, proporcionando excelente reprodutibilidade dos dados, evidenciada através dos ensaios em replicatas necessários à condução do planejamento estatístico, além de promover a secagem do material até níveis compatíveis com as especificações de qualidade e conservação do produto.

Na realização das corridas experimentais da primeira etapa, a aplicação da técnica de planejamento fatorial fracionário permitiu identificar a influência das variáveis independentes T_g (temperatura do ar de secagem), G (vazão mássica do ar), X_i (conteúdo de umidade inicial das sementes) e as de menor significância estatística m (massa de sementes) e t (tempo de secagem) nas respostas de interesse. A partir da etapa complementar de ensaios visando a otimização do processo, tornou-se evidente a influência de T_g , t e G para a variável de resposta X_f (conteúdo de umidade final das sementes), e de t para a resposta B_f (teor final de bixina).

O planejamento estatístico de experimentos foi utilizado para pesquisar a influência das variáveis operacionais do processo de secagem de sementes de urucum em leito fixo nos seus conteúdos finais de umidade e bixina, desenvolvendo-se modelos preditivos para X_f e B_f , em função da temperatura e vazão do ar de secagem e do tempo de processamento.

Um modelo polinomial de segunda ordem se mostrou adequado para descrever os efeitos das variáveis operacionais T_g , t e G no teor final de umidade das sementes de urucum, sob diversas condições de secagem praticadas no desenvolvimento deste trabalho, representado por:

$$X_f = 13,372 + 0,028T_g + 0,081t - 0,2G - 0,00083T_g t + 0,00093T_g G - 0,000065t^2 + 0,00065G^2$$

As variações observadas no valor final da concentração de bixina contida nas sementes de urucum após os diversos tratamentos de retirada de umidade a que foram submetidas durante o processo de secagem em leito fixo, podem ser adequadamente representadas por um modelo linear, em função do tempo de exposição do material às condições operacionais de secagem, dentro da faixa de temperatura e vazão do ar praticada neste estudo, conforme equação:

$$B_f = 3,35 - 0,0022t$$

Os modelos estatísticos propostos conseguem predizer com boa precisão as respostas de interesse do processo de secagem de sementes de urucum em leito fixo, no intervalo de variação

das condições experimentais, permitindo uma melhor compreensão dos efeitos causados pelas variáveis de entrada estudadas nas repostas **Xf** e **Bf**.

A localização das condições ótimas envolvendo o cálculo do ponto estacionário e o exame da natureza da superfície ao redor deste ponto através de análise canônica, resulta na equação para o conteúdo final de umidade de sementes na forma canônica, dada por:

$$\hat{Y} = 10,2829 + 0,7613W_1^2 - 0,6536W_2^2 + 0,2627W_3^2$$

As raízes características (autovalores) da equação canônica indicam que o ponto estacionário existe em termos de um ponto de sela (minimax), sugerindo que um deslocamento para fora desse ponto pode causar um acréscimo ou decréscimo na resposta **Xf**, dependendo da direção do movimento, mas obedecendo a ordem de influência **Tg > t > G**.

Através da análise das curvas de nível das respostas teor final de umidade e de bixina, mantendo-se a vazão mássica do ar de secagem constante em 101,05 kg/h, foi possível a identificação da região ótima de trabalho para as variáveis de entrada: **Tg** (76 a 94°C) e **t** (199 a 270 min), para a qual obtém-se teores finais de umidade (**Xf**) no intervalo de 5 a 10%bs e concentração final de bixina (**Bf**) acima de 2,86 %bs, valores altamente recomendados para a manutenção da qualidade do material.

O valor calculado para a função desejabilidade global foi 0,8732 considerado aceitável e excelente, proporcionando a correta estimativa do ponto ótimo de operação para as variáveis de entrada: **Tg** = 94°C, **t** = 199 min e **G** = 50 kg/h; obtendo-se neste ponto as respostas: **Xf** = 10%bs e **Bf** = 2,98 %bs.

As técnicas estatísticas de planejamento fatorial, metodologia de superfícies de resposta, análise canônica e função desejabilidade, se mostraram ferramentas bastante úteis, pois permitiram a verificação das influências das variáveis do processo de secagem de forma sistemática e a determinação da melhor condição operacional.

Os dados experimentais obtidos na dessorção de sementes de urucum na faixa de 15 a 80°C, se ajustaram muito bem ao modelo tri-paramétrico de GAB, tornando possível analisar o comportamento higroscópico do material e estimar propriedades termodinâmicas de interesse.

Através das isotermas de dessorção obtidas experimentalmente para as sementes de urucum, aplicando-se a equação de Clausius-Clapeyron em conjunto com o modelo de GAB, foi possível estimar o calor isostérico líquido de dessorção, na faixa de 1,44 kJ/mol a 24,50 kJ/mol, para umidades das sementes variando de 4%bs a 16%bs. Constata-se que o conteúdo de umidade de equilíbrio do material decresce com o aumento de temperatura no intervalo de 15 a 80°C para cada valor de atividade de água constante e o teor de umidade na monocamada decresce com o aumento da temperatura, variando de 5,60 %bs a 1,65 %bs, na faixa de 15 a 80°C. O modelo de GAB pode ser usado para representar adequadamente as relações entre a atividade de água e o conteúdo de umidade das sementes de urucum.

As curvas de secagem obtidas durante a execução dos experimentos puderam se ajustadas pela equação não linear de Page, com as constantes características do modelo, determinadas para

a região de secagem à taxa decrescente. Foram observados períodos de taxa de secagem constante, sendo ajustados por um modelo empírico linear.

A realização dos experimentos com as sementes de urucum contendo altos teores de bixina, permitiu observar que o material permaneceu praticamente estável, havendo pequena degradação em relação ao teor inicial de corante, porém sem comprometimento da qualidade ou de seu valor de mercado, para toda a faixa de condições operacionais.

Em se tratando de um biomaterial, com características inerentes de difícil controle e avaliação, os resultados encontrados pelos modelos preditivos para X_f e B_f podem ser considerados muito bons. A determinação das condições do ponto ótimo, dentro das faixas operacionais praticadas neste trabalho, propiciam a obtenção de sementes de urucum com excelente qualidade, conforme as especificações da legislação em vigor.

As informações obtidas neste trabalho podem ser usadas para avaliar a eficiência de processos similares sob as mesmas condições operacionais e, se necessário, promover metodicamente as mudanças nas condições do processo, movendo em direção do ótimo com a finalidade de prever a umidade e a concentração de bixina finais em sementes de urucum.

ANEXO A

Corridas experimentais de secagem de semente de urucum, conforme o projeto fatorial fracionário

(Corridas Iniciais - Primeira Fase de Experimentos)

Tabela A1. Condições de secagem (corrida 1)

massa (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr	Xr
500	0	51,82	0,89	1,00	1,00
496,5	5	50,76	0,89	1,00	0,98
495,6	10	50,48	0,89	1,00	0,97
492,9	15	49,66	0,89	1,00	0,95
490,6	20	48,96	0,89	1,00	0,94
488,4	25	48,30	0,89	1,00	0,92
486,1	30	47,60	0,89	1,00	0,91
481	40	46,05	0,89	1,00	0,87
476,8	50	44,77	0,89	1,00	0,85
473,2	60	43,68	0,84	0,95	0,82
465	80	41,19	0,64	0,71	0,77
458,2	100	39,13	0,51	0,57	0,72
451,4	120	37,06	0,42	0,48	0,68

m_{ss} (g)	329,34	Tg (°C)	40
área (cm ²)	520,33	G (kg/s)	0,014
X _i (%bs)	51,82	pré secagem	não

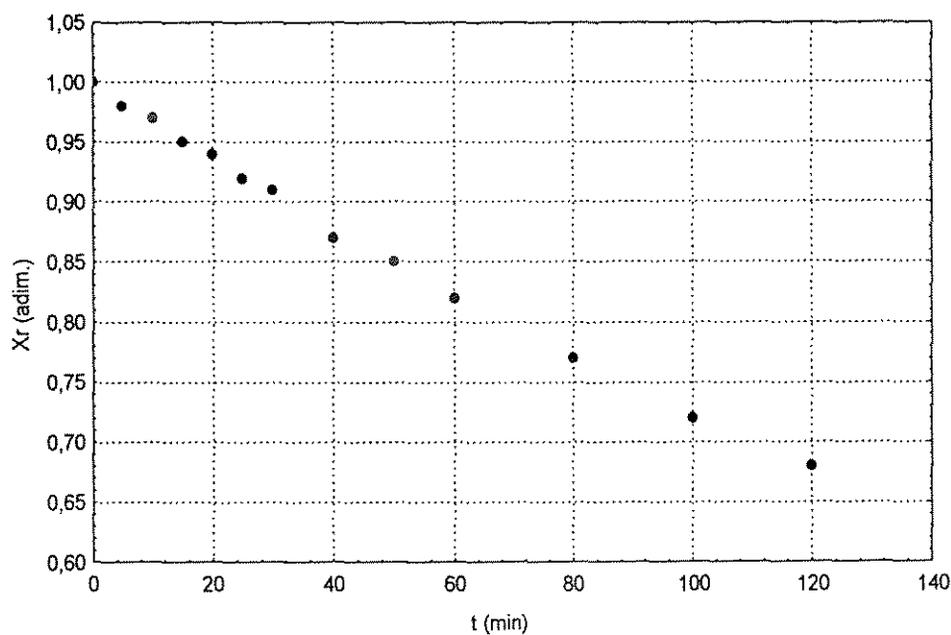


Figura A1.1. Curva de secagem (corrida 1)

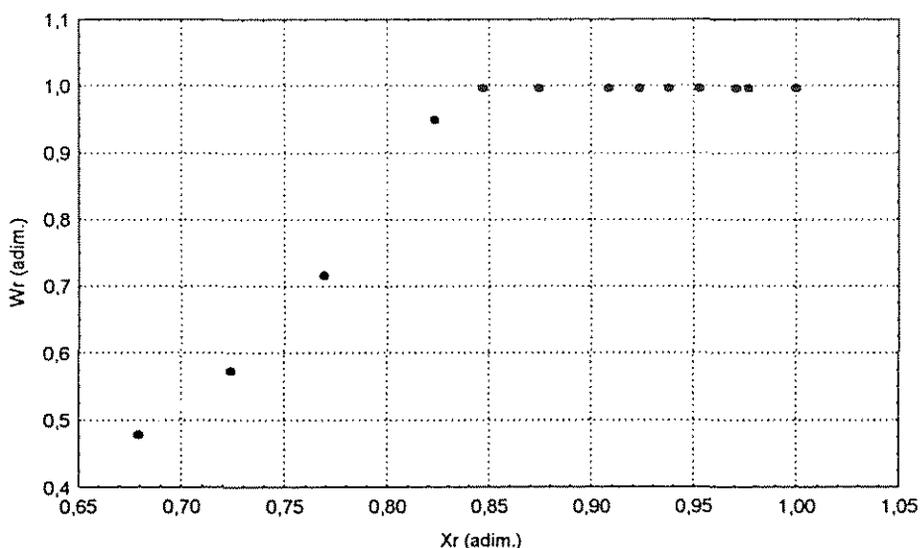


Figura A1.2. Curva de taxa de secagem (corrida 1)

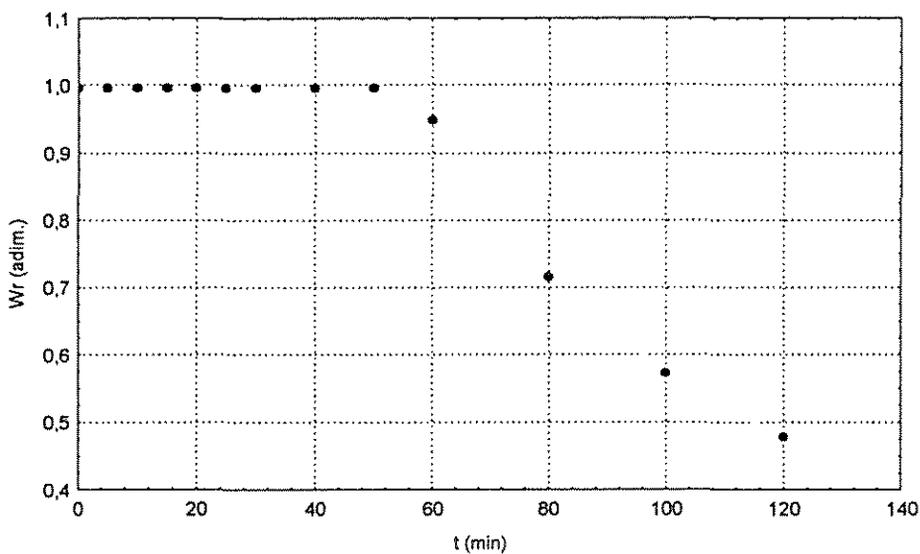


Figura A1.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 1)

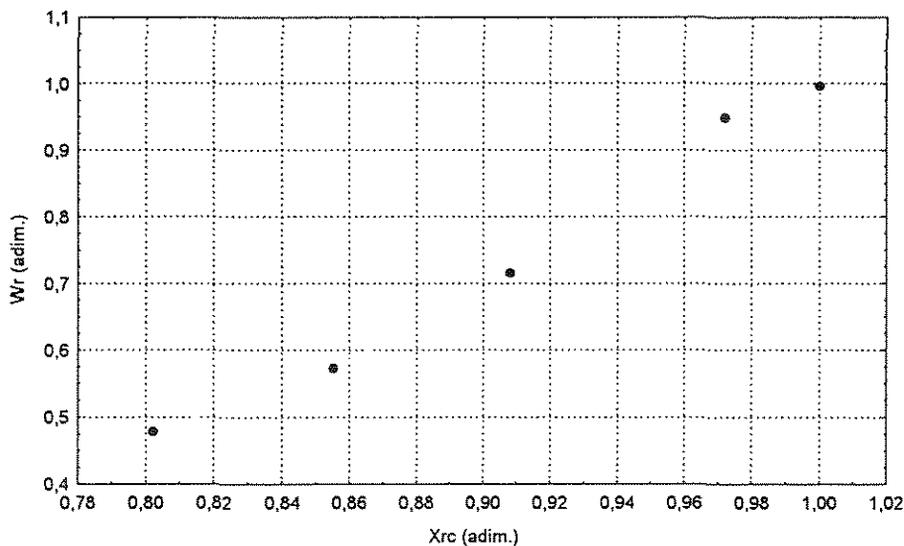


Figura A1.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 1)

Tabela A2: Condições de secagem (corrida 2)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
500	0	31,37	3,38	1,00	1,00
490,7	5	28,93	3,38	1,00	0,92
480,8	10	26,33	3,38	1,00	0,83
474	15	24,54	3,38	1,00	0,77
467,6	20	22,86	2,21	0,65	0,72
462,3	25	21,47	1,73	0,51	0,67
458	30	20,34	1,42	0,42	0,63
451,3	40	18,58	1,03	0,30	0,57
446,4	50	17,29	0,80	0,24	0,53
442,9	60	16,37	0,65	0,19	0,50
437,9	80	15,06	0,47	0,14	0,46
433,9	100	14,00	0,36	0,11	0,42
430,1	120	13,01	0,29	0,09	0,39

m_{ss} (g) 380,6
 área (cm²) 520,33
 X_i (%bs) 31,37

T_g (°C) 80
 G (kg/s) 0,014
 pré secagem sim

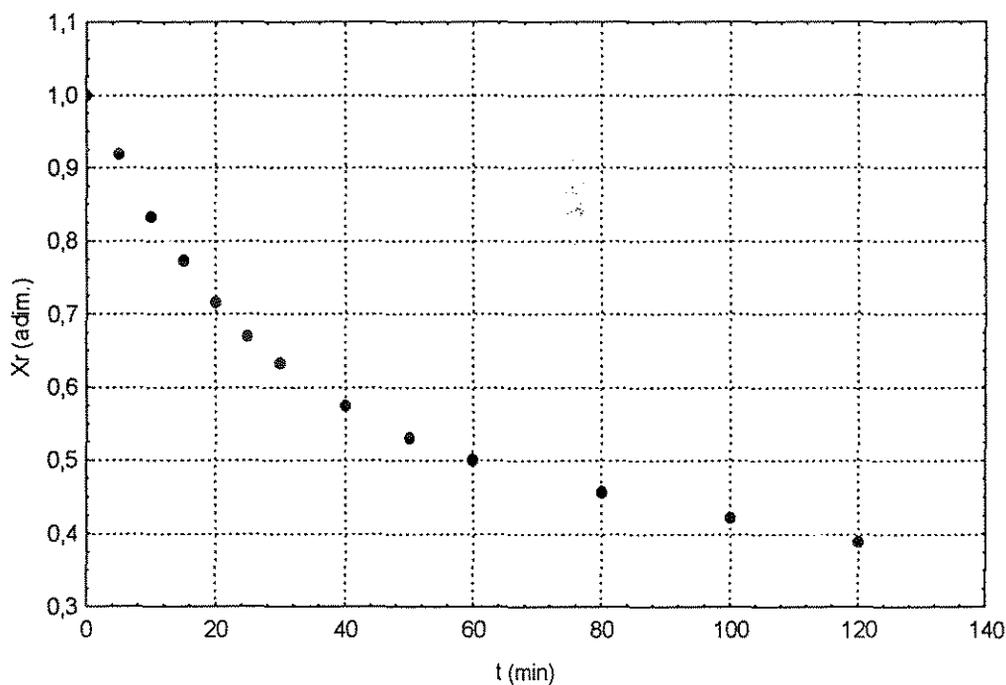


Figura A2.1. Curva de secagem (corrida 2)

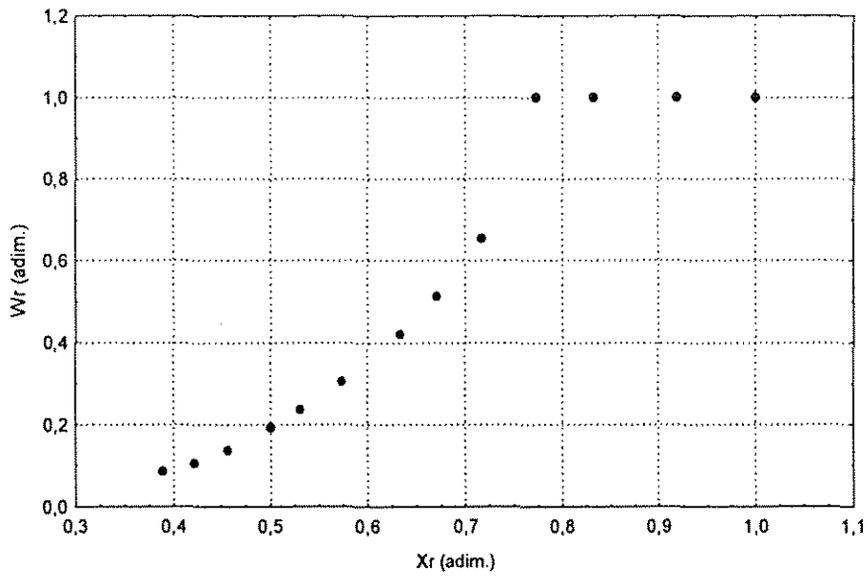


Figura A2.2. Curva de taxa de secagem (corrida 2)

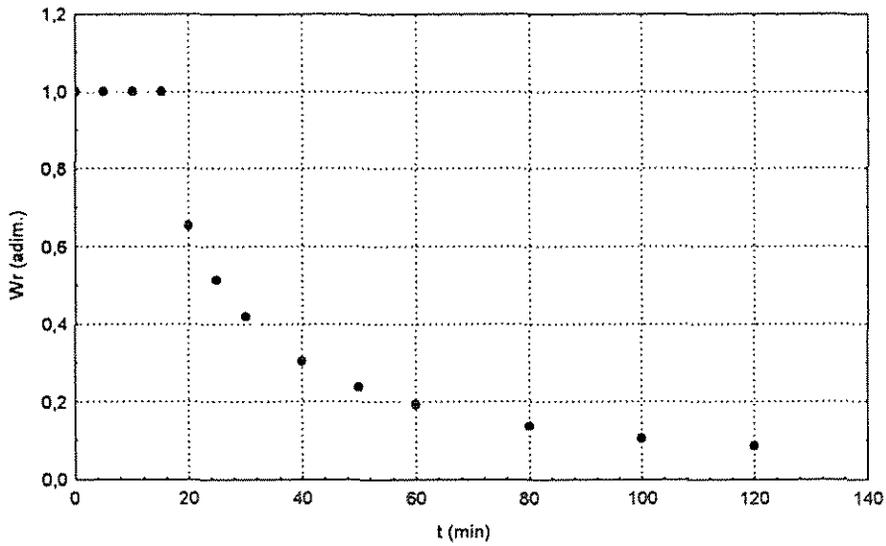


Figura A2.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 2)

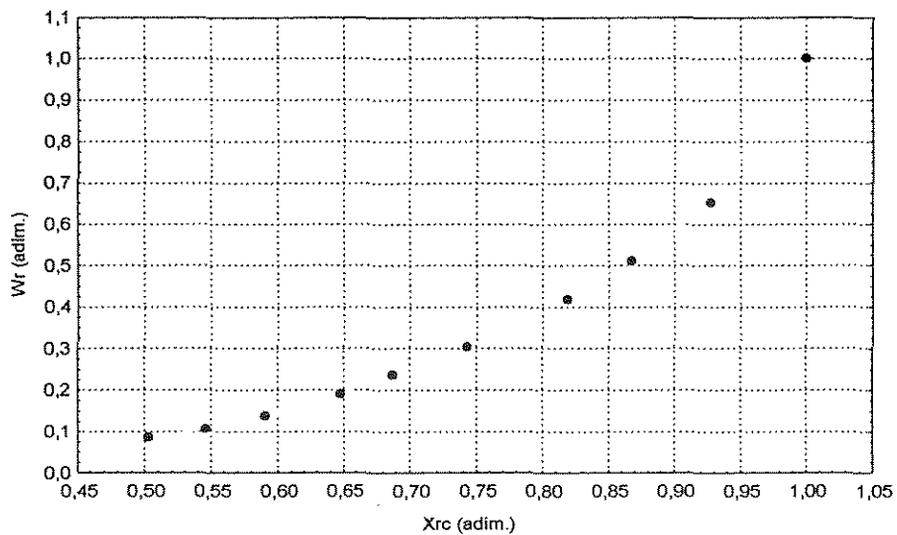


Figura A2.4. curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 2)

Tabela A3: Condições de secagem (corrida 3)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
500	0	33,13	1,34	1,00	1,00
496,7	5	32,26	1,34	1,00	0,97
491,4	10	30,84	1,34	1,00	0,92
488,4	15	30,05	1,34	1,00	0,89
485,1	20	29,17	1,34	1,00	0,85
481,9	25	28,32	1,34	1,00	0,82
479,4	30	27,65	1,34	1,00	0,80
474,7	40	26,40	0,96	0,71	0,75
470,2	50	25,20	0,76	0,57	0,71
466,5	60	24,21	0,62	0,47	0,67
461	80	22,75	0,46	0,34	0,62
456,7	100	21,61	0,36	0,27	0,58
453,6	120	20,78	0,30	0,22	0,55

m_{ss} (g) 375,56
 área (cm²) 520,33
 X_i (%bs) 33,13

Tg (°C) 40
 G (kg/s) 0,036
 pré secagem sim

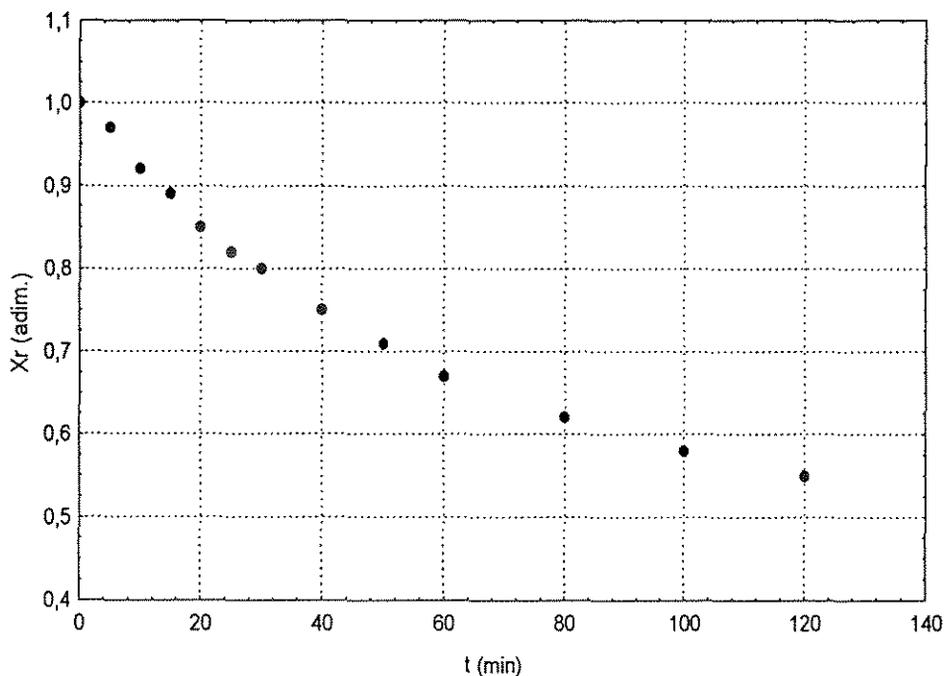


Figura A3.1. Curva de secagem (corrida 3)

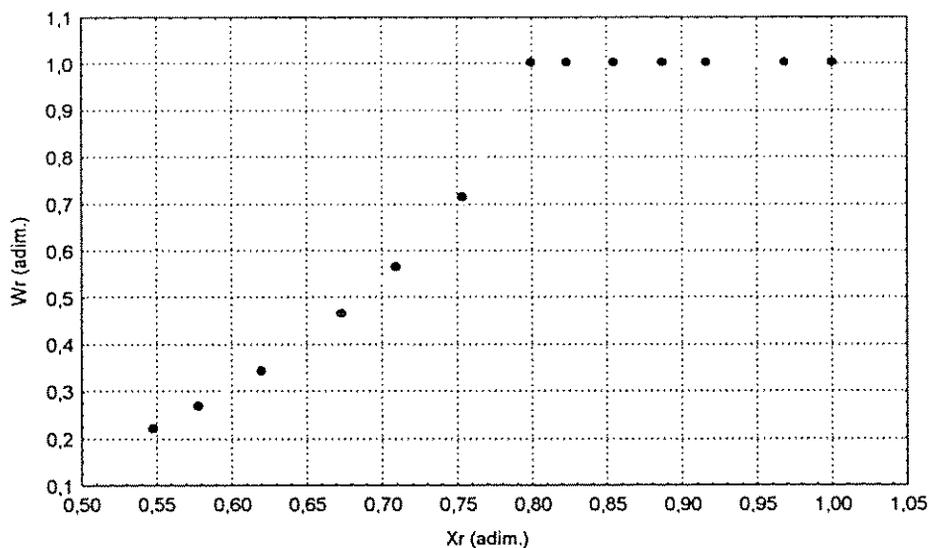


Figura A3.2. Curva de taxa de secagem (corrida 3)

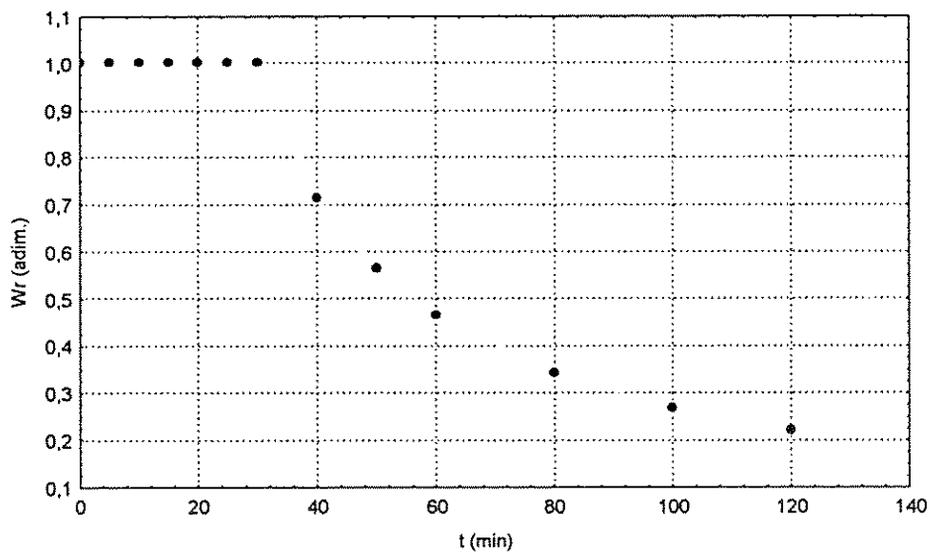


Figura A3.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 3)

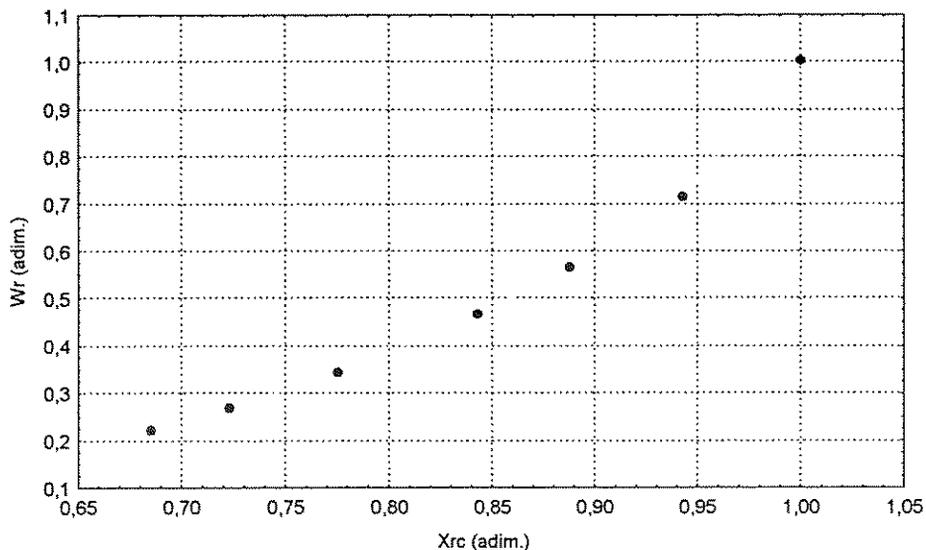


Figura A3.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 3)

Tabela A4: Condições de secagem (corrida 4)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
500	0	30,52	3,46	1,00	1,00
490,7	5	28,09	3,46	1,00	0,92
481,9	10	25,79	3,46	1,00	0,84
474,2	15	23,78	2,77	0,80	0,77
467,8	20	22,11	2,03	0,59	0,71
462,3	25	20,68	1,59	0,46	0,66
458,2	30	19,61	1,30	0,38	0,63
452	40	17,99	0,95	0,27	0,57
447,6	50	16,84	0,74	0,21	0,53
444,4	60	16,00	0,60	0,17	0,50
440	80	14,86	0,43	0,12	0,46
436,7	100	13,99	0,33	0,10	0,43
434,1	120	13,32	0,27	0,08	0,41

m_{ss} (g) 383,09
 área (cm²) 520,33
 X_i (%bs) 30,52

Tg (°C) 80
 G (kg/s) 0,036
 pré secagem não

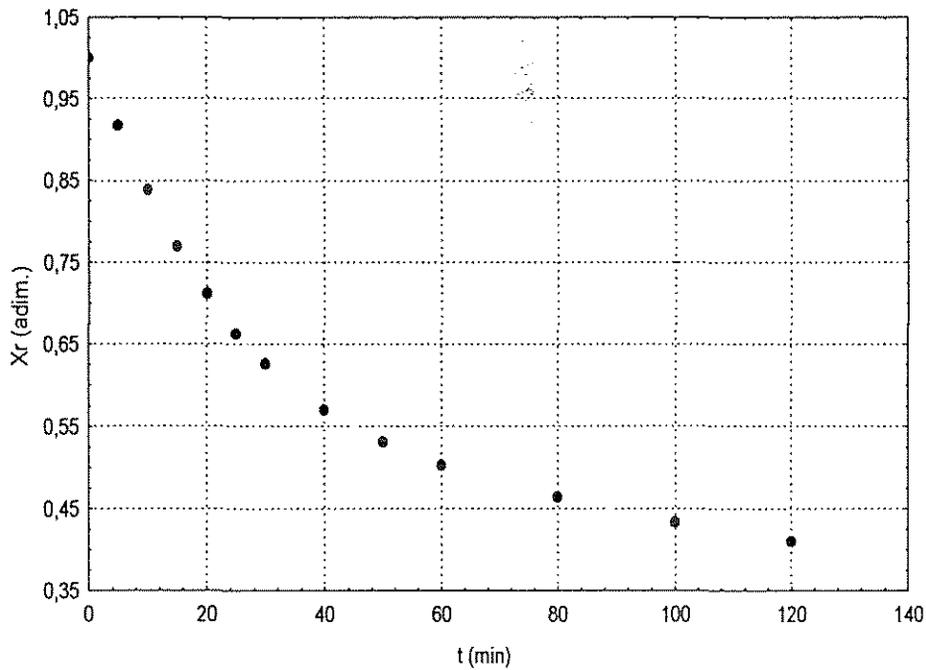


Figura A4.1. Curva de secagem (corrida 4)

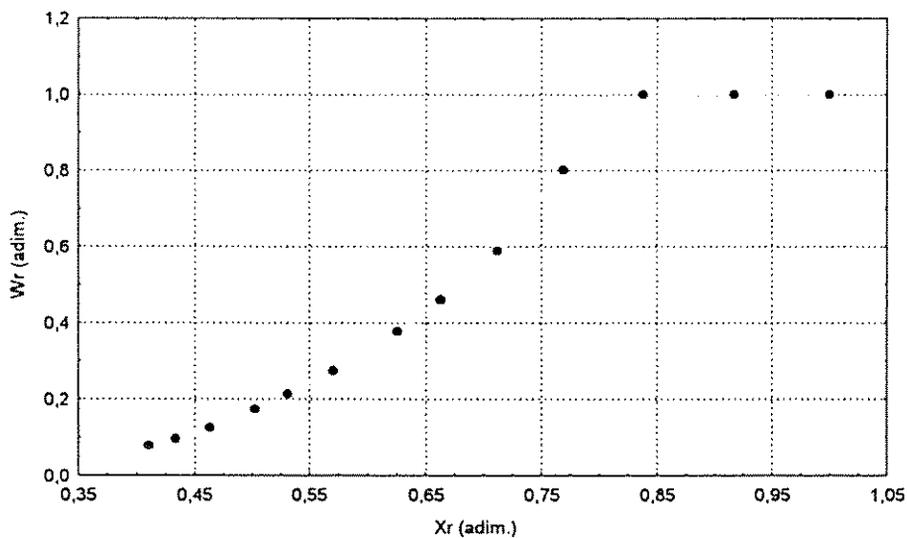


Figura A4.2. Curva de taxa de secagem (corrida 4)

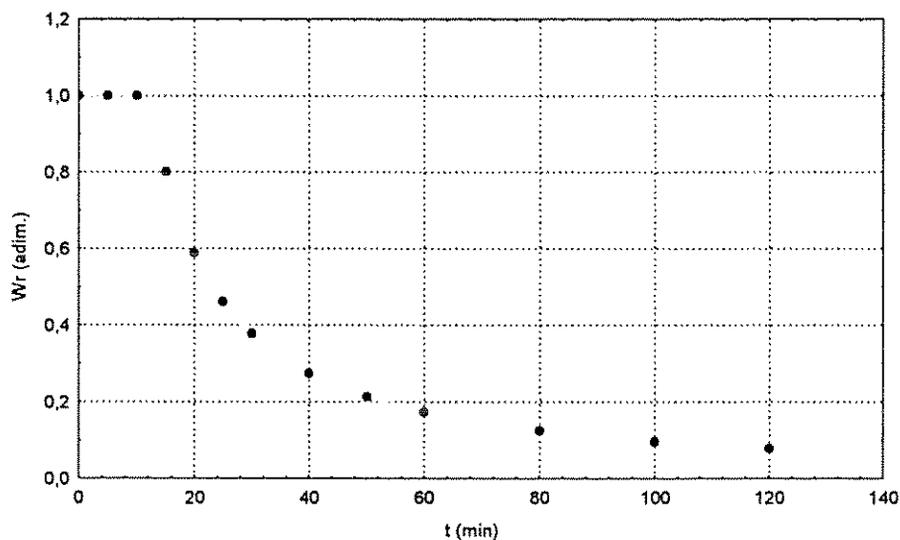


Figura A4.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 4)

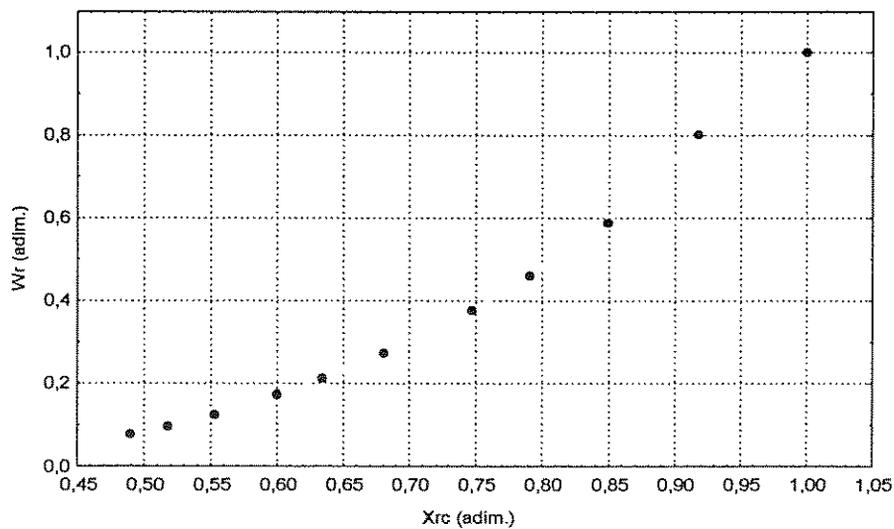


Figura A4.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 4)

Tabela A5: Condições de secagem (corrida 5)

m (g)	t (min)	X (%obs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
500	0	30,70	0,59	1,00	1,00
498,7	5	30,36	0,59	1,00	0,99
498,1	10	30,21	0,59	1,00	0,98
496,9	15	29,89	0,59	1,00	0,97
492,5	20	28,74	0,59	1,00	0,92
490,6	25	28,24	0,59	1,00	0,90
489,3	30	27,90	0,59	1,00	0,89
486,1	40	27,07	0,59	1,00	0,86
484,7	50	26,70	0,59	1,00	0,84
482,3	60	26,08	0,59	1,00	0,82
477,6	80	24,85	0,59	1,00	0,77
473,6	100	23,80	0,49	0,83	0,73
469,8	120	22,81	0,40	0,68	0,69
466,2	140	21,87	0,34	0,57	0,65
462,9	160	21,00	0,29	0,49	0,62
459,6	180	20,14	0,26	0,43	0,58
457,1	200	19,49	0,23	0,38	0,56
454,8	220	18,89	0,20	0,34	0,53
452,3	240	18,23	0,18	0,31	0,51

m_{ss} (g) 382,55
 área (cm²) 520,33
 X_i (%obs) 30,70

Tg (°C) 40
 G (kg/s) 0,014
 pré secagem sim

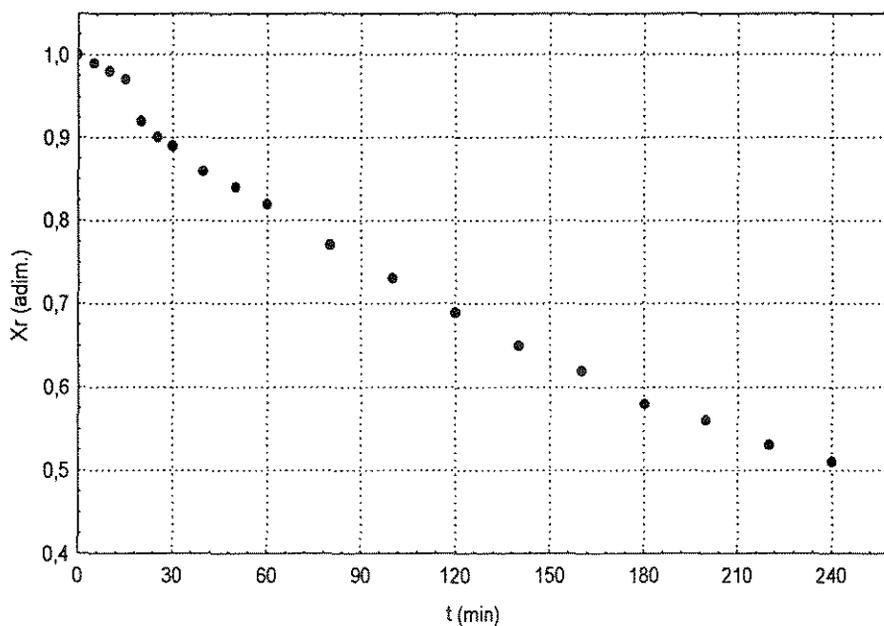


Figura A5.1. Curva de secagem (corrida 5)

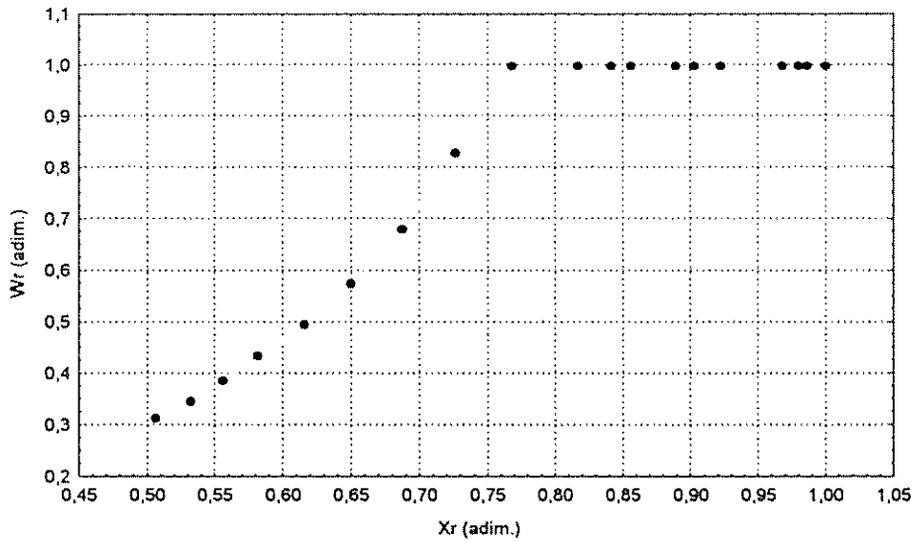


Figura A5.2. Curva de taxa de secagem (corrida 5)

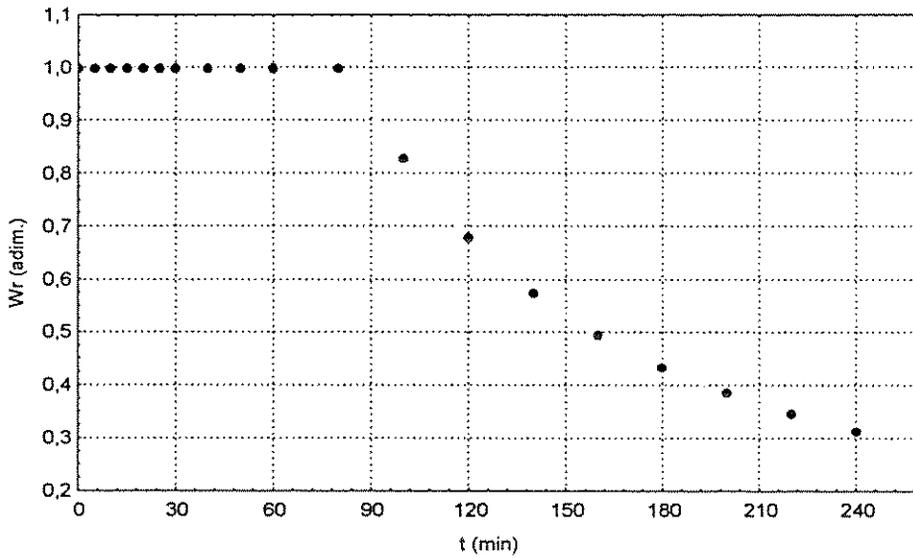


Figura A5.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 5)

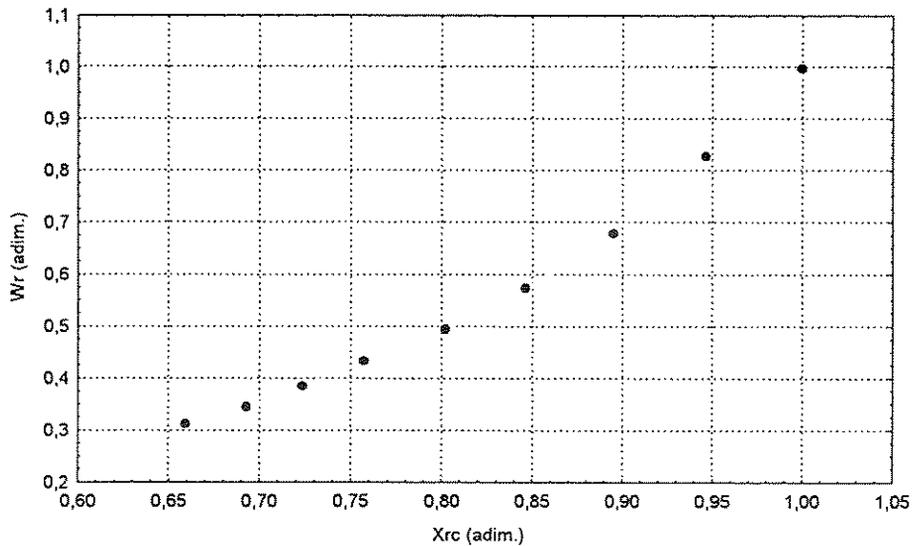


Figura A5.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 5)

Tabela A6: Condições de secagem (corrida 6)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
500	0	53,99	1,87	1,00	1,00
495,6	5	52,63	1,87	1,00	0,97
488,7	10	50,51	1,87	1,00	0,93
483,1	15	48,78	1,87	1,00	0,90
475,2	20	46,35	1,87	1,00	0,85
470,2	25	44,81	1,87	1,00	0,82
465	30	43,21	1,87	1,00	0,79
455,6	40	40,31	1,87	1,00	0,74
446,2	50	37,42	1,87	1,00	0,68
438	60	34,89	1,87	1,00	0,64
423,8	80	30,52	1,54	0,82	0,55
411,5	100	26,73	1,19	0,64	0,48
400,1	120	23,22	0,96	0,51	0,41
390,1	140	20,14	0,78	0,42	0,35
381,6	160	17,52	0,65	0,35	0,30
375	180	15,49	0,55	0,30	0,26
370,2	200	14,01	0,47	0,25	0,24
367,3	220	13,12	0,41	0,22	0,22
364,6	240	12,29	0,36	0,19	0,20

m_{ss} (g) 324,7
 área (cm²) 520,33
 X_i (%bs) 53,99

Tg (°C) 80
 G (kg/s) 0,014
 pré secagem não

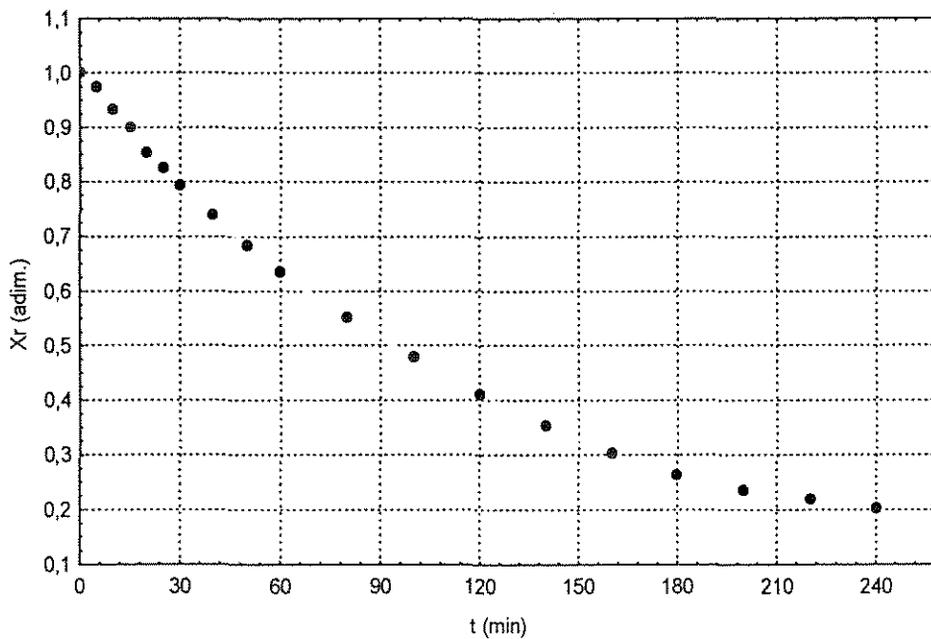


Figura A6.1. Curva de secagem (corrida 6)

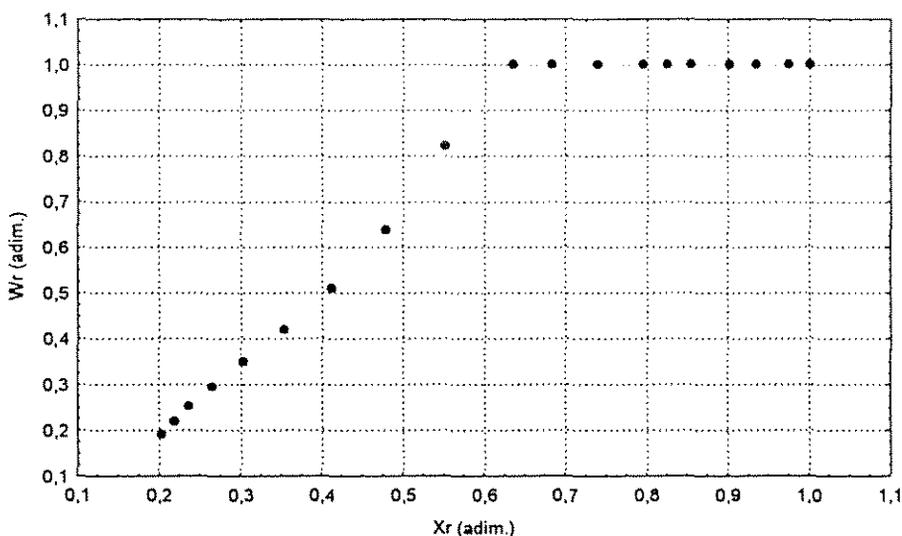


Figura A6.2. Curva de taxa de secagem (corrida 6)

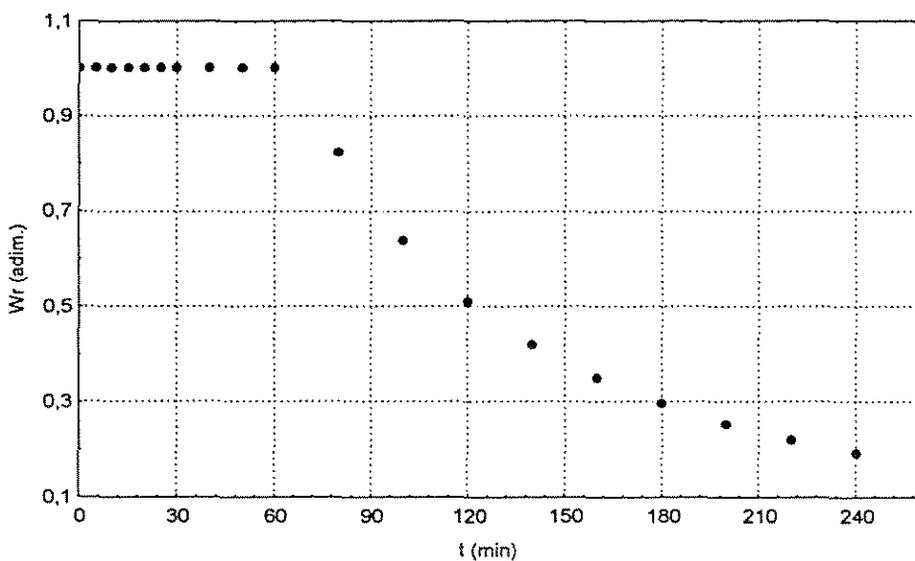


Figura A6.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 6)

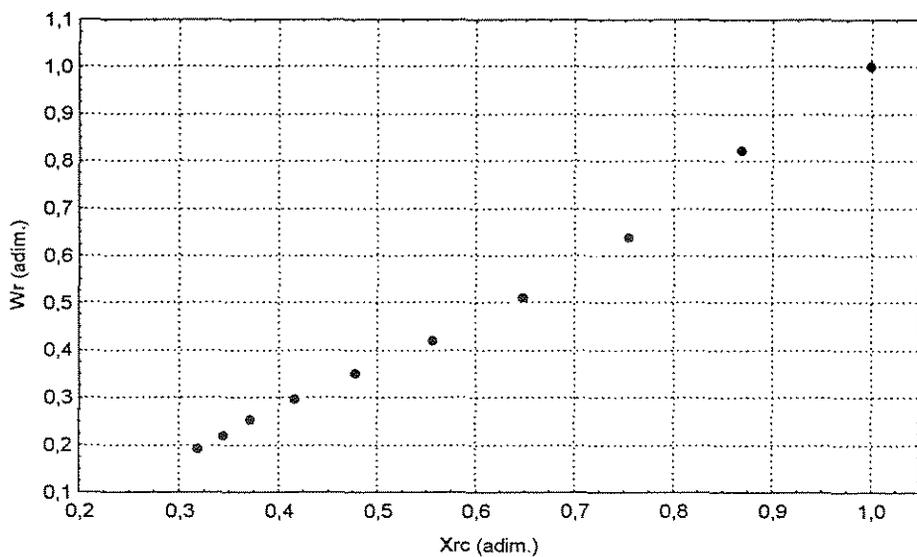


Figura A6.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 6)

Tabela A7: Condições de secagem (corrida 7)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
500	0	46,58	1,97	1,00	1,00
493,4	5	44,65	1,97	1,00	0,95
489,5	10	43,51	1,97	1,00	0,92
484,8	15	42,13	1,97	1,00	0,89
478,6	20	40,31	1,97	1,00	0,85
474,6	25	39,14	1,97	1,00	0,82
470,3	30	37,88	1,97	1,00	0,79
462	40	35,44	1,66	0,84	0,73
454,3	50	33,19	1,32	0,67	0,67
446,5	60	30,90	1,09	0,56	0,62
436,4	80	27,94	0,81	0,41	0,54
428	100	25,48	0,63	0,32	0,48
422	120	23,72	0,52	0,26	0,44
417,2	140	22,31	0,44	0,22	0,40
413,5	160	21,23	0,37	0,19	0,38
411,2	180	20,55	0,33	0,17	0,36
408,7	200	19,82	0,29	0,15	0,34
405,9	220	19,00	0,26	0,13	0,32
404,3	240	18,53	0,23	0,12	0,31

m_{ss} (g) 341,1
 área (cm²) 520,33
 X_i (%bs) 46,58

Tg (°C) 40
 Q (kg/s) 0,036
 pré secagem não

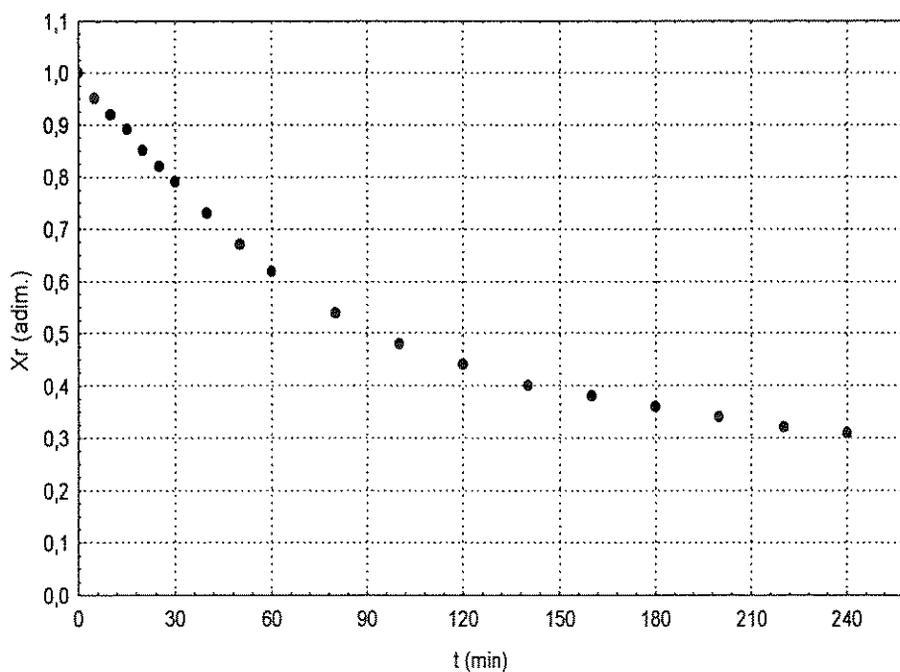


Figura A7.1. Curva de secagem (corrida 7)

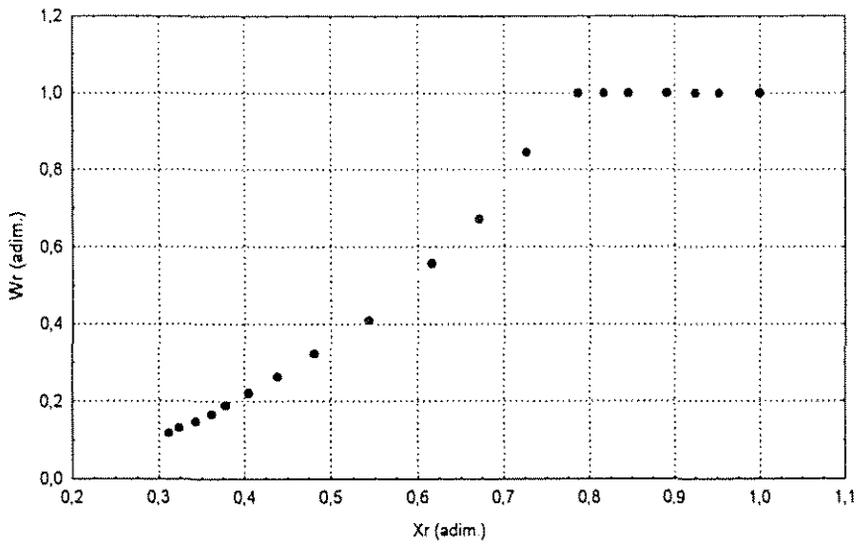


Figura A7.2. Curva de taxa de secagem (corrida 7)

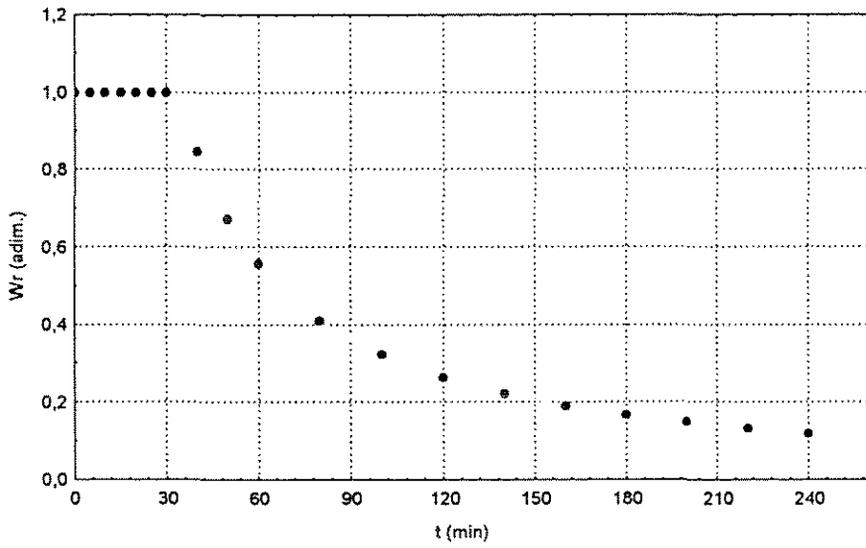


Figura A7.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 7)

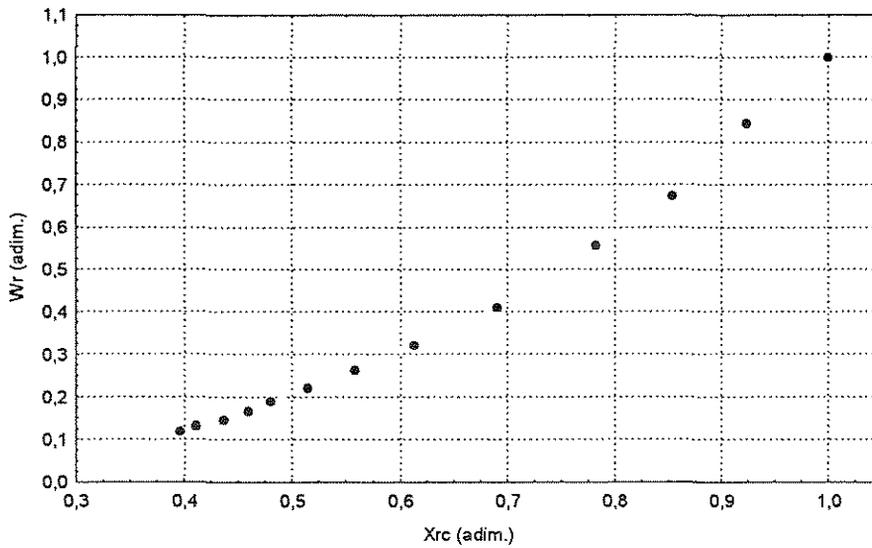


Figura A7.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 7)

Tabela A8: Condições de secagem (corrida 8)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
500	0	34,25	4.29	1.00	1.00
487,1	5	30,79	4.29	1.00	0.89
477,2	10	28,13	4.29	1.00	0.81
467,8	15	25,60	3.14	0.73	0.74
459,7	20	23,43	2.30	0.54	0.67
454,4	25	22,01	1.81	0.42	0.63
448,6	30	20,45	1.48	0.34	0.58
441	40	18,41	1.07	0.25	0.52
435,5	50	16,93	0.83	0.19	0.47
431,4	60	15,83	0.67	0.16	0.44
425,7	80	14,30	0.48	0.11	0.39
422	100	13,31	0.37	0.09	0.36
419,3	120	12,58	0.30	0.07	0.34
416,9	140	11,94	0.25	0.06	0.32
415,3	160	11,51	0.21	0.05	0.31
413,8	180	11,11	0.18	0.04	0.30
412,3	200	10,70	0.16	0.04	0.28
411	220	10,35	0.14	0.03	0.27
409,9	240	10,06	0.13	0.03	0.26

m_{ss} (g) 372,44
 área (cm²) 520,33
 X_i (%bs) 34,25

Tg (°C) 80
 G (kg/s) 0,036
 pré secagem sim

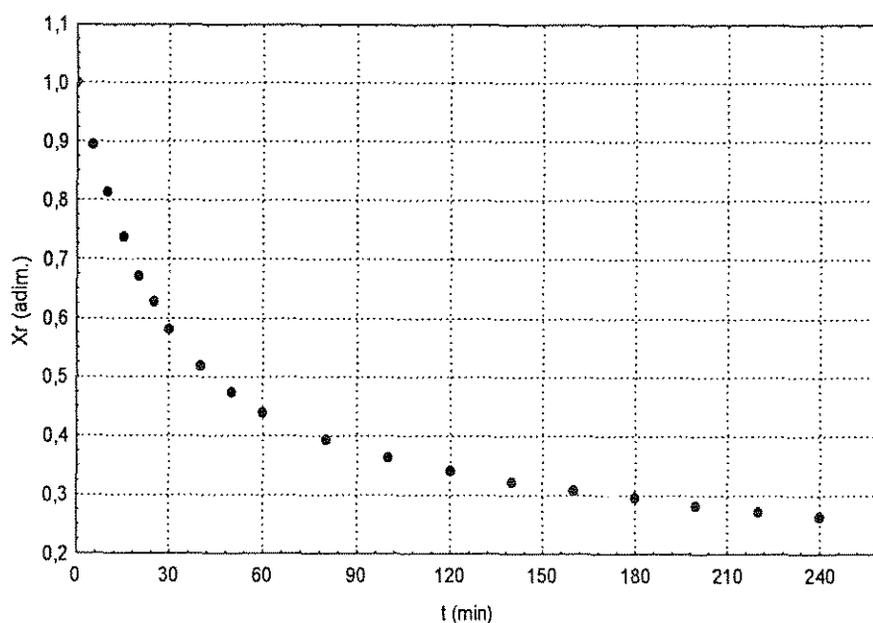


Figura A8.1. Curva de secagem (corrida 8)

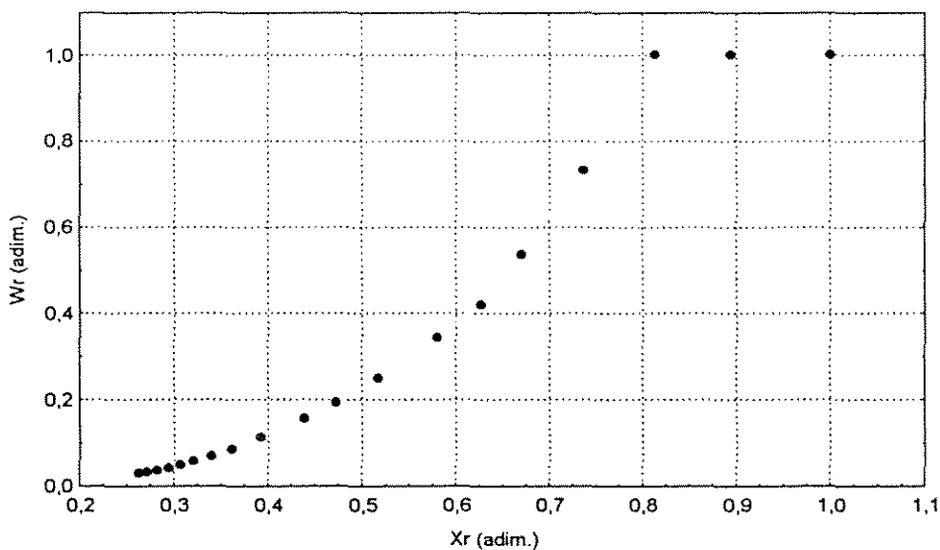


Figura A8.2. Curva de taxa de secagem (corrida 8)

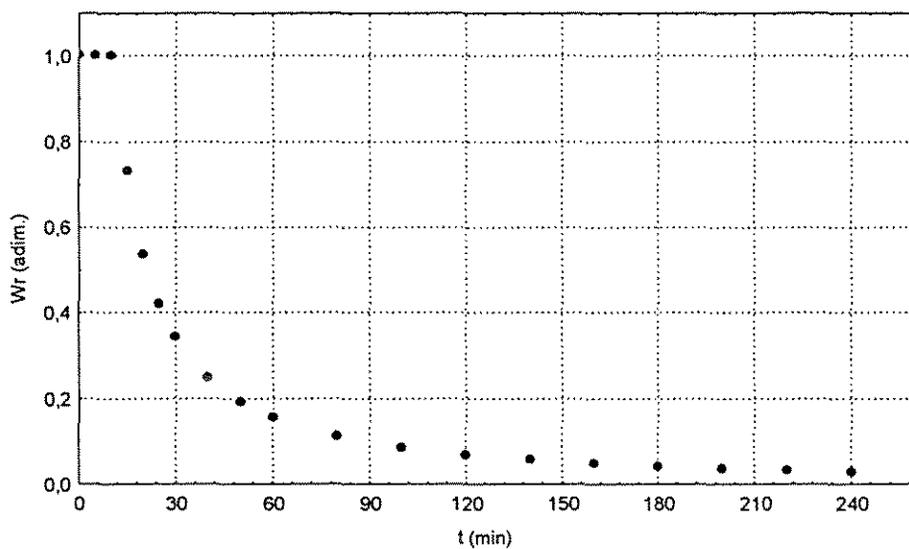


Figura A8.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 8)

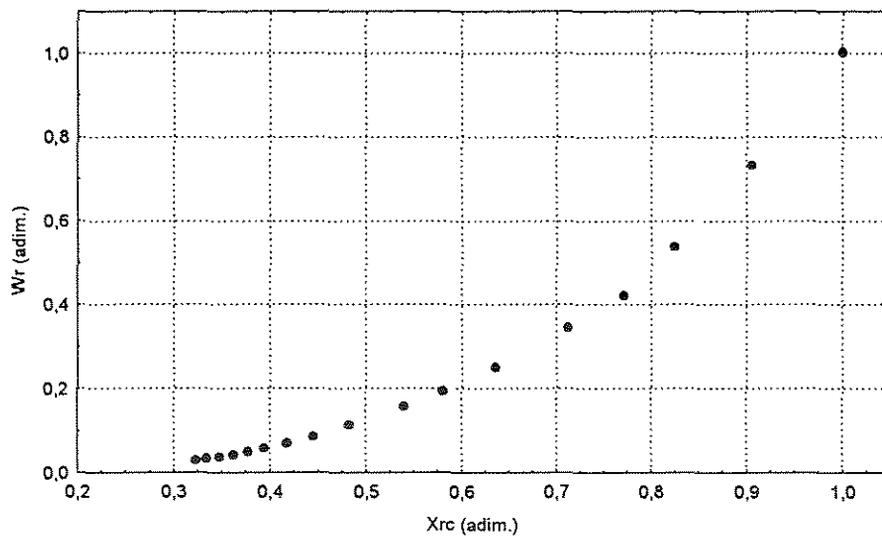


Figura A8.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 8)

Tabela A9: Condições de secagem (corrida 9)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	37,41	2,80	1,00	1,00
1481,7	5	35,74	2,80	1,00	0,95
1464	10	34,12	2,80	1,00	0,90
1446,5	15	32,51	2,80	1,00	0,85
1429,3	20	30,94	2,80	1,00	0,80
1417,1	25	29,82	2,80	1,00	0,76
1405,1	30	28,72	2,80	1,00	0,73
1377,7	40	26,21	2,80	1,00	0,65
1350,2	50	23,69	2,66	0,95	0,57
1326,5	60	21,52	2,14	0,77	0,50
1284,8	80	17,70	1,50	0,54	0,38
1254,6	100	14,93	1,12	0,40	0,29
1238,5	120	13,46	0,87	0,31	0,24

m_{ss} (g) 1091,59
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 37,41

Tg (°C) 40
 G (kg/s) 0,014
 pré secagem sim

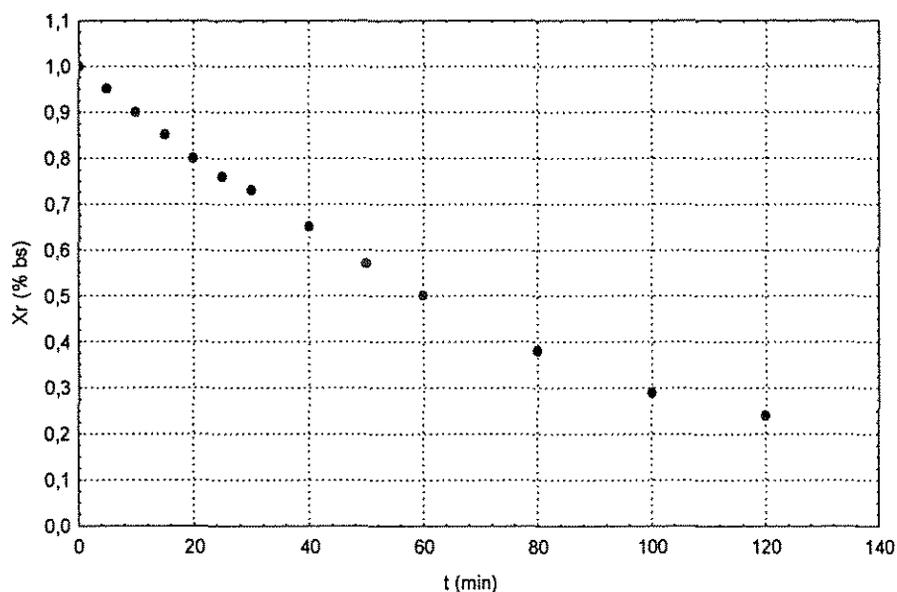


Figura A9.1. Curva de secagem (corrida 9)

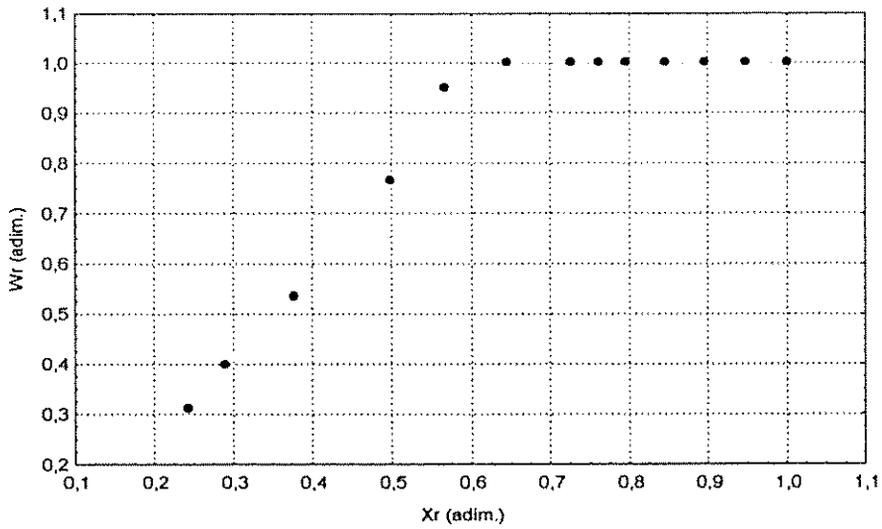


Figura A9.2. Curva de taxa de secagem (corrida 9)

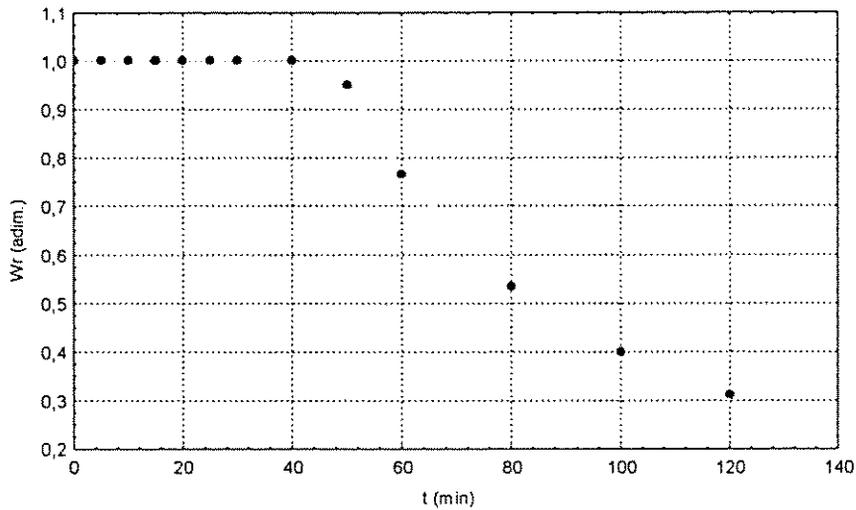


Figura A9.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 9)

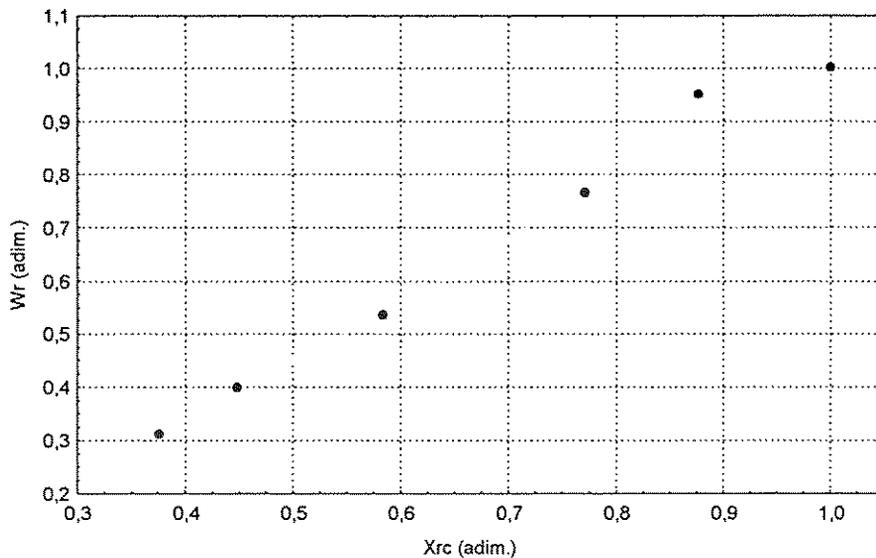


Figura A9.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 9)

Tabela A10: Condições de secagem (corrida 10)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	41,41	1,27	1,00	1,00
1493	5	40,75	1,27	1,00	0,98
1487,4	10	40,22	1,27	1,00	0,97
1479,8	15	39,50	1,27	1,00	0,95
1471,6	20	38,73	1,27	1,00	0,93
1464,3	25	38,04	1,27	1,00	0,92
1457,5	30	37,40	1,27	1,00	0,90
1444,7	40	36,19	1,27	1,00	0,87
1433,5	50	35,14	1,27	1,00	0,84
1423,9	60	34,23	1,14	0,90	0,82
1403,9	80	32,35	0,85	0,67	0,77
1387	100	30,75	0,68	0,53	0,73
1372,5	120	29,39	0,56	0,44	0,70

m_{ss} (g) 1060,78
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 41,41

Tg (°C) 80
 G (kg/s) 0,014
 pré secagem não

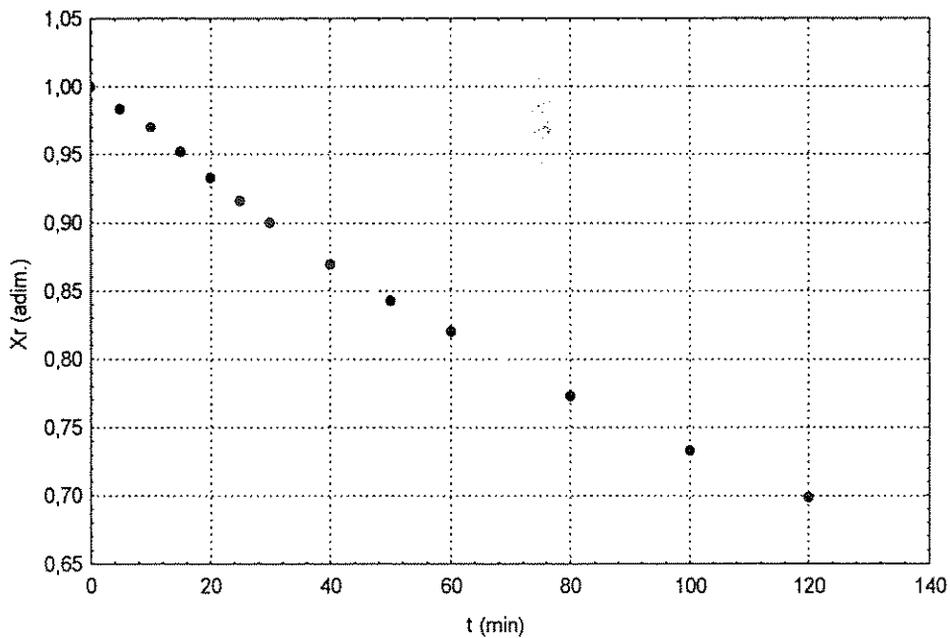


Figura A10.1. Curva de secagem (corrida 10)

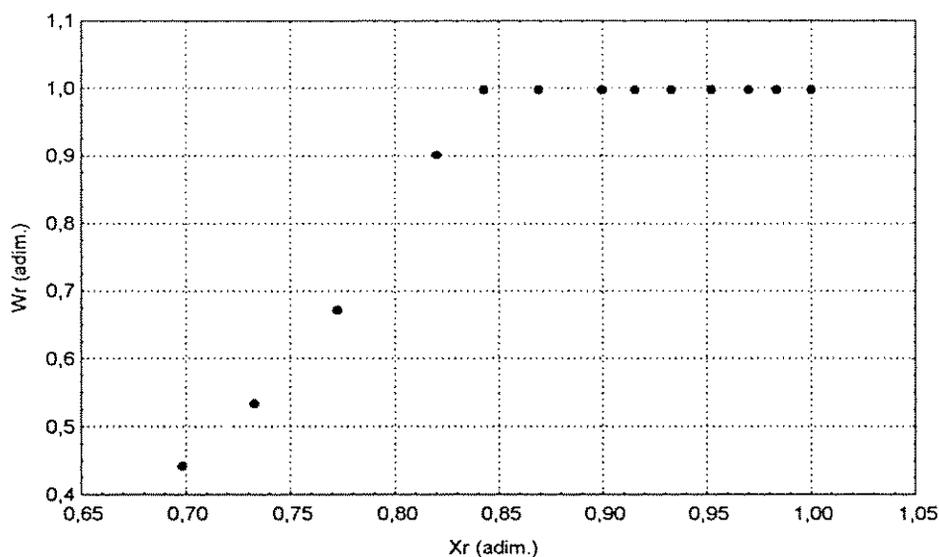


Figura A10.2. Curva de taxa de secagem (corrida 10)

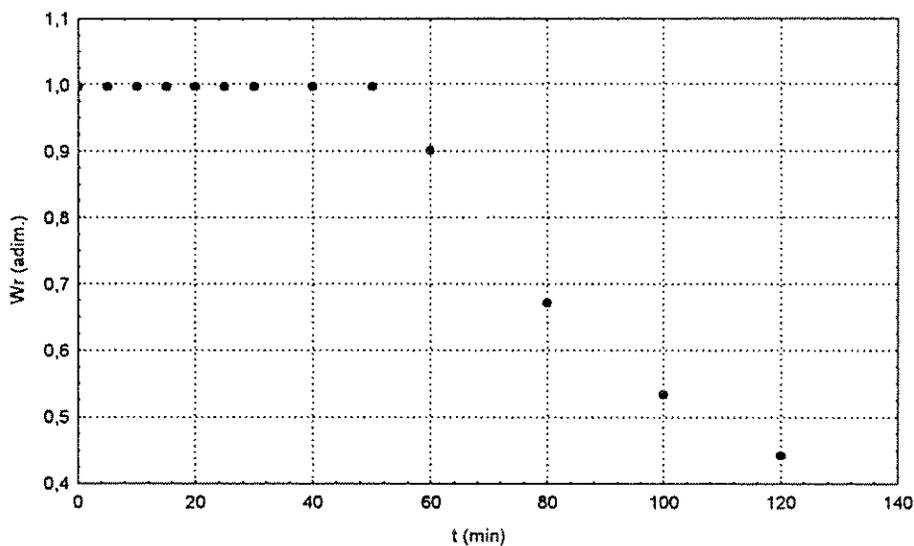


Figura A10.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 10)

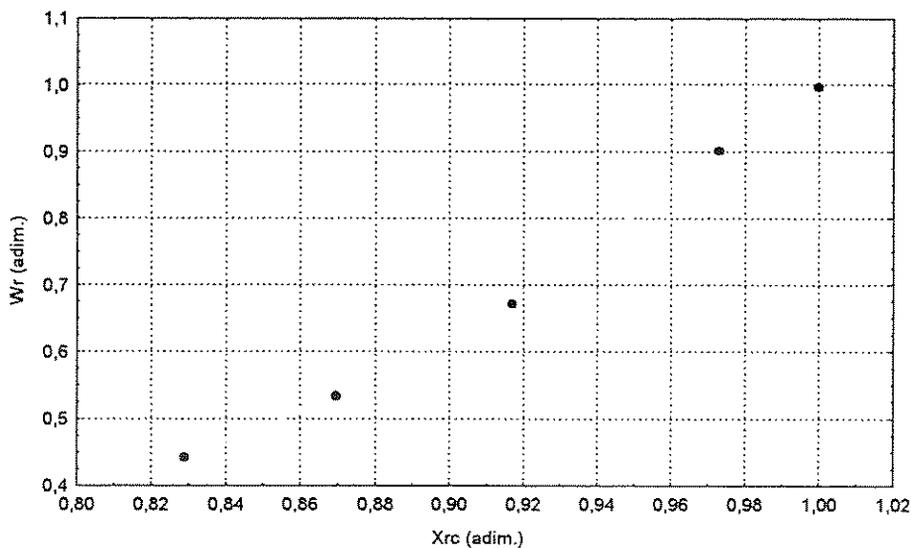


Figura A10.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 10)

Tabela A11: Condições da secagem (corrida 11)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	58,52	5,73	1,00	1,00
1471,2	5	55,47	5,73	1,00	0,94
1438,1	10	51,97	5,73	1,00	0,88
1406,2	15	48,60	5,73	1,00	0,81
1375,6	20	45,37	5,43	0,95	0,75
1340,6	25	41,67	4,38	0,76	0,68
1298,1	30	37,18	3,66	0,64	0,60
1234,5	40	30,46	2,74	0,48	0,47
1206,6	50	27,51	2,17	0,38	0,42
1203,5	60	27,18	1,78	0,31	0,41
1185,8	80	25,31	1,30	0,23	0,37
1179	100	24,59	1,00	0,18	0,36
1165,1	120	23,12	0,81	0,14	0,33

m_{ss} (g) 946,28
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 58,52

Tg (°C) 40
 G (kg/s) 0,036
 pré-secagem não

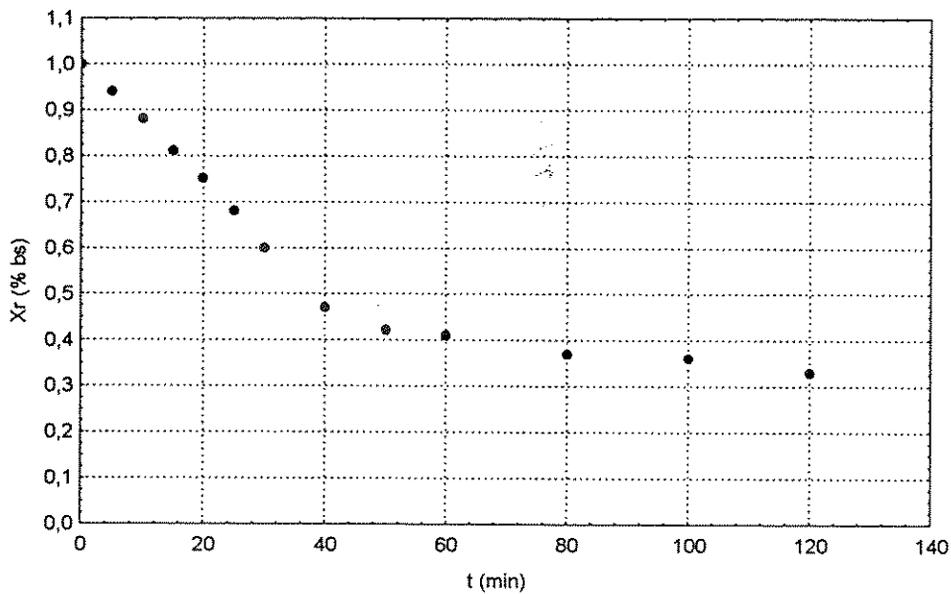


Figura A11.1. Curva de secagem (corrida 11)

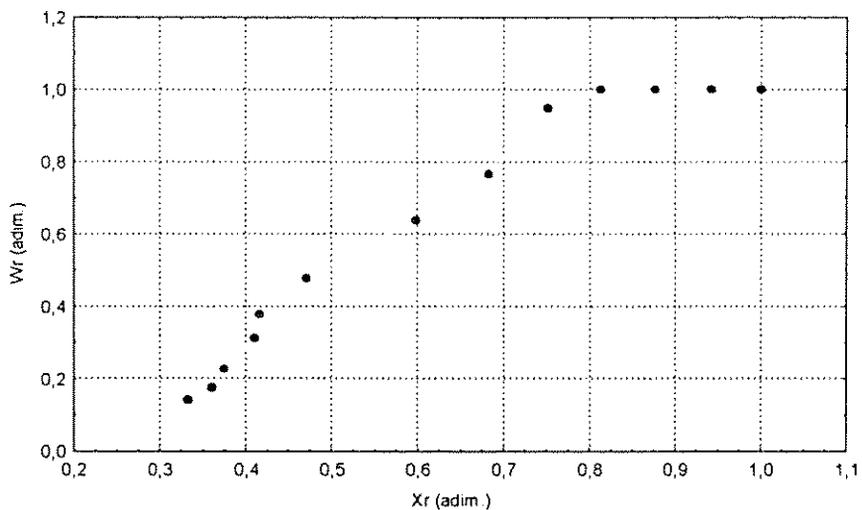


Figura A11.2. Curva de taxa de secagem (corrida 11)

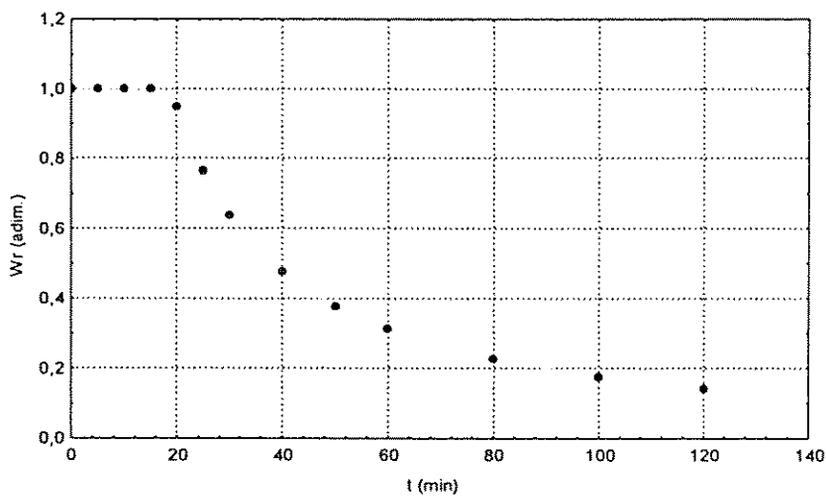


Figura A11.3. Curva de taxa de secagem em função tempo (corrida 11)

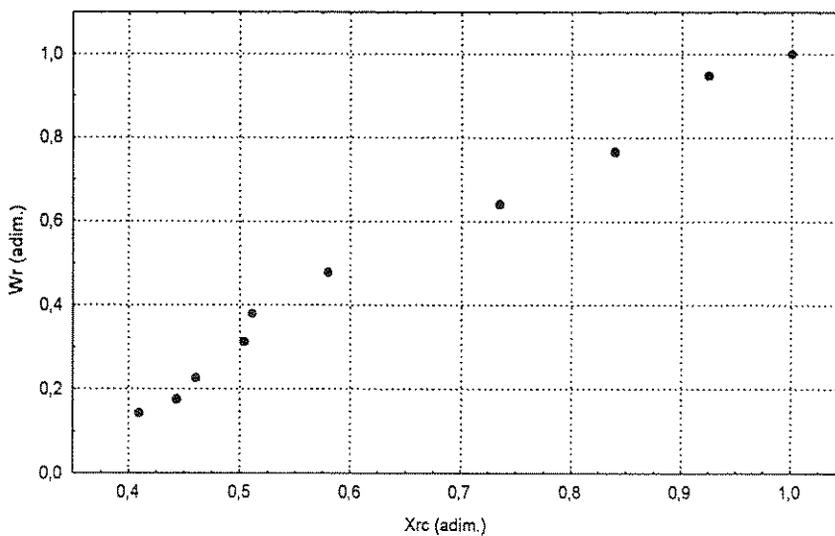


Figura A11.4. Curva de taxa de secagem característica para o período pós-crítico (corrida 11)

Tabela A12: Condições de secagem (corrida 12)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500,0	0	31,88	1,98	1,00	1,00
1484,2	5	30,49	1,98	1,00	0,95
1471,5	10	29,37	1,98	1,00	0,92
1459,4	15	28,31	1,98	1,00	0,88
1449,8	20	27,46	1,98	1,00	0,86
1440,9	25	26,68	1,98	1,00	0,83
1431,9	30	25,89	1,98	1,00	0,80
1415,8	40	24,47	1,67	0,84	0,76
1402,3	50	23,29	1,31	0,66	0,72
1391,0	60	22,29	1,07	0,54	0,69
1370,8	80	20,52	0,78	0,39	0,63
1354,2	100	19,06	0,61	0,31	0,58
1340,0	120	17,81	0,50	0,25	0,54

m_{ss} (g) 1137,42
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 31,88

Tg (°C) 80
 G (kg/s) 0,036
 pré secagem sim

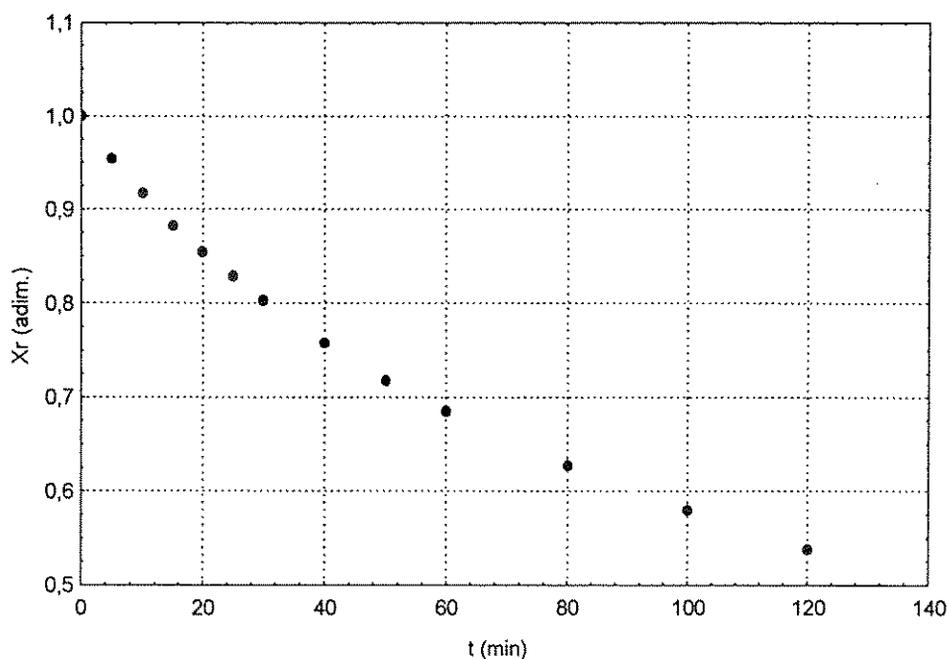


Figura A12.1. Curva de secagem (corrida 12)

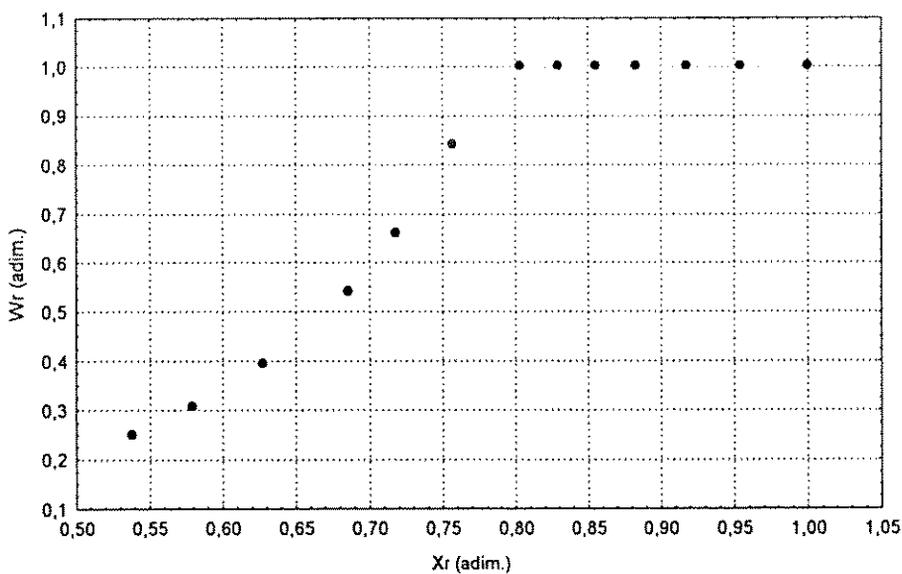


Figura A12.2. Curva de taxa de secagem (corrida 12)

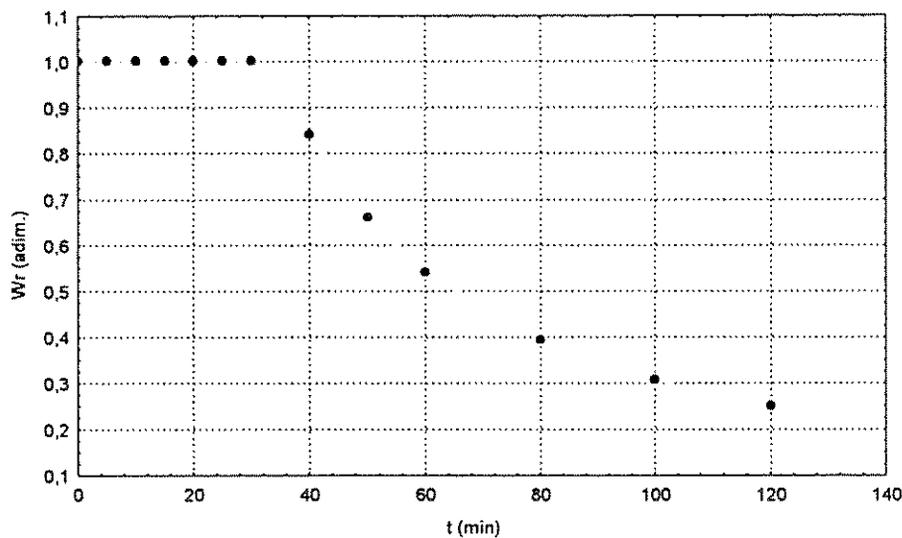


Figura A12.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 12)

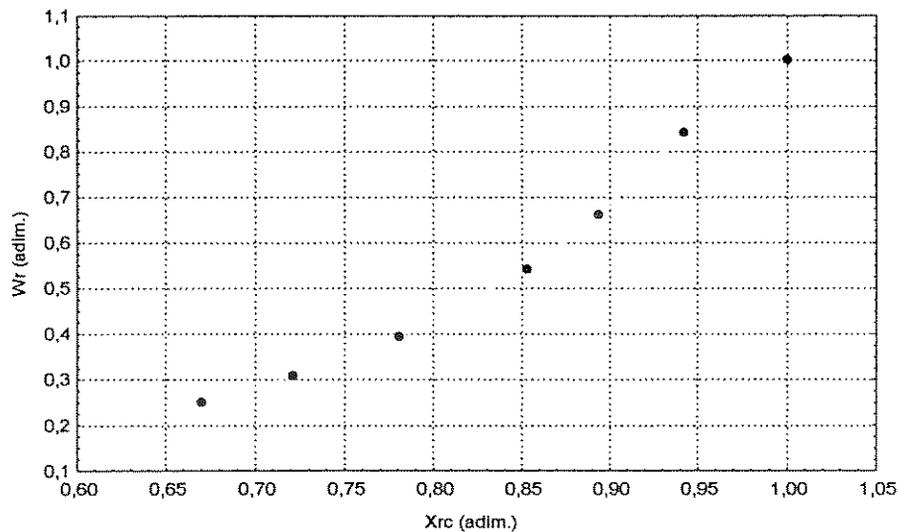


Figura A12.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 12)

Tabela A13: Condições de secagem (corrida 13)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	46,50	0,56	1,00	1,00
1496	5	46,11	0,56	1,00	0,99
1492,5	10	45,77	0,56	1,00	0,98
1489,3	15	45,45	0,56	1,00	0,97
1484,8	20	45,01	0,56	1,00	0,96
1481,3	25	44,67	0,56	1,00	0,96
1478	30	44,35	0,56	1,00	0,95
1471,9	40	43,75	0,56	1,00	0,93
1465,5	50	43,13	0,56	1,00	0,92
1460,9	60	42,68	0,56	1,00	0,91
1450,9	80	41,70	0,56	1,00	0,88
1441	100	40,74	0,56	1,00	0,86
1431,6	120	39,82	0,54	0,95	0,84
1420,7	140	38,75	0,46	0,82	0,81
1412,2	160	37,92	0,40	0,72	0,79
1404,6	180	37,18	0,36	0,64	0,77
1396,9	200	36,43	0,32	0,57	0,75
1389,3	220	35,69	0,29	0,52	0,74
1381,9	240	34,96	0,27	0,48	0,72

m_{ss} (g) 1023,9
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 46,50

Tg (C) 40
 Q (kg/s) 0,014
 pré secagem não

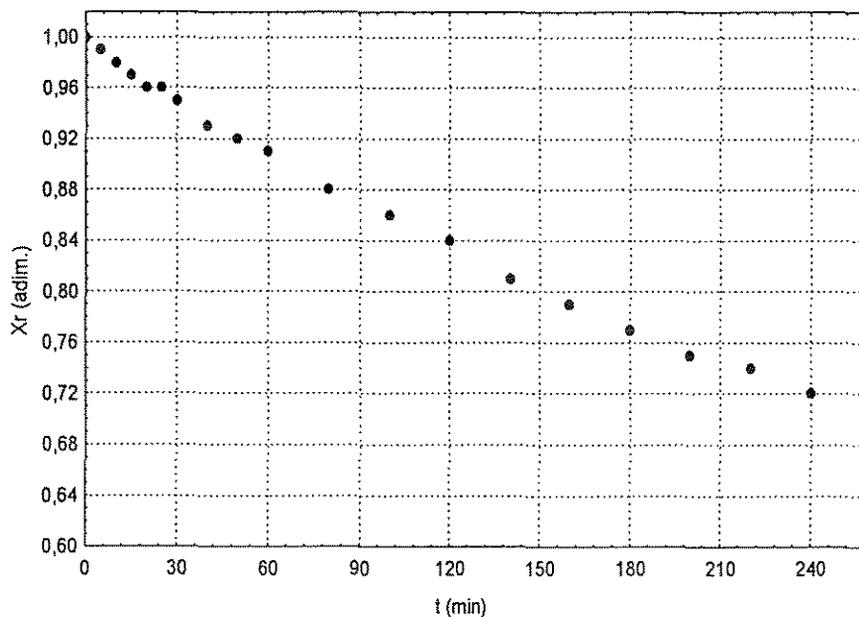


Figura A13.1. Curva de secagem (corrida 13)

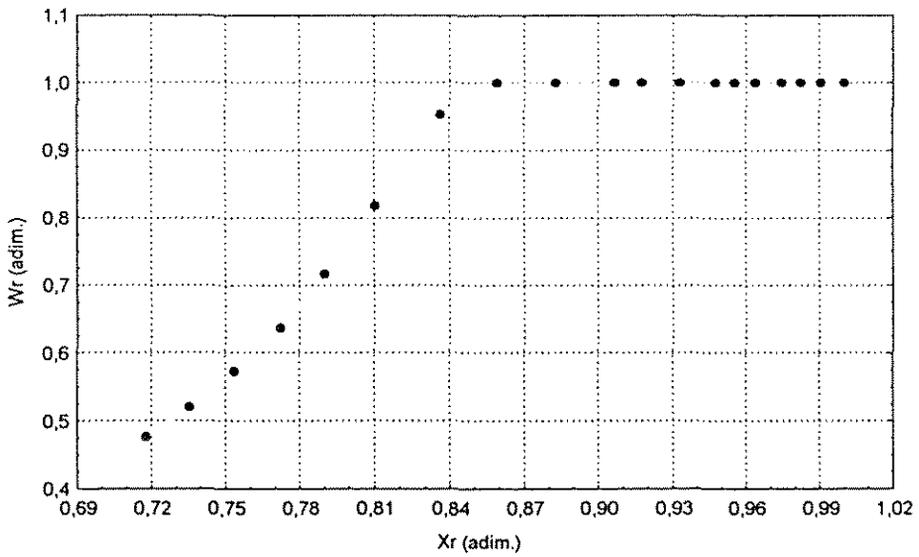


Figura A13.2. Curva de taxa de secagem (corrida 13)

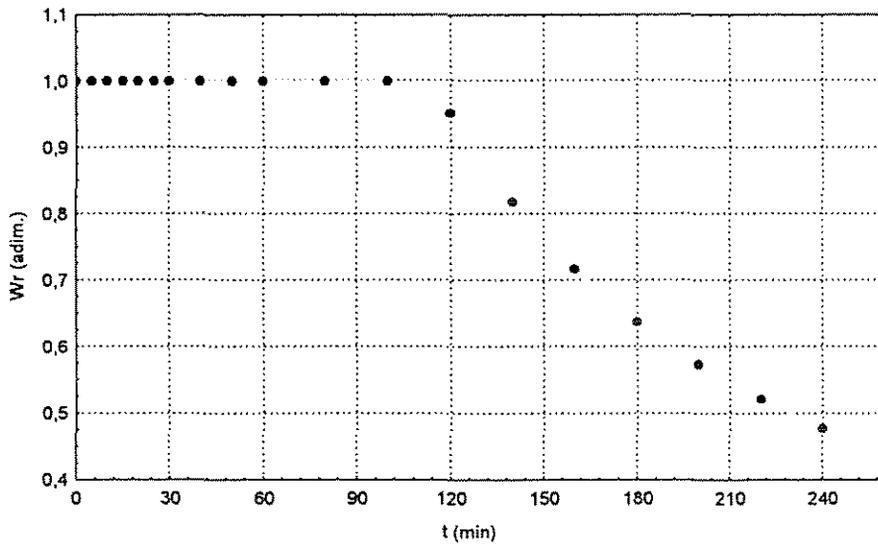


Figura A13.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 13)

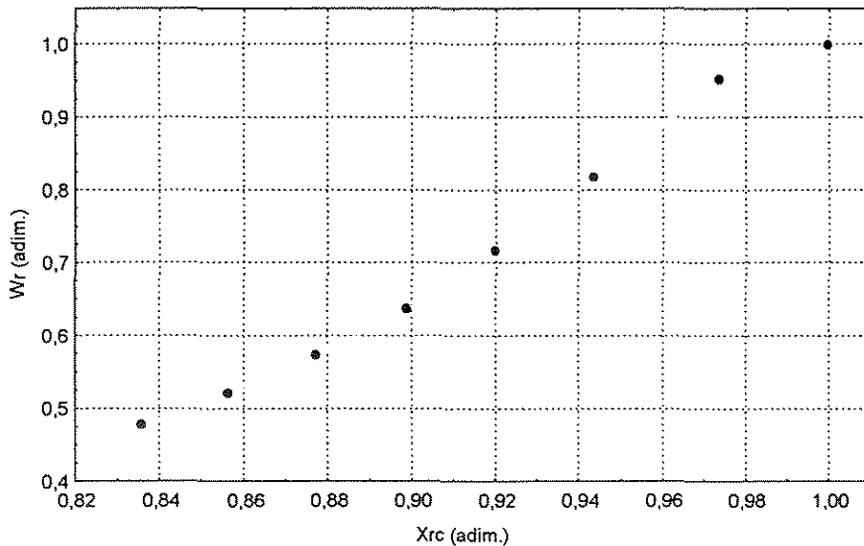


Figura A13.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 13)

Tabela A14: Condições de secagem (corrida 14)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	43,95	8,61	1,00	1,00
1446,6	5	38,83	8,61	1,00	0,88
1405,9	10	34,92	8,61	1,00	0,79
1361,4	15	30,65	8,61	1,00	0,69
1335,2	20	28,13	3,24	0,38	0,63
1318,5	25	26,53	2,56	0,30	0,59
1309,4	30	25,66	2,11	0,24	0,57
1280,2	40	22,86	1,54	0,18	0,50
1273,8	50	22,24	1,21	0,14	0,49
1265,2	60	21,42	0,99	0,11	0,47
1263,4	80	21,24	0,72	0,08	0,47
1250	100	19,96	0,56	0,06	0,44
1232,1	120	18,24	0,45	0,05	0,40
1218,2	140	16,91	0,38	0,04	0,36
1208	160	15,93	0,32	0,04	0,34
1193,6	180	14,55	0,28	0,03	0,31
1183,6	200	13,59	0,25	0,03	0,29
1177,5	220	13,00	0,22	0,03	0,27
1166,5	240	11,94	0,20	0,02	0,25

m_{ss} (g) 1042,03
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 43,95

Tg (C) 80
 Q (kg/s) 0,014
 pré secagem sim

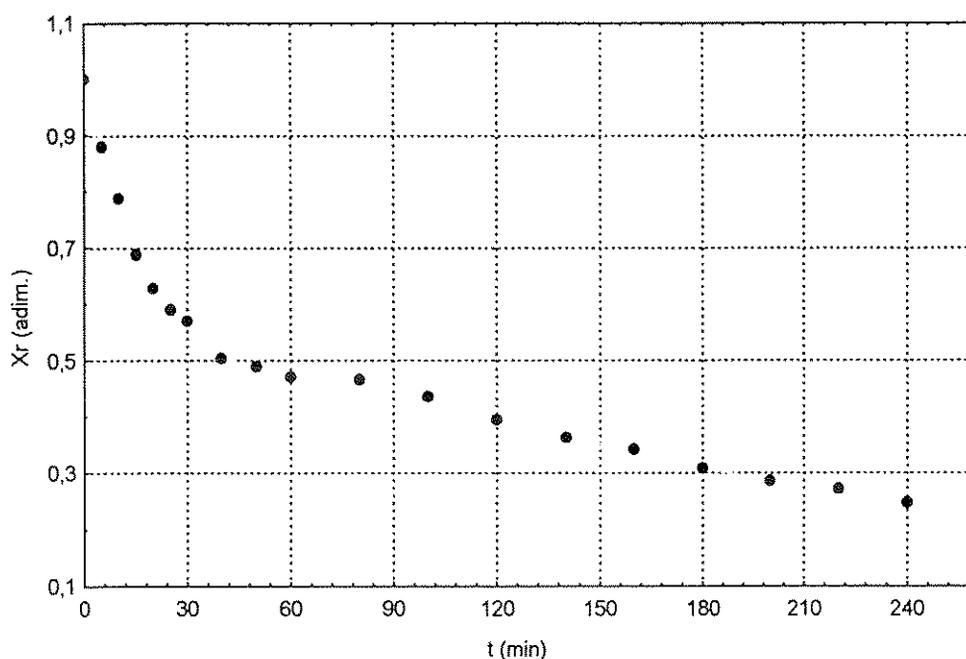


Figura A14.1 Curva de secagem (corrida 14)

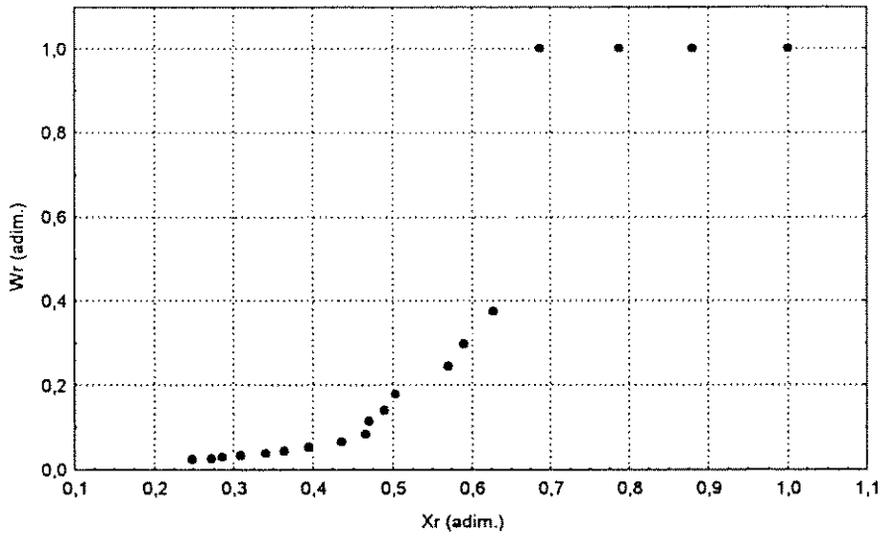


Figura A14.2. Curva de taxa de secagem (corrida 14)

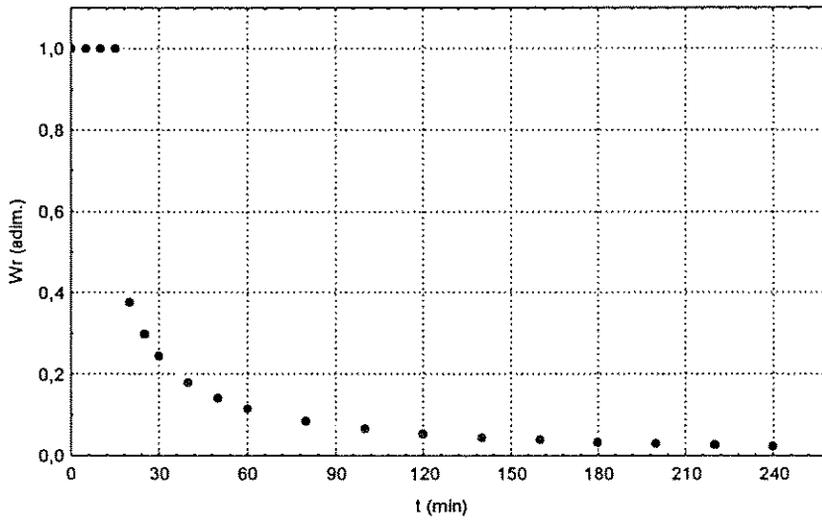


Figura A14.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 14)

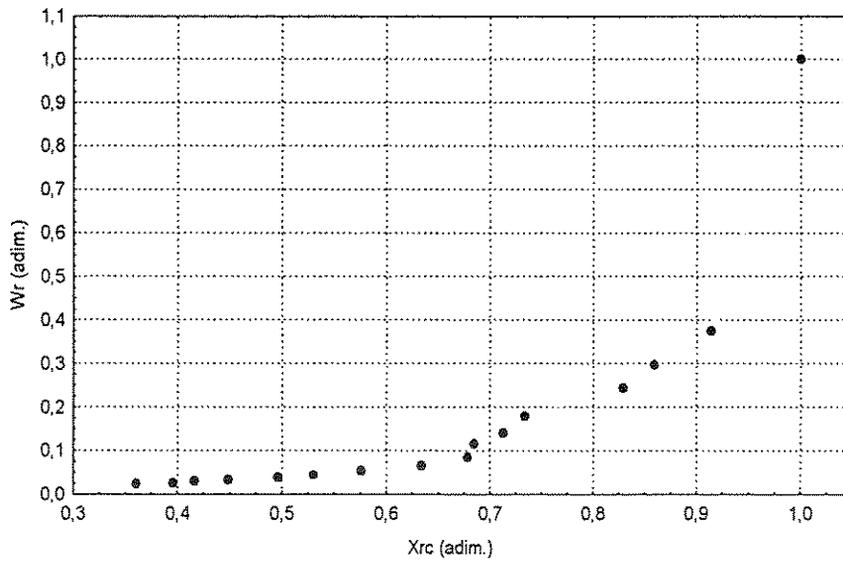


Figura A14.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 14)

Tabela A15: Condições de secagem (corrida 15)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	31,83	0,84	1,00	1,00
1489,9	5	30,95	0,84	1,00	0,97
1484	10	30,43	0,84	1,00	0,95
1480,1	15	30,08	0,84	1,00	0,93
1473,7	20	29,52	0,84	1,00	0,91
1469	25	29,11	0,84	1,00	0,90
1464,8	30	28,74	0,84	1,00	0,88
1456,4	40	28,00	0,84	1,00	0,85
1449,3	50	27,38	0,84	1,00	0,83
1442,3	60	26,76	0,84	1,00	0,81
1430,5	80	25,73	0,75	0,90	0,77
1418,6	100	24,68	0,59	0,71	0,73
1407,9	120	23,74	0,49	0,59	0,69
1398,3	140	22,90	0,41	0,50	0,66
1389,4	160	22,11	0,36	0,43	0,63
1381,5	180	21,42	0,32	0,38	0,61
1374,3	200	20,79	0,28	0,34	0,58
1367,6	220	20,20	0,25	0,30	0,56
1361,8	240	19,69	0,23	0,28	0,54

m_{ss} (g) 1137,8
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 31,83

Tg (°C) 40
 G (kg/s) 0,036
 pré secagem sim

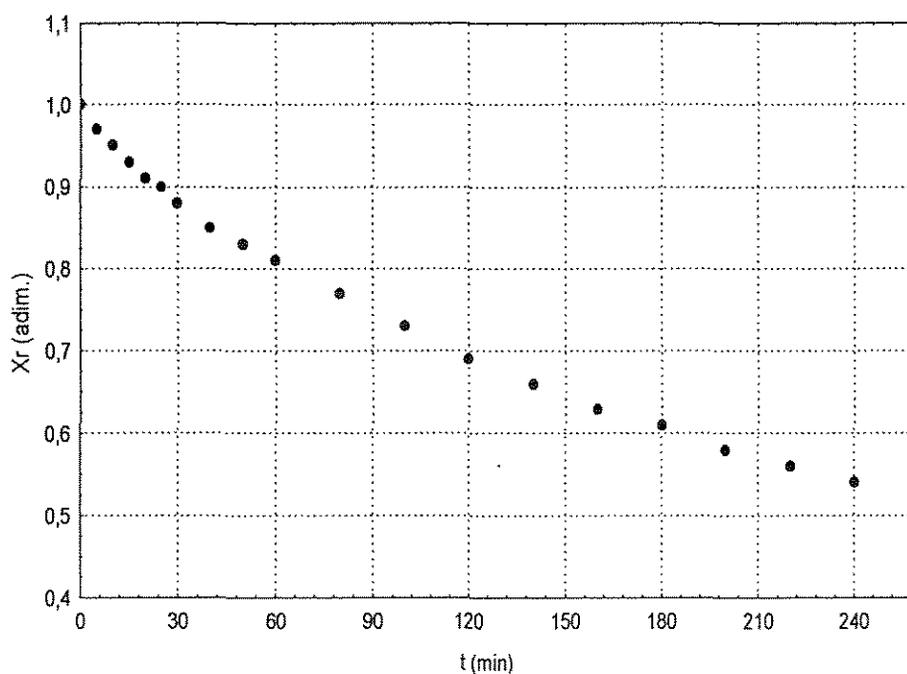


Figura A15.1. Curva de secagem (corrida 15)

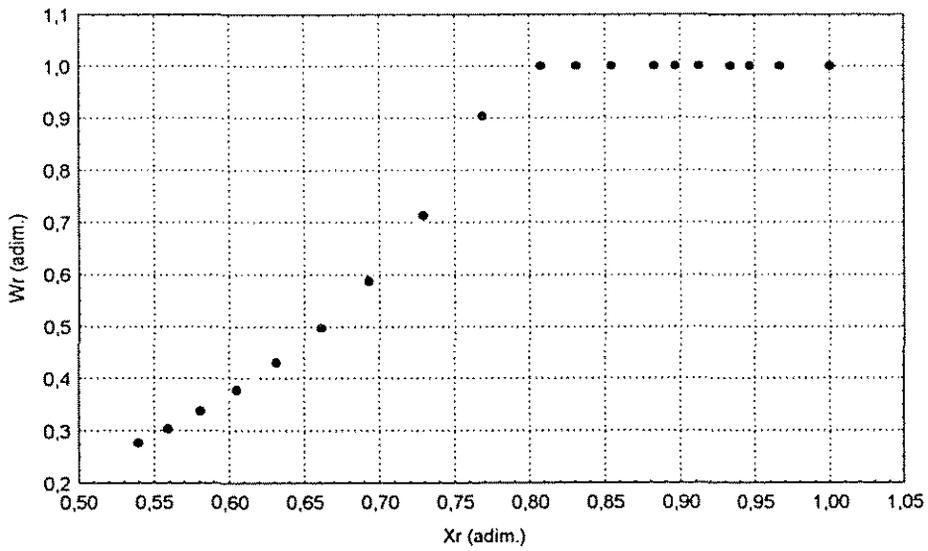


Figura A15.2. Curva de taxa de secagem (corrida 15)

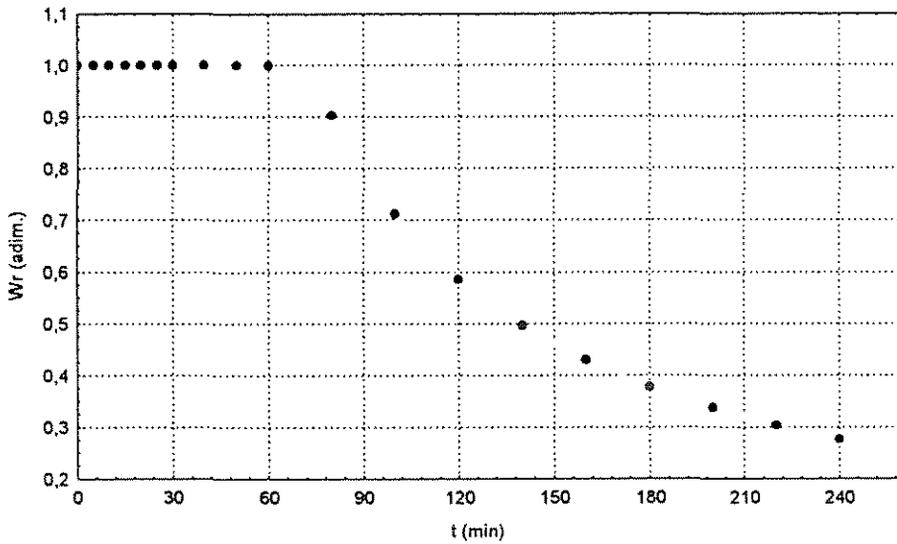


Figura A15.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 15)

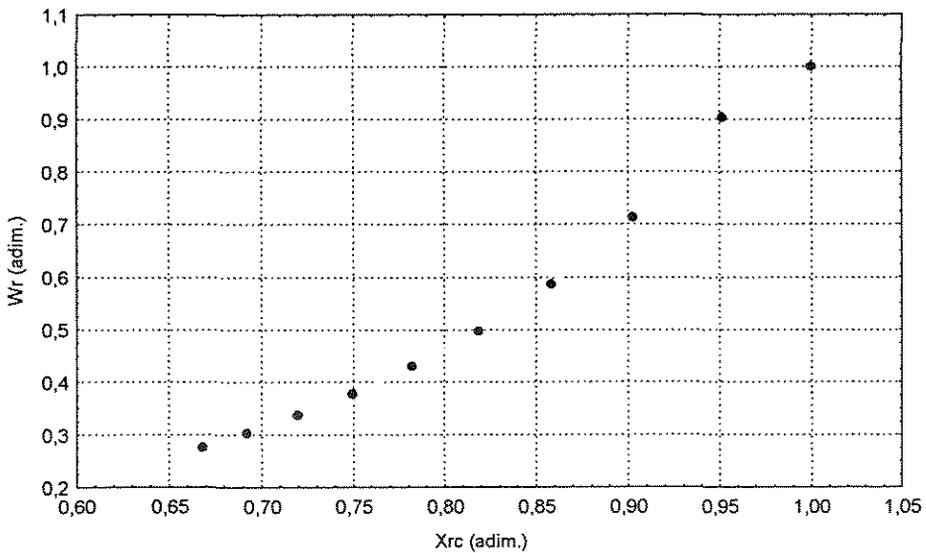


Figura A15.4. curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 15)

Tabela A16: Condições de secagem (corrida 16)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	44,51	2,86	1,00	1,00
1477,6	5	42,35	2,86	1,00	0,95
1459,3	10	40,59	2,86	1,00	0,91
1441	15	38,83	2,86	1,00	0,87
1424,1	20	37,20	2,86	1,00	0,83
1410,5	25	35,89	2,86	1,00	0,80
1397,5	30	34,64	2,86	1,00	0,77
1375,2	40	32,49	2,68	0,94	0,72
1355,3	50	30,57	2,12	0,74	0,68
1338,4	60	28,94	1,75	0,61	0,64
1310	80	26,21	1,28	0,45	0,58
1285,9	100	23,88	0,99	0,35	0,52
1265,7	120	21,94	0,80	0,28	0,48
1247,8	140	20,21	0,67	0,23	0,44
1232,6	160	18,75	0,57	0,20	0,40
1218,7	180	17,41	0,50	0,17	0,37
1206,5	200	16,24	0,43	0,15	0,34
1195,4	220	15,17	0,39	0,13	0,32
1184,7	240	14,14	0,35	0,12	0,30

m_{ss} (g)	1037,98	Tg (°C)	80
área (cm ²)	1089,74	G (kg/s)	0,036
X_i (%bs)	44,51	pré secagem	não

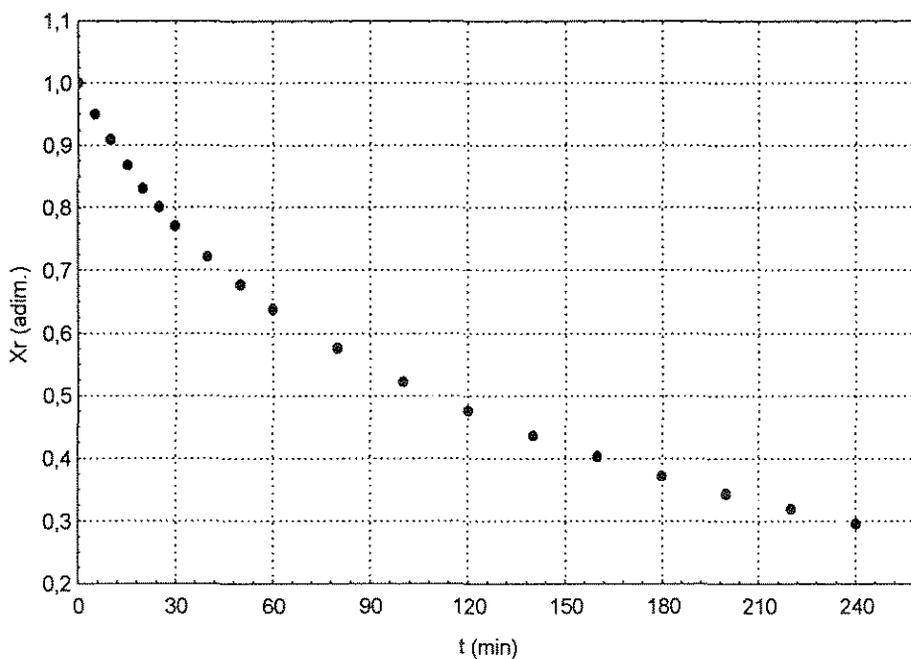


Figura A16.1. Curva de secagem (corrida 16)

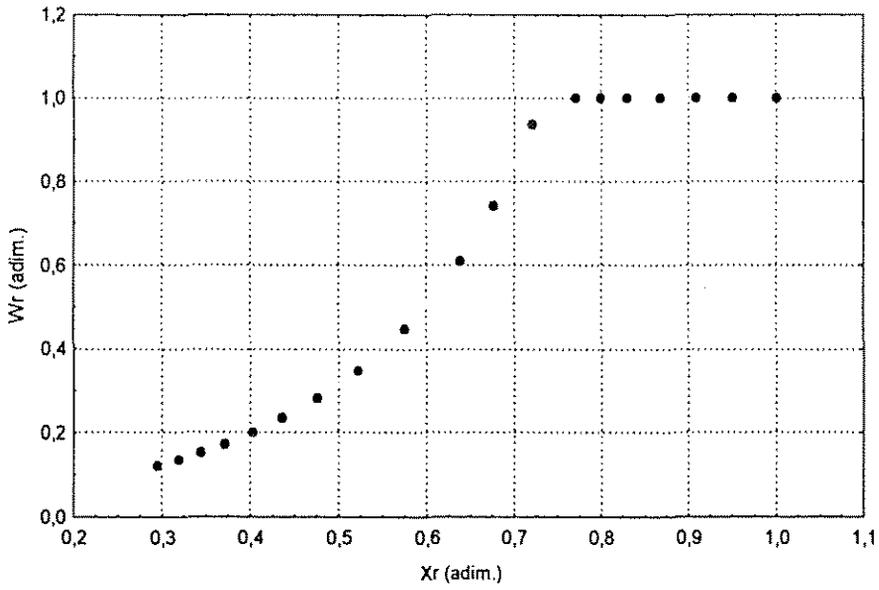


Figura A16.2. Curva de taxa de secagem (corrida 16)

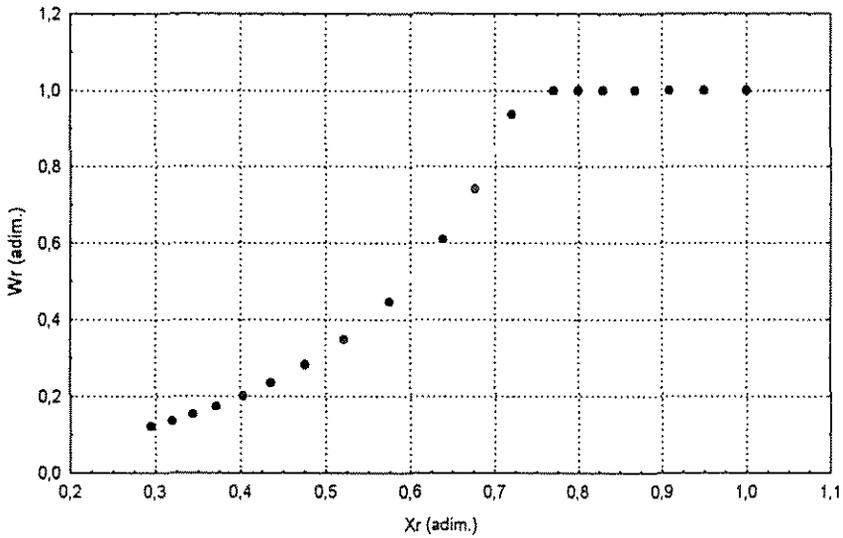


Figura A16.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 16)

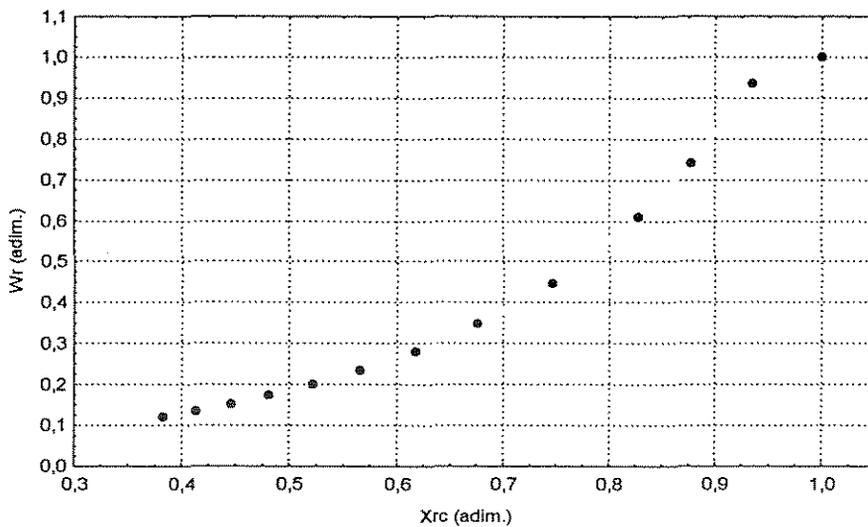


Figura A16.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 16)

Tabela A17: Condições de secagem (corrida 17)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	33,98	0,96	1,00	1,00
1489,2	5	33,02	0,96	1,00	0,97
1485,4	10	32,68	0,96	1,00	0,95
1478,5	15	32,06	0,96	1,00	0,93
1472,8	20	31,55	0,96	1,00	0,92
1466,3	25	30,97	0,96	1,00	0,90
1461	30	30,5	0,96	1,00	0,88
1451,3	40	29,63	0,96	1,00	0,85
1442,5	50	28,85	0,80	0,84	0,82
1434,1	60	28,1	0,67	0,70	0,80
1420,2	80	26,86	0,49	0,52	0,75
1408,3	100	25,79	0,39	0,41	0,71
1397,8	120	24,85	0,32	0,34	0,68

m_{ss} (g) 1119,54
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 33,98

Tg (°C) 40
 G (kg/s) 0,036
 pré secagem não

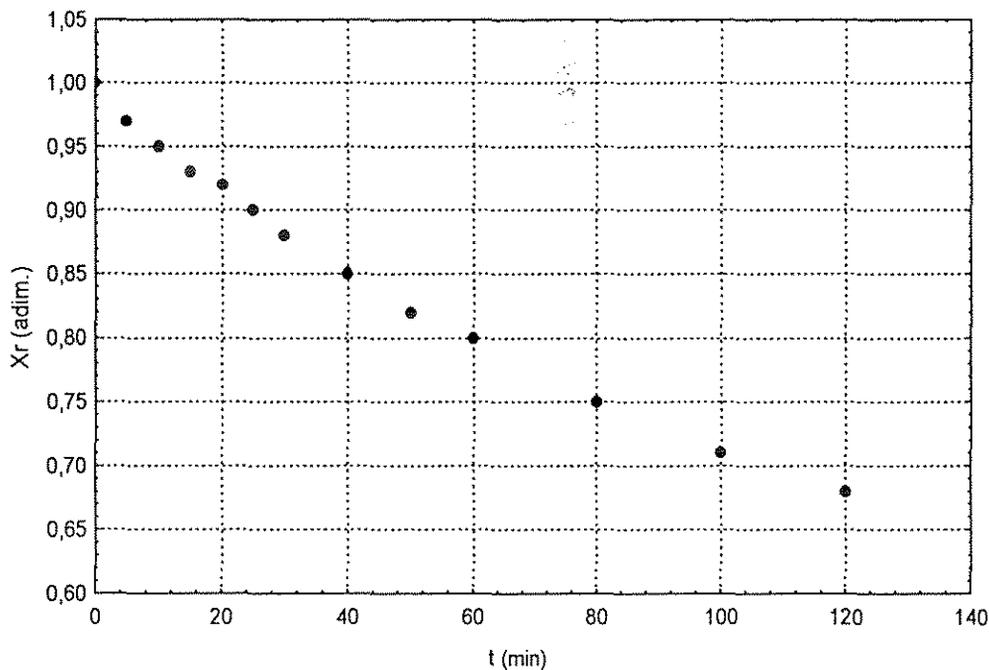


Figura A17.1. Curva de secagem (corrida 17)

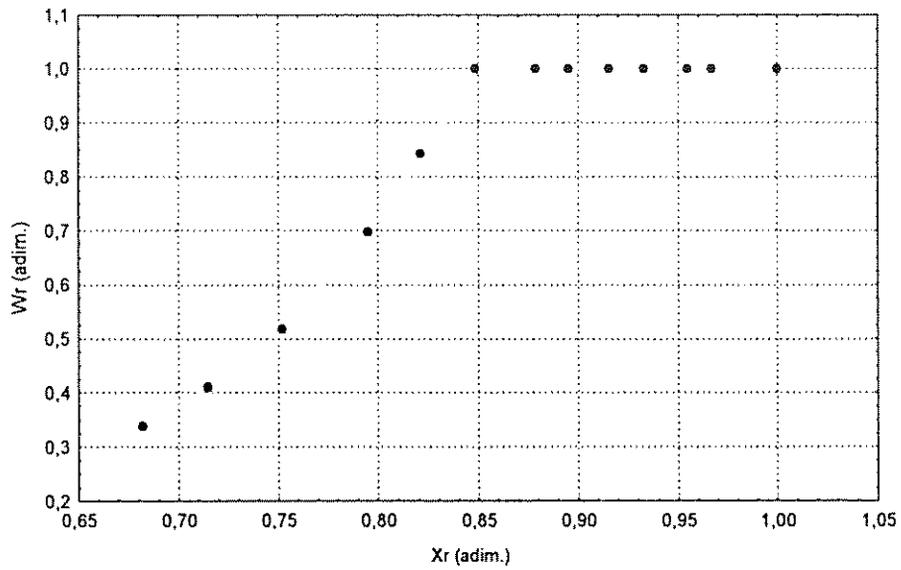


Figura A17.2. Curva de taxa de secagem (corrida 17)

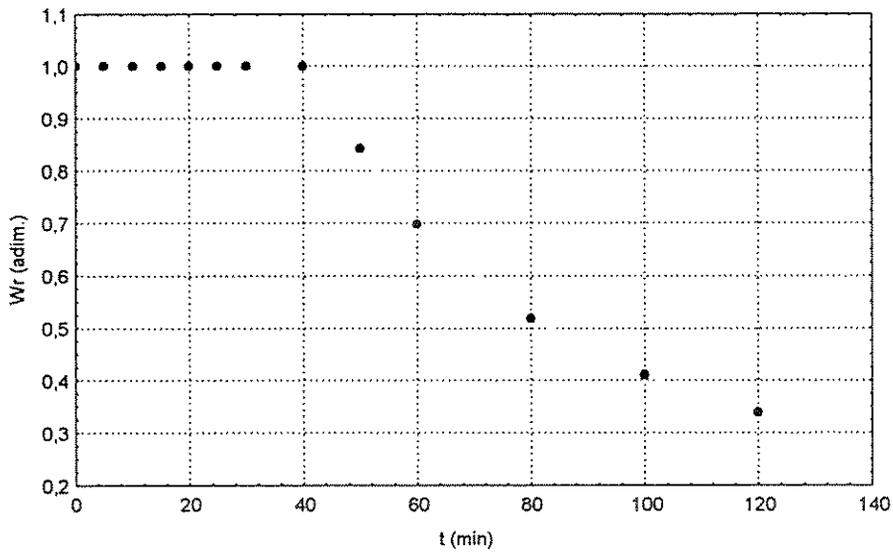


Figura A17.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 17)

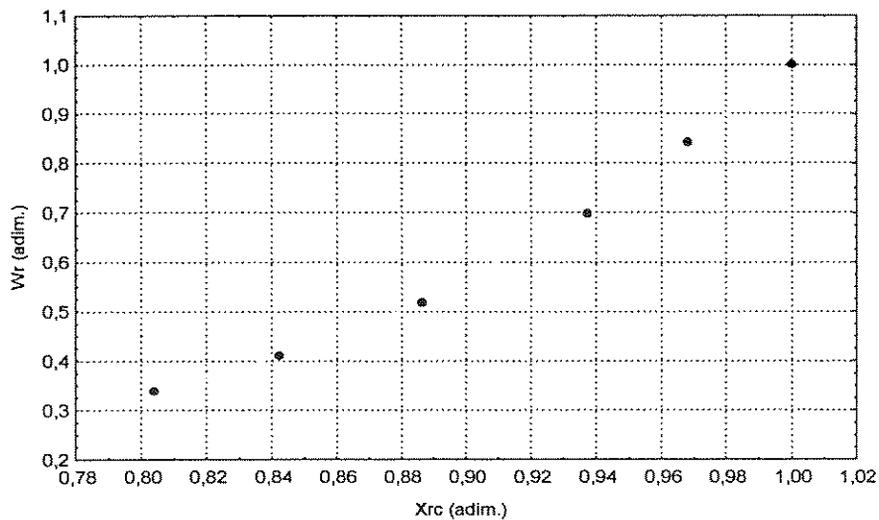


Figura A17.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 17)

Tabela A18: Condições de secagem (corrida 18)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	25,60	0,50	1,00	1,00
1496,1	5	25,27	0,50	1,00	0,98
1492,5	10	24,97	0,50	1,00	0,97
1489,4	15	24,71	0,50	1,00	0,96
1486,8	20	24,49	0,50	1,00	0,95
1483,9	25	24,25	0,50	1,00	0,93
1481,7	30	24,07	0,50	1,00	0,92
1477,6	40	23,72	0,46	0,92	0,91
1473	50	23,34	0,37	0,73	0,89
1470,7	60	23,15	0,30	0,61	0,88
1461,5	80	22,37	0,23	0,45	0,84
1458,9	100	22,16	0,18	0,36	0,83
1454,1	120	21,76	0,15	0,30	0,81

m_{ss} (g) 1194,28
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 25,60

T_g (°C) 40
 G (kg/s) 0,014
 pré secagem sim

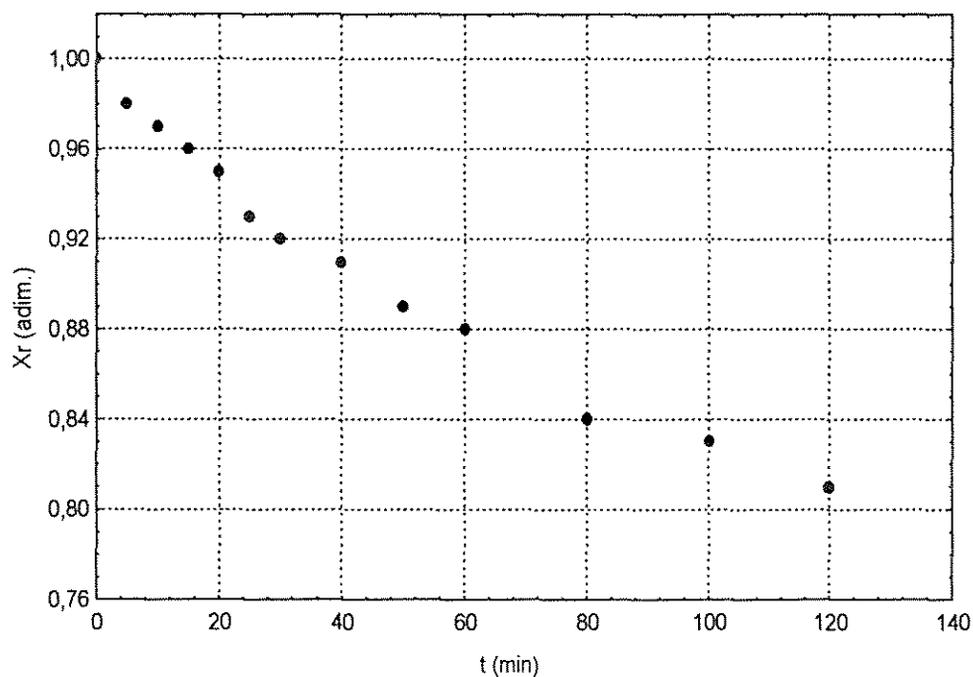


Figura A18.1. Curva de secagem (corrida 18)

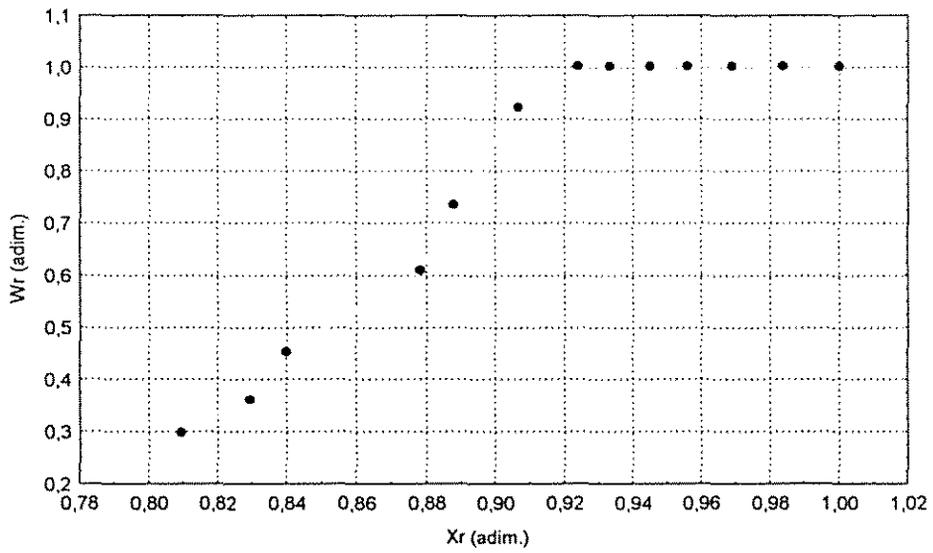


Figura A18.2. Curva de taxa de secagem (corrida 18)

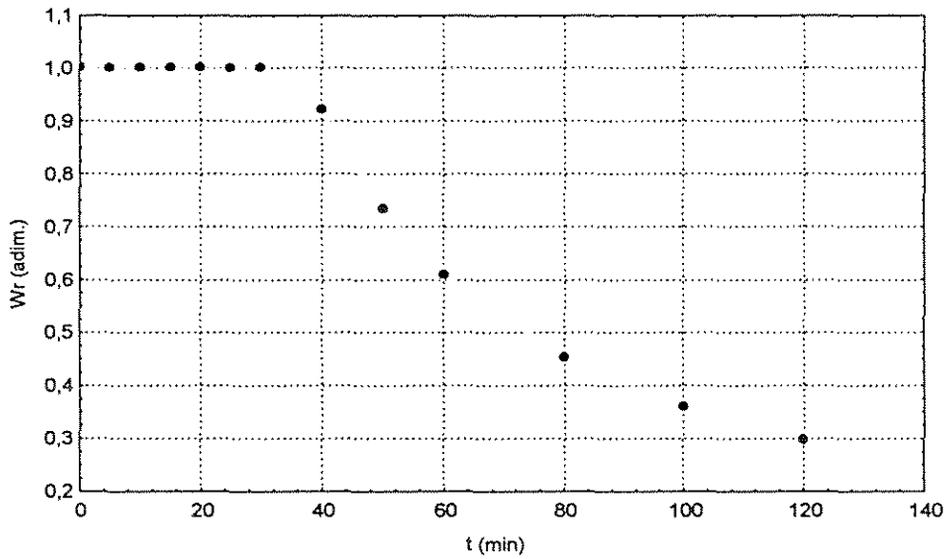


Figura A18.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 18)

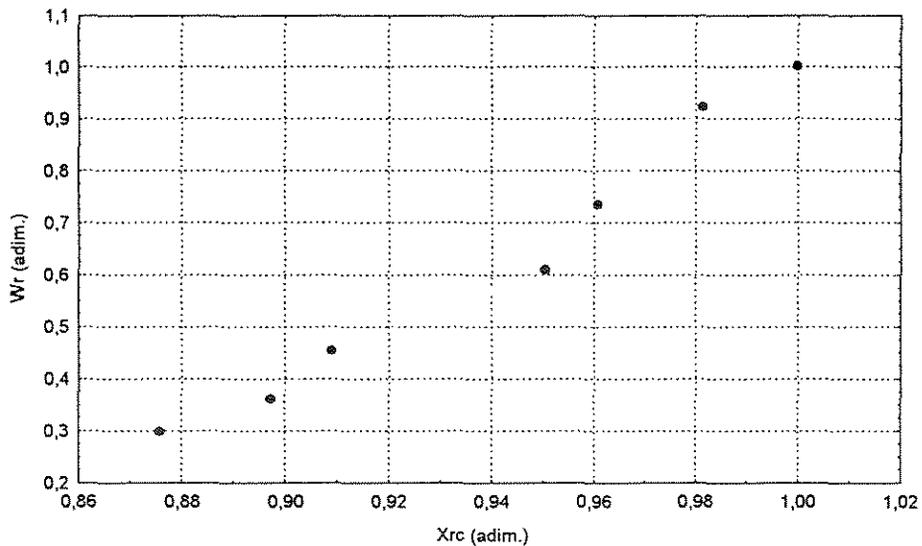


Figura A18.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 18)

Tabela A19: Condições de secagem (corrida 19)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
1500	0	25,60	5,66	1,00	1,00
1493,7	5	25,07	5,66	1,00	0,98
1487,8	10	24,58	5,66	1,00	0,96
1481,9	15	24,08	5,66	1,00	0,94
1476,4	20	23,62	5,66	1,00	0,92
1471,5	25	23,21	5,66	1,00	0,90
1465,9	30	22,74	1,96	0,35	0,88
1456	40	21,91	1,44	0,25	0,85
1447,8	50	21,23	1,13	0,20	0,82
1438,5	60	20,45	0,93	0,16	0,79
1424,5	80	19,28	0,68	0,12	0,74
1411,1	100	18,15	0,53	0,09	0,69
1399	120	17,14	0,43	0,08	0,65
1388,6	140	16,27	0,36	0,06	0,61
1378,6	160	15,43	0,31	0,05	0,58
1369,8	180	14,70	0,27	0,05	0,55
1361,7	200	14,02	0,24	0,04	0,52
1354,1	220	13,38	0,22	0,04	0,49
1346,9	240	12,78	0,20	0,03	0,47

m_{ss} (g) 1194,28
 área (cm²) 1089,74
 X_i (%bs) 25,60

Tg (°C) 80
 G (kg/s) 0,014
 pré secagem sim

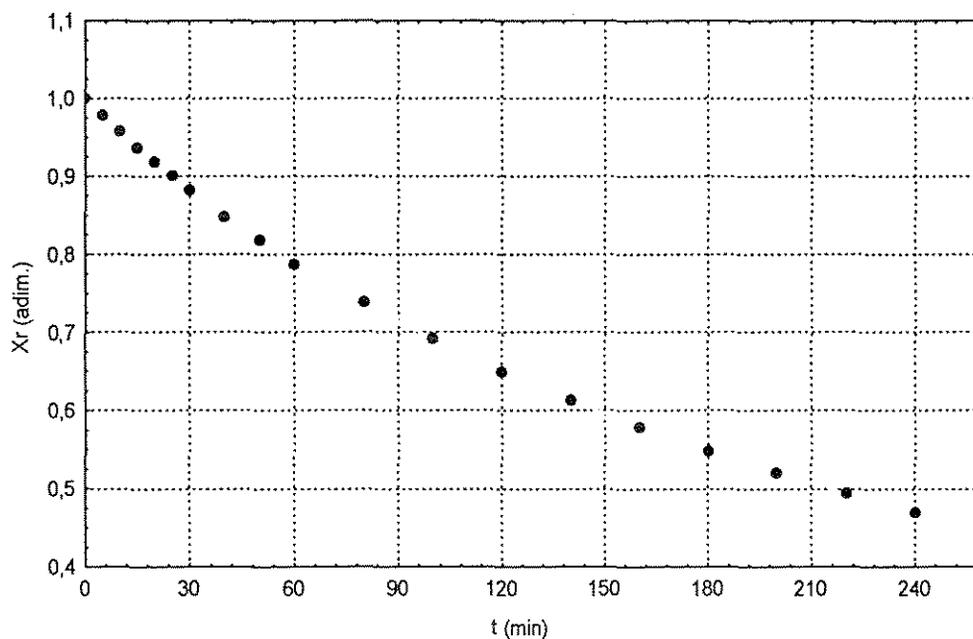


Figura A19.1. Curva de secagem (corrida 19)

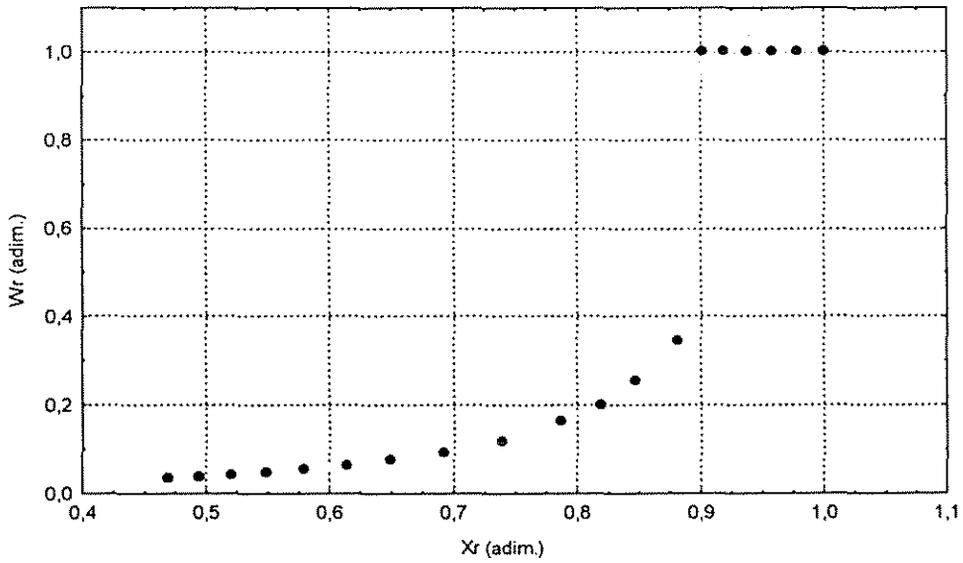


Figura A19.2. Curva de taxa de secagem (corrida 19)

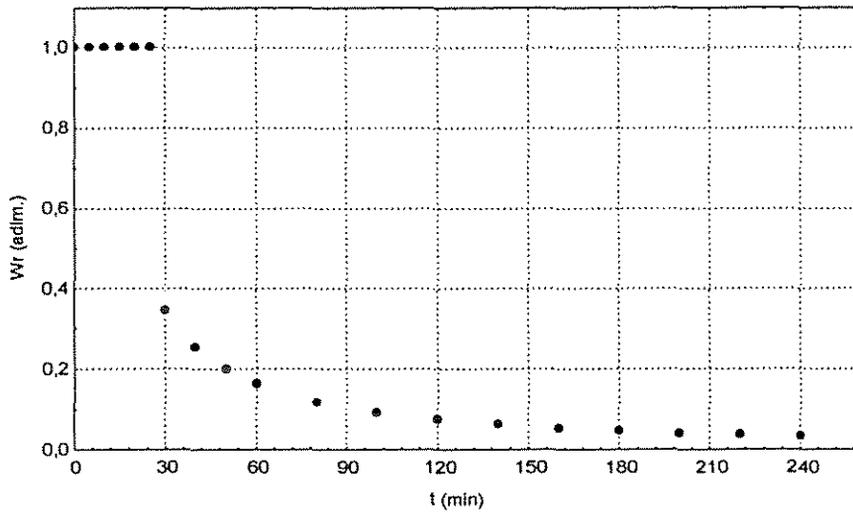


Figura A19.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 19)

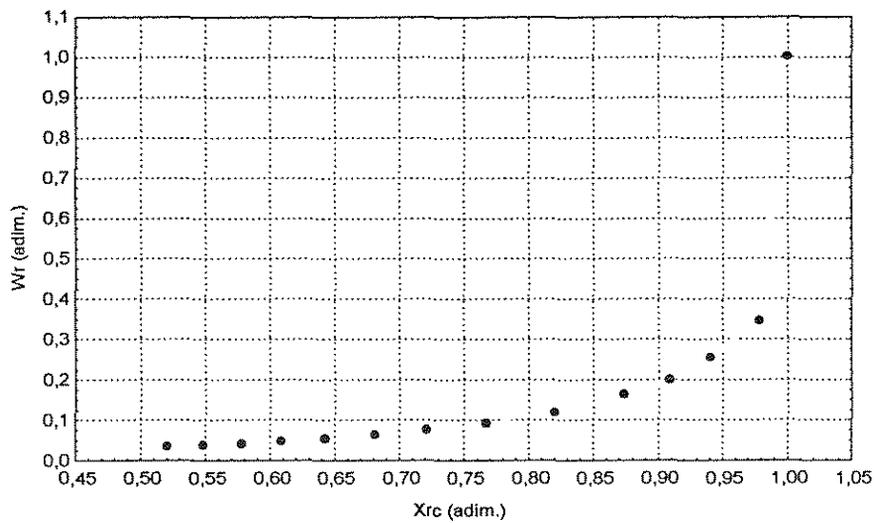


Figura A19.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 19)

Tabela A20: Condições de secagem (corrida 20)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	W _r (adim.)	X _r (adim.)
500	0	29,08	3,78	1,00	1,00
483,6	5	24,85	3,78	1,00	0,85
473,7	10	22,29	3,78	1,00	0,76
465,9	15	20,28	3,78	1,00	0,68
459,6	20	18,65	3,78	1,00	0,62
454,1	25	17,23	1,54	0,41	0,57
449,6	30	16,07	1,25	0,33	0,53
443,7	40	14,54	0,90	0,24	0,48
439,6	50	13,49	0,70	0,18	0,44
436,3	60	12,63	0,56	0,15	0,41
431,6	80	11,42	0,40	0,11	0,36
428,5	100	10,62	0,30	0,08	0,33
426,2	120	10,03	0,24	0,06	0,31

m_{ss} (g) 387,36
 área (cm²) 520,33
 X_i (%bs) 29,08

T_g (°C) 80
 G (kg/s) 0,036
 pré secagem não

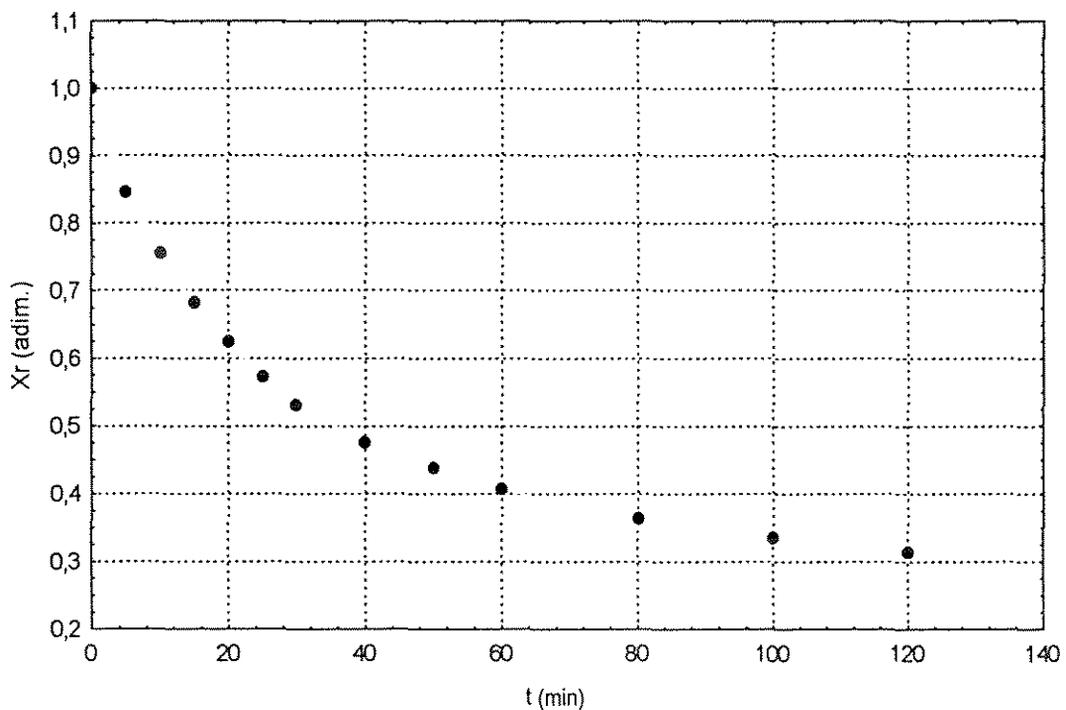


Figura A20.1. Curva de secagem (corrida 20)

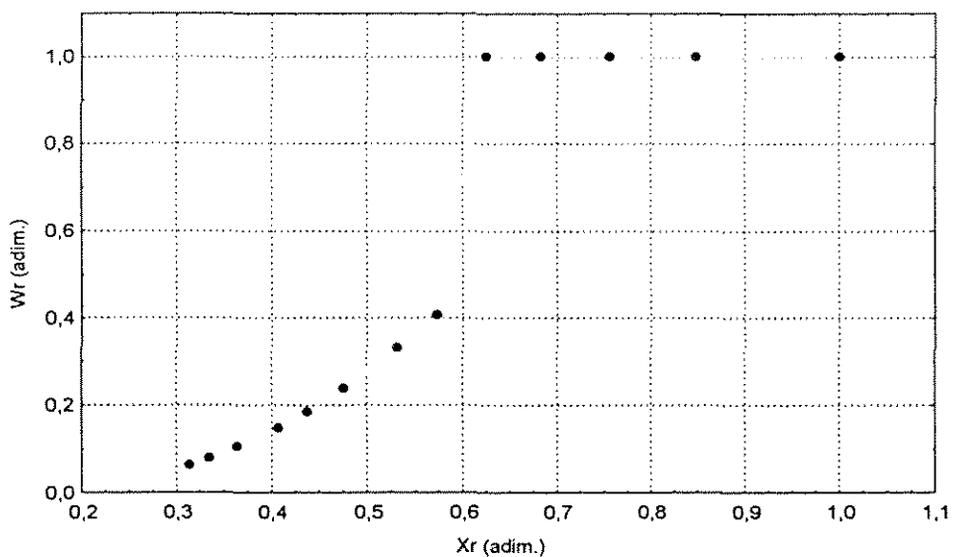


Figura A20.2. Curva de taxa de secagem (corrida 20)

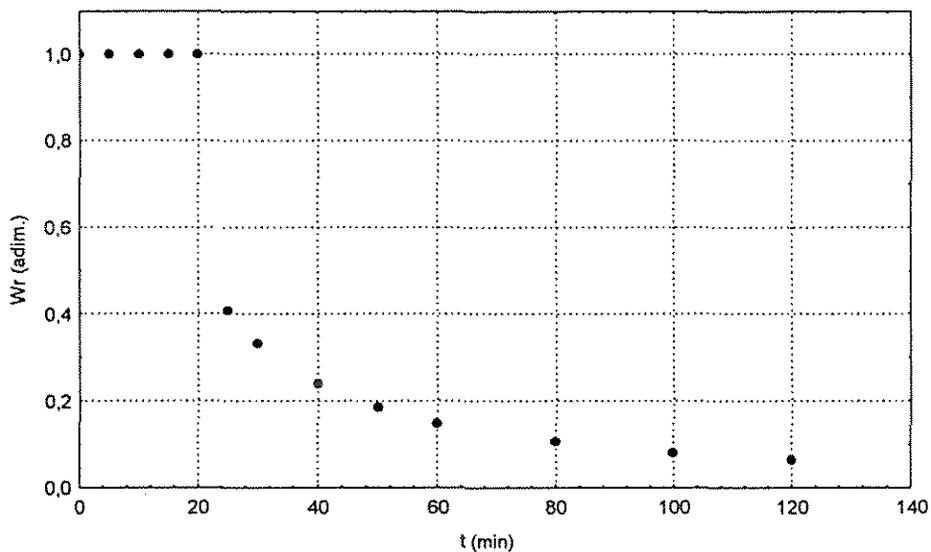


Figura A20.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 20)

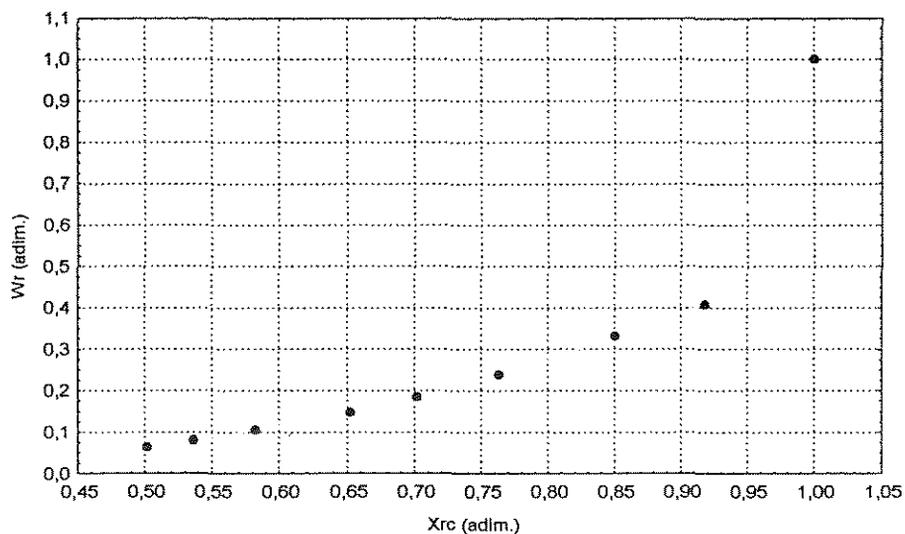


Figura A20.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 20)

Tabela A21: Condições de secagem (corrida 21)

m (g)	t (min)	X (%bs)	W (mg/cm ² .min)	Wr (adim.)	Xr (adim.)
500	0	27,52	0,60	1,00	1,00
498,4	5	27,12	0,60	1,00	0,98
497,1	10	26,79	0,60	1,00	0,97
495,8	15	26,45	0,60	1,00	0,95
494,2	20	26,05	0,60	1,00	0,93
493	25	25,74	0,60	1,00	0,92
490,2	30	25,03	0,60	1,00	0,89
487,6	40	24,36	0,60	1,00	0,85
485,2	50	23,75	0,60	1,00	0,83
482,7	60	23,11	0,55	0,92	0,80
478,4	80	22,02	0,40	0,67	0,75
474,7	100	21,07	0,32	0,53	0,70
470,9	120	20,10	0,26	0,44	0,66

m_{ss} (g) 392,08
 área (cm²) 520,33
 X_i (%bs) 27,52

Tg (°C) 40
 G (kg/s) 0,014
 pré secagem não

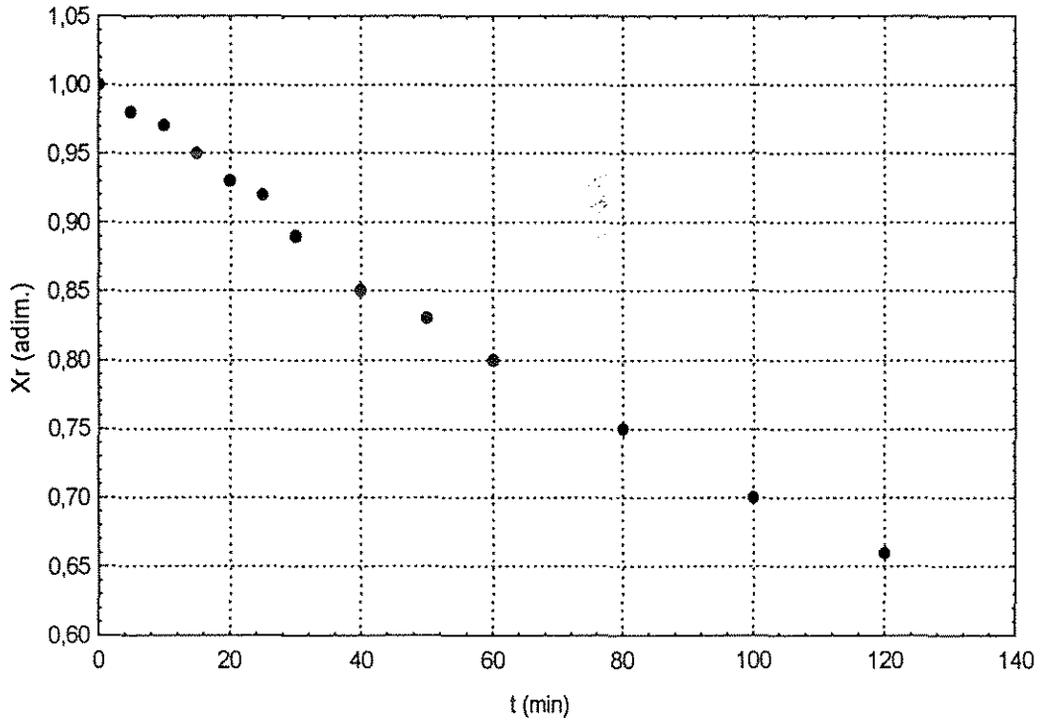


Figura A21.1. Curva de secagem (corrida 21)

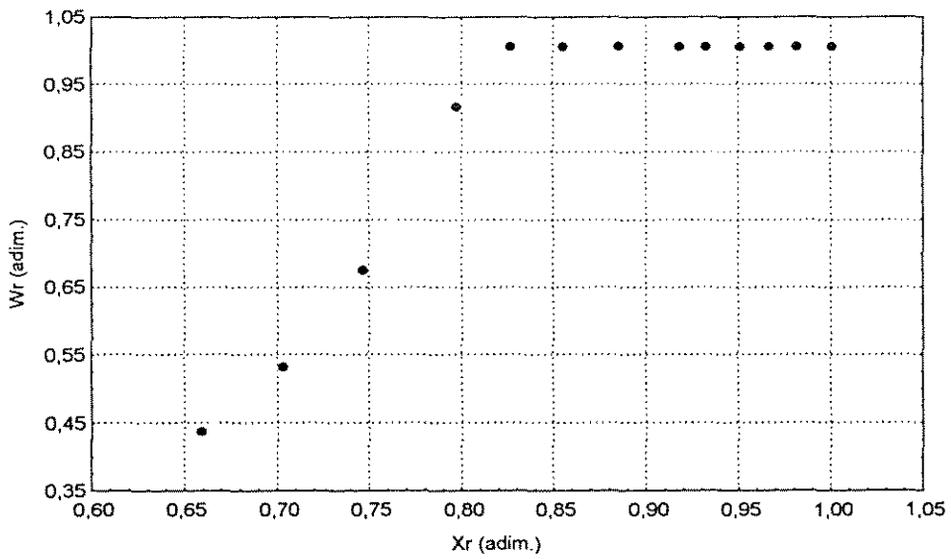


Figura A21.2. Curva de taxa de secagem (corrida 21)

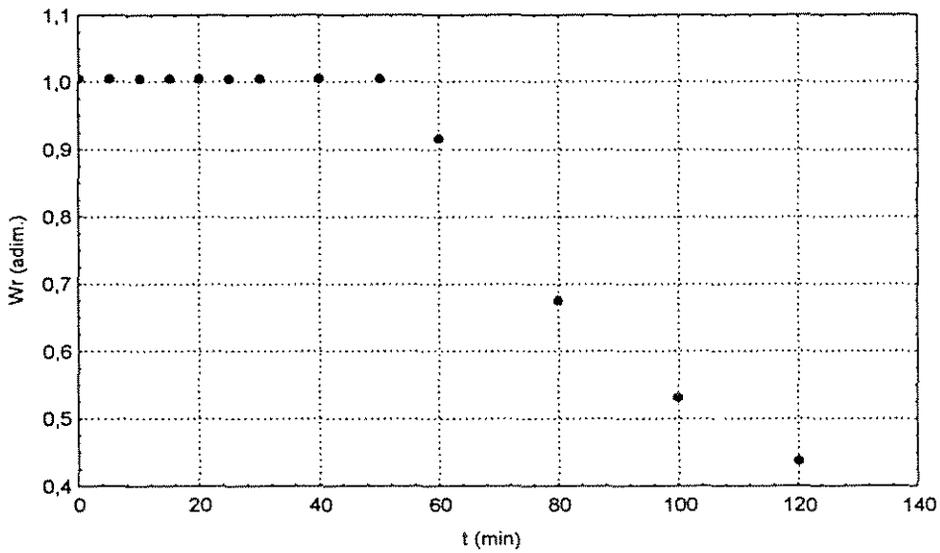


Figura A21.2. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 21)

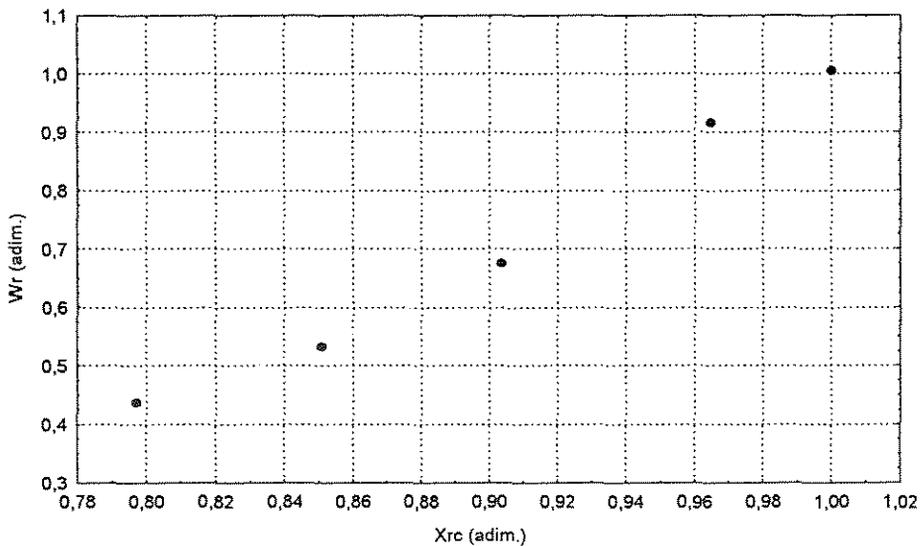


Figura A21.4. Curva de taxa de secagem para o período pós-crítico (corrida 21)

ANEXO B

Corridas experimentais de secagem de semente de urucum, segundo a metodologia de superficies de resposta

(Corridas Finais - Segunda Fase de Experimentos)

Tabela B1.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 1 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	21,60	17,77	0,3636
997,6	5	21,31	17,57	0,3636
995	10	21,00	17,35	0,3636
993,4	15	20,80	17,22	0,3636
991,9	20	20,62	17,09	0,3636
990,6	25	20,46	16,99	0,3636
988,7	30	20,23	16,83	0,3636
986,7	40	19,99	16,66	0,3636
984,4	50	19,71	16,46	0,3636
981,9	60	19,40	16,25	0,3636
977,9	80	18,92	15,91	0,3636
973,8	100	18,42	15,55	0,3471
970,2	120	17,98	15,24	0,2856
966,7	140	17,55	14,93	0,2421
963,5	160	17,17	14,65	0,2097
960,5	180	16,80	14,38	0,1847
957,6	200	16,45	14,12	0,1649
955,2	220	16,16	13,91	0,1487
952,6	240	15,84	13,67	0,1354

Tabela B1.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 1 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	01	T _{si} (°C)	21,5	T _i (°C)	27,5	T _{g1} (°C)	40,0
t (min)	240	T _{sr} (°C)	28,1	T _f (°C)	28,5	T _{g2} (°C)	36,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	21,60	T _{min} (°C)	27	G (kg/s)	0,013
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	15,84	T _{max} (°C)	33	Y ₁ (g/kg as)	12,7
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	5,77	UR _i (%)	59	Y ₂ (g/kg as)	13,7
		X _{cr} (%bs)	18,92	UR _r (%)	51	UR ₁ (%)	33,12
		m _{ss} (g)	822,34	Y _i (g/kg as)	13,6	UR ₂ (%)	41,08
		B _i (%bs)	3,16	Y _r (g/kg as)	12,4	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,1314
		B _r (%bs)	3,00	Y _m (g/kg as)	13,0	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,1399

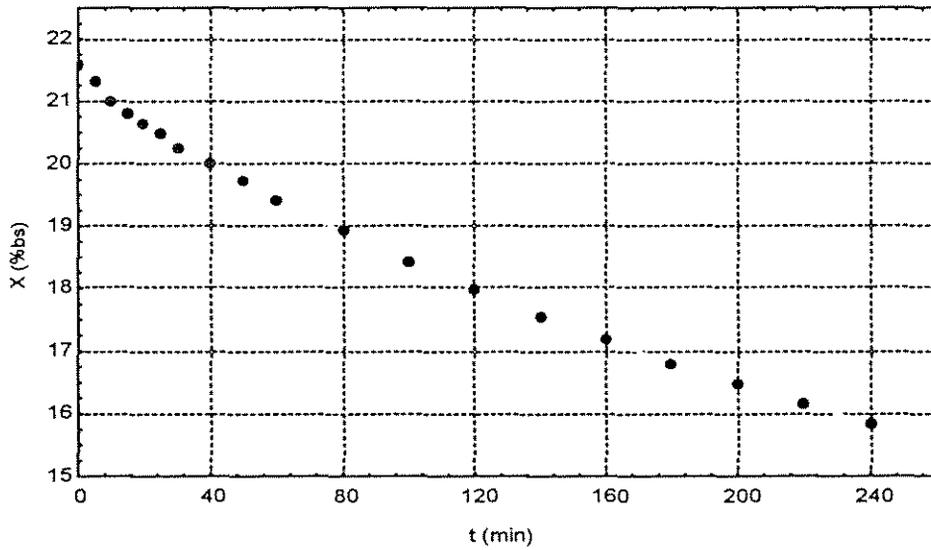


Figura B1.1. Curva de secagem (corrida 1)

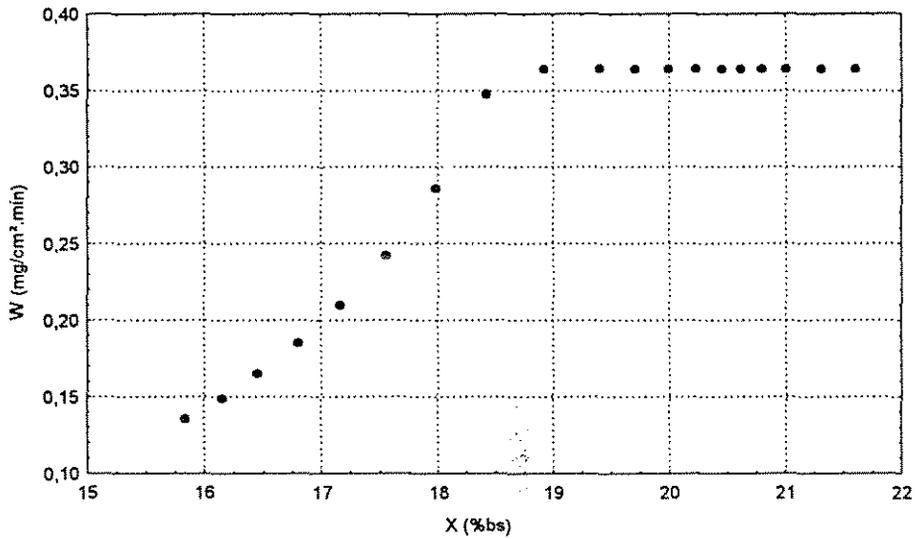


Figura B1.2. Curva de taxa de secagem (corrida 1)

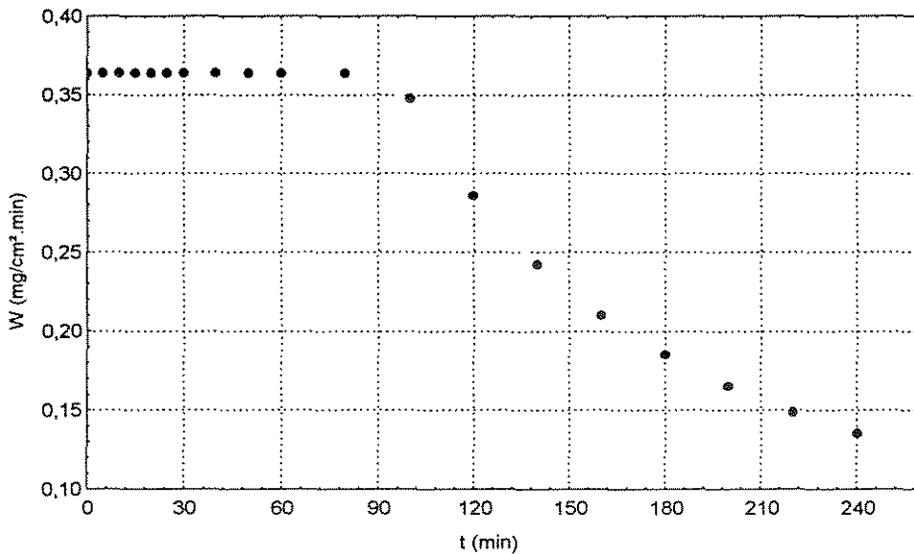


Figura B1.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 1)

Tabela B2.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 2 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	20,10	16,73	0,6644
996,6	5	19,69	16,45	0,6644
994,3	10	19,41	16,26	0,6644
990,7	15	18,98	15,95	0,6644
987,9	20	18,64	15,71	0,6644
985,6	25	18,37	15,52	0,6644
983,4	30	18,10	15,33	0,6644
978,6	40	17,53	14,91	0,6644
974,3	50	17,01	14,54	0,6644
970,6	60	16,57	14,21	0,6644
963,6	80	15,73	13,59	0,6229
957,5	100	14,99	13,04	0,4840
952,1	120	14,34	12,54	0,3932
945,9	140	13,60	11,97	0,3295
941,4	160	13,06	11,55	0,2824
937,6	180	12,60	11,19	0,2464
933,9	200	12,16	10,84	0,2179
930	220	11,69	10,47	0,1949
926,6	240	11,28	10,14	0,1760

Tabela B2.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 2 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	02	Ts _i (°C)	22,2	Ti (°C)	28,3	Tg ₁ (°C)	80
t (min)	24	Ts _f (°C)	41,5	Tf (°C)	29,3	Tg ₂ (°C)	65,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	20,10	Tmin (°C)	28,3	G (kg/s)	0,013
A (cm ²)	736,31	Xf (%bs)	11,28	Tmax (°C)	29,3	Y ₁ (g/kg as)	15,2
H _L (cm)	12,50	Xe (%bs)	1,51	UR _i (%)	64	Y ₂ (g/kg as)	21,3
		Xcr (%bs)	16,57	UR _f (%)	53	UR ₁ (%)	9,48
		m _{ss} (g)	832,66	Y _i (g/kg as)	15,5	UR ₂ (%)	25,92
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	13,5	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0329
		B _f (%bs)	2,79	Y _m (g/kg as)	14,5	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0753

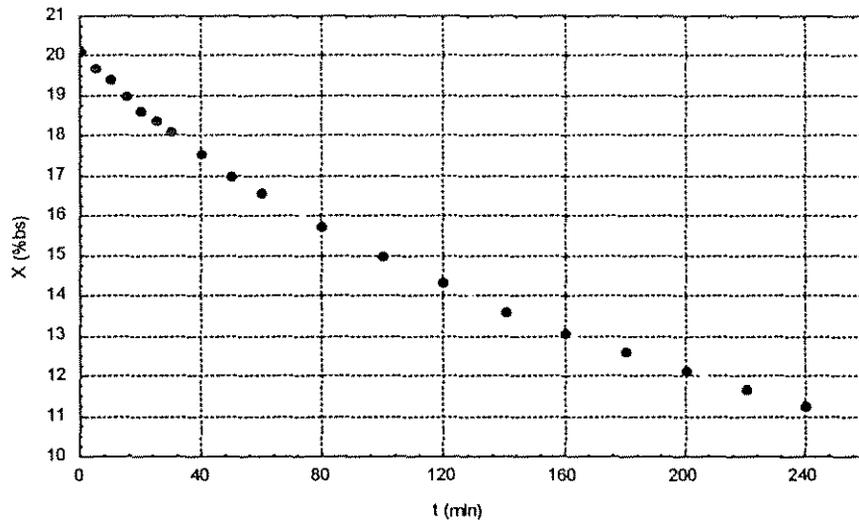


Figura B2.1. Curva de secagem (corrida 2)

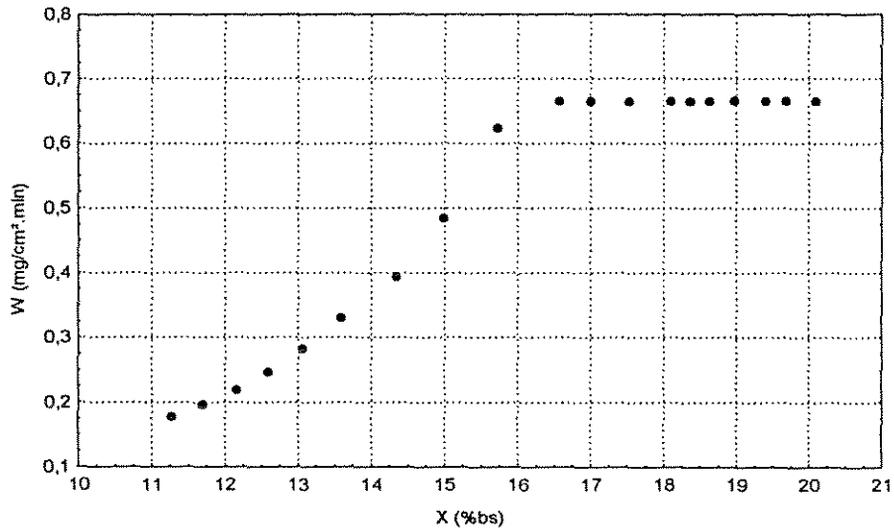


Figura B2.2. Curva de taxa de secagem (corrida 2)

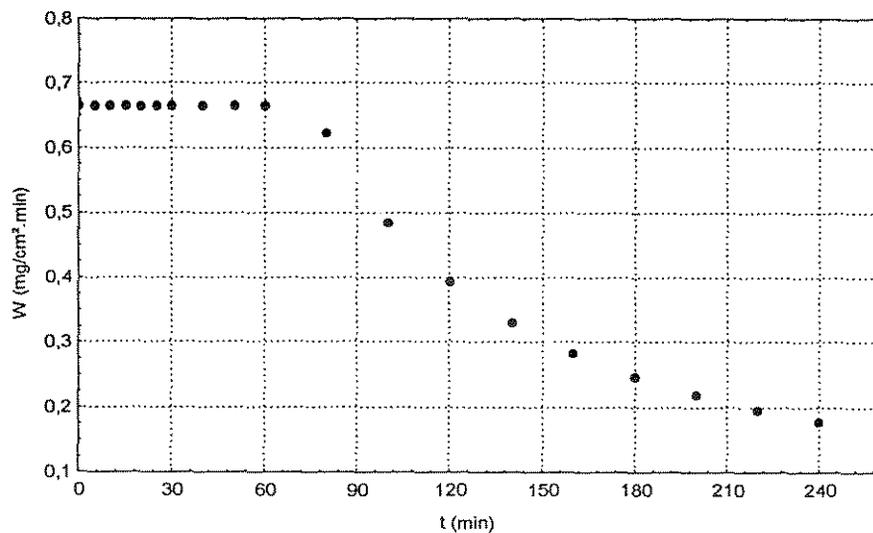


Figura B2.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 2)

Tabela B3.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 3 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	23,98	19,34	0,2793
998,2	5	23,76	19,20	0,2793
997,1	10	23,62	19,11	0,2793
995,9	15	23,47	19,01	0,2793
994,6	20	23,31	18,91	0,2793
993,8	25	23,21	18,84	0,2793
992,4	30	23,04	18,73	0,2793
990,3	40	22,78	18,55	0,2793
988,1	50	22,51	18,37	0,2793
986,4	60	22,30	18,23	0,2793
982,6	80	21,82	17,91	0,2793
979,3	100	21,42	17,64	0,2793
976	120	21,01	17,36	0,2763
973,3	140	20,67	17,13	0,2349
971	160	20,39	16,93	0,2041
968,7	180	20,10	16,74	0,1803
966,6	200	19,84	16,56	0,1613
964,7	220	19,61	16,39	0,1458
962,4	240	19,32	16,19	0,1330
960,2	260	19,05	16,00	0,1221
957,2	280	18,68	15,74	0,1129
955,8	300	18,50	15,61	0,1049
954	320	18,28	15,45	0,0980
952,1	340	18,04	15,29	0,0918
950,4	360	17,83	15,13	0,0864

Tabela B3.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 3 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	03	T _{si} (°C)	23,6	T _i (°C)	29,1	T _{g1} (°C)	40,0
t (min)	360	T _{sf} (°C)	31,6	T _f (°C)	30,6	T _{g2} (°C)	36,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	23,98	T _{min} (°C)	28	G (kg/s)	0,013
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	17,83	T _{max} (°C)	31,5	Y ₁ (g/kg as)	19,3
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	7,70	UR _i (%)	76	Y ₂ (g/kg as)	20,0
		X _{cr} (%bs)	21,42	UR _f (%)	65	UR ₁ (%)	48,64
		m _{ss} (g)	806,57	Y _i (g/kg as)	19,4	UR ₂ (%)	54,49
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	18,0	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,1252
		B _f (%bs)	2,32	Y _m (g/kg as)	18,7	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,1302

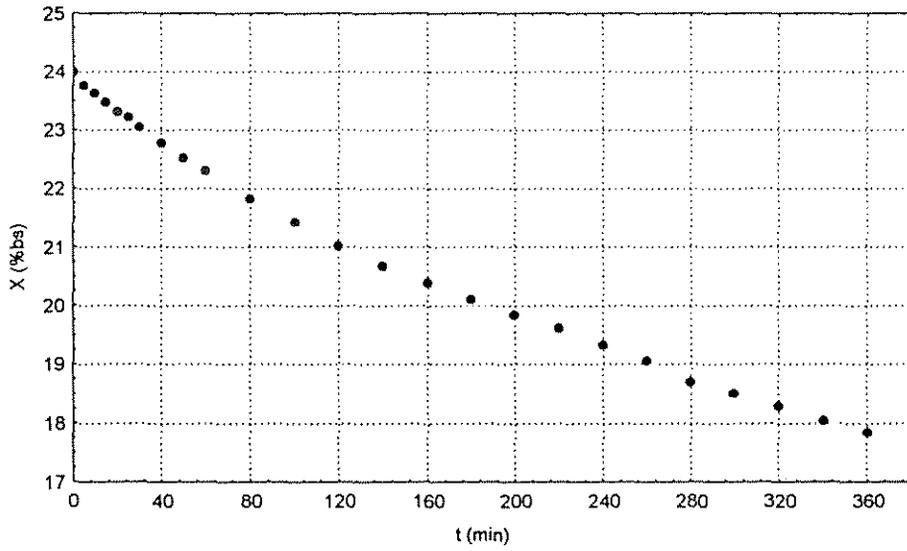


Figura B3.1. Curva de secagem (corrida 3)

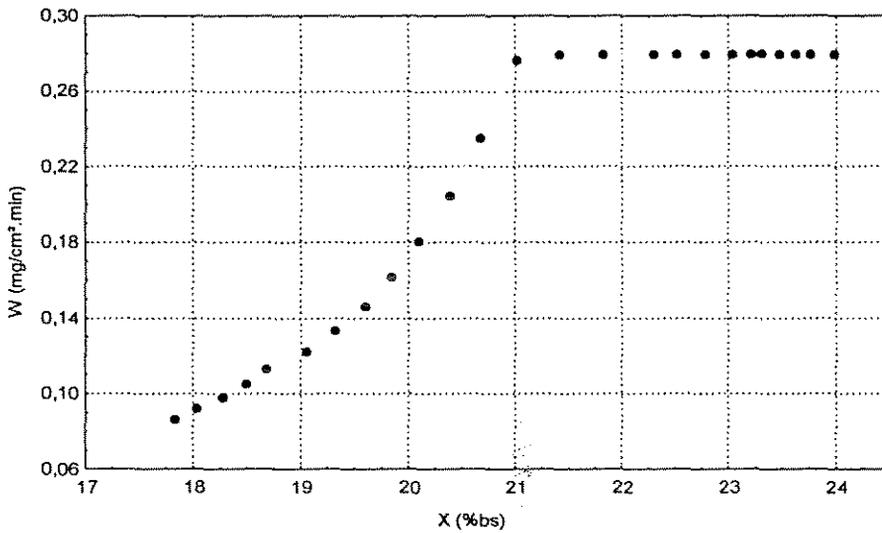


Figura B3.2. Curva de taxa de secagem (corrida 3)

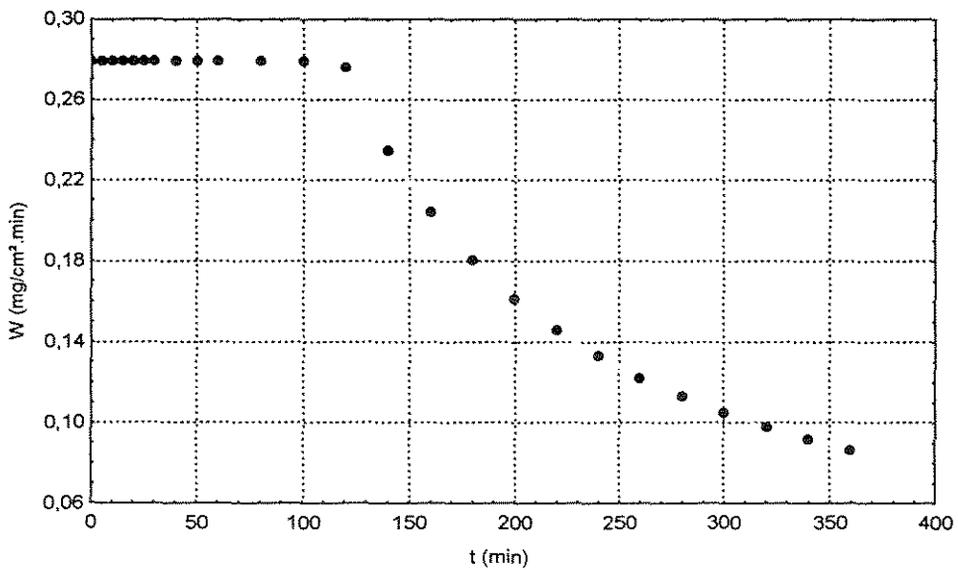


Figura B3.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 3)

Tabela B4.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 4 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	20,03	16,69	0,7027
997,2	5	19,69	16,45	0,7027
994,5	10	19,37	16,22	0,7027
991,4	15	18,99	15,96	0,7027
988,9	20	18,69	15,75	0,7027
985,5	25	18,29	15,46	0,7027
983,4	30	18,03	15,28	0,7027
977,6	40	17,34	14,78	0,7027
972,7	50	16,75	14,35	0,7027
968,2	60	16,21	13,95	0,7027
959,1	80	15,12	13,13	0,7027
951,6	100	14,22	12,45	0,6850
944,3	120	13,34	11,77	0,5494
938,5	140	12,64	11,23	0,4548
932,4	160	11,91	10,64	0,3854
927	180	11,26	10,12	0,3325
922,5	200	10,72	9,69	0,2911
918,1	220	10,20	9,25	0,2578
914,3	240	9,74	8,88	0,2305
910,9	260	9,33	8,54	0,2079
907,6	280	8,94	8,20	0,1888
905,3	300	8,66	7,97	0,1724
902,2	320	8,29	7,65	0,1584
899,7	340	7,99	7,40	0,1462
897,3	360	7,70	7,15	0,1354

Tabela B4.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 4 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	04	T _{si} (°C)	22,3	T _i (°C)	28,5	Tg ₁ (°C)	80,0
t (min)	360	T _{sf} (°C)	48,0	T _f (°C)	28,4	Tg ₂ (°C)	60,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	20,03	T _{min} (°C)	28,4	G (kg/s)	0,013
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	7,70	T _{max} (°C)	28,7	Y ₁ (g/kg as)	12,2
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	1,51	UR _i (%)	59	Y ₂ (g/kg as)	16,9
		X _{cr} (%bs)	15,12	UR _f (%)	48	UR ₁ (%)	7,6
		m _{ss} (g)	833,15	Y _i (g/kg as)	14,4	UR ₂ (%)	17,91
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	11,6	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0348
		B _f (%bs)	2,56	Y _m (g/kg as)	13,0	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0682

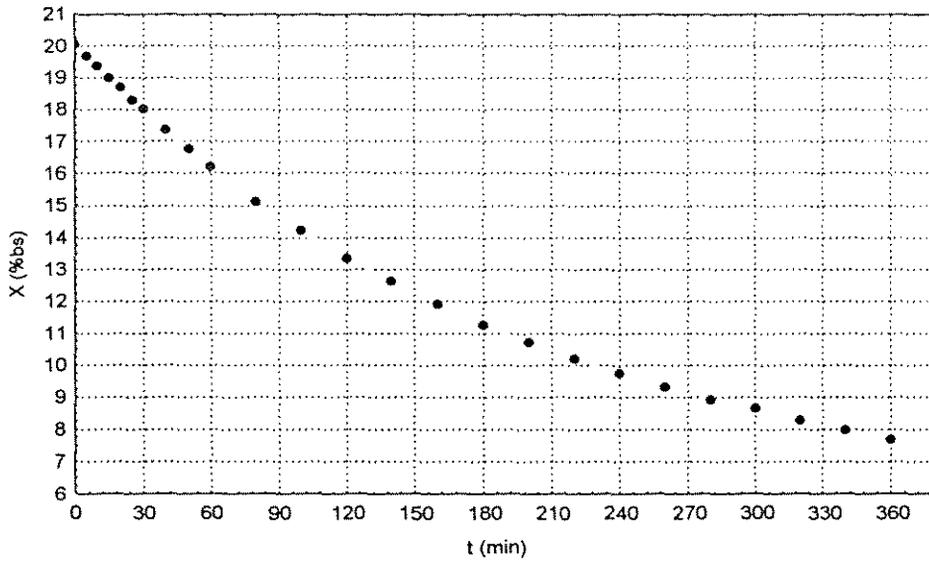


Figura B4.1. Curva de secagem (corrida 4)

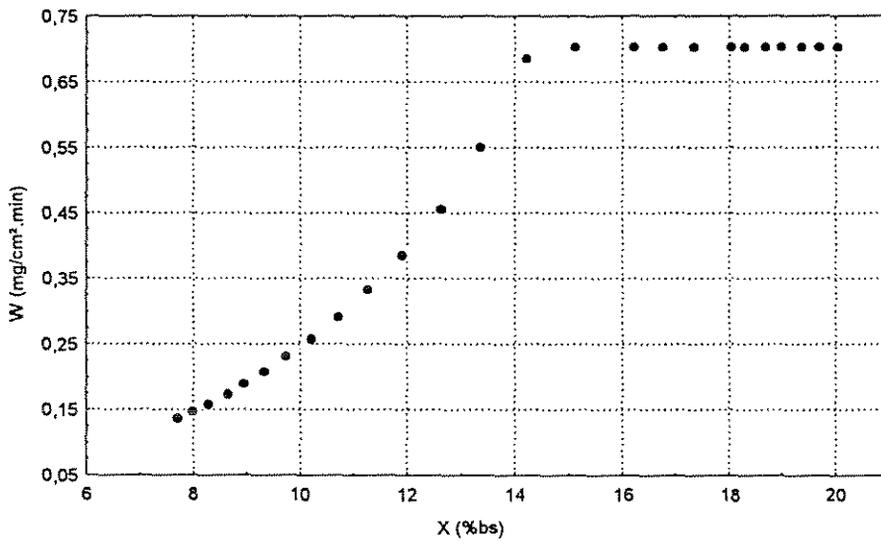


Figura B4.2. Curva de taxa de secagem (corrida 4)

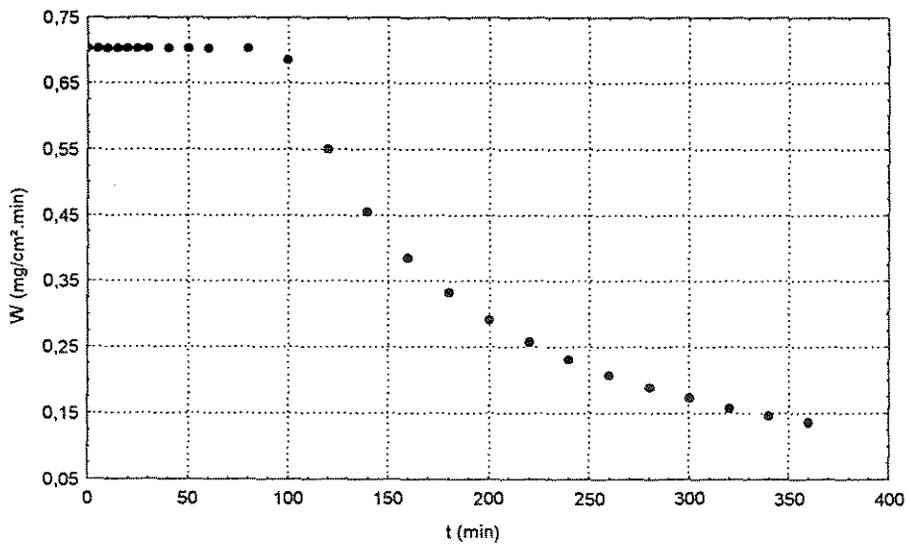


Figura B4.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 4)

Tabela B5.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 5 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	20,50	17,02	0,5308
999,4	5	20,43	16,97	0,5308
996,3	10	20,06	16,71	0,5308
994,1	15	19,79	16,52	0,5308
991,1	20	19,43	16,27	0,5308
989,6	25	19,25	16,14	0,5308
988,4	30	19,11	16,04	0,5308
984,8	40	18,67	15,73	0,5308
980,2	50	18,12	15,34	0,5308
976,8	60	17,71	15,04	0,5308
971,5	80	17,07	14,58	0,5308
965,3	100	16,32	14,03	0,4445
960,3	120	15,72	13,58	0,3630
955,5	140	15,14	13,15	0,3057
952,1	160	14,73	12,84	0,2632
946,4	180	14,04	12,32	0,2305
944,2	200	13,78	12,11	0,2047
941,1	220	13,41	11,82	0,1837
938,6	240	13,10	11,59	0,1664

Tabela B5.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 5 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	05	Ts _i (°C)	22,7	T _i (°C)	28,0	Tg ₁ (°C)	40,0
t (min)	240	Ts _r (°C)	31,8	T _r (°C)	26,5	Tg ₂ (°C)	36,5
Leito de sólidos		X _i (%bs)	20,50	Tmin (°C)	26,5	G (kg/s)	0,030
A (cm ²)	736,31	Xf (%bs)	13,10	Tmax (°C)	28,1	Y ₁ (g/kg as)	14,6
H _L (cm)	12,5	Xe (%bs)	6,19	UR _i (%)	64	Y ₂ (g/kg as)	16,0
		Xcr (%bs)	17,07	UR _r (%)	58	UR ₁ (%)	35,01
		m _{ss} (g)	829,85	Y _i (g/kg as)	15,2	UR ₂ (%)	46,58
		Bi (%bs)	3,16	Y _r (g/kg as)	12,6	ρa ₁ (kg/m ³)	1,1246
		B _r (%bs)	2,56	Y _m (g/kg as)	13,9	ρa ₂ (kg/m ³)	1,1365

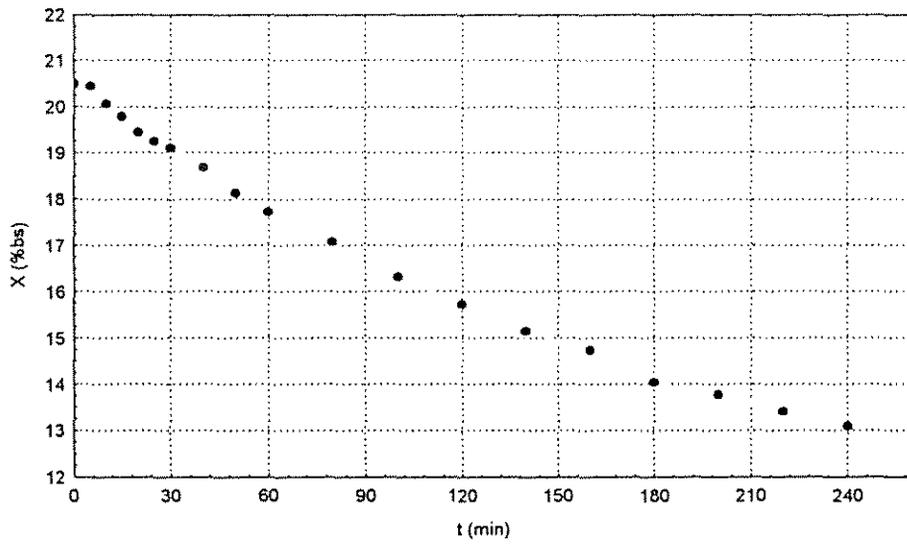


Figura B5.1. Curva de secagem (corrida 5)

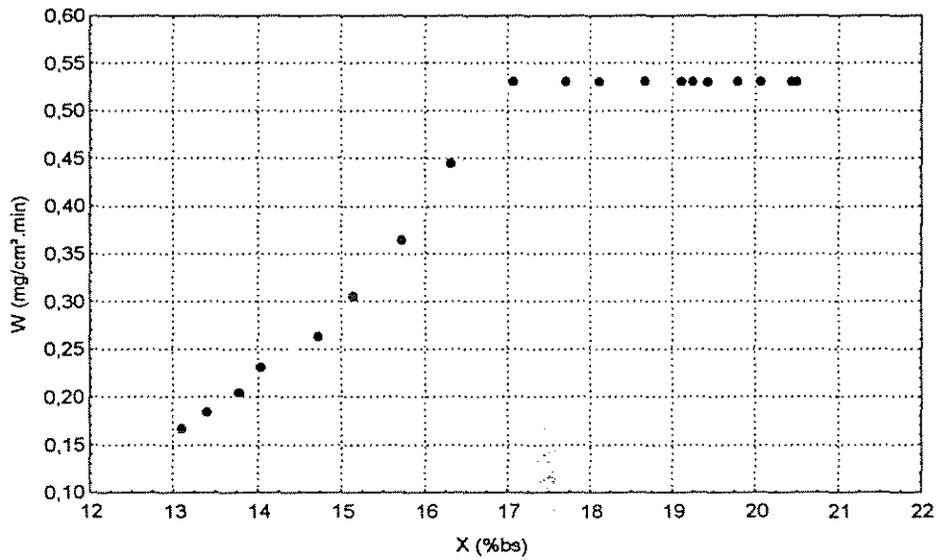


Figura B5.2. curva de taxa de secagem (corrida 5)

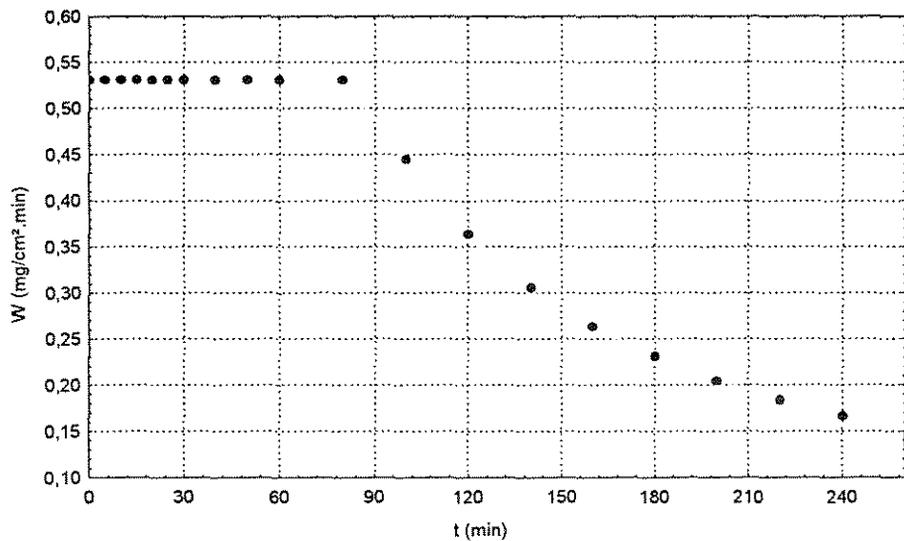


Figura B5.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 5)

Tabela B6.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 6 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	22,35	18,27	1,5937
994,5	5	21,67	17,81	1,5937
988,4	10	20,93	17,31	1,5937
982,2	15	20,17	16,78	1,5937
976,7	20	19,50	16,32	1,5937
969,5	25	18,62	15,69	1,5937
965,8	30	18,16	15,37	1,5937
957,3	40	17,12	14,62	1,4374
949,2	50	16,13	13,89	1,1157
942	60	15,25	13,23	0,9053
930,8	80	13,88	12,19	0,6485
922,7	100	12,89	11,42	0,4991
915,2	120	11,97	10,69	0,4020
909,2	140	11,24	10,10	0,3343
904,8	160	10,70	9,67	0,2846
901,2	180	10,26	9,30	0,2467
897,8	200	9,84	8,96	0,2169
895,3	220	9,54	8,71	0,1929
892,7	240	9,22	8,44	0,1733

Tabela B6.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 6 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	06	T _{si} (°C)	24,7	T _i (°C)	31,2	Tg ₁ (°C)	80,0
t (min)	240	T _{sr} (°C)	56,5	T _r (°C)	29,9	Tg ₂ (°C)	67,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	22,35	Tmin (°C)	29,9	G (kg/s)	0,030
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	9,22	Tmax (°C)	32,3	Y ₁ (g/kg as)	20,2
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	1,59	UR _i (%)	72	Y ₂ (g/kg as)	25,3
		X _{cr} (%bs)	18,60	UR _r (%)	68	UR ₁ (%)	10,22
		m _{ss} (g)	817,35	Y _i (g/kg as)	20,8	UR ₂ (%)	21,8
		B _i (%bs)	3,16	Y _i (g/kg as)	18,1	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0164
		B _r (%bs)	3,00	Y _i (g/kg as)	19,45	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0502

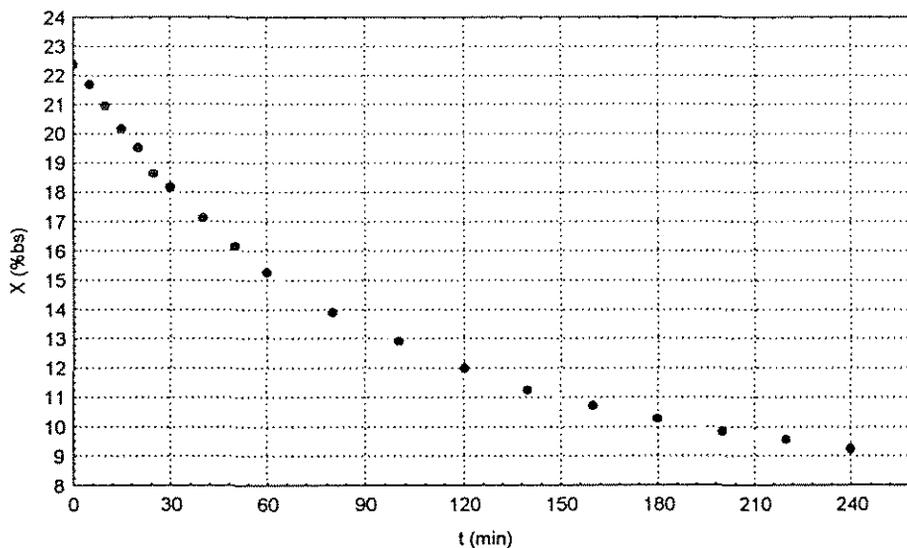


Figura B6.1. Curva de secagem (corrida 6)

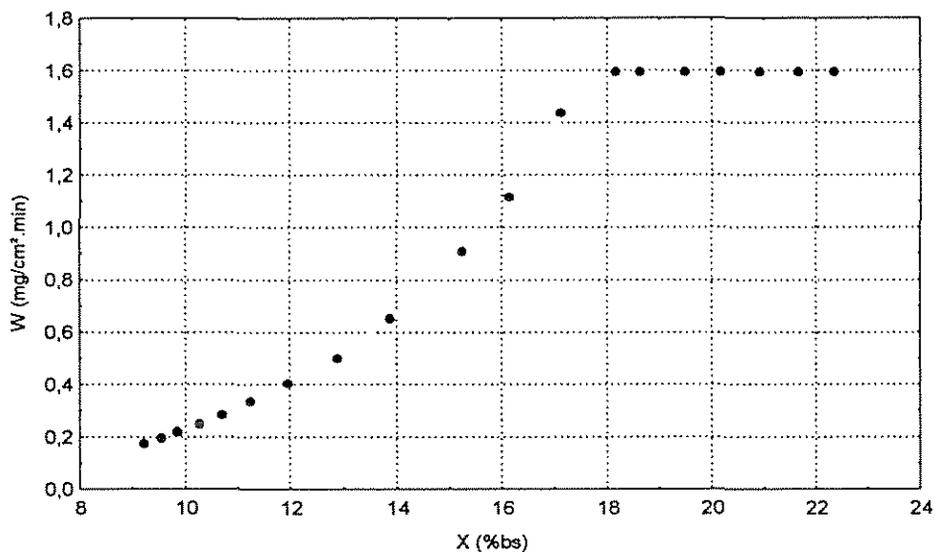


Figura B6.2. Curva de taxa de secagem (corrida 6)

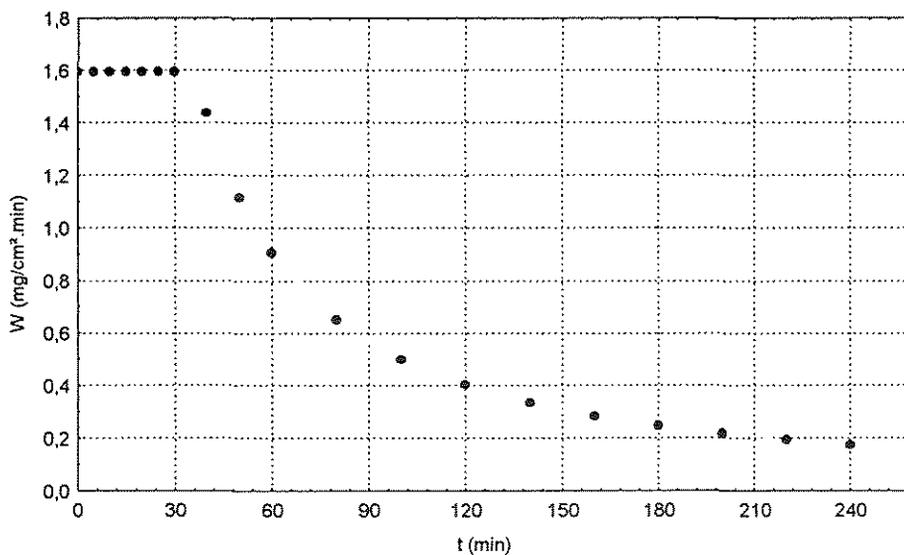


Figura B6.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 6)

Tabela B7.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 7 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	21,07	17,40	0,5015
996,4	5	20,63	17,10	0,5015
994,7	10	20,43	16,96	0,5015
993,7	15	20,31	16,88	0,5015
992,3	20	20,14	16,76	0,5015
990,3	25	19,89	16,59	0,5015
987,9	30	19,60	16,39	0,5015
984,8	40	19,23	16,13	0,5015
981,5	50	18,83	15,85	0,5015
976,1	60	18,17	15,38	0,5015
969,7	80	17,40	14,82	0,5015
965,8	100	16,93	14,48	0,3977
961,6	120	16,42	14,10	0,3258
957,1	140	15,87	13,70	0,2751
953,5	160	15,44	13,37	0,2375
949,7	180	14,98	13,03	0,2085
946,6	200	14,60	12,74	0,1856
944	220	14,29	12,50	0,1669
941,7	240	14,01	12,29	0,1515
939,3	260	13,72	12,06	0,1386
937,8	280	13,54	11,92	0,1276
936,3	300	13,36	11,78	0,1181
934,6	320	13,15	11,62	0,1099
932,4	340	12,88	11,41	0,1027
931,5	360	12,78	11,33	0,0963

Tabela B7.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 7 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	07	T _{si} (°C)	22,5	T _i (°C)	27,6	T _{g1} (°C)	40,0
t (min)	360	T _{sf} (°C)	35,5	T _f (°C)	28,4	T _{g2} (°C)	36,5
Leito de sólidos		X _i (%bs)	21,07	T _{min} (°C)	26	G (kg/s)	0,030
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	12,78	T _{max} (°C)	28,5	Y ₁ (g/kg as)	14,0
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	5,77	UR _i (%)	61	Y ₂ (g/kg as)	15,0
		X _{cr} (%bs)	17,40	UR _f (%)	55	UR ₁ (%)	34,52
		m _{ss} (g)	825,98	Y _i (g/kg as)	14,1	UR ₂ (%)	42,48
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	13,3	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,1268
		B _f (%bs)	2,50	Y _m (g/kg as)	13,7	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,1353

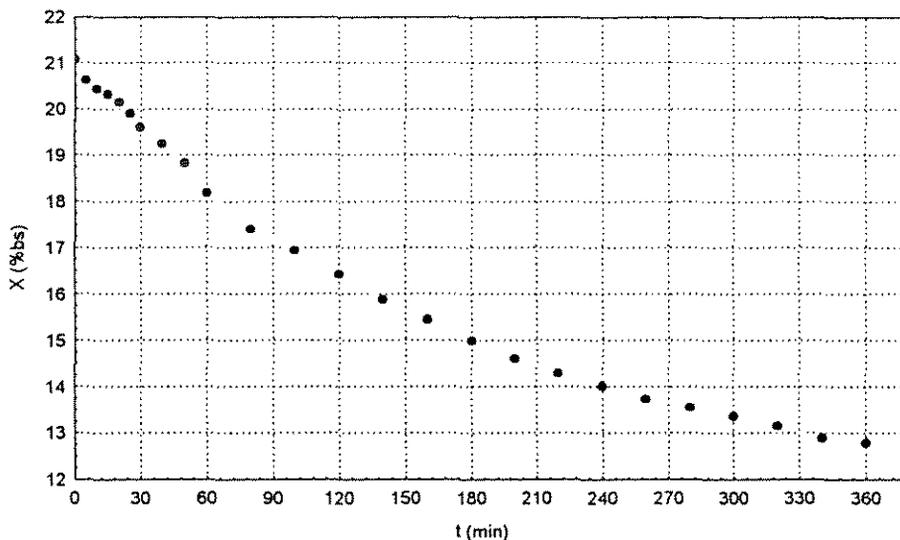


Figura B7.1. Curva de secagem (corrida 7)

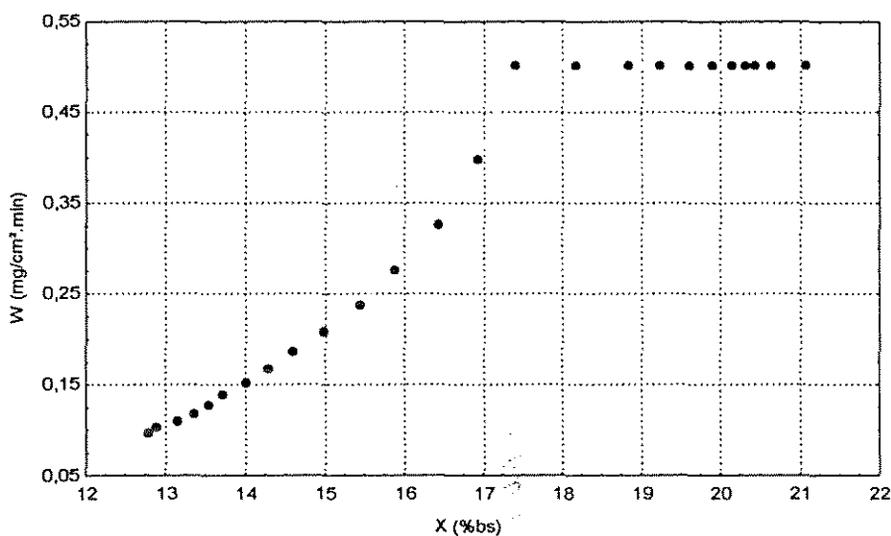


Figura B7.2. Curva de taxa de secagem (corrida 7)

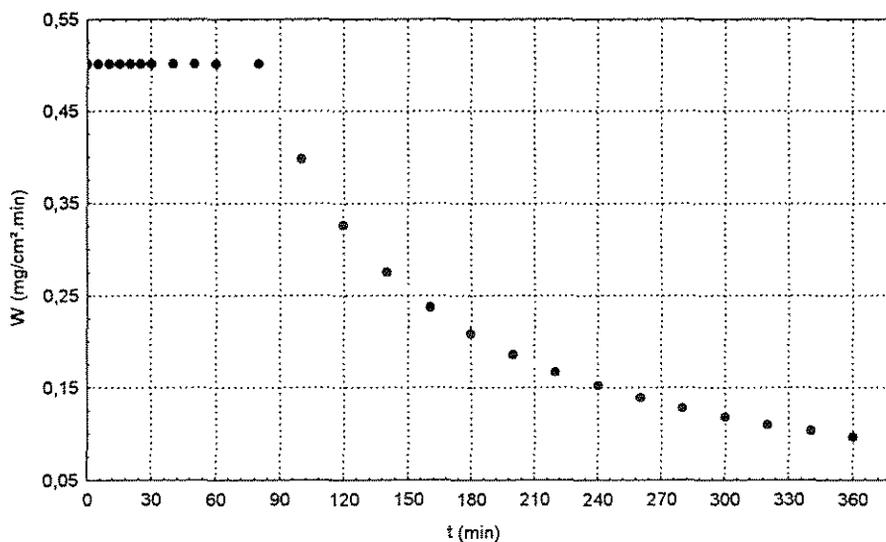


Figura B7.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 7)

Tabela B8.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 8 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	20,77	17,20	1,7984
990,9	5	19,68	16,44	1,7984
983,7	10	18,81	15,83	1,7984
976,3	15	17,91	15,19	1,7984
969,9	20	17,14	14,63	1,7984
964,8	25	16,52	14,18	1,7984
960,2	30	15,97	13,77	1,7984
951,8	40	14,95	13,01	1,3398
944,7	50	14,10	12,35	1,0348
937,4	60	13,21	11,67	0,8362
923,9	80	11,58	10,38	0,5951
917,4	100	10,80	9,75	0,4556
910,4	120	9,95	9,05	0,3654
906,3	140	9,46	8,64	0,3027
902,1	160	8,95	8,22	0,2568
899,1	180	8,59	7,91	0,2219
896,5	200	8,27	7,64	0,1946
893,8	220	7,95	7,36	0,1727
892,3	240	7,77	7,21	0,1548
890,7	260	7,57	7,04	0,1398
887,1	280	7,14	6,66	0,1273
885,8	300	6,98	6,53	0,1165
884	320	6,76	6,34	0,1073
882,9	340	6,63	6,22	0,0992
881,9	360	6,51	6,11	0,0922

Tabela B8.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 8 (final)

Identificação	Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida 08	T _s (°C)	24,7	T _i (°C)	30,0	Tg ₁ (°C)	80,0
t (min) 360	T _s (°C)	60,8	T _r (°C)	28,4	Tg ₂ (°C)	72,0
Leito de sólidos	X _i (%bs)	20,77	T _{min} (°C)	28,5	G (kg/s)	0,030
A (cm ²) 736,31	X _f (%bs)	6,51	T _{max} (°C)	32,5	Y ₁ (g/kg as)	19,0
H _L (cm) 12,5	X _e (%bs)	1,51	UR _i (%)	70	Y ₂ (g/kg as)	24,3
	X _{cr} (%bs)	15,97	UR _r (%)	65	UR ₁ (%)	9,63
	m _{ss} (g)	827,99	Y _i (g/kg as)	18,8	UR ₂ (%)	21,47
	B _i (%bs)	3,16	Y _r (g/kg as)	15,8	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0171
	B _r (%bs)	2,76	Y _m (g/kg as)	17,3	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0524

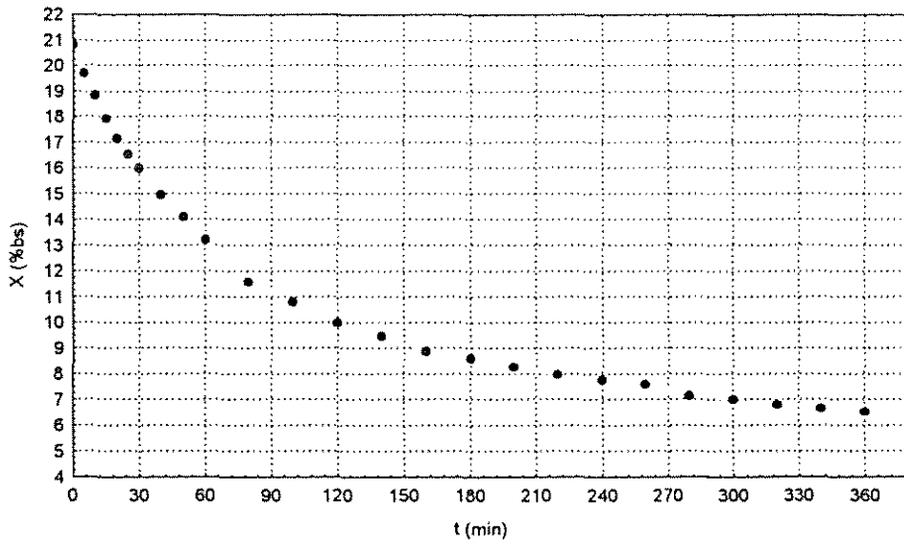


Figura B8.1. Curva de secagem (corrida 8)

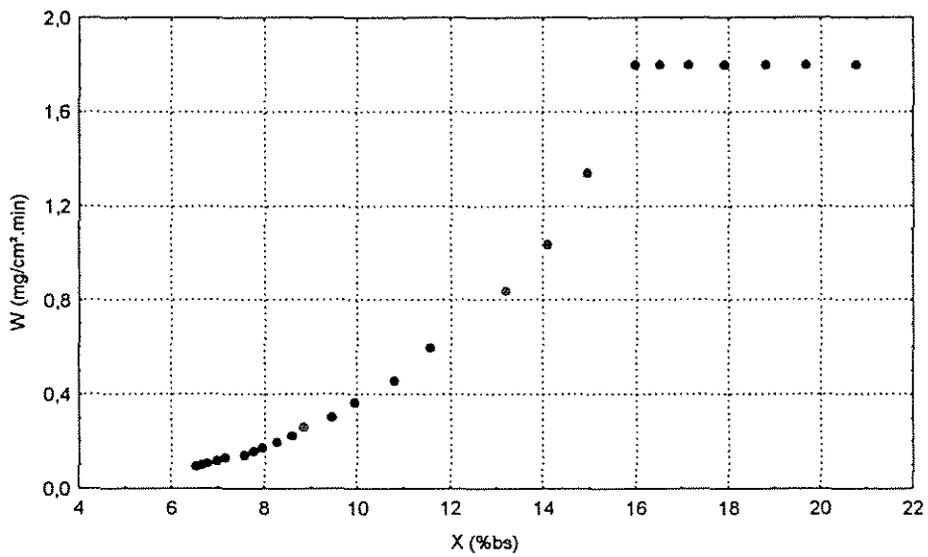


Figura B8.2. Curva de taxa de secagem (corrida 8)

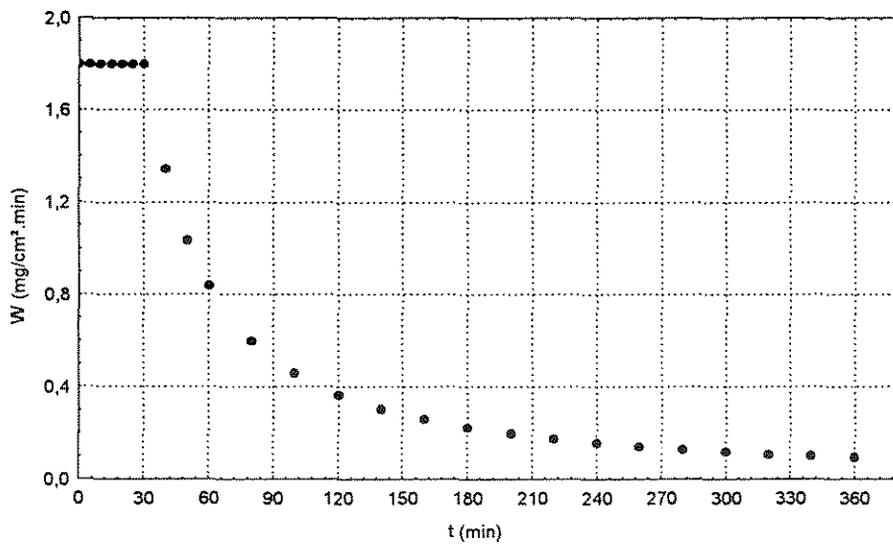


Figura B8.3. Curva de taxa de secagem em função do (corrida 8)

Tabela B9.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 9 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	20,16	16,78	0,1420
999,2	5	20,06	16,71	0,1420
998,3	10	19,96	16,64	0,1420
997,9	15	19,91	16,60	0,1420
996,7	20	19,76	16,50	0,1420
996,3	25	19,72	16,47	0,1420
995,3	30	19,60	16,39	0,1420
993,6	40	19,39	16,24	0,1420
992,4	50	19,25	16,14	0,1420
991,1	60	19,09	16,03	0,1420
988,7	80	18,80	15,83	0,1420
986,8	100	18,57	15,66	0,1420
984,8	120	18,33	15,49	0,1420
983,1	140	18,13	15,35	0,1420
981	160	17,88	15,17	0,1420
979	180	17,64	14,99	0,1420
978,3	200	17,55	14,93	0,1420
976,4	220	17,32	14,77	0,1420
975,3	240	17,19	14,67	0,1420
971,4	260	16,72	14,33	0,1420
969,9	280	16,54	14,20	0,1420
966,7	300	16,16	13,91	0,1420

Tabela B9.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 9 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	09	T _{si} (°C)	24,0	T _i (°C)	26,0	T _{g1} (°C)	26,0
t (min)	300	T _{sr} (°C)	22,0	T _r (°C)	26,3	T _{g2} (°C)	24,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	20,16	T _{min} (°C)	26,0	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	16,16	T _{max} (°C)	29,7	Y ₁ (g/kg as)	13,5
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	8,88	UR _i (%)	60	Y ₂ (g/kg as)	13,8
		X _{cr} (%bs)	-	UR _r (%)	56	UR ₁ (%)	64,25
		m _{ss} (g)	832,22	Y _i (g/kg as)	13,8	UR ₂ (%)	67,18
		B _i (%bs)	3,16	Y _r (g/kg as)	12,0	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,1705
		B _f (%bs)	2,69	Y _m (g/kg as)	12,9	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,1723

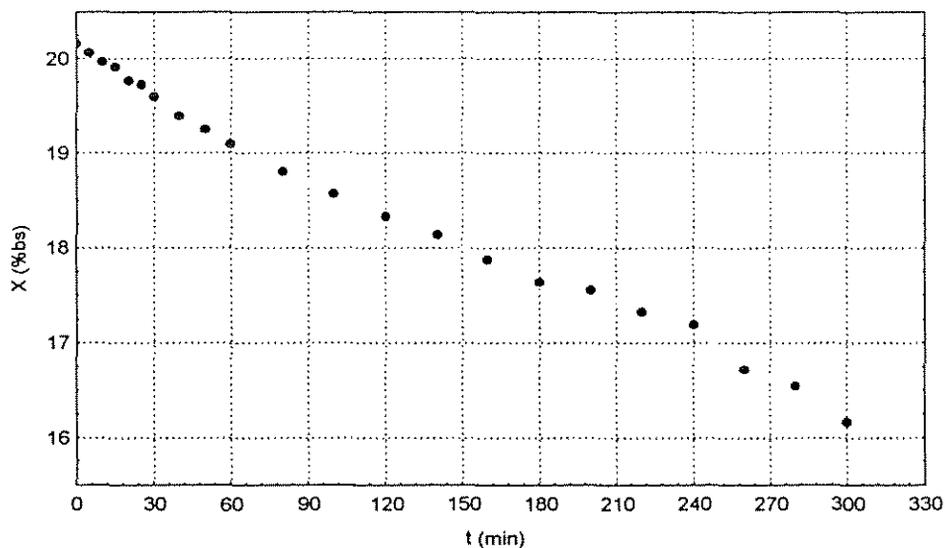


Figura B9.1. Curva de secagem (corrida 9)

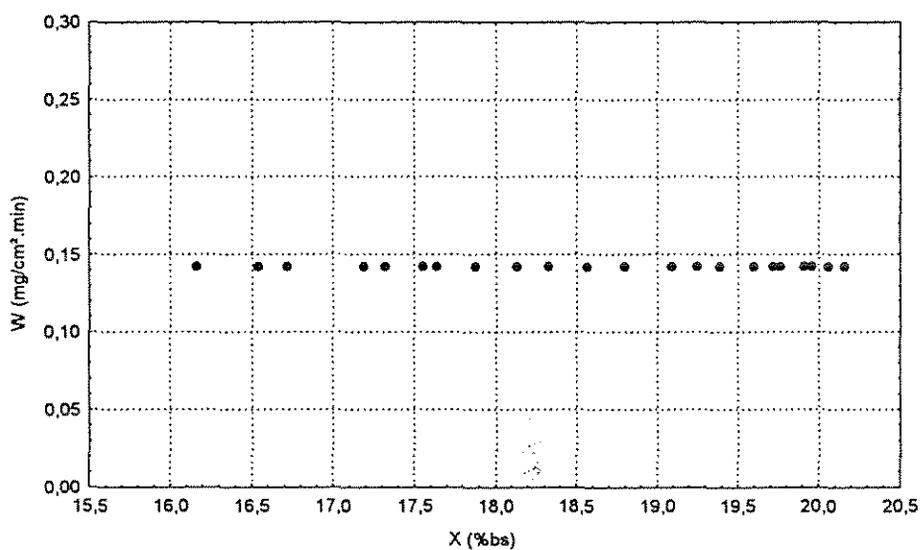


Figura B9.2. Curva de taxa de secagem (corrida 9)

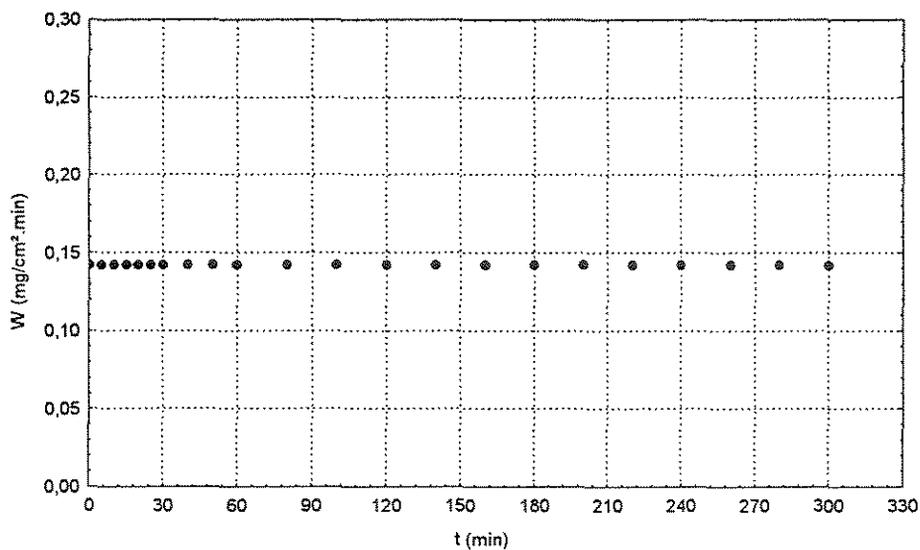


Figura B9.3. curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 9)

Tabela B10.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 10 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	21,50	17,70	1,6577
993,3	5	20,69	17,14	1,6577
985,6	10	19,75	16,49	1,6577
979,5	15	19,01	15,97	1,6577
973,9	20	18,33	15,49	1,6577
968,8	25	17,71	15,05	1,6577
963,3	30	17,04	14,56	1,6577
954,6	40	15,98	13,78	1,6485
947,3	50	15,10	13,12	1,2691
940,1	60	14,22	12,45	1,0221
928,3	80	12,79	11,34	0,7224
918,5	100	11,60	10,39	0,5493
909,6	120	10,52	9,52	0,4378
903,4	140	9,76	8,90	0,3605
898	160	9,11	8,35	0,3041
894,1	180	8,63	7,95	0,2613
889,9	200	8,12	7,51	0,2280
887	220	7,77	7,21	0,2013
884,6	240	7,48	6,96	0,1795
882,4	260	7,21	6,73	0,1614
880,5	280	6,98	6,53	0,1462
878,6	300	6,75	6,32	0,1333

Tabela B10.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 10 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	10	T _{Si} (°C)	22,6	T _i (°C)	31,5	Tg ₁ (°C)	94,0
t (min)	300	T _{Sf} (°C)	68,0	T _f (°C)	32,8	Tg ₂ (°C)	68,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	21,50	Tmin (°C)	31,0	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	6,75	Tmax (°C)	34,0	Y ₁ (g/kg as)	19,8
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	68	Y ₂ (g/kg as)	25,9
		X _{cr} (%bs)	17,04	UR _f (%)	60	UR ₁ (%)	6,59
		m _{ss} (g)	823,04	Y _i (g/kg as)	19,9	UR ₂ (%)	15,83
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	18,9	ρ _{a1} (kg/m ³)	0,9879
		B _f (%bs)	2,67	Y _m (g/kg as)	19,4	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0266

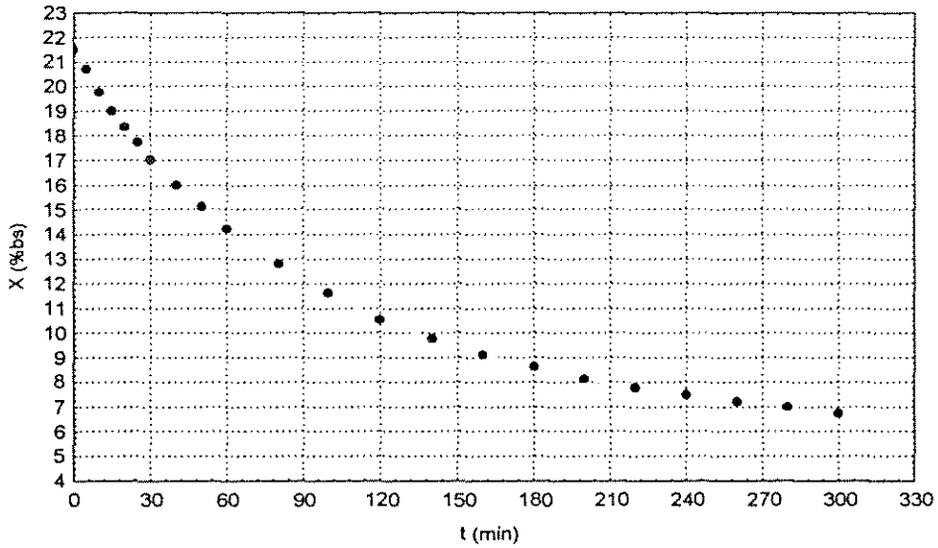


Figura B10.1. Curva de secagem (corrida 10)

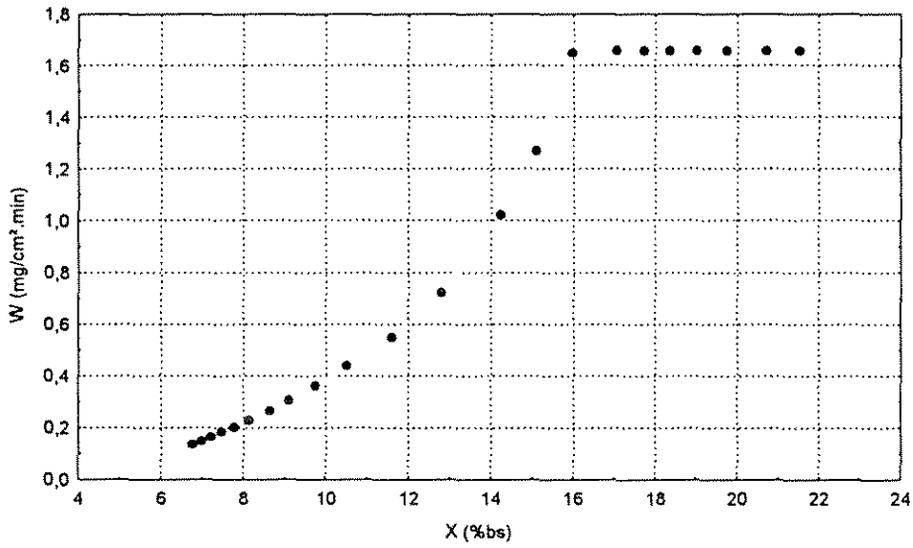


Figura B10.2. Curva de taxa de secagem (corrida 10)

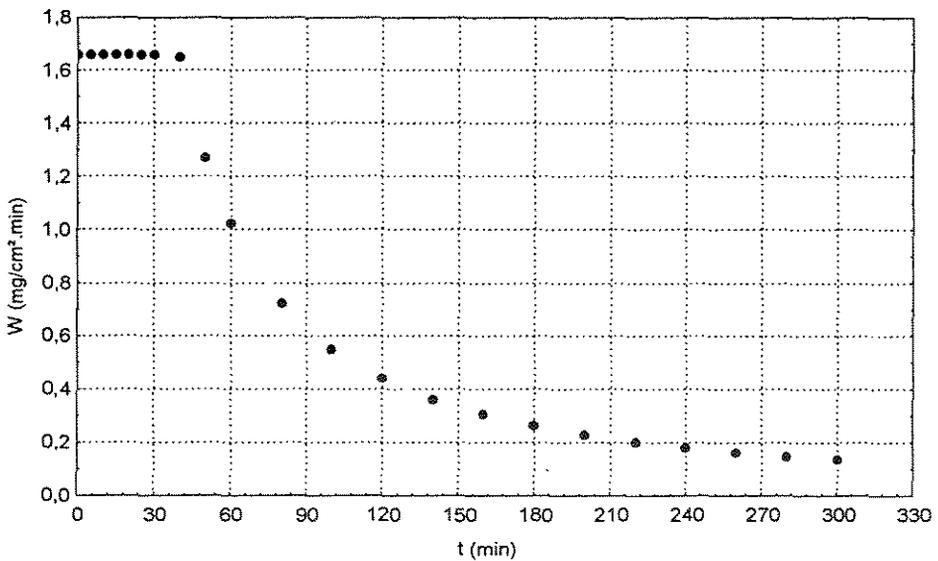


Figura B10.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 10)

Tabela B11.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 11 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	23,12	18,78	0,8774
991,8	5	22,11	18,11	0,8774
990	10	21,89	17,96	0,8774
986	15	21,39	17,62	0,8774
982,4	20	20,95	17,32	0,8774
978,8	25	20,51	17,02	0,8774
975,2	30	20,06	16,71	0,8774
969,6	40	19,38	16,23	0,8774
964,4	50	18,73	15,78	0,8774
959,6	60	18,14	15,36	0,8774
950,9	80	17,07	14,58	0,6776
944,5	100	16,28	14,00	0,5268
937,1	120	15,37	13,33	0,4281
931,8	140	14,72	12,83	0,3588
927,1	160	14,14	12,39	0,3076
921,1	180	13,40	11,82	0,2683
917,4	199	12,95	11,46	0,2387

Tabela B11.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 11 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	11	T _{s_i} (°C)	26,2	T _i (°C)	28,0	Tg ₁ (°C)	60,0
t (min)	199	T _{s_r} (°C)	38,9	T _r (°C)	29,0	Tg ₂ (°C)	48,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	23,12	T _{min} (°C)	28,0	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	12,95	T _{max} (°C)	31,0	Y ₁ (g/kg as)	15,2
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	60	Y ₂ (g/kg as)	18,3
		X _{cr} (%bs)	18,14	UR _r (%)	66	UR ₁ (%)	16,49
		m _{ss} (g)	812,23	Y _i (g/kg as)	14,2	UR ₂ (%)	28,76
		B _i (%bs)	3,16	Y _r (g/kg as)	16,7	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0709
		B _r (%bs)	2,87	Y _m (g/kg as)	15,45	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0940

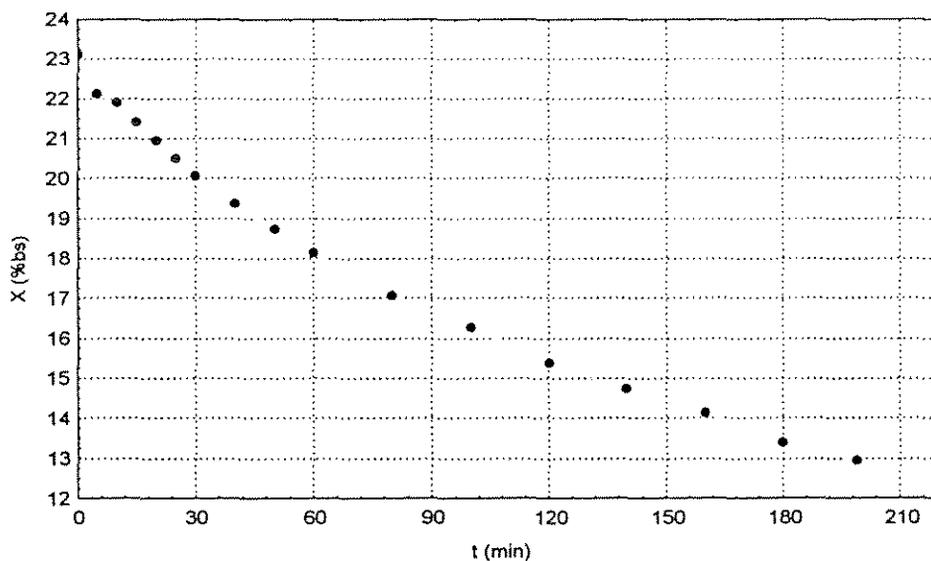


Figura B11.1. Curva de secagem (corrida 11)

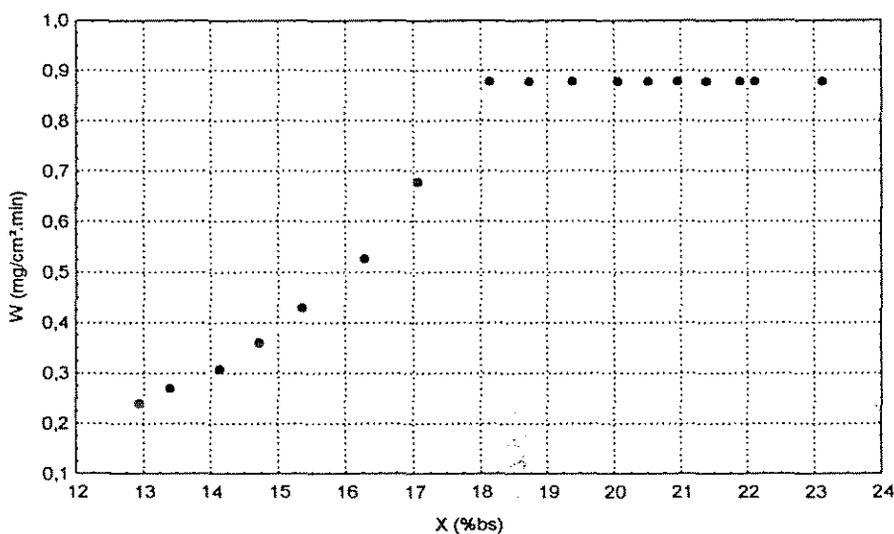


Figura B11.2. Curva de taxa de secagem (corrida 11)

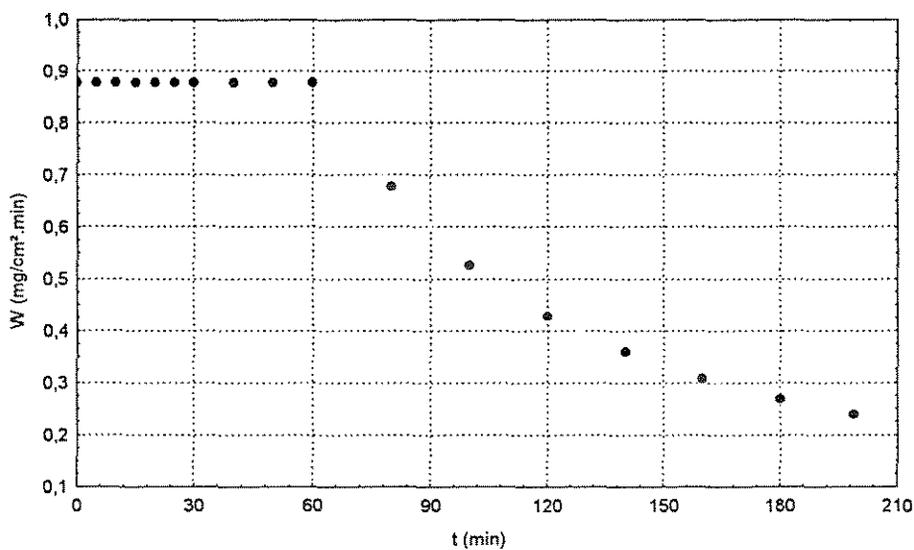


Figura B11.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 11)

Tabela B12.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 12 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	21,48	17,68	0,7337
995	5	20,87	17,27	0,7337
990,9	10	20,37	16,92	0,7337
987,6	15	19,97	16,65	0,7337
985	20	19,66	16,43	0,7337
982,3	25	19,33	16,20	0,7337
979,9	30	19,04	15,99	0,7337
975,1	40	18,45	15,58	0,7337
970,4	50	17,88	15,17	0,7337
966,3	60	17,38	14,81	0,7337
958,6	80	16,45	14,12	0,6359
952,2	100	15,67	13,55	0,4947
945,7	120	14,88	12,95	0,4023
940,8	140	14,29	12,50	0,3374
937	160	13,82	12,15	0,2894
931,7	180	13,18	11,65	0,2526
928,5	200	12,79	11,34	0,2236
925,5	220	12,43	11,05	0,2001
922,4	240	12,05	10,75	0,1808
919,9	260	11,75	10,51	0,1646
917,1	280	11,41	10,24	0,1508
915,1	300	11,16	10,04	0,1390
913	320	10,91	9,84	0,1288
910,9	340	10,65	9,63	0,1199
909	360	10,42	9,44	0,1120
907,5	380	10,24	9,29	0,1050
906,1	401	10,07	9,15	0,0985

Tabela B12.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 12 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	12	Ts _i (°C)	24,7	T _i (°C)	29,6	Tg ₁ (°C)	60,0
t (min)	401	Ts _f (°C)	43,8	T _f (°C)	32,2	Tg ₂ (°C)	52,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	21,48	Tmin (°C)	29,0	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	Xf (%bs)	10,07	Tmax (°C)	32,5	Y ₁ (g/kg as)	19,0
H _L (cm)	12,5	Xe (%bs)	-	UR _i (%)	68	Y ₂ (g/kg as)	21,8
		Xcr (%bs)	17,38	UR _f (%)	64	UR ₁ (%)	20,02
		m _{ss} (g)	823,20	Y _i (g/kg as)	17,8	UR ₂ (%)	31,45
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	19,5	ρa ₁ (kg/m ³)	1,0669
		B _f (%bs)	2,54	Y _m (g/kg as)	18,65	ρa ₂ (kg/m ³)	1,0868

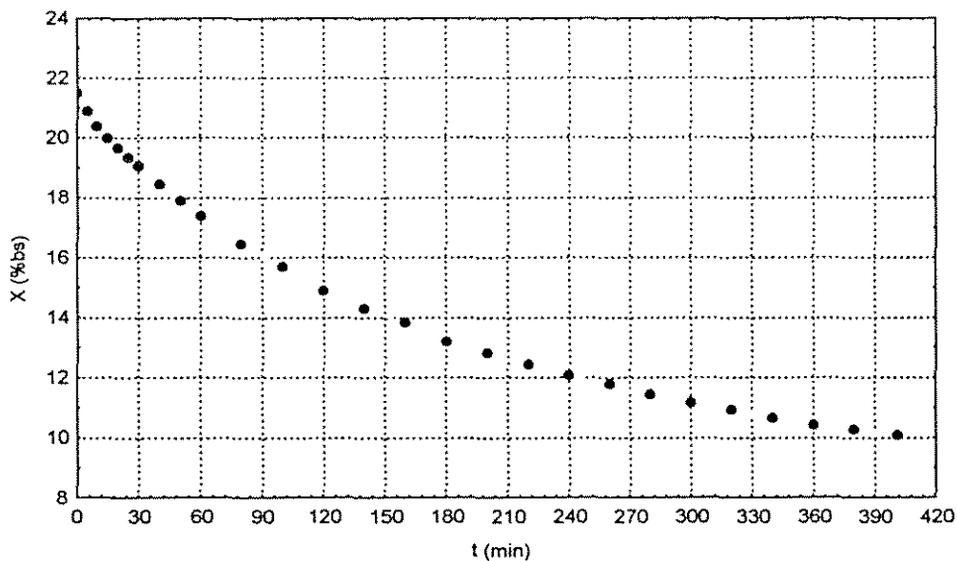


Figura B12.1. Curva de secagem (corrida 12)

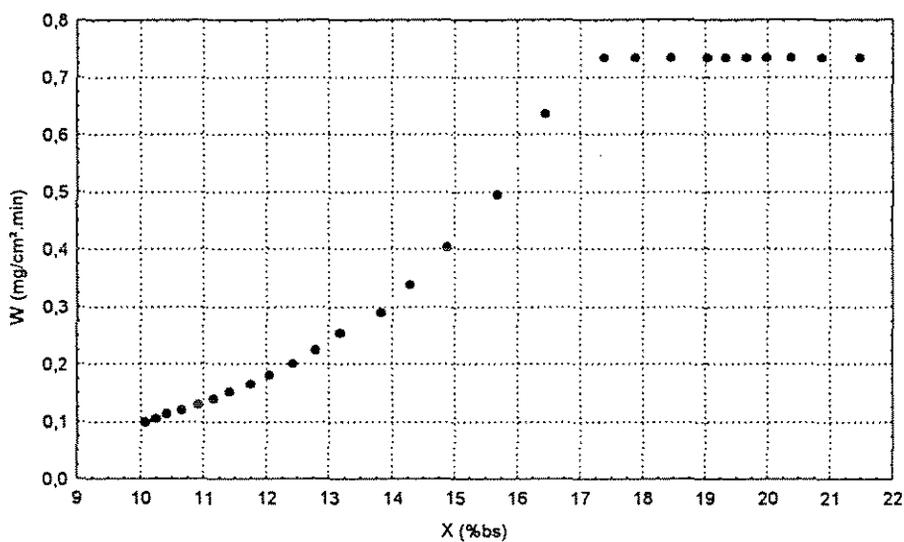


Figura B12.2. curva de taxa de secagem (corrida 12)

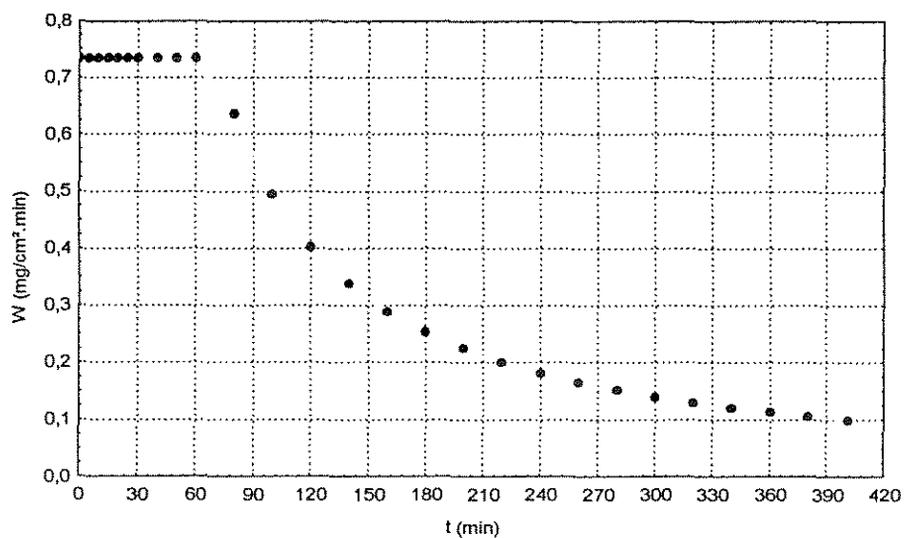


Figura B12.3. Curva de taxa de secagem em função tempo (corrida 12)

Tabela B13.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 13 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	20,69	17,15	0,2675
998,7	5	20,54	17,04	0,2675
997,9	10	20,44	16,97	0,2675
996,8	15	20,31	16,88	0,2675
995,7	20	20,17	16,79	0,2675
994,5	25	20,03	16,69	0,2675
993,3	30	19,88	16,59	0,2675
991,2	40	19,63	16,41	0,2675
989,2	50	19,39	16,24	0,2675
987,2	60	19,15	16,07	0,2675
983,4	80	18,69	15,75	0,2675
980	100	18,28	15,45	0,2675
976,6	120	17,87	15,16	0,2675
973,5	140	17,49	14,89	0,2567
970,7	160	17,16	14,64	0,2223
968	180	16,83	14,41	0,1957
965,2	200	16,49	14,16	0,1746
962,9	220	16,22	13,95	0,1574
960,5	240	15,93	13,74	0,1432
958,2	260	15,65	13,53	0,1313
956,1	280	15,39	13,34	0,1211
954,1	300	15,15	13,16	0,1123

Tabela B13.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 13 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	13	T _{Si} (°C)	24,6	T _i (°C)	28,0	Tg ₁ (°C)	60,0
t (min)	300	T _{Sr} (°C)	32,3	T _r (°C)	29,3	Tg ₂ (°C)	47,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	20,69	T _{min} (°C)	28,8	G (kg/s)	0,007
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	15,15	T _{max} (°C)	29,4	Y ₁ (g/kg as)	15,15
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	69	Y ₂ (g/kg as)	17,6
		X _{cr} (%bs)	17,87	UR _r (%)	62	UR ₁ (%)	23,17
		m ^{ss} (g)	828,55	Y _i (g/kg as)	16,4	UR ₂ (%)	33,95
		B _i (%bs)	3,16	Y _r (g/kg as)	15,9	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0925
		B _r (%bs)	2,59	Y _m (g/kg as)	16,15	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,1084

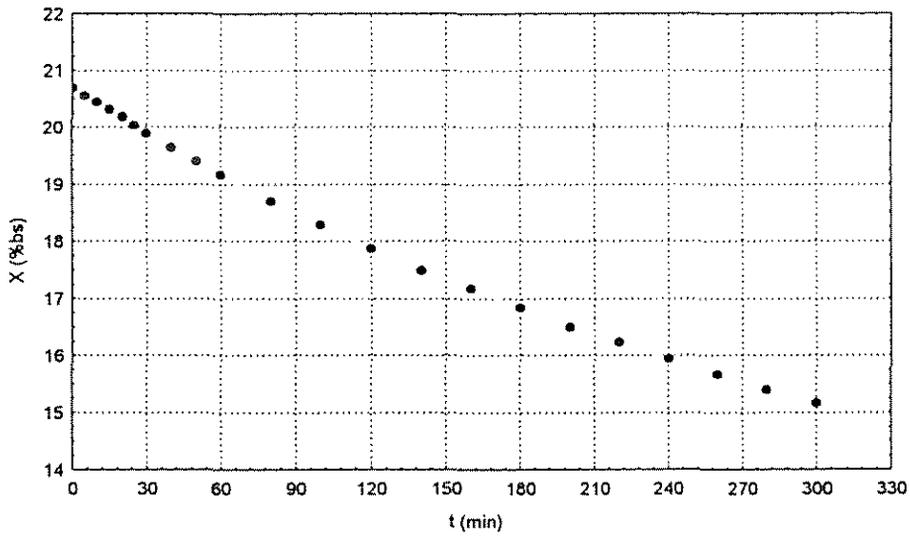


Figura B13.1. Curva de secagem (corrida 13)

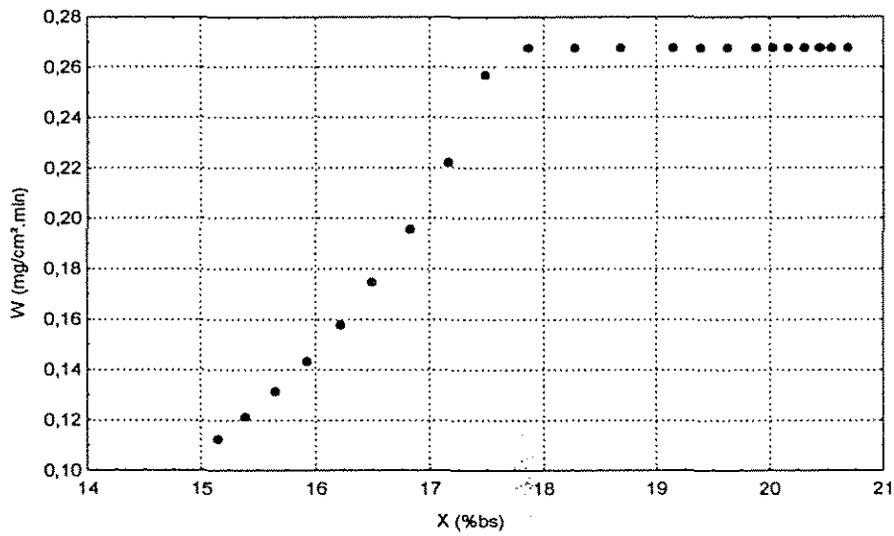


Figura B13.2. curva de taxa de secagem (corrida 13)

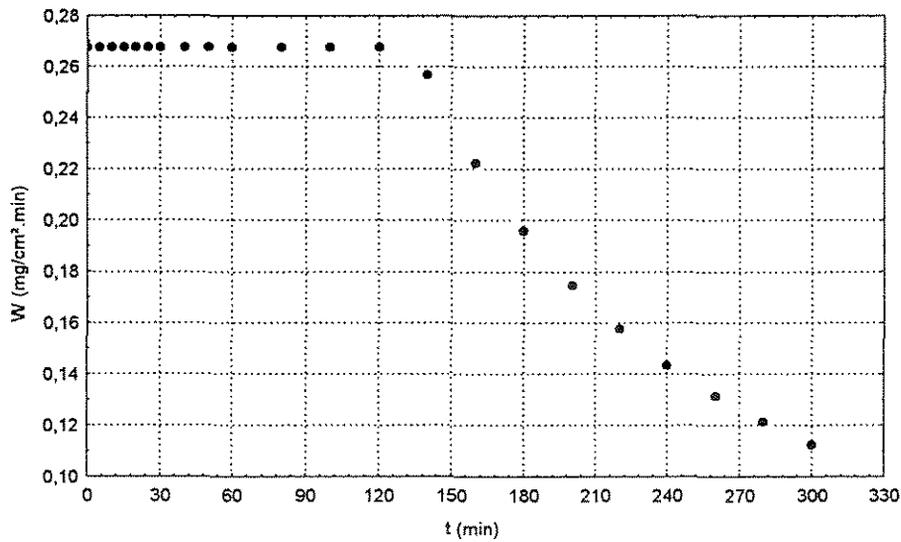


Figura B13.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 13)

Tabela B14.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 14 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	22,25	18,20	1,2478
993,4	5	21,44	17,66	1,2478
988	10	20,78	17,21	1,2478
982,4	15	20,10	16,73	1,2478
978	20	19,56	16,36	1,2478
974,2	25	19,10	16,03	1,2478
970,3	30	18,62	15,70	1,2478
962,8	40	17,70	15,04	1,2478
956,3	50	16,91	14,46	0,8628
951,2	60	16,28	14,00	0,7056
942,1	80	15,17	13,17	0,5126
934,8	100	14,28	12,49	0,3994
928,9	120	13,56	11,94	0,3253
924,2	140	12,98	11,49	0,2733
920,4	160	12,52	11,13	0,2348
917,7	180	12,19	10,86	0,2053
915	200	11,86	10,60	0,1820
912,7	220	11,58	10,38	0,1631
910,6	240	11,32	10,17	0,1476
909,1	260	11,14	10,02	0,1346
907,4	280	10,93	9,85	0,1235
906	300	10,76	9,71	0,1140

Tabela B14.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 14 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	14	T _{si} (°C)	21,5	T _i (°C)	28,0	T _{g1} (°C)	60,0
t (min)	300	T _{sf} (°C)	47,3	T _f (°C)	30,5	T _{g2} (°C)	52,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	22,25	T _{min} (°C)	28,0	G (kg/s)	0,036
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	10,76	T _{max} (°C)	31,4	Y ₁ (g/kg as)	17,5
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	60	Y ₂ (g/kg as)	20,7
		X _{cr} (%bs)	17,70	UR _f (%)	62	UR ₁ (%)	17,23
		m _{ss} (g)	818,0	Y _i (g/kg as)	14,2	UR ₂ (%)	29,23
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	17,1	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0629
		B _f (%bs)	2,50	Y _m (g/kg as)	15,65	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0858

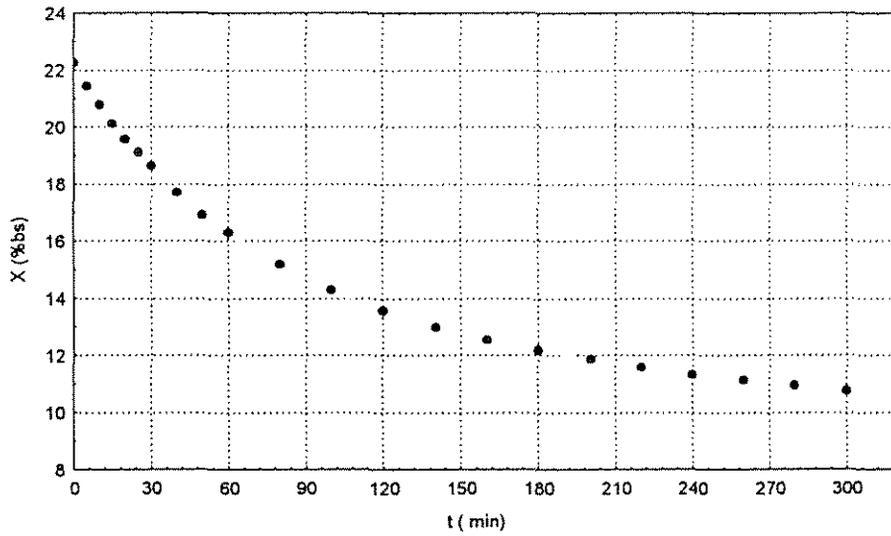


Figura B14.1. Curva de secagem (corrida 14)

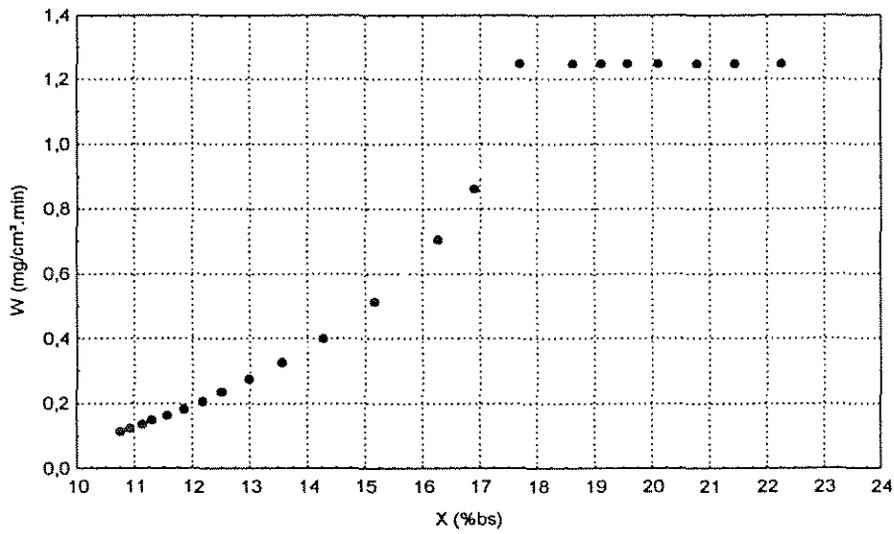


Figura B14.2. Curva de taxa de secagem (corrida 14)

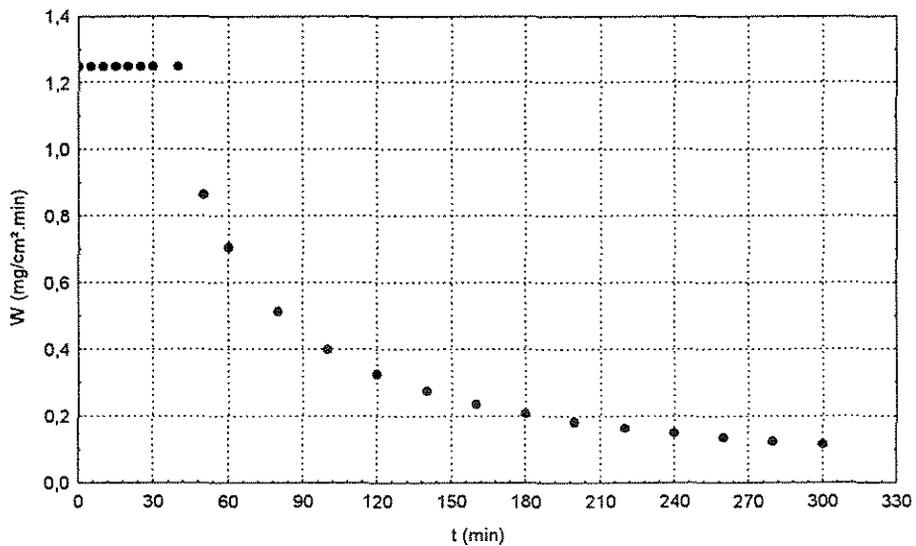


Figura B14.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 14)

Tabela B15.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 15 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	20,30	16,87	0,6366
995,3	5	19,73	16,48	0,6366
991,8	10	19,31	16,18	0,6366
989	15	18,97	15,95	0,6366
987,3	20	18,77	15,80	0,6366
985,1	25	18,50	15,61	0,6366
982,9	30	18,24	15,43	0,6366
976,2	40	17,43	14,85	0,6366
974,8	50	17,26	14,72	0,6366
970,9	60	16,80	14,38	0,6366
964,6	80	16,04	13,82	0,5572
957,9	100	15,23	13,22	0,4346
953,4	120	14,69	12,81	0,3542
949,4	140	14,21	12,44	0,2978
943,9	160	13,55	11,93	0,2560
939,6	180	13,03	11,53	0,2239
937,6	200	12,79	11,34	0,1986
934,4	220	12,40	11,04	0,1781
931,6	240	12,07	10,77	0,1611
928,9	260	11,74	10,51	0,1470
927,2	280	11,54	10,35	0,1349
925,6	300	11,35	10,19	0,1246

Tabela B15.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 15 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	15	T _{si} (°C)	26,8	T _i (°C)	28,9	T _{g1} (°C)	60,0
t (min)	300	T _{sr} (°C)	41,0	T _f (°C)	27,9	T _{g2} (°C)	54,5
Leito de sólidos		X _i (%bs)	20,30	T _{min} (°C)	27,9	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	11,35	T _{max} (°C)	30,1	Y ₁ (g/kg as)	14,2
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	60	Y ₂ (g/kg as)	17,8
		X _{cr} (%bs)	16,80	UR _f (%)	57	UR ₁ (%)	15,48
		m _{ss} (g)	831,28	Y ₁ (g/kg as)	15,0	UR ₂ (%)	29,41
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	13,4	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0715
		B _f (%bs)	2,30	Y _m (g/kg as)	14,2	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0978

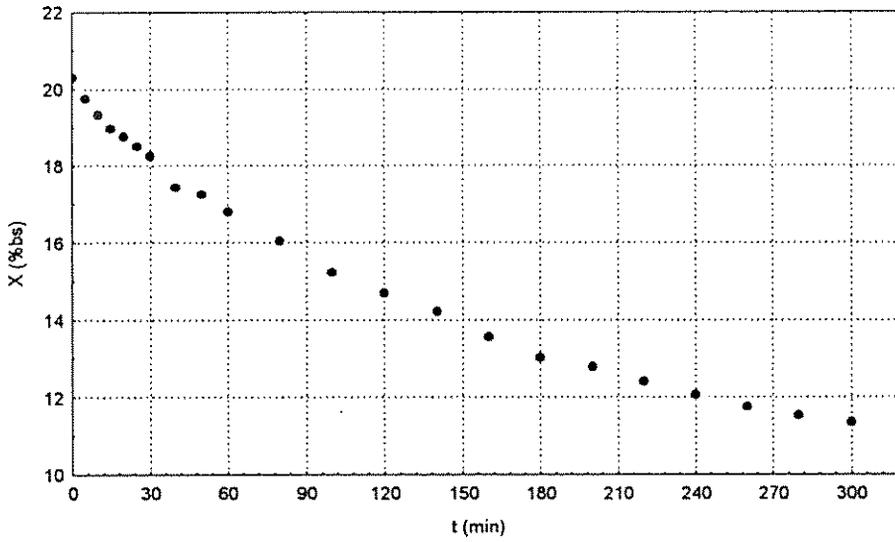


Figura B15.1. Curva de secagem (corrida 15)

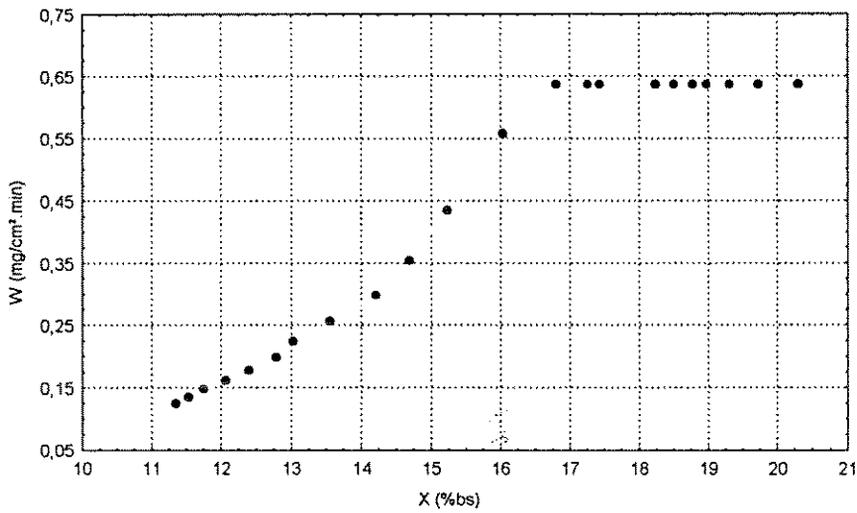


Figura B15.2. curva de taxa de secagem (corrida 15)

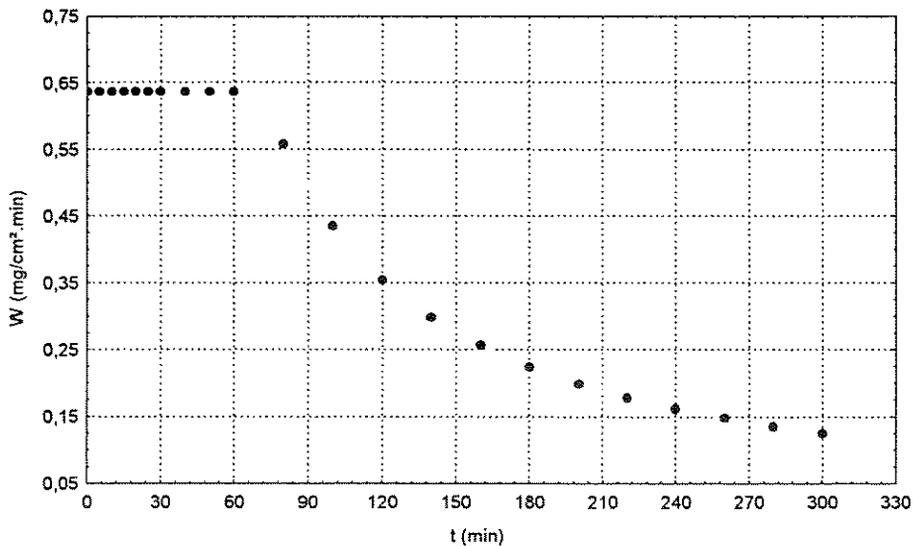


Figura B15.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 15)

Tabela B16.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 16 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	22,34	18,26	0,8298
996,3	5	21,89	17,96	0,8298
992,4	10	21,41	17,64	0,8298
988,2	15	20,90	17,28	0,8298
984,7	20	20,47	16,99	0,8298
981,9	25	20,13	16,75	0,8298
978,8	30	19,75	16,49	0,8298
973	40	19,04	15,99	0,8298
968,2	50	18,45	15,58	0,8298
963,3	60	17,85	15,15	0,8298
955,7	80	16,92	14,47	0,6460
946,8	100	15,83	13,67	0,5028
942,3	120	15,28	13,26	0,4090
937,2	140	14,66	12,78	0,3430
932,5	160	14,08	12,34	0,2943
928,1	180	13,54	11,93	0,2570
924,7	200	13,13	11,60	0,2275
920,5	220	12,61	11,20	0,2036
917,2	240	12,21	10,88	0,1839
914,4	260	11,87	10,61	0,1675
912,5	280	11,64	10,42	0,1535
909,5	300	11,27	10,13	0,1415

Tabela B16.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 16 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	16	T _{si} (°C)	27,2	T _i (°C)	29,2	T _{g1} (°C)	60,0
t (min)	300	T _{sr} (°C)	44,3	T _r (°C)	29,3	T _{g2} (°C)	48,5
Leito de sólidos		X _i (%bs)	22,34	T _{min} (°C)	29,0	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	11,27	T _{max} (°C)	31,2	Y ₁ (g/kg as)	14,8
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	58	Y ₂ (g/kg as)	18,0
		X _{cr} (%bs)	17,85	UR _r (%)	50	UR ₁ (%)	16,08
		m _{ss} (g)	817,39	Y _i (g/kg as)	14,8	UR ₂ (%)	28,17
		B _i (%bs)	3,16	Y _r (g/kg as)	12,8	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0711
		B _r (%bs)	2,90	Y _m (g/kg as)	13,8	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0943

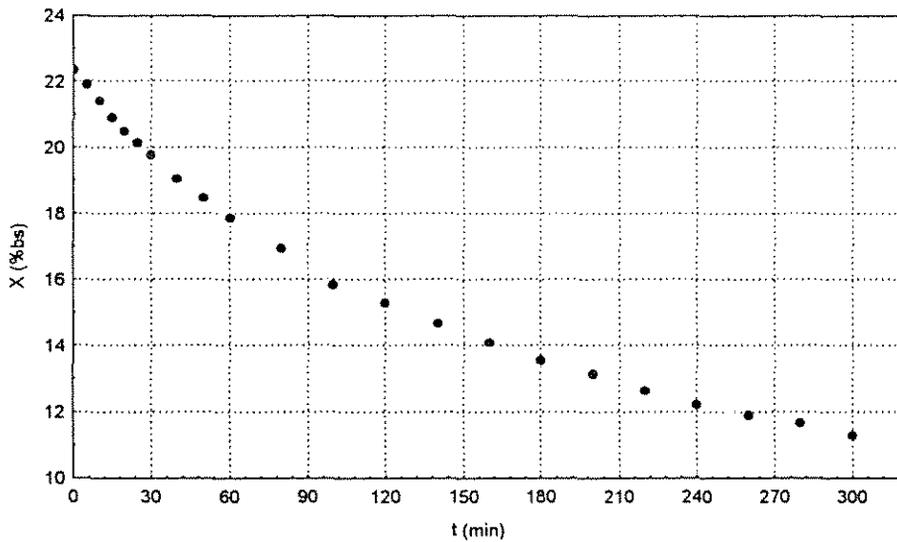


Figura 16.1. Curva de secagem (corrida 16)

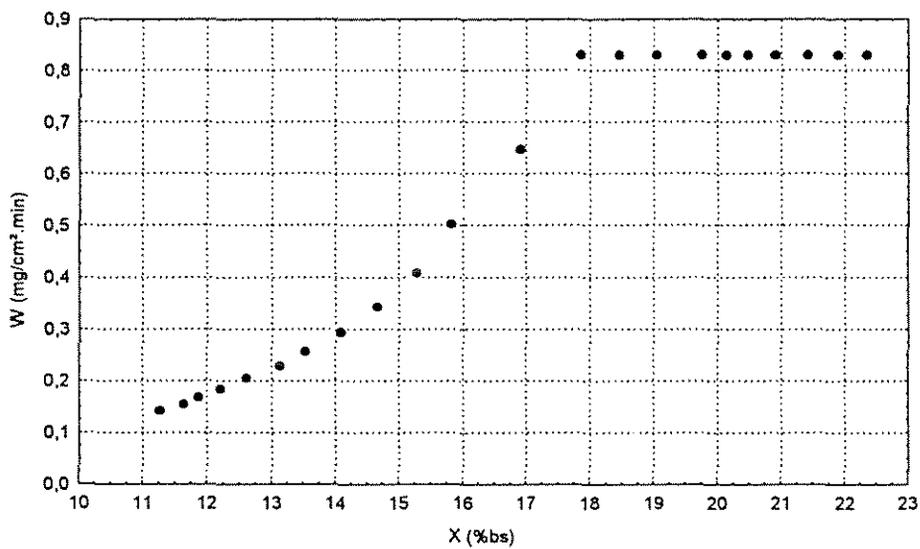


Figura 16.2. Curva de taxa de secagem (corrida 16)

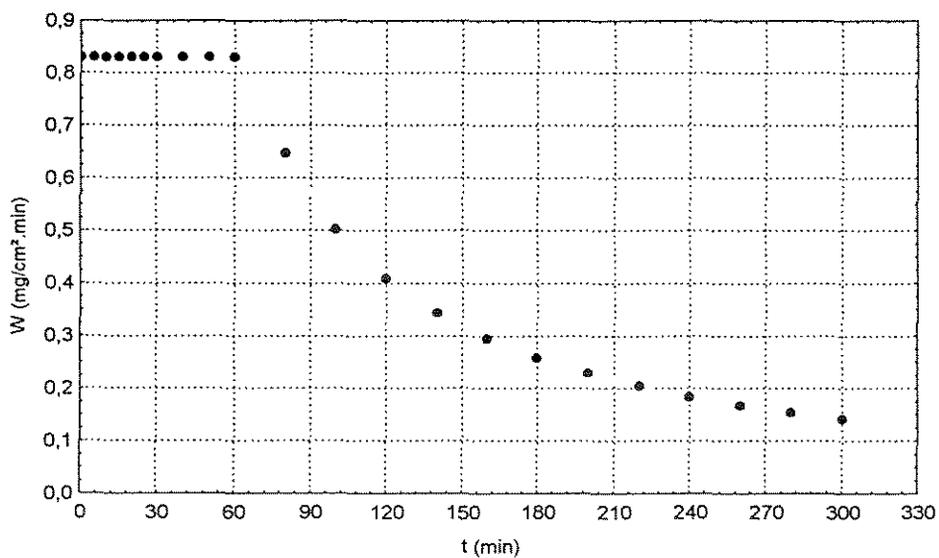


Figura 16.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 16)

Tabela B17.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 17 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	22,24	18,20	0,7825
996,7	5	21,84	17,93	0,7825
992	10	21,27	17,54	0,7825
988,7	15	20,86	17,26	0,7825
985,7	20	20,50	17,01	0,7825
982,8	25	20,14	16,76	0,7825
979,8	30	19,77	16,51	0,7825
974,2	40	19,09	16,03	0,7825
969,6	50	18,53	15,63	0,7825
965,5	60	18,03	15,27	0,7825
957,3	80	17,02	14,55	0,6740
950,2	100	16,16	13,91	0,5243
945,3	120	15,56	13,46	0,4263
940,6	140	14,98	13,03	0,3574
933,6	160	14,13	12,38	0,3065
929,4	180	13,61	11,98	0,2675
925,8	200	13,17	11,64	0,2367
922,1	220	12,72	11,29	0,2117
919,1	240	12,35	11,00	0,1912
915,4	260	11,90	10,64	0,1740
912,8	280	11,58	10,38	0,1594
911	300	11,36	10,20	0,1469

Tabela B17.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 17 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	17	T _{s_i} (°C)	24,7	T _i (°C)	30,0	T _{g₁} (°C)	60,0
t (min)	300	T _{s_f} (°C)	52,7	T _f (°C)	32,1	T _{g₂} (°C)	52,5
Leito de sólidos		X _i (%bs)	22,24	T _{min} (°C)	30,0	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	11,36	T _{max} (°C)	33,2	Y ₁ (g/kg as)	16,9
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	61	Y ₂ (g/kg as)	19,9
		X _{cr} (%bs)	18,03	UR _f (%)	57	UR ₁ (%)	17,91
		m _{ss} (g)	818,04	Y _i (g/kg as)	16,3	UR ₂ (%)	29,58
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	17,2	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0682
		B _f (%bs)	2,74	Y _m (g/kg as)	16,75	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0896

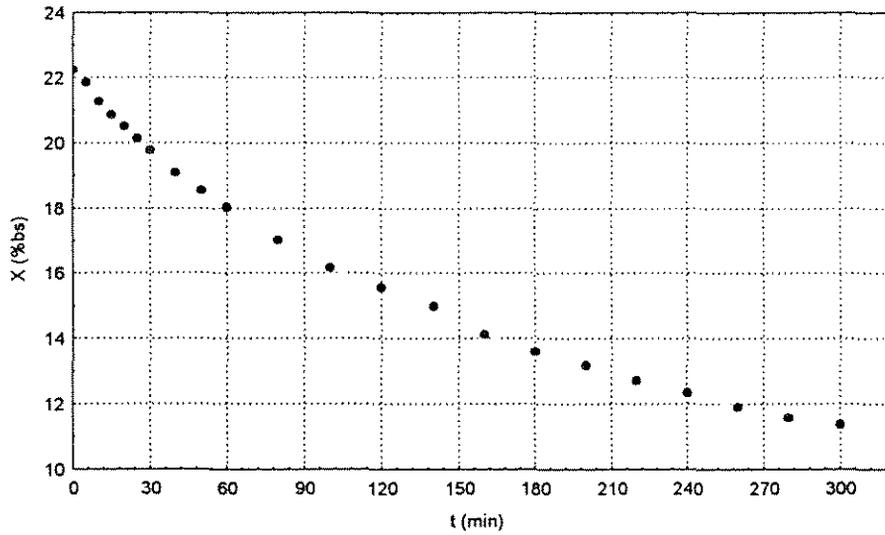


Figura B17.1. Curva de secagem (corrida 17)

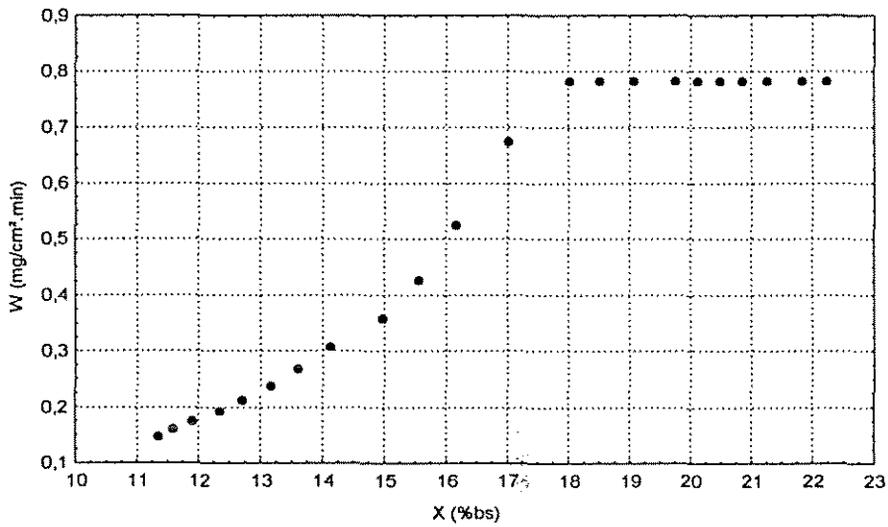


Figura B17.2. Curva de taxa de secagem (corrida 17)

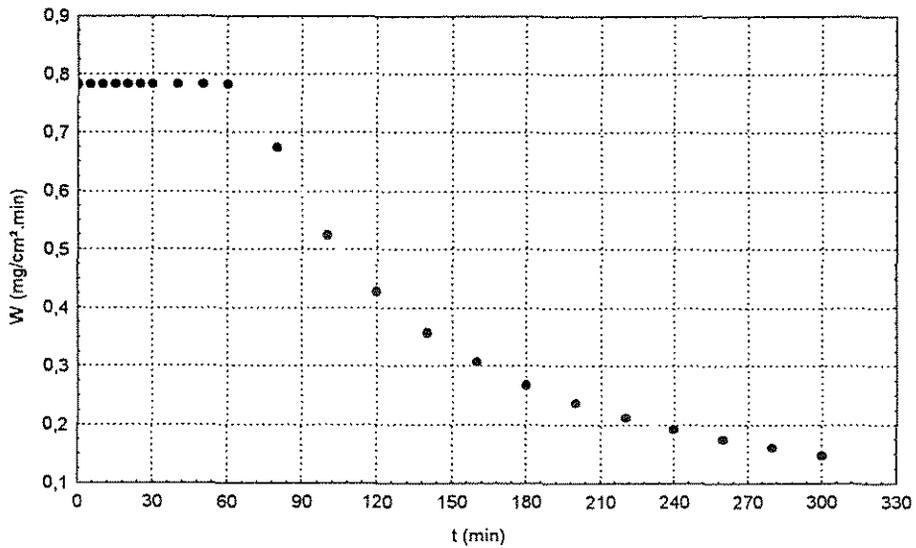


Figura B17.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 17)

Tabela B18.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 18 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	21,07	17,40	0,7653
997,2	5	20,73	17,17	0,7653
994,1	10	20,36	16,91	0,7653
990,8	15	19,96	16,64	0,7653
987,5	20	19,56	16,36	0,7653
984,8	25	19,23	16,13	0,7653
981,8	30	18,87	15,87	0,7653
976,2	40	18,19	15,39	0,7653
971,1	50	17,57	14,94	0,7653
966,9	60	17,06	14,58	0,7653
958,7	80	16,07	13,84	0,6458
951,8	100	15,23	13,22	0,5015
945,3	120	14,45	12,62	0,4072
940	140	13,81	12,13	0,3410
935,2	160	13,22	11,68	0,2922
929,4	180	12,52	11,13	0,2548
927,2	200	12,26	10,92	0,2252
924,1	220	11,88	10,62	0,2014
921,1	240	11,52	10,33	0,1818
918,5	260	11,20	10,07	0,1653
915,9	280	10,89	9,82	0,1514
913,9	300	10,65	9,62	0,1395

Tabela B18.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 18 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	18	T _{si} (°C)	24,7	T _i (°C)	29,7	Tg ₁ (°C)	60,0
t (min)	300	T _{sf} (°C)	46,2	T _f (°C)	32,3	Tg ₂ (°C)	53,5
Leito de sólidos		X _i (%bs)	21,07	T _{min} (°C)	29,0	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	10,65	T _{max} (°C)	32,4	Y ₁ (g/kg as)	20,3
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	69	Y ₂ (g/kg as)	23,0
		X _{cr} (%bs)	17,06	UR _f (%)	67	UR ₁ (%)	21,84
		m _{ss} (g)	825,97	Y _i (g/kg as)	18,2	UR ₂ (%)	34,09
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	20,5	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0677
		B _f (%bs)	2,75	Y _m (g/kg as)	19,35	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0877

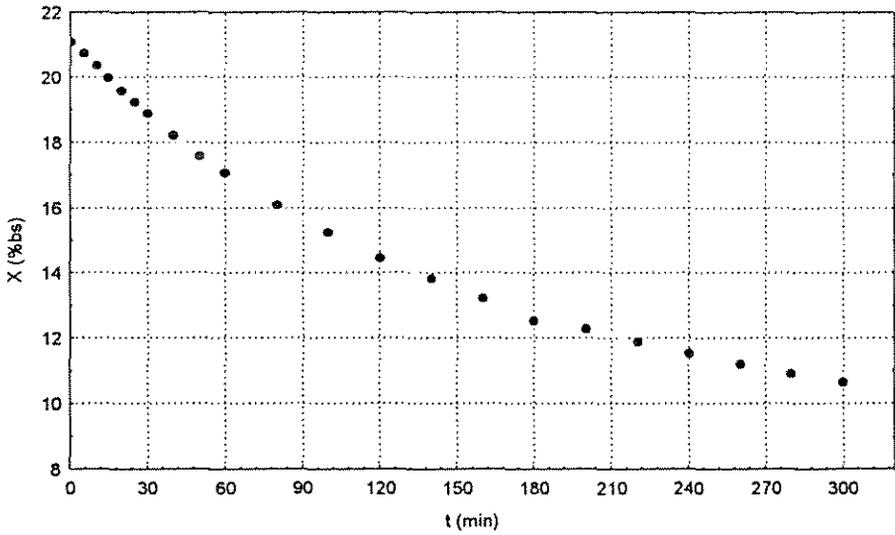


Figura B18.1. Curva de secagem (corrida 18)

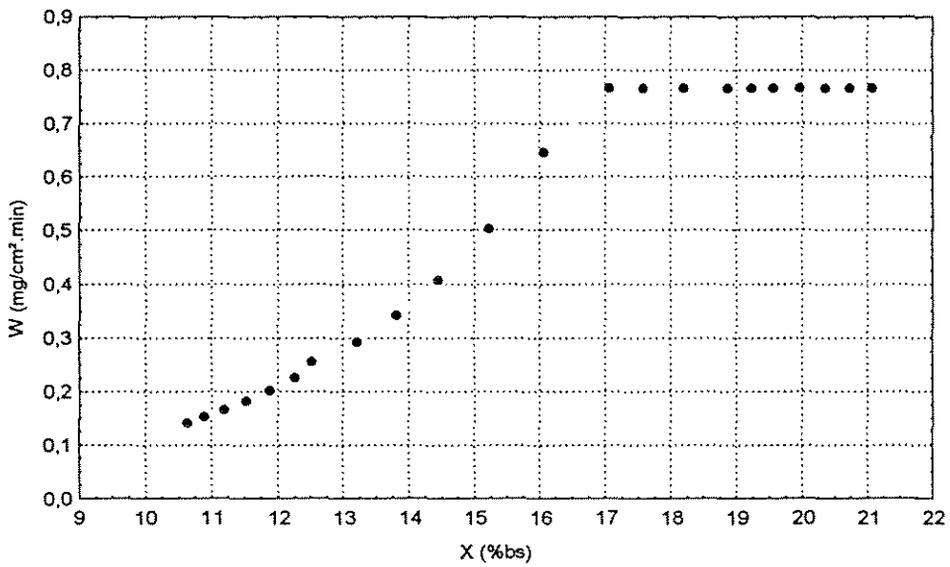


Figura B18.2. Curva de taxa de secagem (corrida 18)

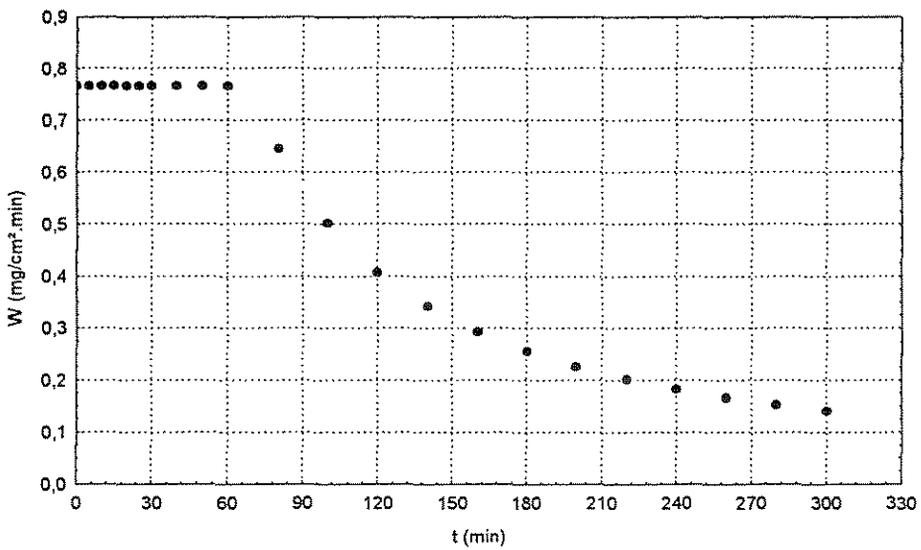


Figura B18.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 18)

Tabela B19.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 19 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	23,87	19,27	0,8509
996,9	5	23,49	19,02	0,8509
991,4	10	22,81	18,57	0,8509
987,8	15	22,36	18,28	0,8509
984,6	20	21,97	18,01	0,8509
981,3	25	21,56	17,73	0,8509
978	30	21,15	17,46	0,8509
972,6	40	20,48	17,00	0,8509
967,1	50	19,80	16,53	0,8509
962,5	60	19,23	16,13	0,8509
952,5	80	17,99	15,25	0,7176
944,8	100	17,04	14,56	0,5585
938,2	120	16,22	13,96	0,4541
933,3	140	15,61	13,50	0,3808
928,1	160	14,97	13,02	0,3266
923,4	180	14,39	12,58	0,2850
919,4	200	13,89	12,20	0,2521
913,9	220	13,21	11,67	0,2255
909,3	240	12,64	11,22	0,2036
908,2	260	12,50	11,11	0,1853
904,7	280	12,07	10,77	0,1697
903,3	300	11,90	10,63	0,1563

Tabela B19.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 19 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	19	T _{si} (°C)	25,7	T _i (°C)	29,1	T _{g1} (°C)	60,0
t (min)	300	T _{sf} (°C)	47,7	T _f (°C)	31,0	T _{g2} (°C)	53,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	23,87	T _{min} (°C)	29,0	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	11,90	T _{max} (°C)	31,0	Y ₁ (g/kg as)	20,1
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	71	Y ₂ (g/kg as)	23,0
		X _{cr} (%bs)	19,23	UR _f (%)	69	UR ₁ (%)	21,61
		m _{ss} (g)	807,27	Y _i (g/kg as)	18,1	UR ₂ (%)	34,96
		B _i (%bs)	3,16	Y _f (g/kg as)	19,6	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0679
		B _f (%bs)	2,65	Y _m (g/kg as)	18,85	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0894

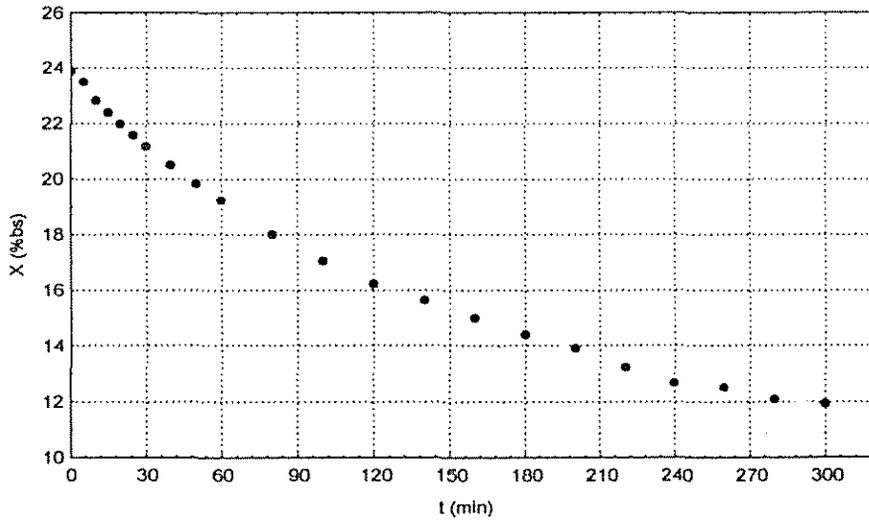


Figura B19.1. Curva de secagem (corrida 19)

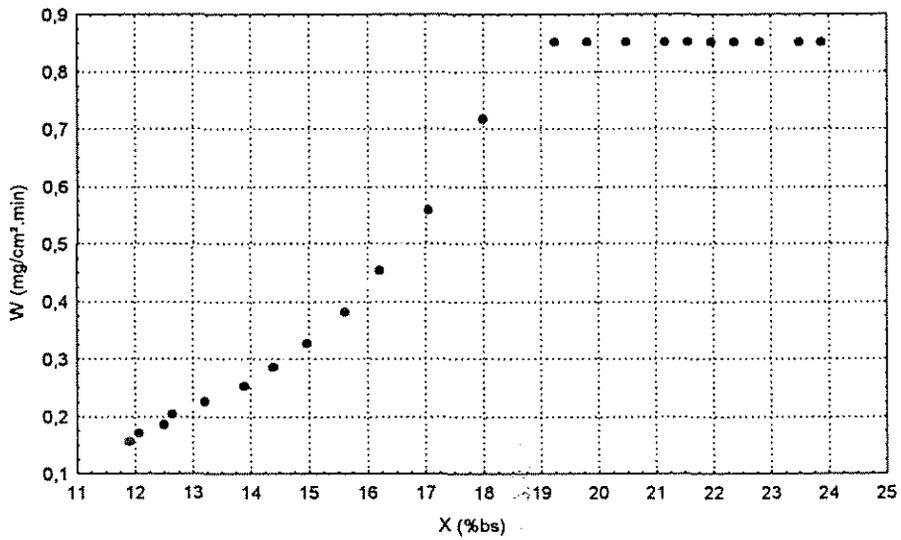


Figura B19.2. Curva de taxa de secagem (corrida 19)

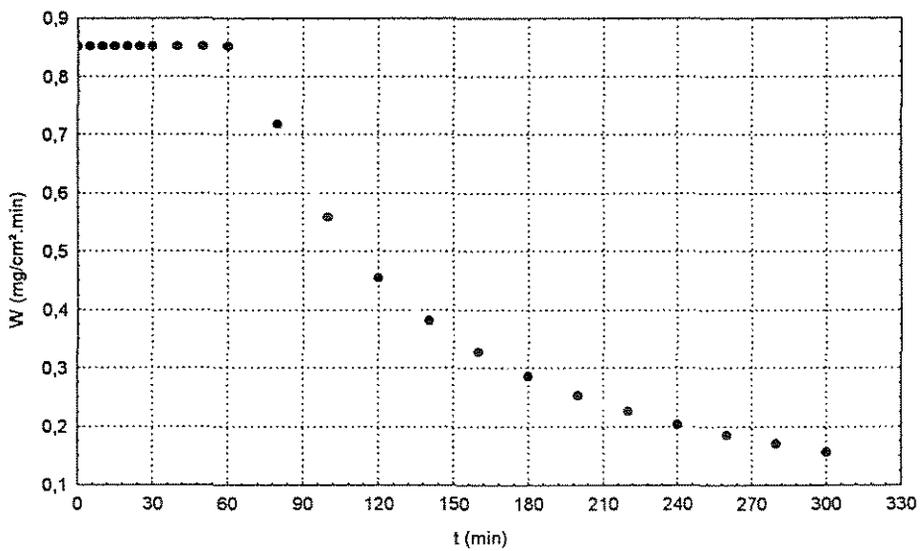


Figura B19.3. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 19)

Tabela B20.1. Condições experimentais de secagem para a corrida 20 (final)

m (g)	t (min)	X (%bs)	X (%bu)	W (mg/cm ² .min)
1000	0	22,94	18,66	0,8894
996,9	5	22,56	18,41	0,8894
993,2	10	22,10	18,10	0,8894
989,8	15	21,69	17,82	0,8894
987	20	21,34	17,59	0,8894
983,8	25	20,95	17,32	0,8894
980	30	20,48	17,00	0,8894
972	40	19,50	16,32	0,8894
966,7	50	18,85	15,86	0,8894
961,8	60	18,24	15,43	0,8894
953	80	17,16	14,65	0,6909
945,8	100	16,28	14,00	0,5371
939,4	120	15,49	13,41	0,4363
933,4	140	14,75	12,86	0,3656
928,4	160	14,14	12,39	0,3133
923,5	180	13,54	11,92	0,2733
919,5	200	13,04	11,54	0,2416
915,7	220	12,58	11,17	0,2161
912,9	240	12,23	10,90	0,1950
910,2	260	11,90	10,64	0,1774
907,5	280	11,57	10,37	0,1624
905,2	300	11,29	10,14	0,1496

Tabela B20.2. Dados experimentais de entrada e saída do material, ambiente e ar de secagem para as condições da corrida 20 (final)

Identificação		Material		Ar ambiente		Ar de secagem	
Corrida	20	T _{si} (°C)	24,6	T _i (°C)	28,8	T _{g1} (°C)	60,0
t (min)	300	T _{sr} (°C)	44,8	T _r (°C)	31,1	T _{g2} (°C)	53,0
Leito de sólidos		X _i (%bs)	22,94	T _{min} (°C)	28,5	G (kg/s)	0,0215
A (cm ²)	736,31	X _f (%bs)	11,29	T _{max} (°C)	31,5	Y ₁ (g/kg as)	19,2
H _L (cm)	12,5	X _e (%bs)	-	UR _i (%)	70	Y ₂ (g/kg as)	22,4
		X _{cr} (%bs)	18,24	UR _r (%)	68	UR ₁ (%)	20,73
		m _{ss} (g)	813,4	Y _i (kg/kg as)	17,5	UR ₂ (%)	34,9
		B _i (%bs)	3,16	Y _r (g/kg as)	19,4	ρ _{a1} (kg/m ³)	1,0684
		B _r (%bs)	2,84	Y _m (g/kg as)	18,45	ρ _{a2} (kg/m ³)	1,0915

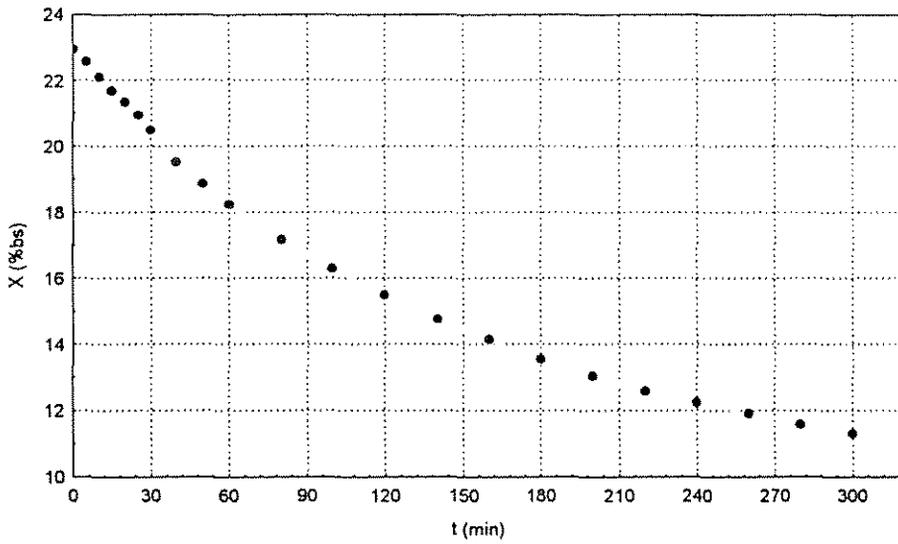


Figura B20.1. Curva de secagem (corrida 20)

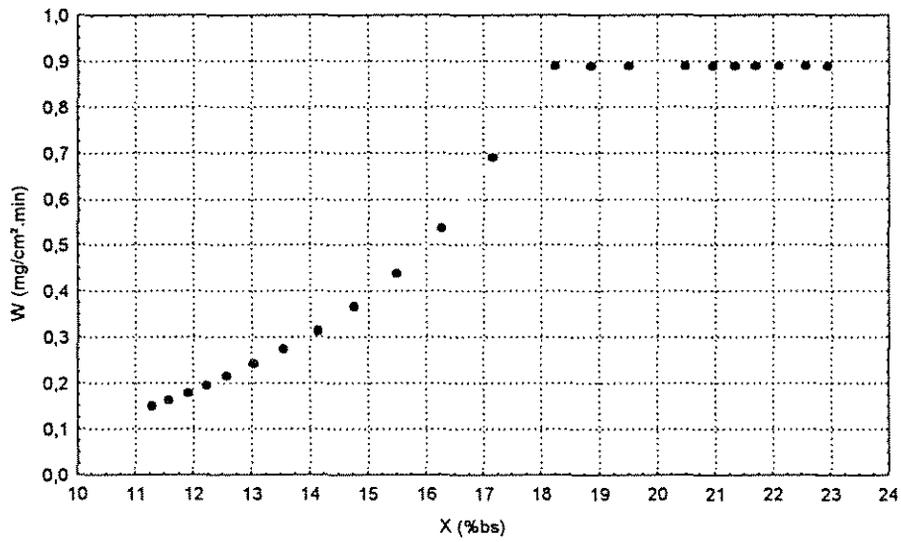


Figura B20.2. Curva de taxa de secagem (corrida 20)

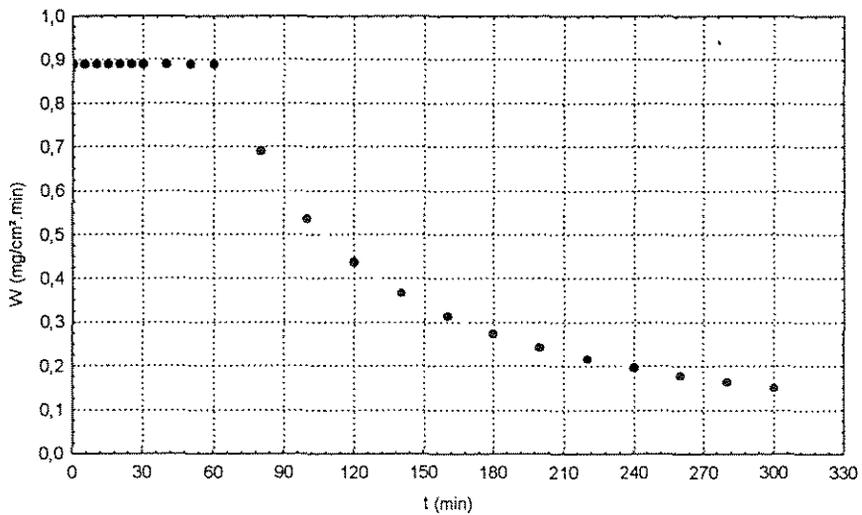


Figura B20.2. Curva de taxa de secagem em função do tempo (corrida 20)

ANEXO C

Teores de bixina e degradação do corante para o projeto fatorial fracionário desenvolvidos na primeira fase dos experimentos

Tabela C1. Análise de bixina e degradação do corante durante a primeira fase de experimentos

Amostras	Nor (%bs)	B (%bs)	B _m (%bs)	φ (%)
1A	2,64	2,70	2,75	41,49
1B	2,70	2,80		
2A	2,87	2,98	2,87	38,94
2B	2,67	2,77		
3A	2,38	2,47	2,55	45,74
3B	2,58	2,62		
4A	3,34	3,46	3,43	27,02
4B	3,26	3,39		
5A	3,42	3,54	3,43	27,02
5B	3,19	3,32		
6A	3,45	3,58	3,55	24,47
6B	3,39	3,52		
7A	3,01	3,12	3,17	32,55
7B	3,12	3,22		
8A	3,48	3,61	3,76	20,00
8B	3,77	3,92		
9A	2,71	2,81	2,76	41,28
9B	2,62	2,72		
10A	3,37	3,5	3,51	25,32
10B	3,4	3,53		
11A	3,35	3,48	3,48	25,96
11B	3,35	3,48		
12A	3,09	3,21	3,34	28,94
12B	3,35	3,47		
13A	3,53	3,66	3,58	23,83
13B	3,38	3,51		
14A	3,57	3,7	3,89	17,23
14B	3,93	4,08		
15A	3,24	3,35	3,36	28,51
15B	3,28	3,38		
16A	3,19	3,32	3,03	35,53
16B	2,64	2,73		
fA	4,93	5,12	4,70	
fB	4,12	4,27		
fC	4,45	4,62		
fD	4,62	4,79		

Nor: nobixina; B: teores de bixina das amostras; B_m: teores de bixina médio; φ: degradação de bixina; f: semente fresca; A, B, C, D: amostras de sementes de urucum.

ANEXO D

Teores de bixina e degradação do corante para a metodologia de superfícies de resposta desenvolvidos na segunda fase dos experimentos

Tabela D1. Análise de bixina e degradação do corante durante a segunda fase de experimentos

Amostras	m _i (g)	X (bs)	m _{ss} (g)	Ab (adim.)	Nor (%bs)	B (%bs)	B _m (%bs)	φ (%)
1A	24,9966	0,1584	21,0371	0,4339	2,9694	3,0793	3,00	5,15
1B	25,0025	0,1584	21,0421	0,4109	2,8113	2,9154		
2A	24,9978	0,1128	22,1780	0,3924	2,5472	2,6415	2,79	11,70
2B	25,0096	0,1128	22,1885	0,4368	2,8341	2,9390		
3A	25,009	0,1783	20,5499	0,2975	2,0842	2,1613	2,32	26,69
3B	25,0056	0,1783	20,5471	0,3402	2,3837	2,4719		
4A	25,007	0,077	23,0815	0,4253	2,6528	2,7509	2,56	18,93
4B	25,0065	0,077	23,0810	0,3668	2,2879	2,3726		
5A	24,9933	0,131	21,7192	0,3574	2,3691	2,4567	2,56	18,99
5B	24,9984	0,131	21,7236	0,3875	2,5681	2,6631		
6A	25,007	0,0922	22,7014	0,4482	2,8424	2,9476	3,00	5,21
6B	24,9972	0,0922	22,6925	0,4626	2,9349	3,0435		
7A	25,0097	0,1278	21,8135	0,3608	2,3813	2,4694	2,50	20,81
7B	24,9971	0,1278	21,8025	0,3703	2,4452	2,5357		
8A	25,0014	0,0651	23,3738	0,4292	2,6436	2,7414	2,76	12,56
8B	25,0059	0,0651	23,3780	0,4361	2,6856	2,7850		
9A	24,9984	0,1616	20,9587	0,3811	2,6178	2,7147	2,69	14,82
9B	25,0084	0,1616	20,9670	0,3748	2,5735	2,6687		
10A	25,0039	0,0675	23,3161	0,4048	2,4995	2,5920	2,67	15,41
10B	25,0027	0,0675	23,3150	0,4301	2,6558	2,7541		
11A	25,0009	0,111	22,2258	0,43	2,7853	2,8884	2,87	9,30
11B	24,9916	0,111	22,2175	0,4232	2,7423	2,8438		
12A	25,0013	0,1007	22,4837	0,376	2,4076	2,4967	2,54	19,56
12B	25,0055	0,1007	22,4874	0,3897	2,4949	2,5872		
13A	25,0022	0,1515	21,2144	0,3105	2,1072	2,1851	2,59	18,00
13B	24,9925	0,1515	21,2061	0,4257	2,8901	2,9970		
14A	25,0013	0,1076	22,3112	0,3616	2,3333	2,4196	2,50	20,77
14B	25,0016	0,1076	22,3114	0,3867	2,4952	2,5876		
15A	25,0061	0,1135	22,1679	0,3621	2,3516	2,4386	2,30	27,16
15B	25,0017	0,1135	22,1640	0,3214	2,0877	2,1649		
16A	24,9929	0,1127	22,1762	0,4402	2,8578	2,9635	2,90	8,11
16B	24,9942	0,1127	22,1774	0,4225	2,7427	2,8442		
17A	25,0022	0,1136	22,1620	0,4083	2,6524	2,7505	2,74	13,42
17B	25,0041	0,1136	22,1636	0,404	2,6243	2,7213		
18A	25,0033	0,1065	22,3404	0,3833	2,4701	2,5615	2,75	13,11
18B	25,0077	0,1065	22,3444	0,4385	2,8253	2,9298		
19A	24,9967	0,119	22,0221	0,4222	2,7601	2,8622	2,65	16,24
19B	25,0007	0,119	22,0256	0,3587	2,3446	2,4313		
20A	24,9998	0,1129	22,1773	0,437	2,8369	2,9418	2,84	10,16
20B	25,008	0,1129	22,1846	0,4066	2,6386	2,7363		
fA	25,0081	0,2163	19,5988	0,4023	2,9552	3,0645	3,16	
fB	25,0084	0,2163	19,5991	0,4269	3,1359	3,2519		

m_i: massa da amostra inicial; m_{ss}: massa de sementes secas; Ab: absorvância; Nor: nobixina; B: valores de bixina das amostras; B_m: valores de bixina médio; φ: degradação de bixina; f: semente fresca, A, B: amostras de sementes de urucum

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACHIOTE. [S.l.: s.n.], [19- -].

AGUERRE, R. J.; SUAREZ, C.; VIOLLAZ, P. Z. New BET type Multilayer Sorption Isotherms. Part II: Modelling Water Sorption in Foods. **Lebensm.-Wiss.u-Technol.**, v. 22, p. 192-195, 1989.

AKHNAZAROVA, S.; KAFAROV, V. **Experiment optimization in chemistry and chemical engineering**. Moscow: Mir, 1982.

ALENCAR, L. R. **Estudo da utilização do urucum, *Bixa orellana* L. em produtos cosméticos**. (Tese de Livre Docência). Niterói: Faculdade de Farmácia, UFF, 1975.

ALLINGER, N. L. *et al.* **Organic Chemistry**. New York: Worth Publishers, 1976.

ALMEIDA, P. T. S. Aplicações de corante natural de urucum em gelados comestíveis. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**, 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p. 257-262.

ALSINA, O. L. S.; ALMEIDA, M. M.; SILVA, O. S. Efeitos da presença de pó no comportamento de urucum em leite de jorro. In: **II Congresso Brasileiro de Corantes Naturais e II Simpósio Brasileiro de Urucum**. 1994, Belém. *Resumos...* Belém: EMBRAPA/CPATU, UFPA, SBCN, 1994.

ALSINA, O. L. S.; ARAGÃO, R. F.; MONTEIRO, L. F. Thin layer drying of mesquite beans. In: **Inter-American Drying Conference (IADC)**. 1997, Itú. *Proceedings...* Itú: DTF, FEQ, UNICAMP, 1997. p. 524-529.

ALVARADO, J. D.; MORENO, C. C. Physical properties of fruits III. Specific heat of pulp as a function of moisture content. **Lat. Am. J. Heat Mass Transf.** v.11, p.131-139, 1987.

ANDRADE, A. A. Estudo das matérias corantes de origem vegetal em uso entre os índios do Brasil das plantas de que procedem. **Archivos do Museo Nacional**. Rio de Janeiro, v. 28, p. 177-199, dez. 1926.

ANDRADE, G. M. S.; ROCHA Filho, G. N.; TAQUEDA, M. E. S. A statistical evaluation of the effects of process variables during catalytic hydrogenation of passion fruit (*passiflora edulis*) seed oil. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, mar., v. 15, n. 1 p.51-58.

- ANGELUCCI, E.; ARIMA, H. K.; KUMAGAI, E. A. Urucu I - dados preliminares sobre a composição química. **Coletânea do ITAL**, Campinas, v. 11, p. 89-96, 1980.
- AOAC. **Official Methods of Analysis**. 12. ed. Washington: Association of Official Analytical Chemists, 1975.
- ARAÚJO, D. M. Aplicações e Mercado do Urucum - Colorífico. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**, 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p. 235-241.
- ARAÚJO, D. M. Colorífico. **Revista Brasileira de Corantes Naturais**, v.1, n. 1, p. 240-241, 1992.
- ASAE. **Agricultural Engineering Yearbook**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1985.
- ASHRAE, **Psychrometrics: theory and practice**. Atlanta: American Society of Heating Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc., 1996.
- ASOTA, S. N. Mechanical seed quality of soyabeans related to drying parameters. **Journal of food engineering**, v. 31, p. 387-394, 1997.
- AYROSA, A. M. I. B.; PITOMBO, R. N. M. Comportamento Higroscópico da Carne Bovina Cozida Liofilizada. **Ciênc. Tecnol. Aliment.**, v. 16, n. 1, p. 12-17, 1996.
- BADGER, W. L.; BANCHERO, J. T. **Introducion a la ingenieria quimica**. Madrid: Ediciones del Castillo, 1964.
- BAHLKAR, S. V.; DUBASH P. J. Methods of extraction of annatto from the seeds of *Bixa orellana*. **Indian J. Dairy Sci.**, v. 36, n. 2, p. 157-161, 1983.
- BAKKER-ARKEMA, F. W. *et al.* **Grain dryer simulation**, Eastlansing: Michigam State University, ARS-USDA, 1974.
- BAKSHI, A. S.; SINGH, R. P. Drying characteristics of paraboiled rice. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.) **Drying'80**, New York, Hemisphere Publishing, v. 2, 1980.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G.; VEGA-MERCADO, H. **Dehydration of foods**. New York: Champman & Hall., 1996.

- BARONCELLI, F. *et al.* Evaluation of bixin thermal degradation during drying of annatto powder in spouted beds. In: **Inter-American Drying Conference (IADC)**. 1997, Itú. *Proceedings...* Itú: DTF/FEQ/UNICAMP, 1997. p. 158-164.
- BARRETO, D. W.; JAEGER, L. M.; MASSARANI, G. Produção de concentrado de bixina. In: **XVII Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XVII ENEMP)**. 1989, São Carlos. *Anais...* São Carlos: USFCar, 1989. p.175-184.
- BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S., BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**, Campinas: Editora da UNICAMP, 1995.
- BATISTA, C. L. L. C.; STRINGHETA, P. C.; GOMES, J. C. Estudo dos parâmetros que influenciam a extração de norbixina e a produção do corante hidrossolúvel em pó. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e II Simpósio Internacional de Urucum**, 1994, Belém. *Resumos...* Belém: EMBRAPA/CPATU, UFPA, SBCN, 1994.
- BECKER, H. A. A study of diffusion in solids of arbitrary shape, with application to the drying of the wheat kernel, **J. Appl. Polymer Sc.**, v. 1, p. 212-226, 1959.
- BLACKADDER, D. A.; NEDDERMAN, R. M. **A handbook of unit operations**, London: Academic press, 1982.
- BOQUET, R.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for Fitting water sorption Isotherms of Foods II: Evaluation of Various two-parameter Models, **Journal. Food Technology**, v. 13, p. 319-327, 1978.
- BOQUET, R.; CHIRIFE, J.; IGLESIAS, H. A. Equations for Fitting water sorption Isotherms of Foods III: Evaluation of Various three-parameter Models, **Journal. Food Technology**, v. 14, p. 527-534, 1979.
- BOX, G. E. P.; DRAPER, N. R. **Empirical model-building and response surfaces**. New York: Wiley, 1987.
- BOX, G. E. P.; HUNTER, W. G.; HUNTER, J. S. **Statistics for experimenters: an introduction to design, data analysis, and model building**. New York: Wiley, 1978.
- BOX, G. E. P.; WILSON, K. B. On the experimental attainment of optimal conditions. **J. Roy. Stat. Soc.**, Ser. B, v. 13, n. 1, 1951.

- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying cereal grains**. Westport: AVI, 1974.
- BRUIN, S.; LUYBEN, K. C. A. M. Drying of food materials: a review of recent developments. In: **Advances in drying**, New York, Hemisphere Publishing, 1980. v.1.
- BRUNAUER, S; EMMETT, P. H.; TELLER, E. Adsorption of Gases in Multimolecular Layers. **J. Am. Chem. Soc**, v. 60, p. 309-319, 1938.
- BRUNHARA, S. S.; BRUNS, R. E.; KIECKBUSCH, T. G. Otimização do processo de extração de colesterol do óleo de manteiga utilizando extrato de *Quillaja saponaria*. In: **11º Congresso Brasileiro de Engenharia Química**, 1996, Rio de Janeiro. *Anais...* Rio de Janeiro: ABEQ, 1996. p.791-796.
- CALADO, V. M. A. **Modelagem e simulação de secadores em leitos fixo e deslizante**. (Tese de Doutorado). Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1993.
- CALÇADA, L. A.; BISCAIA Jr, E. C.; MASSARANI, G. Secagem de material particulado: modelo a três fases. In: **XXIV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos (XXIV ENEMP)**. 1996, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: UFU, 1996. v. 1. p. 181-184.
- CANCELLA, J. F. Aplicação e mercado do urucum na indústria da carne. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p. 235-241.
- CANTO, W. L. *et al.* **Produção e mercado do urucum no Brasil**. Campinas: ITAL, 1991. (Estudos econômicos: alimentos processados, 28)
- CARPINETTI, L. C. R. **Planejamento de experimentos**. São Carlos: Departamento de Engenharia Mecânica, EESC/USP, 1996. v. 1. (Mimeografado).
- CARR, D. S.; HARRIS, B. L. Solutions for maintaining constant relative humidity. **Industrial and Engineering Chemistry**, sept. 1949.
- CARRERA, C. E. F. **Extracción por medio de agua y alcalis, de colorante a partir del achiote (*Bixa orellana*)**. (Tese de Ingeniero em Industrias Alimentarias). Lima: Departamento de Tecnologia de Alimentos y Productos, Universidad Nacional Agraria La Molina, 1977.

- CARVALHO, P. R. N. Extração do corante de urucum. In: — (Coord.) **Corantes Naturais para Alimentos**, Campinas, ITAL, 1989.
- CARVALHO, P. R. N. Extração e utilização do corante de urucum. In: SÃO JOSÉ, A. R. B. e REBOUÇAS, T. N. H. (Coords.) **A Cultura do Urucum no Brasil**, Vitória da Conquista, UESB, 1990. p. 69-76.
- CARVALHO, P. R. N. Carotenóides. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**, 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p.50-62.
- CARVALHO, P.R.N.; CARVALHO, C. R. L.; MANTOVANI, D. M. B. Estudo da composição de sementes, cachopas, folhas e galhos do urucum (*Bixa orellana* L.). In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**, 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p. 317.
- CASTRO, A. L. S.; FARIA, L. J. G.; PINHO, J. T. Secagem de sementes de urucu (*Bixa orellana* L.) através de microondas. In: **II Congresso Brasileiro de Corantes Naturais e II Simpósio Brasileiro de Urucum**, 1994, Belém. *Resumos ...* Belém: EMBRAPA/CPATU, UFPA, SBCN, set. 1994. p. 73.
- CASTRO, C. B.; CALZAVARA, B. B. G.; MOTA, M. C. G. **Urucuzeiro**. Belém: EMBRAPA/CPATU, mar. 1989. (Recomendações básicas, 13)
- CASTRO, A. L. S. **Desenvolvimento de um protótipo de secador por microondas**. (Dissertação de mestrado). Belém: DEE/UFPA, 1994.
- CASTRO, M. S. **Influência das variáveis operacionais no processo de secagem de urucum**. (Monografia de Especialização em Tecnologia de Alimentos). Belém: DEQ/UFPA, 1991.
- CASTRO, M. S.; FARIA, L. J. G. Secagem de urucum em leito fixo: influência das variáveis operacionais no teor de bixina. **Rev. Bras. Cor. Nat.**, v. 1, n. 1, p. 137-144, 1992.
- CAVALCANTI MATA, M. E. R.; MENGALLI, F. C. Bean Seeds Drying Simulation. In: **Inter-American Drying Conference (IADC)**. 1997, Itú. *Proceedings...* Itú: DTF/FEQ/UNICAMP, 1997. p. 508-519.
- CENKOWSKI, S.; JAYAS, D. S.; PABIS, S. Deep-bed grain dryng: a review of particular theories. **Drying Technology**, v. 11, n. 7, p. 1553-1581, 1993.

- CENKOWSKI, S.; MUIR, W. E.; JAYAS, D. Simulation of canola and Barley Drying in a deep bed. **Journal of Food Processes Engineering**, v. 12, p. 171-190, 1990.
- CHAO, R. R. *et al.* Supercritical CO₂ extraction of annatto (*Bixa orellana* L.) pigments and some characteristics of the color extracts. **Jornal of Food Science**, v. 56, n. 1, p. 80-83, 1991.
- CHEFTEL, J. C., CHEFTEL, H.; BESANÇON, P. **Introducción a la bioquímica y tecnología de los alimentos**. Zaragoza: Acribia, 1977.
- CHEREMISINOFF, N. P. **Applied fluid flow measurement: fundamentals and technology**. New York: Marcel Dekker, 1979.
- CHIRIFE, J. *et al.* Some features of parameter K of the GAB equation as applied to sorption isotherms of selected food materials. **Journal of food engineering**, v. 15, p. 75-82, 1992.
- CHUNG, D. S. e PFOST, H. B. Adsorption and desorption of water vapor by cereal grains and their products. **Trans. of ASAE**, v. 10, n. 4, p. 549-551, 1967.
- CHUNG, H. Y. *et al.* Preparation of sorbitol fatty acid polyesters, potencial fat substitutes: optimization of reaction conditions by response surface methodology. **JAOCS**, v. 73, n. 5, 1996.
- CIMA, E. **Os carotenóides extraídos de urucum, *Bixa orellana* L., e sua utilização em produtos dermatológicos**. São Lourenço:[19--] (Comunicados da Farmácia Dermatológica, 734).
- CISNEROS, R. Aplicação e mercado de corantes de urucum: massas alimentícias". In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**, 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p.245-247.
- CLARKE, G. M.; KEMPSON, R. E. **Introduction to the design and analysis of experiments**. London: Arnold, 1997.
- COCHRAN, W. G.; COX, G. M. **Experimental designs**, 2. ed. New York: Wiley, 1957.
- COLOURS for foods, 2. ed., Germany, **Dyestuff Commission - VCH**, 1988.
- COOK, E. M.; DUMONT, H. D. **Process drying practice**, New York: McGraw-Hill, 1991.

- CORREA, P. C. *et al.* Simulação de secagem de café em camadas espessas estacionárias. In: **IV Encontro Nacional de Secagem**. 1983, Viçosa. *Anais...* Viçosa: UFV, 1983.
- COSTA, C. M. L.; FARIA, L. J. G. Otimização do processo de extração química de óleos vegetais utilizando metodologia de superfícies de resposta. In: FARIA, L. J. G. e COSTA, C. M. L. (Coords.). **Tópicos especiais em tecnologia de produtos naturais**. Belém, UFPA/NUMA/POEMA, 1998. p. 220-241. (Série Poema, 7).
- COSTA, C. M. L.; FARIA, J. G.; MAIA, J. G. S. Thermodynamic behavior of long pepper (*Piper hispidinervium* C. DC.) during moisture desorption process. **Drying'98**, Greece, v. B, p. 1019-1026, 1998.
- COULSON, J. Synthetic organic colours for food. In: WALFORD, J. (Ed.) **Developments in food colours-1**. London, Applied Science Publishers, 1980. p. 47-94.
- COUTINHO, P. L. A. *et al.* Secagem de grãos em fluxos cruzados I. In: **X Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos (X ENEMP)**. 1982, São Carlos. *Anais...* São Carlos: UFSCar, 1982. v. 1, p. 206-221.
- DALPASQUALE, U. A.; PEREIRA, N. C. Secagem de soja com ar ambiente em clima tropical. In: **XIX Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos (XIX ENEMP)**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: UNICAMP, 1991. v. 2.
- DASCALESCU, A. **Le Séchage et ses applications industrielles**. Paris: Dunod, 1969.
- DAUD, W. R. W.; SARKER, M. N. H.; TALIB, M. Z. M. Characteristic drying curves and desorption isotherms of malaysian paddy. **Drying'96**, Poland, v. B, p. 897-904, 1996.
- DUARTE, F. R.; BOVI, O. A.; MAIA, N. B. Corantes: programa de pesquisa do Instituto Agrônômico de Campinas. In: **Corantes Naturais para Alimentos**, Campinas, ITAL, p. 46-53, 1989.
- ESPINOSA, R.; CUBILLO, L.; MARTÍNEZ, J. Desorption isotherms and drying kinetics of ground neem seeds wetted with organic solvents. **Drying'98**, Greece, v. C, p. 1687-1694, 1998.
- FALESI, I. C.; KATO, O. R. **A cultura do urucum no Norte do Brasil**. Belém: EMBRAPA/CPATU, 1992. (Documentos, 65).

- FALESI, I. C. *et al.* Influência da cor dos frutos do urucuzeiro nos teores de bixina nas sementes. In: **I Reunião Técnica - Científica sobre Melhoramento Genético do Urucuzeiro**. 1991, Belém. *Anais...* Belém: CPATU/EMBRAPA, SBCN, 1991. p. 27-31.
- FALESI, I. C. **Urucuzeiro: recomendações básicas para seu cultivo**. Belém: EMBRAPA/UEPAE, 1987. (Documentos, 3).
- FARIA, L. J. G. **Estudo experimental do secador pneumático vertical**. (Dissertação de mestrado). Campinas: FEC/UNICAMP, 1986.
- FARIA, L. J. G.; CASTRO, M. S. Cálculo numérico de propriedades termodinâmicas do ar úmido. In: **7º Encontro dos Profissionais de Química da Amazônia**. 1991, Belém. *Anais...* Belém: CRQ 6ª Região, 1991.
- FARIA, L. J. G; ROCHA, S. C. S. Análise do comportamento higroscópico na desorção de sementes de urucum (*Bixa Orellana* L.). In: **XXV Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (XXV ENEMP)**. 1997, São Carlos. *Anais...* São Carlos: USFCar, 1997. v. 2.
- FARIA, L. J. G.; ROCHA, S. C. S; COSTA, C. M. L. Determination and analyzis of desorption isotherms and isosteric heats of annatto (*Bixa orellana* L.) seeds. **Drying'98**. Greece, v. C. p. 2041-2048, 1998.
- FENNEMA, O. R. **Food Chemistry**, 2. ed., New York: Marcel Dekker, 1993.
- FERREIRA, W. A., FALESI, I. C. **Características nutricionais do fruto e teor de bixina em urucu (*Bixa orellana* L.)**. Belém: EMBRAPA-CPATU, 1989. (Boletim de Pesquisa, 97).
- FERREIRA, W. A.; FALESI, I. C. Teores de nutrientes e matéria seca na parte aérea e na raiz e percentagem de bixina de três tipos de urucueiro. In: **I Reunião Técnica - Científica sobre Melhoramento Genético do Urucuzeiro**. 1991, Belém. *Anais...* Belém: CPATU/EMBRAPA, SBCN, 1991.
- FORTES, M.; OKOS, M. R. Drying theories: their bases and limitations as applied to food and grains. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.) **Advances in drying**. New York, Hemisphere Publishing, 1980. v.1.
- FOUST, A. S. *et al.* **Principles of unit operations**. New York: Wiley, 1980.

- GAL, S. Recent advances in techniques for the determination of sorption isotherms. In: DUCKWORTH, R. B. (Ed.) **Water Relations of Foods**. London: Academic Press, 1975. p. 139.
- GEANKOPLIS, C. J. **Transport processes and unit operations**, 3. ed., New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- GHIRALDINI, J. E. Mercado de corantes naturais. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p.79-83.
- GHIRALDINI, J. E. Mercado e aplicações do urucum. In: **II Congresso Brasileiro de Corantes Naturais e II Simpósio Brasileiro de Urucum**. 1994, Belém. *Resumos...* Belém: EMBRAPA/CPATU, UFPA, SBCN, 1994.
- GHIRALDINI, J. E. Produção e comercialização interna de corantes naturais para alimentos. In: CARVALHO, P. R. N. (Coord.) **Corantes Naturais para Alimentos**, Campinas, ITAL, p. 21-25, 1989.
- GLÓRIA, M. B. A.; VALE, S. R. ; BOBBIO P. A., Effects of water activity on the stability of bixin in na annatto extract-microcrystalline cellulose model system. **Food Chemistry**. v.52, p.389-391, 1995.
- GOMES, F. P. **Curso de Estatística Experimental**. 13 ed. Piracicaba: Nobel, 1990.
- GRADIN, A. J. Aplicações no segmento de proteção, higiene e beleza. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p.271.
- GREENSPAN, L. Humidity fixed points of binary saturated aqueous solutions. **J. Res. of the Nat. Bur. of Stand. - A. Phys & Chem**. v. 81A, n.1, p. 89-96, jan./feb. 1977.
- GUERRERO, S.; ALZAMORA, S. M.; GERSCHENSON, L N. Optimization of a combined factors technology for preserving banana purée to minimize colour changes using the response surface methodology. **Journal of Food Engineering**. v. 28, p. 307-322, 1996.
- GUIMARÃES, I. S.; BARBOSA, A. L. S.; MASSARANI, G. Nota sobre a produção de concentrado de bixina em leite de jorro. **Revista Brasileira de Engenharia Química**. São Paulo, v. 12, n. 2, p. 22-23, abr. 1989.

- GUNTHER, P. A. S. *et al.* Secagem de pasta celulósica em leito fixo. In: **6º Congresso Brasileiro de Engenharia Química**. 1984, Campinas. *Anais...* Campinas: ABEQ, 1984. v.2.
- HINES, A. L.; MADDOX, R. N. **Mass transfer: fundamentals and applications**. New Jersey: Prentice-Hall, 1985.
- HUKILL, W. V. Grain drying. In: **Storage of cereal grains and their products**. St. Paul, American Association of Cereal Chemists, 1955.
- HUSSAIN, A. *et al.* Mathematical simulation of mass and heat transfer in high moisture foods. **Trans. of ASAE**, v. 15, p. 732, 1972.
- IBGE. **Censo Agropecuário-Pará (1995/1996)**. Instituto brasileiro de geografia e estatística, 1996.
- IGLESIAS, H. A.; CHIRIFE, J. **Handbook of food isotherms: water sorption parameters for food and foods components**. New York: Academic Press, 1982.
- INCROPERA, F. P.; DE WITT, D. P. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 3. ed., New York: Wiley, 1990.
- INGRAN, J. S.; FRANCIS, B. J. The annatto tree (*Bixa orellana* L.): a guide to its occurrence, cultivation, preparation and uses. **Trop. Sci.**, v. 11, n. 2, p. 97-102, 1969.
- ISLER, O. Introduction. In: — (Ed.) **Carotenoids**. Stuttgart: Birkhäuser verlag basel, 1971.
- INSTITUTO Adolfo lutz. **Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz: métodos químicos e físicos para análise de alimentos**. 3. ed. São Paulo: Governo do Estado de São Paulo, v. 1, 1985.
- JARDIM, D. C. P. Valores de referência. In: **I Seminário sobre Atividade de Água em Alimentos**. 1987, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1987.
- KAMEOKA, T. *et al.* Simulation of heat and mass transfer during through-drying process of rough rice. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.) **Drying of Solids**. New York, Wiley, 1986.

- KAREL, M. Water activity and food preservation. In: FENNEMA, O. R. (Ed.) **Principles of food sciences II: physical principles of food preservation**. New York, Marcel Dekker, 1975. p. 237-263. (Food science: a series of monographs, 4).
- KATO, O. R. *et al.* **Efeito da relação esterco/terriço no desenvolvimento de mudas de urucuzeiro**. Belém: EMBRAPA/CPATU, 1991. (Circular técnica, 59).
- KATO, O. R.; FALESI, I. C. Diagnóstico da cultura do urucum (*Bixa orellana*) no estado do Pará. **Rev. Bras. Cor. Nat.** v. 1, n. 1, p. 201-219, 1992.
- KEEY, R. B. **Drying: principles and practice**. Oxford: Pergamon Press, 1972.
- KEEY, R. B. **Introduction to Industrial drying operations**. Oxford: Pergamon Press, 1978.
- KEEY, R. B. **Drying of loose and particulate materials**. New York: Hemisphere Publishing, 1992.
- KHURI, A. I.; CORNELL, J. A. **Response surfaces: designs and analyses**. New York: Marcel Dekker, 1987.
- KISS, J. Urucum: fontes de cor. **Globo Rural**. n.151, p.31-34, mai. 1998.
- KITIC, D. *et al.* Theoretical prediction of water activity of standard salt solutions at various temperatures. **J. of Food Science**, v. 51, n. 4, p. 1037-1041, 1986.
- KNEULE, F. **El secado**. Bilbao: Urmo, 1976. Tomo I. (Enciclopedia de la Tecnología Química: Técnica de Procesos de las Industrias Químicas e Derivadas).
- LABUZA, T. P. Sorption Phenomena in Foods. **Food Technology**. v. 22, p. 263-272, 1968.
- LASSERAN, J.C. Princípios gerais de secagem. **Rev. Bras. Armaz.**, Viçosa, p. 23-28, 1978. (Centreinar, 3).
- LEWIS, G. N. *et al.* **Thermodynamics**, 2. ed., New York: McGraw-Hill, 1961.
- LIMA, A. C. C. **Análise experimental da secagem de feijão em leito fixo, leito de jorro e leito de jorro fluidizado**. (Dissertação de mestrado). Campinas: DTF/FEQ/UNICAMP, 1995.

- LIMA, L. C. F. Mercado de corantes naturais. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p. 199-205.
- LOPES-FILHO, J. F.; VIEIRA, J. A. G. Curvas de secagem e avaliação das propriedades físicas do cará. In: **XXIV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos (XXIV ENEMP)**. 1996, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: UFU, 1996. v. 1. p. 341-344.
- LÓPEZ, A. *et al.* Deep layer malt drying modelling. **Drying Technology**, v. 15, n. 5, p. 1499-1526, 1997.
- LORENA, W. Legislação de corantes naturais In: CARVALHO, P. R. N. (Coord.) **Corantes Naturais para Alimentos**, Campinas, ITAL, p. 21-25, 1989.
- LOURENÇO NETO, J. P. M. O uso de corante de urucum na fabricação de queijos. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p. 251-254.
- LUIKOV, A. V. **Heat and mass transfer in capillary-porous bodies**. London: Pergamon press, 1966.
- MADAMBA, P. S. Optimization of the drying process: an application to the drying of garlic. **Drying Technology**, v. 15, n. 1, p. 117-136, 1997.
- MANSON R. L., GUNST, R. F.; HESS, J. L. **Statistical design and analysis of experiments**. New York: Wiley, 1989.
- MAROULIS, Z. B.; TSAMI, E.; MARINOS-KOURIS, D. Application of the GAB model to the moisture sorption isotherms for dried fruits. **Journal of Food Engineering**. v. 7, p. 63-78, 1988.
- MASCARENHAS, J. M. O. *et al.* **O perfil das indústrias produtoras de corantes**. Viçosa: Núcleo de Corantes Naturais, UFV, 1997. (mimeografado)
- MASSARANI, G; PASSOS, M. L.; BARRETO, D. W. Production of annatto concentrates in spouted beds. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.70, oct. 1992.
- MATOS, R. A.; ANADÓN, C. E. L. Evaluacion de modelos matematicos de isotemas de sorcion en oca (*Oxalis tuberosa mal*), olluco (*Ullucus tuberosus loz*) y algunos derivados. In: **I**

- Congresso Ibero Americano de Ingenieria de Alimentos**, 1995, Campinas. *Anais...* Campinas, nov, 1995. p. 260-273.
- McCABE, W. L.; SMITH, J. C.; HARRIOTT, P. **Unit operations of chemical engennering**, 5. ed., New York: McGraw-Hill, 1993.
- McKEOWN, G. G. Paper chromatography of bixin and related compounds. **Journal of the AOAC**. v. 44, n. 2, p.347-351, 1961.
- McKEOWN, G. G.; MARK, E. The composition of oil-soluble annatto food colors. **Journal of the AOAC**. v. 45, n. 3, p. 761-766, 1962.
- McKEOWN, G. G. Composition of oil-soluble annatto food colors. II. Ternal degradation of bixina. **Journal of the AOAC**. v. 46, n. 5, p.791-796, 1963.
- McKEOWN, G. G. Composition of oil-soluble annatto food colors. III Structure of the yellow pigment formed by the thermal degradation of bixina. **Journal of the AOAC**. v. 48, n. 4, p. 835-837, 1965.
- MEIRELES, M. A. A. (Org.) **I Encontro sobre Extração Supercrítica de Produtos Naturais**. 1994, Campinas. *Anais...* Campinas: DEA/FEA/UNICAMP, 1994.
- MEIRELES, M. A. A. (Org.) **II Encontro sobre Extração Supercrítica de Produtos Naturais**. 1997, Campinas. *Resumos...* Campinas: DEA/FEA/UNICAMP, 1997.
- MELLO, A. A. A.; LIMA, L. C. F. A situação da cultura do urucum no Brasil e perspectivas. In: SÃO JOSE, A. R. e REBOUÇAS, T. N. H. (Coords.) **A Cultura do Urucum no Brasil**, Vitória da Conquista, UESB, 1990. p. 9-19.
- MENEZES, J. F.; PASSOS, M. L. Determinação dos parâmetros de secagem da semente de urucum. In: **1º Congresso Brasileiro de Engenharia Química: Iniciação Científica**. 1995, São Carlos. *Anais...* São Carlos: UFSCar, 1995.
- MENON, A. S.; MUJUMDAR, A. S. Drying of solids: principles, classification and selection of dryers. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.) **Handbook of industrial drying**. New York, Marcel Dekker, 1987. p. 3-46.
- MONTGOMERY, D. C. **Design and anlysis of experiments**. 3. ed., New York: Wiley, 1991.

- MONTGOMERY, D. C. **Introduction to Statistical quality control**. 3. ed., New York: Wiley, 1996.
- MUJUMDAR, A. S. Preface. In: — (Ed.) **Handbook of Industrial Drying**. New York, Marcel Dekker, 1987. p. v - vi.
- MUJUMDAR, A. S. Innovative industrial drying technologies of the future In: — (Ed.) **Drying of solids**. New York, International Science Publisher, 1992. p. 3-20.
- MUNSON, B. R.; YOUNG, D. F.; OKIISHI, T. H. **Fundamentos da mecânica dos fluidos**. São Paulo: Edgard Blücher, 1997. v.1.
- MURILLO, R. O. El secado del achiote (*Bixa orellana* L.). In: **Seminário sobre el Cultivo del Achiote y Perspectivas Futuras em Costa Rica**. 1983, Tumialba. *Anais...* Tumialba: CATIE, 1983. p. 31-42.
- MYHARA, R.; TAYLOR, M.; AL-BULUSHI, I. The Moisture Sorption Isotherms of Omani Dates. In: **10th Internacional drying symposium**. 1996, Poland. *Proceedings...* Poland, 1996, v. B, p. 989-996.
- NAJAR, S. V.; BOBBIO, F. O.; BOBBIO, P. A. Effects of light, air, anti-oxidants and pro-oxidants on annatto extracts (*Bixa orellana*). **Food Chemistry**. v. 29, p. 283-289, 1988.
- NAKAMURA, M. Application of annatto colors. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p. 217-224.
- NAZARÉ, R. F. R. *et al.* Estudo para identificação de vegetais produtores de corantes, ocorrentes na flora amazônica. In: **Geração de Tecnologia Agroindustrial para o Desenvolvimento do Trópico Úmido**. Belém: EMBRAPA/CPATU, JICA, 1996 (Documentos, 85).
- NAZÁRIO, G. Legislação de corantes naturais. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p. 37-42.
- NGODDY, P. O.; BAKKER-ARKEMA, F. W. A theory of sorption hysteresis in biological materials. **J. Agric. Engen. Res.** v. 20, p. 109, 1975.

- NONHEBEL, G. M. A.; MOSS, A. A. H. **Drying of solids in the chemical industry**. London: Butterworth, 1971.
- NOTHENBERG, M. Tendência Ecológica Pede Insumo Natural, **Química e Derivados**, n. 350, p. 25-29, 1997.
- OHASHI *et al.* **O urucu, uma opção para o estado do Pará**. Belém: Sagri, 1992. (mimeografado)
- OKADA, M. *et al.* Fundamentos sobre a secagem de sólidos. In: TRAVAGLINI, D. A. (Coord.) **Desidratação de frutas e hortaliças: manual técnico**. Campinas: ITAL, 1987. p. 1-38.
- OKOS, M. R. *et al.* Food dehydration. In: HELDMAN, D. R.; LUND, D. B. (Eds.) **Handbook of food Engineering**. New York, Marcel Dekker, 1992. p. 437-562.
- OLIVEIRA, J. M. D. **Aplicação do corante extraído do jenipapo em revestimento orgânico de superfície**. (Dissertação de mestrado). São Paulo: Universidade Mackenzie, 1997.
- OLIVEIRA, V. P. **Agroindustrial biotropical Ltda.** (comunicação pessoal), ago. 1998.
- OLIVEIRA, V. P. Seleção em plantas de urucu In: **I Reunião Técnico-Científica sobre Melhoramento Genético do Urucuzeiro**. 1991, Belém. *Anais...* Belém: CPATU/EMBRAPA, SBCN, 1991. p. 19-22.
- OLIVEIRA, V. P.; GHIRALDINI, J. E. Colheita do urucum. In: SÃO JOSÉ, A. R.; REBOUÇAS, T. N. H. (Coords.) **A Cultura do Urucum no Brasil**, Vitória da Conquista, UESB, 1990. p. 64-68.
- OROZCO, R. A. Processo químico para obter colorante del achiote. **Agroindustria**. Costa Rica, v. 2, n. 12, p. 55, 1973.
- PAGE, G. E. **Factors Influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thi-layer**. (M. Sc. Thesis). Indiana: Purdue University, 1949.
- PAKOWSKI, Z.; MUJUMDAR, A. S. Basic process calculations in drying. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.) **Handbook of Industrial drying**. New York, Marcel Dekker, 1987. p. 83-129.
- PALIPANE, K. B.; DRISCOLL, R. H. Moisture sorption characteristics of in-shell macadamia nuts. **Journal of Food Engineering**. v. 18, p. 63-76. 1992.

- PARACAMPO, A. J.S.; BENTES, M. H.; SERRUYA, H. Estudo comparativo de métodos de extração de urucum (*Bixa orellana* L.). In: **II Congresso Brasileiro de Corantes Naturais e II Simpósio Brasileiro de Urucum**. 1994, Belém. *Resumos...* Belém: EMBRAPA/CPATU, UFPA, SBCN, 1994.
- PARK, K. J. *et al.* Desorption Isotherms of Red Ginger (Sho-Ga): Experimental Determination and Evaluation of Mathematical Models. In: **10th Internacional drying symposium**. 1996, Poland. *Proceedings...* Poland, 1996, v. B, p. 1023-1028.
- PARK, K. J.; BROD, F. P. R. Comparative study of grated coconut (*Cocos nucifera*) drying using vertical and horizontal dryers. In: **Inter-American Drying Conference (IADC)**. 1997, Itú. *Proceedings...* Itú: DTF/FEQ/UNICAMP, 1997. v. B, p. 469-475.
- PARRY, J. L. Mathematical modelling and computer simulation of heat and massa transfer in agricultural grain drying: a review. **J. Agric. Engng. Res.** v. 32, n. 85, p. 1-29, 1985.
- PASSOS, M. L. *et al.* Spouted bed units for annatto powder production. In: **Inter-American Drying Conference (IADC)**. 1997, Itú. *Proceedings...* Itú: DTF/FEQ/UNICAMP, 1997. v. A, p. 181-188.
- PEÇANHA, R. P.; MASSARANI, G. Dimensão característica e forma de partículas. In: **XIV Encontro Sobre Escoamento em Meios Porosos (XIV ENEMP)**. 1986, Campinas. *Anais...* Campinas: FEQ/UNICAMP, 1986. p. 302-312.
- PENA, R. S. **Comportamento higroscópico do pó de guaraná (*Paullinia cupana*) obtido em secador por nebulização**. (Dissertação de mestrado). Belém: DEQ/UFPA, 1994.
- PENA, R. S.; RIBEIRO, C. C.; GRANDI, J. G. Levantamento de isoterma de adsorção de umidade a 15°C, do guaraná (*Paullinia cupana*) em pó, obtido por atomização em spray dryer. **Anais Assoc. Bras. Quim.** v. 44, n. 1, p. 1-6, 1995.
- PENNA Jr. W., MENDÉZ, A. L. C.; FARIA, L. J. G. Análise da influência das variáveis operacionais no processo de extração de corante de sementes de urucum (*Bixa orellana* L.): projeto fatorial de experimentos. In: **II Congresso Brasileiro de Corantes Naturais e II Simpósio Brasileiro de Urucum**. 1994, Belém. *Resumos...* Belém: EMBRAPA/CPATU, UFPA, SBCN, 1994.

- PENNA Jr. W.; FARIA, L. J. G. Extração de corantes de urucum (*Bixa orellana* L.) com solvente orgânico. In: **III Encontro científico e de Desenvolvimento Científico e Tecnológico da Amazônia e Centro-Oeste**. 1995, Belém. *Anais...* Belém: UFPA, 1995.
- PENNA Jr. W.; SILVA, K. S. M.; FARIA, L. J. G. Fotodegradação do corante de urucum (*Bixa orellana* L.). In: **XXXV Congresso Brasileiro de Química**. 1995, Salvador. *Resumos...* Salvador: ABQ, 1995.
- PENNA, Jr., W. **Estudo comparativo da secagem do urucum (*Bixa orellana* L.)**. (Relatório Final de Iniciação Científica-CNPq). Belém: DEQ/UFPA, 1993.
- PENNA, Jr., W. **Algoritmos para o cálculo numérico das propriedades termodinâmicas do ar úmido**. (Trabalho de conclusão de curso). Belém: DEQ/UFPA, 1994.
- PEREIRA, J. A. M.; QUEIROZ, D. M. **Higroscopia**, Viçosa: CENTREINAR, UFV, [19--]. (Centreinar, 3)
- PERRY, R. H.; CHILTON, C. H. (Eds.) **Chemical engineer's handbook**. 5. ed., New York: McGraw-Hill, 1973.
- PIMENTEL, F. A. **Avaliação de métodos de obtenção e da estabilidade de pigmentos de sementes de urucum (*Bixa orellana* L.)**. (Dissertação de mestrado). Viçosa: Departamento de Tecnologia de Sementes/UFV, 1995.
- PINHEIRO, N. F. L. L.; SILVA, G. F.; ALSINA, O. L. S. Secagem de urucum em leite de jorro. In: **XVIII Encontro sobre Escoamento em Meios Porosos**. 1990, Nova Friburgo. *Anais...* Nova Friburgo: UFRJ, 1990. p. 389-399.
- PINHO, J. T., FARIA, L. J. G.; CASTRO, A. L. S. Estudo da secagem de produtos agrícolas através de microondas. In: **II Encontro Científico e de Desenvolvimento Tecnológico da Amazônia e Centro-Oeste**. 1992. Manaus. *Anais...* Manaus, 1992.
- PINTO, A. C. O Brasil dos viajantes e dos exploradores e a química de produtos naturais brasileira, **Química Nova**, v. 18, n. 8, 1995.
- PONTE, M. X.; SILVA, K. S. M. PENNA Jr. W. Estudo da fotodegradação da bixina em sementes de urucum (*Bixa orellana* L.). In: **III Congresso Brasileiro de Corantes Naturais e III Simpósio Brasileiro de Urucum**. 1996, Porto Seguro. *Anais...* Porto Seguro: UESB, SBCN, 1996. (no prelo).

- PÓVOA, M. E. B. Extração do corante de urucum (*Bixa orellana* L.) com diversos solventes. **Rev. Bras. Cor. Nat.**, v. 1, n. 1, p. 153-157, 1992.
- PRENTICE-HERNANDEZ, C.; RUSIG, O. Extrato de urucum (*Bixa orellana* L.) obtido utilizando álcool etílico como solvente. **Arq. Biol. Tecnol.** v. 35, n. 1, p. 63-74, mar. 1992.
- PRESTON, H. D.; RICKARD, M. D. Extraction and chemistry of annatto. **Food Chemistry**, Great Britain, v. 5 p. 47-56, 1980.
- RAO, K. S. Histeresis in Sorption. **Journal of Physical Chemistry**, v. 45, p. 522, 1941.
- RAOUZEOS, G. S.; SARAVACOS, G. D. Statistical analysis of drying experiments. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.) **Drying'84**. New York, Hemispheri Publishing, 1984. p. 414-424.
- RASERA, I. T. Anteprojeto da Norma de Identidade, Qualidade, Apresentação e Embalagem do Urucum para Comercialização Interna. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991.
- REITH, J. F.; GIELEN, W. Properties of bixin and norbixin and the composition of annatto extracts. **Journal of Food Science**. v. 36, p. 861-864, 1971.
- RIBEIRO, J. W.; LOBO, P. D. C. Drying in capillary porous media. In: COTTA, R. M. (Ed.) **The integral transform method in thermal and fluids science and engineering**. New York, Bergell house, 1998. p. 125-143.
- ROA, G.; MACEDO, I. C. Grain drying in stationary bins with solar heated air. **Sol. Energ**, v. 18, p. 445, 1976.
- ROCHA, S. C. S.; FARIA, L. J. G. A Psychometer for measurement of air humidity at high temperatures. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.) **Drying'92**, New York, Elsevier Science Publishers, v. B, p. 1768-1779, 1992.
- ROCKLAND, L. B. Saturated salt solutions for static control of relative humidity between 5 and 40°C. **Analytical Chemistry**. v. 32, n. 10, p. 1375-1376, 1960.

- ROUSEFF, R. L. High performance liquid chromatographic separation and spectral characterization of the pigments in turmeric and annatto. **Journal of Food Science**. v. 53, n. 6, p. 1823-1826, 1988.
- RUMSEY, T. Modeling moisture variability in a fixed-bed drying, **Drying Technology**, v. 9, n. 1, p. 61-78, 1991.
- SABBAH, M. A. *et al.* Simulation studies of reserved direction air-flow drying method for soybean seed in a fixed bed. **Trans. of ASAE**, v. 22, n. 5, p. 1162-1166, 1979.
- SÁNCHEZ, E. S. *et al.* Water Retention in Potato: equilibrium moisture content and isosteric heats. In: **10th Internacional drying symposium**. 1996, Poland. *Proceedings...* Poland, 1996, v. B, p.1061-1068.
- SÃO JOSÉ, A. R. A cultura do urucum no nordeste do Brasil. **Rev. Bras. Cor. Nat.** v. 1, n. 1, p. 220-222, 1992.
- SÃO JOSÉ, A. R.; SOUZA, I. V. B. **Mercado do urucum no Brasil e Perspectivas**. Vitória da Conquista: Sociedade Brasileira de Corantes Naturais, 1991. (Comunicado Técnico, 01/91)
- SATO, G. S. *et al.* Tendência de mercado para corantes na indústria de alimentos. **Agricultura em São Paulo**, v. 39, supl. 1, p. 1-50, 1992.
- SAÚDE. **Os caçadores de colesterol**. São Paulo: Editora Azul. Out. 1997. p. 30-31.
- SAUREL, R. *et al.* Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple I. Fresh plant tissue. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 29, p. 531-542, 1994a.
- SAUREL, R. *et al.* Mass transfer phenomena during osmotic dehydration of apple II. Frozen plant tissue. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 29, p. 543-550, 1994b.
- SBCN. Mercado do urucum. **Informativo corantes naturais**. Ano I, n. 1, abr., 1996.
- SCOTTER, M. J. Characterization of the coloured thermal degradation products of bixin from annatto and a revised mechanism for their formation. **Food Chemistry** 53; 117-185. 1995.
- SHERWOOD, T. K. The Drying of solids I. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 21, n. 1, p. 12-16, Jan. 1929a.

- SHERWOOD, T. K. The Drying of solids II. **Industrial and Engineering Chemistry**, v. 22, n. 10, p. 976-980, Oct. 1929b.
- SILVA, G. F. **Processamento de urucum em leite de jorro**. (Dissertação de mestrado). Campina Grande: DEQ/UFPB, 1991.
- SILVA, J. S.; LACERDA FILHO, A. F. **Construção e operação de secador de grãos**. Viçosa: UFV, 1990. (Boletim de Extensão, 34).
- SILVA, G. F.; ALSINA, O. L. S. Secagem de urucum em leite de jorro: estudo do modelo difusional. In: **XXI Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos (XXI ENEMP)**. 1994, Ouro Preto. *Anais...* Ouro Preto: DEQ/UFMG, 1994. v. 2.
- SILVA, G. F.; ALSINA, O. L. S. Secagem de urucum em leite de jorro: Estudo dos efeitos das variáveis operacionais. In: **XIX Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos (XIX ENEMP)**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: FEQ/UNICAMP, 1991. v. 1.
- SILVA, G. F.; CABRAL, F. A. Estimativa das propriedades de carotenoides por métodos de contribuição de grupos. **Ciênc. Tecnol. Aliment.** v. 17, n. 4, p. 456-460, dez. 1997.
- SILVA, G. F.; MARIZ, T. F.; ALSINA, O. L. S. Estudo comparativo de secagem de urucum em leite de jorro e leite fixo. In: **XX Encontro Nacional sobre Escoamento em Meios Porosos (XX ENEMP)**. 1992, São Carlos. *Anais...* São Carlos: UFSCar, 1992. v. 2.
- SILVEIRA, A. H. Colorau. **Seiva**, Viçosa, v. 3, n. 10, p. 4-7, 1942.
- SIMPSON, K. L. Chemical changes in natural foods pigments. In: RICHARDSON, T.; FINLEY, J. W. (Eds.) **Chemical changes in food during processing**, New York, AVI, 1985.
- SINGH, B. P. N.; NARAIN, M.; SRIVASTAVA, R. Thin-layer drying of paddy. In: MUJUMDAR, A. S. (Ed.) **Drying of Solids: recent international developments**. New York: Wiley, 1986. p. 109-113.
- SINÍCIO, R. Determinação de equação de secagem em camadas espessas e estacionárias. In: **IV Encontro Nacional de Secagem**. 1983, Viçosa. *Anais...* Viçosa:UFV, 1983.
- SOBRAL, P. J. A. **Secagem de sangue bovino incorporado à proteína texturizada de soja**. (Dissertação de mestrado). Campinas: FEA/UNICAMP, 1987.

- SODHA, M. S. *et al.* **Solar Crop Drying**. Boca Raton: CRC Press, 1987. v. 1
- SOKHANSANJ, S. Grain drying simulation with respect to energy conservation and grain quality. In: MUJUMDAR., A. S. (Ed.) **Advanced in Drying**. 1984. v. 3. p. 121-180.
- SOUZA, F. R. S. *et al.* Avaliação preliminar de progênies de urucuzeiro na região do nodereste paraense. In: **I Reunião Técnica-Científica sobre Melhoramento Genético do Urucuzeiro**. 1991, Belém. *Anais...* Belém: CPATU/EMBRAPA, SBCN, 1991. p. 13-18.
- SOUZA, U. F.; ARNOSTI Jr., S.; SARTORI, D. J. M. Estudo em camada fina e leito fixo para sementes de *Brachiaria brizantha*. In: **XXIV Congresso brasileiro de sistemas particulados (XXIV ENEMP)**. 1996, Uberlândia. *Anais...* Uberlândia: UFU. 1996. v. 1. p. 329-334.
- STRUMILLO, C. ; KUDRA, T. **Drying: principles, applications and design**. New York: Gordon and Breach Science Publishers, 1986. (Topics in chemical engineering, v. 3)
- SUÁREZ, C.; AGUERRE, R.; VIOLLAZ, P. E. Analysis of the desorption isotherms of rough rice, *Lebensm.-Wiss.u-Technol.*, v. 16, p. 176-179, 1983
- TAQUEDA, M. E. S.; COSTA, C. M. L.; FARIA, L. J. G. Planejamento e análise estatística de experimentos aplicados ao beneficiamento de produtos naturais. In: FARIA, L. J. G. e COSTA, C. M. L. (Coords.). **Tópicos especiais em tecnologia de produtos naturais**. Belém, UFPA/NUMA/POEMA, 1998. p. 205-219. (Série Poema, 7).
- TAKAHASHI, M. Y. Extratos de urucum. In: — (Coord.) **Monografia de Corantes Naturais para fins Alimentícios: padrões de identidade e qualidade**. 2. ed., São Paulo, 1987. p. 22-29.
- TECHASENA, O.; LEBERT, A.; BIMBENET, J. J. Simulation of deep bed drying of carrots. **Journal of Food Engineering**. v. 16, p. 267-281, 1992.
- TEIXEIRA NETO, R. O. Levantamento e aplicação de isoterma. In: **I Seminário sobre Atividade de Água em Alimentos**. 1987, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1987.
- TELIS-ROMERO, J.; GABAS, A. L.; RIZZATTO, M. L. Efeito de pré-tratamentos químicos na taxa de secagem de uva Itália e rubi em leito fixo. In: **XXIII Congresso brasileiro de sistemas particulados (XXIII ENEMP)**. 1995, Maringá. *Anais...* Maringá: UEM. 1995. p. 453-463.

- THOMPSON, T. L. *et al.* Mathematical simulation of corn drying - a new model. **Trans. of ASAE**, v. 11, n. 4, p. 582-586, 1968.
- TOLEDO, R. T. **Fundamentals of Food Process Engineering**. 2. ed. New York: Van nostrand reinhold, 1991.
- TREYBAL, R. E. **Mass transfer operations**. 3. ed., New York: McGraw-Hill, 1980.
- TSAMI, E. Net Isosteric Heat of Sorption in Dried Fruits. **Journal of Food Engineering**. v. 14, p. 327-335. 1991.
- VAN DEN BERG, C.; BRUIN, S. Water activity and its estimation in food systems: theoretical aspects. In: ROCKLAND, L. B.; STEWART, G. F. (Eds.) **Water activity: influences on food quality**. New York: Academic Press, 1981. p. 1-61.
- VAN NESS, H. C.; ABBOT, M. M. **Classical themodynamics of non-electrolyte solutions with applications to phase equilibria**. New York: McGraw-Hill, 1982.
- VAN'T LAND, C. M. **Industrial drying equipment: selection and application**. New York: Marcel Dekker, 1991.
- WEINTZ, H. J. Cores naturais. In: **Seminário internacional: plantas amazônicas e seu aproveitamento tecnológico**. 1993, Belém. *Anais...* Belém: POEMA/UFPA, DAIMLER-BENZ, 1993.
- WERKEMA, M. C. C.; AGUIAR, S. **Otimização estatística de processos: como determinar a condição de operação de um processo que leva ao alcance de uma meta de melhoria**. Belo Horizonte: EEUFMG, 1996. (TQC, v. 9).
- WEXLER, A.; BROMBACHER, W. G. **Methods of measuring humidity and testing hygrometers**. United States Departament of Commerce, 1951. (NBS Circular, 512)
- WEXLER, A.; HASEGAWA, S. Relative humidity - temperature range of 0 to 50 °C. **J. Res. NBS**, v. 53, p. 19, 1954.
- WOLF, W. *et al.* The Water-vapour Sorption Isotherms of Microcrystalline Cellulose and Purified Potato Starch. Results of a Collaborative Study. **Journal of Food Engineering**, v. 7, p. 79-81. 1984.

- YABIKU, H. Y.; TAKAHAHI, M. Y. Avaliação dos métodos analíticos para a determinação de bixina em grãos de urucum e suas correlações. In: **II Seminário de Corantes Naturais para Alimentos e I Simpósio Internacional de Urucum**. 1991, Campinas. *Anais...* Campinas: ITAL, 1991. p. 275-279.
- YOSHIDA, C. M. P. **Cinética de secagem do milho superdoce**. (Dissertação de mestrado). Campinas: DEA/FEA/UNICAMP, 1997.
- YOUNG, J. F. Humidity control in the laboratory using salt solutions - a review. **J. Appl. Chem.** v. 17, p. 241-245, 1967.
- ZAKHIA, N. BOHUON, P.; COLLIGNAN, A. Modelling of fish drying kinetics using a combination of surface response methodology and diffusional models. **Drying Technology**, v. 13, n. 8/9, p. 2083-2096, 1995.
- ZAMBINI, C. Q.; ATUI, M. B.; ALVES, H. I. Detecção de fraudes em açafrão e colorau. **Ciên. Tec. Alim.** v. 15, n. 2, p. 124-127, jul./dez. 1995.