



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE ENGENHARIA AGRÍCOLA
COPEAG - COORD. DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENG. AGRÍCOLA



PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

Dissertação de Mestrado

SECAGEM SOLAR E CONVENCIONAL DE
GRÃOS RESIDUAIS DE URUCUM

DIVYGO DA COSTA SANTOS

Biblioteca UFCG
SMBC_CDSA
CAMPUS DE SUMÉ
Reg.10531/12

Campina Grande
Paraíba



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AGRÍCOLA**



DISSERTAÇÃO

**ÁREA DE CONCENTRAÇÃO EM PROCESSAMENTO
E ARMAZENAMENTO DE PRODUTOS AGRÍCOLAS**

**SECAGEM SOLAR E CONVENCIONAL DE GRÃOS RESIDUAIS
DE URUCUM**

DYEGO DA COSTA SANTOS

**CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO - 2012**

SECAGEM SOLAR E CONVENCIONAL DE GRÃOS RESIDUAIS DE URUCUM

DYEGO DA COSTA SANTOS

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Campina Grande como parte dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola.

ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Processamento e Armazenamento de Produtos Agrícolas

**ORIENTADORES: Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz
Prof^a. Dr^a. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo**

**CAMPINA GRANDE - PB
FEVEREIRO - 2012**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL DA UFCG

S237s Santos, Dyego da Costa
Secagem solar e convencional de grãos residuais de urucum / Dyego da
Costa Santos. – Campina Grande, 2012.
197 f.: il. ; color.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal
de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais.

Orientadores: Prof. Dr. Alexandre José de Melo Queiroz, Prof.^a Dr.^a.
Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo

Referências.

1. *Bixa orellana* L. 2. Corante Natural. 3. Secador Solar. 4. Secador
Noturno. I. Título.

CDU 633.863 (043)



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
COORDENAÇÃO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA

CTRN

PARECER FINAL DO JULGAMENTO DA DISSERTAÇÃO

DYEGO DA COSTA SANTOS

SECAGEM SOLAR E CONVENCIONAL DE GRÃOS RESIDUAIS DE URUCUM

BANCA EXAMINADORA

PARECER

Alexandre J M Queiroz

Dr. Alexandre José de Melo Queiroz
Orientador (UAFA/CTRN/UFCC)

APROVADO

Rossana Mª F de Figueirêdo

Dr. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo
Orientadora (UAFA/CTRN/UFCC)

Aprovado

Josivanda P. Gomes

Dr. Josivanda Palmeira Gomes
Examinadora (UAFA/CTRN/UFCC)

APROVADO

Ana Regina Campos

Dr. Ana Regina Nascimento Campos
Examinadora (CES/UFCC)

Aprovado



FEVEREIRO - 2012

UFCC - BIBLIOTECA

Ao *Espírito Santo* que, com gemidos
inexprimíveis, intercede por mim junto a
Deus...

Dedico / Ofereço

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida, cuidado e proteção.

Às minhas mães, Irenilda da Costa Santos e Maria Eunice da Costa Santos, pelo apoio e cuidado.

A meus tios e tias, Lúcia (Nenê), Eurenice (Lili), Eurinete (Lilete), Fátima (Fata), Reginaldo (Chaado), Diassis (Tita) e Francisco (Chico), pela confiança.

A meu padrasto, Jairo Ferreira dos Anjos, pelo apoio e expectativa.

A meu irmão, Maycon da Costa Santos, pela amizade.

A Marco Ortelli, por ter contribuído, mesmo indiretamente, na realização deste trabalho.

A todos os meus primos e primas e demais familiares, por estarem sempre presentes.

Aos meus orientadores, Dr. Alexandre José de Melo Queiroz e Dra. Rossana Maria Feitosa de Figueirêdo, pelos conselhos e confiança.

Às professoras Dra. Josivanda Palmeira Gomes e Dra. Ana Regina Nascimento Campos, pela participação na banca examinadora e pelas sugestões para melhoria deste trabalho.

A todos os professores e funcionários do LAPP/UAEA/UFMG, pelos ensinamentos e colaboração, em especial à professora Ana Paula Trindade Rocha.

À indústria alimentícia Maratá, pela doação dos grãos residuais de urucum.

À CAPES, pela concessão da bolsa de estudo.

Ao amigo Emanuel Neto Alves de Oliveira, sem o qual não haveria concluído este trabalho.

Ao amigo Joabis Nobre Martins, pela colaboração e disponibilidade.

A todos aqueles que, direta ou indiretamente, me ajudaram na realização deste estudo, em especial a Esther Albuquerque, Juliana Brito, Arali Oliveira, Regina Garcia, Emmanuel Fabiano, Matheus Medeiros, Silvana Oliveira e Rayane Souza.

A todos, o meu muito obrigado!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	iv
LISTA DE TABELAS.....	x
RESUMO.....	xvi
ABSTRACT	xvii
1 – INTRODUÇÃO	1
1.1 – Objetivo geral	3
1.1.1 – Objetivos específicos.....	3
2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
2.1 – O urucum	4
2.1.1 – Importância econômica.....	5
2.1.2 – Processamento e extração dos pigmentos.....	6
2.1.3 – Grãos residuais de urucum	8
2.2 – Secagem.....	8
2.2.1 – Métodos de secagem.....	11
2.2.1.1 – Secagem natural.....	12
2.2.1.2 – Secagem em terreiro	13
2.2.1.3 – Secagem com energia solar	14
2.2.1.4 – Secagem estacionária.....	16
2.2.1.5 – Secagem contínua	17
2.2.1.6 – Secagem intermitente	17
2.2.2 – Teorias de secagem.....	18
2.2.2.1 – Teoria da Difusão Líquida.....	18
2.2.2.2 – Teoria de Luikov	20
2.2.2.3 – Teoria da Condensação-Evaporação	20
2.2.2.4 – Teoria Capilar	21
2.2.2.5 – Krisher-Berger & Pei.....	21
2.2.2.6 - Teoria de Philip & De Vries.....	21
2.2.3 – Cinética de secagem	22
2.2.3.1 – Modelos matemáticos para secagem	22
2.2.3.1.1 – Modelo Aproximação da Difusão	23
2.2.3.1.2 – Modelo de Dois Termos	24
2.2.3.1.3 – Modelo de Midilli.....	25



2.2.3.1.4 – Modelo de Page	26
2.2.3.1.2 – Modelo de Thompson.....	28
3 - MATERIAL E MÉTODOS.....	30
3.1 - Local de realização da pesquisa	30
3.2 – Matéria-prima	30
3.2.1 – Característica da matéria-prima.....	30
3.3 – Processamento dos grãos residuais de urucum.....	31
3.3.1 – Processamento dos grãos residuais de urucum com óleo	31
3.3.2 – Processamento dos grãos residuais de urucum sem óleo	32
3.3.3 – Preparo das amostras	33
3.4 – Secadores	35
3.4.1 - Secador solar para uso diurno	35
3.4.2 - Secador Acumulador de Calor para Secagem no Período Noturno (ACSN)...	35
3.4.2.1 – Descrição das partes do secador ACSN	36
3.4.2.1.1 – Coletores solares.....	36
3.4.2.1.2 – Reservatório térmico	37
3.4.2.1.3 – Câmara de secagem	37
3.4.2.1.4 – Bomba d’água e painel fotovoltaico.....	38
3.4.2.1.5 – Montagem e funcionamento do secador solar ACSN	39
3.5 - Secagens	40
3.5.1 – Secagem convencional	40
3.5.2 - Secagem com energia solar	41
3.5.2.1 – Secagem por exposição direta ao sol.....	42
3.5.2.2 – Secagem por exposição direta ao sol combinada com o secador ACSN..	43
3.5.2.2.1 – Secagem por exposição direta ao sol durante o dia e à noite em abrigo (testemunha)	43
3.5.2.3 – Secagem em secador ACSN no período noturno	43
3.5.2.3.1 – Secagem em secador ACSN no período noturno (testemunha)	43
3.5.2.4 - Secagem em secador solar no período diurno.....	44
3.5.2.5 – Secagem em secador ACSN durante a noite e durante o dia secagem em secador solar	44
3.5.2.5.1 – Abrigo durante a noite e durante o dia secagem em secador solar (testemunha)	44
3.6 – Cinética de secagem	44

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
4.1 – Secagem convencional em estufa	46
4.1.1 – Secagem convencional dos grãos residuais de urucum com óleo (GCO)	46
4.1.2 – Secagem convencional dos grãos residuais de urucum sem óleo (GSO)	51
4.1.3 – Secagem convencional da farinha de grãos residuais de urucum com óleo (FCO)	57
4.1.4 – Secagem convencional da farinha dos grãos residuais de urucum sem óleo (FSO)	62
4.2 – Secagem solar	67
4.2.1 – Secagem por exposição direta ao sol	67
4.2.2 – Secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN ou com abrigo no período noturno	73
4.2.3 – Secagem em secador ACSN	83
4.2.4 – Secagem em secador solar	89
4.2.5 – Secagem em secador ACSN ou abrigo no período noturno combinado com secagem em secador solar	96
4.3 – Comparações entre as secagens em estufa e solar	104
4.3.1 – Secagens em estufa e por exposição direta ao sol	104
4.3.2 – Secagens em estufa e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN	106
4.3.3 – Secagens em estufa e em secador ACSN	108
4.3.4 – Secagens em estufa e em secador solar	109
4.3.5 – Secagens em estufa e em secador ACSN combinada com secagem em secador solar	112
5 – CONCLUSÕES.....	114
6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	115
APÊNDICE A	139
APÊNDICE B.....	153
APÊNDICE C	162
APÊNDICE D	181
APÊNDICE E.....	194

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Frutos e sementes de urucum.....	4
Figura 3.1 – Grãos residuais de urucum.....	30
Figura 3.2 – Fluxograma do processamento dos grãos residuais de urucum com óleo.....	32
Figura 3.3 – Fluxograma do processamento dos grãos residuais de urucum sem óleo.....	33
Figura 3.4 – Amostras de grãos e farinhas de grãos residuais de urucum destinados às secagens solar e convencional.....	34
Figura 3.5 – Secador solar de uso diurno.....	35
Figura 3.6 – Coletores solares.....	36
Figura 3.7 – Reservatório térmico.....	37
Figura 3.8 – Câmara de secagem.....	38
Figura 3.9 – Bomba d'água e painel fotovoltaico.....	39
Figura 3.10 – Sistema completo do secador ACSN.....	40
Figura 4.1 – Curvas de secagem convencional de GCO.....	46
Figura 4.2 – Modelo de Dois Termos ajustado à cinética de secagem convencional do GCO.....	51
Figura 4.3 – Curvas de secagem convencional do GSO.....	52
Figura 4.4 – Modelo de Dois Termos ajustado à cinética de secagem convencional do GSO.....	57
Figura 4.5 – Curvas de secagem convencional da FCO.....	58
Figura 4.6 – Modelo de Dois Termos ajustado à cinética de secagem convencional da FCO.....	62
Figura 4.7 – Curvas de secagem convencional da FSO.....	63
Figura 4.8 – Modelo de Dois Termos ajustado à cinética de secagem convencional da FSO.....	67
Figura 4.9 – Secagem da FCO por exposição direta ao sol.....	70
Figura 4.10 – Secagem da FSO por exposição direta ao sol.....	71
Figura 4.11 – Secagem dos GCO por exposição direta ao sol combinada com secador ACSN ou abrigo no período noturno (testemunha).....	77
Figura 4.12 – Secagem dos GSO por exposição direta ao sol combinada com secador ACSN ou abrigo no período noturno (testemunha).....	79
Figura 4.13 – Secagem da FCO em secador ACSN ou colocada em abrigo no período noturno (testemunha).....	86

Figura 4.14 – Secagem da FSO em secador ACSN e colocada em abrigo no período noturno (testemunha)	87
Figura 4.15 – Secagem dos GCO em secador solar	92
Figura 4.16 – Secagem da FCO em secador solar.....	93
Figura 4.17 – Secagem dos GSO em secador solar.....	94
Figura 4.18 – Secagem da FSO em secador solar	95
Figura 4.19 – Secagem dos GCO em secador ACSN ou colocados em abrigo no período noturno (testemunha) combinada com secagem em secador solar.....	100
Figura 4.20 – Secagem dos GSO em secador ACSN ou colocados em abrigo no período noturno (testemunha) combinada com secagem em secador solar.....	101
Figura 4.21 – Curvas de secagem das FCO em estufa e por exposição direta ao sol.....	104
Figura 4.22 – Curvas de secagem das FSO em estufa e por exposição direta ao sol.....	106
Figura 4.23 – Curvas de secagem dos GCO em estufa e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN	107
Figura 4.24 – Curvas de secagem dos GSO em estufa e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN	107
Figura 4.25 – Curvas de secagem das FCO em estufa e em secador ACSN.....	108
Figura 4.26 – Curvas de secagem das FSO em estufa e em secador ACSN	109
Figura 4.27 – Curvas de secagem dos GCO em estufa e em secador solar.....	110
Figura 4.28 – Curvas de secagem dos GSO em estufa e em secador solar	110
Figura 4.29 – Curvas de secagem das FCO em estufa e em secador solar.....	111
Figura 4.30 – Curvas de secagem das FSO em estufa e em secador solar	111
Figura 4.31 – Curvas de secagem dos GCO em estufa e em secador ACSN combinada com secagem em secador solar.....	112
Figura 4.32 – Curvas de secagem dos GSO em estufa e em secador ACSN combinada com secagem em secador solar.....	113
Figura B.1 – Modelo de Aproximação da Difusão ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GCO.....	154
Figura B.2 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GCO	154
Figura B.3 – Modelo de Page ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GCO	155
Figura B.4 – Modelo de Thompson ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GCO.....	155

Figura B.5 – Modelo de Aproximação da Difusão ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GSO	156
Figura B.6 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GSO	156
Figura B.7 – Modelo de Page ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GSO	157
Figura B.8 – Modelo de Thompson ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GSO	157
Figura B.9 – Modelo de Aproximação da Difusão ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FCO.....	158
Figura B.10 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FCO	158
Figura B.11 – Modelo de Page ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FCO	159
Figura B.12 – Modelo de Thompson ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FCO	159
Figura B.13 – Modelo de Aproximação da Difusão ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FSO	160
Figura B.14 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FSO	160
Figura B.15 – Modelo de Page ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FSO.....	161
Figura B.16 – Modelo de Thompson ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FSO.....	161
Figura D.1 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol da amostra FCO.....	182
Figura D.2 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol da amostra FSO	182
Figura D.3 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GCO	183



Figura D.4 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GCO (Testemunha 1º dia)	183
Figura D.5 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GCO (Testemunha 2º dia)	184
Figura D.6 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GSO.....	184
Figura D.7 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GSO (Testemunha 1º dia)	185
Figura D.8 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GSO (Testemunha 2º dia)	185
Figura D.9 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador ACSN da amostra FCO	186
Figura D.10 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador ACSN da amostra FCO (Testemunha)	186
Figura D.11 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador ACSN da amostra FSO.....	187
Figura D.12 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador ACSN da amostra FSO (Testemunha).....	187
Figura D.13 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador solar da amostra GCO.....	188

Figura D.14 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador solar da amostra FCO	188
Figura D.15 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador solar da amostra GSO	189
Figura D.16 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador solar da amostra FSO.....	189
Figura D.17 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à primeira etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GCO (noite)	190
Figura D.18 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à segunda etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GCO (dia). 190	
Figura D.19 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à primeira etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GCO (Testemunha noite).....	191
Figura D.20 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à segunda etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GCO (Testemunha dia)	191
Figura D.21 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à primeira etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GSO (noite)	192
Figura D.22 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à segunda etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GSO (dia). 192	
Figura D.23 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à primeira etapa da cinética de secagem em secador	

ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GSO
(Testemunha noite)..... 193

Figura D.24 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e
Thompson ajustados à segunda etapa da cinética de secagem em secador
ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GSO
(Testemunha dia) 193

LISTA DE TABELAS

- Tabela 4.1** - Parâmetros dos modelos Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da secagem em estufa de GCO 49
- Tabela 4.2** - Parâmetros dos modelos Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da secagem em estufa de GSO 55
- Tabela 4.3** - Parâmetros dos modelos Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da secagem em estufa das FCO 60
- Tabela 4.4** - Parâmetros dos modelos Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da secagem em estufa da FSO 65
- Tabela 4.5** - Parâmetros dos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem das FCO e FSO por exposição direta ao sol 69
- Tabela 4.6** – Teores de água inicial e final das amostras FCO e FSO desidratadas por exposição direta ao sol..... 72
- Tabela 4.7** – Parâmetros de diferentes modelos com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem dos GCO e GSO por exposição direta ao sol, combinada com secagem no secador ACSN ou colocados em abrigo no laboratório..... 74
- Tabela 4.8** – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na primeira etapa de secagem: amostras desidratadas por exposição direta ao sol 80
- Tabela 4.9** – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na segunda etapa de secagem: amostras desidratadas em secador ACSN e colocadas em abrigo no período noturno (testemunha)..... 81
- Tabela 4.10** – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na terceira etapa de secagem: amostras desidratadas por exposição direta ao sol 82
- Tabela 4.11** – Teores de água inicial e final das amostras GSO na quarta etapa de secagem: amostras desidratadas em secador ACSN e colocadas em abrigo no período noturno (testemunha)..... 83

Tabela 4.12 – Parâmetros dos diferentes modelos ajustados com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem das FCO e FSO em secador ACSN.....	84
Tabela 4.13 – Teores de água inicial e final das amostras FCO e FSO desidratadas em secador ACSN e colocadas em abrigo no período noturno (testemunha) ...	88
Tabela 4.14 – Parâmetros dos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem das amostras FCO, GCO, FSO e GSO em secador solar.....	90
Tabela 4.15 – Teores de água inicial e final das amostras GCO, FCO, GSO e FSO desidratadas em secador solar.....	95
Tabela 4.16 – Parâmetros dos diferentes modelos ajustados com seus R^2 e DQM da cinética de secagem dos GCO e GSO em secador ACSN ou colocados em abrigo no laboratório combinado com secagem em secador solar (T= testemunha).....	98
Tabela 4.17 – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na primeira etapa de secagem: amostras desidratadas em secador ACSN e colocadas em abrigo no período noturno (testemunha).....	102
Tabela 4.18 – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na segunda etapa de secagem: amostras desidratadas em secador solar	103
Tabela A.1 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em estufa na temperatura de 40 °C.....	140
Tabela A.2 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em estufa na temperatura de 50 °C.....	141
Tabela A.3 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em estufa na temperatura de 60 °C.....	142
Tabela A.4 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em estufa na temperatura de 70 °C.....	143
Tabela A.5 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em estufa na temperatura de 40 °C	144
Tabela A.6 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em estufa na temperatura de 50 °C	145
Tabela A.7 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em estufa na temperatura de 60 °C	146

Tabela A.8 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em estufa na temperatura de 70 °C	147
Tabela A.9 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em estufa na temperatura de 40 °C.....	148
Tabela A.10 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em estufa na temperatura de 50 °C.....	149
Tabela A.11 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em estufa na temperatura de 60 °C.....	149
Tabela A.12 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em estufa na temperatura de 70 °C.....	150
Tabela A.13 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em estufa na temperatura de 40 °C	150
Tabela A.14 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em estufa na temperatura de 50 °C	151
Tabela A.15 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em estufa na temperatura de 60 °C	151
Tabela A.16 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em estufa na temperatura de 70 °C	152
Tabela C.1 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO por exposição direta ao sol	163
Tabela C.2 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO por exposição direta ao sol.....	163
Tabela C.3 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN	164
Tabela C.4 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN (testemunha 1° dia).....	165
Tabela C.5 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN (testemunha 2° dia).....	166
Tabela C.6 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN	167

Tabela C.7 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN (testemunha 1º dia)	168
Tabela C.8 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN (testemunha 2º dia)	169
Tabela C.9 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em secador ACSN	169
Tabela C.10 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em secador ACSN (testemunha)	170
Tabela C.11 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em secador ACSN.....	170
Tabela C.12 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em secador ACSN (testemunha).....	171
Tabela C.13 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em secador solar	171
Tabela C.14 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos FCO em secador solar	171
Tabela C.15 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador solar.....	172
Tabela C.16 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos FSO em secador solar	172
Tabela C.17 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (período noturno).....	173
Tabela C.18 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (período diurno).....	174
Tabela C.19 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (testemunha período noturno).....	175
Tabela C.20 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (testemunha período diurno).....	176

Tabela C.21 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (período noturno).....	177
Tabela C.22 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (período diurno).....	178
Tabela C.23 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (testemunha período noturno).....	179
Tabela C.24 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (testemunha período diurno).....	180
Tabela E.1 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem das FCO e FSO por exposição direta ao sol.....	195
Tabela E.2 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem dos GCO e GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN.....	195
Tabela E.3 – Valores médios de temperatura e umidade relativa no interior do secador de uso noturno durante a secagem dos GCO e GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN	195
Tabela E.4 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem das FCO e FSO em secador ACSN.....	196
Tabela E.5 – Valores médios de temperatura e umidade relativa no interior do secador de uso noturno durante as secagens das FCO e FSO em secador ACSN.....	196
Tabela E.6 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem dos GCO, FCO, GSO e FSO em secador solar	196
Tabela E.7 – Valores médios de temperatura no interior do secador de uso diurno durante a secagem dos GCO, FCO, GSO e FSO em secador solar	196
Tabela E.8 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem dos GCO e GSO em secador solar ACSN combinada com secagem em secador ACSN.....	197
Tabela E.9 – Valores médios de temperatura no interior do secador de uso noturno durante a secagem dos GCO e GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar	197

Tabela E.10 – Valores médios de temperatura no interior do secador de uso diurno durante a secagem dos GCO e GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar 197

RESUMO

Os grãos residuais de urucum constituem o subproduto da extração dos pigmentos bixina e norbixina na indústria de alimentos. Atualmente, a maioria desses grãos vem sendo descartada, o que gera a necessidade de aproveitamento desses resíduos, inclusive com estudos no sentido de incorporá-los à alimentação humana. Ante o exposto, objetivou-se secar grãos residuais de urucum e farinhas de grãos residuais de urucum por meio convencional (secagem em estufa) e utilizando energia solar. Os grãos e as farinhas foram secados em estufa com circulação forçada de ar, nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C. Nas secagens por meio de energia solar foram utilizados dois secadores, um para secagem diurna, denominado secador solar, e o outro para secagem noturna, denominado Secador Acumulador de Calor para Secagem Noturna (ACSN). O secador ACSN é composto por dois circuitos de circulação de água independentes. No período diurno funcionava o circuito coletor solar/reservatório, o qual era interrompido durante a noite e aberto o circuito reservatório/câmara de secagem. Na secagem por exposição direta ao sol as amostras eram colocadas em bandejas em base de concreto recoberta com lona plástica (polietileno) preta. Para a representação da cinética de secagem dos grãos e das farinhas de urucum desidratados em estufa, secadores solar e noturno e por exposição direta ao sol foram empregados os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson. Nas secagens convencionais, o aumento da temperatura de desidratação promoveu reduções nos tempos de secagem. A utilização do secador ACSN no período noturno evitou a absorção de água pelas amostras e promoveu sua secagem, o que possibilitou a obtenção de produto com menor teor de água. Para as amostras cuja secagem se iniciou no período noturno, a utilização do secador ACSN no período noturno possibilitou maiores taxas de secagem, em comparação com a testemunha, com obtenção de produto com menor teor de água. As secagens solares apresentaram tempos de desidratação menores que as observadas nas secagens convencionais. Os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson propiciaram bons ajustes aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras de grãos e farinhas de grãos residuais de urucum com e sem óleo pelos métodos convencional e solar.

Palavras-chave: *Bixa orellana* L., corante natural, secador solar, secador noturno

ABSTRACT

Residual annatto seeds are a subproduct derived from the extraction of bixin and norbixin pigments in the food industry. The fact that most of these seeds are typically discarded demonstrates the need for making better use of these residues, through studies aimed at incorporating them into the human diet. The objective of this study was to dry residual annatto seeds and annatto seed powder using conventional means (oven-drying) and solar energy. The seeds and powder were oven dried with forced air circulation at temperatures of 40, 50, 60 and 70 °C. Two dryers were used in the solar energy method, one for daytime drying, called a solar dryer, and the other for nighttime drying, denominated a heat accumulator for nighttime drying (ACSN). The ACSN dryer is composed of two independent water circulation circuits. The solar collector circuit/reservoir was in operation in the daytime. This was interrupted during the night, whereupon the reservoir circuit/drying chamber was opened. In solar drying, samples were collected in concrete trays covered with a black plastic tarp (polyethylene). Diffusion approximation, two term, Midilli, Page and Thompson mathematical models were used to represent the drying kinetics of annatto seeds and powder dried in an oven and solar and nighttime dryers, as well as by direct exposure to the sun. In conventional drying, an increase in temperature promoted reductions in drying time. Using the ACSN dryer at night avoided water absorption by the samples, promoting their drying and resulting in a product with lower water content. For samples dried at night, employing the ACSN dryer led to greater drying rates compared to the control sample, generating a product with lower water content. Solar dryers exhibited shorter drying times than those observed in conventional dryers. Diffusion Approximation, Two Term, Midilli, Page and Thompson models showed a good fit to experimental data derived from the drying kinetics of annatto seed samples and residual powder, with and without oil, using conventional and solar methods.

Keywords: *Bixa orellana* L., natural coloring, solar dryer, nighttime dryer

1 - INTRODUÇÃO

O urucum é um arbusto da família Bixaceae e atende pelo nome botânico de *Bixa orellana* L; pode atingir de 2 a 5 metros de altura, dependendo da região ecológica e da idade da planta. Os frutos consistem de uma cápsula ou cachopa coberta de espinhos flexíveis; em se interior normalmente estão divididas em duas valvas cerca de 10 a 50 pequenas sementes, quase do tamanho das sementes de uva (VERÍSSIMO et al., 2008). É originário da América do Sul e encontrado em outras regiões de clima tropical da América Central, África e Ásia (BARBOSA & MERCADANTE, 2008).

De acordo com VERÍSSIMO et al. (2008), o urucueiro é cultivado em quase todos os estados brasileiros, principalmente nos estados da Paraíba, Piauí, Bahia, Pará, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Goiás, Mato Grosso e Paraná.

Segundo GOMES & BRUNO (1992), a cultura do urucum vem-se expandindo no Estado da Paraíba face às perspectivas favoráveis de aumentar o uso industrial e as exportações de seus grãos. De acordo com ANSELMO et al. (2008) foi no Brejo Paraibano que a sua exploração comercial ocorreu com maior intensidade. Em 2001 o Estado da Paraíba implementou o Programa de Revitalização do urucuzeiro, obtendo um aumento de área plantada superior a 70% (SILVA et al., 2008a).

Do pericarpo seco das sementes de urucum obtém-se corante natural muito usado em vários setores industriais (SILVA et al., 2010). Segundo ALVES et al. (2008), o principal pigmento do urucum é o carotenoide bixina, que representa mais de 80% dos carotenoides totais. De acordo com SILVA et al. (2008a), entre os corantes naturais o urucum é a principal fonte de obtenção dos pigmentos bixina e norbixina.

Há uma série de indústrias de urucum instaladas por todo o Brasil, sobretudo nas regiões Sul e Sudeste, as quais produzem diferentes fórmulas do corante (CORLETT et al., 2007), cujo resíduo agroindustrial constituído pelas sementes é o subproduto da extração da bixina e norbixina.

Após a extração industrial dos pigmentos naturais do urucum gera-se um subproduto, o resíduo dos grãos processados, o qual tem sido descartado na maioria dos casos, sem nenhuma função na alimentação, adubação orgânica ou reciclagem de nutrientes (UTIYAMA, 2001). SILVA et al. (2006) relatam que o resíduo agroindustrial da semente de urucum apresenta forte coloração vermelha e uma camada externa de óleo de soja, usado como veículo para diluição da bixina.

RÊGO et al. (2010) mencionaram que aproximadamente 2.500 t de subproduto do urucum são obtidos no Brasil a cada ano, em especial na região Nordeste, onde quase 97% do subproduto não são aproveitados. Esse quadro reflete a quantidade de resíduos que pode ser produzida pelos complexos agroindustriais. Segundo UTIYAMA (2001), esses resíduos processados se constituem em subprodutos de baixo custo. O aproveitamento desses materiais ganha maior importância no Brasil visto que, conforme CATANEO et al. (2008), por se tratar de um país de grande atividade agrícola, é um dos que mais produzem resíduos agroindustriais e a busca de alternativas para utilização da matéria orgânica gerada vem crescendo em vários centros de pesquisa.

Alguns trabalhos têm sido realizados com a utilização dos grãos residuais de urucum na alimentação animal (UTIYAMA, 2001; SILVA et al., 2005; GONÇALVES et al., 2006; SILVA et al., 2006; CLEMENTINO, 2008; RÊGO et al., 2010). Segundo HARDER et al. (2010), a incorporação de urucum *in natura* e de seus resíduos industriais na alimentação de animais ruminantes e não ruminantes vem sendo estudada desde 1955. Observa-se, então, a possibilidade de se direcionar pesquisas com vistas ao melhor aproveitamento desses resíduos, inclusive com estudos no sentido de incorporá-lo na alimentação humana.

COSTA (2008) ressalta que a secagem é um dos processos industriais mais utilizados na conservação de produtos agropecuários, sem que percam sensivelmente suas propriedades biológicas. Seu objetivo é reduzir o teor de água para uma melhor conservação das propriedades físicas e fisiológicas, durante o armazenamento (GUEDES & FARIA, 2000) e processamento (COSTA, 2008). Neste contexto, a utilização de energia solar para a secagem de sementes e outros produtos vegetais apresenta-se como alternativa (DUZAT et al., 2002).

Na literatura são referenciadas algumas pesquisas sobre secagem de sementes *in natura* de urucum (FARIA, 1998; GUEDES & FARIA, 2000; FARIA & ROCHA, 2000; UTIYAMA, 2001); no entanto, pouco se sabe sobre secagem de grãos residuais do urucuzeiro, tanto por meio de energia solar quanto convencional. Isso reforça a necessidade de realização de estudos abordando o uso de energia solar e convencional para a secagem de grãos residuais de urucum.

1.1 – Objetivo geral

Secar grãos residuais de urucum (*Bixa orellana* L.) e farinha de grãos residuais de urucum por meio convencional (secagem em estufa) e utilizando energia solar.

1.1.1 – Objetivos específicos

- Secar grãos residuais de urucum e farinha de grãos residuais de urucum pelo método convencional (secagem em estufa) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C;
- Secar grãos residuais de urucum e farinha de grãos residuais de urucum sob exposição direta ao sol e em secador solar;
- Secar farinhas de grãos residuais de urucum em secador acumulador de calor para secagem noturna (ACSN);
- Combinar as secagens dos grãos residuais de urucum por exposição direta ao sol com as secagens noturnas em secador ACSN;
- Combinar as secagens dos grãos de urucum em secador ACSN com secagem em secador solar;
- Comparar as secagens dos grãos residuais de urucum e das farinhas de grãos residuais de urucum em estufa com as secagens utilizando energia solar;
- Ajustar os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da secagem dos grãos residuais de urucum e das farinhas dos grãos residuais de urucum.

2 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 – O urucum

O urucuzeiro (*Bixa orellana* L.) é uma planta perene, característica da floresta amazônica de várzea, pertencente à família Bixaceae (LIMA et al., 2007a). É um arbusto com altura entre 2,0 a 4,0 m, podendo atingir até 6,0 m, dependendo das condições de clima e da idade da planta. Seus frutos são cápsulas ovoides “cachopas”, cobertas por espinhos flexíveis em cujo interior se encontram de 30 a 50 sementes (Figura 2.1). Cresce em altitudes de até 1000 m; contudo, desenvolve-se melhor em zonas relativamente baixas, de 100 a 500 m, suportando temperaturas de 24 a 35 °C (OLIVEIRA, 2005).



Figura 2.1 – Frutos e sementes de urucum

O urucuzeiro é uma planta originária da América do Sul, mais especificamente da região amazônica. Seu nome popular tem origem na palavra tupi “uru-ku”, que significa “vermelho” (CORLETT et al., 2007). Apresenta vida útil de aproximadamente 30 anos, uma produção média de 3 kg de grão/planta/ano, variando de 1 a 12 kg de grãos/planta/ano (CANTO et al., 1991). Desenvolve-se muito bem na região Nordeste, mostrando capacidade de adaptação e de desenvolvimento nas condições ambientais das regiões áridas e semiáridas. É adaptada ao sol pleno, clima úmido, solos férteis e ricos em matéria orgânica; porém se ressentem de geadas. Produz flores rosadas com muitos estames (MESQUITA, 2008).

Na região Nordeste a primeira colheita, mais significativa, ocorre nos meses de junho e julho, enquanto a segunda, conhecida como safrinha, realiza-se no período de novembro a dezembro (ANSELMO et al., 2008).

Na colheita são usadas tesouras de poda ou podões que, cortando os galhos, retiram a inflorescência, contendo entre 15 e 20 cachopas; após colhidas, são levadas em balaio para terreiros ou depósitos, em que, após a secagem, são imediatamente beneficiadas em máquinas fabricadas para tal fim. Essas máquinas separam as cachopas das sementes e as classificam, para posteriormente serem embaladas em sacos de polietileno ou de estopa, onde se conservam durante mais de cinco anos em perfeitas condições e sem qualquer tratamento fitossanitário. A máquina descachopadeira, movida a motor de 5 Hp, por exemplo, pode beneficiar até 200 sacos por dia (ALVES, 2005). Segundo autor, o objetivo final da cultura do urucuzeiro é a extração dos corantes bixina e norbixina.

De acordo com CARVALHO & HEIN (1989), o teor de pigmentos presentes nas sementes de urucum varia de acordo com a variedade da cultura, do solo, do clima e dos tratos culturais, podendo-se encontrar sementes com menos de 1% e até com mais de 4% de bixina. A norbixina, também proveniente das sementes de urucum, tem poder de coloração similar à bixina e é o pigmento natural mais usado no Brasil, cerca de 80% do consumo. A conversão da bixina em norbixina é feita pela diluição da bixina em meio alcalino que, após a separação e secagem, é comercializada na forma de pó ou pasta.

2.1.1 – Importância econômica

O urucuzeiro tem grande importância para o desenvolvimento socioeconômico da Região Nordeste do Brasil, pois 78,2% do seu cultivo provêm da agricultura familiar, sob condições de sequeiro, com custos reduzidos de implantação se comparados com outras culturas (ANSELMO et al., 2008).

O principal produto é a semente que apresenta cobertura rica em bixina, um corante do grupo dos carotenoides, de grande interesse nos mercados nacional e internacional. O interesse, principalmente na área alimentícia, deve-se às exigências do mercado consumidor em substituir os corantes artificiais pelos naturais (CORLETT et al., 2007).

O cultivo do urucum destina-se exclusivamente à comercialização do corante presente na semente, podendo chegar, no máximo, a 4,5% em massa, nas sementes de boa procedência. A produção de pigmento, contudo, deixa a semente como subproduto (OLIVEIRA, 2005). O urucum é um dos corantes naturais mais utilizados e o Brasil é um

dos maiores produtores e exportadores de suas sementes (MERCADANTE & PFANDER, 2001).

Nos últimos anos o potencial do mercado internacional do urucum teve um grande impulso. Como o produto natural é substituto para corantes sintéticos, considerados cancerígenos, a proibição ao uso desses aditivos nos Estados Unidos, Japão e alguns países da Europa, fez com que o urucuzeiro ganhasse relevância nas regiões produtoras (OLIVEIRA, 2005).

O urucum é um dos principais corantes naturais utilizados mundialmente (SOUZA & SÃO JOSÉ, 2009), ressaltando-se sua aplicação na indústria alimentícia em queijos, manteigas, margarinas, salsichas, sorvetes, refrigerantes, carnes, etc. Além desta aplicabilidade na indústria de alimentos, vários outros segmentos o utilizam, como no tingimento de tecidos, para dar cores aos vernizes, em rações para aves, na medicina e em cosméticos (ALVES et al., 2008).

O urucum é empregado com frequência como condimento na culinária asiática, africana e européia. Foram os espanhóis os responsáveis pela expansão do consumo deste produto ao redor do mundo, o que levou a um aumento de sua produção já no século XIX (OLIVEIRA, 2005).

2.1.2 – Processamento e extração dos pigmentos

A tendência demonstrada pelo mercado globalizado em restringir o uso de corantes sintéticos em alimentos e as restrições impostas pela Organização Mundial de Saúde, têm levado a indústria e pesquisadores ao interesse por materiais naturais, em particular pelos vegetais, que são usados como corantes. O Brasil é considerado o terceiro mais importante exportador mundial de sementes de urucum, depois do Peru e Kênia; contudo, a qualidade do produto brasileiro no mercado internacional é considerada baixa (ALVES et al., 2008).

As sementes dessa planta se destacam como significativa matéria-prima para a obtenção dos corantes bixina, norbixina e norbixato, em razão das suas características de produto natural, não tóxico, elevado poder tintorial e amplo espectro de cores, utilizados para coloração de produtos alimentícios, cosméticos, farmacêuticos e têxteis, além de serem usados também como condimentos culinários (colorau) (ANSELMO et al., 2008).

O principal pigmento do urucum é o carotenoide bixina que representa mais de 80% dos carotenoides totais presentes na semente. Sua tonalidade varia entre o amarelo e o vermelho. É estável em alimentos processados na presença de agentes redutores e

oxidantes, a bixina supera algumas das desvantagens dos corantes sintéticos do tipo azo, que têm elevada reatividade em relação aos agentes oxidantes (cloro, hipoclorito) e redutores (dióxido de enxofre, ácidos ascórbico e cítrico e alguns flavorizantes). Esta reatividade dos corantes artificiais causa descoloração nos alimentos industrializados nos quais eles estão presentes (ALVES, 2005).

A bixina é lipossolúvel (SANTANA et al., 2008), solúvel em clorofórmio, acetona, éter etílico, etanol etc. e insolúvel em água (ALVES, 2005) e a norbixina é hidrossolúvel, insolúvel em álcool, propilenoglicol, óleo e gordura (ALVES, 2005).

Os métodos utilizados pelos produtores para o beneficiamento são diversos e dependem das características climáticas da região, do número de plantas em colheita, da tecnologia disponível na propriedade e da exigência em qualidade, por parte do comprador. As principais etapas de beneficiamento são: o recolhimento dos frutos no campo, a présecagem dos frutos, o descachopamento, a peneiração, a secagem, a armazenagem e a comercialização (SANTANA et al., 2008).

PRESTON & RICKARD (1980) descreveram não somente os principais métodos de extração, como a extração em óleo, a extração em solventes orgânicos e a extração em meio aquoso alcalino, mas também variantes desses processos. Em um dos processos as sementes são tratadas com solução alcalina, a frio ou sob leve aquecimento. Soluções alcalinas como hidróxido de sódio ou de potássio transformam a bixina em um sal que, nesta forma, é comercializado. Isso permite a utilização em alimentos contendo baixos teores de óleo, ampliando o espectro da utilização dos corantes de urucum. A solução alcalina obtida contendo o corante solúvel é acidificada o que leva a precipitação de um pigmento rico em norbixina; é obtido, desta forma, um concentrado vermelho com elevado teor daquele componente.

A extração com solventes orgânicos também é uma alternativa para a obtenção de produto com elevada concentração de bixina. Este processo, apesar de conduzir a um produto com elevado rendimento, apresenta alguns problemas, relativos ao elevado custo para recuperação dos solventes e à possibilidade de deixar resíduos tóxicos que pode inviabilizar seu emprego como corantes para alimentos (CUNHA, 2008).

Além dos processos de extração por solvente, a bixina também pode ser extraída por processos puramente mecânicos que, em geral consistem de técnicas físicas simples que promovem a raspagem entre os grãos visando à separação de sua camada externa que contém o corante, o qual é obtido na forma predominante de bixina. Extrações com fluido supercrítico, particularmente se empregando o dióxido de carbono, são reportadas na

literatura; no entanto, esta técnica extrativa continua restrita à escala laboratorial. Processos alternativos, como operações mecânicas envolvendo moinhos de bolas ou leito de jorro, nos quais as sementes de urucum sofrem atrição e impacto umas com as outras conduzem a um pigmento em forma de pó ultrafino, também são estudados (CUNHA, 2008).

2.1.3 – Grãos residuais de urucum

Toda atividade agroindustrial está associada à geração de resíduos. Consideram-se resíduos os materiais que não apresentam, dentro de um processo de produção, valor econômico na sua forma original, ou que apresentam valor muito baixo, e que representam problemas, quanto à sua destinação e armazenamento (BENITES, 2006).

O resíduo da semente de urucum é o subproduto da extração agroindustrial da bixina. O aumento da escala de extração agroindustrial da bixina resulta em 94 a 98% de sobras que, atualmente, são descartadas pela indústria (MORAES, 2007).

A utilização deste resíduo na alimentação animal tem-se limitado a pequenos criadores, sobremaneira de suínos e aves, sem critério algum, visto que dispõe de poucas informações a respeito de consumo, digestibilidade e níveis de inclusão nas rações. Por sua composição bromatológica, o resíduo de urucum pode ser considerado equivalente ao farelo de trigo, em virtude de apresentar teores semelhantes especialmente de fibra e proteína bruta (TONANI et al., 2000).

Os grãos residuais de urucum contêm: fibra bruta (12,5-14,4%), fibra em detergente neutro (36,8%), fibra em detergente ácido (20,2%) e proteína bruta (14,7%) (UTIYAMA et al., 2002). Segundo UTIYAMA (2001), apesar de ser um subproduto, o resíduo de semente processada de urucum tem apresentado composição bromatológica pouco variável.

Os grãos residuais de urucum, um subproduto de baixo custo, são descartados pela indústria em quantidades de aproximadamente 2600 t ao ano (PIMENTEL, 1995).

2.2 – Secagem

Dentre os processos utilizados para a manutenção da qualidade de produtos agrícolas após a colheita, a secagem é um dos mais empregados como forma de reduzir a atividade de água no produto. Com a redução do teor de água até níveis seguros, inibe-se o crescimento de micro-organismos, reduz-se a possibilidade de proliferação de insetos

praga, além de se minimizar mudanças físicas e químicas durante o armazenamento, que contribuem decisivamente para a perda de qualidade do produto (GONELI et al., 2011; ULLMANN et al., 2010).

A secagem pode ser definida como um processo simultâneo de transferência de calor e massa entre o produto e o ar de secagem, que consiste na remoção da umidade excessiva contida no interior do grão por meio de evaporação, causada geralmente por convecção forçada de ar aquecido, de modo a permitir a manutenção de sua qualidade durante o armazenamento, por longos períodos de tempo (AFONSO JUNIOR & CORRÊA, 1999).

De acordo com OLIVEIRA et al. (2006), a evolução dessas transferências simultâneas de calor e de massa no decorrer da operação de secagem faz com que essa seja dividida esquematicamente em três períodos: período de indução, período em taxa constante e período em taxa decrescente de secagem.

O fenômeno de redução do teor de água envolve o movimento hidráulico do interior para a superfície do grão, através de mecanismos distintos de transferência de calor e massa, que podem alterar de forma substancial a qualidade e as propriedades físicas do produto, dependendo do método e das condições de secagem (HALL, 1980).

O mecanismo pelo qual ocorre a difusão da água nos produtos agrícolas é muito complexo devido à diversidade da composição química e à estrutura física dos produtos. Na literatura sobre secagem envolvendo o fenômeno da difusão de água, são encontradas grandes variações nos valores do coeficiente de difusividade, não só devido à complexidade dos produtos como também em função dos diferentes métodos de predição, tipo de material, teor de água, processo de secagem e a metodologia utilizada para sua obtenção (RESENDE et al., 2005).

A conservação pela secagem se baseia no fato de que tanto os micro-organismos como as enzimas e todo o mecanismo metabólico, necessitam de certa quantidade de água para suas atividades. Em consequência da redução de água disponível, serão reduzidas a atividade de água e a velocidade das reações químicas no produto, tal como o desenvolvimento de microrganismos (CHRISTENSEN & KAUFMANN, 1974).

Em geral, depois da colheita as sementes ainda se encontram úmidas, com teor de água impróprio para o armazenamento, tornando-se conveniente o uso de técnicas e equipamentos de secagem adequados, para que as sementes adquiram o teor de água indicado para a armazenagem segura. Durante a secagem as sementes sofrem diversas mudanças físicas causadas por gradientes de temperatura e umidade, que provocam

estresse térmico e hídrico, expansão, contração e alterações em sua densidade e porosidade (FORTES & OKOS, 1980).

Durante a secagem é necessário o fornecimento de calor para evaporar a umidade do material, além de um sorvedor de umidade para remover o vapor de água, formado na superfície do material a ser secado (PARK et al., 2001).

Segundo ALMEIDA et al. (1999), neste processo o calor é requerido para evaporar a água durante a secagem do produto e o líquido evaporado na superfície externa do produto é removido e transferido para o meio de secagem que, normalmente, é o ar. A diferença de pressão parcial de vapor d'água entre o ambiente quente (ar quente) e a superfície do produto ocasionará transferência de massa do produto para o ar e assim o vapor será arrastado do material (PARK et al., 2001).

De acordo com FANG et al. (2009), o conhecimento do teor inicial e final (equilíbrio) de água do material e da relação da água com a estrutura sólida e do transporte da água do interior do material até a sua superfície possibilita fundamentar o processo de secagem.

A secagem constitui a operação mais importante no preparo de grãos para o armazenamento e tem por finalidade colocá-los em níveis recomendáveis de umidade para minimizar a deterioração e a redução da qualidade durante o processo de estocagem (SIMIONI et al., 2008). É o processo mais utilizado para assegurar sua qualidade e estabilidade durante o armazenamento. A diminuição da quantidade de água do material reduz a atividade biológica e as mudanças químicas e físicas que ocorrem durante o período de pós-colheita (GONELI et al., 2007).

Quando conduzida sem os devidos cuidados, a secagem pode concorrer para redução da qualidade das sementes. Aparentemente, os efeitos da secagem em temperaturas mais elevadas podem não ser imediatos, visto que somente após algum tempo de armazenagem é que esses efeitos se tornam mensuráveis (AFONSO JÚNIOR & CORRÊA, 2000).

O fenômeno da secagem não pode ser generalizado para materiais biológicos, pois possuem características próprias e propriedades que podem sofrer importantes alterações durante a secagem. As características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem. Entretanto, a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto é fenômeno comum a qualquer condição de secagem (PARK et al., 2001).

A secagem é uma operação crítica considerando-se a sequência colheita – secagem – armazenagem – pré-processamento – transporte (BROOKER et al., 1992). De acordo com ROMERO-PEÑA & KIECKBUSCH (2003) a secagem pode significar também considerável economia no transporte, no manuseio e na estocagem do produto, além de prover efetivo método de prolongamento de sua vida útil. O interesse por alimentos desidratados tem crescido paralelamente ao aumento da demanda por alimentos “prontos para consumo”.

De acordo com PARK et al. (2001), as vantagens de se utilizar o processo de secagem são várias, dentre as quais se tem: a facilidade na conservação do produto; estabilidade dos componentes aromáticos à temperatura ambiente por longos períodos de tempo; proteção contra degradação enzimática e oxidativa; redução do peso; economia de energia por não necessitar de refrigeração e a disponibilidade do produto durante qualquer época do ano.

No estudo de sistemas de secagem, desenvolvimento e aperfeiçoamento de equipamentos utilizados para a secagem de grãos, dimensionamento, otimização e determinação da viabilidade da aplicação comercial, são de fundamental importância a simulação e a obtenção de informações teóricas a respeito do comportamento de cada produto durante a remoção de água (GONELI et al., 2007).

Uma vez que é imprescindível o uso da secagem em alguma etapa de processamento, o trabalho do engenheiro se desdobra devendo escolher um secador adequado que se integre ao processo como um todo. Deverá comparar as vantagens e desvantagens dentre as várias alternativas disponíveis levando em conta tanto o ponto de vista técnico como o econômico. Antes que uma opção final seja feita, quase sempre será necessária uma simulação do comportamento do secador nas condições específicas de processamento (ALONSO & PARK, 2005).

Para proceder à seleção do equipamento de secagem, primeiramente é feito um levantamento das informações do processo em que está inserida a etapa de secagem bem como do produto final desejado e da matéria-prima utilizada (NONHEBEL & MOSS, 1971).

2.2.1 – Métodos de secagem

Segundo GARCIA et al. (2004), os métodos de secagem são classificados quanto ao uso de equipamentos (natural ou artificial), à periodicidade no fornecimento de calor

(contínuo ou intermitente) e à movimentação da massa de sementes (estacionário ou contínuo).

2.2.1.1 – Secagem natural

A secagem natural é um método amplamente utilizado nos países subdesenvolvidos e/ou em desenvolvimento. Várias razões justificam esta utilização, como desconhecimento de técnicas mais modernas pela maioria dos agricultores. As condições climáticas permitem, em boa parte desses países, a secagem natural; além disso, os investimentos para realizá-la são mínimos (SILVA, 1995).

Segundo BELESSIOTIS & DELYANNIS (2011), a secagem por exposição ao sol é um dos mais antigos métodos de uso de energia solar para a conservação de alimentos, como grãos, vegetais, frutas, etc. Desde os tempos pré-históricos a humanidade usou a radiação solar como única fonte de energia térmica disponível para secar e preservar todos os gêneros alimentícios necessários para o inverno.

Na secagem natural as sementes são secadas essencialmente pela ação do calor e do vento, sem uso de equipamento mecânico e/ou eletroeletrônico. É mais barata e mais lenta que a artificial, no entanto está sujeita às modificações climáticas, razão pela qual é utilizada principalmente nas pequenas propriedades (CARVALHO, 1994). A movimentação do ar é feita pela ação do vento e a energia para a evaporação de umidade provém do potencial de secagem do ar e da incidência direta da energia solar (SILVA, 1995).

De acordo com BRAGA et al. (2005), a secagem na planta, principalmente nas “culturas das águas”, além de estar sujeita a perdas provocadas por insetos, fungos, pássaros, roedores e por agentes meteorológicos adversos, é lenta, exigindo um tempo maior do que no processo artificial.

ARAÚJO et al. (1984), pesquisando a influência da secagem das vagens na germinação e no vigor de sementes de feijão, as submeteram à secagem natural e à secagem artificial, com ar aquecido a 40, 50 e 60 °C e verificaram que a secagem das vagens, com ar aquecido a 50 e 60 °C, causou redução na germinação e no vigor das sementes, logo após a secagem (efeito imediato) e que houve acentuado efeito da secagem a 60 °C sobre a qualidade das sementes, quando armazenadas, por um ano, em câmara seca (efeito latente). ANDREOLI et al. (1993), armazenaram sementes de café (*Coffea canephora* L. cv. Guarini) acondicionadas em dois tipos de embalagem, após secagem

natural e artificial e concluíram que as sementes secadas naturalmente até 25% de teor de água e conservadas em sacos de polietileno apresentaram os maiores valores de germinação e de vigor após cinco meses de armazenamento. MORAES NETO et al. (1998) estudaram os componentes químicos da farinha de banana obtida por meio de secagem natural e verificaram que a secagem natural da banana madura até o ponto ideal de teor de água para obtenção de farinha, mostrou-se impraticável, evidenciando a necessidade de secagem artificial adicional. ALMEIDA et al. (1999) estudaram a secagem natural de gergelim e constataram que o tempo médio gasto para as sementes atingirem o teor de água de 6,1% b.u. foi de 35 dias.

2.2.1.2 – Secagem em terreiro

Na secagem em terreiros ou com ar natural, o produto é retirado da planta e depositado em um pátio previamente preparado, denominado terreiro, e a radiação solar é a energia utilizada para remoção do teor de água. A secagem em terreiros é possível quando da ocorrência da baixa umidade relativa do ar e pouca nebulosidade existente em diversas regiões do Brasil durante o período de colheita. A principal vantagem do método é a economia de energia, porém apresenta o inconveniente de exigir extensas áreas e depender dos fatores climáticos que, sendo desfavoráveis, retardam o processo e favorecem a ocorrência de fermentações indesejáveis, comprometendo a qualidade do produto (SILVA & BERBERT, 1999).

Segundo SILVA (1995), a utilização de terreiros para a secagem de produtos agrícolas, é devida em geral à simplicidade de construção e operação, baixo custo inicial e versatilidade, haja vista que a maioria dos produtos agrícolas pode ser secada em terreiros. As principais restrições dessa técnica consistem em baixa capacidade de secagem por unidade de área, dependência das condições climáticas, maior necessidade de mão-de-obra e área plana para construção de terreiro. Assim, o uso de terreiro fica restrito em propriedades com menor volume de produção ou fazendas produtoras de café, onde o terreiro é muitas vezes indispensável.

RESENDE et al. (2007) observaram a influência do tipo de pavimento na secagem de clones de café em terreiros de concreto e chão batido. BORÉM et al. (2008) estudaram a qualidade do café natural e despulpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. RESENDE et al. (2009a) estimaram e avaliaram as curvas de secagem de clones de café e ajustaram diferentes modelos matemáticos aos valores experimentais durante a secagem

em terreiro de concreto, sendo espalhados em camadas de 3 cm de espessura e revolvidos periodicamente ao longo do dia. RESENDE et al. (2009b) estudaram a influência do pavimento de terreiros na secagem e na qualidade do café conilon e concluíram que os terreiros de concreto e de lama asfáltica apresentaram maior eficiência na secagem do café dessa espécie, comparativamente aos terreiros de tijolo cerâmico e chão batido. PALACIN et al. (2009) efetuaram secagem combinada de café cereja e concluíram que cafés secados em terreiro de cimento podem ter a qualidade depreciada em comparação com a secagem em leito fixo, em leiras ou em sistemas combinados e que é possível obter melhor qualidade dos cafés secados em sistemas combinados, comparativamente com a secagem em terreiro de cimento. RESENDE et al. (2010) estudaram a cinética da secagem de quatro clones de café submetidos a secagem em terreiro de chão batido e verificaram que o tempo necessário para a secagem em terreiro de chão batido dos clones de café Cpafró 194, Cpafró 193, Cpafró 167 e Cpafró 180, até o teor de água de 0,13 (decimal b.s.) foi de, aproximadamente 189,5 h. AMPESSAN et al. (2010) realizaram comparação entre secagens de café cereja descascado em terreiros com diferentes tipos de pavimentação e notaram que a secagem utilizando terreiro com pavimentação de asfalto apresentou maior eficiência energética, em comparação com o terreiro de concreto. RESENDE et al. (2011) avaliaram a qualidade de café conilon submetido a secagem em terreiro híbrido e de concreto e concluíram que o tempo necessário para que os cafés boia, mistura e cereja atingissem o teor de água de $9,5 \pm 0,5$ (% b.u.) foi maior em terreiros de concreto que em terreiros híbridos.

2.2.1.3 – Secagem com energia solar

Segundo SILVA (1995), desde 1974, quando da primeira crise do petróleo, tem havido grande interesse na possibilidade de ser usada a energia solar para substituir as fontes convencionais de energia (sobretudo os derivados do petróleo) na secagem de produtos agrícolas ou em outras aplicações.

O Brasil dispõe de um grande potencial de uso de energia solar em quase todo o território nacional, notadamente na região Nordeste. Esta energia se constitui em uma opção vantajosa na viabilidade de muitos projetos que poderiam promover o desenvolvimento da região em vários setores, como na secagem de grãos, no aproveitamento da energia solar para aquecimento de água domiciliar e também na transformação de energia solar em elétrica (COSTA, 2008).

A utilização da radiação solar como fonte de energia é, sem dúvida, a forma que requer menor custo de operação. Por sua vez, em alguns casos, torna-se um processo não muito interessante do ponto de vista industrial, devido às variações climáticas e, em contrapartida, ao longo tempo necessário para atingir o ponto desejado de teor de água no alimento. Este tempo pode ser determinado a partir das curvas de secagem dos diversos produtos, que varia em função do tipo de processo, do equipamento utilizado e das condições de secagem (VILELA & ARTUR, 2008).

De acordo com FERREIRA et al. (2008), secadores solares usam fontes de energia livres e renováveis, reduzem as perdas de secagem (em comparação com a secagem ao sol) e apresentam custos operacionais mais baixos do que a secagem artificial.

A quantidade de energia que pode incidir em uma superfície perpendicular aos raios solares, em um dia completamente claro (ausência de nebulosidade) e numa latitude média brasileira, é de aproximadamente 4800 Kcal/dia por metro quadrado de área coletora. Isso significa que uma superfície absorvedora com 2,5 m² poderia interceptar uma quantidade de energia solar equivalente a 1 kg de óleo diesel por dia (SILVA, 1995).

Segundo SILVA (1995), existem fatores que nos impedem de coletar e usar eficientemente o total de energia incidente. Primeiramente o sol não está descoberto todos os dias e, por outro lado, dependendo da região, a poluição atmosférica impede uma boa utilização da radiação solar. Finalmente, a orientação do coletor exerce grande efeito na quantidade total recebida e, em muitos casos, é quase impossível orientar um coletor de madeira para que ele fique perpendicular aos raios solares, pois os investimentos adicionais para o direcionamento da superfície coletora inviabilizariam o sistema. Uma opção econômica seria aceitar uma menor eficiência na captação de energia com a fixação da superfície coletora em uma posição que pudesse captar maior quantidade de energia.

Diversos trabalhos têm sido desenvolvidos no tocante à secagem ao sol e/ou utilização de energia solar para secagem de produtos agrícolas variados: sementes de feijão (AHRENS & LOLLATO, 1997); grãos de feijão (BRAGA et al., 2005; SANTOS et al., 2011); sementes de *Brachiaria brizantha* (PREVIERO et al., 1998); pera (GUINÉ, 2005); grãos de milho (SANTOS et al., 2005); palma (BELEN-CAMACHO et al., 2007); amêndoas de jaca (DANTAS, 2007); banana (WEIRICH NETO et al., 2007; COSTA, 2008); salsa (MORSETTO et al., 2008); sementes de cacau (CLEMENT et al., 2009); grãos de abóbora (DIÓGENES, 2010); caju (MACHADO et al., 2010; 2011) e sementes de pitanga (SENA et al., 2010).

2.2.1.4 – Secagem estacionária

De acordo com MILMAN (2002), a secagem estacionária é um método artificial que, basicamente, se caracteriza pela passagem forçada do ar em fluxo axial ou radial através da camada de grãos que permanecem parados no compartimento de secagem. O ar utilizado pode ser aquecido ou não. Os silos-secadores são adequados para a secagem estacionária.

A utilização de ar sem aquecimento depende das condições psicrométricas do ar ambiente e, além da morosidade e do baixo fluxo operacional, apresenta risco de desenvolvimento microbiano durante o processo (BARBOSA et al., 2009). A secagem estacionária intensifica a redução da qualidade biológica por expor os grãos ainda com alto teor de água a um prolongado tempo em contato com o ar aquecido, acelerando deste modo sua deterioração (OLIVEIRA et al., 2010).

A secagem estacionária requer, porém, condições especiais para seu desempenho adequado. O secador estacionário, tipo tubo central perfurado, é um equipamento em que o ar é forçado a passar pelas sementes transversalmente (distribuição radial de ar) num tubo vertical perfurado, situado na posição central do secador, desde a base até o topo. A câmara de secagem compreende o volume contido entre o tubo central e a parede externa do secador (CARVALHO, 1994).

GARCIA et al. (2005) estudaram a qualidade fisiológica de sementes de trigo submetidas a secagem estacionária com ar ambiente forçado. BARBOSA et al. (2009), pesquisaram o manejo térmico do ar na secagem estacionária e seus efeitos no desempenho industrial de arroz branco e parboilizado. OLIVEIRA et al. (2010) desidrataram grãos de aveia utilizando sistema estacionário dividido em duas etapas: na primeira etapa, as amostras com umidade inicial de 23% permaneceram estáticas na câmara de secagem e receberam ar a 25 °C até atingirem a umidade intermediária, de 15 a 16%, a fim de minimizar danos térmicos nos grãos; na segunda etapa de secagem, as amostras foram submetidas a quatro temperaturas do ar até a umidade final de 13%. ARAÚJO FILHO et al. (2011), investigaram o processamento de produto farináceo a partir de beterrabas submetidas a secagem estacionária. AVELAR et al. (2011), estudaram a secagem estacionária de sementes de soja com ar desumidificado por resfriamento.

2.2.1.5 – Secagem contínua

A secagem contínua é um método artificial que, basicamente, se caracteriza pela ação contínua do ar aquecido sobre a massa de grãos que está em movimento. Faz uso dos chamados secadores contínuos (MILMAN, 2002).

A secagem em fluxo contínuo implica em manter as sementes em constante movimento no interior do secador. Na secagem contínua as sementes passam através do secador apenas uma vez, ficando expostas por determinado período ao ar aquecido e outro na câmara de resfriamento. Isso vale dizer que as sementes entram úmidas na câmara de secagem e são descarregadas resfriadas com o teor de água desejado (GARCIA et al., 2004).

2.2.1.6 – Secagem intermitente

A secagem intermitente é caracterizada pela passagem descontínua do ar aquecido pela massa de grãos também em movimento. Neste processo, a difusão da água do centro para a periferia do grão e a evaporação da água superficial ocorrem de maneira mais branda e equilibrada. Para a secagem intermitente são utilizados os secadores intermitentes. O processo ocorre com movimentação do grão e do ar de secagem, que mantém períodos de contato e não contato alternadamente (MILMAN, 2002).

De acordo com GARCIA et al. (2004), a secagem intermitente é caracterizada pela permanência das sementes em contato com o ar aquecido por períodos curtos, intercalados com períodos sem exposição ao fluxo de ar aquecido na câmara de equalização.

VILLELA & SILVA (1992) estudaram as curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método intermitente. AHRENS & VILLELA (1996) pesquisaram a secagem intermitente e seus efeitos na qualidade fisiológica de sementes de tremoço azul. MARINI et al. (2005) estudaram o efeito da secagem intermitente na estabilidade de grãos de aveia branca. SARAVIA et al. (2007) investigaram o manejo da temperatura do ar na secagem intermitente de sementes de arroz irrigado. MARINI et al. (2007) pesquisaram a qualidade de grãos de aveia sob secagem intermitente em altas temperaturas. SIMIONI et al. (2008) estudaram parâmetros operacionais na secagem intermitente de grãos de aveia branca.

2.2.2 – Teorias de secagem

Segundo MARTINAZZO et al. (2007b), várias teorias e fórmulas empíricas foram desenvolvidas para prever a taxa de secagem: Teoria difusional; Teoria capilar; Teoria de Luikov; Teoria de Philip & De Vries; Teoria de Krisher-Berger & Pei e Teoria da condensação–evaporação. As duas primeiras teorias são básicas e fundamentam as outras teorias.

2.2.2.1 – Teoria da Difusão Líquida

De acordo com MARTINAZZO et al. (2007a) a teoria da difusão líquida tem sido amplamente empregada na área de secagem, embora existam algumas suposições a serem consideradas para sua aplicação, como: redução do volume desprezado, não existência do efeito de capilaridade, equilíbrio térmico instantâneo com o ar e os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, admite-se como desprezíveis.

Os modelos de secagem baseados na teoria da difusão líquida têm merecido atenção especial por parte dos pesquisadores. Deferidos modelos assumem que não há influência da capilaridade, desprezam os efeitos da transferência de energia e massa de um corpo para outro, dada à dificuldade de se quantificarem esses múltiplos efeitos na massa de produto e, também, por considerarem que os corpos entram em equilíbrio térmico com o ar instantaneamente, o que pode induzir a discrepâncias entre os resultados encontrados (GONELI et al., 2007).

De acordo com ROMERO-PEÑA & KIECKBUSCH (2003), em muitos casos de secagem de produtos alimentícios não se observa o período de taxa constante de perda de água. Os modelos matemáticos que descrevem a taxa decrescente de secagem de um sólido consideram, geralmente, como mecanismo principal a difusão baseada na segunda Lei de Fick (Equação 2.1):

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla (D_{ef} \nabla X) \quad (2.1)$$

em que:

D_{ef} - difusividade efetiva ($m^2 s^{-1}$);

X – teor de água (kg_{H_2O}/kg_{ms}); e

t – tempo (s).

O modelo Difusional baseado na 2ª Lei de Fick foi utilizado por GOUVEIA et al. (1999), na determinação da difusividade e do encolhimento do gengibre durante a secagem; PARK et al. (2001), no estudo de secagem de pera bartlett (*Pyrus sp.*) em fatias; EL-AQUAR & MURR (2003), no estudo e modelagem da cinética de desidratação osmótica do mamão formosa (*Carica papaya L.*); LESCANO & TOBINAGA (2004), na determinação do modelo codificado e real para a difusividade efetiva da secagem do resíduo do extrato hidrossolúvel de soja; PARK et al. (2004), no estudo da secagem de caqui Giombo com encolhimento e sem encolhimento; ARÉVALO-PINEDO & MURR (2005), na pesquisa da influência da pressão, temperatura e prétratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora; OLIVEIRA et al. (2006), na determinação da difusividade efetiva da raiz de chicória; AMENDOLA & QUEIROZ (2007), na aplicação de metodologias matemáticas para cálculo do coeficiente de difusão de massa de bananas durante o processo de secagem; GONELI et al. (2007), no estudo da difusão de água em grãos de trigo durante a secagem; MARTINAZZO et al. (2007b), na pesquisa da difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas a secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar; RESENDE & CORRÊA (2007), no estudo da modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão; RAFIEE et al. (2007), na investigação experimental e numérica da difusão de água em pistache durante a secagem com alta temperatura e baixa umidade relativa; SILVA et al. (2008d), na determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), variedade sempre verde, com base no comportamento da secagem; BORIN et al. (2008), na pesquisa do efeito do prétratamento osmótico com sacarose e cloreto de sódio sobre a secagem convectiva de abóbora.

Segundo CORRÊA et al. (2006b) o mecanismo da difusão líquida é muito complexo devido à diversidade da composição química e estrutura física dos produtos. Os dados disponíveis na literatura apresentam elevada variação nos seus valores, não só devido à complexidade dos produtos, como também em função dos diferentes métodos de estimação, tipo de material, teor de água, processo de secagem e metodologia utilizada para sua obtenção.

2.2.2.2 – Teoria de Luikov

De acordo com ARNOSTI JUNIOR et al. (1999), para desenvolver sua teoria Luikov aplicou os princípios da termodinâmica irreversível e fez as seguintes considerações:

- os transportes molecular e molar de vapor, ar e água ocorrem simultaneamente;
- a transferência de vapor e gás inerte (ar) ocorre por difusão, efusão (transporte molecular) e filtração, quando sob gradientes de pressão (transporte molecular);
- o transporte de líquido é assumido ocorrer por difusão, capilaridade e filtração;
- a retração e a deformação não são consideradas.

Na teoria de Luikov todos os tipos de transferência são chamados de difusão e, considerando o aquecimento interno e a transferência de massa num corpo poroso capilar, as equações que expressam os mecanismos são similares à lei de Fick (ARNOSTI JUNIOR et al., 1999).

2.2.2.3 – Teoria da Condensação-Evaporação

O modelo de condensação-*evaporação* foi desenvolvido através dos estudos de Henry, no ano de 1939, quando o interesse em compreender o comportamento da água em fardos de algodão levou ao estudo da difusão de uma substância, através de outra, pelos poros de um corpo sólido. Este modelo considera que o sólido é constituído de redes contínuas de poros e as equações que dominam o fluxo são obtidas com um balanço apropriado de calor e massa. O balanço de massa considera o movimento de vapor por meio do sólido e o balanço de energia é feito considerando-se o fluxo de calor por condução, adicionando-se o calor envolvido na adsorção ou absorção da água pelo sólido. Além disso, ele também considera que a quantidade de vapor varia linearmente com a concentração de vapor e temperatura (RODRÍGUEZ & DIEZ, 2005; FORTES & OKOS, 1980)

2.2.2.4 – Teoria Capilar

O princípio da teoria capilar é o seguinte: para um tubo capilar isolado, a pressão de sucção e então a ascensão da água dentro do capilar são proporcionais à tensão superficial da água e inversamente proporcional a seu raio. Admitindo-se que a tensão capilar é finalmente associada ao teor de água, esses autores estabelecem uma lei geral na qual o fator potencialidade é o gradiente de teor de água. Os autores também agregam a este fluxo de água líquida um fluxo de vapor de água que se teria dentro dos poros depois da retirada do líquido (PARK et al., 2007).

Não sendo o material biológico um material capilar, esta teoria não poderia ser aplicada para tais materiais, no senso estrito. No entanto, não se pode esquecer que esta teoria fornece ferramentas poderosíssimas para fundamentar as equações fenomenológicas de transferência simultânea de calor e de massa. Assumir o fluxo de transferência de massa como sendo função somente do gradiente de concentração é simplificar muito, apesar deste gradiente ser o mais importante contribuinte na transferência de massa (PARK et al., 2007).

2.2.2.5 – Krischer-Berger & Pei

De acordo com RODRÍGUEZ & DIEZ (2005), o trabalho de Krischer, que foi uma análise da transferência de calor e massa em uma grande variedade de meios porosos, serviu de base para muitas teorias de secagem. Na sua teoria básica, Krischer acredita que durante a secagem a água pode migrar no estado líquido por capilaridade e no estado de vapor por um gradiente de concentração de vapor.

Segundo BROD (2003), os modelos que consideram as transferências simultâneas de calor e massa são, de maneira geral, complexos e sua resolução exige meios de cálculos também complexos, sobretudo quando se considera a variação dos coeficientes de difusão de massa com a temperatura e o teor de água. Além disso, leva-se em consideração a deformação do produto e sua heterogeneidade, o que aumentaria ainda mais a dificuldade.

2.2.2.6 - Teoria de Philip & De Vries

De acordo com RODRÍGUEZ & DIEZ (2005), a teoria de Philip & De Vries aborda que a água se movimenta tanto por difusão como por capilaridade. Philips & De

Vries estenderam seu modelo para apresentar, separadamente, os efeitos de componentes isotérmicos e térmicos da transferência de vapor.

A principal limitação da teoria de Philip e De Vries é que as equações do modelo são utilizadas apenas para a chamada “região capilar da isoterma de sorção” (primeiro período de secagem), pois neste período é mantida, no meio poroso, uma película de umidade contínua, dentro dos poros (RODRÍGUEZ & DIEZ, 2005).

2.2.3 – Cinética de secagem

De acordo com GUEDES & FARIA (2000), a análise da cinética de secagem fornece informações sobre o comportamento da transferência de massa entre as sementes e o agente de secagem, normalmente o ar atmosférico, o qual é de importância fundamental para o projeto e simulação de secadores. Para a interpretação da cinética de secagem, a curva de secagem deve representar a variação do conteúdo de água do produto em relação ao tempo (ALMEIDA et al., 1999).

A evolução das transferências simultâneas de calor e de massa, no curso da operação de secagem, faz com que a secagem seja dividida esquematicamente em três períodos de secagem: período 0 ou período de se entrar em regime operacional; período 1 ou período de secagem a taxa constante; e período 2 ou de secagem a taxa decrescente (PRADO et al., 2000).

A taxa de secagem pode ser acelerada com o aumento da temperatura do ar de secagem e/ou com o aumento do fluxo de ar que passa pelo produto por unidade de tempo. A quantidade de ar utilizada para a secagem depende de vários fatores, entre eles: o teor de água inicial do produto e a espessura da camada (GOUVEIA et al., 2003).

2.2.3.1 – Modelos matemáticos para secagem

O estudo de sistemas de secagem, seu dimensionamento, otimização e a determinação da viabilidade de sua aplicação comercial, podem ser feitos por simulação matemática. Para a simulação, cujo princípio se fundamenta na secagem de sucessivas camadas delgadas do produto, utiliza-se um modelo matemático que representa satisfatoriamente a perda de umidade do produto durante o período de secagem (AFONSO JUNIOR & CORRÊA, 1999).

De acordo com SINÍCIO (1983), uma das formas mais eficientes de se analisar o processo de secagem de um produto se baseia no desenvolvimento de modelos matemáticos para descrição do fenômeno físico, ou seja, no emprego da simulação. A representação matemática do processo de secagem de diversos produtos agrícolas vem, há algum tempo, sendo estudada e utilizada na tentativa de prever os fenômenos que acontecem durante este processo (CORRÊA et al., 2006a).

Existem métodos difusivos, empíricos, teóricos e semiteóricos para se descrever matematicamente o processo de secagem. Segundo COSTA (2008), os modelos difusivos geralmente se baseiam na difusão de líquido e/ou vapor dentro do produto. Nestes modelos são obtidos perfis de temperatura e de concentração mássica de água, como função da posição dentro do sólido e do tempo de secagem; sendo que nesses modelos podem ser consideradas as resistências externa e interna aos fluxos de calor e massa. De acordo com o autor, os modelos empíricos e semiempíricos são comumente usados para descrever a secagem de uma partícula ou de uma camada fina de partículas. São quase sempre, simplificações das soluções das equações diferenciais que representam os modelos difusivos.

As equações semiempíricas têm como base a lei de resfriamento de Newton para transferência de calor por convecção, presumindo-se que, durante a secagem, as condições sejam isotérmicas e que a transferência de água seja restrita à superfície do produto (RESENDE et al., 2009a).

Normalmente se consideram nos métodos teóricos as condições externas sob as quais a operação ocorre como também os mecanismos internos de transferência de energia e massa e seus efeitos (SOUSA et al., 2011).

Os modelos se baseiam em variáveis externas ao produto, como a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem. Porém, não fornecem indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água no interior dos grãos e consideram que todo o processo de secagem ocorra somente no período de taxa decrescente (RESENDE et al., 2009a).

2.2.3.1.1 – Modelo Aproximação da Difusão

MONTES et al. (2008), estudando a modelagem da cinética de secagem de inhame (*Dioscorea rotundata*) ajustaram o modelo matemático de Aproximação da Difusão (Equação 2.2) aos dados experimentais da secagem:

$$RX = a.\exp(-k.t) + (1 - a).\exp(-k.b.t) \quad (2.2)$$

em que:

RX – razão de água (adimensional);

a, b, k – constantes do modelo; e

t – tempo (min).

CORRÊA et al. (2007), estudando a modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão em camadas delgadas, verificaram que os modelos Aproximação da Difusão, Page, Midilli, Henderson & Pabis modificado e Dois Termos foram os que melhor representam o fenômeno de secagem do feijão. RESENDE et al. (2009a) ao estudarem a modelagem matemática para a secagem de clones de café em terreiro de concreto verificaram que os modelos de Aproximação da Difusão e Dois Termos apresentaram-se satisfatórios na descrição do fenômeno para o clone Cpafró 180, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99. RADÜNZ et al. (2010), analisando a cinética de secagem de folhas de sálvia, concluíram que o modelo da Aproximação da Difusão e o de Dois Termos se mostraram adequados apenas para descrever a cinética de secagem para a faixa de temperatura de 60 a 90 °C. RESENDE et al. (2010), estudando a cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido, verificaram que os modelos Verma, Dois Termos e Aproximação da Difusão foram adequados para representação da secagem dos quatro clones de café analisados. SEHEDLOU et al. (2010) usaram o modelo de Aproximação da Difusão na secagem convectiva de maçãs. WAUGHON & PENA (2008), pesquisando a modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi, constataram que o modelo de Aproximação da Difusão se ajustou bem aos dados experimentais.

2.2.3.1.2 – Modelo de Dois Termos

JITTANIT (2011) utilizou vários modelos matemáticos para descrever a cinética de secagem de sementes de abóbora, dentre eles o de Dois Termos (Equação 2.3):

$$RX = a.\exp(-k.t) + b.\exp(-q.t) \quad (2.3)$$

em que:

RX – razão de água (adimensional);

a, b, k, q – constantes de secagem do modelo (adimensional); e

t – tempo (min).

LEMA et al. (2007), analisando as características de secagem de salsa em camada fina, utilizaram o modelo de Dois Termos. MEISAMI-ASL et al. (2009), no estudo da modelagem matemática de fatias de maçã durante a secagem utilizaram o modelo de Dois Termos. RADÜNZ et al. (2011) utilizaram o modelo de Dois Termos para avaliar a cinética de secagem de carqueja. MEZIANE (2011) empregou o modelo de Dois Termos na cinética de secagem de bagaço de azeitona. REIS et al. (2011), estudando a modelagem matemática da pimenta Cumari do Pará, utilizaram vários modelos matemáticos, inclusive o de Dois Termos, no entanto concluíram que o modelo matemático de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, com valores de R^2 superiores a 0,99. CORRÊA et al. (2007) utilizaram alguns modelos matemáticos para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas, e concluíram que o modelo de Dois Termos representou satisfatoriamente o fenômeno de secagem, com valores de R^2 superiores a 0,99. SACILIK (2007a), estudando a modelagem do processo de secagem de tomate em camada fina, ajustou o modelo de Dois Termos aos dados experimentais. SHAH & JOSHI (2010) utilizaram o modelo matemático de Dois Termos no estudo da cinética de secagem de bagaço de cana em micro-ondas.

2.2.3.1.3 – Modelo de Midilli

MARTINAZZO et al. (2007a), na análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão utilizaram treze modelos diferentes no ajuste dos dados experimentais, dentre eles o modelo de Midilli (Equação 2.4):

$$RX = a.exp(-kt^n) + bt \quad (2.4)$$

em que:

RX - razão de umidade (adimensional);

k, n, a, b - constantes do modelo; e

t - tempo (min).

LIMA et al. (2007b) verificaram, na cinética de secagem de polpa de facheiro, que a equação de Midilli apresentou os maiores valores de coeficientes de determinação e os menores desvios quadráticos médios. MARTINAZZO et al. (2007a) verificaram que o modelo matemático de secagem em camada fina, proposto por Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais, durante a análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. MORSETTO et al. (2008), fazendo estudo preliminar sobre a cinética de secagem de salsa em condições de secagem solar, concluíram que o modelo de Midilli permitiu obter os melhores ajustes. SILVA et al. (2008c), estudando a cinética de secagem de folhas e caule de coentro (*Coriandrum sativum*), concluíram que o modelo de Midilli representou melhor o processo de secagem nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, com velocidade de ar constante (1,5 m s⁻¹). MOHAMMADI et al. (2009) constataram que o modelo de Midilli descreveu satisfatoriamente o comportamento de secagem de kiwis, a uma velocidade constante do ar de 1,0 m s⁻¹, e uma faixa de temperatura de 40-80 °C. No estudo de MEISAMI-ASL et al. (2009), o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou às condições da pesquisa de modelagem matemática de fatias de maçã durante a secagem. SHAH & JOSHI (2010), estudando a modelagem de secagem de bagaço de cana em micro-ondas, concluíram que o modelo de Midilli ajustou-se melhor aos dados experimentais. GOYALDE et al. (2009), pesquisando a modelagem matemática da cinética de secagem de fatias de cana utilizaram o modelo de Midilli e obtiveram valores de R² superiores a 0,99. CIHAN et al. (2007), pesquisando a modelagem da secagem intermitente de arroz integral em camada delgada, chegaram a conclusão que o modelo de Midilli foi o que apresentou o melhor ajuste aos dados experimentais, uma vez que o referido modelo produziu os maiores valores de R² e os menores valores de DQM . BINGOL et al. (2008) utilizaram o modelo de Midilli no estudo da modelagem matemática de micro-ondas de convecção-assistida no aquecimento e secagem de uvas. SILVA et al. (2008c), no estudo da cinética de secagem de folhas e caule de coentro (*Coriandrum sativum*), empregaram o modelo matemático de Midilli e concluíram que este modelo foi o que melhor representou o processo de secagem para a faixa de temperatura de 50 a 80 °C, com valores de R² superiores a 0,99.

2.2.3.1.4 – Modelo de Page

Ao avaliar os fatores com influência significativa sobre a taxa máxima de secagem convectiva de sementes de milho em camada delgada e comparar os resultados obtidos

experimentalmente com aqueles obtidos com o modelo exponencial, PAGE (1949) propôs a Equação 2.5 de secagem:

$$RX = \exp(-k.t^n) \quad (2.5)$$

em que:

RX – razão de água (adimensional);

k – constante de velocidade de secagem (min^{-1});

n – constante do modelo; e

t – tempo (min).

De acordo com BRUCE (1985), o modelo proposto por Page descreve melhor o processo de secagem de produtos agrícolas que o modelo exponencial.

GUEDES & FARIA (2000), determinando a constante de secagem de sementes de urucum em secador convectivo de leito fixo, observaram que a variação do teor de água das sementes com o tempo pôde ser descrita adequadamente pelos modelos de Thompson, Page e de Henderson. SILVA et al. (2008b), estudando a desidratação da polpa de tamarindo pelo método de secagem em camada de espuma, concluíram que o modelo de Page representou satisfatoriamente os dados experimentais da secagem da polpa formulada, com valores de R^2 superiores a 0,99. RESENDE et al. (2009a), estudando a modelagem matemática para a secagem de clones de café em terreiro de concreto notaram que o modelo de Page foi adequado para representação da secagem de quatro clones de café analisados. AFONSO JÚNIOR & CORRÊA (1999), comparando modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão, concluíram que a equação proposta por Page foi a que melhor representou os dados experimentais. CARLESSO et al. (2005), determinando as curvas de secagem de sementes de maracujá-amarelo com utilização de um secador de camada delgada com fluxo de ar ascendente, usaram o modelo proposto por Page para secagem de produtos agrícolas granulares e perceberam que o modelo estudado não apresentou bom ajuste à curvas de secagem das sementes de maracujá. CORRÊA et al. (2001), investigando a cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca, concluíram que o modelo de secagem em camadas finas proposto por Page se ajustou satisfatoriamente às curvas de secagem obtidas experimentalmente para o milho-pipoca da cultivar Zélia, com valores de R^2 superiores a 0,99. ALEXANDRE et al. (2009), estudando a cinética de secagem de abacaxi pérola em

fatias, constataram que dentre os modelos de secagem estudados o proposto por Page se ajustou satisfatoriamente às curvas de secagem obtidas experimentalmente, com valores de R^2 superiores a 0,97. SOUSA et al. (2006) constataram que o modelo de Page utilizado para prever o equilíbrio higroscópico da torta e do farelo de mamona se ajustou satisfatoriamente aos dados experimentais. SILVA et al. (2009), no estudo da cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo, verificaram que os modelos que melhor representam o processo de secagem foram os de Page e Henderson & Pabis. KOUA et al. (2009) concluíram que o modelo de Page apresentou bom ajuste aos dados experimentais da secagem solar de manga, banana e mandioca, com valores de R^2 superiores a 0,99 para os dados da secagem da manga e banana e valores de R^2 superiores a 0,98 para os dados da secagem de mandioca. AZOUBEL et al. (2009) estudando o efeito da desidratação osmótica sobre a cinética de secagem de caju, concluíram que, dos modelos utilizados o de Page apresentou um bom ajuste experimental, com erros relativos médios de até 15%.

2.2.3.1.2 – Modelo de Thompson

SOUSA et al. (2011) ajustaram o modelo de Thompson (Equação 2.6) aos dados experimentos da cinética de secagem de nabo forrageira:

$$RX = \exp((-a - (a^2 + 4.b.t)^{0.5})/2.b) \quad (2.6)$$

em que:

RX – razão de água (adimensional);

a, b – constantes de secagem do modelo (adimensional); e

t – tempo (min).

CORRÊA et al. (2006c), verificando as características e cinética de secagem de frutos do cafeeiro, utilizaram o modelo de Thompson e obtiveram valores de R^2 superiores a 0,98. MONTES et al. (2008), no estudo da modelagem da cinética de secagem de inhame (*Dioscorea rotundata*), concluíram que o modelo de Thompson se ajustou bem aos dados da secagem. SANTOS et al. (2001) ajustaram o modelo de Thompson aos dados da cinética de secagem em camada fina de malte cevada. MARTINAZZO et al. (2010) ajustaram as curvas de secagem de folhas de capim limão ao modelo de Thompson. RESENDE et al. (2010) estudaram a cinética de secagem de clones de café em terreiro de

chão batido e verificaram que o modelo matemático de Thompson representou satisfatoriamente o fenômeno de secagem. CORRÊA et al. (2007), pesquisando a modelagem matemática para a descrição do processo de secagem de feijão em camadas delgadas, ajustaram o modelo de Thompson aos dados experimentais. SOUSA et al. (2006), estudando a cinética de secagem do farelo de mamona, concluíram que o modelo de Thompson se ajustou bem aos dados experimentais, com valores de R^2 superiores a 0,99. RESENDE et al. (2009a), pesquisando a modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto, ajustaram o modelo de Thompson aos dados da cinética de secagem e obtiveram valores de R^2 superiores a 0,96.

3 - MATERIAL E MÉTODOS

3.1 - Local de realização da pesquisa

O estudo foi realizado no Laboratório de Armazenamento e Processamento de Produtos Agrícolas (LAPPA), da Unidade Acadêmica de Engenharia Agrícola (UAEA), do Centro de Tecnologia e Recursos Naturais (CTRN) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), em Campina Grande, PB.

3.2 – Matéria-prima

Foram utilizados grãos residuais de urucum (*Bixa orellana* L.) doados pela indústria alimentícia Maratá, com sede no Estado de Sergipe.

3.2.1 – Característica da matéria-prima

Os grãos residuais de urucum foram recepcionados no LAPPA e estocados em recipientes plásticos em temperatura de -18 °C até o início dos experimentos. Esses grãos apresentaram-se impregnados de óleo de soja oriundo do processo de extração dos pigmentos (Figura 3.1).

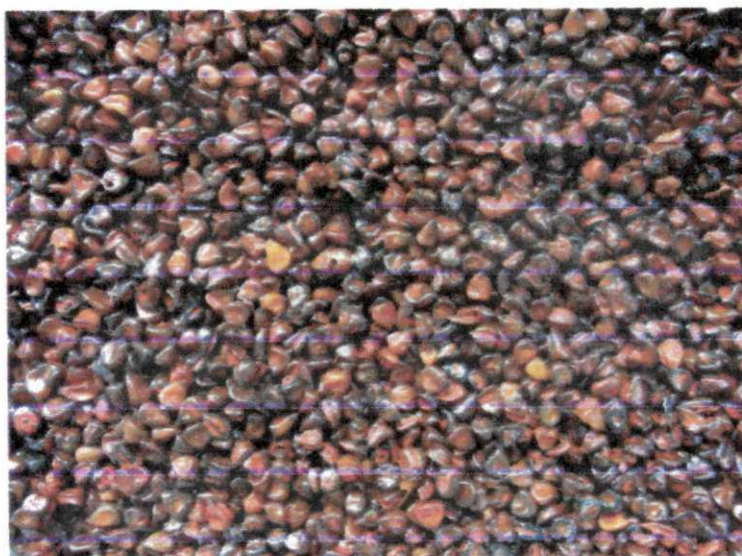


Figura 3.1 – Grãos residuais de urucum

3.3 – Processamento dos grãos residuais de urucum

A manipulação dos grãos residuais de urucum para realização dos experimentos foi realizada de dois modos: no primeiro os grãos foram conservados com a camada de óleo proveniente do processo de extração dos pigmentos e no segundo a camada de óleo foi removida através de lavagens dos grãos em água e com detergente de grau alimentício.

3.3.1 – Processamento dos grãos residuais de urucum com óleo

Na composição do tratamento com a camada de óleo, os grãos residuais de urucum foram processados conforme segue:

- **Recepção:** Os grãos residuais de urucum foram recepcionados no LAPP e congelados em freezer até início dos experimentos;
- **Seleção:** Foram removidas sujidades como talos, pedaços de casca e folhas;
- **Pesagem:** Os grãos residuais foram pesados em balança semianalítica com precisão 0,01 g;
- **Fracionamento:** Os grãos foram fracionados em sacos de polietileno, em quantidade de aproximadamente 100 g;
- **Armazenamento:** A matéria-prima foi armazenada em freezer horizontal a temperatura de $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, visando à preservação de suas características para realização do estudo.

Observa-se, na Figura 3.2, o fluxograma do processamento dos grãos residuais de urucum com a camada de óleo.

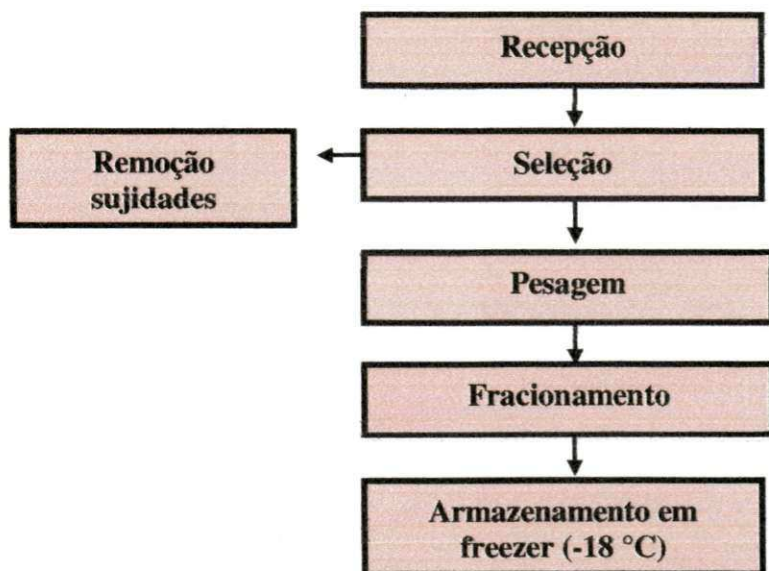


Figura 3.2 – Fluxograma do processamento dos grãos residuais de urucum com óleo

3.3.2 – Processamento dos grãos residuais de urucum sem óleo

Na composição do tratamento sem a camada de óleo, os grãos residuais de urucum foram processados da mesma maneira do tratamento com a camada de óleo, incluindo-se uma etapa de remoção do óleo:

- **Lavagem:** Os grãos residuais foram pré-lavados em água corrente com utilização de detergente de grau alimentício, objetivando a remoção da camada de óleo;
- **Drenagem da água da lavagem:** Após lavagem, a água foi drenada com o auxílio de uma peneira;
- **Eliminação do excesso de água:** A matéria-prima foi colocada em bandejas de aço inoxidável e exposta às condições ambientais de Campina Grande (± 25 °C) para eliminação do excesso de água. Nesta etapa o processo de eliminação da água presente na superfície dos grãos foi realizado à sombra.

Observa-se, na Figura 3.3, o fluxograma do processamento dos grãos residuais de urucum sem a camada de óleo.

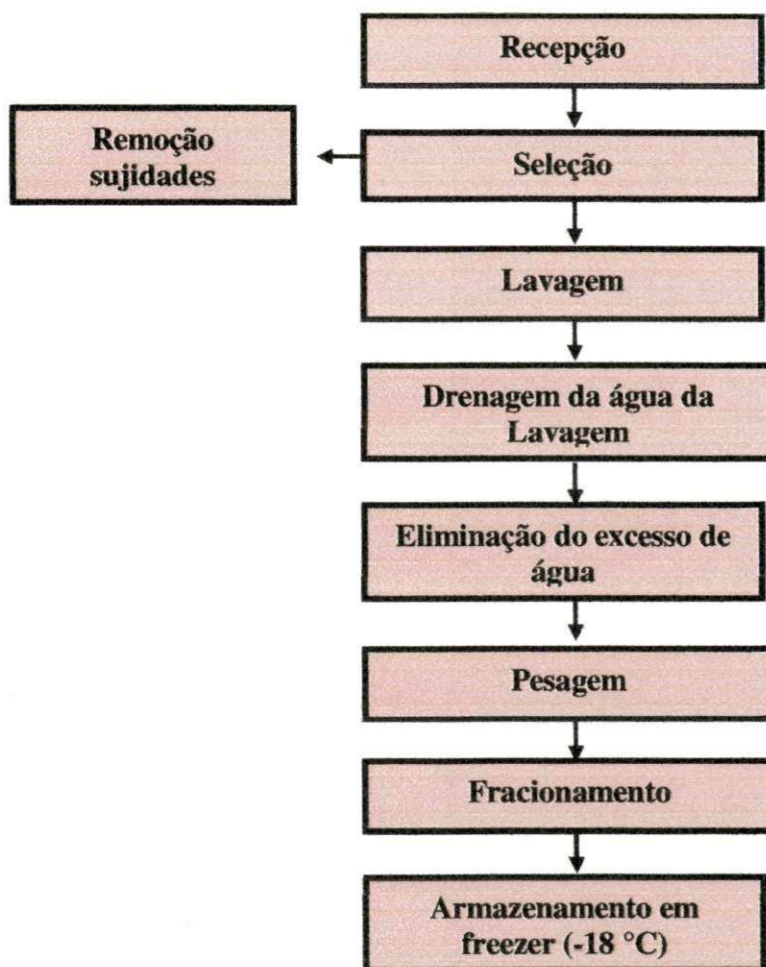


Figura 3.3 – Fluxograma do processamento dos grãos residuais de urucum sem óleo

3.3.3 – Preparo das amostras

Com o objetivo de avaliar a secagem dos grãos residuais de urucum, as amostras foram avaliadas em quatro produtos distintos:

- **Grãos inteiros com óleo (GCO):** Foram provenientes do descongelamento, até temperatura ambiente, dos grãos residuais de urucum com a camada de óleo, obtidos no item 3.3.1;

- **Farinha de grãos com óleo (FCO):** Foram oriundas do descongelamento, até temperatura ambiente, dos grãos residuais de urucum com a camada de óleo (obtidos no item 3.3.1) e posterior trituração dos mesmos em moinho de facas;

- **Grãos inteiros sem óleo (GSO):** Foram originadas do descongelamento, até temperatura ambiente, dos grãos residuais de urucum sem a camada de óleo (item 3.3.2);

- **Farinha de grãos sem óleo (FSO):** Foram provenientes do descongelamento, até temperatura ambiente, dos grãos residuais de urucum sem a camada de óleo (obtidos no item 3.3.2) e posterior trituração dos mesmos em moinho de facas.

Observa-se na Figura 3.4 os diferentes produtos obtidos (GCO, FCO, GSO e FSO) do processamento dos grãos residuais de urucum.

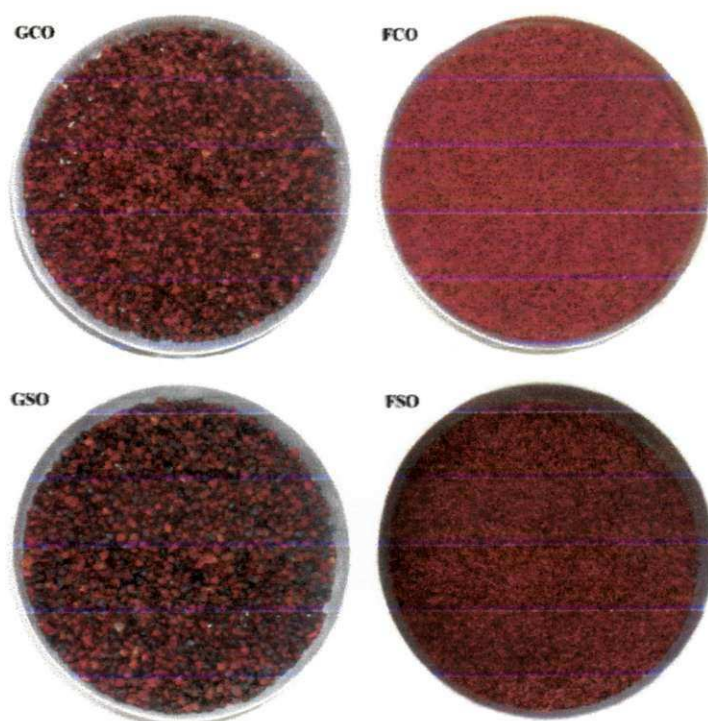


Figura 3.4 – Amostras de grãos e farinhas de grãos residuais de urucum destinados às secagens solar e convencional

Antes do início das secagens as amostras GCO, FCO, GSO e FSO foram reidratadas até teor de água de aproximadamente 18% b.u. (21,95% b.s.) através de método dinâmico. De acordo com BILBAO-SÁINZ et al. (2005), a reidratação de materiais é um processo complexo que tem como objetivo reconstituir as características originais das sementes, quando submetidas ao contato com uma fase líquida.

3.4 – Secadores

3.4.1 - Secador solar para uso diurno

Para a secagem durante o dia foi utilizado um secador em chapa zincada, revestido internamente com poliestireno expandido pintado na cor preta, tendo por cobertura um vidro plano com 4,0 mm de espessura (Figura 3.5), construído segundo DANTAS (2007). O secador, com formato quadrado, mede 71,0 cm de lado e 9,0 cm de profundidade. A coloração preta no interior do secador para uso diurno facilita a absorção da radiação solar (TUNDE-AKINTUNDE, 2011).

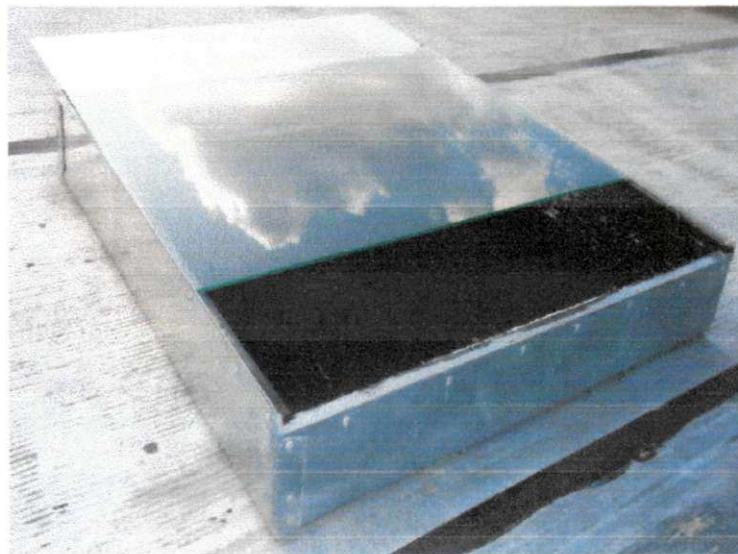


Figura 3.5 – Secador solar de uso diurno

3.4.2 - Secador Acumulador de Calor para Secagem no Período Noturno (ACSN)

As amostras GCO, FCO, GSO e FSO foram secadas durante a noite com utilização de um equipamento denominado Secador Acumulador de Calor para Secagem no período Noturno (ACSN). Este equipamento foi construído segundo DANTAS (2007), para estudo da secagem solar e convencional de amêndoas de jaca, e foi modificado de acordo com DIÓGENES (2010), em estudo de secagem solar e convencional de sementes de abóbora. Este secador capta a energia solar com utilização de coletores solares e aquece a água que é utilizada na secagem noturna, pela passagem do fluido por trocador de calor. A água aquecida é armazenada em um reservatório termicamente isolado, sendo utilizada à noite

como fonte de calor para aquecer a câmara de secagem. A água quente circula durante o dia movida por uma bomba acionada por meio de energia fotovoltaica. Durante a noite a circulação se dá por sifão térmico, passando pelo trocador de calor em serpentina, localizado abaixo da bandeja contendo as amostras.

3.4.2.1 – Descrição das partes do secador ACSN

3.4.2.1.1 – Coletores solares

Utilizaram-se três coletores solares de placas planas (Figura 3.6). Esses coletores apresentam (isoladamente) um sistema de circulação de água composto de carcaça em alumínio, isolante térmico em lã de vidro, placa absorvedora de calor, trocador de calor em tubos de cobre e cobertura transparente de vidro com 3,0 mm de espessura. A carcaça possui formato regular, com dimensões de 1,72 m de comprimento por 1,02 m de largura e 0,10 m de profundidade. Na porção superior o fechamento da carcaça é feito com uma cobertura de vidro, utilizando-se selante flexível como adesivo. As dimensões das placas absorvedoras são de $1,7 \times 1,0$ m, sendo constituídas de trocadores de calor, feitos de chapa de alumínio, nos quais são fixados tubos de cobre. Os eixos longitudinais dos coletores são posicionados para o norte e inclinados na mesma direção em 7° , a fim de compensar a latitude local (aproximadamente 7° sul). Isso é justificado para favorecer a captação de energia nos meses de maior incidência solar.

UFCC - BIBLIOTECA

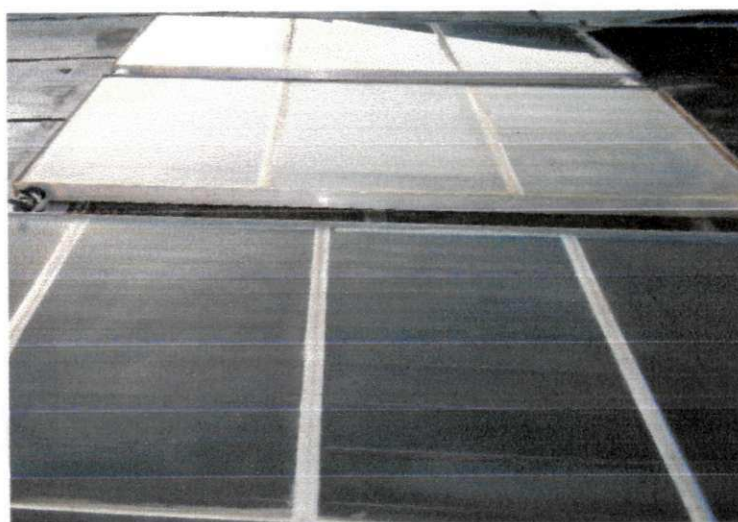


Figura 3.6 – Coletores solares

3.4.2.1.2 – Reservatório térmico

Para armazenamento da água aquecida nos coletores foi utilizado um reservatório térmico constituído de caixa de poliestireno expandido com capacidade para 150 L, que tem a função de evitar transferência de calor da água aquecida para o ambiente externo, revestido internamente com filme plástico, para manter a impermeabilidade, e um reservatório de plástico transparente acoplado para observação do nível e reposição da água perdida por evaporação (Figura 3.7).



Figura 3.7 – Reservatório térmico

3.4.2.1.3 – Câmara de secagem

A câmara de secagem utilizada foi protegida com uma chapa de zinco moldado em forma de chaminé, envolvida com lona plástica (polietileno) preta. A câmara é composta de chapa de zinco, em forma de coluna com seção quadrada, com isolamento térmico interno em poliestireno expandido com 30 mm de espessura. A coluna central possui dimensões de 0,5 m de altura, topo em tronco de pirâmide com 0,33 m de base e 0,26 m de altura. O interior da câmara tem lado de 0,33 m e suporte para bandeja (local onde as amostras estavam localizadas), em tela de alumínio. Possui ainda 0,13 m de elevação em relação ao solo, tronco de pirâmide no topo provido de abertura de 0,3 m de lado para a saída do ar de secagem e trocador de calor elaborado em serpentina de tubo de cobre com diâmetro interno de 3/4 de polegada, logo abaixo do local para instalação da bandeja, em

que a água quente circula e fornece calor para o processo de secagem (Figura 3.8). A secagem se realiza pelo aquecimento do ar por convecção natural.

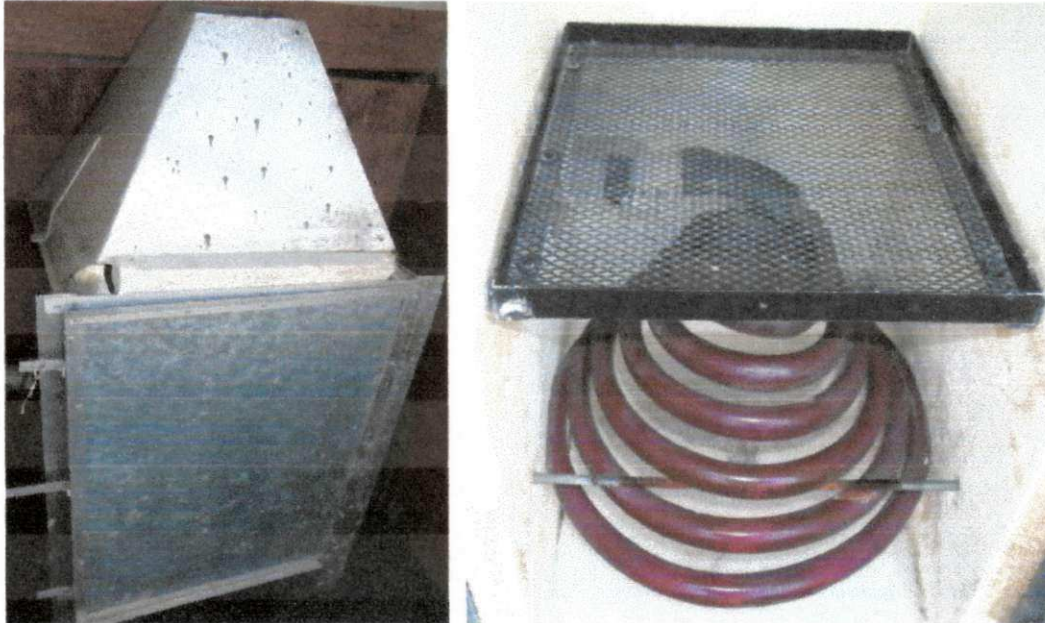


Figura 3.8– Câmara de secagem

3.4.2.1.4 – Bomba d’água e painel fotovoltaico

Consiste de um sistema de bombeamento auxiliar movido a energia fotovoltaica que objetiva incrementar a circulação da água pela tubulação, a qual é construída em nível ascendente, dos coletores ao reservatório térmico, para propiciar uma circulação baseada no princípio do sifão térmico (Figura 3.9). A bomba é inserida em uma derivação (“by-pass”), tendo a alimentação elétrica realizada diretamente na saída do painel fotovoltaico, sem uso de acumuladores, promovendo aumento de circulação nos momentos de maior radiação solar. Este sistema não foi utilizado por DANTAS (2007), no entanto foi uma melhoria inserida por DIOGENES (2010).

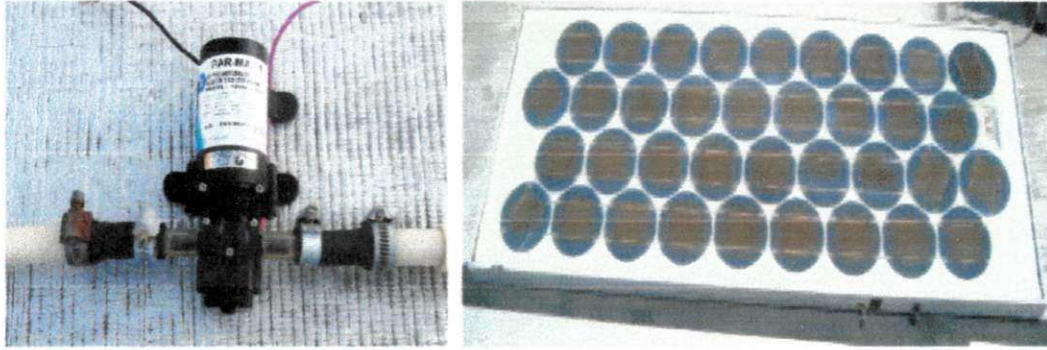


Figura 3.9 – Bomba d'água e painel fotovoltaico

3.4.2.1.5 – Montagem e funcionamento do secador solar ACSN

O secador ACSN foi montado com os componentes dos itens 3.4.2.1.1 ao 3.4.2.1.4, em alturas diferentes, de maneira que a água circulasse em dois circuitos independentes (Figura 3.10). Durante o dia a água teve circulação restrita ao circuito coletores/reservatório térmico. Para prosseguimento com as secagens durante a noite, a circulação neste circuito foi interrompida, sendo então liberada a circulação no circuito reservatório/câmara de secagem. Na circulação diurna, a circulação da água entre os coletores e o reservatório foi levada a efeito com base no princípio do sifão térmico e bomba fotovoltaica, onde a água aquecida nos coletores percorre a tubulação necessariamente ascendente desde a saída superior do coletor localizado na posição mais alta em relação aos demais, até a entrada do reservatório, localizada na posição mais alta de todo o circuito. Ao ascender pelo efeito convectivo produzido pelo aquecimento, é criado um sifão térmico que succiona a água fria da parte inferior do reservatório em direção à entrada do coletor localizado na posição mais baixa em relação aos demais, promovendo assim a circulação, onde a bomba d'água movida a energia fotovoltaica acelera o movimento da água, possibilitando aquecimento mais rápido da água nos coletores solares, com menores tempos de residência e consequente melhoria no aproveitamento dos eventos de sol aberto.

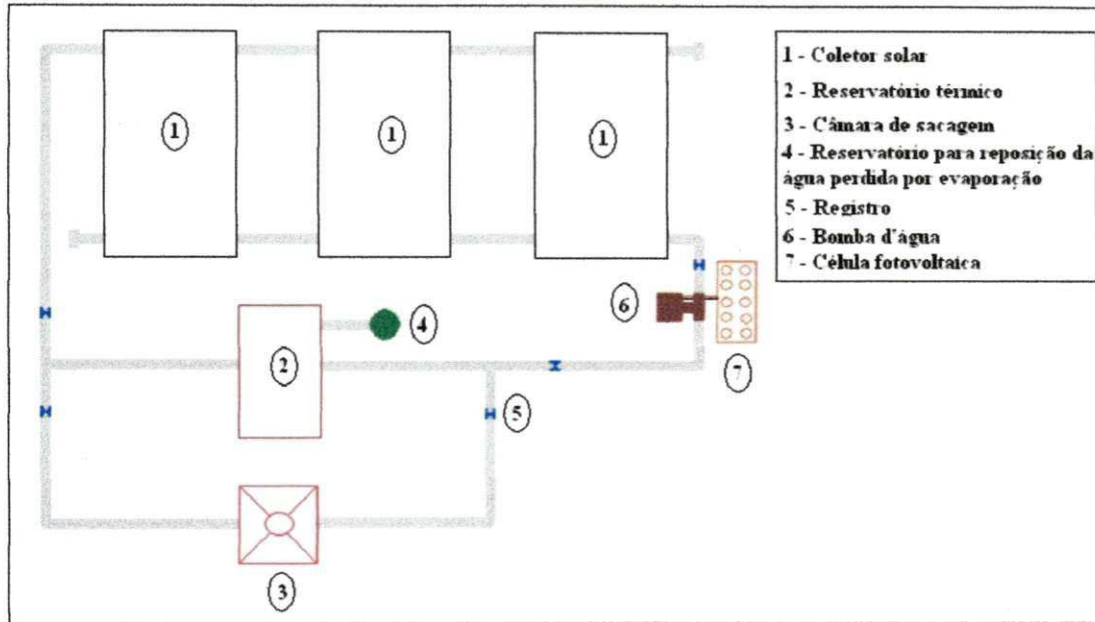


Figura 3.10 – Sistema completo do secador ACSN

Fonte: DIÓGENES (2010)

3.5 - Secagens

As amostras GCO, FCO, GSO e FSO foram submetidas a diferentes processos de secagem, utilizando-se estufa convencional com circulação forçada de ar e secagens utilizando-se energia solar.

3.5.1 – Secagem convencional

As amostras foram pesadas em balança com precisão 0,001 g. Os experimentos foram realizados com 4 repetições, de forma que cada repetição foi constituída de aproximadamente 15 g de amostra, fracionada em cestas montadas com tela de arame (10 x 10 x 3 cm) para as amostras GCO e GSO e recipientes de alumínio (diâmetro de 13,5 cm e altura de 1,5 cm) para as amostras FCO e FSO. Durante as secagens foram acompanhadas a temperatura e a umidade relativa.

Antes do início da secagem foi determinado o teor de água inicial das amostras (GCO, FCO, GSO e FSO), em estufa a 105 ± 3 °C durante 24 h, de acordo com a metodologia do Instituto Adolfo Lutz (BRASIL, 2005).

Para determinação das cinéticas de secagem, as amostras (GCO, FCO, GSO e FSO) foram pesadas e conduzidas à secagem convencional, onde a perda de água dos grãos residuais e das farinhas de urucum foi acompanhada até teor de água de aproximadamente 5% (b.u.), com pesagens das amostras em tempos regulares de 5, 10, 15, 30, 60, 120, 240 e 360 min. Quando as amostras atingiam teor de água de aproximadamente 5% (b.u.), verificado através da diferença de massa inicial e final, era determinado o seu exato teor de água em estufa a 105 °C por 24 h (BRASIL, 2005), a fim de se calcular os teores de água finais, segundo as condições de temperatura e umidade relativa durante execução dos experimentos.

As amostras GCO, FCO, GSO e FSO foram secadas em camada fina, pelo método em estufa com circulação forçada de ar nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 °C e velocidade do ar de secagem de aproximadamente 1 m s⁻¹.

3.5.2 - Secagem com energia solar

Os procedimentos antes do início das secagens por meio de energia solar foram os mesmos para as secagens convencionais (item 3.5.1.).

Para determinação das cinéticas de secagem, as amostras (GCO, FCO, GSO e FSO) foram pesadas e conduzidas a secagem solar, onde a perda de água dos grãos residuais e das farinhas de urucum foi acompanhada até teor de água de aproximadamente 5% (b.u.), com pesagens das amostras em intervalos de 15, 30, 60, 120, 180 e 240 min. Quando as amostras atingiam teor de água de aproximadamente 5% (b.u.), era determinado o teor de água exato das mesmas, em estufa a 105 °C durante 24 h (BRASIL, 2005), a fim de se calcular os teores de água finais.

As amostras GCO e GSO foram secadas em camada fina, utilizando-se energia solar de cinco formas:

- Secagem por exposição direta ao sol durante o dia, combinada com secagem no período noturno no secador ACSN (Acumulador de Calor para Secagem Noturna);
- Secagem por exposição direta ao sol durante o dia, sendo que à noite as amostras eram colocadas em bancada de laboratório (testemunha);
- Secagem em secador solar durante o dia;

- Secagem em secador ACSN (Acumulador de Calor para Secagem Noturna) durante a noite combinada com secagem em secador solar durante o dia;
- No período noturno as amostras ficavam em bancada do laboratório e durante o dia eram secadas em secador solar (testemunha).

Os grãos de urucum com e sem a camada de óleo conseguiram atingir o teor de água de aproximadamente 5% b.u. no decorrer da secagem durante o dia em secador solar, por isso a avaliação do fenômeno de secagem se deu apenas para o período diurno, no entanto, para avaliação da eficiência do secador ACSN efetuaram-se secagens noturnas iniciadas no secador ACSN e completadas com o secador solar.

As amostras FCO e FSO foram secadas utilizando-se energia solar de quatro formas:

- Secagem por exposição direta ao sol;
- Secagem em secador solar durante o dia;
- Secagem em secador ACSN (Acumulador de Calor para Secagem Noturna) durante a noite;
- No período noturno as amostras ficavam em bancada do laboratório (testemunha).

As farinhas dos grãos de urucum com e sem óleo atingiram o teor de água de aproximadamente 5% b.u. no decorrer da secagem durante o dia por exposição direta ao sol e em secador solar, assim a avaliação do fenômeno de secagem se deu apenas para o período diurno; no entanto, para avaliação da eficiência do secador ACSN foram efetuadas secagens noturnas em secador ACSN.

3.5.2.1 – Secagem por exposição direta ao sol

A secagem das amostras FCO e FSO foi iniciada aproximadamente às 8 h, em base de concreto recoberta com lona plástica (polietileno) preta, em que as amostras foram dispostas em bandejas e expostas ao sol.

3.5.2.2 – Secagem por exposição direta ao sol combinada com o secador ACSN

A secagem das amostras GCO e GSO foi iniciada aproximadamente às 8 h, em base de concreto recoberta com lona plástica (polietileno) preta, onde as amostras foram dispostas em bandejas e expostas ao sol. A partir das 17 h, metade das amostras foi colocada no secador ACSN, com acompanhamento da perda de água, até as 8 h da manhã seguinte, quando as amostras voltaram para exposição direta ao sol até as 17 h, retornando posteriormente ao secador ACSN. Este ciclo foi realizado até as amostras atingirem teor de água de aproximadamente 5% b.u. (5,26 b.s.).

Durante o processo de secagem no secador ACSN, foram monitoradas as temperaturas e umidades relativas no interior da câmara de secagem e ambiente com uso de termopares e higrômetros.

3.5.2.2.1 – Secagem por exposição direta ao sol durante o dia e à noite em abrigo (testemunha)

A outra metade das amostras do item 3.5.2.2, foi transferida para a bancada do laboratório, aí permanecendo durante a noite exposta às condições de temperatura e umidade relativa do ambiente, a fim de servir de testemunha em relação à outra metade, que foi colocada no secador ACSN, permanecendo até às 8 h do dia seguinte, retornando a partir desse horário para exposição direta ao sol até aproximadamente às 17 h.

3.5.2.3 – Secagem em secador ACSN no período noturno

A secagem das amostras FCO e FSO foi iniciada aproximadamente às 17 h, em secador solar descrito no item 3.4.2.1 onde as amostras foram dispostas em bandejas no interior da câmara de secagem.

3.5.2.3.1 – Secagem em secador ACSN no período noturno (testemunha)

A outra metade das amostras do item 3.5.2.3, foi transferida para a bancada do laboratório, onde permaneceu durante a noite exposta às condições de temperatura e umidade relativa do ambiente, a fim de servir de testemunha em relação à outra metade, que foi colocada no secador ACSN.

3.5.2.4 - Secagem em secador solar no período diurno

A secagem das amostras GCO, FCO, GSO e FSO foi iniciada aproximadamente às 8 h, em secador solar descrito no item 3.4.1, onde as amostras foram dispostas em bandejas no interior do secador.

Durante o processo de secagem no secador solar foram monitoradas as temperaturas no interior do secador e do ambiente com uso de termopares. Também foi medida a umidade relativa do ambiente com uso de higrômetro.

3.5.2.5 – Secagem em secador ACSN durante a noite e durante o dia secagem em secador solar

A secagem das amostras GCO e GSO foi iniciada aproximadamente às 17 h, em secador solar descrito no item 3.4.2.1 onde as amostras foram dispostas em bandejas no interior da câmara de secagem. A partir de aproximadamente 8 h as amostras foram colocadas no secador solar, onde se efetuou o acompanhamento da perda de água até teor de água de aproximadamente 5% b.u.

3.5.2.5.1 – Abrigo durante a noite e durante o dia secagem em secador solar (testemunha)

A outra metade das amostras do item 3.5.2.5 foi posta na bancada do laboratório, onde permaneceu durante a noite exposta às condições de temperatura e umidade relativa do ambiente, a fim de servir de testemunha em relação à outra metade, que foi colocada no secador ACSN, permanecendo até as 8 h do dia seguinte, sendo direcionada a partir desse horário para secagem em secador solar de uso diurno.

3.6 – Cinética de secagem

As razões de água e as curvas de razão de água em função do tempo de secagem foram calculadas e construídas a partir dos dados de perda de massa das amostras durante as secagens e dos teores de água determinados no final das mesmas. No cálculo da razão de água foi utilizada a Equação 3.1.

$$RX = \frac{X - X_e}{X_i - X_e} \quad (3.1)$$

em que:

RX – razão de água do produto (adimensional);

X – teor de água do produto;

X_i – teor de água inicial do produto; e

X_e – teor de água de equilíbrio do produto.

Os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão (Equação 2.4), Dois Termos (Equação 2.5), Midilli (Equação 2.6), Page (Equação 2.7) e Thompson (Equação 2.8) foram ajustados aos dados experimentais oriundos do processo de secagem, utilizando-se o programa computacional STATISTICA 5.0 por meio de análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, para as amostras secadas em estufa e com energia solar. Na avaliação da qualidade do ajuste dos modelos aos dados experimentais foram utilizados como critério a análise do coeficiente de determinação (R^2) e o desvio quadrático médio (DQM), de acordo com a Equação 3.2.

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum (RX_{pred} - RX_{exp})^2}{n}} \quad (3.2)$$

em que:

DQM – desvio quadrático médio;

RX_{pred} – razão de água predito pelo modelo;

RX_{exp} – razão de água experimental; e

n – número de observações.

4 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 – Secagem convencional em estufa

No Apêndice A, pode-se observar nas Tabelas A.1 a A.16, as taxas de secagem durante a cinética de desidratação convencional nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, dos grãos residuais de urucum com e sem a camada de óleo (GCO e GSO) e das farinhas dos grãos residuais de urucum, processadas com e sem a camada de óleo (FCO e FSO).

4.1.1 – Secagem convencional dos grãos residuais de urucum com óleo (GCO)

Na Figura 4.1 apresentam-se os dados experimentais da cinética de secagem das amostras GCO nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, expressos através da razão de água em função do tempo de secagem.

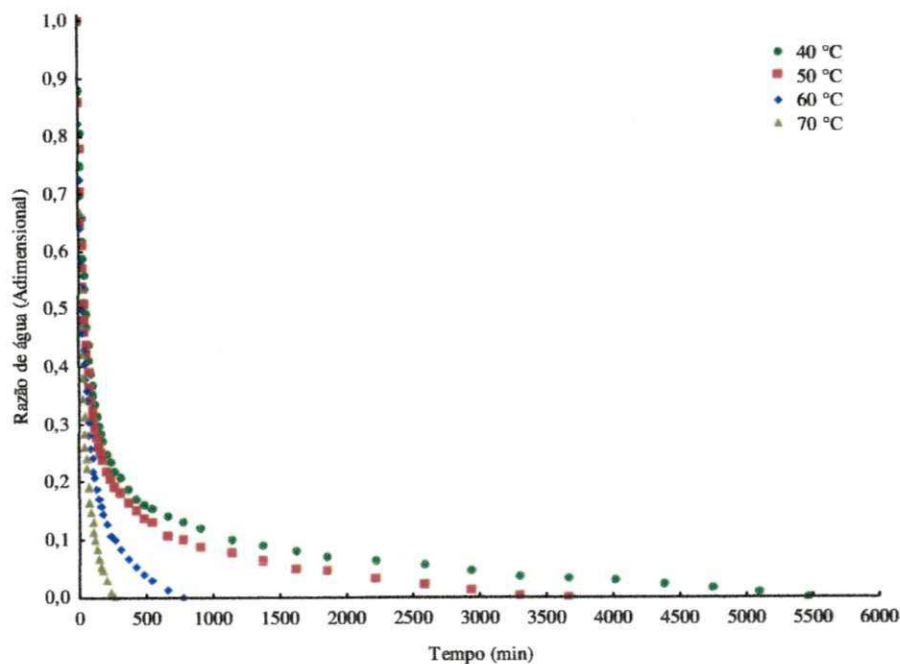


Figura 4.1 – Curvas de secagem convencional de GCO

Verifica-se que o tempo de secagem diminuiu com o aumento da temperatura evidenciando aumento na taxa de remoção de água do grão. Os tempos necessários para que as amostras de GCO atingissem o teor de água desejado (aproximadamente 5,0% b.u.) foram de 91,00 h (5460 min) na temperatura de 40 °C, 61,00 h (3660 min) na temperatura

de 50 °C, 13,00 h (780 min) na temperatura de 60 °C e 4,50 h (270 min) na temperatura de 70 °C. O teor de água inicial médio foi de $16,95 \pm 0,74\%$ b.u. (20,41% b.s.) e o teor final de $4,94 \pm 0,04\%$ b.u. (5,20% b.s.).

Esses resultados corroboram com os dados das pesquisas de vários autores que, ao trabalharem com produtos agrícolas, também verificaram a influência da temperatura na velocidade de secagem (SACILIK, 2007a; HACIHAFIZOGLU et al., 2008; ALMEIDA et al., 2009; ULLMANN et al., 2010; BORGES et al., 2011; BOTELHO et al. 2011; REIS et al., 2011; TAVAKOLIPOUR, 2011).

De acordo com SOUSA et al. (2011), o aumento da temperatura do ar de secagem faz com que haja uma maior taxa de remoção de água do grão devido a um maior gradiente de umidade entre a semente e o ar, decrescendo o tempo necessário para reduzir o teor de água até o valor desejado. CORRÊA et al. (2001) relatam que na secagem de produtos agrícolas existe uma clara dependência da velocidade da secagem com a temperatura do ar.

Observando-se os valores das taxas de secagem nas Tabelas A.1 a A.4 verifica-se apenas o período de taxa decrescente (terceiro período) que é quase sempre o único observado para a secagem de produtos agrícolas e alimentícios (PARK et al., 2001).

TAVAKOLIPOUR (2011) secou pistache nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, velocidade do ar de 2 m s^{-1} e espessura de 2 cm e obteve tempos de secagem de aproximadamente 440, 320 e 230 min, respectivamente, sendo que o último tempo de secagem é o mesmo para as temperaturas de 60 e 70 °C. Esses tempos de secagem são inferiores aos verificados no presente trabalho, com exceção do tempo necessário para secar os GCO na temperatura de 70 °C.

ROBERTS et al. (2008), secando sementes de uva em secador por convecção nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e velocidade do ar de secagem de $1,5 \text{ m s}^{-1}$, verificaram tempos de secagem de aproximadamente 290, 190 e 160 min, respectivamente, para as sementes da variedade Riesling, e 280, 200 e 180 min, aproximadamente, para as sementes da variedade Cabernet Franc, portanto, inferiores aos tempos de secagem de GCO.

RABÊLO et al. (2008) também verificaram redução no tempo de secagem ao desidratar amêndoas de pequi com teor de água inicial de 14% b.u. nas temperaturas de 60 e 70 °C. Os autores encontraram tempos de secagem de 80 min para a temperatura de 60 °C e 60 min para a temperatura de 70 °C e teores de água final de 8,20 e 10,20% b.u., respectivamente, para as secagens na maior e na menor temperatura.

KOYUNCU et al. (2004) obtiveram tempos superiores de secagem, quando comparados aos tempos dos GCO, ao desidratar castanhas nas temperaturas de 40, 50, 60 e

70 °C e velocidades do ar de secagem de 0,5 e 1,0 m s⁻¹. Esses autores verificaram tempos variando de 212,0 h, para a secagem a temperatura de 40 °C e velocidade do ar de 0,5 m s⁻¹, a 43,0 h, para a secagem a temperatura de 70 °C e velocidade do ar de 1,0 m s⁻¹.

ULLMANN et al. (2010) desidrataram sementes de pinhão-manso com teor inicial de água de 0,3 (decimal b.s.) nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60 °C, até que elas atingissem teor de água de 0,1 (decimal b.s.) e encontraram tempos de secagem de 12,5 h para a temperatura de 30 °C e 3 h para a temperatura de 60 °C, entretanto, os GCO demoraram maior intervalo de tempo para atingir o teor de água desejado.

Estão apresentados, na Tabela 4.1, os parâmetros de ajuste dos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da cinética de secagem em estufa com circulação forçada de ar dos GCO e seus respectivos coeficientes de determinação (R²) e desvios quadráticos médios (DQM).

Observa-se que todos os modelos matemáticos avaliados se ajustaram bem aos dados experimentais de secagem para a faixa de temperatura estudada, com coeficientes de determinação (R²) superiores a 0,98. De acordo com esses resultados, todos os modelos avaliados podem ser utilizados na predição da cinética de secagem de grãos residuais de urucum com óleo.

Observa-se que os modelos de Aproximação da Difusão e Dois Termos, por apresentarem os maiores valores de coeficientes de determinação (R²) e os menores valores de DQM, foram os melhores para estimar as curvas de cinética de secagem de GCO, para a faixa de temperatura de 40 a 70 °C. Esses modelos foram equivalentes para predição do fenômeno de secagem.

Tabela 4.1 - Parâmetros dos modelos Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da secagem em estufa de GCO

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM	
		a	b	k			
Aproximação da Difusão	40	0,698961	0,039910	0,023447	0,9928	0,0047	
	50	0,673114	0,051580	0,030997	0,9943	0,0042	
	60	0,557649	0,111951	0,052962	0,9976	0,0012	
	70	0,488705	0,160267	0,085982	0,9993	0,0020	
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	q		
Dois Termos	40	0,273872	0,665901	0,000802	0,019420	0,9952	0,0145
	50	0,303708	0,646534	0,001427	0,026589	0,9960	0,0122
	60	0,553386	0,419050	0,047146	0,005617	0,9981	0,0049
	70	0,509719	0,487603	0,013750	0,085152	0,9993	0,0015
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	n		
Midilli	40	1,061050	0,000007	0,117092	0,462539	0,9875	0,0218
	50	1,049441	0,000008	0,124561	0,472657	0,9891	0,0163
	60	1,019241	0,000019	0,096730	0,587400	0,9976	0,0038
	70	1,011871	-0,000006	0,099134	0,665451	0,9977	0,0018
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros		R^2	DQM		
		k	n				
Page	40	0,101124	0,477581	0,9830	0,0733		
	50	0,110826	0,485322	0,9864	0,0495		
	60	0,093262	0,589654	0,9970	0,0154		
	70	0,094597	0,675287	0,9976	0,0043		
Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros		R^2	DQM		
		a	b				
Thompson	40	-0,343674	0,208660	0,9831	0,0866		
	50	-0,326919	0,227146	0,9868	0,0583		
	60	-1,47902	0,298255	0,9991	0,0059		
	70	-2,78490	0,406741	0,9986	0,0062		

Esses resultados concordam com os de RESENDE et al. (2009a; 2010) que encontraram valores de coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 ao ajustarem o modelo de Dois Termos aos dados da secagem de clones de café. LEMA et al. (2007), RADÜNZ et al. (2010) e JITTANIT (2011) verificaram valores de coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 para o modelo de Dois Termos, ao estudarem a secagem de salsa, sálvia e sementes de abóbora. REIS et al. (2011) observaram que o modelo de Dois Termos apresentou valores de coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99, ao ajustarem-no aos dados da secagem de pimenta Cumari do Pará. CORRÊA et al. (2010) obtiveram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 ao ajustar os modelos de Aproximação da Difusão e Dois Termos aos dados experimentais da cinética de secagem de café nas temperaturas de 35, 40 e 45 °C e velocidade do ar de secagem de 4,0 m s⁻¹.

Verifica-se que o parâmetro “k” do modelo de Aproximação da Difusão aumentou com o aumento da temperatura. Nos ajustes do modelo de Dois Termos, este parâmetro aumentou com a elevação da temperatura de 40 até 60 °C, no entanto decresceu na temperatura de 70 °C. LEMA et al. (2007), REIS et al. (2011) e RADHIKA et al. (2011) observaram elevação no parâmetro “k” dos modelos de Aproximação da Difusão e Dois Termos, ao secar salsa, pimenta Cumari do Pará e *Eluesine coracana*, respectivamente.

Observa-se também que o parâmetro “n” dos modelos de Midilli e Page e o “b” do modelo de Aproximação da Difusão e Thompson, aumentaram com a elevação da temperatura. Para o modelo de Dois Termos (faixa de temperatura de 40 a 60 °C), o parâmetro “b” diminuiu com o aumento da temperatura. ROBERTS et al. (2008) verificaram aumento do parâmetro “n” do modelo de Page na secagem de sementes de uva, de duas variedades, nas temperaturas de 40 a 60 °C e RESENDE et al. (2008) observaram elevação nesse mesmo parâmetro ao desidratar duas variedades de feijão dos grupos vermelho e preto nas temperaturas de 35 e 45 °C. REIS et al. (2011), RADÜNZ et al. (2011), TAHERI-GARAVAND et al. (2011) e MARTINAZZO et al. (2007a) verificaram que o parâmetro “n” do modelo de Midilli também aumentou com o aumento da temperatura, durante a secagem de pimenta Cumari do Pará, carqueja, tomate e folhas de capim-limão, respectivamente.

O parâmetro “a” dos modelos de Aproximação da Difusão e Midilli diminuiu com o aumento da temperatura, comportamento também verificado por REIS et al. (2011), para o modelo de Aproximação da Difusão, na secagem de pimenta Cumaru do Pará. No

modelo de Dois Termos, o parâmetro “a” aumentou com a elevação da temperatura (faixa de 40 a 60 °C).

Na Figura 4.2 estão representados os ajustes do modelo matemático de Dois Termos aos dados experimentais da cinética de secagem de GCO para as temperaturas de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C. Este modelo foi, de modo geral, considerado o melhor para estimar as curvas de cinética de secagem de GCO.

Nas Figuras B.1 a B.4 (Apêndice B) estão representados graficamente os ajustes dos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Midilli, Page e Thompson, aos dados experimentais da secagem de GCO.

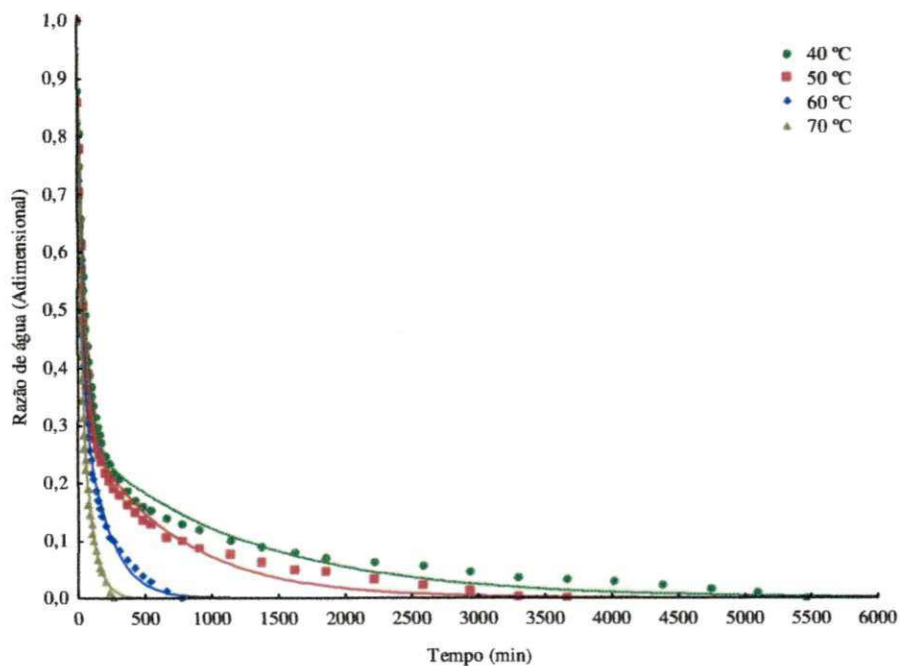


Figura 4.2 – Modelo de Dois Termos ajustado à cinética de secagem convencional do GCO

4.1.2 – Secagem convencional dos grãos residuais de urucum sem óleo (GSO)

A Figura 4.3 apresenta os dados experimentais da cinética de secagem das amostras GSO nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, expressos através da razão de água em função do tempo de secagem.

Observa-se que a perda de água é mais acentuada no início da secagem e vai declinando com o decorrer do tempo. Nota-se ainda que a temperatura influenciou diretamente no tempo de secagem, em que os grãos desidratados nas maiores temperaturas

demoraram menor intervalo de tempo para atingir o teor de água desejado. Conforme GOUVEIA et al. (2003) uma provável justificativa seria o aumento da taxa de secagem com o aumento da temperatura do ar.

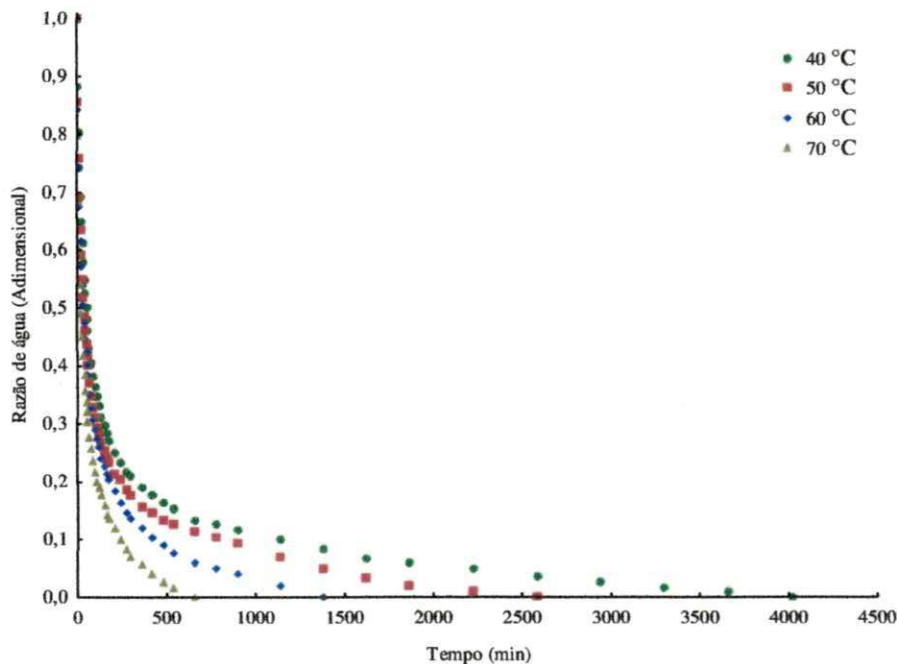


Figura 4.3 – Curvas de secagem convencional do GSO

Pode-se observar nas Tabelas A.5 a A.8 que as secagens ocorreram no período de taxa decrescente. Esse fenômeno pode ser explicado, pois no estudo da secagem de produtos agrícolas, especialmente grãos e sementes, sabe-se que esses produtos apresentam um período de taxa constante de secagem muito pequeno ou inexistente, em razão da ocorrência de uma diferença entre o teor de água superficial e o do interior do produto. Isto se deve, basicamente, às diferentes velocidades de migração das moléculas de água do interior para a periferia do produto e de evaporação das moléculas de água da superfície (CORRÊA et al., 2010)

Os tempos decorridos na cinética de secagem de GSO foram de 67,00 h (4020 min), 43,00 h (2580 min), 23,00 h (1380 min) e 11,00 h (660 min), para as temperaturas do ar de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente, em que o teor de água inicial médio foi de $19,48 \pm 1,30\%$ b.u. (24,19% b.s.) e o final de $4,88 \pm 0,07\%$ b.u. (5,13% b.s.).

GUINÉ & FERNANDES (2006) também observaram redução nos tempos de secagem ao desidratarem três variedades de castanha nas temperaturas de 70, 80 e 90 °C. No entanto, comparando-se os tempos de secagem das castanhas na temperatura de 70 °C

com a dos GSO na mesma temperatura; constata-se que os autores encontraram tempos inferiores, correspondendo a 7 h para as variedades Longal e Martainha e 8 h para a variedade Viana.

ALMEIDA et al. (2009) obtiveram tempos de secagem inferiores aos observados no presente trabalho, ao secar feijão adzuki com teor de água inicial de 1,15 (decimal b.s.) até o teor de 0,11 (decimal b.s.). Os feijões foram desidratados nas temperaturas de 30 a 70 °C e umidades relativas de 52, 28, 19, 13 e 6,8%, sendo os tempos de secagem de 49,0; 23,0; 16,5; 10,0 e 7,0 h para as temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

HACIHAFIZOGLU et al. (2008) também encontraram tempos inferiores de secagem ao desidratarem grãos de arroz em camada fina, nas temperaturas de 40, 45, 50, 55 e 60 °C, e velocidades do ar de secagem de 1,5 m s⁻¹. Os tempos de secagem foram de aproximadamente 8 h (temperatura de 40 °C), 6,5 h (temperatura de 45 °C), 6,0 h (temperatura de 50 °C), 5,5 h (temperatura de 55 °C), 5,0 h (temperatura de 60 °C).

SANTOS et al. (2001) secaram em camada fina malte verde de cevada, variedade BR-2, nas temperaturas de 55, 67 e 80 °C e encontraram tempos de secagem de aproximadamente 4,5 h (270 min), 2,75 h (165 min) e 1,67 h (100 min), para as temperaturas de 55, 67 e 80 °C, respectivamente.

SOUSA et al. (2011) desidrataram nabo forrageiro com teor de água inicial de 0,36 (decimal b.s.) até o teor de 0,09 (decimal b.s.), nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C e umidades relativas de 47,3, 26,2, 12,0, 10,1 e 5,1%, respectivamente, e verificaram tempos de secagem de 19 h (temperatura de 30 °C), 9,5 h (temperatura de 40 °C), 5,2 h (temperatura de 50 °C), 3,0 h (temperatura de 60 °C) e 2,5 h (temperatura de 70 °C), tempos estes inferiores aos verificados no presente trabalho.

DOYMAZ (2005) secou grãos de feijão verde nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e encontrou redução nos tempos de secagem com a elevação da temperatura, com aproximadamente 570 min para a temperatura de 50 °C, 360 min para a temperatura de 60 °C e 270 min para a temperatura de 70 °C. DOYMAZ (2009) também verificou redução nos tempos de secagem ao desidratar folhas de espinafre nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 e velocidade do ar de 1,2 m s⁻¹.

HII et al. (2012) desidrataram sementes de cacau e obtiveram tempos de secagem de 72,0, 52,0 e 26,0 h para as temperaturas de 28,2, 40,4 e 56,0 °C, respectivamente, e velocidade do ar de secagem de 1,6 m s⁻¹. CORRÊA et al. (2010) obtiveram tempos semelhantes de secagem, ao desidratarem café nas temperaturas de 35, 45 e 55 °C. Os

autores encontraram tempos de secagem de aproximadamente 70, 47 e 31 h, respectivamente, para as temperaturas de 35, 45 e 55 °C.

Ressalta-se que, segundo GOUVEIA et al. (1999), por tratar de materiais biológicos o fenômeno de secagem não pode ser generalizado, uma vez que os mesmos possuem características intrínsecas que podem diferenciá-los entre si. PARK et al. (2001) ainda afirmaram que as características específicas de cada produto, associadas às propriedades do ar de secagem e ao meio de transferência de calor adotado, determinam diversas condições de secagem, restando como fenômeno comum a qualquer condição de secagem a transferência de calor e de massa entre o ar de secagem e o produto.

Na Tabela 4.2 estão os parâmetros dos ajustes dos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson, aos dados experimentais da cinética de secagem em estufa com circulação forçada de ar dos grãos residuais de urucum sem óleo (GSO) e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Pode-se verificar que os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão e Dois Termos se equivaleram, sendo os que melhor se ajustaram aos dados experimentais da secagem de GSO, apresentando valores de coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 e valores baixos de DQM ($\leq 0,0096$). No entanto, os demais modelos matemáticos avaliados também resultaram em bons ajustes aos dados experimentais da secagem para a faixa de temperatura estudada, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,98 e baixos valores de DQM. De acordo com os resultados, todos os modelos avaliados podem ser utilizados na predição da cinética de secagem de GSO.

MENGES & ERTEKIN (2006) também encontraram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 para os modelos de Aproximação da Difusão e Dois Termos ao estudar a secagem de maçã nas temperaturas 60, 70 e 80 °C. Os autores ainda observaram que os modelos de Midilli e Page apresentaram ajustes superiores a 0,99, sendo que o modelo de Thompson apresentou ajuste superior a 0,99 somente na temperatura de 80 °C; nas demais temperaturas o ajuste foi superior a 0,98. HACIHAFIZOGLU et al. (2008) secaram grãos de arroz nas temperaturas de 40, 45, 50, 55 e 60 °C e verificaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 para os modelos de Dois Termos, Midilli e Page, sendo que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Tabela 4.2 - Parâmetros dos modelos Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da secagem em estufa de GSO

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		a	b	k		
Aproximação da Difusão	40	0,668950	0,045632	0,026241	0,9947	0,0002
	50	0,669305	0,049766	0,034488	0,9953	0,0032
	60	0,607956	0,079597	0,041659	0,9963	0,0004
	70	0,567817	0,098524	0,064906	0,9983	0,0007

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	q		
Dois Termos	40	0,641276	0,310331	0,022598	0,001084	0,9963	0,0096
	50	0,315386	0,642684	0,001602	0,030668	0,9966	0,0053
	60	0,592150	0,370312	0,036591	0,003095	0,9973	0,0060
	70	0,420960	0,558113	0,006226	0,060407	0,9986	0,0027

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	n		
Midilli	40	1,057460	0,000008	0,117511	0,463856	0,9879	0,0156
	50	1,047520	0,000012	0,133482	0,465528	0,9870	0,0128
	60	1,030120	0,000019	0,108577	0,527254	0,9948	0,0064
	70	1,018812	0,000010	0,120974	0,553183	0,9966	0,0035

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros		R^2	DQM
		k	n		
Page	40	0,102266	0,478144	0,9845	0,0525
	50	0,121280	0,473836	0,9842	0,0393
	60	0,102628	0,530659	0,9934	0,0245
	70	0,115619	0,558875	0,9963	0,0108

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros		R^2	DQM
		a	b		
Thompson	40	-0,288210	0,209587	0,9844	0,0636
	50	-0,177195	0,230358	0,9835	0,0509
	60	-0,731513	0,254758	0,9956	0,0218
	70	-0,991726	0,303560	0,9981	0,0056

DOYMAZ (2005; 2009), PONTES et al. (2009) e DOYMAZ & KOCAYIGIT (2011) verificaram ajustes com R^2 superiores a 0,99, para o modelo de Page, ao estudar secagem de feijão verde, folhas de espinafre, pimenta de cheiro e grãos de ervilha, respectivamente. Na secagem das amostras GSO os valores de R^2 , para o modelo de Page, foram superiores a 0,99 apenas nas temperaturas de 60 e 70 °C.

Observa-se que o parâmetro “k” do modelo de Aproximação da Difusão aumentou com o aumento da temperatura. HACIHAFIZOGLU et al. (2008), ao secarem arroz nas temperaturas de 40, 45, 50, 55 e 60 °C e velocidade do ar de secagem de 1,5 m s⁻¹, também verificaram aumento no parâmetro “k” do modelo de Aproximação da Difusão, para a faixa de temperatura de 40 a 55 °C.

O parâmetro “n” aumentou com a elevação da temperatura de secagem no modelo de Midilli e demonstrou tendência a aumentar também no modelo Page. DOYMAZ (2005) ao secarem feijão verde verificou que o parâmetro “n” do modelo de Page aumentou com o aumento da temperatura de secagem. Comportamento semelhante também foi constatado por MENGES & ERTEKIN (2006) que, ao desidratar maçãs nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C e velocidades do ar de 1,0, 2,0 e 3,0 m s⁻¹, observaram aumento do parâmetro “n” do modelo de Midilli com a elevação da temperatura de secagem, para os fluxos de ar de 1,0 e 2,0 m s⁻¹.

O parâmetro “a” do modelo de Midilli diminuiu com o aumento da temperatura de secagem. No modelo de Aproximação da Difusão percebe-se tendência do parâmetro “a” diminuir com a elevação da temperatura.

Pode-se verificar ainda que o parâmetro “b” do modelo de Aproximação da Difusão e Thompson também aumentou com a elevação da temperatura de secagem, comportamento verificado por HACIHAFIZOGLU et al. (2008) ao estudarem secagem de arroz nas temperaturas de 40, 45, 50, 55 e 60 °C e velocidade do ar de secagem de 1,5 m s⁻¹. Os referidos autores verificaram aumento do parâmetro “b” para o modelo de Aproximação da Difusão com a elevação da temperatura do ar de secagem, para a faixa de temperatura de 40 a 55 °C. RAFIEE et al. (2009) desidrataram grãos de soja nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar de secagem de 1,0 m s⁻¹ e também observaram que o parâmetro “b” de Aproximação da Difusão aumentou com a elevação da temperatura de secagem.

Verificam-se, na Figura 4.4, os ajustes do modelo matemático de Dois Termos aos dados experimentais da cinética de secagem de GSO para as temperaturas de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C. De acordo com os valores de coeficientes de determinação (R^2) este

modelo matemático, juntamente com o de Aproximação da Difusão, foi considerado o melhor para estimar as curvas de cinética de secagem de GSO.

No Apêndice B encontram-se representados graficamente os ajustes dos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Midilli, Page e Thompson, aos dados experimentais da secagem dos GSO nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C (Figuras B.5 a B.8).

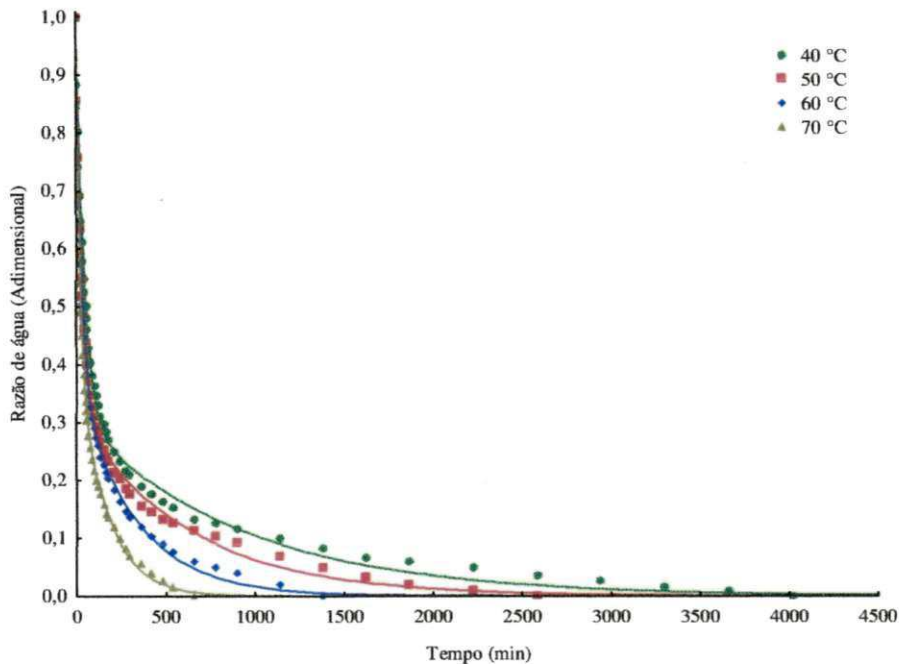


Figura 4.4 – Modelo de Dois Termos ajustado à cinética de secagem convencional do GSO

4.1.3 – Secagem convencional da farinha de grãos residuais de urucum com óleo (FCO)

Verificam-se, na Figura 4.5, os dados experimentais da cinética de secagem das farinhas dos grãos residuais de urucum com óleo (FCO) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, expressos através da razão de água em função do tempo de secagem.

O aumento da temperatura promoveu diminuição da razão de água, comportamento também verificado por SOUSA et al. (2006), ao secarem farelo de mamona, DIÓGENES (2010), ao desidratar farinha de grãos de abóbora, FIORENTIN et al. (2010), ao secarem bagaço de laranja, DANTAS (2007), ao desidratar farinha de amêndoas de jaca, WAUGHON & PENA (2008), ao secarem fibra residual do abacaxi, PENA &

MENDONÇA (2009), ao desidratarem fibra residual do maracujá e SILVA & VIOTTO (2010) ao secarem resíduos de limão siciliano para obtenção de farinha fibrosa.

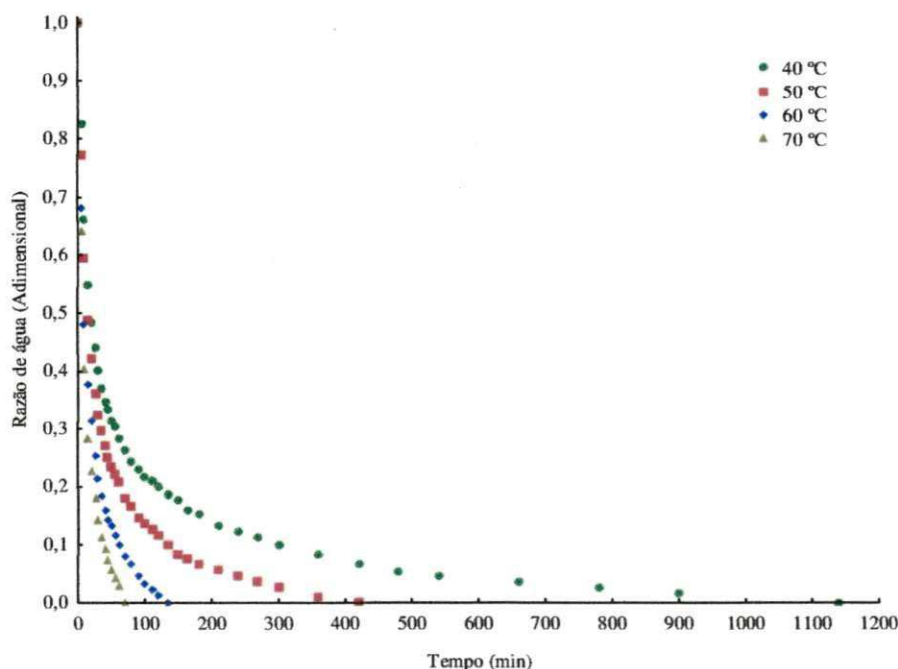


Figura 4.5 – Curvas de secagem convencional da FCO

Assim como verificado por FIORENTIN et al. (2010), no presente trabalho as curvas de secagem evidenciam que, no intervalo estudado, a influência da temperatura é evidente. Em todas as condições estudadas, as curvas de secagem apresentaram uma região linear nos primeiros minutos e em seguida o comportamento passa a ser polinomial. WAUGHON & PENA (2006) verificaram comportamento logarítmico nas curvas de secagem após o primeiro momento linear da desidratação de fibra de abacaxi.

As secagens das FCO foram procedidas durante 19 h (1140 min) na temperatura de 40 °C, 7 h (420 min) na temperatura de 50 °C, 2,25 h (135 min) na temperatura de 60 °C e 1,17 h (70 min) na temperatura de 70 °C. O teor de água inicial médio foi de $18,32 \pm 0,34\%$ b.u. (22,43% b.s.) e o final de $4,87 \pm 0,17\%$ b.u. (5,12 % b.s.).

SOUSA et al. (2006) ao secarem farelo de mamona com uma espessura da camada de 1 cm, encontraram tempos de secagem de 14 h para a temperatura de 50 °C, 9 h para a temperatura de 60 °C e 8 h para as temperaturas de 70 e 80 °C, tempos esses superiores aos verificados para a secagem das FCO. PENA & MENDONÇA (2009) notaram redução nos tempos de secagem com elevação da temperatura ao secarem fibra residual de maracujá nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar de $2,0 \text{ m s}^{-1}$. COSTA et al. (2011),

estudando a secagem de sementes de crambe, encontraram tempos de desidratação de 20,5, 8,5, 5,0, 5,0 e 2,75 h para as temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

Constatam-se, nas Tabelas A.9 a A.12, que todas as secagens das FCO ocorreram no período de taxa decrescente de secagem.

Apresentam-se na Tabela 4.3 os parâmetros dos ajustes dos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson, aos dados experimentais da cinética de secagem em estufa com circulação forçada de ar das FCO e seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

O modelo matemático de Dois Termos foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da secagem das FCO, apresentando valores de coeficientes de determinação (R^2) maiores que 0,99 e baixos valores de DQM.

Os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Midilli, Page e Thompson, também resultaram em bons ajustes aos dados experimentais da secagem das FCO, para a faixa de temperatura estudada, com coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,98, com exceção do ajuste para a temperatura de 60 °C do modelo de Aproximação da Difusão, em que o coeficiente de determinação (R^2) foi maior que 0,95. Todos os modelos avaliados também apresentaram baixos valores de DQM, podendo ser utilizados na predição da cinética de secagem das farinhas dos grãos residuais de urucum com a camada de óleo.

MEZIANE (2011) também encontrou valores de coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99, para a faixa de temperatura de 40 a 50 °C, ao ajustar o modelo de Dois Termos aos dados experimentais da secagem do resíduo de azeitona.

SOUSA et al. (2006) verificaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99, para os modelos matemáticos de Page e Thompson, ao estudar a cinética de secagem do farelo de mamona nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C, com espessura da camada de farinha de 1,0, 3,0 e 5,0 cm e velocidade do ar de secagem de 1 m s⁻¹, estando de acordo com os resultados verificados nas secagens das FCO para a faixa de temperatura de 50 a 70 °C.

WAUGHON & PENA (2008) encontraram ajustes superiores a 0,99, para os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli e Page, ao desidratar a fibra residual de abacaxi nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e velocidades do ar de secagem de 2,0, 2,5 e 3,0 m s⁻¹.

Tabela 4.3 - Parâmetros dos modelos Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da secagem em estufa das FCO

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		a	b	k		
Aproximação da Difusão	40	0,660328	0,064034	0,064230	0,9983	0,0060
	50	0,648376	0,111070	0,082559	0,9996	0,0010
	60	-0,103651	0,999974	0,054379	0,9589	0,0667
	70	0,527000	0,270177	0,157344	0,9985	0,0027

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	q		
Dois Termos	40	0,339597	0,659929	0,004112	0,064168	0,9983	0,0062
	50	0,351963	0,648905	0,009178	0,082736	0,9996	0,0008
	60	0,558609	0,443092	0,134128	0,025152	0,9994	0,0034
	70	0,475041	0,529131	0,042584	0,159001	0,9985	0,0039

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	n		
Midilli	40	1,034395	0,000020	0,169508	0,482689	0,9846	0,0089
	50	1,020618	0,000046	0,147226	0,583920	0,9921	0,0058
	60	1,006866	0,000002	0,147169	0,683293	0,9972	0,0018
	70	1,004735	0,000004	0,143329	0,776158	0,9969	0,0013

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros		R^2	DQM
		k	n		
Page	40	0,16170	0,48438	0,9830	0,0260
	50	0,14634	0,57738	0,9919	0,0194
	60	0,14451	0,68704	0,9972	0,0037
	70	0,14164	0,77871	0,9969	0,0028

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros		R^2	DQM
		a	b		
Thompson	40	-0,265021	0,291532	0,9832	0,0361
	50	-1,30123	0,379001	0,9948	0,0155
	60	-2,73323	0,533123	0,9984	0,0034
	70	-4,57151	0,706045	0,9978	0,0022

DIÓGENES (2010) observou coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 para os modelos de Aproximação da Difusão e Page, e baixos valores de DQM, durante a avaliação da cinética de secagem da farinha de grãos de abóbora nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C e velocidade do ar de secagem de aproximadamente 1,0 m s⁻¹. DANTAS (2007) verificou, para o modelo de Page, ajustes superiores a 0,99 ao secar amêndoas de jaca moídas nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C.

O parâmetro “k” dos modelos matemáticos de Midilli e Page diminuiu com a elevação da temperatura de secagem, no entanto, verifica-se que este parâmetro aumentou para o modelo de Dois Termos, para a faixa de temperatura de 40 a 60 °C. Observa-se ainda que o parâmetro “n” dos modelos de Midilli e Page aumentou com o aumento da temperatura. Comportamento semelhante também foi verificado por DOYMAZ (2005) que, ao ajustar o modelo de Page aos dados experimentais da secagem de feijão verde, observou diminuição no parâmetro “k”. SOUSA et al. (2006) constataram elevação no parâmetro “n”, para o modelo de Page, ao desidratar farelo de mamona. PACHECO et al. (2011) secaram cogumelos nas temperaturas de 50, 60, 70 e 80 °C e velocidades do ar de 1,5, 2,5 e 3,5 m s⁻¹, e verificaram que o modelo de Page, para a velocidade do ar de 1,5 m s⁻¹, também teve o parâmetro “n” aumentado com a elevação da temperatura de secagem. JITTANIT (2011) ajustou o modelo de Page aos dados experimentais da secagem de sementes de abóbora em secador de bandejas nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C e observou comportamento contrário, em que o parâmetro “n” diminuiu com a elevação da temperatura de secagem.

O parâmetro “b” do modelo de Thompson aumentou com a elevação da temperatura de secagem, entretanto foi observado comportamento inverso para esse parâmetro no modelo de Dois Termos, para a faixa de temperatura de 40 a 60 °C, onde a elevação da temperatura promoveu redução no parâmetro “b”. SOUSA et al. (2006), secando farelo de mamona com espessura de 3,0 cm, também verificaram aumento no parâmetro “b” do modelo de Thompson com a elevação da temperatura de secagem.

O parâmetro “a” do modelo de Midilli diminuiu com a elevação da temperatura. No modelo de Dois Termos o parâmetro “a” aumentou com a elevação da temperatura, para a faixa de temperatura de 40 a 60 °C, comportamento também observado por LEMA et al. (2007) que desidrataram salsa nas temperaturas de 35, 45, 55 e 65 °C e velocidade do ar de secagem de 1,0 m s⁻¹.

Na Figura 4.6 podem-se verificar as curvas geradas pelos ajustes do modelo matemático de Dois Termos aos dados experimentais da cinética de secagem das FCO para

as temperaturas de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C. Conforme o conjunto de valores de coeficientes de determinação (R^2) e DQM, este modelo matemático foi o melhor para estimar as curvas de cinética de secagem das FCO.

Estão apresentadas nas Figuras B.9 a B.12 do Apêndice B, as curvas de ajuste dos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da secagem das FCO nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.

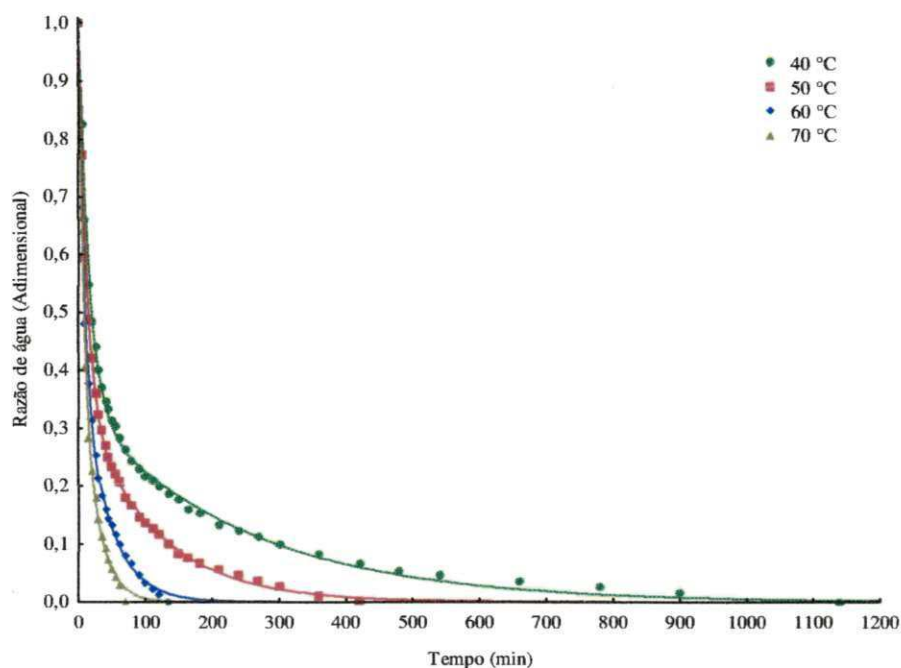


Figura 4.6 – Modelo de Dois Termos ajustado à cinética de secagem convencional da FCO

4.1.4 – Secagem convencional da farinha dos grãos residuais de urucum sem óleo (FSO)

Tem-se na Figura 4.7, os dados experimentais da cinética de secagem das farinhas dos grãos residuais de urucum sem óleo (FSO) nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, expressos através da razão de água em função do tempo de secagem.

Observam-se reduções nas razões de água com a elevação da temperatura de secagem, promovendo diminuição nos tempos de desidratação. As secagens das FSO foram levadas a efeito nos tempos de 15,00 h (900 min), 6,00 h (360 min), 1,83 h (110 min) e 0,83 h (50 min), para as temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, em que o teor de água

inicial médio foi de $20,95 \pm 0,71\%$ b.u. (26,50% b.s.) e o final de $4,92 \pm 0,04\%$ b.u. (5,17% b.s.).

Comparando-se os tempos de secagem das amostras FSO e FCO, verifica-se que os menores tempos de desidratação foram encontrados nas amostras FSO, evidenciando o efeito do óleo no aumento dos tempos de secagem das amostras.

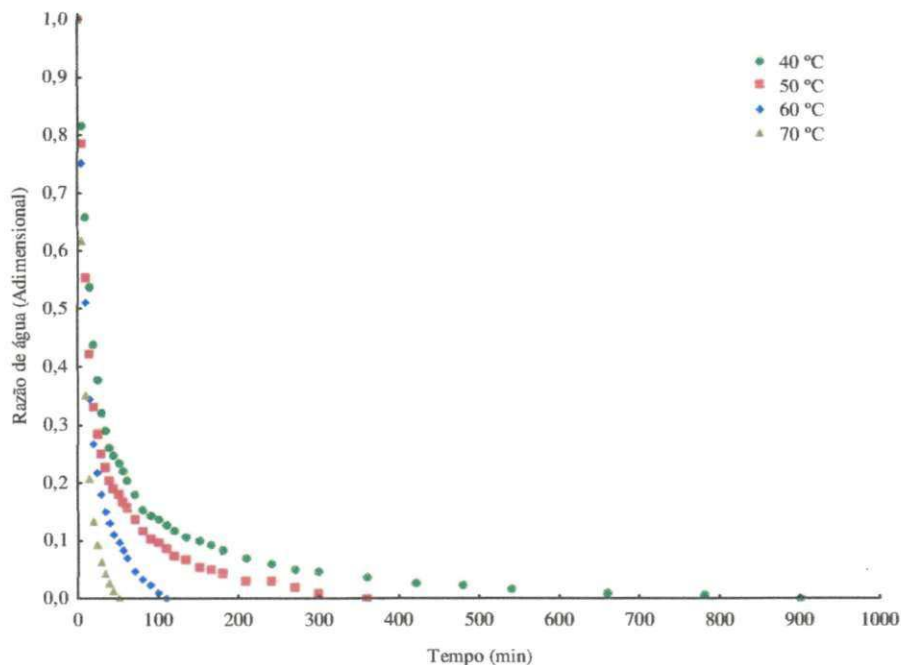


Figura 4.7 – Curvas de secagem convencional da FSO

RAFIEE et al. (2009) secaram grãos de soja nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C e também observaram reduções mais bruscas nas razões de água dos grãos que foram desidratados nas temperaturas mais elevadas.

PENA et al. (2008) desidrataram a fibra de maracujá para obtenção de farinha em estufa com circulação forçada de ar e verificaram tempos de secagem de 6,17 h (370 min), 5,67 h (340 min) e 2,50 h (150 min), para as desidratações nas temperaturas de 70, 80 e 90 °C, respectivamente.

FERREIRA & PENA (2010) desidrataram cascas residuais de maracujá amarelo em estufa nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C e também verificaram reduções nos tempos de secagem com o aumento da temperatura; os mencionados autores encontraram tempos de secagem de aproximadamente 600 min (10,00 h), 530 min (8,80 h) e 475 min (7,90 h), para as temperaturas de 60, 70 e 80 °C, respectivamente, tempos esses superiores aos verificados nas secagens das FSO.

CARLESSO et al. (2007), estudando a secagem de sementes de maracujá, verificaram que o tempo de secagem foi afetado diretamente pela temperatura do ar de secagem, onde as sementes desidratadas em temperaturas mais elevadas demoraram menos tempo para atingir o teor de água esperado. BOTELHO et al. (2011), secando fatias de cenoura nas temperaturas de 50, 60, 70, 80, 90 e 100 °C, observaram reduções nos tempos de desidratação com a elevação da temperatura de secagem.

LUANGMALAWAT et al. (2008) secaram arroz e verificaram tempos de secagem de 360, 270, 120, 90 e 70 min, para as temperaturas de 50, 60, 80, 100 e 120 °C, respectivamente, e velocidade do ar de 0,4 m s⁻¹.

PONTES et al. (2009) desidrataram pimenta de cheiro em camada delgada em secador estacionário tipo cabine, nas temperaturas de 50, 60 e 70 °C e velocidade do ar de secagem de 1,5 m s⁻¹, e verificaram tempos de secagem de 10, 2,7 e 2,3 h, para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, respectivamente.

Constata-se nas Tabelas A.13 a A.16, que todas as secagens das amostras FSO ocorreram no período de taxa decrescente de secagem.

Na Tabela 4.4 apresentam-se os parâmetros dos ajustes dos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson, aos dados experimentais da cinética de secagem em estufa com circulação forçada de ar das FSO com respectivos coeficientes de determinação (R²) e desvios quadráticos médios (DQM).

Observa-se que o modelo matemático de Dois Termos foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da secagem das FSO, com valores de coeficientes de determinação (R²) superiores a 0,99 e alguns dos mais baixos valores de DQM.

Os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Midilli, Page e Thompson, também apresentaram bons ajustes aos dados experimentais da secagem das FSO para a faixa de temperatura de 40 a 70 °C, com coeficientes de determinação (R²) superiores a 0,98 e baixos valores de DQM ($\leq 0,0531$), podendo ser utilizados na predição da cinética de secagem das farinhas dos grãos residuais de urucum sem óleo (FSO). Para a faixa de temperatura de 60 a 70 °C esses modelos matemáticos apresentaram ajustes com R² superiores a 0,99.

DANTAS (2007) e PONTES et al. (2009) obtiveram coeficientes de determinação superiores a 0,99 aos ajustar o modelo de Page aos dados experimentais das secagens de farinha de amêndoas de jaca e pimenta de cheiro, respectivamente.

Tabela 4.4 - Parâmetros dos modelos Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da secagem em estufa da FSO

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros			R^2	DQM
		a	b	k		
Aproximação da Difusão	40	0,762302	0,096279	0,058231	0,9991	0,0049
	50	0,738101	0,118750	0,083697	0,9975	0,0030
	60	0,726814	0,278129	0,089952	0,9964	0,0011
	70	-0,904403	0,999990	0,100244	0,9987	0,0079

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	q		
Dois Termos	40	0,766950	0,240638	0,059182	0,005677	0,9992	0,0035
	50	0,267320	0,751990	0,010104	0,086734	0,9978	0,0011
	60	0,288011	0,729806	0,025575	0,093880	0,9966	0,0038
	70	0,500795	0,500795	0,100392	0,100392	0,9987	0,0076

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	n		
Midilli	40	1,036666	0,000034	0,130465	0,611852	0,9845	0,0207
	50	1,026676	0,000088	0,144881	0,643837	0,9838	0,0114
	60	1,014911	0,000176	0,094404	0,859538	0,9929	0,0045
	70	1,002763	0,000157	0,100043	1,006326	0,9988	0,0014

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros		R^2	DQM
		k	n		
Page	40	0,123754	0,614582	0,9818	0,0531
	50	0,147495	0,626396	0,9812	0,0373
	60	0,097370	0,837686	0,9920	0,0194
	70	0,103205	0,988466	0,9987	0,0065

Modelo	Temp. (°C)	Parâmetros		R^2	DQM
		a	b		
Thompson	40	-2,01243	0,393909	0,9885	0,0454
	50	-2,07902	0,453315	0,9877	0,0312
	60	-6,53757	0,711061	0,9949	0,0092
	70	-27,0671	1,673649	0,9988	0,0030

COSTA et al. (2011) secaram sementes de crambe com teor de água inicial de 0,26 (decimal b.s.), nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, até teor de 0,09 (decimal b.s.) e verificaram que os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson produziram ajustes com R^2 superiores a 0,99.

LEMA et al. (2007) também observaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99, para os modelos matemáticos de Dois Termos, Midilli e Page, ao ajustarem os dados experimentais da cinética de secagem de salsa nas temperaturas de 35, 45, 55 e 65 °C e velocidade do ar de secagem 1 m s⁻¹; os referidos autores ainda verificaram, para o modelo de Aproximação da Difusão, ajuste superior a 0,99 para a faixa de temperatura de 45 a 65 °C.

Observa-se que o parâmetro “k” do modelo de Aproximação da Difusão aumentou com a elevação da temperatura. De acordo com CORRÊA et al. (2010), o parâmetro “k” tende a aumentar, pois maiores temperaturas acarretam maiores taxas de secagem, chegando ao teor de água de equilíbrio em menor tempo de submissão do produto ao ar de secagem.

Os parâmetros “n” dos modelos matemáticos de Page e Midilli aumentaram com o aumento de temperatura de secagem, comportamento também obtido por RAFIEE et al. (2009) ao ajustarem o modelo de Page aos dados experimentais da secagem de grãos de soja.

Os parâmetros “a” dos modelos de Aproximação da Difusão, Midilli e Thompson diminuíram com o aumento da temperatura do ar de secagem. No tocante ao parâmetro “b” dos modelos de Midilli (faixa de temperatura de 40 a 60 °C), Aproximação da Difusão e Thompson, verificam-se aumentos no mesmo com a elevação da temperatura de secagem. Pode-se ainda notar que o parâmetro “q” do modelo de Dois Termos também aumentou com a elevação da temperatura de secagem, comportamento igualmente verificado por JITTANIT (2011) ao desidratarem sementes de abóbora em secador de bandejas nas temperaturas de 60, 70 e 80 °C. RAFIEE et al. (2009), ao desidratarem grãos de soja nas temperaturas de 30, 40, 50, 60 e 70 °C, observaram que o parâmetro “a” do modelo de Aproximação da Difusão aumentou com a elevação da temperatura de secagem para a faixa de temperatura de 30 a 60 °C.

As curvas de ajuste do modelo matemático de Dois Termos aos dados experimentais da cinética de secagem das FSO para as temperaturas de secagem de 40, 50, 60 e 70 °C são apresentados na Figura 4.8. De acordo com os valores dos coeficientes de

determinação (R^2) e DQM, este modelo matemático foi o melhor para estimar as curvas de cinética de secagem das FSO.

No Apêndice B, Figuras B.13 a B.16, são apresentadas as curvas de ajuste dos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Midilli, Page e Thompson, aos dados experimentais da secagem das FSO nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C.

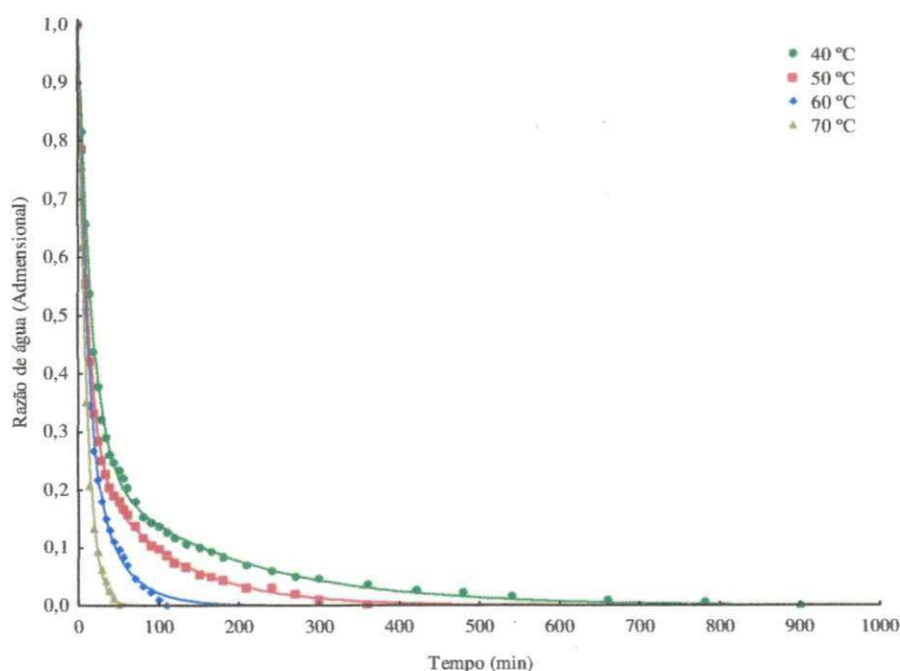


Figura 4.8 – Modelo de Dois Termos ajustado à cinética de secagem convencional da FSO

4.2 – Secagem solar

No Apêndice C, Tabelas C.1 a C.24, pode-se observar as taxas de secagem durante a cinética de desidratação dos grãos residuais de urucum com e sem a camada de óleo (GCO e GSO) e das farinhas dos grãos residuais de urucum processadas com e sem a camada de óleo (FCO e FSO), desidratadas por exposição direta ao sol, em secadores solar ou ACSN ou em associação com secagens noturnas e diurnas.

4.2.1 – Secagem por exposição direta ao sol

Estão apresentados, nas Figuras D.1 e D.2 (Apêndice D), os dados experimentais da cinética de secagem dos produtos FCO e FSO por exposição direta ao sol com as curvas de

secagem ajustadas pelos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson.

Observam-se, na Figura 4.5 os parâmetros dos ajustes dos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos pontos experimentais da cinética de secagem das FCO e FSO, por exposição direta ao sol, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Verifica-se que o modelo de Dois Termos foi o que melhor se ajustou às curvas de secagem do produto FCO e o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados das secagens do produto FSO. Ambos os modelos apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 e os mais baixos valores de DQM.

Os demais modelos matemáticos avaliados apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 e baixos valores de DQM, podendo também ser usados na predição da cinética de secagem dos produtos FCO e FSO.

Esses resultados estão de acordo com os obtidos por DOYMAZ (2011) que, ao ajustar os modelos de Dois Termos e Aproximação da Difusão aos dados da secagem por exposição direta ao sol de feijão verde, encontrou coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99; o referido autor ajustou os modelos de Page e Midilli às curvas de secagem e verificou ajustes superiores a 0,98. SOBUKOLA et al. (2007) verificaram valores de R^2 superiores a 0,99, para os modelos de Page e Midilli, ao estudarem a secagem por exposição ao sol de folhas de *Vernonia anyadalina* e *Ocimum viride*, sendo que os ajustes para os modelos de Aproximação da Difusão foram superiores a 0,97 para as folhas de *V. anyadalina* e superiores a 0,95 para as folhas de *O. viride*. AKPINAR (2006) também observou valores de R^2 superiores a 0,99 ao ajustar os modelos de Page, Dois Termos e Aproximação da Difusão aos dados experimentais da cinética de secagem de manjerição e salsa sob exposição direta ao sol. RONO et al. (2009), desidratando sementes de amaranto (*Amaranthus cruentus*) por exposição direta ao sol, verificaram ajuste superior a 0,99 para o modelo de Page. MIDILLI & KUCUK (2003) secaram pistache com casca por exposição direta ao sol e também verificaram valores de R^2 superiores a 0,99 para os modelos de Dois Termos e Page.

Tabela 4.5 - Parâmetros dos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem das FCO e FSO por exposição direta ao sol

Modelo	Produto	Parâmetros			R^2	DQM	
		a	b	k			
Aproximação da Difusão	FCO	0,844822	0,179140	0,028818	0,9991	0,0017	
	FSO	-0,048003	0,167385	0,165561	0,9971	0,0034	
Modelo	Produto	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	q		
Dois Termos	FCO	0,154284	0,844490	0,005142	0,028740	0,9991	0,0014
	FSO	0,503938	0,503938	0,026744	0,026753	0,9967	0,0076
Modelo	Produto	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	n		
Midilli	FCO	1,004859	0,000074	0,040849	0,846432	0,9967	0,0053
	FSO	1,002040	-0,000078	0,024530	1,016603	0,9972	0,0005
Modelo	Produto	Parâmetros		R^2	DQM		
		k	n				
Page	FCO	0,046506	0,807230	0,9947	0,0264		
	FSO	0,022573	1,042301	0,9970	0,0023		
Modelo	Produto	Parâmetros		R^2	DQM		
		a	b				
Thompson	FCO	-7,63232	0,472211	0,9969	0,0150		
	FSO	-2632,08	8,360260	0,9967	0,0052		

Nas Figuras 4.9 e 4.10 pode-se verificar os pontos experimentais das curvas de secagem das FCO e FSO desidratadas por exposição direta ao sol. Ambas as secagens foram iniciadas aproximadamente às 08:00 h da manhã e foram processadas até que as farinhas (FCO e FSO) atingissem o teor de água desejado, de aproximadamente 5,0% b.u. (5,26% b.s.), sendo encerradas aproximadamente às 16:30 e 12:00 h, para os produtos FCO e FSO, respectivamente. Os valores médios dos parâmetros termodinâmicos do ambiente para as secagens dos produtos FCO e FSO estão apresentados no Apêndice E (Tabela E.1).

Observa-se, na Figura 4.9, a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem do produto FCO por exposição direta ao sol. Durante a secagem a temperatura média do ambiente variou de 21,90 a 30,00 °C e a umidade relativa variou de 50,00 a 92,00%. O tempo de secagem para que o produto FCO atingisse o teor de água desejado foi de 7,0 h (420 min).

Na Tabela C.1 observa-se que a perda de água da amostra FCO durante a secagem se deu no período de taxa decrescente de secagem. Segundo CORRÊA et al. (2007) o processo de secagem de um produto pode ser dividido em um período de velocidade constante e em outro de velocidade decrescente.

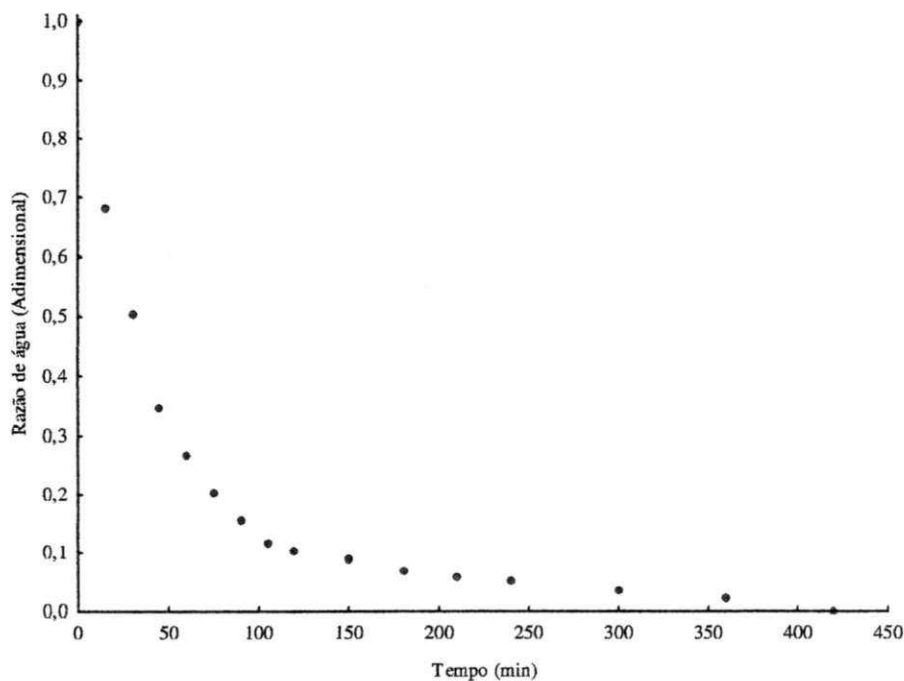


Figura 4.9 – Secagem da FCO por exposição direta ao sol

Pode-se verificar, na Figura 4.10, a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem do produto FSO por exposição direta ao sol. Observa-se que o tempo de secagem foi de 2,5 h (150 min), sendo inferior ao tempo de secagem verificado para o produto FCO. Conforme constatado na cinética de secagem convencional das FCO e FSO, o óleo presente nos produtos FCO pode ter contribuído para elevação do tempo de secagem e, conseqüentemente, diminuição do tempo de desidratação do produto FSO, além das condições atmosféricas durante as desidratações. No decorrer da secagem do produto FSO,

a temperatura média do ambiente variou de 23,30 a 30,10 °C e a umidade relativa média oscilou de 53,00 a 90,00%.

Na Tabela C.2 verifica-se ausência de um período de taxa constante de secagem, onde a secagem ocorreu quase que exclusivamente no período de taxa decrescente.

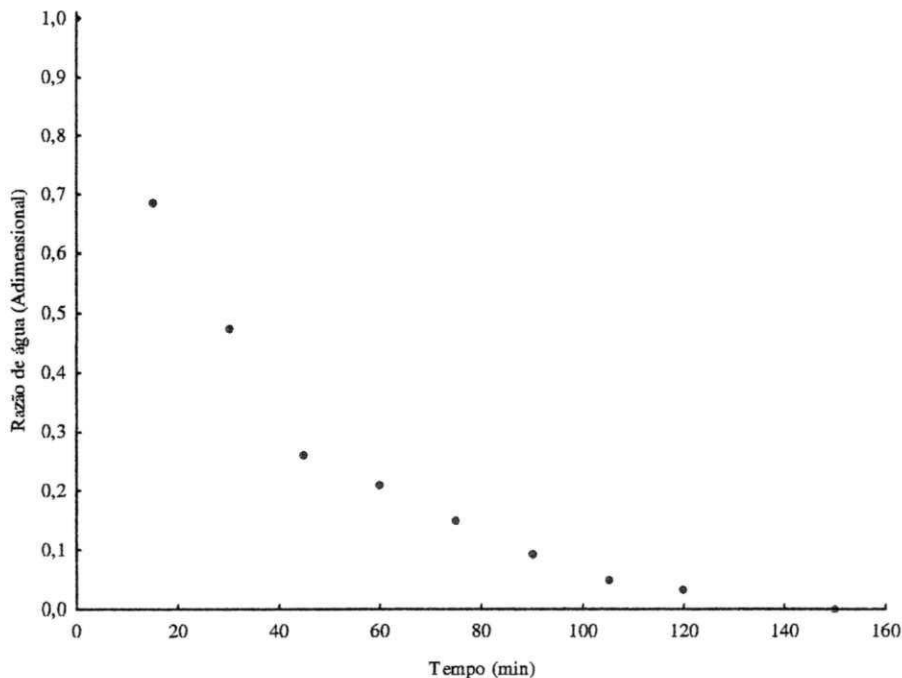


Figura 4.10 – Secagem da FSO por exposição direta ao sol

RONOH et al. (2009), estudando a secagem de sementes de amaranho em camada fina por exposição direta ao sol, verificaram tempo de 6,0 h de secagem para que as sementes atingissem o teor de água final de 7,0% b.s., partindo do teor de água inicial de 64,0% b.s., tempo este inferior ao necessário para que o produto FCO atingisse o teor de água de 5,0% b.u. Durante a realização da secagem das sementes de amaranho, ocorreu variação da temperatura de 22,6 a 30,4 °C e da umidade relativa de 25,0 a 52,0%.

AKPINAR (2006) desidratou salsa, manjeriço e hortelã por exposição direta ao sol e também verificou tempos de secagem próximos ao do produto FCO, correspondendo a aproximadamente 6,5 h. Durante a realização dos experimentos o autor verificou radiação solar e velocidade do vento variando de 195 a 796 W m⁻² e 0,09 a 0,9 m s⁻¹, respectivamente. A temperatura do ambiente variou de 30,0 a 36,5 °C, sendo que as secagens foram iniciadas às 10:30 h e encerradas às 17:00 h.

AL-MAHASNEH et al. (2007) secaram grãos de gergelim em camada fina por exposição direta ao sol e constataram tempo de secagem de aproximadamente 3,0 h (180 min), tempo este próximo à secagem por exposição direta ao sol do produto FSO e inferior ao tempo de secagem do produto FCO. A secagem dos grãos de gergelim foi iniciada às 10:00 h da manhã até as 14:30 da tarde, quando a temperatura e a umidade relativa do ambiente variaram de 27 a 31 °C e de 16 a 20%, respectivamente, e a velocidade do vento variou entre 2,10 e 14,60 Km.h⁻¹.

Apresentam-se, na Tabela 4.6, os teores de água inicial e final das secagens dos produtos FCO e FSO por exposição direta ao sol. Verifica-se que as amostras FCO e FSO perderam 78,27 e 81,90% de água, respectivamente, para atingir o teor de água desejado, ou seja, próximo a 5,0% b.u. O produto FCO iniciou a secagem com teor de água de 23,47% b.s. (19,01% b.u.), chegando ao final da secagem a um teor de 5,10% b.s. (4,85% b.u.). Quanto ao produto FSO, o teor de água inicial foi de 26,63% b.s. (21,03% b.u.) e o teor final foi de 4,82% b.s. (4,60% b.u.).

Tabela 4.6 – Teores de água inicial e final das amostras FCO e FSO desidratadas por exposição direta ao sol

Produto	Secagem por exposição direta ao sol		
	Teor de água (% b.s.)		Perda de água (%)
	Inicial	Final	
FCO	23,47	5,10	78,27
FSO	26,63	4,82	81,90

AL-MAHASNEH et al. (2007) secaram grãos de gergelim por exposição direta ao sol com teor inicial de água de 68,0% b.u. (212,5% b.s.), até teor final de aproximadamente 4,0% b.u. (4,17% b.s.), e obtiveram redução no conteúdo de água de aproximadamente 98,04% (b.s.). Esta redução no conteúdo de água é superior à verificada para os produtos FCO e FSO.

RONOH et al. (2009) desidrataram sementes de amaranto com teor de água inicial de aproximadamente 64,0% b.s. (39,02% b.u.) até teor de água final de 7,0% b.s. (6,54% b.u.), e encontram redução no conteúdo de água de aproximadamente 83,82%, concordando com as reduções nos conteúdos de água das FCO e FSO.

DOYMAZ (2011), estudando a secagem por exposição ao sol de feijão verde, verificou redução no conteúdo de água de 97,93% (calculada em b.s.), superior à

quantidade de água perdido pelos produtos FCO e FSO. Os teores de água inicial e final dos grãos de feijão verde foram de 89,5% b.u. (852,38% b.s.) e 15,0% b.u. (17,65% b.s.), respectivamente.

De maneira geral, a secagem por exposição direta ao sol dos produtos FCO e FSO, foi suficiente para baixar o teor de água inicial de aproximadamente 25,0% b.s. de ambos os produtos, até um teor de aproximadamente 5,0% b.s., sendo um teor seguro para estocagem e comercialização. AL-MAHASNEH et al. (2007) estudaram secagem de gergelim ao sol e afirmaram que a secagem por exposição direta também foi suficiente para baixar o conteúdo de água a níveis seguros, podendo ser um dos métodos de desidratação utilizados para secagem dos grãos de gergelim. O método de secagem por exposição direta ao sol também se mostrou eficiente e seguro para as secagens dos produtos FCO e FSO.

4.2.2 – Secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN ou com abrigo no período noturno

Pode-se observar, nas Figuras D.3 a D.8 do Apêndice D, a representação gráfica dos dados experimentais da cinética de secagem dos produtos GCO e GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN ou abrigo no período noturno, e as curvas de secagem ajustadas pelos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson.

Pode-se observar na Tabela 4.7, os parâmetros dos ajustes dos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da cinética de secagem dos produtos GCO e GSO, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM). No tocante à testemunha (identificadas pelas letras “T1” ou “T2”) os ajustes foram feitos por trechos, onde se ajustaram os modelos matemáticos aos dados da cinética de secagem referente ao primeiro período diurno e, posteriormente, aos dados do segundo período diurno de desidratação.

Tabela 4.7 – Parâmetros de diferentes modelos com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem dos GCO e GSO por exposição direta ao sol, combinada com secagem no secador ACSN ou colocados em abrigo no laboratório

Modelo	Produto	Parâmetros			R^2	DQM	
		a	b	k			
Aproximação da Difusão	GCO	0,833281	0,102037	0,011974	0,9985	0,0020	
	GCO (T1)	0,029008	0,025363	0,448040	0,9982	0,0018	
	GCO (T2)	-289,969	0,997085	0,012320	0,9836	0,0370	
	GSO	0,823908	0,085662	0,015677	0,9973	0,0098	
	GSO (T1)	0,033108	0,023522	0,514488	0,9989	0,0085	
	GSO (T2)	-285,826	0,997590	0,011371	0,9870	0,0351	
Modelo	Produto	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	q		
Dois Termos	GCO	0,833692	0,167904	0,012023	0,001232	0,9985	0,0015
	GCO (T1)	0,801045	0,190727	0,010612	0,017794	0,9981	0,0031
	GCO (T2)	0,529409	0,529409	0,006765	0,006767	0,9603	0,0356
	GSO	0,807029	0,165696	0,014797	0,001268	0,9980	0,0027
	GSO (T1)	0,492865	0,492288	0,012364	0,012364	0,9986	0,0056
	GSO (T2)	0,655658	0,377355	0,006545	0,006544	0,9730	0,0393
Modelo	Produto	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	n		
Midilli	GCO	1,024842	0,000031	0,025414	0,777304	0,9912	0,0298
	GCO (T1)	0,995796	-0,000013	0,013847	0,961349	0,9981	0,0004
	GCO (T2)	0,983781	-0,000441	0,001286	1,248099	0,9941	0,0021
	GSO	1,016811	0,000017	0,046172	0,680984	0,9900	0,0196
	GSO (T1)	0,988971	-0,000020	0,013558	0,978518	0,9988	0,0009
	GSO (T2)	0,958106	-0,000104	0,001122	1,313531	0,9911	0,0012
Modelo	Produto	Parâmetros		R^2	DQM		
		k	n				
Page	GCO	0,026532	0,757502	0,9860	0,0537		
	GCO (T1)	0,013805	0,964358	0,9981	0,0048		
	GCO (T2)	0,000681	1,431704	0,9864	0,0358		
	GSO	0,047746	0,667290	0,9869	0,0585		
	GSO (T1)	0,014022	0,975553	0,9985	0,0109		
	GSO (T2)	0,001459	1,287562	0,9933	0,0366		
Modelo	Produto	Parâmetros		R^2	DQM		
		a	b				
Thompson	GCO	-6,66294	0,293355	0,9914	0,0337		
	GCO (T1)	-47,9138	0,763186	0,9980	0,0069		
	GCO (T2)	-5722,69	6,009492	0,9553	0,0086		
	GSO	-3,79623	0,281475	0,9910	0,0416		
	GSO (T1)	-159,435	1,419961	0,9984	0,0104		
	GSO (T2)	-4653,94	5,418081	0,9714	0,0230		

T1 = testemunha primeiro dia; T2 = testemunha segundo dia

Verifica-se que o modelo de Dois Termos foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da secagem por exposição direta ao sol, no período diurno, combinada com secagem em secador ACSN, no período noturno, dos produtos GCO e GSO. Este modelo apresentou valores de R^2 superiores a 0,99 e os menores resultados de DQM. Para os produtos GCO (T1) e GCO (T2), o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou às curvas de secagem referentes aos primeiro e segundo dias de desidratação, respectivamente. Os modelos de Aproximação da Difusão e Midilli foram os que melhor se ajustaram aos dados da secagem referentes ao produto GSO (T1) e os modelos de Thompson e Midilli foram os que melhor se ajustaram aos dados do produto GSO (T2).

Observa-se que todos os modelos matemáticos avaliados apresentaram valores de R^2 superiores a 0,95, podendo ser utilizados na predição da cinética de secagem dos produtos GCO e GSO. Esses resultados estão de acordo com as pesquisas de DANTAS (2007) e DIÓGENES (2010) que, ao estudarem a secagem por exposição direta ao sol combinada com secagens em secador ACSN de amêndoas de jaca e grãos de abóbora, também verificaram que todos os modelos aplicados poderiam ser utilizados para prever as secagens dos produtos avaliados, cujos ajustes foram superiores a 0,96 e 0,80, respectivamente. CLEMENT et al. (2009) investigaram a secagem ao sol de sementes de cacau fermentadas com temperatura e umidade relativa do ambiente variando de 29,66 a 31,66 °C e 57,50 a 76,50%, respectivamente, e obtiveram ajustes superiores a 0,94 para os modelos de Dois Termos, Page e Thompson. AKPINAR (2008) ajustou os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da cinética de secagem de amora e verificou que os modelos avaliados apresentaram ajustes superiores a 0,99, com exceção dos modelos de Page e Thompson, que apresentaram valores de R^2 superiores a 0,98.

Estão apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12 os pontos experimentais das curvas de secagem das amostras GCO e GSO, secadas por exposição direta ao sol no período diurno, combinada com secagens em secador ACSN no período noturno.

A primeira etapa de secagem, correspondendo à desidratação por exposição direta ao sol, foi iniciada aproximadamente às 08:00 h e encerrada aproximadamente às 17:00 h, quando as amostras foram conduzidas a desidratação ao secador ACSN ou foram abrigadas em laboratório; a segunda etapa de secagem, correspondendo à desidratação em secador noturno (ACSN) foi iniciada aproximadamente às 17:00 h e encerrada aproximadamente às 08:00 h da manhã do dia seguinte; a terceira etapa de secagem, correspondendo ao segundo dia de desidratação por exposição direta ao sol, foi iniciada aproximadamente às 08:00 h e

encerrada aproximadamente às 13:00 h para o produto GCO (quando as amostras atingiram aproximadamente 5,0% b.u.), no entanto a desidratação por exposição ao sol do produto GCO foi encerrada aproximadamente às 17:00 h, quando os produtos retornaram ao secador ACSN no período noturno (quarta etapa de desidratação), sendo a secagem encerrada aproximadamente às 23:00 h, quando o produto GSO atingiu o teor de água desejado (aproximadamente 5,0% b.u.).

Os valores médios dos parâmetros termodinâmicos do ambiente externo nos períodos noturnos e diurnos estão apresentados no Apêndice E (Tabelas E.2). Pode-se verificar ainda, na Tabela E.3 do Apêndice E, as temperaturas e umidades relativas médias no interior do secador ACSN durante o período de secagens dos produtos GCO e GSO.

Verifica-se, na Figura 4.11, a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem do produto GCO por exposição direta ao sol no período diurno, combinada com a secagem em secador ACSN no período noturno. Neste período a testemunha permaneceu em abrigo na bancada do laboratório, com a finalidade de se avaliar a eficiência do secador ACSN.

Durante a realização das secagens a temperatura e a umidade relativa do ambiente externo variaram de 22,20 a 31,10 °C e 38,00 a 87,00%, respectivamente, para a secagem diurna e de 20,70 a 27,70 °C e 58,00 a 91,00%, respectivamente, para a secagem noturna. A temperatura e a umidade relativa no interior do secador ACSN variaram de 40,10 a 50,20 °C e 52,60 a 70,00%, respectivamente. O tempo necessário para que o produto GCO atingisse o teor de água desejado foi de 28,00 h (1680 min).

Como se constata na Figura 4.11, no período diurno, referente ao primeiro dia de secagem, ambas as amostras perderam água em uma velocidade próxima, o que é facilmente justificado, haja vista que ambas as amostras estavam expostas às mesmas condições ambientais durante a secagem por exposição direta ao sol; ao final do primeiro dia de secagem, 480 min após o início das mesmas, os valores médios de RX eram de 0,1053 e 0,0770 para as amostras GCO e GCO (T1), respectivamente.

No período noturno o produto GCO foi acondicionado no secador ACSN para prosseguimento da desidratação e a testemunha foi colocada em abrigo, exposto às condições ambientais do interior do laboratório, descritas anteriormente; observou-se, então, que as amostras GCO continuaram a perder água com o tempo de secagem, no entanto a testemunha absorveu água no período noturno. De acordo com FAGUNWA et al. (2009), o teor de água reabsorvido pela testemunha pode ser atribuído à elevada umidade relativa do ambiente (76,07%) e à natureza higroscópica dos grãos. Ao final da secagem



noturna (aos 1320 min do seu início), o valor médio de RX da amostra GCO era de 0,0459, evidenciando continuidade do processo de secagem no período noturno, enquanto que a testemunha apresentou valor médio de RX de 0,1173, valor este superior ao observado no início de sua secagem. Esse resultado comprova que o secador ACSN foi eficiente para prosseguimento da secagem no período noturno.

No período diurno, referente ao segundo dia de secagem por exposição direta ao sol (após 1320 min do início da secagem), o produto GCO continuou a perder água com o decorrer do tempo de secagem. A testemunha GCO (T2) que havia absorvido água no período noturno também perdeu água com o prosseguimento da desidratação. A secagem foi interrompida quando o produto GCO atingiu o teor de água desejado, aos 1680 min (28,00 h) do início da desidratação.

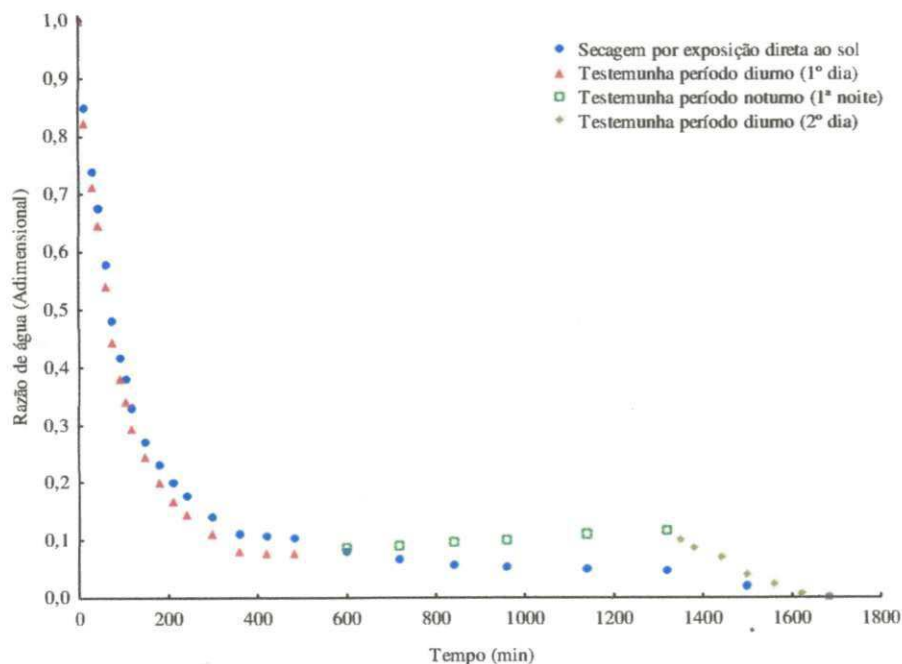


Figura 4.11 – Secagem dos GCO por exposição direta ao sol combinada com secador ACSN ou abrigo no período noturno (testemunha)

Encontra-se na Figura 4.12 a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem do produto GSO por exposição direta ao sol no período diurno, combinada com a secagem em secador ACSN no período noturno.

A temperatura e a umidade relativa do ambiente externo, no período das secagens, variaram de 22,80 a 32,10 °C e 34,00 a 85,00%, respectivamente, para a secagem diurna e de 21,00 a 29,30 °C e 49,00 a 93,00%, respectivamente, para a secagem noturna. A

temperatura e a umidade relativa no interior do secador variaram de 36,80 a 48,10 °C e 39,70 a 52,90%, respectivamente. Verifica-se que o tempo necessário para que o produto GSO atingisse o teor de água de aproximadamente 5,0% b.u. foi de 36,00 h (2160 min).

No período diurno, referente ao primeiro dia de secagem, tal como verificado para as amostras GCO e GCO (T1), os produtos GSO e GSO (T1) perderam água em velocidades próximas. Ao final do primeiro dia de secagem (480 min), os valores médios de RX eram de 0,0974 para o produto GSO e de 0,0764 para a testemunha GSO (T1).

Durante o período noturno, referente ao primeiro dia de secagem, o produto GSO foi conduzido ao secador ACSN e a testemunha colocada em abrigo. Conforme observado para as amostras com óleo e sua testemunha, o produto GSO continuou a perder água com o tempo de secagem, no entanto a testemunha absorveu água no período noturno, sendo que, ao final da secagem noturna (1320 min), os valores médios de RX da amostra GSO e sua testemunha eram de 0,0436 e 0,1051, atestando continuidade do processo de secagem para a amostra GSO e interrupção da desidratação, acompanhada de aumento no conteúdo de água, da testemunha.

No período diurno, referente ao segundo dia de secagem por exposição direta ao sol, observa-se que as amostras GSO e GSO (T2) continuaram perdendo água com o prosseguimento da secagem, fato este também observado para os produtos com óleo e sua testemunha, uma vez que os produtos estavam nas mesmas condições ambientais quando expostos ao sol. A secagem foi interrompida aos 1800 min e as amostras direcionadas para o secador ACSN ou abrigo.

No tocante ao período noturno do segundo dia de secagem em secador noturno, o produto GSO, que foi acondicionado no secador ACSN, continuou a perder água, no entanto sua testemunha absorveu água. A secagem foi encerrada quando o produto GSO atingiu teor de água desejado, aos 2160 min (36,00 h) do início da secagem.

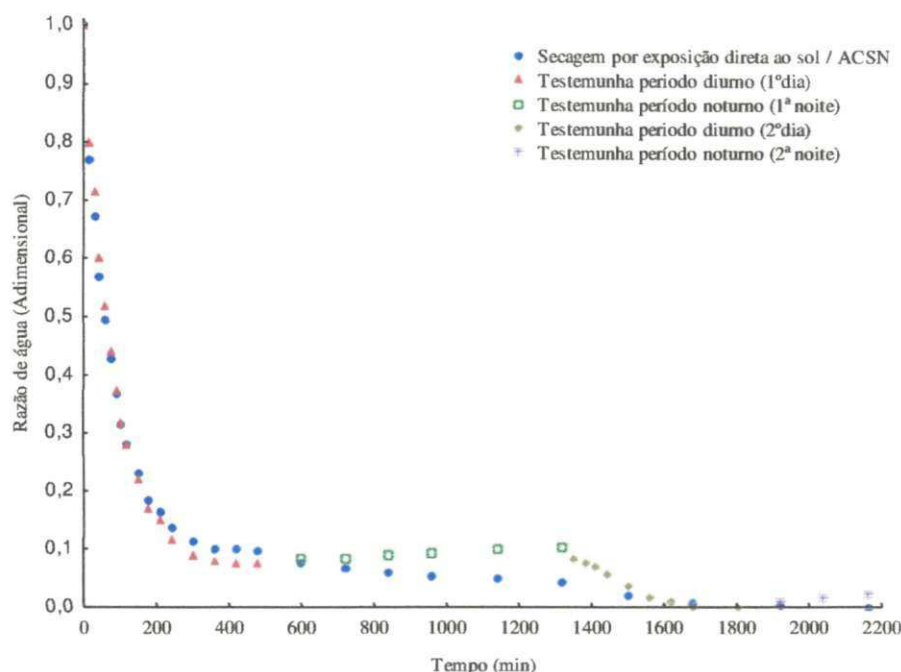


Figura 4.12 – Secagem dos GSO por exposição direta ao sol combinada com secador ACSN ou abrigo no período noturno (testemunha)

Podem-se observar na Tabela 4.8, os teores de água inicial e final dos produtos GCO e GSO referentes à primeira etapa de secagem, em que as amostras foram desidratadas por exposição direta ao sol.

Nota-se que os produtos GCO iniciaram a secagem com teor de água inicial de 20,77% (b.s.) e ao final da desidratação apresentavam teores de 6,45% (b.s.), para a amostra secada por exposição direta ao sol e 6,92% (b.s.) para a testemunha. Neste primeiro momento da secagem ambos os produtos foram secados por exposição ao sol, o que justifica os teores de água finais próximos. Nota-se ainda que a porcentagem de perda de água foi próxima para os produtos GCO expostos ao sol e testemunha, correspondendo a 68,95 e 66,68%, respectivamente, uma vez que ambas as amostras estavam sob as mesmas condições ambientais.

No tocante aos produtos GSO, verifica-se que as amostras iniciaram a secagem por exposição direta ao sol com teor de água inicial de 21,26% (b.s.), sendo que este foi reduzido para 6,62 e 6,36% para as amostras GSO e testemunha, respectivamente. Da mesma forma do produto GCO, ambas as amostras de GSO iniciaram este primeiro período de secagem com desidratação por exposição ao sol, o que justifica os teores de água finais próximos. Ao término desta etapa, os produtos GSO e testemunha sofreram porcentagens de perdas de 68,86 e 70,04%, respectivamente.

Comparando-se os produtos GCO e GSO, observa-se que a percentagem de perda de água foi semelhante em todos os tratamentos, tanto para as amostras quanto para as testemunhas.

Tabela 4.8 – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na primeira etapa de secagem: amostras desidratadas por exposição direta ao sol

Produto	Secagem por exposição direta ao sol			Testemunha*		
	Teor de água (% b.s.)		Perda de água (%)	Teor de água (% b.s.)		Perda de água (%)
	Inicial	Final		Inicial	Final	
GCO	20,77	6,45	68,95	20,77	6,92	66,68
GSO	21,26	6,62	68,86	21,26	6,37	70,04

*Neste primeiro período de secagem a testemunha também foi desidratada por exposição direta ao sol.

DOYMAZ (2011) secou quiabo em camada fina por exposição direta ao sol com temperatura variando de 33 a 46 °C, onde o ambiente atingiu as temperaturas mais elevadas das 10:00 h às 16:00 h, e verificou teor de água no início da desidratação ao sol de 88,7% b.u. (785,0% b.s.) e no final de 15% b.u. (17,7% b.s.), correspondendo a 97,75% de perda de água calculada em base seca. Esta redução é bem superior ao verificado na primeira etapa das secagens dos produtos GCO e GSO, posto que a secagem do quiabo foi efetuada em 100 h.

DESAI et al. (2009) desidrataram pimenta por exposição direta ao sol com temperatura, radiação solar e umidade relativa variando de 26,0 a 33,5 °C, 70,0 a 102,0 mW.cm⁻² e 43,0 a 65,0%, respectivamente, e observaram redução no conteúdo de água de 96,49% (calculada em b.s.), onde os teores de água inicial e final da pimenta foram de 76,5% b.u. (325,5% b.s.) e 10,25% b.u. (11,4% b.s.), respectivamente, referentes a 48 h de secagem; no entanto, quando se consideram apenas 8 h de secagem, tempo este correspondente ao intervalo da primeira etapa de desidratação das amostras GCO e GSO por exposição ao sol, o teor de água da pimenta sobe para 58,28% b.u. (139,7% b.s.) e a percentagem de perda de água cai para 57,09% (calculada em b.s.), sendo inferior à redução obtida para as amostras GCO e GSO.

SREEKUMAR et al. (2008) estudaram a secagem de fatias de abóbora com 5,0 mm de espessura por exposição direta ao sol, com temperatura do ambiente variando de 31,1 a 33,7 °C e secagens se iniciando às 09:30 h e encerrando às 16:30 h, e constataram redução

no conteúdo de água de 99,43% (calculado em b.s.). O teor de água inicial da abóbora foi de 95,0% b.u. (1900% b.s.) e o teor final de 9,7% b.u. (10,7% b.s.), sendo que este teor final corresponde ao intervalo de tempo de 7 h de desidratação por exposição ao sol, intervalo de tempo semelhante ao necessário na primeira etapa de secagem das amostras GCO e GSO ao sol.

Uma vez que as amostras GCO e GSO não haviam atingido o teor de água desejado na primeira etapa da secagem (exposição direta ao sol), o processo de desidratação foi continuado à noite. A Tabela 4.9 apresenta os teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO (e testemunha) referente à segunda etapa de secagem, correspondendo à desidratação no período noturno, onde as amostras GCO e GSO foram conduzidas ao secador ACSN, permanecendo durante toda a noite enquanto as testemunhas foram direcionadas ao abrigo na bancada do laboratório. Observa-se que as amostras GCO e GSO continuaram a perder água durante a noite, com redução nos conteúdos de água de 13,02 e 11,33%, respectivamente, enquanto as testemunhas absorveram água.

Tabela 4.9 – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na segunda etapa de secagem: amostras desidratadas em secador ACSN e colocadas em abrigo no período noturno (testemunha)

Produto	Secagem em secador ACSN			Testemunha		
	Teor de água (% b.s.)		Perda de água (%)	Teor de água (% b.s.)		Ganho de água (%)
	Inicial	Final		Inicial	Final	
GCO	6,45	5,61	13,02	6,92	7,46	7,80
GSO	6,62	5,87	11,33	6,37	6,78	6,43

Como as amostras GCO e GSO não haviam atingido o teor de água de aproximadamente 5,0% b.u. (5,26% b.s.) ao final da secagem em secador ACSN, deu-se continuidade à terceira etapa de secagem, onde as amostras voltaram para desidratação ao sol. Observam-se na Tabela 4.10 os teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO e testemunha, referentes à terceira etapa de desidratação, ocorrida através de secagem por exposição direta ao sol.

Pode-se verificar que o produto GCO atingiu o teor de água final desejado (4,98% b.s.) ao término da secagem, com redução de 11,23% no conteúdo de água; a testemunha, apesar de ter perdido maior porcentagem de água (20,91%), uma vez que na etapa anterior

absorveu água durante a noite, atingiu teor de água de 5,90% b.s. ao final da desidratação. Comparando-se os teores de água final da amostra GCO e sua testemunha, verifica-se diferença de 0,92% entre as amostras evidenciando que o principal responsável por esta diferença foi a utilização do secador ACSN durante o período noturno.

Tabela 4.10 – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na terceira etapa de secagem: amostras desidratadas por exposição direta ao sol

Produto	Teor de água (% b.s.)					
	Secagem por exposição direta ao sol			Testemunha*		
	Inicial	Final	Perda de água (%)	Inicial	Final	Perda de água (%)
GCO	5,61	4,98	11,23	7,46	5,90	20,91
GSO	5,87	5,34	9,03	6,78	5,30	21,83

*Neste terceiro período de secagem a testemunha também foi desidratada por exposição direta ao sol.

SREEKUMAR et al. (2008) estudaram a secagem de fatias de abóbora por exposição direta ao sol e verificaram, para o segundo dia de desidratação ao sol, uma redução de 51,02% no conteúdo de água (calculada em base seca), para as amostras iniciando a secagem com 9,7% b.u. (10,74% b.s.) até 5,0% b.u. (5,26% b.s.), correspondendo a 5 h de secagem.

DESAI et al. (2009) obtiveram redução de 27,63% no conteúdo de água (calculada em base seca) em 6 h de secagem por exposição direta ao sol, correspondendo ao segundo dia de desidratação, ao secarem pimenta com teores de água inicial e final de 55,56% b.u. (125,02% b.s.) e 47,50% b.u. (90,48% b.s.), respectivamente,

Quanto às amostras GSO, observam-se reduções no conteúdo de água de 9,03% para a amostra GSO e de 21,83% para sua testemunha; ao final da desidratação os teores de água final das amostras GSO e testemunha eram de 5,34 e 5,30% b.s., respectivamente; em razão de não ter atingido o teor de água desejado ao final da secagem, foi necessário uma quarta etapa de desidratação, agora no período noturno, no secador ACSN.

Verificam-se na Tabela 4.11 os teores de água inicial e final do produto GSO e testemunha, referente à quarta etapa de secagem, ocorrida no período noturno no secador ACSN. Nota-se que o produto GSO perdeu água durante sua permanência no secador ACSN, no entanto a testemunha absorveu água; ao final da secagem o teor de água da amostra sem óleo havia reduzido de 5,34% b.s. para 5,26% b.s., atingindo o teor de água

desejado, com redução nesse conteúdo de 1,50%. No entanto, a testemunha teve seu conteúdo de água aumentado de 5,30 para 5,61%; comparando-se os teores de água final da amostra GSO e da testemunha, verifica-se diferença de 0,35% entre as amostras.

Tabela 4.11 – Teores de água inicial e final das amostras GSO na quarta etapa de secagem: amostras desidratadas em secador ACSN e colocadas em abrigo no período noturno (testemunha)

Teor de água (% b.s.)						
Produto	Secagem em secador ACSN			Testemunha		
	Inicial	Final	Perda de água (%)	Inicial	Final	Ganho de água (%)
GSO	5,34	5,26	1,50	5,30	5,61	5,83

De maneira geral, o secador ACSN reduziu os conteúdos de água das amostras GCO e GSO, onde as amostras que foram secadas por exposição direta ao sol no período diurno, combinada com secagens em secador ACSN no período noturno, apresentaram os menores teores de água ao final das desidratações.

4.2.3 – Secagem em secador ACSN

Nas Figuras D.9 a D.12, Apêndice D, apresentam-se os dados experimentais da cinética de secagem das amostras FCO e FSO em secador ACSN ou abrigo no período noturno e as curvas de secagem ajustadas pelos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson.

Na Tabela 4.12 apresentam-se os parâmetros de ajuste dos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson, aos dados da cinética de secagem das amostras FCO e FSO no secador ACSN de uso noturno, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios. A letra “T”, inserida após os nomes de algumas amostras, é indicativo de que a amostra era a testemunha, ou seja, durante o período noturno foi colocada em abrigo na bancada do laboratório.

Tabela 4.12 – Parâmetros dos diferentes modelos ajustados com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem das FCO e FSO em secador ACSN

Modelo	Produto	Parâmetros			R^2	DQM
		a	b	k		
Aproximação da Difusão	FCO	0,815367	0,288900	0,018446	0,9999	0,0009
	FCO (T)	0,148647	0,166241	0,028505	0,9995	0,0028
	FSO	-3,75648	0,899135	0,023300	0,9976	0,0122
	FSO (T)	-2,72109	0,900822	0,011018	0,9977	0,0135

Modelo	Produto	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	q		
Dois Termos	FCO	0,175139	0,821330	0,005189	0,018187	0,9999	0,0000
	FCO (T)	0,148169	0,847529	0,026775	0,004724	0,9995	0,0018
	FSO	0,508402	0,508402	0,014950	0,014926	0,9959	0,0000
	FSO (T)	0,498377	0,498377	0,007540	0,007549	0,9967	0,0150

Modelo	Produto	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	n		
Midilli	FCO	1,005308	0,000015	0,023806	0,887545	0,9992	0,0046
	FCO (T)	0,999999	-0,000022	0,012728	0,841408	0,9996	0,0001
	FSO	0,987024	0,000023	0,008093	1,136515	0,9977	0,0014
	FSO (T)	0,972145	-0,000013	0,004818	1,084305	0,9980	0,0010

Modelo	Produto	Parâmetros		R^2	DQM
		k	n		
Page	FCO	0,024020	0,882784	0,9989	0,0175
	FCO (T)	0,011685	0,861572	0,9994	0,0061
	FSO	0,009448	1,102193	0,9973	0,0098
	FSO (T)	0,006103	1,044794	0,9972	0,0163

Modelo	Produto	Parâmetros		R^2	DQM
		a	b		
Thompson	FCO	-13,8849	0,487335	0,9996	0,0075
	FCO (T)	-16,2726	0,335848	0,9982	0,0157
	FSO	-4358,70	7,999251	0,9956	0,0046
	FSO (T)	-4652,84	5,939441	0,9967	0,0156

T = testemunha

Verifica-se que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da cinética de secagem, com valores de R^2 superiores a 0,99 e os menores valores de DQM, exceto para o produto FCO, em que o modelo de Dois Termos foi o que melhor se ajustou; os outros modelos avaliados apresentaram coeficientes de determinação (R^2) superiores a 0,99 e baixos valores de DQM, podendo também ser usados na predição da cinética de secagem das amostras FCO e FSO em secador ACSN e em local abrigado, em condições ambientais.

Os resultados concordam com os obtidos por DIÓGENES (2010), que ao estudar a secagem de farinha de grãos de abóbora em secador ACSN combinada com desidratação por exposição ao sol, obteve ajustes superiores a 0,99 para os modelos de Aproximação da Difusão e Page. SANTOS et al. (2011) secaram feijão caupi verde em secador ACSN durante duas noites e verificaram valores de R^2 superiores a 0,98 para os modelos de Dois Termos, Midilli e Page, na primeira noite de secagem, e superiores a 0,99, para os mesmos modelos, na segunda noite de secagem. SACILIK (2007b) obteve ajuste superior a 0,99 para o modelo de Dois Termos e superior a 0,98, para o modelo de Page, ao desidratar sementes de abóbora em secador solar.

Notam-se nas Figuras 4.13 e 4.14 os pontos experimentais das curvas de secagem das farinhas dos grãos residuais de urucum com e sem óleo (FCO e FSO), desidratados em secador ACSN no período noturno. No tocante às testemunhas, no período noturno elas ficaram em abrigo na bancada do laboratório, expostas às condições ambientais.

As secagens foram iniciadas às 17:00 h e processadas até que as amostras FCO e FSO atingissem o teor de água desejado, de aproximadamente 5,0% b.u. (5,26% b.s.). Os valores médios dos parâmetros termodinâmicos do ambiente externo no período noturno, estão na Tabela E.4 do Apêndice E; verifica-se ainda no Apêndice E (Tabela E.5) as temperaturas e as umidades relativas médias no interior do secador ACSN durante o período de secagem das amostras FCO e FSO.

Observa-se, na Figura 4.13, a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem das amostras FCO em secador ACSN no período noturno. Neste período a testemunha permaneceu em abrigo na bancada do laboratório, com a finalidade de se avaliar a eficiência do secador ACSN; a temperatura e a umidade relativa do ambiente externo, durante o intervalo de realização da secagem noturna, variaram de 21,50 a 24,80 °C e 73,00 a 93,00%, respectivamente; a temperatura e a umidade relativa no interior do secador ACSN variaram de 49,60 a 40,20 °C e 45,50 a 79,30%, respectivamente.

Observa-se claramente que as amostras que foram desidratadas no secador ACSN durante o período noturno perderam água com maior velocidade que as amostras que permaneceram abrigadas na bancada do laboratório. Isso já era esperado, uma vez que durante a noite, o ambiente externo apresenta umidade relativa mais elevada e a temperatura mais baixa. No entanto, no interior do secador ACSN, a temperatura é mais elevada e a umidade relativa mais baixa que a do ambiente externo, o que favorece a remoção de água do produto. O tempo de secagem para que o produto FCO atingisse o teor de água desejado foi de 14,0 h (840 min), mas observa-se que no tempo de 420 min a razão de água já estava próxima de 0,02 e com teor de água de 5,24% b.u., enquanto que a testemunha, em igual tempo, apresentava razão de água superior a 0,10 e com teor de água de 14,08% b.u.

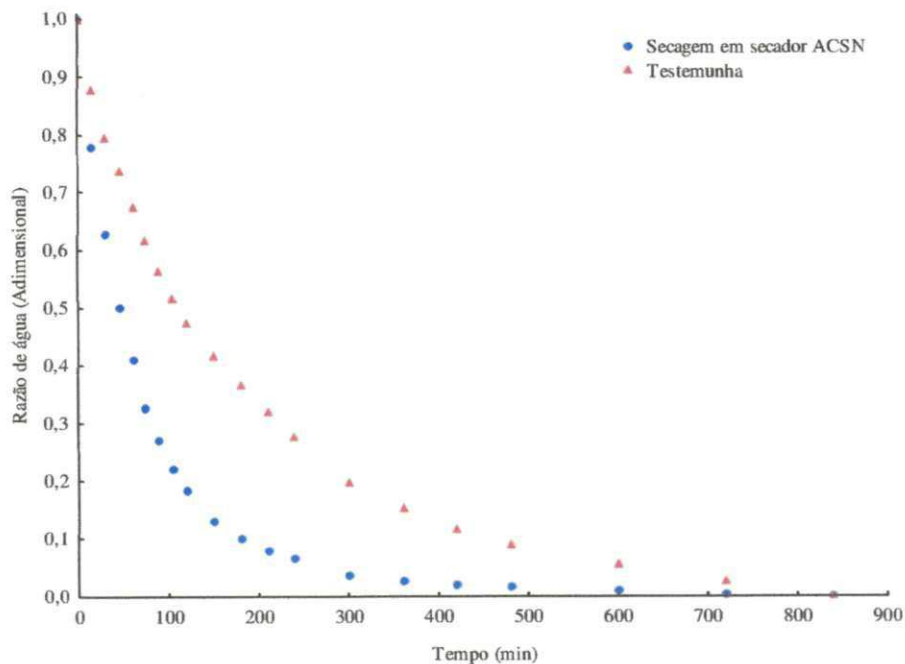


Figura 4.13 – Secagem da FCO em secador ACSN ou colocada em abrigo no período noturno (testemunha)

Na Figura 4.14 apresenta-se a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem das amostras FSO em secador ACSN no período noturno sendo que, durante este período a testemunha permaneceu em abrigo na bancada do laboratório, com a finalidade de se avaliar a eficiência do secador ACSN; a temperatura e a umidade relativa do ambiente externo, durante o intervalo de realização da secagem noturna, variaram de 21,30 a 29,40 °C e 54,00 a 94,00%, respectivamente; a temperatura e a umidade relativa no

interior do secador ACSN variaram de 50,00 a 40,30 °C e 34,00 a 75,70%, respectivamente.

Verifica-se que, da mesma forma que as amostras FCO secadas em secador ACSN, o produto FSO, que foi desidratado no secador ACSN, perdeu água com maior velocidade que o produto que permaneceu abrigado na bancada do laboratório durante o período noturno, sendo que o tempo de secagem para que o produto FSO atingisse o teor de água desejado foi de 10,0 h (600 min).

Comparando-se os tempos de secagem das amostras FCO e FSO em secador ACSN, verifica-se que a amostra FCO necessitou de maior tempo para atingir o teor de água desejado; tal resultado corrobora com os resultados das secagens dessas amostras pelos métodos de exposição direta ao sol e em estufa (secagem convencional), onde as amostras FCO demandaram mais tempo para atingir o teor de água de aproximadamente 5,0% b.u. (5,26% b.s.).

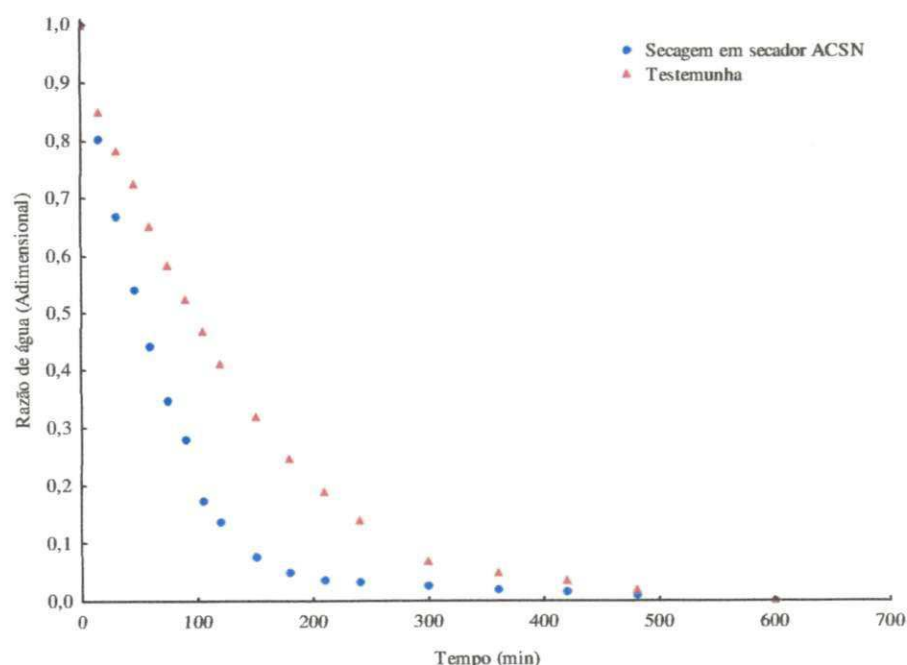


Figura 4.14 – Secagem da FSO em secador ACSN e colocada em abrigo no período noturno (testemunha)

Observam-se, na Tabela 4.13, os teores de água inicial e final das FCO e FSO referentes à secagem em secador ACSN no período noturno; nota-se que as amostras FCO e testemunha iniciaram o processo de desidratação com teor de água inicial de 24,89% b.s. e ao final da desidratação apresentavam teores de 5,18% b.s., para a amostra FCO e

15,33% b.s. para a testemunha. Verifica-se ainda que a porcentagem de perda de água para as amostras FCO e sua testemunha correspondeu a 79,18 e 38,41%, respectivamente.

Tabela 4.13 – Teores de água inicial e final das amostras FCO e FSO desidratadas em secador ACSN e colocadas em abrigo no período noturno (testemunha)

Produto	Teor de água (% b.s.)					
	Secagem em secador ACSN			Testemunha		
	Inicial	Final	Perda de água (%)	Inicial	Final	Perda de água (%)
FCO	24,89	5,18	79,19	24,89	15,33	38,41
FSO	26,73	5,21	80,60	26,73	18,01	32,62

Observa-se claramente que o secador ACSN acarretou, ao final da secagem, uma maior redução no teor de água da amostra FCO em relação à testemunha, com diferença entre as amostras de 10,15% b.s., o que evidencia a eficiência do secador de uso noturno. Esses resultados estão de acordo com os obtidos por DANTAS (2007) e DIÓGENES (2010) que também comprovaram experimentalmente a eficiência do secador ACSN de uso noturno ao desidratar farinha de amêndoas de jaca e grãos de abóbora, respectivamente.

Quanto às amostras FSO, constata-se que o produto sem óleo e sua testemunha iniciaram a secagem no secador ACSN com teor de água inicial de 26,73% b.s., sendo que este teor foi reduzido para 5,21 e 18,01% para as amostras FSO e testemunha, respectivamente; ao final desta etapa as amostras FSO e sua testemunha apresentaram porcentagens de perda de 80,60 e 32,62%, respectivamente. Comparando-se os teores de água final das amostras FSO e testemunha, observa-se diferença entre as amostras de 12,80% b.s., comprovando a eficiência do secador ACSN para secagens no período noturno.

SANTOS et al. (2011) desidrataram feijão caupi com teor de água inicial de 67,22% b.u. (205,06% b.s.) em secador ACSN de uso noturno, até teor de água final de 14,88% b.u. (17,48% b.s.) na primeira noite de secagem, e obtiveram redução no conteúdo de água de 91,48% (b.s.), resultado superior à perda de água verificada para as desidratações das amostras FCO e FSO.

DIÓGENES (2010) secou farinha de grãos de abóbora em secador ACSN e verificou redução no conteúdo de água de 87,91%, estando próximo ao obtido no presente

estudo para desidratação dos produtos FCO e FSO. A farinha de abóbora iniciou a secagem com teor de água de 39,77% b.s. e ao final do processo, na primeira noite, apresentou teor de água de 4,81% b.s.

De maneira geral, assim como verificado por SANTOS et al. (2011), o secador ACSN de uso noturno mostrou-se eficaz na condução da secagem dos produtos FCO e FSO na ausência do sol.

4.2.4 – Secagem em secador solar

Está apresentada nas Figuras D.13 a D.16, Apêndice D, a representação gráfica dos dados experimentais da cinética de secagem dos produtos GCO, FCO, GSO e FSO em secador solar e as curvas de secagem ajustadas pelos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson.

Na Tabela 4.14 encontram-se os parâmetros dos ajustes dos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da cinética de secagem dos produtos GCO, FCO, GSO e FSO com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM).

Pode-se verificar que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais das secagens em secador solar de uso diurno dos produtos GCO, FCO, GSO e FSO, apresentando valores de R^2 superiores a 0,99 e alguns dos menores DQM. Nota-se ainda que todos os modelos matemáticos avaliados apresentaram valores de R^2 superiores a 0,99 e baixos valores de DQM, com exceção do produto FSO, onde os valores de R^2 foram superiores a 0,96, logo todos os modelos avaliados podem ser utilizados na predição da cinética de secagem dos produtos GCO, FCO, GSO e FSO.

AKPINAR & BICER (2008) estudaram a secagem em camada fina de pimentão longo verde em secador solar e verificaram que os modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Page e Thompson sinalizaram valores de R^2 superiores a 0,96, no entanto o modelo de Midilli apresentou ajuste de aproximadamente 0,84. TUNDE-AKINTUNDE (2011) e RONO et al. (2009) ajustaram o modelo de Page aos dados experimentais da secagem de pimenta malagueta e sementes de amaranto, respectivamente, e também constataram ajustes superiores a 0,99. AKPINAR (2008) encontrou valores de R^2 superiores a 0,98 para os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli e Thompson e superiores a 0,97, para o modelo de Page, ao estudar a secagem de amoras em secador solar.

Tabela 4.14 – Parâmetros dos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM) da cinética de secagem das amostras FCO, GCO, FSO e GSO em secador solar

Modelo	Produto	Parâmetros			R^2	DQM
		a	b	k		
Aproximação da Difusão	FCO	0,069683	0,058893	0,726350	0,9956	0,0128
	GCO	0,124383	0,119892	0,123710	0,9987	0,0079
	FSO	-0,995046	0,337026	0,193643	0,9997	0,0038
	GSO	0,202634	0,321022	0,048301	0,9950	0,0051

Modelo	Produto	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	q		
Dois Termos	FCO	0,497478	0,497478	0,045369	0,045369	0,9951	0,0083
	GCO	0,124682	0,875629	0,123859	0,014832	0,9987	0,080
	FSO	0,588485	0,458185	0,041018	0,041018	0,9668	0,0394
	GSO	0,794859	0,213573	0,015459	0,049714	0,9951	0,0078

Modelo	Produto	Parâmetros				R^2	DQM
		a	b	k	n		
Midilli	FCO	0,999677	-0,001510	0,093519	0,734221	0,9992	0,0001
	GCO	1,000066	-0,000200	0,036525	0,805808	0,9995	0,0000
	FSO	1,003335	0,000151	0,004113	1,676903	0,9985	0,0010
	GSO	1,008864	-0,000170	0,033029	0,851591	0,9954	0,0007

Modelo	Produto	Parâmetros		R^2	DQM
		k	n		
Page	FCO	0,050328	0,970629	0,9952	0,0117
	GCO	0,028629	0,877531	0,9977	0,0118
	FSO	0,004428	1,647585	0,9983	0,0078
	GSO	0,026513	0,913726	0,9944	0,0040

Modelo	Produto	Parâmetros		R^2	DQM
		a	b		
Thompson	FCO	-1742,84	8,912298	0,9951	0,0102
	GCO	-15,2792	0,549320	0,9960	0,0149
	FSO	-2855,68	10,62978	0,9637	0,0188
	GSO	-17,9732	0,611451	0,9943	0,0065

MIDILLI & KUCUK (2003) desidrataram em camada fina pistache com e sem casca em secador solar e obtiveram valores de R^2 superiores a 0,99 para o modelo de Page e 0,97 para o modelo de Dois Termos. AKPINAR & BICER (2007) também ajustaram os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da cinética de secagem de cereja e verificaram que os modelos avaliados apresentaram ajustes superiores a 0,99, com exceção do modelo de Page, que apresentou valor de R^2 superior a 0,98.

Observam-se, nas Figuras 4.15 a 4.18, os pontos experimentais das curvas de secagem das farinhas e dos grãos residuais de urucum com e sem óleo (GCO, FCO, GSO e FSO), desidratados em secador solar de uso diurno.

Deu-se início às secagens aproximadamente às 08:00 h da manhã e as mesmas prosseguiram até que as amostras GCO, FCO, GSO e FSO atingissem o teor de água desejado, ou seja, de aproximadamente 5,0% b.u. (5,26% b.s.). As secagens foram encerradas aproximadamente às 12:45, 09:40, 12:15 e 09:40 h para as amostras GCO, FCO, GSO e FSO, respectivamente. Os valores médios dos parâmetros termodinâmicos do ambiente externo no período diurno estão apresentados na Tabela E.6 (Apêndice E). Verificam-se ainda, no Apêndice E (Tabela E.7), as temperaturas médias no interior do secador solar durante o período de secagens das amostras GCO, FCO, GSO e FSO.

Tem-se na, Figura 4.15, a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem das amostras GCO em secador solar de uso diurno. A temperatura e a umidade relativa do ambiente externo, durante o intervalo de realização da secagem solar, variaram de 27,18 a 30,20 °C e 50,00 a 86,00%, respectivamente, e a temperatura no interior do secador solar variou de 57,00 a 103,10 °C.

O tempo de secagem do produto GCO em secador solar foi de 4 h (240 min); em outras palavras, comparando-se a desidratação do produto GCO em secador solar e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN, verifica-se redução no tempo de secagem de 85,71%. Esta redução no tempo de secagem é superior ao verificado por SACILIK (2007b), que ao desidratar em camada fina sementes de abóbora em secador solar e por exposição direta ao sol, obteve redução de 17,9%. AKPINAR & BICER (2008) desidrataram, em camada fina, pimentão longo verde em secador solar e por exposição direta ao sol e observaram que a secagem em secador solar obteve uma redução de 31,58% no tempo de secagem, ao comparar a desidratação por ambos os métodos.

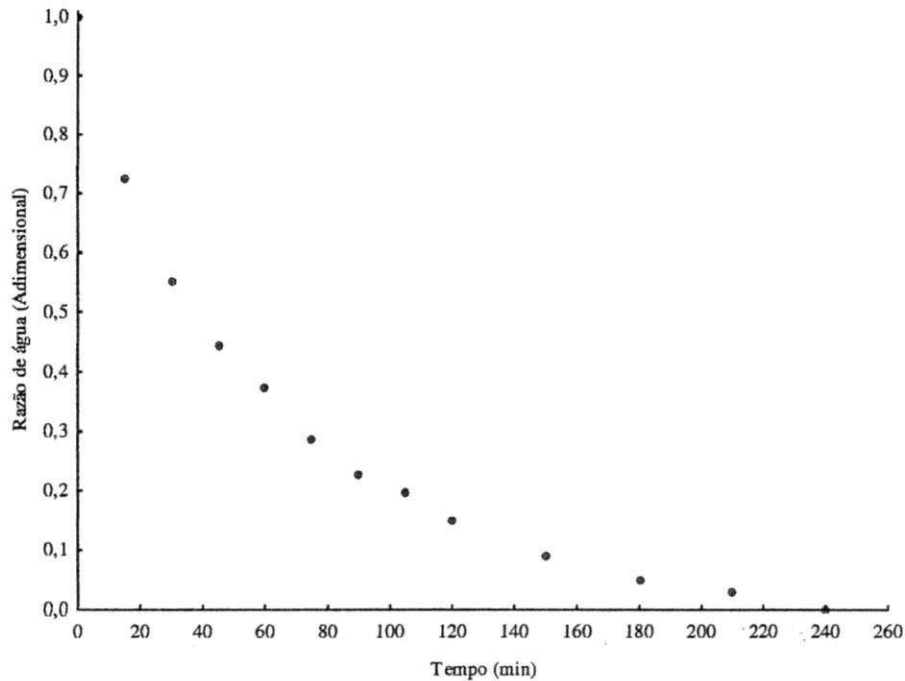


Figura 4.15 – Secagem dos GCO em secador solar

Na Figura 4.16 verifica-se a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem das amostras FCO em secador solar de uso diurno. A temperatura e a umidade relativa do ambiente externo, durante o intervalo de realização da secagem solar, variaram de 21,90 a 26,80 °C e 57,00 a 92,00%, respectivamente, e a temperatura no interior do secador solar variou de 45,40 a 75,20 °C. Observa-se que o tempo de secagem do produto FCO em secador solar foi de 1,25 h (75 min). Ao se comparar a secagem do produto FCO em secador solar e por exposição direta ao sol, constatou-se que a secagem em secador solar proporcionou uma redução no tempo de secagem de 82,14%.

AKPINAR (2008), ao estudar a secagem de amoras, verificou que a secagem em secador solar possibilitou uma redução de 31,58% no tempo de desidratação, em comparação com a secagem por exposição direta ao sol, estando inferior, portanto, à observada para o produto FCO. Vários fatores podem estar envolvidos neste maior percentual de redução no tempo de secagem da amostra FCO no secador solar em comparação com a secagem por exposição direta ao sol, sendo o mais provável a temperatura atingida no interior do secador no momento da desidratação. No estudo do autor já citado, verificou-se variação de temperatura no secador solar de 42,3 a 62,6 °C, sendo inferior à faixa de temperatura registrada no momento da secagem do produto FCO.

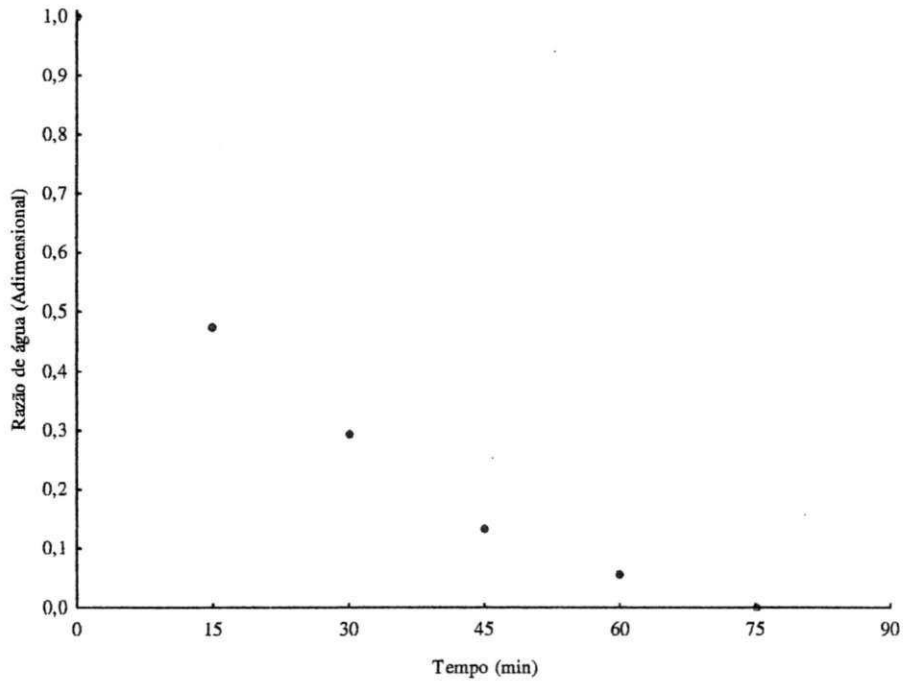


Figura 4.16 – Secagem da FCO em secador solar

Observa-se, na Figura 4.17, a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem das amostras GSO em secador solar de uso diurno. A temperatura e a umidade relativa do ambiente externo, durante o intervalo de realização da secagem solar, variaram de 22,20 a 28,50 °C e 52,00 a 85,00%, respectivamente, e a temperatura no interior do secador solar variou de 42,40 a 80,20 °C.

Nota-se que o tempo de secagem do produto GSO em secador solar foi de 3,5 h (210 min); ao se comparar a secagem do produto GCO em secador solar e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN, verifica-se redução no tempo de secagem, correspondendo a 90,28%. Há que se salientar, todavia, a temperatura elevada que se verifica no secador solar diurno, podendo chegar, em alguns dias, a mais de 90 °C.

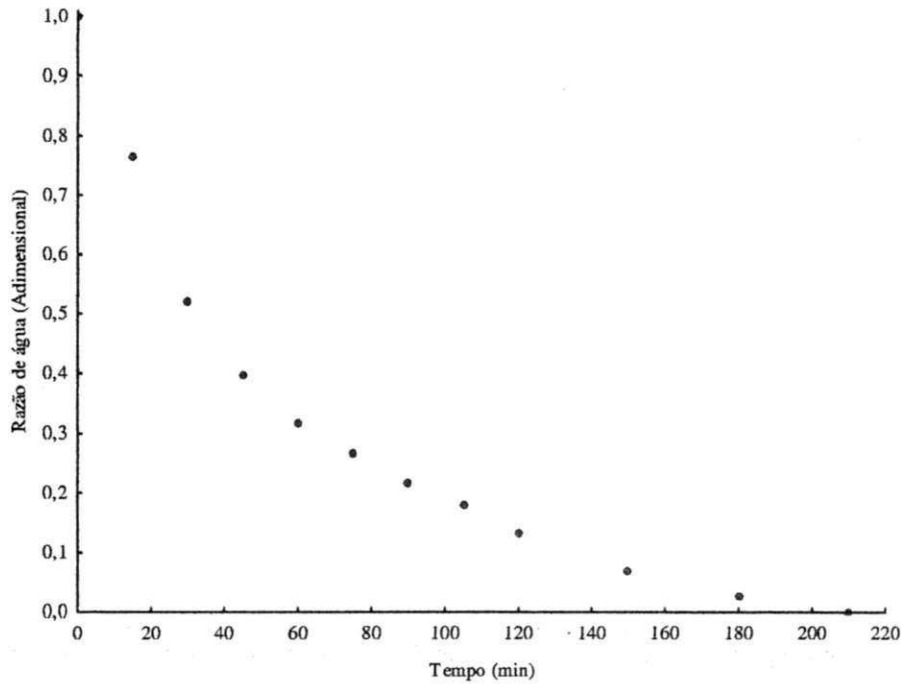


Figura 4.17 – Secagem dos GSO em secador solar

Na Figura 4.18 tem-se a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem das amostras FSO em secador solar de uso diurno. A temperatura e a umidade relativa do ambiente externo, durante o intervalo de realização da secagem solar, variaram de 22,30 a 26,80 °C e 60,00 a 84,00%, respectivamente, e a temperatura no interior do secador solar variou de 44,70 a 62,10 °C. Observa-se que o tempo de secagem do produto FSO em secador solar foi de 1,25 h (75 min); ao se comparar a secagem do produto FCO em secador solar e por exposição direta ao sol, constata-se que a secagem em secador solar possibilitou uma redução no tempo de secagem de 50,0% em comparação com a secagem por exposição direta ao sol.

FERREIRA et al. (2008) também verificaram redução de 50% no tempo de secagem, ao compararem a desidratação de grãos de café em chaminé solar e por exposição direta ao sol, em que a secagem em secador solar possibilitou menores tempos de secagem. RONO et al. (2009), secando sementes de amaranto na parte superior de um secador solar e por exposição direta ao sol, verificaram porcentagem de redução no tempo de desidratação semelhante à obtida para o produto FSO, em que a secagem em secador solar possibilitou redução de 41,67% no tempo de desidratação, em comparação com a secagem por exposição direta ao sol.

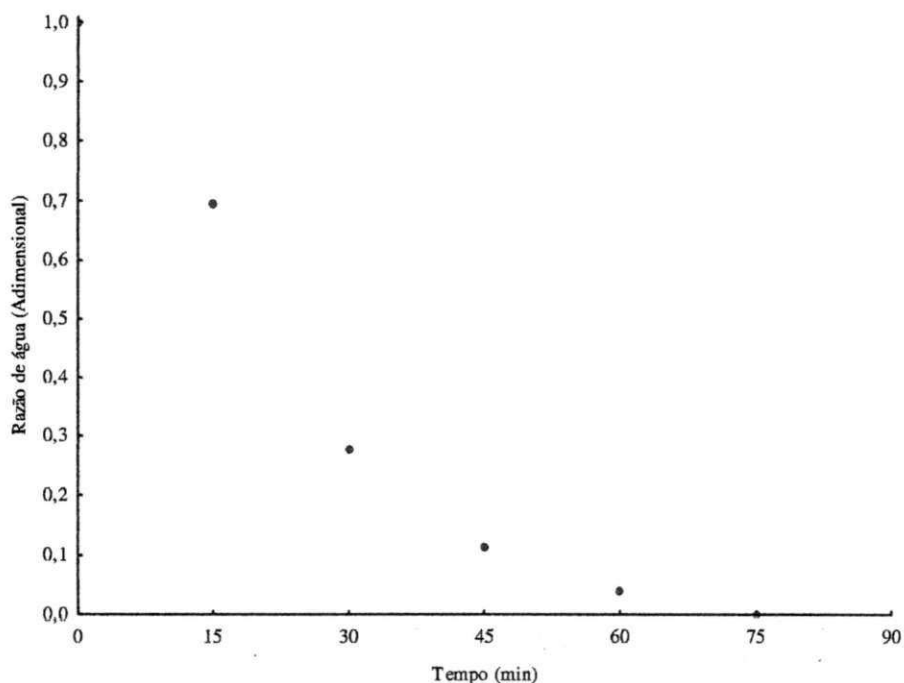


Figura 4.18 – Secagem da FSO em secador solar

Verificam-se, na Tabela 4.15, os teores de água inicial e final das amostras GCO, FCO, GSO e FSO referentes à secagem em secador solar de uso diurno. Observa-se que o produto GCO iniciou a secagem solar com teor de água inicial de 20,50% b.s. e ao final da desidratação apresentava teor de 5,16% b.s., apresentando assim 74,83% de perda de água; a amostra FCO iniciou a secagem com teor de água de 23,47%, sendo verificado ao final da desidratação teor de 4,99% b.s., com 78,74% na redução do conteúdo de água.

Tabela 4.15 – Teores de água inicial e final das amostras GCO, FCO, GSO e FSO desidratadas em secador solar

Produto	Secagem em secador solar		
	Teor de água (% b.s.)		Perda de água (%)
	Inicial	Final	
GCO	20,50	5,16	74,83
FCO	23,47	4,99	78,74
GSO	23,27	4,85	79,16
FSO	27,16	4,51	83,39

Quanto ao produto GSO, verificam-se teores de água inicial e final de 23,27% b.s. e 4,85% b.s., respectivamente; após a secagem foi verificado que esta amostra perdeu 79,16% de água. Nota-se ainda que o produto FSO perdeu 83,39% de água ao final da secagem solar, cujos teores de água inicial e final das amostras variaram de 27,16% b.s. e 4,51% b.s., respectivamente.

RONOH et al. (2009) secaram em camada fina sementes de amarantho em secador solar, com temperatura e umidade relativa no interior do secador variando de 31,2 a 54,7 °C e 22,0 a 34,0%, respectivamente. O teor de água inicial das sementes era de 64,0% b.s. e ao final da secagem foi encontrado teor de 7,0% b.s., sendo que os tempos de secagem para atingir esse teor final variaram entre as amostras que foram secadas nas partes superior e inferior do secador. Os tempos de secagem foram de 3,5 h e 4,5 h, para as amostras desidratadas nas camadas superior e inferior do secador, respectivamente. Esses tempos de secagem estão próximos aos verificados nas desidratações das amostras GCO e GSO. Durante a secagem das sementes de amarantho, ocorreu perda de 89,06% no conteúdo de água, superior, portanto, à perda das amostras GCO, FCO, GSO e FSO.

GATEA (2010) desenvolveu um secador solar e avaliou seu desempenho desidratando milho com teor de água inicial de 21% b.u. (26,58% b.s.); os ensaios foram iniciados às 09:00 h e encerrados às 14:00 h, obtendo-se milho com teor de água de 13% b.u. (14,94% b.s.). O conteúdo de água perdido durante o processo de secagem do milho foi de 43,79% b.s., inferior ao verificado para as amostras GCO, FCO, GSO e FSO.

FAGUNWA et al. (2009) desenvolveram um secador solar com armazenamento de energia térmica para secagem de sementes de cacau, com temperatura no interior do secador variando de 31,0 a 54,0 °C, durante o período de realização dos experimentos; os referidos autores utilizaram sementes com teor de água inicial de 53,4% b.u. (114,59% b.s.) e conseguiram reduzir esse teor até 3,6% b.u. (3,73% b.s.) em 72 h intermitentes de secagem, com redução no conteúdo de água de 96,74% (b.s.).

4.2.5 – Secagem em secador ACSN ou abrigo no período noturno combinado com secagem em secador solar

Pode-se observar nas Figuras D.17 a D.24, Apêndice D, a representação gráfica dos dados experimentais da cinética de secagem das amostras GCO e GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar e as curvas de secagem ajustadas pelos modelos matemáticos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson.



Estão apresentados na Tabela 4.16 os parâmetros dos ajustes dos modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras GCO e GSO, com seus respectivos coeficientes de determinação (R^2) e desvios quadráticos médios (DQM); quanto à testemunha (identificada pelos termos “T noite” ou “T dia”) e as amostras GCO e GSO (identificadas pelos termos “noite” ou “dia”), os ajustes foram feitos por trechos, onde se ajustou os modelos matemáticos aos dados da cinética de secagem referentes à secagem noturna em secador ACSN e posteriormente aos dados da desidratação diurna em secador solar. A justificativa para esse ajuste por partes é que as secagens processadas à noite e durante o dia são muito distintas entre si. Enquanto que durante a noite têm-se umidades relativas altas e temperaturas relativamente mais baixas, durante o dia, no secador solar, conseguiu-se obter temperaturas elevadas e conseqüentemente umidades relativas mais baixas.

Pode-se verificar que o modelo de Midilli foi o que melhor se ajustou aos dados experimentais da secagem das amostras GCO e GSO em secador ACSN ou abrigo no período noturno, combinado com secagem em secador solar no período diurno, apresentando valores de R^2 superiores a 0,99 e os menores resultados de DQM, com exceção das amostras GCO (noite) e GSO (noite), em que o Modelo de Thompson foi o que melhor se ajustou. Verifica-se ainda que todos os modelos matemáticos avaliados apresentaram valores de R^2 superiores a 0,92 e baixos valores de DQM podendo ser utilizados na predição da cinética de secagem das amostras GCO e GSO.

Esses resultados corroboram com a pesquisa de DANTAS (2007) que ao ajustar os modelos de Page, Henderson, Henderson & Pabis e Logarítmico aos dados experimentais da cinética de secagem de amêndoas de jaca em secador ACSN ou abrigo no período noturno combinada com secagem em secador solar no período diurno, verificou R^2 superior a 0,97 e valores baixos de DQM.

DIÓGENES (2010) obteve valores de R^2 inferiores aos verificados no presente trabalho, ao desidratar sementes de abóbora com e sem tegumento em secador ACSN ou abrigo no período noturno combinada com secagem em secador solar no período diurno; o autor ajustou os modelos de Aproximação da Difusão, Exponencial Dois termos, Henderson & Pabis, Logarítmico e Page aos dados experimentais da cinética de secagem dos produtos e encontrou ajuste superior a 0,78.

Tabela 4.16 – Parâmetros dos diferentes modelos ajustados com seus R² e DQM da cinética de secagem dos GCO e GSO em secador ACSN ou colocados em abrigo no laboratório combinado com secagem em secador solar (T= testemunha)

Modelo	Produto	Parâmetros			R ²	DQM	
		a	b	k			
Aproximação da Difusão	GCO (noite)	0,557809	0,143793	0,042977	0,9988	0,0034	
	GCO (dia)	-206,197	0,995076	0,016465	0,9769	0,0292	
	GCO (T noite)	0,401519	0,210017	0,028550	0,9987	0,0024	
	GCO (T dia)	-164,630	0,996267	0,017010	0,9891	0,0222	
	GSO (noite)	0,614432	0,139399	0,048869	0,9985	0,0070	
	GSO (dia)	-115,219	0,991704	0,013161	0,9962	0,0161	
	GSO (T noite)	0,446290	0,275954	0,026264	0,9989	0,0039	
	GSO (T dia)	-29,2686	0,989202	0,014453	0,9979	0,0093	
Modelo	Produto	Parâmetros				R ²	DQM
		a	b	k	q		
Dois Termos	GCO (noite)	0,555477	0,437449	0,041947	0,006126	0,9988	0,0047
	GCO (dia)	0,537923	0,537923	0,007835	0,007830	0,9325	0,0342
	GCO (T noite)	0,429286	0,557215	0,024905	0,005713	0,9988	0,0035
	GCO (T dia)	0,527108	0,496241	0,010158	0,010158	0,9793	0,0262
	GSO (noite)	0,381994	0,611895	0,006759	0,048011	0,9985	0,0081
	GSO (dia)	0,537056	0,543013	0,006433	0,006433	0,9655	0,0312
	GSO (T noite)	0,533781	0,451911	0,021608	0,006455	0,9990	0,0039
	GSO (T dia)	0,501915	0,501915	0,010633	0,010643	0,9971	0,0129
Modelo	Produto	Parâmetros				R ²	DQM
		a	b	k	n		
Midilli	GCO (noite)	1,004683	0,000007	0,077417	0,628064	0,9990	0,0024
	GCO (dia)	1,002312	-0,001546	0,001220	1,228113	0,9992	0,0019
	GCO (T noite)	1,001885	0,000008	0,031182	0,760215	0,9995	0,0012
	GCO (T dia)	0,997213	-0,000870	0,010084	0,926065	0,9995	0,0000
	GSO (noite)	1,003880	0,000014	0,096744	0,612022	0,9989	0,0032
	GSO (dia)	1,010492	-0,000208	0,000956	1,342885	0,9990	0,0036
	GSO (T noite)	1,000795	0,000014	0,028038	0,813840	0,9995	0,0020
	GSO (T dia)	0,996719	-0,000089	0,009924	1,005324	0,9985	0,0004
Modelo	Produto	Parâmetros		R ²	DQM		
		k	n				
Page	GCO (noite)	0,077883	0,624903	0,9989	0,0068		
	GCO (dia)	0,000476	1,561810	0,9837	0,0292		
	GCO (T noite)	0,031765	0,754776	0,9994	0,0055		
	GCO (T dia)	0,003498	1,224602	0,9886	0,0228		
	GSO (noite)	0,099654	0,602760	0,9986	0,0113		
	GSO (dia)	0,000595	1,457176	0,9974	0,0124		
	GSO (T noite)	0,029117	0,803812	0,9993	0,0102		
	GSO (T dia)	0,008386	1,050982	0,9976	0,0104		
Modelo	Produto	Parâmetros		R ²	DQM		
		a	b				
Thompson	GCO (noite)	-2,44088	0,312347	0,9997	0,0009		
	GCO (dia)	-4104,31	5,432004	0,9200	0,0127		
	GCO (T noite)	-6,66249	0,323110	0,9991	0,0073		
	GCO (T dia)	-4451,50	6,638925	0,9783	0,0152		
	GSO (noite)	-1,96508	0,332362	0,9996	0,0054		
	GSO (dia)	-4521,40	5,135619	0,9530	0,0163		
	GSO (T noite)	-8,80555	0,379771	0,9993	0,0022		
	GSO (T dia)	-3805,01	6,349465	0,9971	0,0113		

SAEED (2010) verificou valores de R^2 superiores a 0,99, ao ajustar os modelos de Aproximação da Difusão, Midilli e Page aos dados da secagem de *Hibiscus sabdariffa* L. em secador solar.

Nas Figuras 4.19 e 4.20 podem ser visualizados os pontos experimentais das curvas de secagem dos GCO e GSO, desidratados em secador ACSN no período noturno, combinado com secagem em secador solar no período diurno; no tocante às testemunhas, no período noturno elas ficaram em abrigo na bancada do laboratório.

A primeira etapa de secagem, correspondendo à desidratação em secador ACSN, foi iniciada aproximadamente às 17:00 h e encerrada aproximadamente às 08:00 h, quando as amostras foram conduzidas a desidratação em secador solar de uso diurno, inclusive as testemunhas que estavam abrigadas em laboratório; a segunda etapa de secagem, referente à etapa de desidratação em secador solar, foi iniciada aproximadamente às 08:00 h e encerrada aproximadamente às 12:00 h para as amostras GCO (1080 min após o início da secagem) e 14:50 h para as amostras GSO (1200 min após o início da secagem), quando as amostras atingiram o teor de água desejado, de aproximadamente 5,0% b.u. (5,26% b.s.).

Os valores médios dos parâmetros termodinâmicos do ambiente externo nos períodos noturno e diurno estão apresentados no Apêndice E (Tabela E.8). Pode-se verificar, na Tabela E.9, as temperaturas e as umidades relativas médias no interior do secador ACSN e na Tabela E.10 as temperaturas médias obtidas no secador solar durante o período de secagem das amostras GCO e GSO (Apêndice E).

Observa-se, na Figura 4.19, a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem do produto GCO em secador ACSN no período noturno, combinada com a secagem em secador solar no período diurno.

Durante a realização das secagens, a temperatura e a umidade relativa do ambiente externo variaram de 21,50 a 30,70 °C e 39,00 a 92,00%, respectivamente, para a secagem noturna, e de 23,00 a 31,30 °C e 43,00 a 84,00%, respectivamente, para a secagem diurna; a temperatura e a umidade relativa no interior do secador ACSN variaram de 41,30 a 57,60 °C e 28,50 a 71,40%, respectivamente, e a temperatura no interior do secador solar variou de 86,60 a 90,30 °C.

No período noturno, referente à primeira etapa da secagem (Figura 4.19), verifica-se que o produto que estava no secador ACSN perdeu água com maior velocidade que a testemunha que estava abrigada na bancada do laboratório; ao final da primeira etapa da secagem, 840 min após o seu início, os valores médios de RX eram de 0,1257 e 0,3141 para as amostras GCO (noite) e a testemunha, respectivamente.

No período diurno o produto GCO (dia) e a testemunha foram colocados no secador solar para prosseguimento da desidratação; observou-se que as amostras GCO (dia) continuaram a perder água, no entanto em uma velocidade inferior à verificada para a testemunha, que havia perdido menos água no período noturno; a secagem foi interrompida quando o produto GCO (dia) atingiu o teor de água desejado, aos 1080 min (18 h) do início da desidratação.

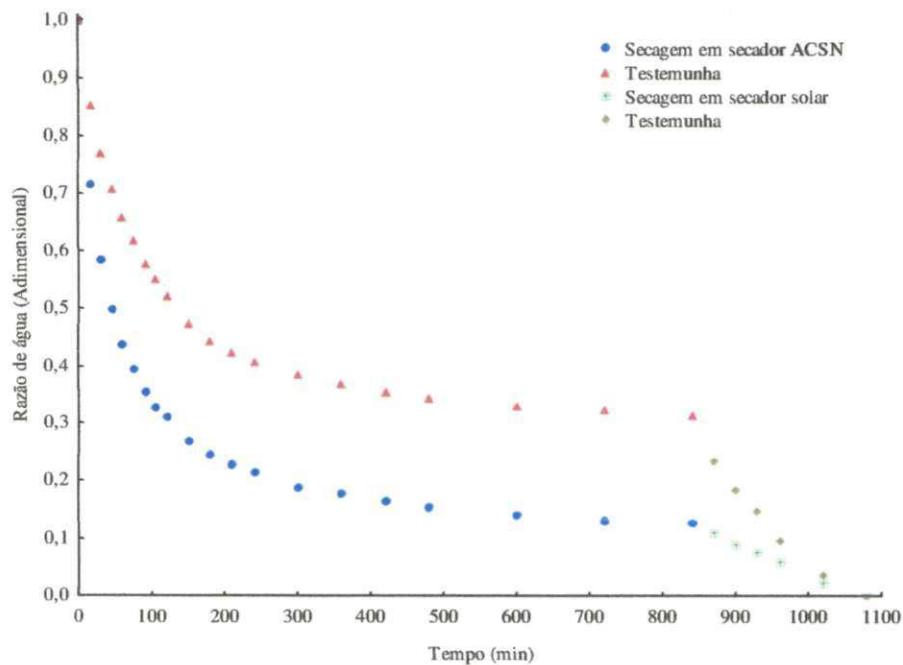


Figura 4.19 – Secagem dos GCO em secador ACSN ou colocados em abrigo no período noturno (testemunha) combinada com secagem em secador solar

Está apresentada na Figura 4.20 a distribuição dos pontos experimentais da cinética de secagem do produto GSO em secador ACSN no período noturno, combinada com a secagem em secador solar no período diurno, onde, durante este período a testemunha permaneceu em abrigo na bancada do laboratório, com a finalidade de se avaliar a eficiência do secador ACSN.

No período de realização das secagens a temperatura e a umidade relativa do ambiente externo variaram de 22,50 a 31,00 °C e 41,00 a 90,00%, respectivamente, para a secagem noturna e de 22,80 a 31,90 °C e 49,00 a 86,00%, respectivamente, para a secagem diurna. A temperatura e a umidade relativa no interior do secador ACSN variaram de 40,40

a 58,80 °C e 25,90 a 72,30%, respectivamente, e a temperatura no interior do secador solar variou de 68,70 a 75,30 °C.

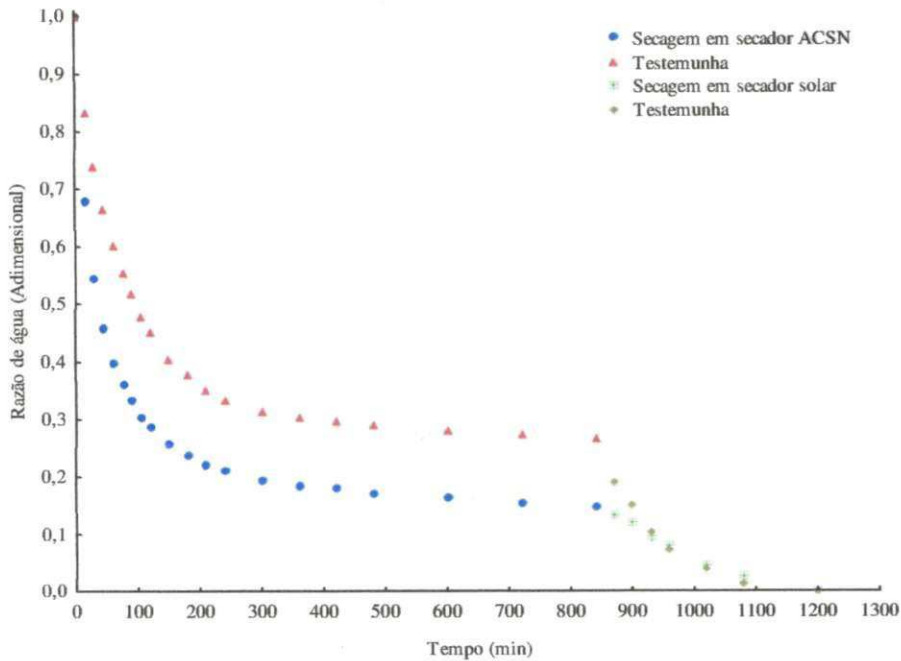


Figura 4.20 – Secagem dos GSO em secador ACSN ou colocados em abrigo no período noturno (testemunha) combinada com secagem em secador solar

Conforme já observado para a amostra GCO (noite) no período noturno, percebe-se que a amostra GSO que estava no secador ACSN perdeu água com maior velocidade que a testemunha; ao final dessa primeira etapa da desidratação (840 min), os valores médios de RX eram de 0,1480 para a amostra GSO (noite) e 0,2684 para sua testemunha.

Verifica-se que o produto GSO (dia) e sua testemunha que foram acondicionados em secador solar no período diurno continuaram a perder água nesta segunda etapa de secagem, no entanto em uma velocidade superior à observada para o período noturno, em virtude das temperaturas mais elevadas no interior do secador e umidade relativa mais baixa. Da mesma forma que observado para a testemunha do produto GCO (dia), a testemunha do produto GSO (dia) também perdeu água com maior intensidade, pois no período noturno anterior havia perdido menos água. A secagem foi interrompida quando o produto GCO (dia) atingiu teor de água desejado, aos 1200 min (20,0 h) do início da desidratação.

Observam-se, na Tabela 4.17, os teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO referentes à primeira etapa de secagem, onde as amostras foram desidratadas em secador ACSN.

Constata-se que as amostras GCO e sua testemunha iniciaram a secagem com teor de água inicial de 21,11% b.s. e ao final da desidratação apresentavam teores de 6,80% b.s., para a amostra GCO, e 9,85% b.s. para a testemunha; ao final dessa primeira etapa de secagem as amostras GCO e testemunha apresentaram redução nos conteúdos de água de 67,79 e 53,34%, respectivamente.

Tabela 4.17 – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na primeira etapa de secagem: amostras desidratadas em secador ACSN e colocadas em abrigo no período noturno (testemunha)

Produto	Teor de água (% b.s.)					
	Secagem em secador ACSN			Testemunha		
	Inicial	Final	Perda de água (%)	Inicial	Final	Perda de água (%)
GCO	21,11	6,80	67,79	21,11	9,85	53,34
GSO	22,13	7,27	67,15	22,13	9,38	57,61

Em referência às amostras GSO, nota-se que elas e sua testemunha iniciaram a secagem em secador ACSN com teor de água inicial de 22,13% b.s., sendo que este foi reduzido para 7,27 e 9,38% para as amostras GSO e testemunha, respectivamente. Foi observado ao final dessa etapa de desidratação que as amostras apresentaram porcentagens de perdas de água de 67,15 (GSO) e 57,61% (testemunha).

Para ambas as amostras (GCO e GSO), percebe-se que os produtos que permaneceram no secador ACSN no período noturno apresentaram maior porcentagem de perda de água ao final dessa etapa de desidratação, indicando que o secador ACSN foi eficiente para secagem noturna.

DIÓGENES (2010) desidratou grãos de abóbora em secador ACSN no período noturno e também verificou que a amostra (designada pelo autor como tratamento) perdeu maior porcentagem de água que a testemunha, sendo os conteúdos de perda de água de 74,44 e 42,44%, para as amostras tratamento e testemunha, respectivamente.

Uma vez que as amostras GCO e GSO não haviam atingido o teor de água desejado de aproximadamente 5,0% b.u. (5,26% b.s.) ao final da secagem em secador ACSN, deu-se continuidade à segunda etapa de desidratação, agora no período diurno.

Na Tabela 4.18 estão apresentados os teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO, referentes à segunda etapa de secagem em secador solar.

Observa-se que, ao final da secagem, o produto GCO atingiu o teor de água desejado (5,02% b.s.), com redução de 26,18% no seu conteúdo; sua testemunha apresentou porcentagem de perda de água de 45,58%, superior à da amostra GCO uma vez que, no período noturno havia perdido menos água, no entanto, seu teor de água final (5,36% b.s.) foi um pouco superior ao teor de água final da amostra GCO. Comparando-se os teores de água final da amostra GCO e sua testemunha, verifica-se diferença de 0,34% entre as amostras.

Tabela 4.18 – Teores de água inicial e final das amostras GCO e GSO na segunda etapa de secagem: amostras desidratadas em secador solar

Produto	Teor de água (% b.s.)					
	Secagem em secador solar			Testemunha*		
	Inicial	Final	Perda de água (%)	Inicial	Final	Perda de água (%)
GCO	6,80	5,02	26,18	9,85	5,36	45,58
GSO	7,27	5,05	30,54	9,38	5,34	43,07

*Neste segundo período de secagem a testemunha também foi desidratada em secador solar.

Quanto ao produto sem óleo, as amostras apresentaram reduções no conteúdo de água de 30,54% para o produto GSO e de 43,07% para sua testemunha, sendo que ao final da desidratação os teores de água final das amostras foram de 5,05 e 5,34% b.s., para as amostras GSO e sua testemunha, respectivamente. Conforme observado para o produto GCO, a testemunha da amostra GSO também apresentou teor de água superior à amostra GSO ao final da secagem, com diferença entre as amostras de 0,29%.

FERREIRA et al. (2008) secaram grãos de café em chaminé solar, com teor de água inicial de 50,0% b.u. (100% b.s.) até teor final de 11,0% b.u. (12,36% b.s.) e obtiveram 87,64% de redução no conteúdo de água (calculado em base seca); esta porcentagem de perda é superior à verificada na segunda etapa de desidratação das amostras GCO e GSO,

pois essas amostras já haviam perdido água na etapa anterior, quando secadas em secador ACSN.

4.3 – Comparações entre as secagens em estufa e solar

4.3.1 – Secagens em estufa e por exposição direta ao sol

Tem-se, nas Figuras 4.21 e 4.22, os pontos experimentais da cinética de secagem em estufa das farinhas dos grãos residuais de urucum com e sem óleo (FCO e FSO), comparadas com os dados da cinética de secagem desses por exposição direta ao sol.

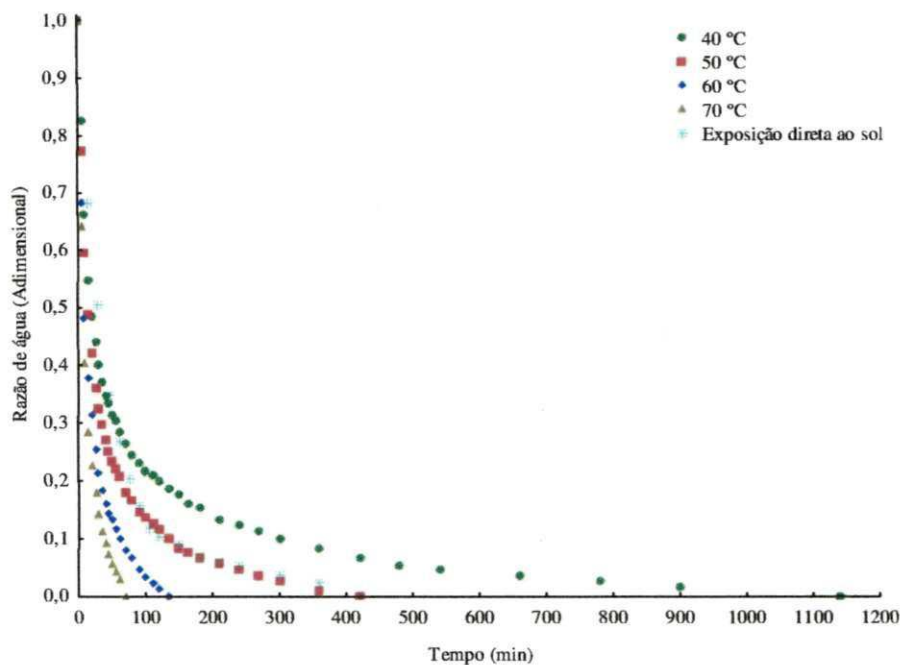


Figura 4.21 – Curvas de secagem das FCO em estufa e por exposição direta ao sol

Verifica-se que o produto FCO desidratado por exposição ao sol teve comportamento semelhante para a secagem em estufa para a temperatura de 50 °C.

As secagens por exposição ao sol foram realizadas no início do ano, onde a temperatura estava por volta dos 26,0 °C, ultrapassando os 30 °C nos horários próximos ao meio-dia. Apesar da temperatura durante a secagem por exposição direta ao sol ser inferior às utilizadas na desidratação em estufa, a umidade relativa (por volta de 68%, chegando a valores abaixo de 40% em alguns horários do dia) do ambiente durante a secagem ao sol era bem menor que as observadas durante a realização das secagens em estufa (por volta

de 80%, chegando a valores abaixo de 90% em alguns horários do dia). As desidratações das farinhas de urucum (FCO e FSO) em estufa foram realizadas no início do segundo semestre, e neste período, as condições do ambiente apresentavam temperaturas mais baixas e umidades relativas altas.

De acordo com VILLELA & SILVA (1992), a velocidade de secagem não depende apenas da temperatura de desidratação, mas também é influenciada pela umidade relativa do ambiente; é provável que a umidade relativa do ambiente no momento das secagens das amostras FCO e FSO em estufa e por exposição direta ao sol tenha sido a principal variável responsável pela velocidade de desidratação.

HII et al. (2008) estudaram a secagem de sementes de cacau pelos métodos natural e artificial e verificaram que as sementes desidratadas pelo método artificial demoraram menos tempo para atingir o teor de água desejado; os autores iniciaram os experimentos às 08:00 h e os encerraram às 18:00 h, sendo que no período noturno as sementes desidratadas pelo método artificial também ficaram expostas às condições ambientais; as sementes de cacau iniciaram as secagens com 51% b.u. e foram desidratadas até 7,5% b.u., com tempos de secagem de 51 h e 73,5 h, para as secagens pelos métodos artificial e natural, respectivamente.

SACILIK (2007b) pesquisaram a secagem de sementes de abóbora pelo método convencional nas temperaturas de 40, 50 e 60 °C com velocidade do ar de secagem de 0,8 m s⁻¹ e pelos métodos de secagem em secador solar e por exposição ao sol e verificaram que as amostras secadas em estufa demoraram menos tempo para atingirem o teor de água de equilíbrio; o autor iniciava suas secagens ao sol às 08:00 h e as encerrava às 18:00 h, no entanto as sementes de abóbora ficavam 14 h expostas às condições ambientais durante o período noturno, sendo que este tempo (14 h) foi contabilizado como tempo de secagem; ao final do processo, o tempo total para secagem das sementes de abóbora ao sol foi de 34 h, enquanto que o tempo necessário para secagem em estufa foi de 9,0, 7,5 e 6,0 h para as temperaturas de 40, 50 e 60 °C, respectivamente.

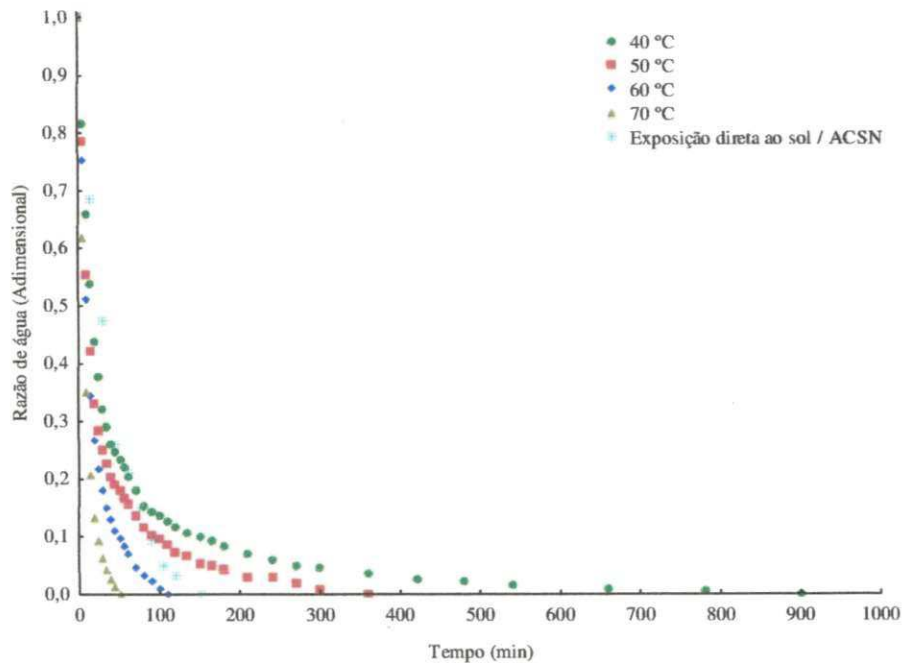


Figura 4.22 – Curvas de secagem das FSO em estufa e por exposição direta ao sol

4.3.2 – Secagens em estufa e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

Podem-se verificar, nas Figuras 4.23 e 4.24, os pontos experimentais da cinética de secagem em estufa dos grãos residuais de urucum com e sem óleo (GCO e GSO), comparados com os dados da cinética de secagem dessas amostras por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN.

Observa-se que as amostras GCO e GSO desidratadas por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN, apresentaram as curvas de secagem localizadas entre as temperaturas de 50 e 60 °C (secagem das amostras GCO e GSO em estufa). Estes resultados podem ser justificados quando se analisam as temperaturas atingidas no interior do secador ACSN, por volta de 50,0 °C, no período noturno; as condições climáticas no momento das secagens por exposição direta ao sol, no período diurno, também podem ter contribuído para redução dos tempos de secagem.

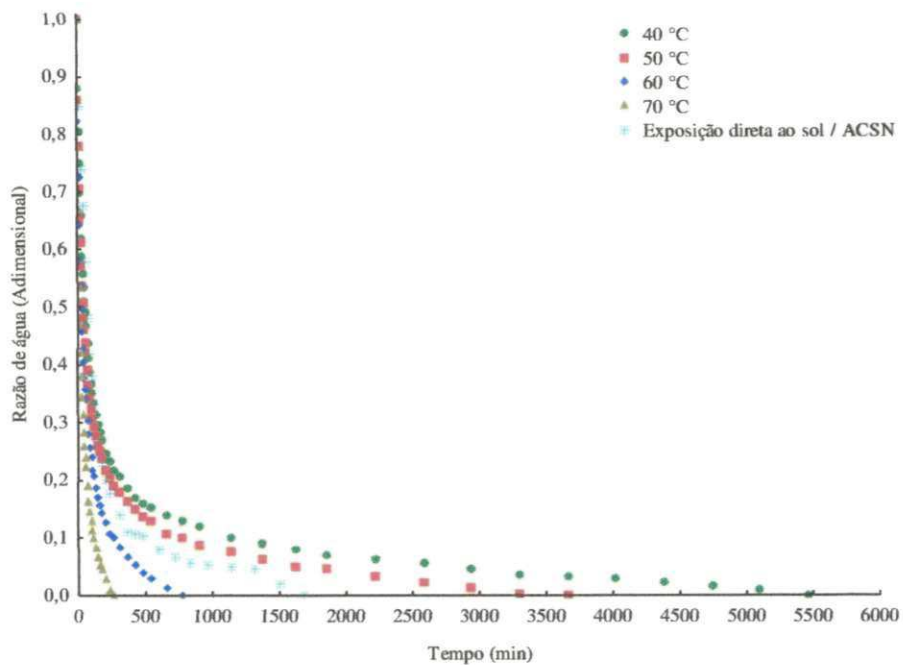


Figura 4.23 – Curvas de secagem dos GCO em estufa e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

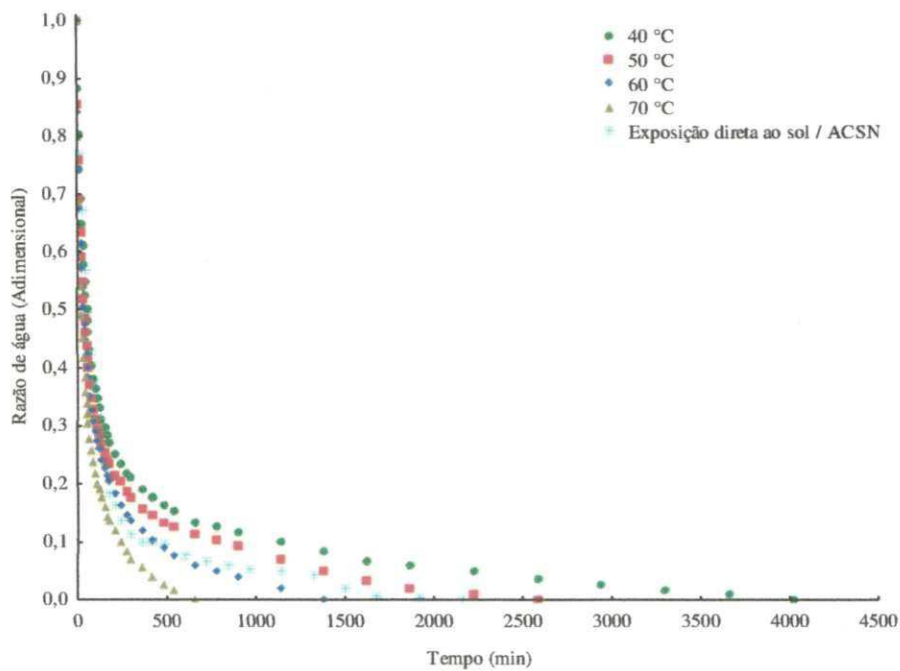


Figura 4.24 – Curvas de secagem dos GSO em estufa e por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

4.3.3 – Secagens em estufa e em secador ACSN

Nas Figuras 4.25 e 4.26 estão apresentados os pontos experimentais da cinética de secagem em estufa das farinhas dos grãos residuais de urucum com e sem óleo (FCO e FSO), comparados com os dados da cinética de secagem dessas amostras em secador ACSN de uso noturno.

Observa-se que as curvas de secagem das amostras FCO e FSO desidratados em secador ACSN no período noturno, após 100 min de secagem, ficaram próximas aos pontos experimentais da cinética de secagem das amostras secadas em estufa na temperatura de 50 °C, todavia apresentando tempos de secagem superiores. Isso já era esperado, pois, apesar da verificação de temperaturas superiores a 50 °C no secador ACSN (no início da secagem), a umidade relativa no interior do secador estava em torno de 50 a 70%, além da temperatura no interior da câmara de secagem ir diminuindo gradativamente com as secagens, atingindo valores inferiores a 50 °C; também há a possibilidade de deficiência na exaustão do ar úmido, fenômeno relatado por DIÓGENES (2010).

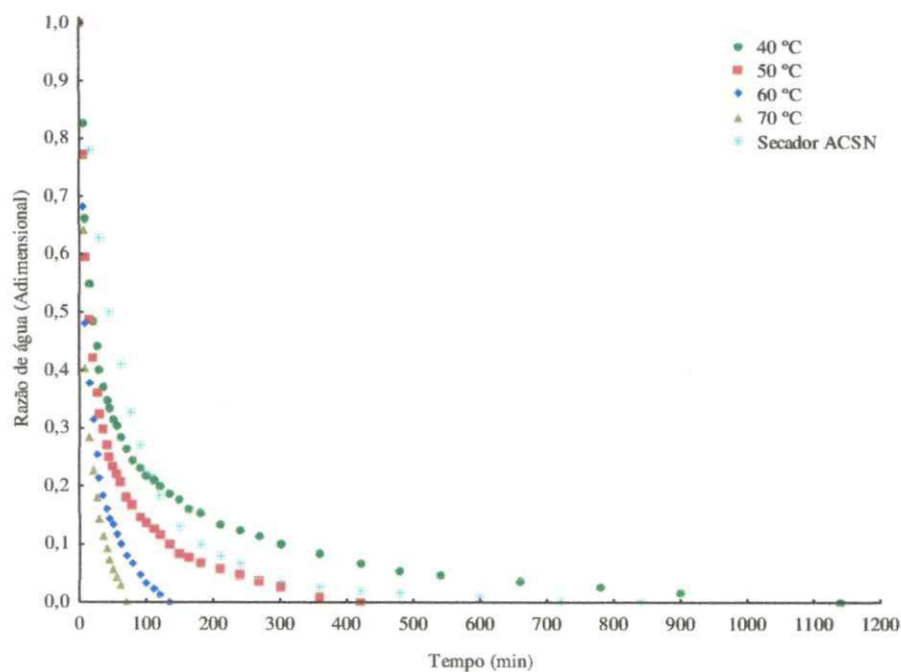


Figura 4.25 – Curvas de secagem das FCO em estufa e em secador ACSN

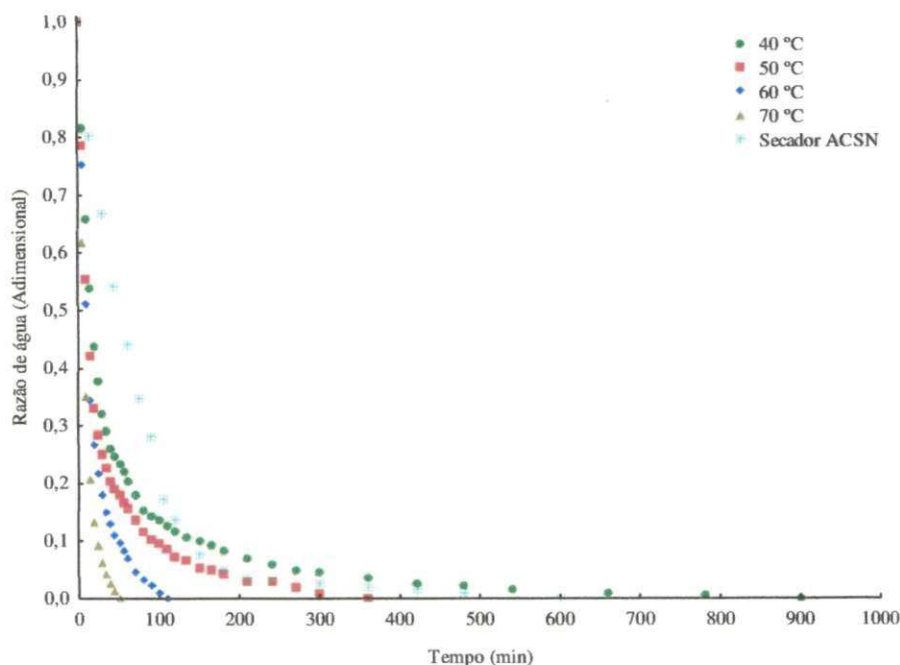


Figura 4.26 – Curvas de secagem das FSO em estufa e em secador ACSN

4.3.4 – Secagens em estufa e em secador solar

Nas Figuras 4.27 a 4.30 se encontram os pontos experimentais da cinética de secagem em estufa das farinhas (FCO e FSO) e dos grãos residuais de urucum com e sem óleo (GCO e GSO), comparados com os dados da cinética de secagem dessas amostras em secador solar de uso diurno.

Nota-se que as curvas de secagem das amostras GCO, FCO, GSO e FSO ficaram próximas aos dados experimentais da cinética de secagem dessas amostras desidratados em estufa na temperatura de 70 °C.

Analisando os dados das temperaturas obtidas no interior do secador solar durante a secagem das amostras GCO, FCO, GSO e FSO, observam-se temperaturas superiores a 70 °C, com algumas oscilações ocasionadas geralmente por nuvens; como a temperatura no interior do secador solar de uso diurno é dependente de sol aberto, a passagem de nuvens contribuía para diminuição da temperatura no secador, impedindo a incidência direta de luz solar.

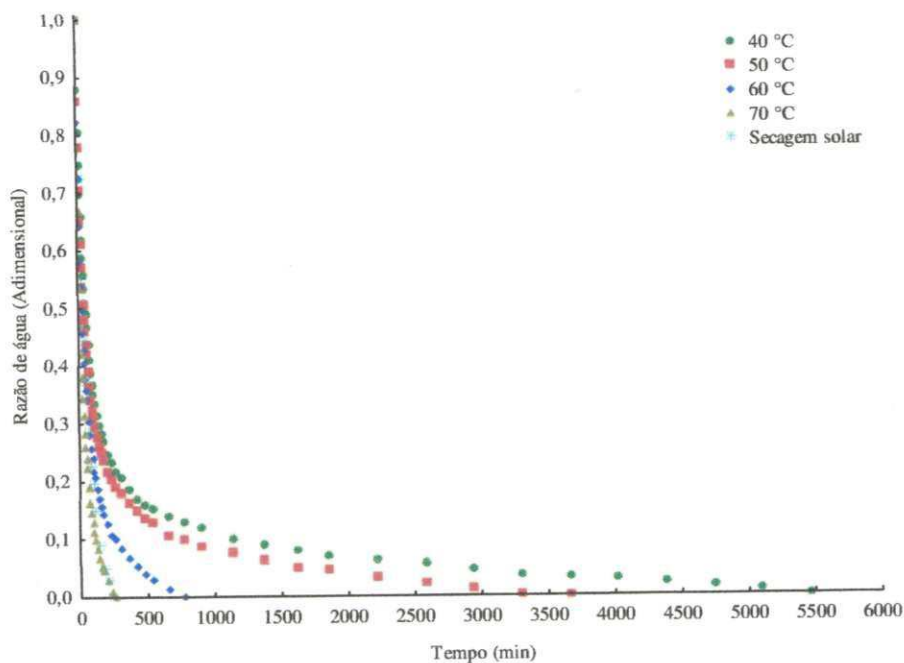


Figura 4.27 – Curvas de secagem dos GCO em estufa e em secador solar

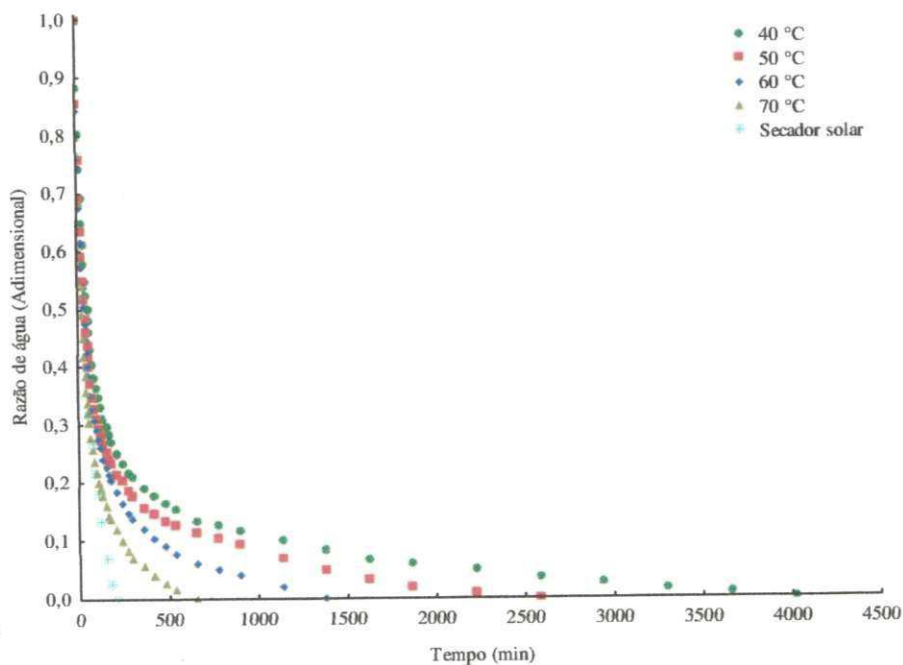


Figura 4.28 – Curvas de secagem dos GSO em estufa e em secador solar

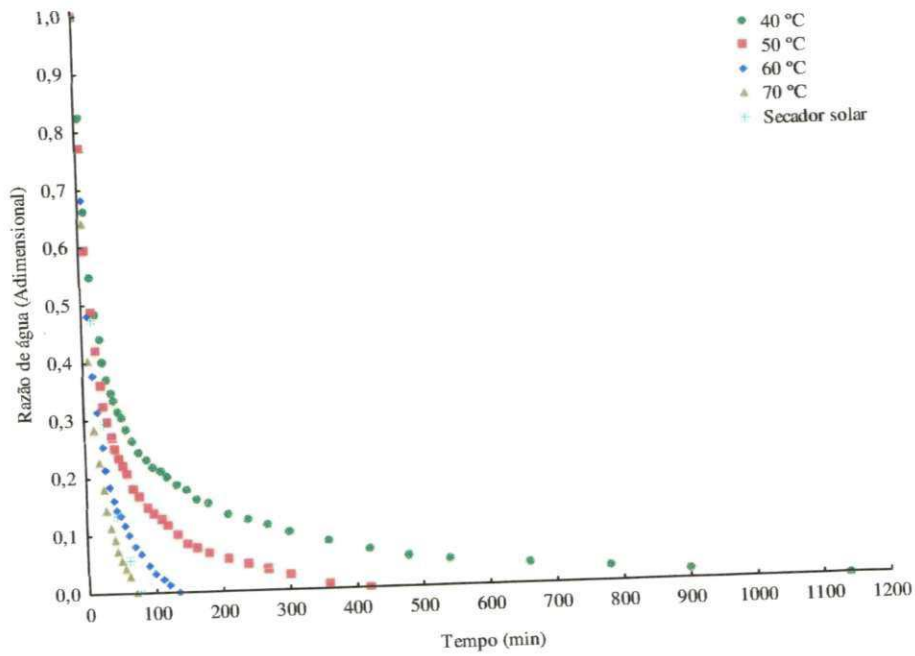


Figura 4.29 – Curvas de secagem das FCO em estufa e em secador solar

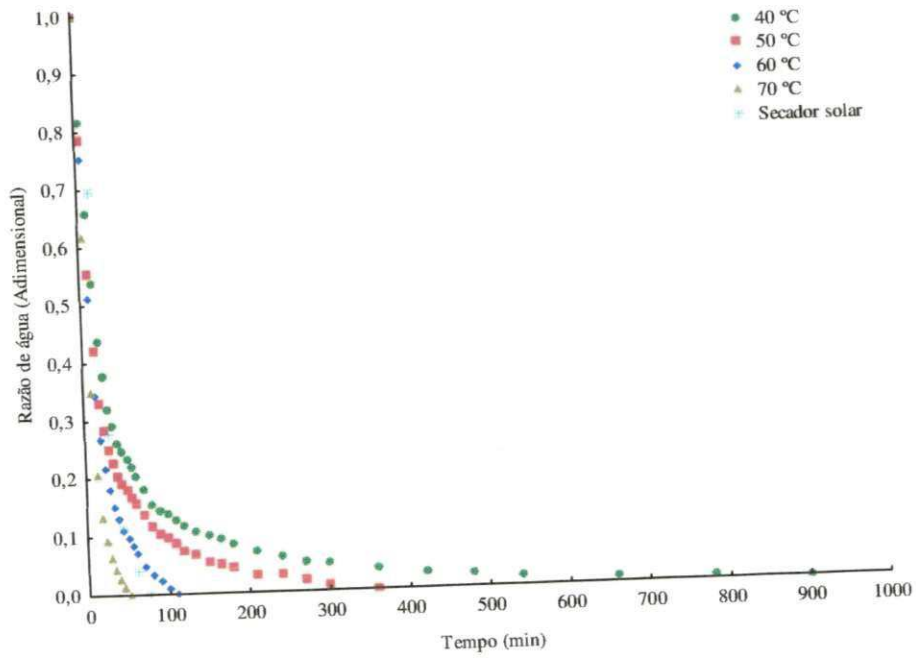


Figura 4.30 – Curvas de secagem das FSO em estufa e em secador solar

4.3.5 – Secagens em estufa e em secador ACSN combinada com secagem em secador solar

Estão apresentados nas Figuras 4.31 e 4.32 os pontos experimentais da cinética de secagem em estufa dos grãos residuais de urucum com e sem óleo (GCO e GSO), comparados com os dados da cinética de secagem dessas amostras em secador ACSN de uso noturno combinada com secador solar de uso diurno.

Verifica-se que as curvas de secagem referentes à etapa de desidratação das amostras GCO e GSO em secador ACSN no período noturno ficaram próximas aos pontos experimentais das secagens dessas amostras em estufa na temperatura de 40 °C; na segunda etapa de secagem, referente à desidratação em secador solar de uso diurno, observa-se queda brusca nas razões de água, de ambas as amostras, obtendo-se, ao final da secagem, tempos de desidratação próximos para as secagens em estufa na temperatura de 60 °C.

DIÓGENES (2010) realizou comparações entre as secagens de grãos de abóbora em estufa e em secador ACSN combinada com secador solar e verificou que as amostras desidratadas em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80 °C perderam água com maior velocidade que as amostras secadas no secador ACSN combinada com o solar.

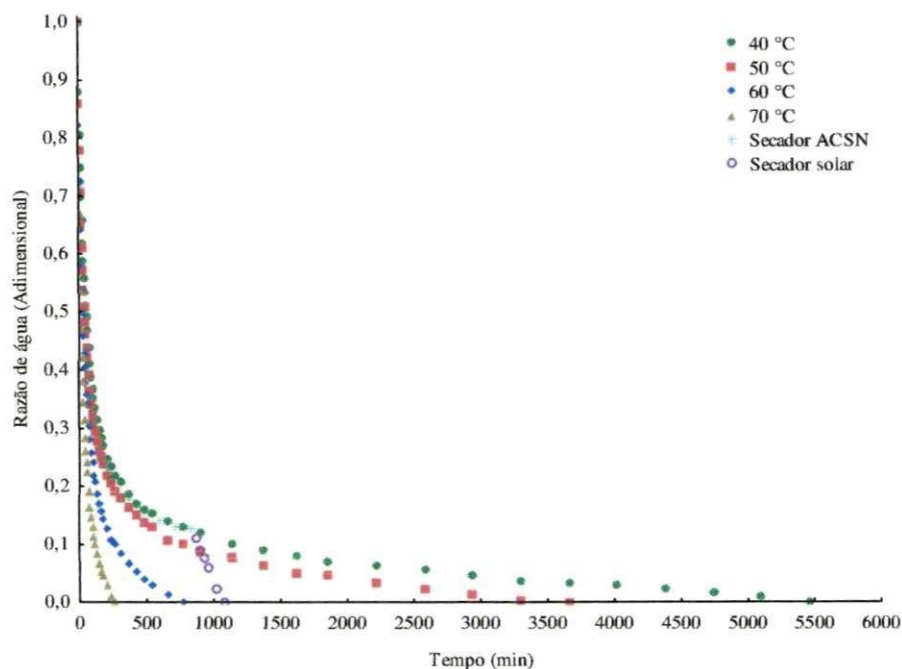


Figura 4.31 – Curvas de secagem dos GCO em estufa e em secador ACSN combinada com secagem em secador solar

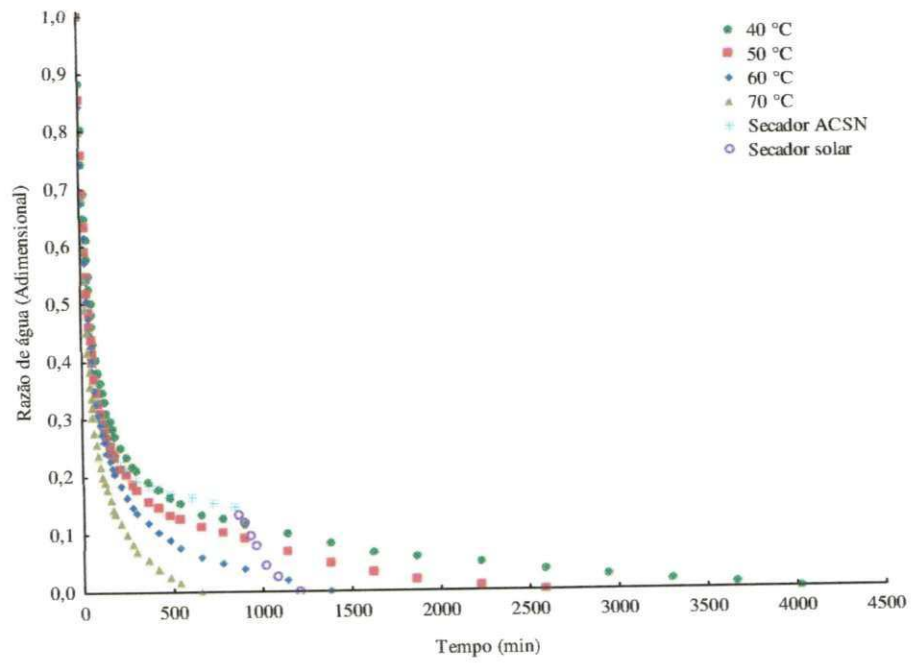


Figura 4.32 – Curvas de secagem dos GSO em estufa e em secador ACSN combinada com secagem em secador solar

5 – CONCLUSÕES

➤ Os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson propiciaram bons ajustes aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras de grãos e farinhas de grãos residuais de urucum com e sem óleo em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C, podendo ser utilizados na predição de secagem desses produtos, onde o modelo Dois Termos apresentou os maiores coeficientes de determinação (R^2);

➤ Para as secagens por meio de energia solar, os modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson tiveram bons ajustes aos dados experimentais da cinética de secagem das amostras de grãos e farinhas de grãos residuais de urucum com e sem óleo por exposição direta ao sol, exposição direta ao sol combinada com secador ACSN, em secador ACSN, em secador solar e em secador ACSN combinada com secador solar, podendo ser utilizados na predição do fenômeno de secagem desses produtos, onde os modelos de Midilli e Dois Termos apresentaram os maiores coeficientes de determinação (R^2);

➤ Para as amostras cujas secagens se iniciaram no período diurno combinada com secagens noturnas, a utilização do secador ACSN no período noturno evitou absorção de água pelas amostras e promoveu sua secagem, o que possibilitou a obtenção de produto com menor teor de água;

➤ Para as amostras que iniciaram a secagem no período noturno, a utilização do secador ACSN, no período noturno, possibilitou maiores taxas de secagem, em comparação com a testemunha, com obtenção de produto com menor teor de água;

➤ As secagens solares apresentaram tempos de desidratação menores que os observados nas secagens convencionais.

6 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AFONSO JUNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Comparação de modelos matemáticos para descrição da cinética de secagem em camada fina de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.349-353, 1999.

AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C. Efeitos imediato e latente da secagem de sementes de feijão colhidas com diferentes níveis de umidade. **Ciência e Agrotecnologia**, v.24, n.Especial, p.33-40, 2000.

AHRENS, D.C.; VILLELA, F.A. Secagem intermitente e seus efeitos na qualidade fisiológica de sementes de tremoço azul. **Scientia Agrícola**, v.53, n.2/3, p.309-315, 1996.

AHRENS, D.C.; LOLLATO, M.A. Secagens ao sol e artificial de sementes de feijão: curvas de secagem e efeitos sobre a qualidade fisiológica. **Revista Brasileira de Sementes**, v.19, n.1, p.22-27, 1997.

AKPINAR, E.K. Mathematical modelling of thin layer drying process under open sun of some aromatic plants. **Journal of Food Engineering**, v.77, n.4, p.864-870, 2006.

AKPINAR, E.K. Mathematical modelling and experimental investigation on sun and solar drying of white mulberry. **Journal of Mechanical Science and Technology**, v.22, n.8, p.1544-1553, 2008.

AKPINAR, E.K.; BICER, Y. Modelling of thin layer drying kinetics of sour cherry in a solar dryer and under open sun. **Journal of Scientific & Industrial Research**, v.66, n.9, p.764-771, 2007.

AKPINAR, E.K.; BICER, Y. Mathematical modelling of thin layer drying process of long green pepper in solar dryer and under open sun. **Energy Conversion and Management**, v.49, n.6, p.1367-1375, 2008.

AL-MAHASNEH, M.A.; RABABAH, T.M.; AL-SHBOOL, M.A.; YANG, W. Thin-layer drying kinetics of sesame hulls under forced convection and open sun drying. **Journal of Food Process Engineering**, v.30, n.3, p.324-337, 2007.

ALEXANDRE, H.V.; GOMES, J.P.; BARROS NETO, A.L.; SILVA, F.L.H.; ALMEIDA, F.A.C. Cinética de secagem de abacaxi cv. pérola em fatias. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.11, n.2, p.123-128, 2009.

ALMEIDA, F.A.C.; FONSECA, K.S.; GOUVEIA, J.P.G. Secagem natural de gergelim e determinação da umidade de equilíbrio. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.3, n.3, p.343-348, 1999.

ALMEIDA, D.P.; RESENDE, O.; COSTA, L.M.; MENDES, U.C.; SALES, J.F. Cinética de secagem do feijão adzuki (*Vigna angularis*). **Global Science and Technology**, v.2, n.1, p.72-83, 2009.

ALONSO, L.F.T.; PARK, K.J. Métodos de seleção de secadores. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, n.2, p. 208-216, 2005.

ALVES, R.W. **Extração de corantes de urucum por processos adsorptivos utilizando argilas comerciais e *colloidal gás aphrons***. 2005. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

ALVES, R.W.; SOUZA, A.A.U.; SOUZA, S.M.A.G.U. Extração por agitação mecânica de sementes de urucum (*Bixa orellana*), purificação e análise dos extratos por espectrofotometria e HPLC. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v.2, n.1, p.27-34, 2008.

AMENDOLA, M.; QUEIROZ, M.R. Mathematical methodologies for calculating the mass diffusion coefficient of bananas during drying. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.6, p.623–627, 2007.

AMPESSAN, F.; LACERDA FILHO, A.F.; VOLK, M.B.S.; RIGUEIRA, R.J.A. Comparação entre secagens de café cereja descascado em terreiros com diferentes tipos de pavimentação. **Engenharia na Agricultura**, v.18, n.5, p.373-381, 2010.

ANDREOLI, D.M.C.; GROTH, D.; RAZERA, L.F. Armazenamento de sementes de café (*Coffea canephora* L. cv. Guarini) acondicionadas em dois tipos de embalagens, após secagem natural e artificial. **Revista Brasileira de Sementes**, v.15, n.1, p. 87-95, 1993.

ANSELMO, G.C.S.; CAVALCANTI-MATA, M.E.R.M.; RODRIGUES, E. Comportamento higroscópico do extrato seco de urucum (*Bixa orellana* L.). **Ciência e Agrotecnologia**, v.32, n.6, p.1888-1892, 2008.

ARAÚJO, E.F.; SILVA, R.F.; SILVA, J.S.; SEDIYAMA, C.S. Influência da secagem das vagens na germinação e no vigor de sementes de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, v.6, n.2, p. 97-110, 1984.

ARAÚJO FILHO, D.G.; EIDAM, T.; BORSATO, A.V.; RAUPP, D.S. Processamento de produto farináceo a partir de beterrabas submetidas à secagem estacionária. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.33, n.2, p.207-214, 2011.

ARÉVALO-PINEDO, A.; MURR, F.E.X. Influência da pressão, temperatura e pré-tratamentos na secagem a vácuo de cenoura e abóbora. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.25, n.4, p.636-643, 2005.

ARNOSTI JÚNIOR, S.; INNOCENTINI, M.D.M.; PANDOLFELLI, V.C. Variáveis críticas no processo de secagem de concretos refratários. **Cerâmica**, v.45, n.292-293, p.107-118, 1999.

AVELAR, S.A.G.; LEVIEN, A.M.; PESKE, A.T.; VILLELA, F.A.; BAUDET, L. Secagem estacionária de sementes de soja com ar desumidificado por resfriamento. **Revista Brasileira de Sementes**, v.33, n.3 p.454-462, 2011.

AZOUBEL, P.M.; EL-AOUAR, A.B.; TONON, R.V.; KUROZAWA, L.E.; ANTONIO, G.C.; MURR, F.E.X.; PARK, K.J. Effect of osmotic dehydration on the drying kinetics and quality of cashew apple. **International Journal of Food Science and Technology**, v.44, n.5, p.980-986, 2009.

BARBOSA, M.I.M.J.; MERCADANTE, A.Z. Avaliação da estabilidade das microcápsulas de bixina em diferentes matrizes alimentícias. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v.2, n.1, p.23-26, 2008.

BARBOSA, F.F.; ELIAS, M.C.; FAGUNDES, C.A.A.; OLIVEIRA, M.; PEREIRA, F.M.; DIONELLO, R.G. Manejo térmico do ar na secagem estacionária e seus efeitos no desempenho industrial de arroz branco e parboilizado. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v.27, n.2, p.271-280, 2009.

BELEN-CAMACHO, D.R.; ROMAN, J.C.; PANTALEON, D.G.; MORENO-ÁLVAREZ, M.J.; MARTÍNEZ, C.M.; ESCALONA, C.E.O. Efecto del secado solar en los contenidos de humedad, carbohidratos, carotenoides totales e índice de peróxidos del mesocarpio de la palma coroba (*Attalea* spp.). **Interciencia**, v.32, n.4, p.257-261, 2007.

BELESSIOTIS, V.; DELYANNIS, E. Solar drying. **Solar Energy**, v.85, n.8, p.1665-1691, 2011.

BENITES, V.M. Perspectivas de uso de palhada para a produção de compostos orgânicos. In: SOUZA, F.H.D.; POTT, E.B.; PRIMAVESI, O; BERNARDI, A.C.C.; RODRIGUES, A.A. **Usos alternativos da palhada residual da produção de sementes para pastagens**. 1. ed. São Carlos: Embrapa Pecuária Sudeste, 2006. p.101-120.

BILBAO-SÁINZ, C.; ANDRÉS, A.; FITO, P. Hydration kinetics of dried apple as affected by drying conditions. **Journal of Food Engineering**, v.68, n.3, p.369-376, 2005.

BINGOL, G.; PAN, Z.; ROBERTS, J.S.; DEVRES, Y.O.; BALABAN, M.O. Mathematical modeling of microwave-assisted convective heating and drying of grapes.

International Journal of Agricultural and Biological Engineering, v.1, n.2, p.46-54, 2008.

BORÉM, F.M.; CORADI, P.C.; SAATH, R.; OLIVEIRA, J.A. Qualidade do café natural e despolpado após secagem em terreiro e com altas temperaturas. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 5, p. 1609-1615, 2008.

BORGES, S.V.; MANCINI, M.C.; CORRÊA, J.L.G.; LEITE, J.B. Drying kinetics of bananas by natural convection: influence of temperature, shape, blanching and cultivar. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.2, p.368-376, 2011.

BORIN, I.; FRASCARELI, E.C.; MAURO, M.A.; KIMURA, M. Efeito do pré-tratamento osmótico com sacarose e cloreto de sódio sobre a secagem convectiva de abóbora. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n.1, p.39-50, 2008.

BOTELHO, F.M.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; MARTINS, M.A.; MAGALHÃES, F.E.A.; CAMPOS, S.C. Periods of constant and falling-rate for infrared drying of carrot slices. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.8, p.845-852, 2011.

BRAGA, C.A.S.; MOREIRA, C.A.; PECHE FILHO, A.; BERNARDI, J.A.; MELLO, R.C.; STORINO, M.; LINO, A.C.L. Desenvolvimento e avaliação de um secador solar para grãos, associado a silo subterrâneo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.9, n.4, p.666-670, 2005.

BRASIL. Ministério da Saúde. Agência nacional de Vigilância Sanitária. **Métodos físico-químicos para análises de alimentos**. Brasília: Ministério da Saúde, 2005. 1017p.

BROD, F.P.R. **Avaliação de um secador vibro-fluidizado**. 2003. 336 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola). Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. New York: AVI Book, 1992. 450p.

BRUCE, D.M. Exposed-layer barley drying: Three models fitted to new data up to 150 °C. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.32, n.4, p.337-347, 1985.

CANTO, W. L.; OLIVEIRA, V. P.; CARVALHO, P. R. N.; GERMER, S. P. M. **Produção e mercado de urucum, no Brasil**. Campinas: ITAL, 1991. 65p.

CARLESSO, V.O.; BERBERT, P.A.; SILVA, R.F.; VIANNA, A.P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R.G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.27, n.3, p.444-448, 2005.

CARLESSO, V.O.; BERBERT, P.A.; SILVA, R.F.; DETMANN, E. Avaliação de modelos de secagem em camada fina de sementes de maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Sementes**, v.29, n.2, p.28-37, 2007.

CARVALHO, N.M. **A secagem de sementes**. Jaboticabal: FUNEP, 1994. 165p.

CARVALHO, P.R.N.; HEIN, M. Urucum: uma fonte de corante natural. **Coletânea ITAL**, v.19, n.1, p. 25-33, 1989.

CATANEO, C.B.; CALIARI, V.; GONZAGA, L.V.; KUSKOSKI, E.M.; FETT, R. Atividade antioxidante e conteúdo fenólico do resíduo agroindustrial da produção de vinho. **Semina: Ciências Agrárias**, v.29, n.1, p.93-102, 2008.

CHRISTENSEN, C. M.; KAUFMANN, H. H. Microflora. In: CHRISTENSEN, C. M. **Storage of cereal grain and their products**. St. Paul: American Association of Cereals Chemists, 1974. p.158-192.

CIHAN, A.; KAHVECI, K.; HACIHAFIZOGLU, O. Modelling of intermittent drying of thin layer rough rice. **Journal of Food Engineering**, v.79, n.1, p. 293-298, 2007.

CLEMENT, A.D.; EMMANUEL, A.N.; KOUAMÉ, P.; BENJAMIN, Y.K. Mathematical modelling of sun drying kinetics of thin layer cocoa (*Theobroma cacao*) beans. **Journal of Applied Sciences Research**, v.5, n.9, p.1110-1116, 2009.

CLEMENTINO, R.H. **Utilização de subprodutos agroindustriais em dietas de ovinos de corte: consumo, digestibilidade, desempenho e características de carcaça**. 2008. 136 f. Tese (Doutorado em Zootecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

CORLETT, F.M.F.; BARROS, A.C.S.A.; VILLELA, F.A. Qualidade fisiológica de sementes de urucum armazenadas em diferentes ambientes e embalagens. **Revista Brasileira de Sementes**, v.29, n.2, p.148-158, 2007.

CORRÊA, P.C.; MACHADO, P.F.; ANDRADE, E.T. Cinética de secagem e qualidade de grãos de milho-pipoca. **Ciência e Agrotecnologia**, v.25, n.1, p.134-142, 2001.

CORRÊA, P.C.; RIBEIRO, D.M.; RESENDE, O.; BOTELHO, F.M. Determinação e modelagem das propriedades físicas e da contração volumétrica do trigo, durante a secagem. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.10, n.3, p.665-670, 2006a.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; NOGUEIRA, B.L. Determinação do coeficiente de difusão líquida dos grãos de feijão. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8, n.2, p.117-126, 2006b.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; RIBEIRO, D.M. Drying characteristics and kinetics of coffee berry. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8, n.1, p.1-10, 2006c.

CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MARTINAZZO, A.P.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M. Modelagem matemática para a descrição do processo de secagem do feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) em camadas delgadas. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, p.501-510, 2007.

CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G.H.H.; BOTELHO, F.M.; GONELI, A.L.D.; CARVALHO, F.M. Modelagem matemática e determinação das propriedades termodinâmicas do café (*Coffea arabica* L.) durante o processo de secagem. **Revista Ceres**, v. 57, n.5, p.595-601, 2010.

COSTA, A.R.S. **Sistema de secagem solar para frutas tropicais e modelagem da secagem de banana em um secador de coluna estática**. 2008. 169 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal.

COSTA, L.M.; RESENDE, O.; SOUSA, K.A.; GONÇALVES, D.N. Coeficiente de difusão efetivo e modelagem matemática da secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.10, p.1089-1096, 2011.

CUNHA, F.G. **Estudo da extração mecânica da bixina das sementes de urucum em leite de jorro**. 2008. 92 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia.

DANTAS, H.J. **Secagem solar e convencional de amêndoas de jaca**. 2007. 125 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DESAI, S.R.; PALLED, V.; ANANTACHAR, M. Performance evaluation of farm solar dryer for chilly drying. **Karnataka Journal of Agricultural Science**, v.22, n.2, p.382-384, 2009.

DIÓGENES, A.M.G. **Secagem solar e convencional de grãos de abóbora**. 2010. 155 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande.

DOYMAZ, I. Drying behaviour of green beans. **Journal of Food Engineering**, v.69, n.2, 161-165, 2005.

DOYMAZ, I. Thin-layer drying of spinach leaves in a convective dryer. **Journal of Food Process Engineering**, v.32, n.1, p.112-125, 2009.

DOYMAZ, I. Drying of green bean and okra under solar energy. **Chemical Industry & Chemical Engineering Quarterly**, v.17, n.2, p.199-205, 2011.

DOYMAZ, I.; KOCAYIGIT, F. Drying and rehydration behaviors of convection drying of green peas. **Drying Technology**, v.29, n.11, p.1273-1282, 2011.

DUZAT, R.M.; MACEDO, H.; ROCHA, L.C.; NASCIMENTO, R.C.; BARBOSA, A.P. Secador solar multi-uso para beneficiamento de produtos naturais da Amazônia. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL (AGRENER), 4., 2002. Campinas, SP. **Anais...** Campinas: Núcleo Interdisciplinar de Planejamento Energético da UNICAMP & Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2002. CD-ROM.

EL-AQUAR, A.A.; MURR, F.E.X. Estudo e modelagem da cinética de desidratação osmótica do mamão formosa (*Carica papaya* L.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.23, n.1, p. 69-75, 2003.

FAGUNWA, A.O.; KOYA, O. A.; FAVORODE, M.O. Development of an Intermittent Solar Dryer for Cocoa Beans. **Agricultural Engineering International: the CIGR Journal**, v.11, n.1, p.1-14, 2009.

FANG, S.Z.; WANG, Z.F.; HU, X.S. Hot air drying of whole fruit Chinese jujube (*Zizyphus jujuba* Miller): thinlayer mathematical modelling. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 44, n.9, p.1818-1824, 2009.

FARIA, L.J.G. **Análise experimental do processo de secagem de urucum (*Bixa orellana* L.) em leito fixo**. 1998. 274 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas.

FARIA, L.J.G.; ROCHA, S.C.S. Optimization of annatto (*Bixa orellana* L.) drying in fixed bed. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.17, n.4-7, p.483-496, 2000.

FERREIRA, A.G.; MAIA, C.B.; CORTEZ, M.F.B.; VALLE, R.M. Technical feasibility assessment of a solar chimney for food drying. **Solar Energy**, v.82, n.3, p.198-205, 2008.

FERREIRA, M.F.P.; PENA, R.S. Estudo da secagem da casca do maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.12, n.1, p.15-28, 2010.

FIorentin, L.D.; MENON, B.T.; ALVES, J.A.; BARROS, S.T.D.; PEREIRA, N.C.; MÓDENES, A.N. Determinação da cinética e das isoterms de secagem do bagaço da laranja. **Acta Scientiarum. Technology**, v.32, n.2, p.147-152, 2010.

FORTES, M; OKOS, M.R. Changes in physical properties of corn during drying. **Transactions of the ASABE**, v.23, n.4, p.1004-1008, 1980.

GARCIA, D.C.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T.; MENEZES, N.L. A secagem de sementes. **Ciência Rural**, v.34, n.2, p.603-608, 2004.

GARCIA, D.C.; BARROS, A.C.S.A.; PESKE, S.T.; MENEZES, N.L. Qualidade fisiológica de sementes de trigo submetidas à secagem estacionária com ar ambiente forçado. **Revista Brasileira de Sementes**, v.27, n.1, p.158-166, 2005.

GATEA, A.A. Design, construction and performance evaluation of solar maize dryer. **Journal of Agricultural Biotechnology and Sustainable Development**, v.2, n.3, p.39-46, 2010.

GOMES, S.M.S.; BRUNO, R.L.A. Influência da temperatura e substratos na germinação de sementes de urucum (*Bixa orellana* L.). **Revista Brasileira de Sementes**, v.14, n.1, p.47-50, 1992.

GONÇALVES, J.S.; NEIVA, J.N.M.; CÂNDIDO, M.J.D.; OLIVEIRA, B.C.M.; LOBO, R.N.B. Composição bromatológica e características fermentativas de silagens de capim-elefante (*Pennisetum purpureum* Schum.) cv. Roxo contendo níveis crescentes do subproduto da semente do urucum (*Bixa orellana* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v.37, n.2, p.228-234, 2006.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; REIS NETO, S.A. Estudo da difusão de umidade em grãos de trigo durante a secagem. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.27, n.1, p. 135-140, 2007.

GONELI, A.L.D.; CORRÊA, P.C.; MAGALHÃES, F.E.A.; BAPTESTINI, F.M. Contração volumétrica e forma dos frutos de mamona durante a secagem. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.33, n.1, p.1-8, 2011.

GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C.; MURR, F.E.X. Estudo da difusividade e do encolhimento do gengibre (*Zingiber officinale*, Roscoe) durante a secagem. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.1, n.1, p.51-58, 1999.

GOUVEIA, J.P.G.; ALMEIDA, F.A.C.; FARIAS, E.S.; SILVA, M.M. CHAVES, M.C.V.; REIS, L.S. Determinação das curvas de secagem em frutos de cajá. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.especial, n.1, p.65-68, 2003.

GOYALDE, N.A.; MELO, E.C.; ROCHA, R.P.; GONELI, A.L.D.; ARAÚJO, F.L. Mathematical modeling of the drying kinetics of sugarcane slices. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.11, n.2, p.117-121, 2009.

GUEDES, A.M.M.; FARIA, L.J.G. Determinação da constante de secagem de urucum (*Bixa orellana* L.) em secador convectivo de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.2, n.1, p.73-86, 2000.

GUINÉ, R.P.F. Secagem Solar de Pêras: Evolução da Densidade e Características de Encolhimento. **Brazilian Journal Food Technology**, v.8, n.3, p. 248-251, 2005.

GUINÉ, R.P.F.; FERNANDES, R.M.C. Analysis of the drying kinetics of chestnuts. **Journal of Food Engineering**, v.76, n.3, 460-467, 2006.

HACIHAFIZOGLU, O.; CIHAN, A.; KAHVECI, K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice. **Food and Bioproducts Processing**, v.86, n.4, p.268-275, 2008.

HALL, C. W. **Drying and storage of agricultural crops**. Westport: AVI, 1980. 381p.

HARDER, M.N.C.; SPADA, F.P.; SAVINO, V.J.M.; COELHO, A.A.D.; CORRER, E.; MARTINS, E. Coloração de cortes cozidos de frangos alimentados com urucum. **Ciência Tecnologia de Alimentos**, v.30, n.2, p.507-509, 2010.

HII, C.L.; LAW, C.L.; CLOKE, M. Modelling of thin layer drying kinetics of cocoa beans during artificial and natural drying. **Journal of Engineering Science and Technology**, v.3, n.1, p.1-10, 2008.

HII, C.L.; LAW, C.L.; SUZANNAH, S. Drying kinetics of the individual layer of cocoa beans during heat pump drying. **Journal of Food Engineering**, v.108, n.2, p.276-282, 2012.

JITTANIT, W. Kinetics and temperature dependent moisture diffusivities of pumpkin seeds during drying. **Kasetsart Journal: Natural Science**, v.45, n.1, p.147-158, 2011.

KOUA, K.B.; FASSINOU, W.F.; GBAHA, P.; TOURE, S. Mathematical modelling of the thin layer solar drying of banana, mango and cassava. **Energy**, v.34, n.10, 1594-1602, 2009.

KOYUNCU, T.; SERDAR, U.; TOSUN, I. Drying characteristics and energy requirement for dehydration of chestnuts (*Castanea sativa* Mill.). **Journal of Food Engineering**, v.62, n.2, p.165-168, 2004.

LEMA, A.; PONTIN, M.; SANMARTINO, A.; ZILETTI, M.; MARTINELLO, M. Características del proceso de secado en capa delgada del perejil. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v.11, n.1-2, p.875-882, 2007.

LESCANO, C.A.A.; TOBINAGA, S. Modelo codificado e real para a difusividade efetiva da secagem do resíduo do extrato hidrossolúvel de soja. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.6, n.1, p.17-25, 2004.

LIMA, R.V. LOPES, J.C.; COELHO, R.I. Germinação de sementes de urucu em diferentes temperaturas e substratos. **Ciência e Agrotecnologia**, v.31, n.4, p.1219-1224, 2007a.

LIMA, E.E.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; QUEIROZ, A.J.M. Cinética de secagem de polpa de facheiro. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.9, n.1, p.17-28, 2007b.

LUANGMALAWAT, P.; PRACHAYAWARAKORN, S.; NATHAKARANAKULEA, A.; SOPONRONNARITA, S. Effect of temperature on drying characteristics and quality of cooked rice. **Food Science and Technology**, v.41, n.4, p.716-723, 2008.

MACHADO, A.V.; OLIVEIRA, E.L.; SANTOS, E.S.; OLIVEIRA, J.A. Estudio del Secado de anacardo (*Anacardium occidentale L.*) mediante secador solar de radiación directa. **Información Tecnológica**, v.21, n.1, p. 31-37, 2010.

MACHADO, A.V.; OLIVEIRA, E.L.; SANTOS, E.S.; OLIVEIRA, J.A.; FREITAS, L.M. Avaliação de um secador solar sob convecção forçada para a secagem do pedúnculo de caju. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.6, n.1, p.1-7, 2011.

MARINI, L.J.; GUTKOSKI, L.C.; ELIAS, M.C.; MEZZOMO, N. Efeito da secagem intermitente na estabilidade de grãos de aveia branca. **Brazilian Journal of Food Technology**, v.8, n.3, p.260-267, 2005.

MARINI, L.J.; GUTKOSKI, L.C.; ELIAS, M.C.; SANTIN, J.A. Qualidade de grãos de aveia sob secagem intermitente em altas temperaturas. **Ciência Rural**, v.37, n.5, p.1268-1273, 2007.

MARTINAZZO, A.P.; CORRÊA, P.C.; RESENDE, O.; MELO, E.C. Análise e descrição matemática da cinética de secagem de folhas de capim-limão. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.11, n.3, p.301-306, 2007a.

MARTINAZZO, A.P.; CORRÊA, P.C.; MELO, E.C.; BARBOSA, F.F. Difusividade efetiva em folhas de *Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf submetidas à secagem com diferentes comprimentos de corte e temperaturas do ar. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.9, n.1, p.68-72, 2007b.

MARTINAZZO, A.P.; MELO, E.C.; CORRÊA, P.C.; SANTOS, R.H.S. Modelagem matemática e parâmetros qualitativos da secagem de folhas de capim-limão

[*Cymbopogon citratus* (DC.) Stapf]. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.12, n.4, p.488-498, 2010.

MEISAMI-ASL, E.; RAFIEE, S.; KEYHANI, A.; TABATABAEEFAR, A. Mathematical modeling of moisture content of apple slices (Var. Golab) during drying. **Pakistan Journal of Nutrition**, v.8, n.6, p.804-809, 2009.

MENGES, H.O.; ERTEKIN, C. Mathematical modeling of thin layer drying of Golden apples. **Journal of Food Engineering**, v.77, n.1, p.119-125, 2006.

MERCADANTE, A.Z.; PFANDER, H. Caracterização de um novo carotenóide minoritário de urucum. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, n.2, p.193-196, 2001.

MESQUITA, F.L.A. **Abelhas visitantes das flores do urucuzeiro (*Bixa orellana* L.) e suas eficiências de polinização**. 2008. 55 f. Dissertação (Mestrado em Zootecnia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MEZIANE, S. Drying kinetics of olive pomace in a fluidized bed dryer. **Energy Conversion and Management**, v.52, n.3, p.1644–1649, 2011.

MIDILLI, A.; KUCUK, H. Mathematical modeling of thin layer drying of pistachio by using solar energy. **Energy Conversion and Management**, v.44, n.7, p.1111-1122, 2003.

MILMAN, M.J. **Equipamentos para pré-processamento de grãos**. Pelotas: Ed. Universitária/UFPel, 2002. 206p.

MOHAMMADI, A.; RAFIEE, S.; KEYHANI, A.; EMAM-DJOMEH, Z. Moisture content modeling of sliced kiwifruit (cv. *Hayward*) during drying. **Pakistan Journal of Nutrition**, v.8, n.1, p.78-82, 2009.

MONTES, E.J.M.; GALLO, R.T.; PIZARRO, R.D.A.; SIERRA, O.A.P.; ESCOBAR, J.L.M.; HERAZO, I.I.M. Modelado de la cinética de secado de ñame (*Dioscorea*

rotundata) em capa delgada. **Revista Ingeniería e Investigación**, v.28, n.2, p.45-52, 2008.

MORAES, S.A. **Subprodutos da agroindústria e indicadores externos de digestibilidade aparente em caprinos**. 2007. 60 f. Tese (Doutorado em Ciência Animal) – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte.

MORAES NETO, J.M.; CIRNE, L.E.M.R.; PEDROZA, J.P.; SILVA, M.G. Componentes químicos da farinha de banana (*Musa* sp.) obtida por meio de secagem natural. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.2, n.3, p.316-318, 1998.

MORSETTO, J.; LEMA, A.; PONTIN, M.; PAISIO, G. Estudio preliminar sobre la cinética de secado para perejil en condiciones de secado solar. **Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente**, v.12, n.1-2, p.8141-8146, 2008.

NONHEBEL, G.M.A.; MOSS, A.A.H. **Drying of solids in the chemical industry**. Londres: Butterworth & Co., 1971. 301p.

OLIVEIRA, J.S. **Caracterização, extração e purificação por cromatografia de compostos de urucum (*Bixa orellana* L.)**. 2005. 215 f. Tese (Doutorado em Engenharia Química) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OLIVEIRA, R.A.; OLIVEIRA, W.P.; PARK, K.J. Determinação da difusividade efetiva de raiz de chicória. **Engenharia Agrícola**, v.26, n.1, p.181-189, 2006.

OLIVEIRA, L.C.; GUTKOSKI, L.C.; ELIAS, M.C.; MAZZUTTI, S.; AOSANI, E.; ROCHA, J.C. Efeito da temperatura de secagem na qualidade de grãos de aveia branca. **Ciência e Agrotecnologia**, v.34, n.2, p.313-319, 2010.

PACHECO, A.C.W.; LUZ, G.R.; POLON, P.E.; JORGE, L.M.M.; PARAÍSO, P.R. Modeling of drying and adsorption isotherms of the fish feed. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, v.54, n.3, p.577-588, 2011.

PAGE, G.E. **Factors influencing the maximum rates of air drying shelled corn in thin-layer**. Indiana, 1949. Dissertation (M.Sc.). Purdue University, USA, 1949.

PALACIN, J.J.F.; LACERDA FILHO, A.F.; MELO, E.C.; TEIXEIRA, E.C. Secagem combinada de café cereja descascado. **Revista Engenharia na Agricultura**, v.17, n.3, p. 244-258, 2009.

PARK, K.J.; YADO, M.K.M.; BROD, F.P.R. Estudo de secagem de pêra bartlett (*Pyrus* sp.) em fatias. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.21, n.3, p. 288-292, 2001.

PARK, K.J.; TUBONI, C.T.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. Estudo da secagem de caqui giombo com encolhimento e sem encolhimento. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.6, n.1, p.71-86, 2004.

PARK, K.J.; ANTONIO, G.C.; OLIVEIRA, R.A.; PARK, K.J.B. **Conceitos de processo e equipamentos de secagem**. Campinas: UNICAMP, 2007. 127 p. Disponível em: <http://www.feagri.unicamp.br/ctea/manuais/concproceqsec_07.pdf>. Acesso em 27 de out. 2010.

PENA, R.S.; SILVA, D.M.S.; MENDONÇA, N.B.; ALMEIDA, M.D.C. Estudo da secagem da fibra residual do maracujá. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v.2, n.1, p.1-13, 2008.

PENA, R.S.; MENDONÇA, N.B. Secagem em camada delgada da fibra residual do maracujá. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v.27, n.2, p.257-270, 2009.

PIMENTEL, F.A. **Avaliação de métodos de obtenção e da estabilidade de pigmentos de sementes de urucum (*Bixa orellana* L.)**. 1995. 132 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

PONTES, S.F.O.; SANTOS, C.T.; BONOMO, R.C.F.; PONTES, L.V.; FONTAN, R.C.I. Determinação das curvas de secagem em camada delgada de pimenta de cheiro

(*Capsicum chinense*) a diferentes temperaturas **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.11, n.2, p.143-148, 2009.

PRADO, M.E.T.; PARK, K.J.; ALONSO, L.F.T. Shrinkage of dates (*Phoenix dactylifera*). **Drying Technology**, v.18, n.1/2, p.295-310, 2000.

PRESTON, H.D.; RICKARD, M.D. Extraction and Chemistry of Anatto. **Food Chemistry**, v.5, n.1, p. 47-56, 1980.

PREVIERO, C.A.; GROTH, D.; RAZERA, L.F. Secagem ao sol e qualidade fisiológica de sementes de *Brachiaria brizantha* (Hochst. ex A.Rich) Stapf. **Revista Brasileira de Sementes**, v.20, n.2, p.58-62, 1998.

RABÊLO, A.M.S.; TORRES, M.C.L.; GERALDINE, R.M.; SILVEIRA, M.F.A. Extração, secagem e torrefação da amêndoa do pequi (*Caryocar brasiliense* Camb.). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n.4, p.868-871, 2008.

RADHIKA, G.B.; SATYANARAYANA, S.V.; RAO, D.G. Mathematical model on thin layer drying of finger millet (*Elusine coracana*). **Advance Journal of Food Science and Technology**, v.3, n.2, p.127-131, 2011.

RADÜNZ, L.L.; MOSSI, A.J.; ZAKRZEWSKI, C.A.; AMARAL, A.S.; GRASSMANN, L. Análise da cinética de secagem de folhas de sálvia. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.9, p.979-986, 2010.

RADÜNZ, L.L.; AMARAL, A.S.; MOSSI, A.J.; MELO, E.C.; ROCHA, R.P. Avaliação da cinética de secagem de carqueja. **Engenharia na Agricultura**, v.19 n.1, p.19-27, 2011.

RAFIEE, S.; AFARI, A.; KASHANINEJAD, M.; OMID, M. Experimental and numerical investigations of moisture diffusion in pistachio nuts during drying with high temperature and low relative humidity. **International Journal of Agriculture & Biology**, v.9, n.3, p.412-415, 2007.

RAFIEE, S.H.; KEYHANI, A.; SHARIFI, M.; JAFARI, A.; MOBLI, H.; TABATABAEEFAR, A. Thin layer drying properties of soybean (*Viliamz* Cultivar). **Journal of Agricultural Science and Technology**, v.11, n.3, p.289-300, 2009.

RÊGO, A.C.; CÂNDIDO, M.J.D.; PEREIRA, E.S.; FEITOSA, J.V.; RÊGO, M.M.T. Degradação de silagens de capim-elefante contendo subproduto do urucum. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.3, p.482-489, 2010.

REIS, R.C.; BARBOSA, L.S. LIMA, M.L.; REIS, J.S.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R. Modelagem matemática da secagem da pimenta Cumari do Pará. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.4, p.347-353, 2011.

RESENDE, O.; CORRÊA, P. C.; GONELI, A. L. D.; MARTINAZZO, A. P.; RIBEIRO, R.M. Contração volumétrica na difusão líquida durante o processo de secagem do arroz em casca. **Revista Brasileira de Armazenamento**, v.30, n.2, p.163-171, 2005.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C. Modelagem matemática do processo de hidratação de sementes de feijão. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v.29, n.3, p. 373-378, 2007.

RESENDE, O.; ARCANJO, R.V.; SIQUEIRA, V.C.; RODRIGUES, S.; KESTER, A.N.; LIMA, P.P. Influência do tipo de pavimento na secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiros de concreto e chão batido. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.9, n.2, p.171-178, 2007.

RESENDE, O.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A.L.D.; BOTELHO, F.M.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática do processo de secagem de duas variedades de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.10, n.1, p.17-26, 2008.

RESENDE, O.; ARCANJO, R.V.; SIQUEIRA, V.C.; RODRIGUES, S. Modelagem matemática para a secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de concreto. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 31, n. 2, p. 189-196, 2009a.

RESENDE, O.; SIQUEIRA, V.C.; ARCANJO, R.V. Influência do pavimento de terreiros na secagem e na qualidade do café conilon. **Global Science and Technology**, v.3, n.5, p.26 -37, 2009b.

RESENDE, O.; RODRIGUES, S.; SIQUEIRA, V.C.; ARCANJO, R.V. Cinética da secagem de clones de café (*Coffea canephora* Pierre) em terreiro de chão batido. **Acta Amazônica**, v.40, n.2, p. 247-256, 2010.

RESENDE, O.; AFONSO JÚNIOR, P.C.; CORRÊA, P.C.; SIQUEIRA, V.C. Qualidade do café conilon submetido à secagem em terreiro híbrido e de concreto. **Ciência e Agrotecnologia**, v.35, n.2, p.327-335, 2011.

ROBERTS, J.S.; KIDD, D.R.; PADILLA-ZAKOUR, O. Drying kinetics of grape seeds. **Journal of Food Engineering**, v.89, n.4, p.460-465, 2008.

RODRÍGUEZ, J.H.; DIEZ, P.Q. Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. **Científica**, v.9, n.2, p. 63-71, 2005.

RONOH, E.K.; KANALI, C.L.; MAILUTHA, J.T.; SHITANDA, D. Modeling thin layer drying of amaranth seeds under open sun and natural convection solar tent dryer. **Agricultural Engineering International: the CIGR Journal**, v.11, n.1, p.1-13, 2009.

ROMERO-PEÑA, L.M.; KIECKBUSCH, T.G. Influência de condições de secagem na qualidade de fatias de tomate. **Brazilian Journal Food Technology**, v.6, n.1, p.69-76, 2003.

SACILIK, K. The thin-layer modelling of tomato drying process. **Agriculturae Conspectus Scientificus**, v.72, n.4, p.343-349, 2007a.

SACILIK, K. Effect of drying methods on thin-layer drying characteristics of hull-less seed pumpkin (*Cucurbita pepo* L.). **Journal of Food Engineering**, v.79, n.1, p.23-30, 2007b.

SAEED, I.E. Solar drying of Roselle (*Hibiscus sabdariffa* L.): mathematical modelling, drying experiments, and effects of the drying conditions. **Agricultural Engineering International: the CIGR Journal**, v.12, n.3, p.115-123, 2010.

SANTANA, K.C.; GUEDES, P.A.; REBOUÇAS, T.N.H.; SÃO JOSÉ, A.R.; LEMOS, O.L.; RODRIGUES VILA, M.T.; SOUZA, M.J.L. Teores de bixina em urucum (*Bixa orellana*) 'Piave Vermelha', em diferentes acondicionamentos e temperaturas. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v.2, n.1, p.19-22, 2008.

SANTOS, I.J.; COUTO, S.M.; ANDRADE, E.T. Cinética de secagem em camada fina do malte verde de cevada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.3, n.1, p.53-59, 2001.

SANTOS, B.M.; QUEIROZ, M.R.; BORGES, T.P.F.. A solar collector design procedure for crop drying. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**, v.22, n.2, p.277-284, 2005.

SANTOS, D.C.; QUEIROZ, A.J.M.; FIGUEIRÊDO, R.M.F.; OLIVEIRA, E.N.A. Secagem noturna de feijão caupi com o uso de energia solar. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 40., 2011. **Anais...** Cuiabá: Sociedade Brasileira de Engenharia Agrícola, 2011. CD-ROM.

SARAVIA, C.T.; PERES, W.B.; RISSO, J. Manejo da temperatura do ar na secagem intermitente de sementes de arroz irrigado. **Revista Brasileira de Sementes**, v.29, n.2, p.23-27, 2007.

SEHIEDLOU, S.; GHASEMZADEH, H.R.; HAMDAMI, N.; TALATI, F.; MOGHADDAM, M. Convective drying of apple: mathematical modeling and determination of some quality parameters. **International Journal of Agriculture & Biology**, v.12, n.2, p.171-178, 2010.

SENA, L.H.M.; MATOS, V.P.; FERREIRA, E.G.B.S.; SALES, A.G.F.A.; PACHECO, M.V. Qualidade fisiológica de sementes de pitangueira submetidas a diferentes

procedimentos de secagem e substratos - Parte 1. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.405–411, 2010.

SHAH, S.; JOSHI, M. Modeling microwave drying kinetics of sugarcane bagasse **International Journal of Electronics Engineering**, v.2, n.1, p. 159-163, 2010.

SILVA, J.S. **Pré-processamento de produtos agrícolas**. 1. ed. Juiz de Fora: Instituto Maria, 1995. 509 p.

SILVA, J.S.; BERBERT, P.A. **Colheita, secagem e armazenamento**. Viçosa: Aprenda Fácil, 1999. 146p.

SILVA, V.M.; VIOTTO, L.A. Drying of sicilian lemon residue: influence of process variables on the evaluation of the dietary fiber produced. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.30, n.2, p.421-428, 2010.

SILVA, J.H.V.; SILVA, E.L.; JORDÃO FILHO, J.; RIBEIRO, M.L.G. Efeitos da inclusão do resíduo da semente de urucum (*Bixa orellana* L.) na dieta para frangos de corte: desempenho e características de carcaça. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v.34, n.5, p.1606-1613, 2005.

SILVA, J.H.V.; SILVA, E.L.; JORDÃO FILHO, J.; RIBEIRO, M.L.G.; COSTA, F.G.P. Resíduo da semente de urucum (*Bixa orellana* L.) como corante da gema, pele, bico e ovário de poedeiras avaliado por dois métodos analíticos. **Ciência e Agrotecnologia**, v.30, n.5, p. 988-994, 2006.

SILVA, M.C.D.; BOTELHO, J.R.; SOUZA, A.G. Estudo cinético do corante bixina por decomposição térmica dinâmica. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v.2, n.1, p.11-14, 2008a.

SILVA, A.S.; GURJÃO, K.C.O.; ALMEIDA, F.A.C.; BRUNO, R.L.A.; PEREIRA, W.E. Desidratação da polpa de tamarindo pelo método de camada de espuma. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 6, p. 1899-1905, 2008b.

SILVA, A.S.; ALMEIDA, F.A.C.; LIMA, E.E.; SILVA, F.L.H.; GOMES, J.P. Drying kinetics of coriander (*Coriandrum sativum*) leaf and stem. **Ciência y Tecnología Alimentaria**, v.6, n.1, p. 13-19, 2008c.

SILVA, W.P.; CAVALCANTI-MATA, M.E.R.M.; SILVA, C.D.P.S.; GUEDES, M.A.; LIMA, A.G.B. Determinação da difusividade e da energia de ativação para feijão macassar (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.), variedade sempre-verde, com base no comportamento da secagem. **Engenharia Agrícola**, v.28, n.2, p.325-333, 2008d.

SILVA, A.S.; MELO, K.S.; ALVES, N.M.C.; FERNANDES, T.K.S.; FARIAS, P.A. Cinética de secagem em camada fina da banana maçã em secador de leito fixo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.11, n.2, p.129-136, 2009.

SILVA, P.I.; NACHTIGALL, A.M.; STRINGHETA, P.C. Eficiência de solventes na obtenção e caracterização de corantes de urucum (*Bixa orellana* L.). **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v.28, n.1, p. 115-124, 2010.

SIMIONI, D.; OLIVEIRA, M.; PAGNUSSATT, F.A.; DEUNER, C.C.; GUTKOSKI, L.C.; ELIAS, M.C. Parâmetros operacionais na secagem intermitente de grãos de aveia branca cultivar UPFA 20 Teixeira. **Ciência e Agrotecnologia**, v. 32, n. 2, p. 497-502, 2008.

SINÍCIO, R. **Simulação de secagem de milho em camadas espessas a baixas temperaturas**. 1983. 64 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

SOBUKOLA, O.P.; DAIRO, O.U.; SANI, L.O.; ODUNEWU, A.V.; FAFIOLU, B.O. Thin layer drying process of some leafy vegetables under open sun. **Food Science and Technology International**, v.13, n.1, p.35-40, 2007.

SOUSA, M.B.; PEDROZA, J.P.; BELTRÃO, N.E.M.; SEVERINO, L.S.; DANTAS, F.P. Cinética de secagem do farelo de mamona. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.8, n.2, p.135-146, 2006.

SOUSA, K.A.; RESENDE, O.; CHAVES, T.H.; COSTA, L.M. Cinética de secagem do nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). **Revista Ciência Agronômica**, v.42, n.4, p.883-892, 2011.

SOUZA, R.M.A.; SÃO JOSÉ, A.R. Ocorrência de enteroparasitas em colorífico comercializado em vitória da conquista – Bahia. **Alimentos e Nutrição**, v.20, n.2, p.241-245, 2009.

SREEKUMAR, A.; MANIKANTAN, P.E.; VIJAYAKUMAR, K.P. Performance of indirect solar cabinet dryer. **Energy Conversion and Management**, v.49, n.6, p.1388-1395, 2008.

TAHERI-GARAVANDA, A.; RAFIEEA, S.; KEYHANIA, A. Mathematical modeling of thin layer drying kinetics of tomato influence of air dryer conditions. **International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies**, v.2, n.2, p.147-160, 2011.

TAVAKOLIPOUR, H. Drying kinetics of pistachio nuts (*Pistacia vera* L.). **World Applied Sciences Journal**, v.12, n.9, p.1639-1646, 2011.

TONANI, F. L.; RUGGIERI, A.C.; A. GUIM, A.; ANDRADE, P.; QUEIROZ, A.C.; SANTOS, H.Q.; MALHEIROS, E.B. Avaliação nutricional do resíduo de urucum (*Bixa orellana*, L.), após a extração do corante. **Ars veterinaria**, v.16, n.2, p. 118-121, 2000.

TUNDE-AKINTUNDE, T.Y. Mathematical modeling of sun and solar drying of chilli pepper. **Renewable Energy**, v.36, n.8, p.2139-2145, 2011.

ULLMANN, R.; RESENDE, O.; SALES, J.F.; CHAVES, T.H. Qualidade das sementes de pinhão manso submetidas à secagem artificial. **Revista Ciência Agronômica**, v.41, n.3 p.442-447, 2010.

UTIYAMA, C.E. **Utilização do resíduo de sementes processadas de urucum (*Bixa orellana* L.) na alimentação de suínos em crescimento**. 2001. 43 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade de São Paulo, Piracicaba.

UTIYAMA, C.E.; MIYADA, V.S.; FIGUEIREDO, A.N.; OETTING, L. Digestibilidade de nutrientes do resíduo de semente processadas de urucum (*Bixa orellana* L.) para suínos em crescimento. REUNIÃO ANUAL DA SOCIEDADE BRASILEIRA DE ZOOTECNIA, 39., Recife. **Anais...** Recife: Sociedade Brasileira de Zootecnia, 2002. CD-ROM.

VERÍSSIMO, S.A.; OLIVEIRA, E.L.; LADCHUMANANANDASIVAM, R.; AQUINO, M.S.; ALEXANDRE, M.E.O. Aproveitamento do corante natural (*Bixa orellana*) no tingimento de fibra celulósica. **Tecnologia & Ciência Agropecuária**, v.2, n.1, p.35-39, 2008.

VILELA, C.A.A.; ARTUR, P.O. Secagem do açafrão (*Curcuma longa* L.) em diferentes cortes geométricos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.28, n.2, p. 387-394, 2008.

VILLELA, F.A.; SILVA, W.R. Curvas de secagem de sementes de milho utilizando o método de secagem intermitente. **Scientia Agrícola**, v.49, n.1, p.145-153, 1992.

WAUGHON, T.G.M.; PENA, R.S. Estudo da secagem da fibra residual do abacaxi. **Alimentos e Nutrição**, v.17, n.4, p.373-379, 2006.

WAUGHON, T.G.M.; PENA, R.S.S. Modelagem da secagem em camada delgada da fibra residual do abacaxi. **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**, v.26, n.2, p.297-306, 2008.

WEIRICH NETO, P.H.; EURICH, J.; FONSECA, R.G.; STEFANOVICZ, B.R.; FAUATE, A.; FAUATE, M. Desidratador de frutas com uso de energia solar direta. In: ENCONTRO DE ENGENHARIA E TECNOLOGIA DOS CAMPOS GERAIS, 3., 2007. **Anais...** Ponta Grossa: Associação dos Engenheiros e Arquitetos de Ponta Grossa, 2007. CD-ROM.

APÊNDICE A

Tabela A.1 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em estufa na temperatura de 40 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,4446	240	0,0079
5	0,2680	270	0,0043
10	0,2073	300	0,0049
15	0,1741	360	0,0043
20	0,1315	420	0,0031
25	0,1353	480	0,0015
30	0,0998	540	0,0014
35	0,1093	660	0,0011
40	0,0774	780	0,0012
45	0,0744	900	0,0012
50	0,0688	1140	0,0007
55	0,0734	1380	0,0007
60	0,0465	1620	0,0007
70	0,0411	1860	0,0003
80	0,0384	2220	0,0003
90	0,0344	2580	0,0004
100	0,0257	2940	0,0003
110	0,0268	3300	0,0002
120	0,0194	3660	0,0002
135	0,0169	4020	0,0002
150	0,0152	4380	0,0003
165	0,0143	4740	0,0003
180	0,0107	5100	0,0003
210	0,0079	5460	

TX – taxa de secagem



Tabela A.2 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em estufa na temperatura de 50 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,4836	180	0,0086
5	0,2674	210	0,0070
10	0,2347	240	0,0062
15	0,1670	270	0,0050
20	0,1309	300	0,0039
25	0,1294	360	0,0027
30	0,0999	420	0,0029
35	0,0914	480	0,0021
40	0,0781	540	0,0025
45	0,0701	660	0,0009
50	0,0647	780	0,0012
55	0,0545	900	0,0006
60	0,0418	1140	0,0008
70	0,0415	1380	0,0007
80	0,0315	1620	0,0002
90	0,0253	1860	0,0009
100	0,0204	2100	0,0005
110	0,0204	2340	0,0004
120	0,0175	2700	0,0002
135	0,0174	3300	0,0002
150	0,0079	3660	
165	0,0141		

TX – taxa de secagem

Tabela A.3 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em estufa na temperatura de 60 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,6029	110	0,0117
5	0,3239	120	0,0202
10	0,2653	135	0,0162
15	0,1899	150	0,0108
20	0,1308	165	0,0115
25	0,1293	180	0,0088
30	0,1229	210	0,0091
35	0,0894	240	0,0030
40	0,0715	270	0,0068
45	0,0735	300	0,0039
50	0,0609	360	0,0036
55	0,0533	420	0,0022
60	0,0493	480	0,0026
70	0,0358	540	0,0018
80	0,0356	660	0,0017
90	0,0236	780	
100	0,0328		

TX – taxa de secagem

Tabela A.4 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em estufa na temperatura de 70 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,6587	70	0,0311
5	0,3354	80	0,0241
10	0,3838	90	0,0194
15	0,1723	100	0,0205
20	0,1379	110	0,0159
25	0,1144	120	0,0158
30	0,0940	135	0,0120
35	0,0789	150	0,0112
40	0,0831	165	0,0075
45	0,0613	180	0,0063
50	0,0540	210	0,0081
55	0,0397	240	0,0044
60	0,0453	270	

TX – taxa de secagem

Tabela A.5 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em estufa na temperatura de 40 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,5822	180	0,0129
5	0,3715	210	0,0104
10	0,2858	240	0,0100
15	0,2283	270	0,0040
20	0,1851	300	0,0063
25	0,1631	360	0,0045
30	0,1527	420	0,0039
35	0,1186	480	0,0035
40	0,0988	540	0,0027
45	0,1032	660	0,0013
50	0,0788	780	0,0015
55	0,0912	900	0,0012
60	0,0620	1140	0,0013
70	0,0549	1380	0,0013
80	0,0443	1620	0,0006
90	0,0340	1860	0,0005
100	0,0325	2220	0,0005
110	0,0323	2580	0,0005
120	0,0247	2940	0,0005
135	0,0205	3300	0,0004
150	0,0179	3660	0,0004
165	0,0162	4020	

TX – taxa de secagem

Tabela A.6 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em estufa na temperatura de 50 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,6816	150	0,0160
5	0,4342	165	0,0120
10	0,2960	180	0,0119
15	0,2393	210	0,0063
20	0,1885	240	0,0091
25	0,1775	270	0,0071
30	0,1327	300	0,0053
35	0,1234	360	0,0037
40	0,1014	420	0,0031
45	0,0953	480	0,0029
50	0,0793	540	0,0016
55	0,0610	660	0,0016
60	0,0592	780	0,0015
70	0,0437	900	0,0016
80	0,0397	1140	0,0016
90	0,0320	1380	0,0011
100	0,0282	1620	0,0010
110	0,0207	1860	0,0005
120	0,0210	2220	0,0005
135	0,0161	2580	

TX – taxa de secagem

Tabela A.7 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em estufa na temperatura de 60 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,6276	120	0,0198
5	0,3769	135	0,0166
10	0,2519	150	0,0149
15	0,2201	165	0,0110
20	0,1584	180	0,0105
25	0,1252	210	0,0097
30	0,1110	240	0,0081
35	0,1099	270	0,0054
40	0,0912	300	0,0046
45	0,0829	360	0,0048
50	0,0823	420	0,0034
55	0,0570	480	0,0030
60	0,0505	540	0,0022
70	0,0427	660	0,0012
80	0,0327	780	0,0013
90	0,0277	900	0,0013
100	0,0252	1140	0,0013
110	0,0239	1380	

TX – taxa de secagem

Tabela A.8 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em estufa na temperatura de 70 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,7820	100	0,0258
5	0,4267	110	0,0152
10	0,3015	120	0,0155
15	0,1984	135	0,0185
20	0,1823	150	0,0154
25	0,1292	165	0,0092
30	0,1127	180	0,0088
35	0,1116	210	0,0099
40	0,0909	240	0,0072
45	0,0659	270	0,0071
50	0,0510	300	0,0039
55	0,0556	360	0,0037
60	0,0456	420	0,0037
70	0,0345	480	0,0026
80	0,0284	540	0,0019
90	0,0306	660	

TX – taxa de secagem

Tabela A.9 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em estufa na temperatura de 40 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,6602	120	0,0109
5	0,6067	135	0,0124
10	0,3884	150	0,0155
15	0,2162	165	0,0085
20	0,1444	180	0,0092
25	0,1425	210	0,0050
30	0,0965	240	0,0053
35	0,0712	270	0,0065
40	0,0464	300	0,0047
45	0,0632	360	0,0038
50	0,0363	420	0,0034
55	0,0602	480	0,0021
60	0,0323	540	0,0011
70	0,0321	660	0,0012
80	0,0201	780	0,0012
90	0,0201	900	0,0011
100	0,0129	1140	
110	0,0153		

TX – taxa de secagem

Tabela A.10 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em estufa na temperatura de 50 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,8767	90	0,0173
5	0,6485	100	0,0150
10	0,3661	110	0,0149
15	0,2352	120	0,0183
20	0,1984	135	0,0167
25	0,1125	150	0,0053
30	0,0897	165	0,0106
35	0,0818	180	0,0049
40	0,0693	210	0,0056
45	0,0570	240	0,0041
50	0,0378	270	0,0063
55	0,0471	300	0,0037
60	0,0398	360	0,0028
70	0,0221	420	
80	0,0278		

TX – taxa de secagem

Tabela A.11 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em estufa na temperatura de 60 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	1,2618	50	0,0481
5	0,7419	55	0,0502
10	0,3647	60	0,0352
15	0,2108	70	0,0214
20	0,2092	80	0,0303
25	0,1208	90	0,0190
30	0,1032	100	0,0156
35	0,0814	110	0,0178
40	0,0485	120	0,0125
45	0,0368	135	

TX – taxa de secagem

Tabela A.12 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em estufa na temperatura de 70 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	1,3415	35	0,0589
5	0,8086	40	0,0608
10	0,3810	45	0,0560
15	0,1845	50	0,0357
20	0,1467	55	0,0378
25	0,1082	60	0,0453
30	0,0912	70	

TX – taxa de secagem

Tabela A.13 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em estufa na temperatura de 40 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,9290	110	0,0173
5	0,7515	120	0,0100
10	0,5306	135	0,0115
15	0,4326	150	0,0076
20	0,2585	165	0,0114
25	0,2329	180	0,0091
30	0,1183	210	0,0045
35	0,1146	240	0,0060
40	0,0605	270	0,0038
45	0,0482	300	0,0024
50	0,0575	360	0,0028
55	0,0525	420	0,0015
60	0,0509	480	0,0019
70	0,0481	540	0,0009
80	0,0221	660	0,0008
90	0,0128	780	0,0008
100	0,0197	900	

TX – taxa de secagem

Tabela A.14 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em estufa na temperatura de 50 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	1,1317	80	0,0207
5	1,0956	90	0,0183
10	0,5908	100	0,0183
15	0,3958	110	0,0261
20	0,1903	120	0,0076
25	0,1388	135	0,0151
30	0,0964	150	0,0053
35	0,0979	165	0,0090
40	0,0451	180	0,0075
45	0,0355	210	0,0015
50	0,0612	240	0,0063
55	0,0398	270	0,0059
60	0,0361	300	0,0031
70	0,0428	360	

TX – taxa de secagem

Tabela A.15 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em estufa na temperatura de 60 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	1,1935	45	0,0573
5	1,0647	50	0,0410
10	0,6797	55	0,0567
15	0,2899	60	0,0383
20	0,2018	70	0,0269
25	0,1396	80	0,0156
30	0,1122	90	0,0256
35	0,0742	100	0,0166
40	0,0622	110	

TX – taxa de secagem

Tabela A.16 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em estufa na temperatura de 70 °C

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	1,6726	30	0,0698
5	1,0558	35	0,0604
10	0,5237	40	0,0423
15	0,2574	45	0,0422
20	0,1424	50	
25	0,1022		

TX – taxa de secagem

APÊNDICE B

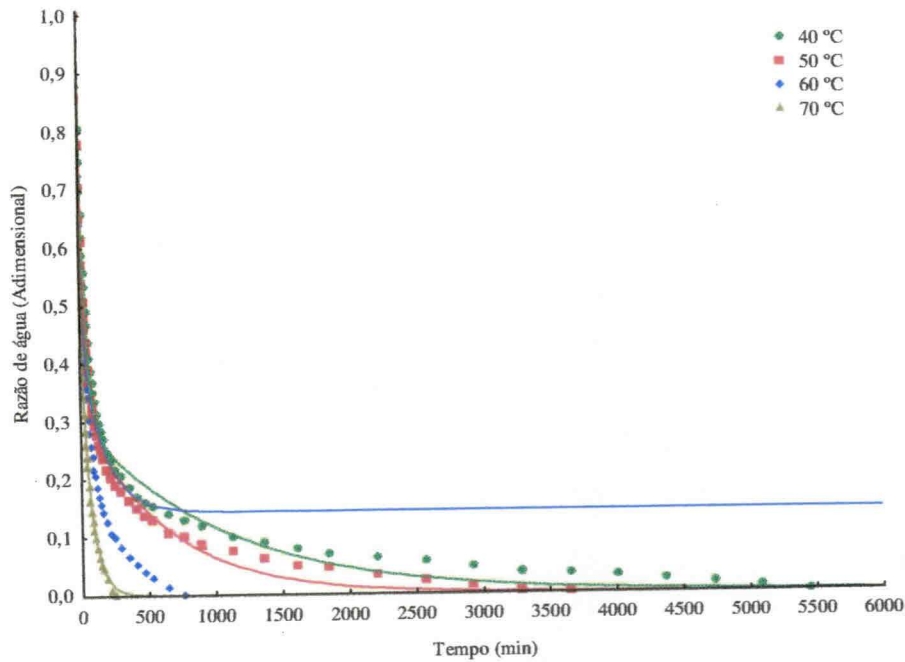


Figura B.1 – Modelo de Aproximação da Difusão ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GCO

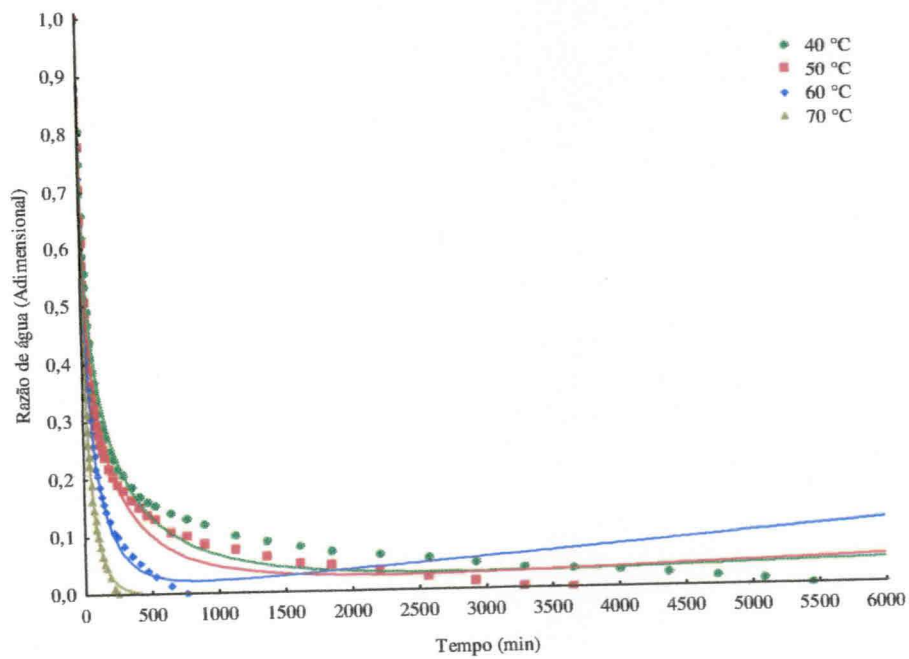


Figura B.2 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GCO

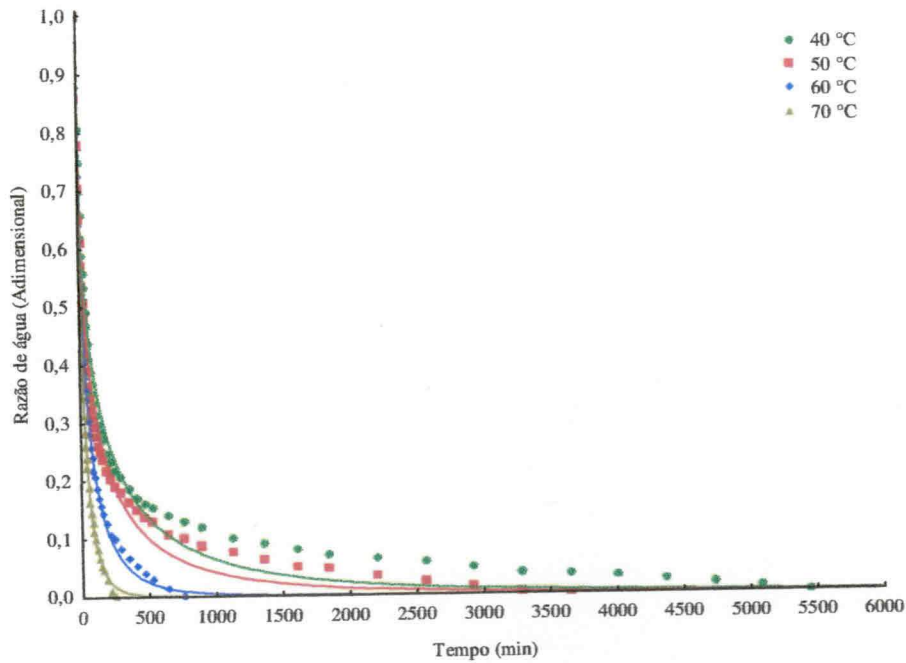


Figura B.3 – Modelo de Page ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GCO

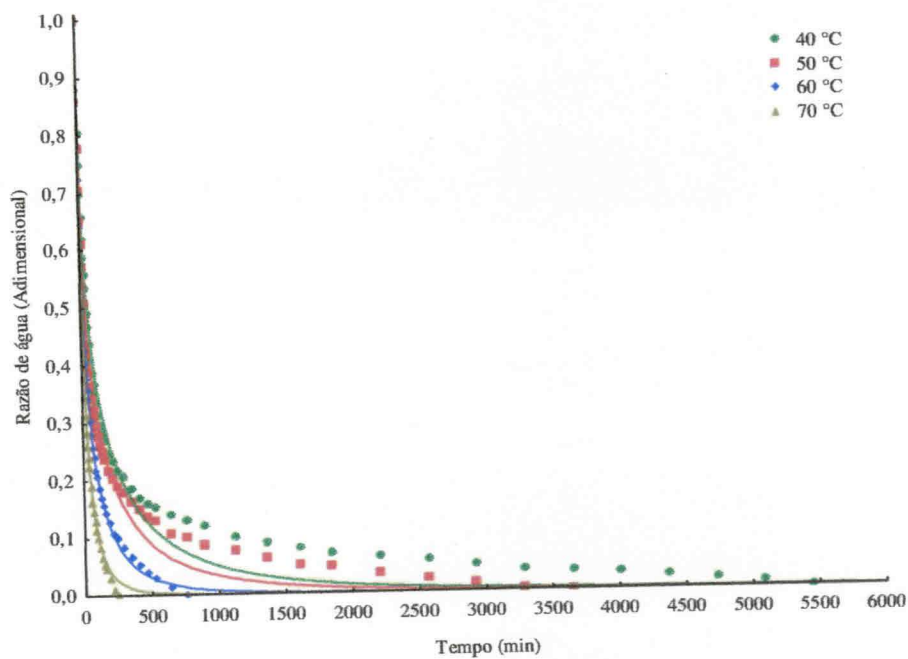


Figura B.4 – Modelo de Thompson ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GCO

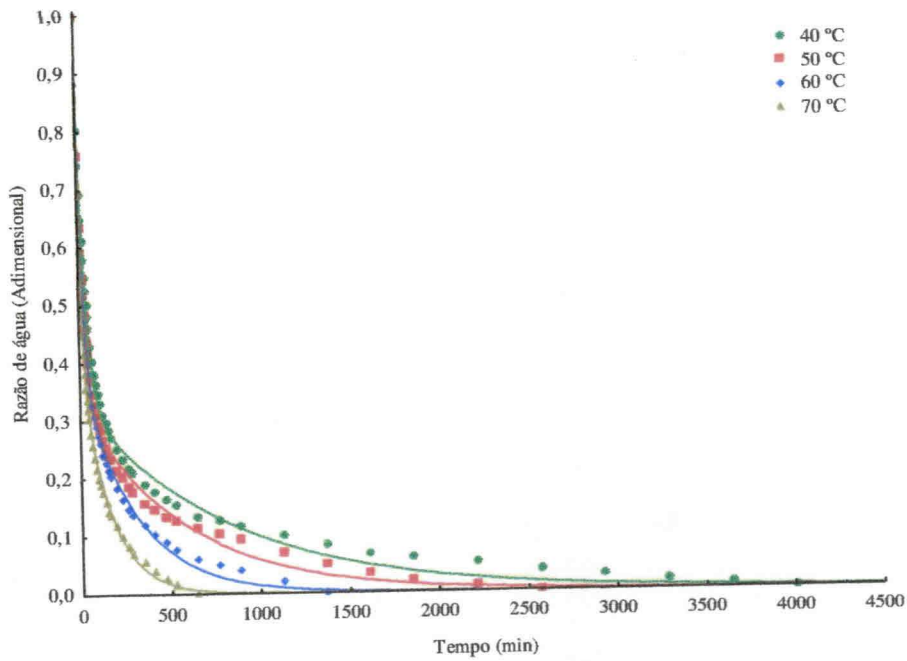


Figura B.5 – Modelo de Aproximação da Difusão ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GSO

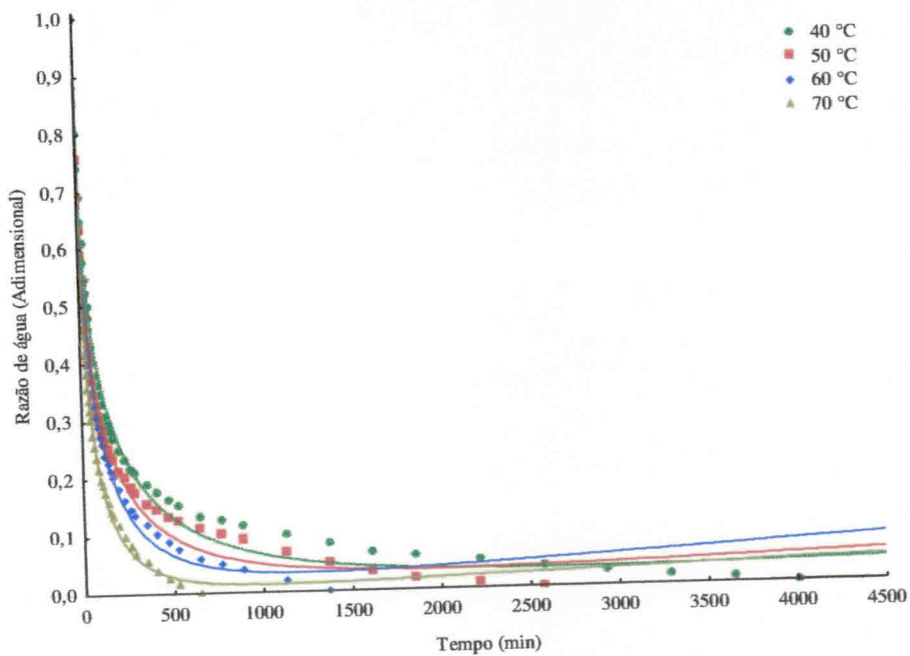


Figura B.6 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GSO

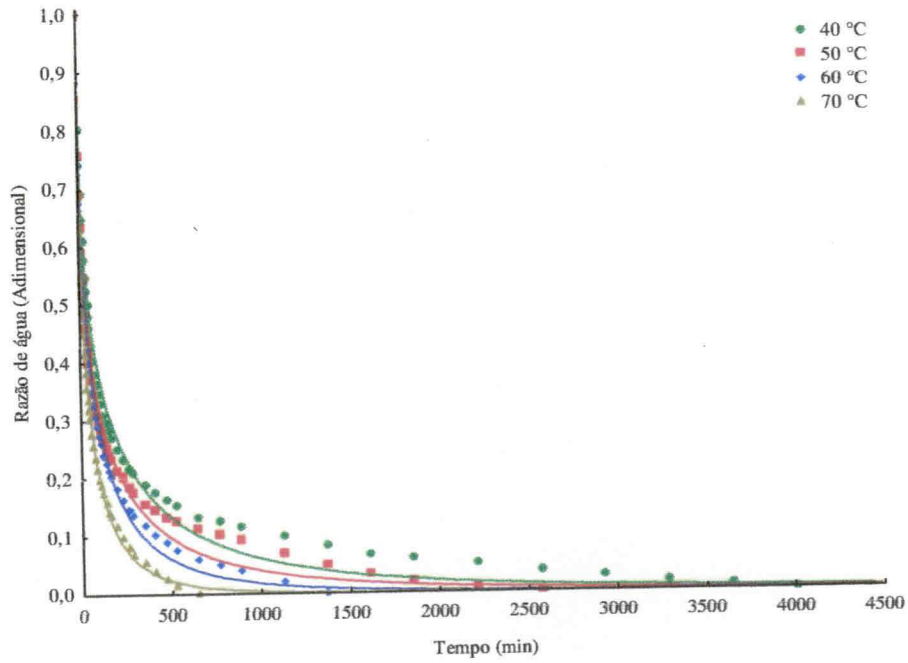


Figura B.7 – Modelo de Page ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GSO

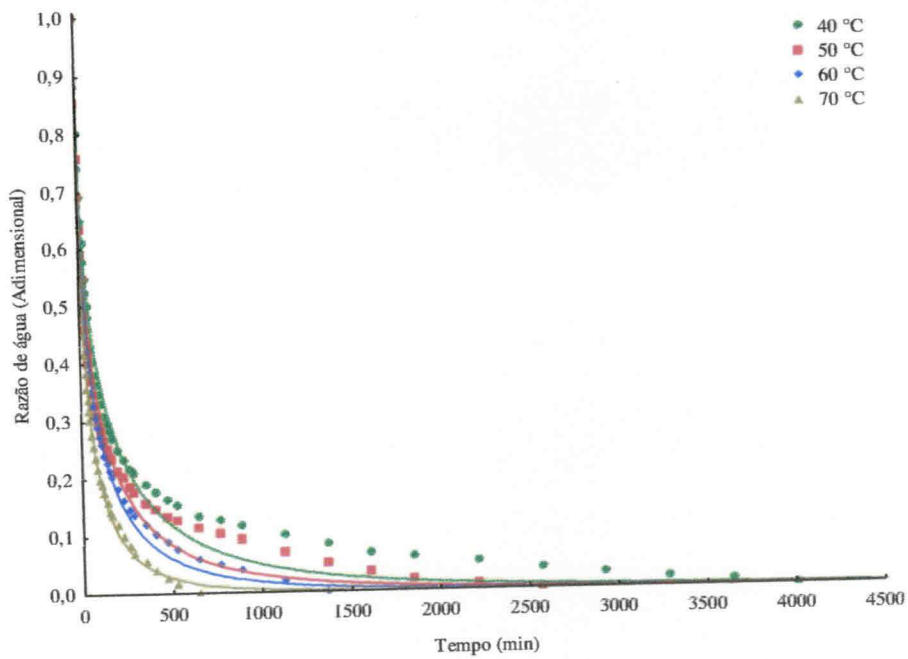


Figura B.8 – Modelo de Thompson ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra GSO

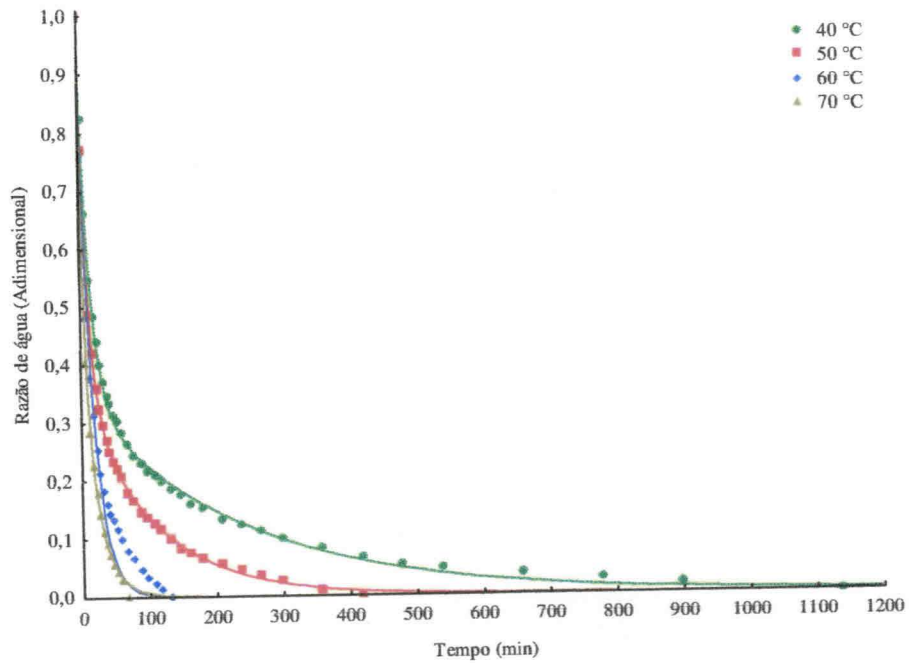


Figura B.9 – Modelo de Aproximação da Difusão ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FCO

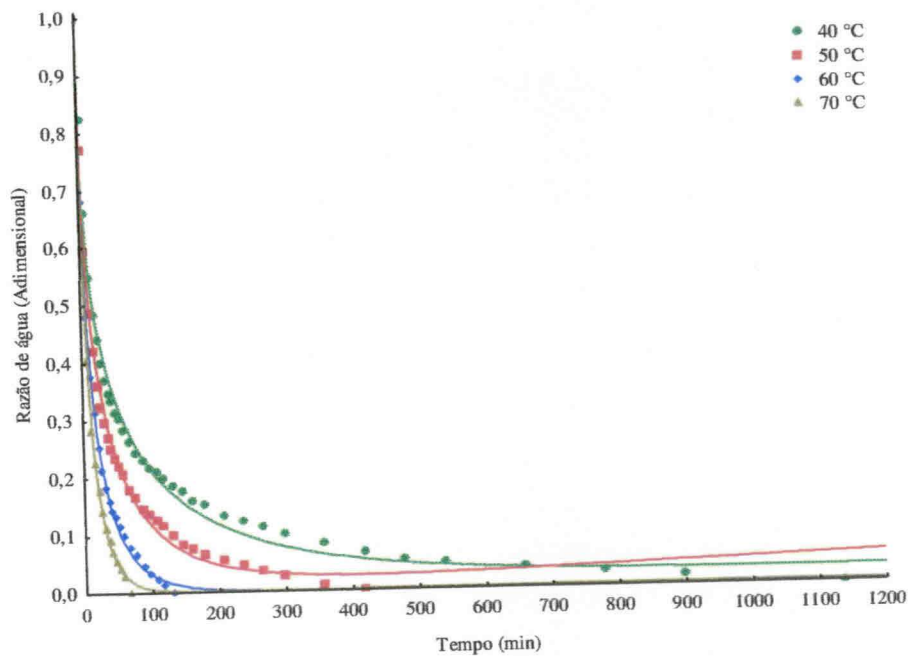


Figura B.10 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FCO

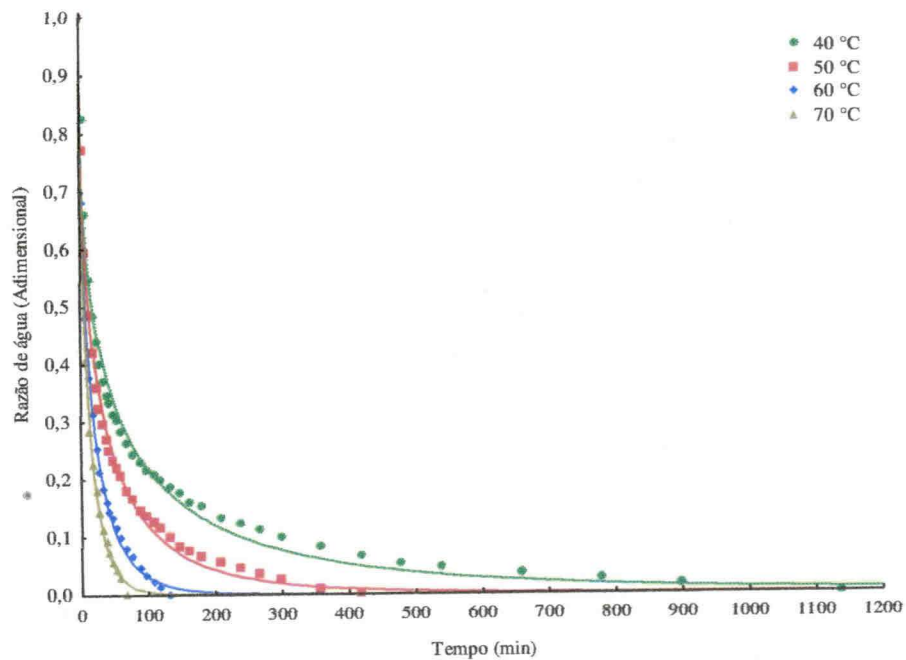


Figura B.11 – Modelo de Page ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FCO

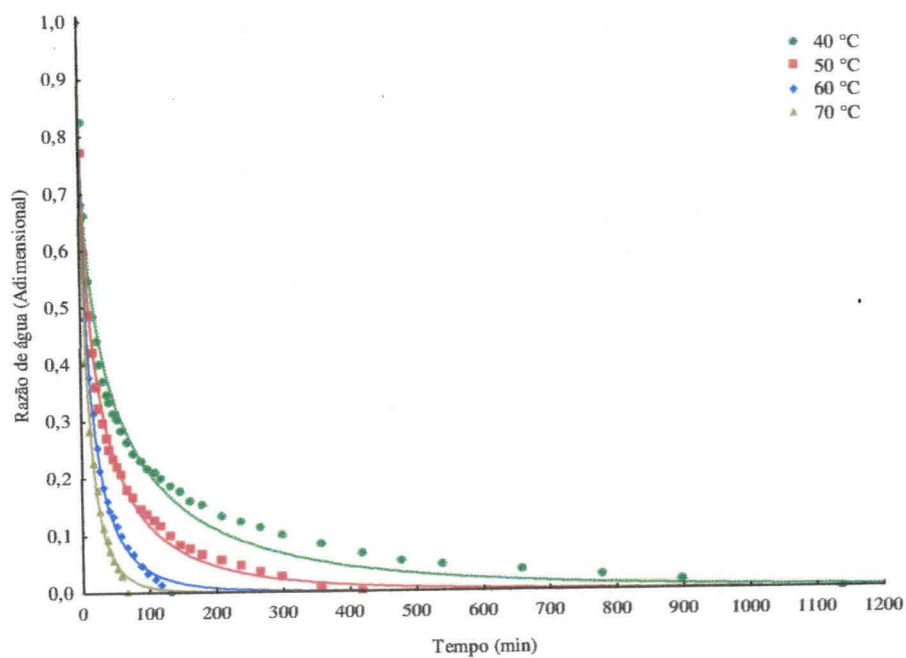


Figura B.12 – Modelo de Thompson ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FCO

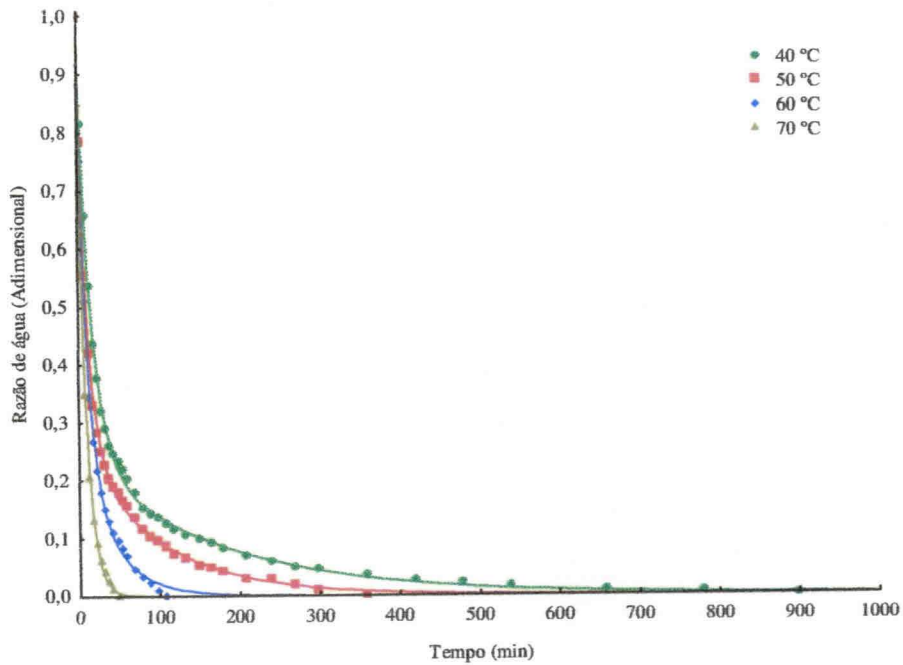


Figura B.13 – Modelo de Aproximação da Difusão ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FSO

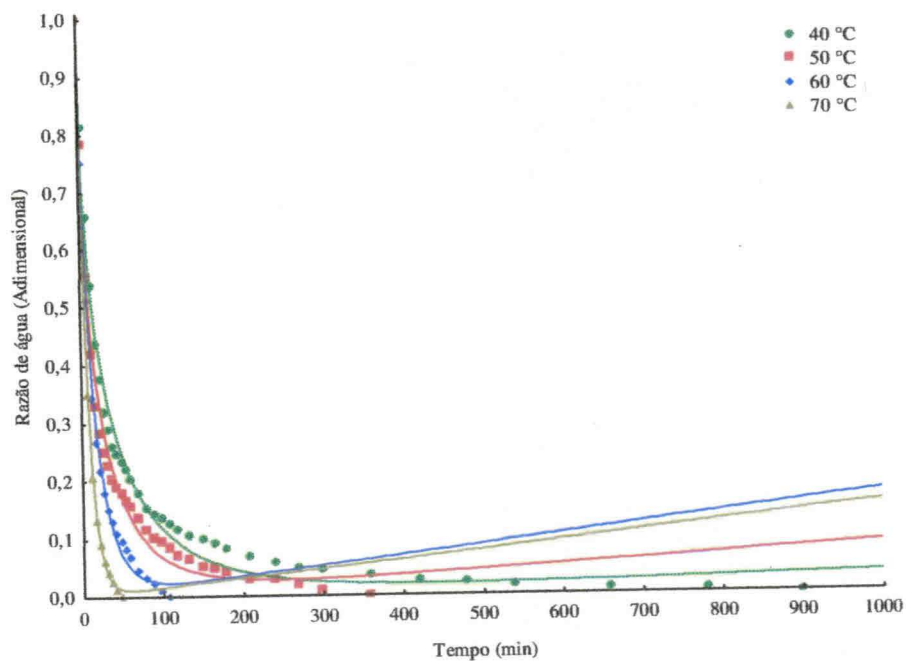


Figura B.14 – Modelo de Midilli ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FSO

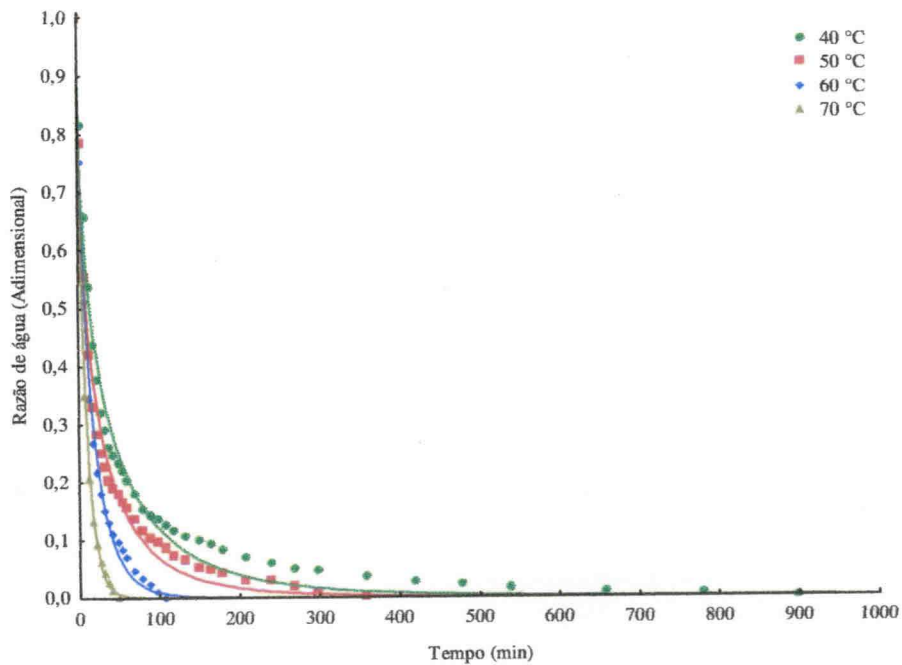


Figura B.15 – Modelo de Page ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FSO

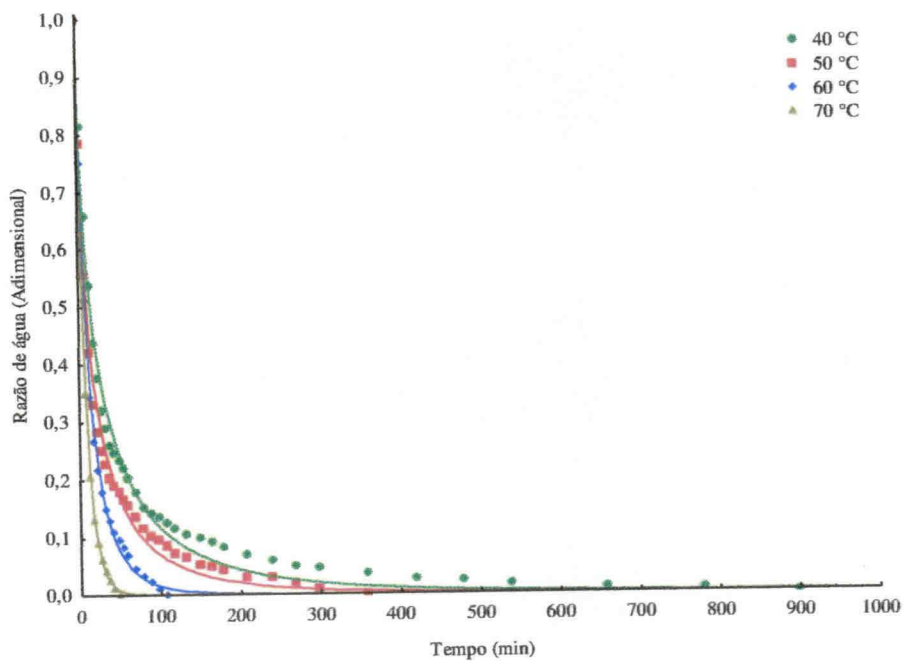


Figura B.16 – Modelo de Thompson ajustado à cinética de secagem em estufa nas temperaturas de 40, 50, 60 e 70 °C da amostra FSO

APÊNDICE C

Tabela C.1 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO por exposição direta ao sol

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,4330	120	0,0077
15	0,2220	150	0,0101
30	0,1877	180	0,0049
45	0,0917	210	0,0046
60	0,0695	240	0,0041
75	0,0508	300	0,0033
90	0,0441	360	0,0064
105	0,0162	420	

TX – taxa de secagem

Tabela C.2 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO por exposição direta ao sol

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,5191	75	0,0711
15	0,3135	90	0,0550
30	0,2913	105	0,0223
45	0,0678	120	0,0195
60	0,0746	150	

TX – taxa de secagem

Tabela C.3 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

Período/local	Tempo (min)	TX
	0	0,1793
	15	0,1239
	30	0,0699
	45	0,1078
	60	0,1020
	75	0,0642
	90	0,0392
	105	0,0496
Diurno	120	0,0301
(exposição direta ao sol)	150	0,0189
	180	0,0152
	210	0,0114
	240	0,0091
	300	0,0065
	360	0,0012
	420	0,0002
	480	0,0030
	600	0,0016
	720	0,0011
Noturno	840	0,0004
(secador ACSN)	960	0,0004
	1140	0,0002
	1320	0,0019
Diurno	1500	0,0017
(exposição direta ao sol)	1680	

TX – taxa de secagem

Tabela C.4 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN (testemunha 1º dia)

Período/local	Tempo (min)	TX
	0	0,1961
	15	0,1169
	30	0,0687
	45	0,1037
	60	0,0967
	75	0,0604
	90	0,0385
	105	0,0433
Diurno	120	0,0244
(exposição direta ao sol)	150	0,0187
	180	0,0153
	210	0,0120
	240	0,0071
	300	0,0064
	360	0,0009
	420	0,0002
	480	

TX – taxa de secagem

Tabela C.5 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN (testemunha 2º dia)

Período/local	Tempo (min)	TX
	1320	0,0075
	1350	0,0056
	1380	0,0042
Diurno	1440	0,0062
(exposição direta ao sol)	1500	0,0051
	1560	0,0027
	1620	0,0012
	1680	

TX – taxa de secagem

Tabela C.6 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

Período/local	Tempo (min)	TX
	0	0,2755
	15	0,1079
	30	0,1127
	45	0,0785
	60	0,0728
	75	0,0621
	90	0,0521
	105	0,0366
Diurno (exposição direta ao sol)	120	0,0249
	150	0,0230
	180	0,0090
	210	0,0121
	240	0,0057
	300	0,0031
	360	0,0007
	420	0,0004
	480	0,0022
	600	0,0015
	720	0,0006
Noturno (secador ACSN)	840	0,0007
	960	0,0004
	1140	0,0005
	1320	0,0018
Diurno (exposição direta ao sol)	1500	0,0011
	1680	0,0002
Noturno (secador ACSN)	1920	0,0001
	2160	

TX – taxa de secagem

Tabela C.7 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN (testemunha 1º dia)

Período/local	Tempo (min)	TX
	0	0,2383
	15	0,0944
	30	0,1271
	45	0,0880
	60	0,0839
	75	0,0657
	90	0,0583
	105	0,0385
Diurno	120	0,0299
(exposição direta ao sol)	150	0,0233
	180	0,0107
	210	0,0151
	240	0,0066
	300	0,0028
	360	0,0005
	420	0,0001
	480	

TX – taxa de secagem

Tabela C.8 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN (testemunha 2º dia)

Período/local	Tempo (min)	TX
Diurno (exposição direta ao sol)	1320	0,0099
	1350	0,0040
	1380	0,0034
	1410	0,0056
	1440	0,0050
	1500	0,0042
	1560	0,0020
	1620	0,0018
	1680	0,0001
	1800	

TX – taxa de secagem

Tabela C.9 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em secador ACSN

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,3313	180	0,0122
15	0,2101	210	0,0077
30	0,1713	240	0,0081
45	0,1164	300	0,0030
60	0,1033	360	0,0014
75	0,0689	420	0,0016
90	0,0577	480	0,0007
105	0,0442	600	0,0007
120	0,0315	720	0,0007
150	0,0174	840	

TX – taxa de secagem

Tabela C.10 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FCO em secador ACSN (testemunha)

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,0816	180	0,0142
15	0,0571	210	0,0141
30	0,0380	240	0,0121
45	0,0407	300	0,0066
60	0,0376	360	0,0053
75	0,0340	420	0,0040
90	0,0294	480	0,0025
105	0,0278	600	0,0023
120	0,0185	720	0,0020
150	0,0155	840	

TX – taxa de secagem

Tabela C.11 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em secador ACSN

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,3291	150	0,0169
15	0,2067	180	0,0080
30	0,1898	210	0,0033
45	0,1424	240	0,0018
60	0,1286	300	0,0022
75	0,0875	360	0,0010
90	0,1359	420	0,0019
105	0,0477	480	0,0014
120	0,0362	600	

TX – taxa de secagem

Tabela C.12 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação das FSO em secador ACSN (testemunha)

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,0924	150	0,0206
15	0,0415	180	0,0159
30	0,0347	210	0,0138
45	0,0435	240	0,0096
60	0,0397	300	0,0029
75	0,0342	360	0,0015
90	0,0335	420	0,0025
105	0,0320	480	0,0013
120	0,0260	600	

TX – taxa de secagem

Tabela C.13 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em secador solar

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,3101	105	0,0440
15	0,1829	120	0,0270
30	0,1075	150	0,0191
45	0,0706	180	0,0085
60	0,0835	210	0,0139
75	0,0570	240	
90	0,0296		

TX – taxa de secagem

Tabela C.14 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos FCO em secador solar

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,6945	45	0,0832
15	0,2163	60	0,0605
30	0,1776	75	

TX – taxa de secagem

Tabela C.15 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador solar

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,3223	90	0,0439
15	0,3128	105	0,0490
30	0,1505	120	0,0342
45	0,0946	150	0,0238
60	0,0559	180	0,0137
75	0,0555	210	

TX – taxa de secagem

Tabela C.16 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos FSO em secador solar

Tempo (min)	TX	Tempo (min)	TX
0	0,5253	45	0,0922
15	0,6246	60	0,0506
30	0,2175	75	

TX – taxa de secagem

Tabela C.20 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GCO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (testemunha período diurno)

Período/local	Tempo (min)	TX
Diurno (exposição direta ao sol)	840	0,0385
	870	0,0251
	900	0,0176
	930	0,0229
	960	0,0146
	1020	0,0082
	1080	

TX – taxa de secagem

Tabela C.21 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (período noturno)

Período/local	Tempo (min)	TX
	0	0,4041
	15	0,1554
	30	0,0985
	45	0,0659
	60	0,0406
	75	0,0315
	90	0,0297
	105	0,0183
	120	0,0162
Noturno	150	0,0107
(secador ACSN)	180	0,0080
	210	0,0064
	240	0,0037
	300	0,0025
	360	0,0015
	420	0,0022
	480	0,0011
	600	0,0010
	720	0,0009
	840	

TX – taxa de secagem

Tabela C.22 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (período diurno)

Período/local	Tempo (min)	TX
	840	0,0068
	870	0,0078
	900	0,0116
Diurno	930	0,0079
(exposição direta ao sol)	960	0,0086
	1020	0,0050
	1080	0,0032
	1200	

TX – taxa de secagem

Tabela C.23 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (testemunha período noturno)

	Tempo (min)	TX
	0	0,2093
	15	0,1147
	30	0,0854
	45	0,0749
	60	0,0540
	75	0,0429
	90	0,0445
	105	0,0297
	120	0,0246
Noturno	150	0,0155
(secador ACSN)	180	0,0134
	210	0,0096
	240	0,0052
	300	0,0025
	360	0,0017
	420	0,0020
	480	0,0012
	600	0,0010
	720	0,0007
	840	

TX – taxa de secagem

Tabela C.24 – Dados experimentais da taxa de secagem durante a cinética de desidratação dos GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar (testemunha período diurno)

	Tempo (min)	TX
	840	0,0392
	870	0,0213
	900	0,0236
Diurno	930	0,0136
(exposição direta ao sol)	960	0,0085
	1020	0,0068
	1080	0,0015
	1200	

TX – taxa de secagem

APÊNDICE D

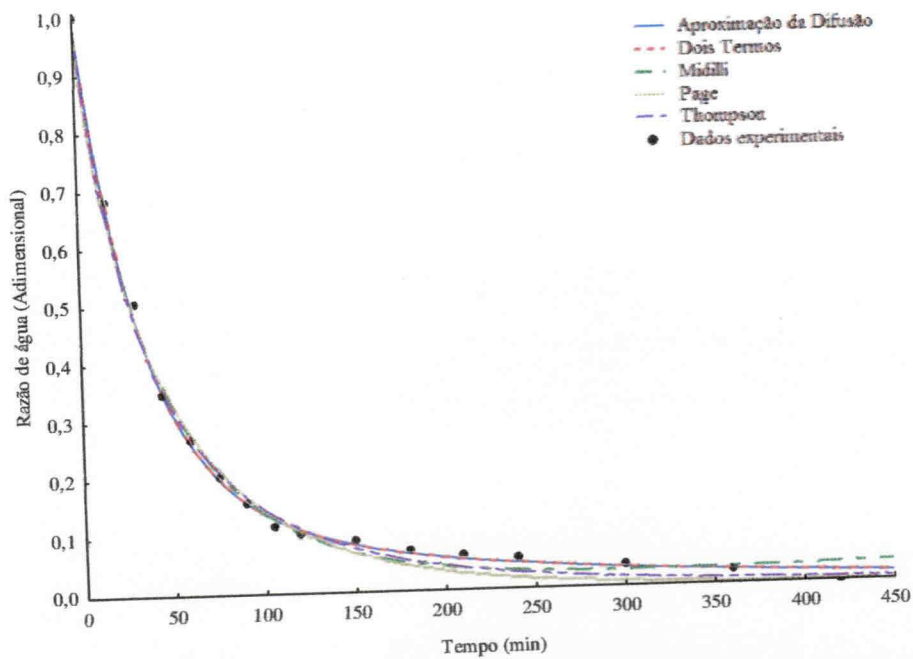


Figura D.1 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol da amostra FCO

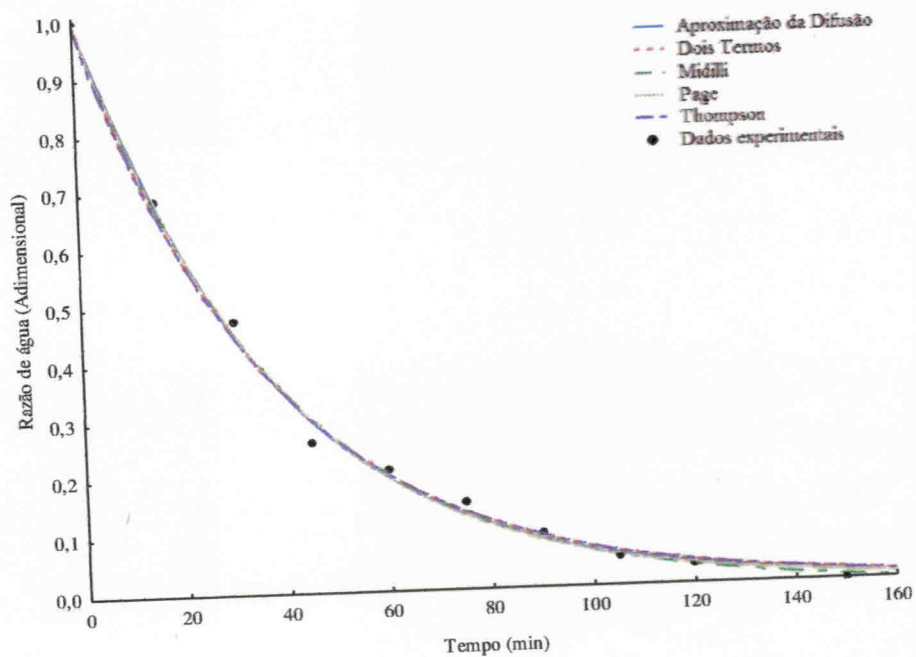


Figura D.2 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol da amostra FSO

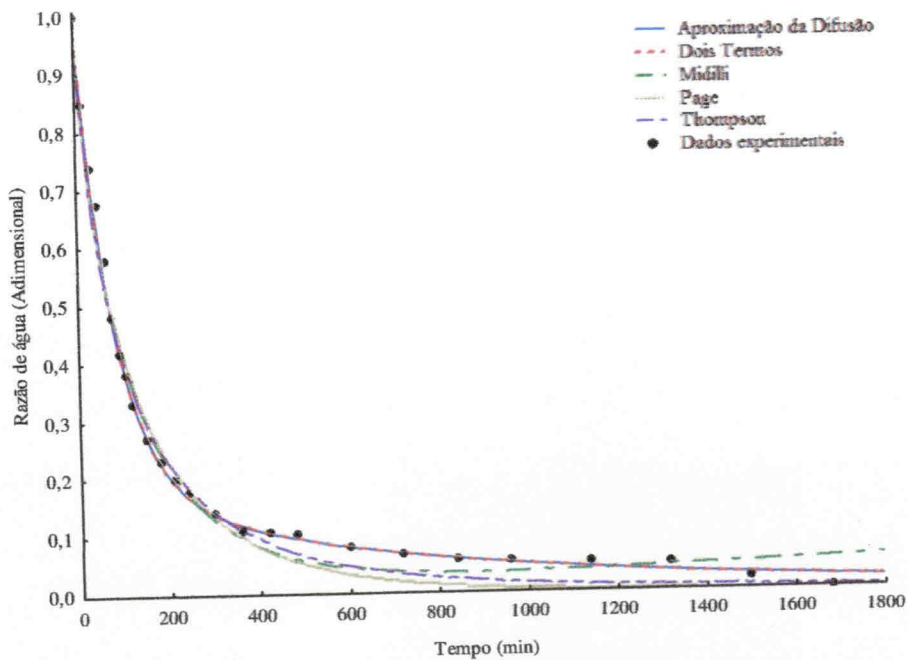


Figura D.3 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GCO

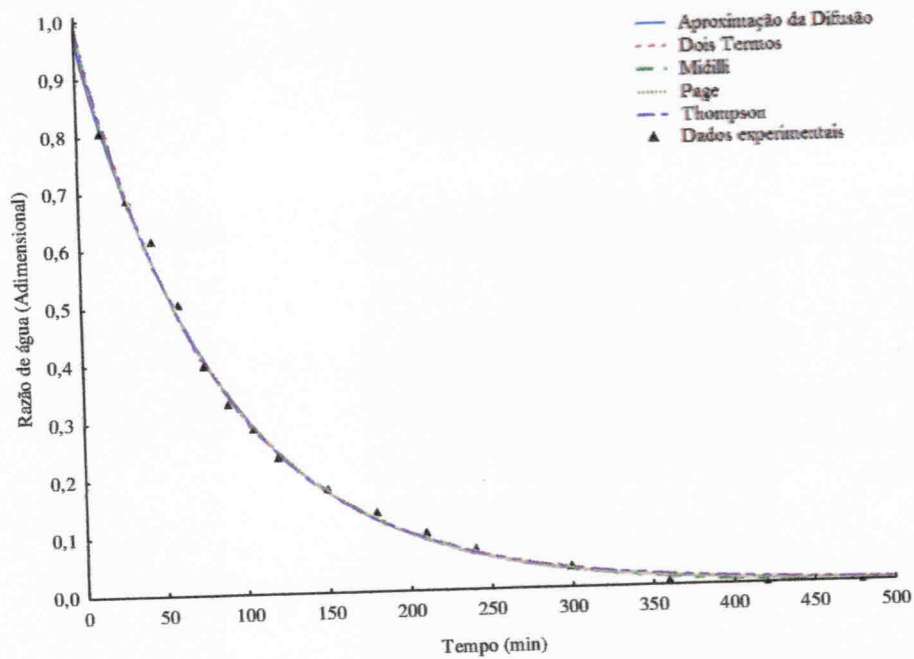


Figura D.4 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GCO (Testemunha 1º dia)

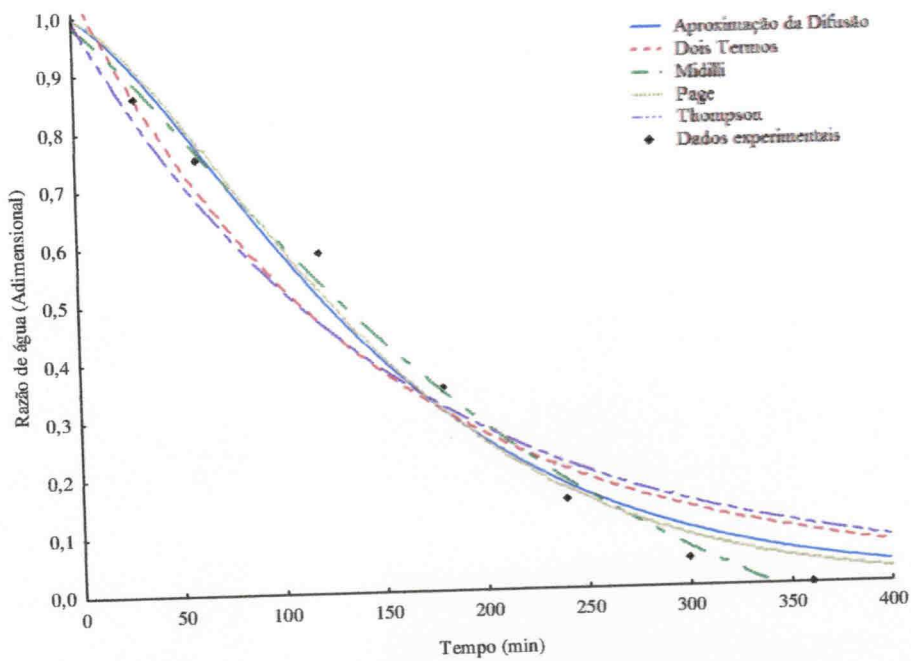


Figura D.5 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GCO (Testemunha 2º dia)

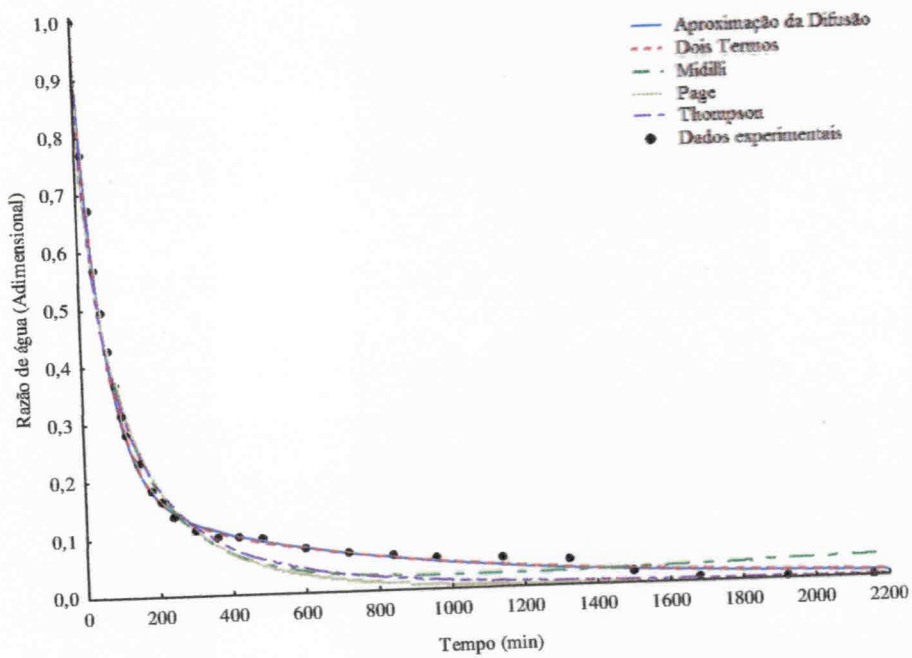


Figura D.6 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GSO

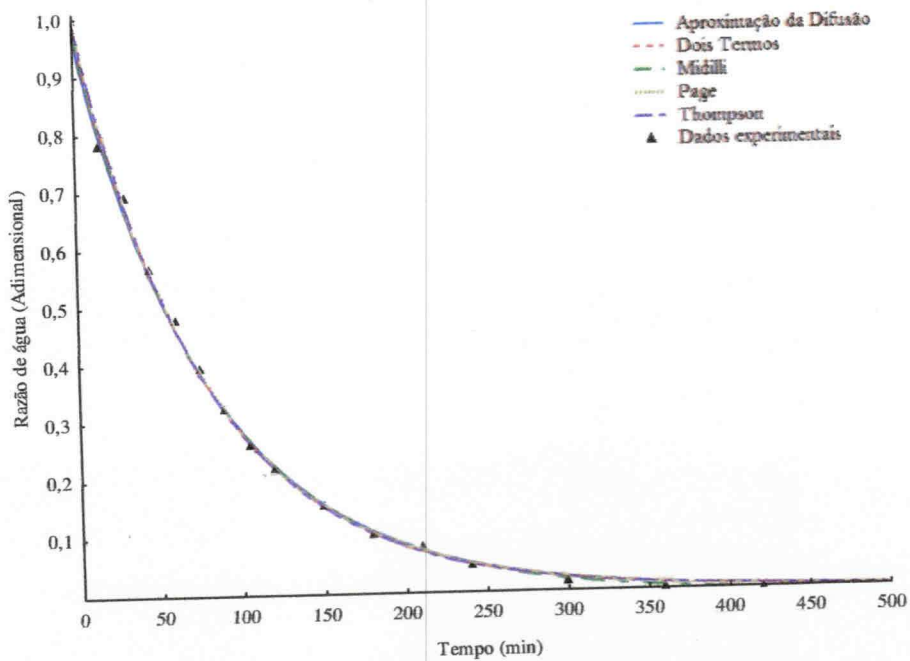


Figura D.7 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GSO (Testemunha 1º dia)

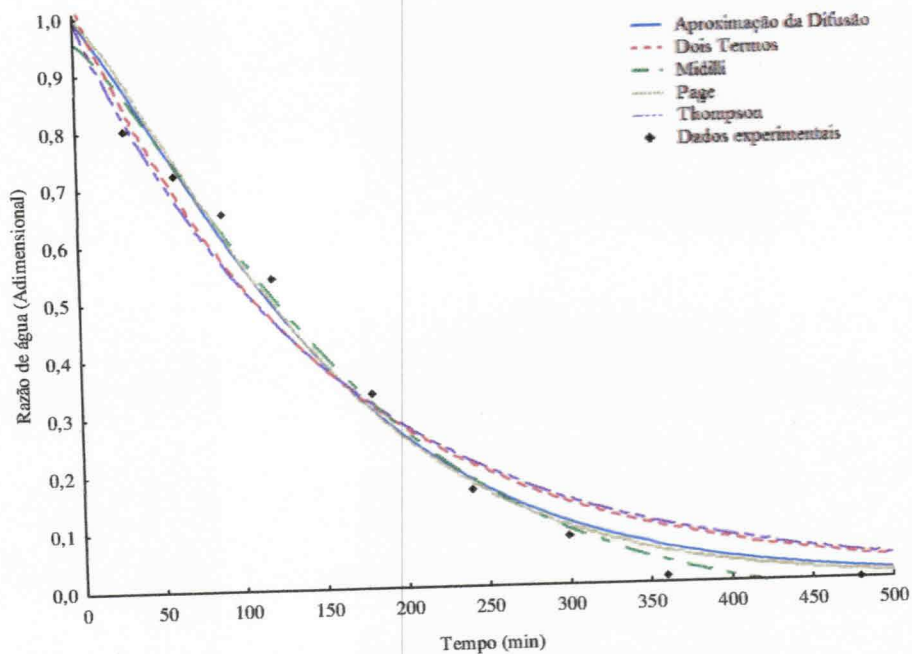


Figura D.8 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN da amostra GSO (Testemunha 2º dia)

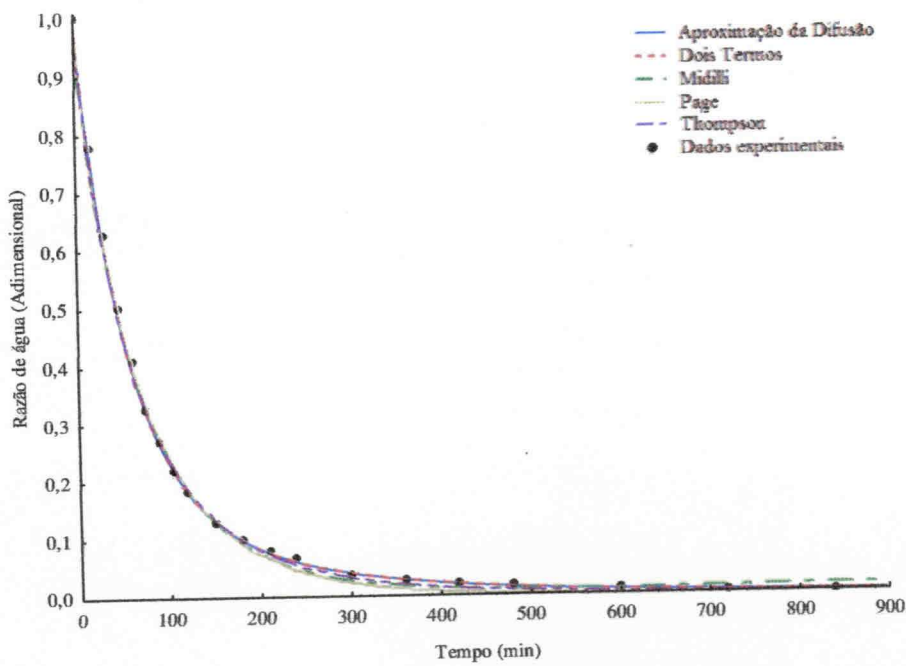


Figura D.9 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador ACSN da amostra FCO

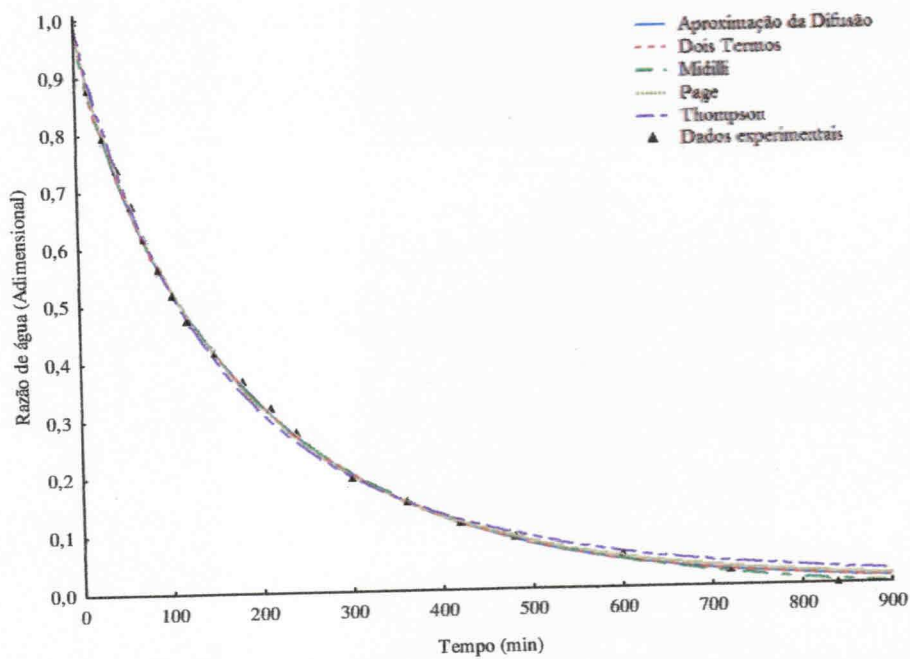


Figura D.10 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador ACSN da amostra FCO (Testemunha)

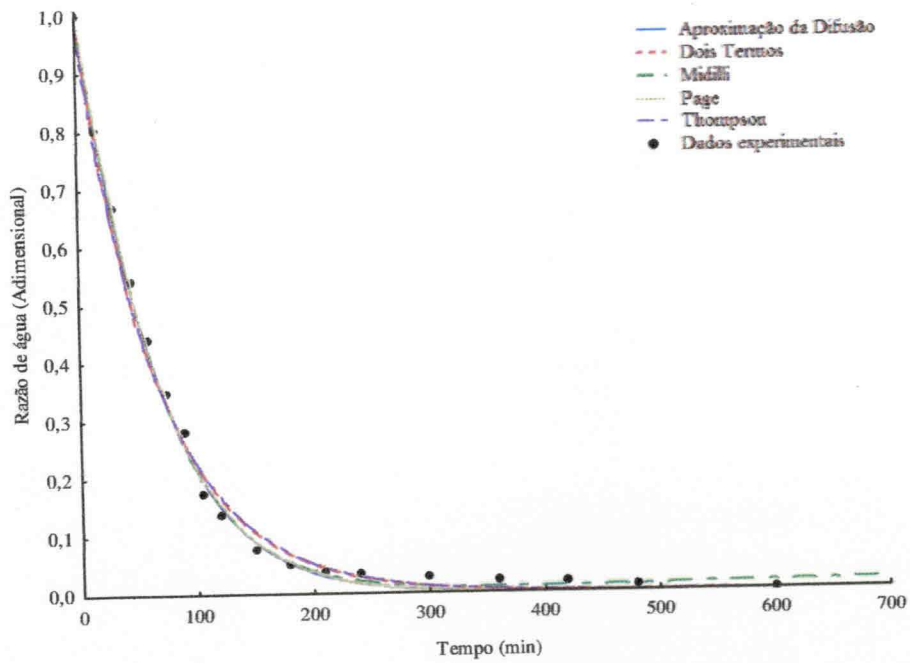


Figura D.11 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador ACSN da amostra FSO

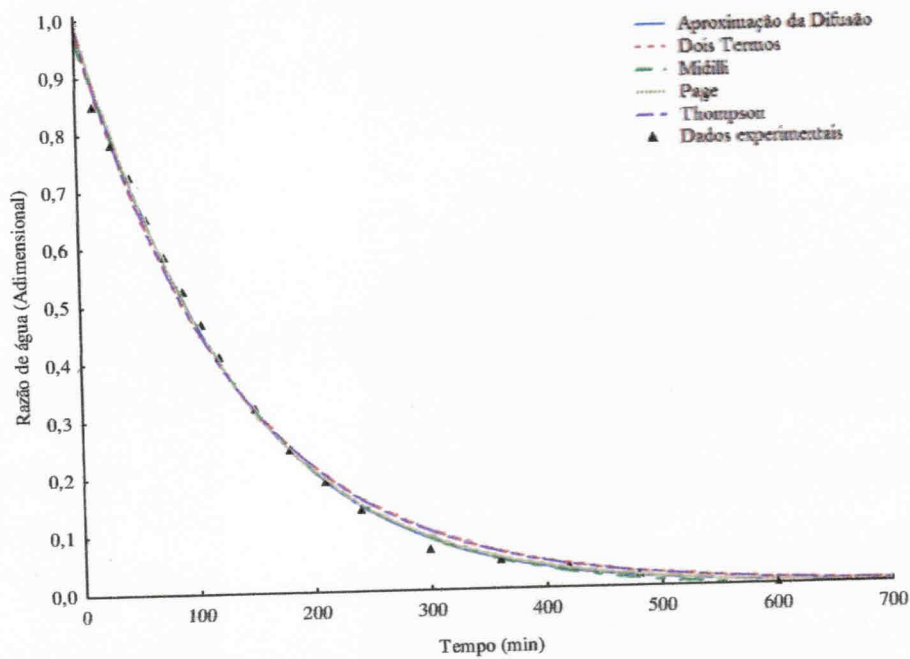


Figura D.12 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador ACSN da amostra FSO (Testemunha)

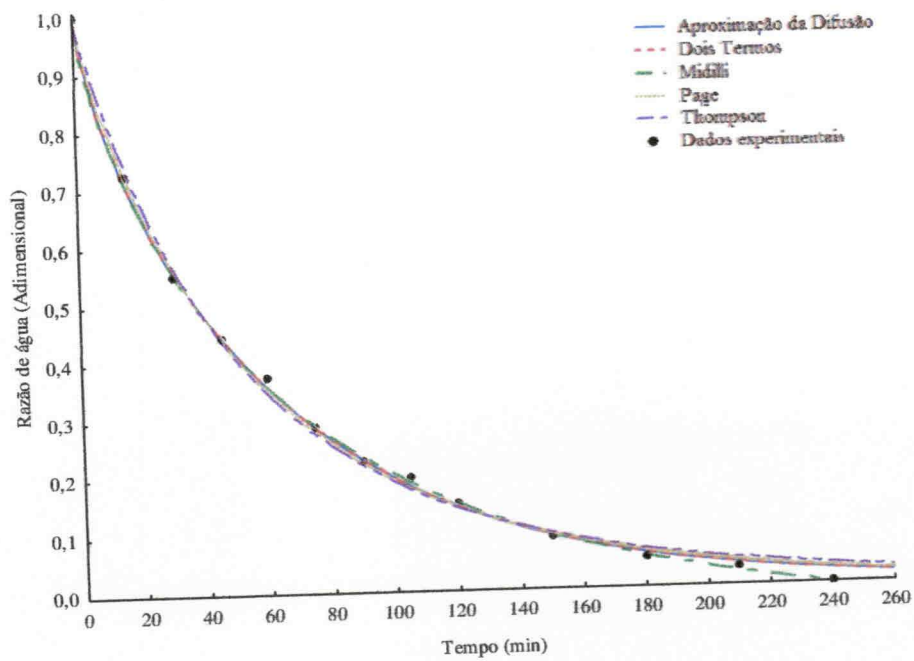


Figura D.13 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador solar da amostra GCO

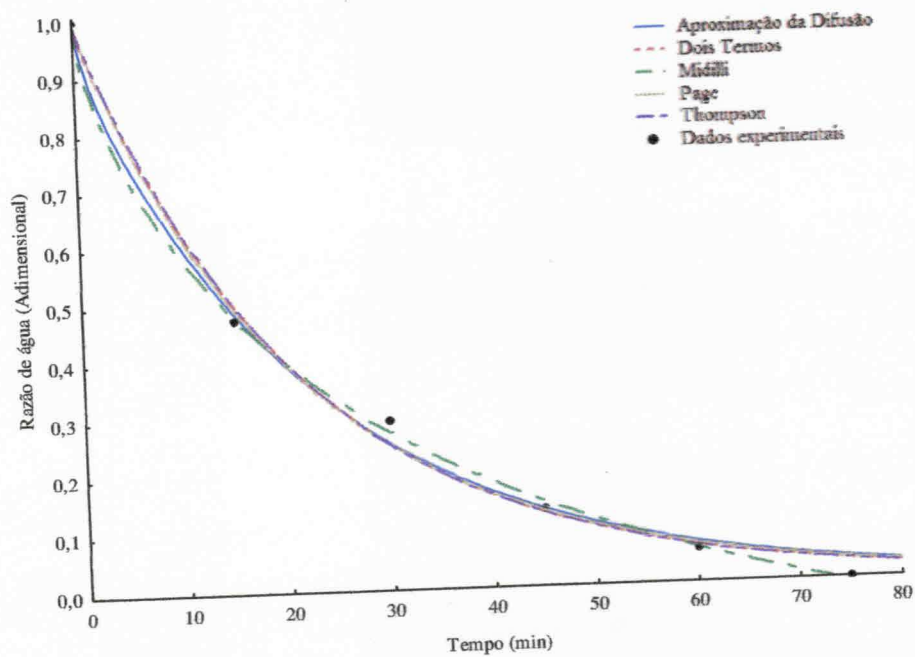


Figura D.14 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador solar da amostra FCO

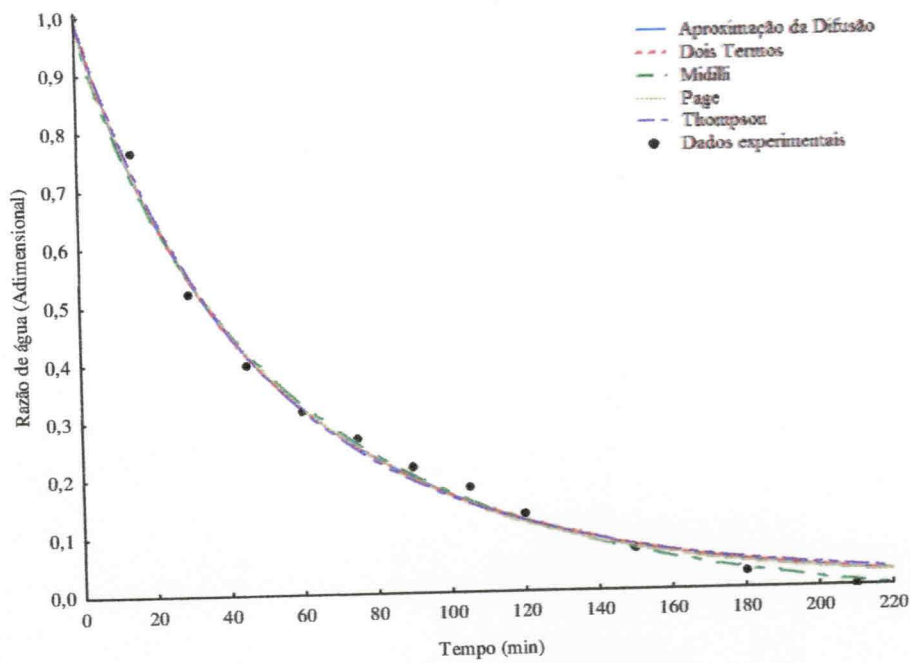


Figura D.15 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador solar da amostra GSO

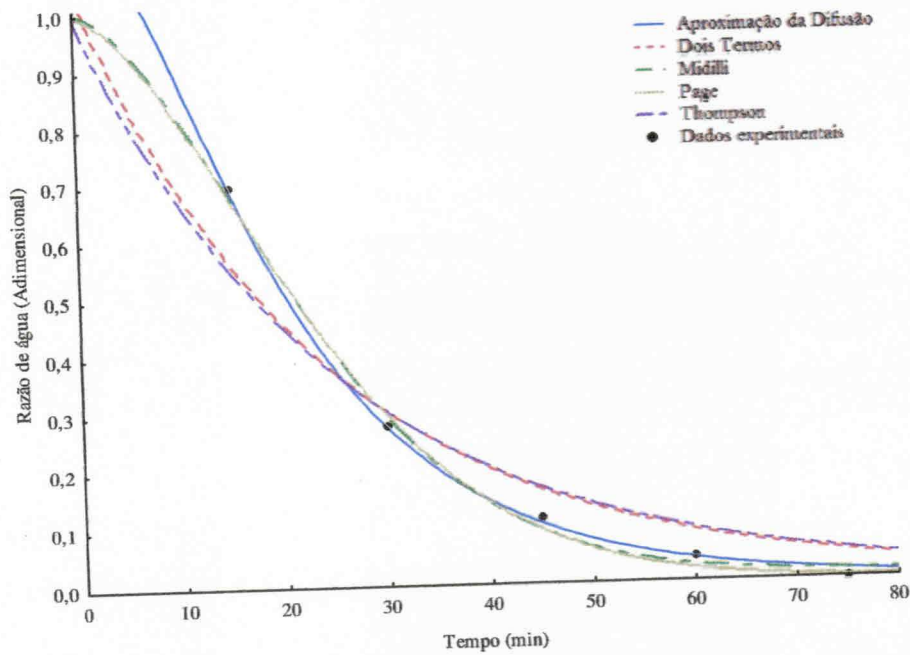


Figura D.16 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à cinética de secagem em secador solar da amostra FSO

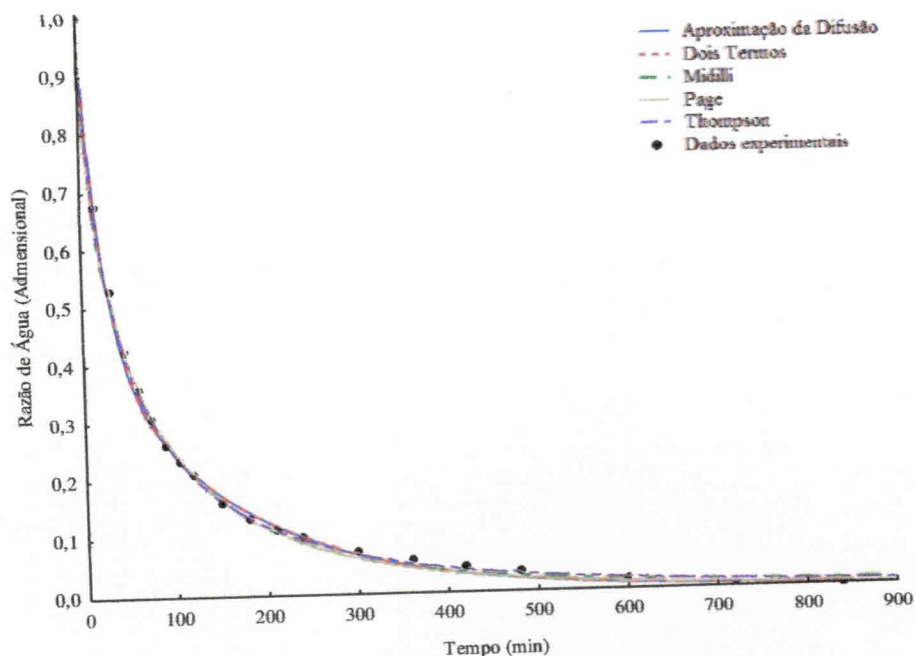


Figura D.17 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à primeira etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GCO (noite)

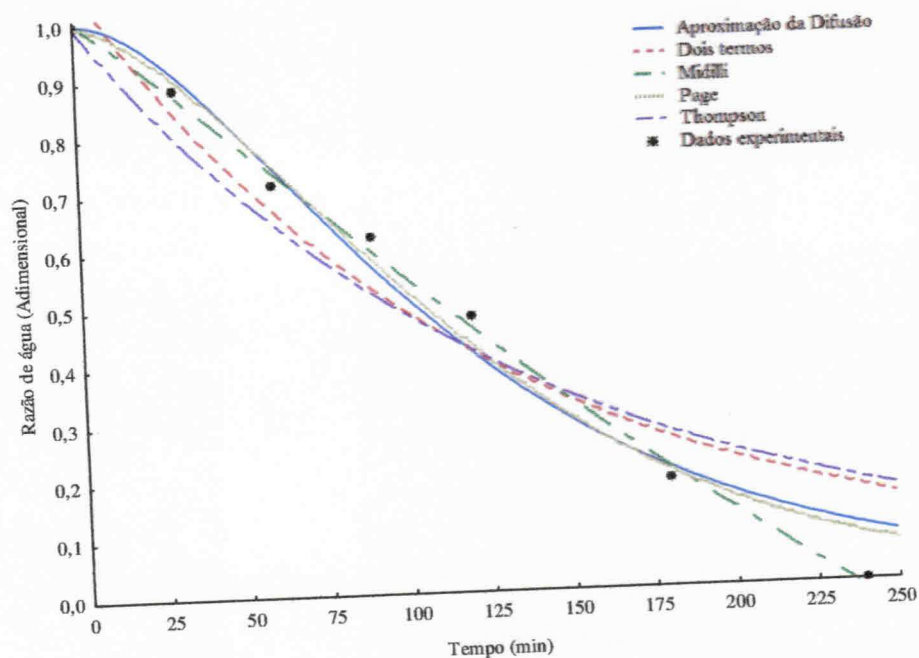


Figura D.18 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à segunda etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GCO (dia)

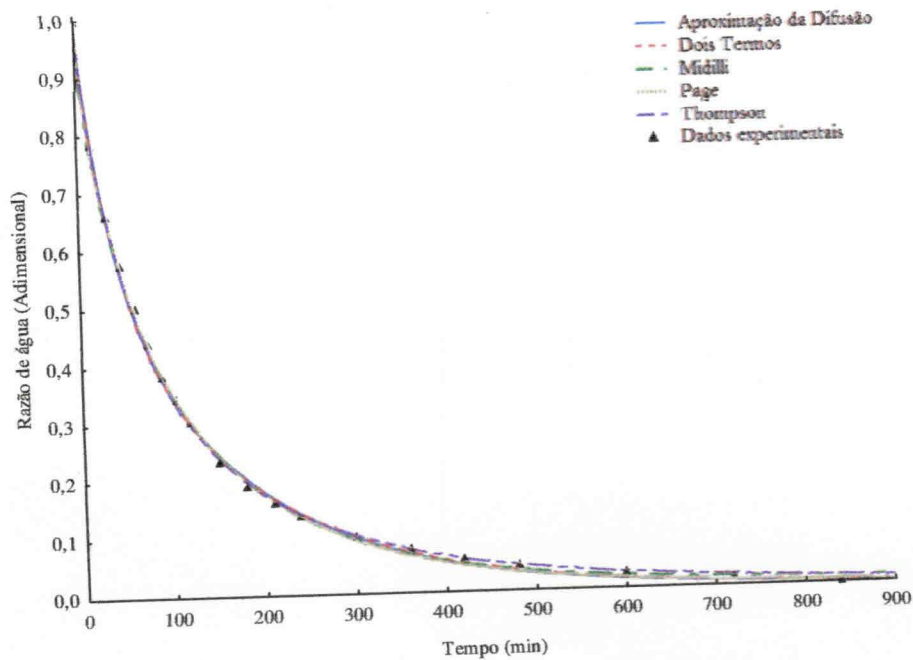


Figura D.19 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à primeira etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GCO (Testemunha noite)

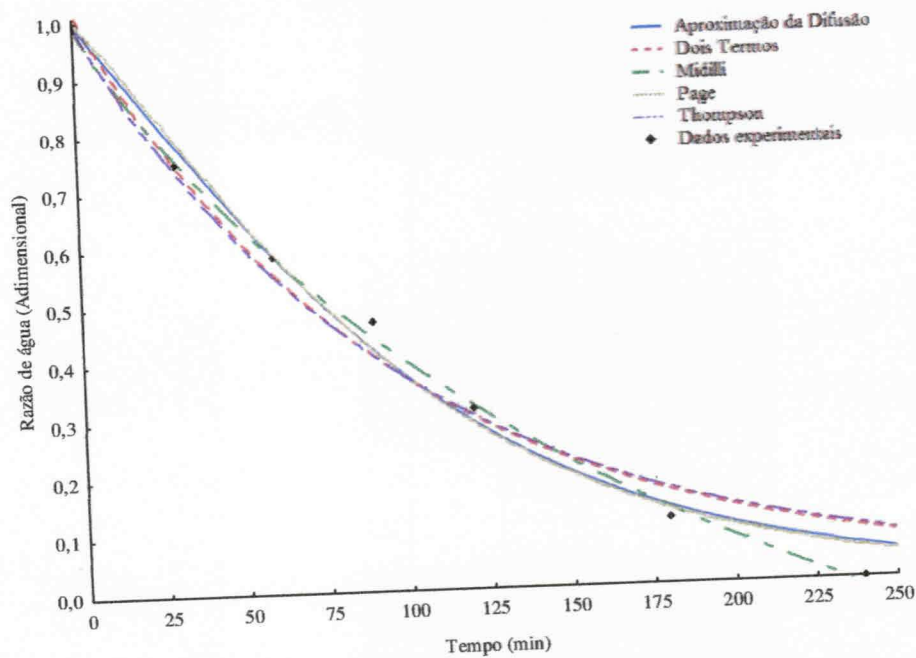


Figura D.20 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à segunda etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GCO (Testemunha dia)

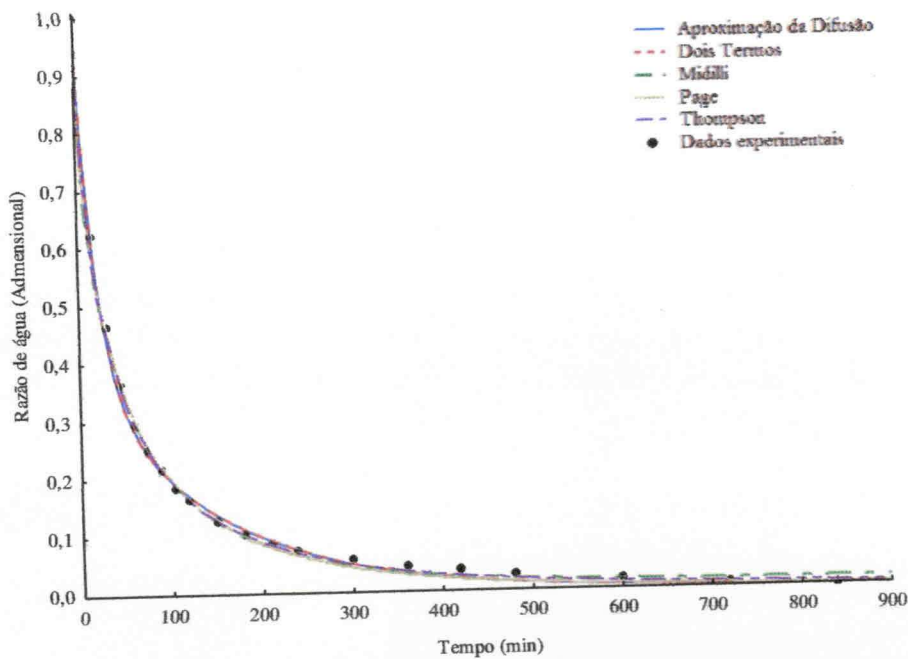


Figura D.21 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à primeira etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GSO (noite)

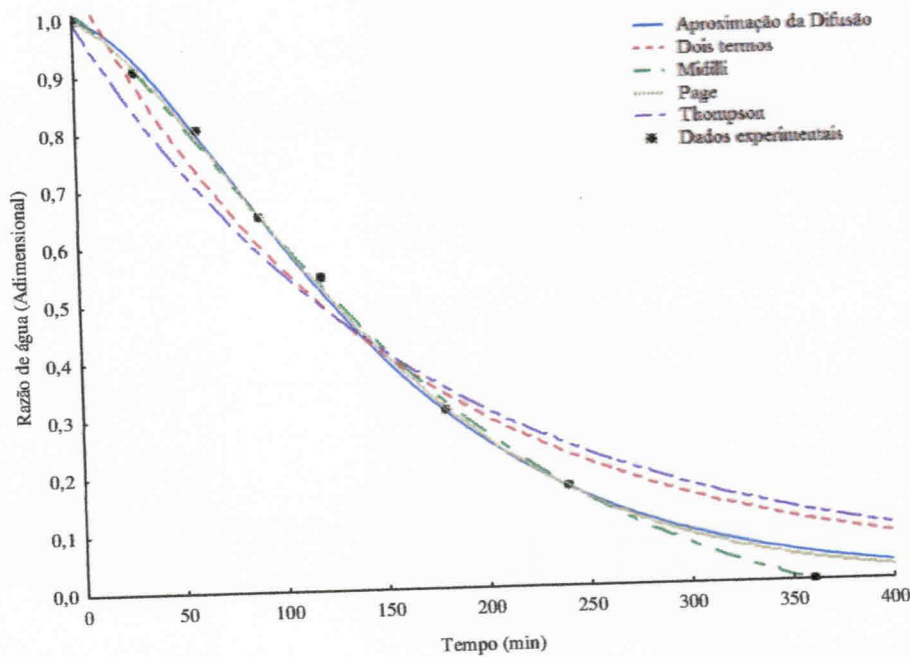


Figura D.22 – Modelos de Aproximação da Difusão, Dois Termos, Midilli, Page e Thompson ajustados à segunda etapa da cinética de secagem em secador ACSN combinada com secagem se secador solar da amostra GSO (dia)

Tabela E.4 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem das FCO e FSO em secador ACSN

Produto	Temp. (°C)			Umidade (%)			Vento (m s ⁻¹)	Radiação (KJm ²)
	Média	Max.	Mín.	Média	Max.	Mín.		
FCO	22,91	24,80	21,50	87,88	93,00	73,00	2,32	-
FSO	22,78	29,40	21,30	88,19	94,00	54,00	3,23	-

Tabela E.5 – Valores médios de temperatura e umidade relativa no interior do secador de uso noturno durante as secagens das FCO e FSO em secador ACSN

Produto	Temp. (°C)			Umidade (%)		
	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.
FCO	44,81	49,60	40,20	67,22	79,30	45,50
FSO	43,56	50,00	40,30	67,04	75,70	34,00

Tabela E.6 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem dos GCO, FCO, GSO e FSO em secador solar

Produto	Temp. (°C)			Umidade (%)			Vento (m s ⁻¹)	Radiação (KJm ²)
	Média	Max.	Mín.	Média	Max.	Mín.		
GCO	27,18	30,20	22,50	62,33	86,00	50,00	2,57	2620,00
FCO	25,07	26,80	21,90	70,67	92,00	57,00	3,77	2272,67
GSO	25,58	28,50	22,20	65,80	85,00	52,00	3,06	1702,14
FSO	24,50	26,80	22,30	69,00	84,00	60,00	2,87	2028,33

Tabela E.7 – Valores médios de temperatura no interior do secador de uso diurno durante a secagem dos GCO, FCO, GSO e FSO em secador solar

Produto	Temp. (°C)		
	Média	Máx.	Mín.
GCO	80,08	103,10	57,00
FCO	60,08	75,20	45,40
GSO	55,04	80,20	42,40
FSO	52,03	62,10	44,70

Tabela E.8 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem dos GCO e GSO em secador solar ACSN combinada com secagem em secador ACSN

Produto	Temp. (°C)			Umidade (%)			Vento (m s ⁻¹)	Radiação (KJm ²)
	Média	Max.	Mín.	Média	Max.	Mín.		
GCO (noite)	23,64	30,70	21,50	79,63	92,00	39,00	2,56	-
GCO (dia)	28,03	31,30	23,00	56,67	84,00	43,00	2,72	2613,38
GSO (noite)	24,27	31,00	22,50	80,06	90,00	41,00	2,95	-
GSO (dia)	27,56	31,90	23,80	66,00	86,00	49,00	3,58	2125,60

Tabela E.9 – Valores médios de temperatura no interior do secador de uso noturno durante a secagem dos GCO e GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar

Produto	Temp. (°C)			Umidade (%)		
	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.
GCO (noite)	49,94	57,60	41,30	55,06	71,40	28,50
GSO (noite)	47,90	58,80	40,40	58,56	72,30	25,90

Tabela E.10 – Valores médios de temperatura no interior do secador de uso diurno durante a secagem dos GCO e GSO em secador ACSN combinada com secagem em secador solar

Produto	Temp. (°C)		
	Média	Máx.	Mín.
GCO (dia)	88,45	90,30	86,60
GSO (dia)	71,47	75,30	68,70

Tabela E.1 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem das FCO e FSO por exposição direta ao sol

Produto	Temp. (°C)			Umidade (%)			Vento (m s ⁻¹)	Radiação (KJm ²)
	Média	Max.	Mín.	Média	Max.	Mín.		
FCO	27,55	30,00	21,90	57,50	92,00	50,00	3,65	2832,80
FSO	26,82	30,10	23,30	67,40	90,00	53,00	3,16	2003,22

Tabela E.2 – Valores médios das condições termodinâmicas do ambiente externo durante a secagem dos GCO e GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

Produto	Temp. (°C)			Umidade (%)			Vento (m s ⁻¹)	Radiação (KJm ²)
	Média	Max.	Mín.	Média	Max.	Mín.		
GCO (1° dia)	27,12	30,20	22,20	58,90	85,00	47,00	3,20	1648,69
GCO (noite)	22,46	27,70	20,70	82,53	91,00	58,00	2,44	-
GCO (2° dia)	28,01	31,10	22,40	53,50	87,00	38,00	2,56	2710,25
GSO (1° dia)	28,90	32,10	22,80	49,2	85,00	34,00	4,20	2479,55
GSO (1ª noite)	22,90	28,50	21,00	81,80	93,00	57,00	3,20	-
GSO (2° dia)	29,20	32,00	23,10	49,10	82,00	37,00	3,43	2294,29
GSO (2ª noite)	24,40	29,30	22,50	74,50	86,00	49,00	4,70	-

Tabela E.3 – Valores médios de temperatura e umidade relativa no interior do secador de uso noturno durante a secagem dos GCO e GSO por exposição direta ao sol combinada com secagem em secador ACSN

Produto	Temp. (°C)			Umidade (%)		
	Média	Máx.	Mín.	Média	Máx.	Mín.
GCO (noite)	44,78	50,20	40,10	63,87	70,00	52,60
GSO (1ª noite)	39,40	43,30	36,80	45,44	51,60	39,70
GSO (2ª noite)	43,30	48,10	42,00	49,53	52,90	47,30