



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE
PROCESSOS**

GEORGIANA MARIA VASCONCELOS MARTINS

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PARBOILIZAÇÃO SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, TECNOLÓGICAS E DE COCÇÃO DO ARROZ
VERMELHO**

**CAMPINA GRANDE-PB
2023**

GEORGIANA MARIA VASCONCELOS MARTINS

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PARBOILIZAÇÃO SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, TECNOLÓGICAS E DE COCÇÃO DO ARROZ
VERMELHO**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, pertencente à linha de pesquisa de Bioprodutos e área de concentração Desenvolvimento de Processos, como requisito para a obtenção do título de doutorado em Engenharia de Processos.

Orientadora: Prof^a. Dra. Maria Elita Martins Duarte
Coorientador Prof. Dr Hugo Miguel Lisboa Oliveira

CAMPINA GRANDE-PB

M586i Martins, Georgiana Maria Vasconcelos.
Influência das variáveis de parboilização sobre as características químicas, tecnológicas e de cocção do arroz vermelho / Georgiana Maria Vasconcelos Martins. – Campina Grande, 2023.
167 f.

Tese (Doutorado em Engenharia de Processos) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Ciências e Tecnologia, 2023.
"Orientação: Profa. Dra. Maria Elita Martins Duarte, Prof. Dr. Hugo Miguel Lisboa Oliveira".
Referências.

1. Arroz – Cultura. 2. Parboilização do Arroz Vermelho. 3. Arroz – Beneficiamento e Textura. 4. Arroz Parboilizado – Absorção e Secagem.
I. Duarte, Maria Elita Martins. II. Oliveira, Hugo Miguel Lisboa.
III. Título.

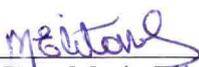
CDU 633.18(043)

**INFLUÊNCIA DAS VARIÁVEIS DE PARBOILIZAÇÃO SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS QUÍMICAS, TECNOLÓGICAS E DE COCÇÃO DO ARROZ
VERMELHO**

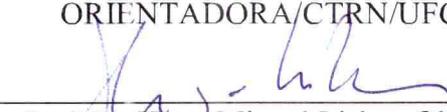
Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos, do Centro de Ciências e Tecnologia da Universidade Federal de Campina Grande, pertencente à linha de pesquisa de Bioprodutos e área de concentração Desenvolvimento de Processos, como requisito para a obtenção do título de doutorado em Engenharia de Processos.

Aprovada em: 31 de Agosto de 2023.

BANCA EXAMINADORA



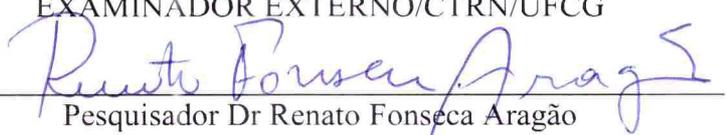
Profa. Dra. Maria Elita Martins Duarte
ORIENTADORA/CTRN/UFCG



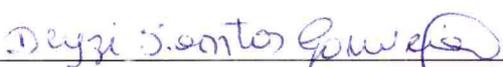
Prof. Dr. Hugo Miguel Lisboa Oliveira
ORIENTADOR /CTRN/UFCG



Profa Dra Severina de Sousa
EXAMINADOR EXTERNO/CTRN/UFCG



Pesquisador Dr Renato Fonseca Aragão
EXAMINADOR EXTERNO /CTRN/UFCG



Profa Dra Deyzi Santos Gouveia
EXAMINADOR EXTERNO/CTRN/UFCG



Prof. Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata
EXAMINADOR INTERNO /CTRN/UFCG

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PROCESSOS



ATA DA DEFESA PARA CONCESSÃO DO GRAU DE DOUTOR EM ENGENHARIA DE PROCESSOS, REALIZADA EM 31 DE AGOSTO DE 2023.

Candidato(a): Georgiana Maria Vasconcelos Martins

Comissão Examinadora: Professores Drs: Nome (UFCG - Orientador), Maria Elita Martins Duarte (UFCG - Orientadora), Hugo Miguel Lisboa Oliveira (UFCG - Orientador), Severina de Sousa (UFCG - Examinadora Externa), Renato Fonseca Aragão (UFCG - Examinador Externo), Deyzi Santos Gouveia (UFCG - Examinadora Externa), Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata (UFCG - Examinador Interno).

Título: "Influência das Variáveis de Parboilização Sobre as Características Químicas, Tecnológicas e de Cocção do Arroz "

Horário e Local da defesa: 31 de agosto de 2023, às 14:00 horas, Auditório do Bloco CZ.

Em sessão pública, após exposição de 50 minutos, o candidato foi arguido oralmente pela Comissão Examinadora, tendo demonstrado suficiência de conhecimento e capacidade de sistematização no tema de sua tese sendo "APROVADA". Face a Aprovação declara o Presidente da Banca Examinadora Maria Elita Martins Duarte, achar-se o(a) candidato(a) legalmente habilitado(a) a receber o grau de Doutor no domínio da Engenharia de Processos, cabendo a Universidade Federal de Campina Grande providenciar a expedição do Diploma a que o mesmo faz jus. Na forma regulamentar foi lavrada a presente ata, que é assinada por mim, Maria de Fátima David Sousa, secretária, e pelos membros da Comissão Examinadora. Campina Grande, 31 de agosto de 2023.

Maria de Fatima David Sousa (Secretária)

Professores Drs:

Maria Elita Martins Duarte (UFCG - Orientadora)
Hugo Miguel Lisboa Oliveira (UFCG - Orientador)
Severina de Sousa (UFCG - Examinadora Externa)
Renato Fonseca Aragão (UFCG - Examinador Externo)
Deyzi Santos Gouveia (UFCG - Examinadora Externa)
Mário Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata (UFCG - Examinador Interno)

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao Bondoso Jesus acima de tudo, pois todas as coisas vêm dele, existem por meio dele e são para ele. A ele seja toda a glória para sempre! Amém Rm 11.36.

Agradeço à todos que de alguma forma colaboraram para realização desta pesquisa, em especial:

Aos meus pais Geová e Joana Dark

As minhas irmãs: Gabriela e Glória Geórgia

As minhas amigas: Elisângela e Jacimone pela amizade.

Aos orientadores Dr Hugo Miguel Lisboa Oliveira e Dra Maria Elita Martins Duarte pela orientação.

Aos professores Dr. Francisco Hevilásio Freire Pereira (Laboratório de Fisiologia Vegetal) e Dr. Fernandes Antônio de Almeida (Laboratório de Fitopatologia) ambos do Curso de Agronomia da Universidade Federal de Campina Grande, como também ao professor Dr. Mario Eduardo Rangel Moreira Cavalcanti Mata (Laboratório de Engenharia de Alimentos, campus Campina Grande), pelos espaços cedidos para realização da pesquisa.

Aos Técnicos do CCTA do Curso de Agronomia da Universidade Federal de Campina Grande: Joice (Laboratório de Fisiologia Vegetal), Tiago (Laboratório de Fitopatologia) e Roberta (Laboratório de Sementes).

Aos Técnicos do CETENE Adriana Fernandes Campos e Gian Carlos Silva Duarte pela contribuição nas Análises Térmicas (TG e DTG)

A professora Dra Amanda Melissa Damião Leite da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Engenharia de Materiais pela contribuição nas análises de Infravermelho com Transformada de Fourier.

A Dra Renata Duarte Almeida pelas análises de Textura realizada no Laboratório de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Campina Grande, CTRN, UFCG.

A técnica MSc. Fabíola pela análise de cor realizada no Laboratório de Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Pombal, CCTA, UFCG.

Ao Núcleo de Processamento de Alimentos (NUPPA) pelas análises de composição centesimal e conteúdo de amido.

Aos meus alunos do curso de Engenharia de Alimentos, campus Pombal, UFCG, Victor de Souza Pereira e Bruna Lorrane Rosendo Martins pela contribuição na pesquisa.

Agradeço a Gabriela Carla Vasconcelos Martins e a Padronize Consultoria Acadêmica pela contribuição na tradução do abstract da tese e do artigo da tese.

As contribuições da banca do exame do Seminário I, Qualificação, Seminário II e Defesa Final.

Aos Professores do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Processos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG) pelos ensinamentos transmitidos.

Minha sincera gratidão

Georgiana Maria Vasconcelos Martins

RESUMO

Os objetivos dessa pesquisa foram avaliar a caracterização do arroz vermelho *in-natura*, do arroz vermelho hidratado em casca por 7 horas nas temperaturas de 45 até 75°C e do arroz parboilizado autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e submetidos à secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C através das seguintes análises: caracterização centesimal, teor de amido, termogravimetria (TG), Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR-ATR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Como também analisou-se a cinética de absorção nas temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C. Também analisou-se a cinética de secagem do arroz parboilizado para os tempos de autoclave 14, 22 e 30 minutos e temperaturas de secagem 50, 60 e 70°C. Como também avaliou-se os parâmetros texturométricos: firmeza, coesividade, adesividade, gomosidade e mastigabilidade do arroz parboilizado. Concluiu-se que: As análises da composição centesimal e caracterização do teor de amido do arroz vermelho parboilizado com tempo de autoclave 14, 22 e 30 minutos submetidos à secagem a 50°C observaram valores correspondentes aos valores do arroz parboilizado da literatura pesquisada. As modelagens matemáticas revelaram que os modelos de Cavalcanti Mata & Duarte (2018) e o Duarte & Cavalcanti Mata (2018) em relação ao de Peleg (1988) foram melhores para descrever a cinética de hidratação do arroz vermelho em casca, avaliados pelos parâmetros estatísticos R^2 , P, DQM e SE. Da caracterização por TG e DTG obteve-se o percentual de massa e a faixa de temperatura correspondente a degradação dos polissacarídeos presente no arroz vermelho hidratado. A partir das análises de FTIR-ATR observou-se para o arroz hidratado bandas características pertencentes a classe dos amidos do tipo A. Nas micrografias evidenciaram para o arroz vermelho hidratado em casca que houve alteração da sua estrutura morfológica. Já os termogramas evidenciaram as temperaturas de degradação e a obtenção da DTG forneceram os valores nos quais ocorrem o fenômeno de desidratação e os eventos de degradação dos polissacarídeos de arroz vermelho parboilizado. Pela análise de FTIR-ATR foi confirmada a modificação na estrutura química do arroz parboilizado, uma vez que as bandas características para o amido correspondente aos estiramentos C-H, C-O e C-OH e as bandas correspondentes às deformações C=O, C-OH e CH₂, bem como às vibrações dos grupos C-O-C e C-O em álcoois, foram modificadas em relação às bandas características do arroz vermelho *in natura*. As análises de MEV do arroz parboilizado autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e submetidos a temperaturas de secagem 50, 60 e 70°C evidenciam também a gelatinização do amido, assim confirma a parboilização do arroz vermelho. Do processo de secagem o Modelo I de Cavalcanti Mata foi o melhor, mediante a avaliação dos parâmetros estatísticos R^2 , P, DQM e SE. O modelo matemático avaliado para os parâmetros texturométricos: firmeza, coesividade, adesividade, gomosidade e mastigabilidade foi considerado satisfatório pelos parâmetros estatísticos R^2 , P, DQM e SE.

Palavras-chaves: arroz vermelho, beneficiamento, parboilização, textura, absorção, secagem

ABSTRACT

This study aims to evaluate the characterization of fresh red rice, red hydrated red rice for 7 hours at temperatures of 45 to 75°C and parboiled rice autoclaved for 14, 22 and 30 minutes, also submitted to drying at temperatures. 50, 60 and 70 ° C by the following analyzes: centesimal characterization, starch content, thermogravimetry (TG), Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FTIR-ATR) and Scanning Electron Microscopy (SEM), as well as analyzing the absorption kinetics at temperatures of 45, 55, 65 and 75 °C, according to Peleg Models (1988), the models proposed by Cavalcanti Mata & Duarte (2018) and Duarte & Cavalcanti Mata (2018). Parboiled rice drying kinetics were also analyzed for autoclave times 14, 22 and 30 minutes and drying temperatures 50, 60 and 70 °C. The texturometric parameters, such as, firmness, cohesiveness, stickiness, gomosity and chewability of parboiled rice were also evaluated. It was concluded that the analysis of centesimal composition and characterization of starch content of parboiled red rice with autoclave time 14, 22 and 30 minutes submitted to drying at 50°C observed values corresponding to the values of parboiled rice of other literatures. Mathematical modeling revealed that Cavalcanti Mata & Duarte (2018) and Duarte & Cavalcanti Mata (2018) models compared to Peleg (1988) models were better to describe the hydration kinetics of husked red rice, evaluated by statistical parameters. R^2 , P, DQM and SE. From the characterization by TG the percentage of mass and the degradation temperature range of the polysaccharides of hydrated red rice were obtained. The FTIR analysis showed characteristic bands of type A starch for hydrated rice. In the micrographs, it was observed that the red rice in shell had altered its morphological structure. Degradation temperatures and DTG yield provided the values at which dehydration phenomena occur and the degradation events of parboiled red rice polysaccharides. The FTIR analysis confirmed the modification in the chemical structure of the parboiled rice starch, since the characteristic bands for the starch corresponding to the CH, CO and C-OH strains and the bands corresponding to the deformations C = O, C-OH and CH₂, as well as the vibrations of the COC and CO groups in alcohols, their bands in relation to the characteristic bands of fresh red rice were reduced. SEM analysis of autoclaved parboiled rice for 14, 22 and 30 minutes and submitted to drying temperatures of 50, 60 and 70 °C also showed starch gelatinization. From the drying process, Cavalcanti Mata's Model I was the best, through the evaluation of statistical parameters R^2 , P, DQM and SE. The mathematical model evaluated for the texturometric parameters: firmness, cohesiveness, adhesiveness, guminess and chewability were considered satisfactory by the statistical parameters R^2 , P, DQM and SE.

Keywords: red rice, beneficiation, parboiling, texture, absorption, drying

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Produtos e subprodutos do grão de arroz	27
Figura 2.2 - Arroz branco (a), parboilizado (b) e integral (c)	27
Figura 2.3 - Corte longitudinal de um grão de arroz	28
Figura 2.4 - Imagens dos diferentes produtos obtidos do beneficiamento do arroz em casca (A); transformado em arroz integral (B), casca do arroz (D), polimento do arroz integral para obtenção do arroz branco (C) e obtenção do farelo (E)	29
Figura 2.5- Estrutura química da amilopectina e da amilose	30
Figura 2.6- Raio do arroz vermelho de volume como se ele fosse um cilindro	45
Figura 3.1 - Fluxograma para a obtenção do arroz vermelho parboilizado.	48
Figura 3.2- Curva típica de TPA no texturômetro TAXT-plus para o arroz vermelho parboilizado autoclavados a 14, 22 e 30 minutos e submetidos a secagem de 50, 60 e 70°C e do arroz parboilizado Tio João comercial	61
Figura 4.1- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho <i>in-natura</i>	67
Figura 4.2- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho pré-seco	68
Figura 4.3 - Análise de TG-DTG para o arroz vermelho hidratado à 45°C	68
Figura 4.4 - Análise de TG-DTG para o arroz vermelho hidratado à 55°C	69
Figura 4.5 - Análise de TG-DTG para o arroz vermelho hidratado à 65°C	70
Figura 4.6- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho hidratado à 75°C	70
Figura 4.7- Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho <i>in-natura</i> e do arroz vermelho pré -seco	72
Figura 4.8- Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho submetido ao processo de pré -secagem à 50°C e hidratação de 45°C até 75°C	74
Figura 4.9- Análise Microscópica do arroz vermelho: (a) <i>in-natura</i> , (b) pré-seco, (c) hidratado a 45°C, (d) hidratado a 55°C, (e) hidratado a 65°C, (f) hidratado a 75°C	76
Figura 4.10 - Valores observados e estimativas pelo modelo de Peleg (1988) para as temperaturas de 45, 55,65 e 75°C	77
Figura 4.11 - Cinética de absorção de água proposto pelo modelo de Cavalcanti Mata &Duarte (2018)	81
Figura 4.12 - Cinética de absorção de água proposto pelo modelo de Duarte &Cavalcanti Mata (2018)	81

Figura 4.13 -	Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 14 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 50°C	83
Figura 4.14 -	Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 14 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 60°C	84
Figura 4.15 -	Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 14 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 70°C	85
Figura 4.16-	Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 22 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 50°C	86
Figura 4.17-	Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 22 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 60°C	87
Figura 4.18 -	Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 22 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 70°C	88
Figura 4.19-	Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 30 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 50°C	88
Figura 4.20-	Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 30 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 60°C	89
Figura 4.21-	Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 30 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 70°C	90
Figura 4.22-	Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho submetido ao processo de parboilização e ao processo de hidratação à 55°C durante 7 horas: a) 14 minutos de autoclave/secagem à 50°C; b) 14 minutos de autoclave/secagem à 60°C; c) 14 minutos de autoclave/secagem à 70°C. d) hidratação à 55°C durante 7 horas	91
Figura 4.23-	Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho submetido ao processo de parboilização e ao processo de hidratação à 55°C durante 7 horas: a) 22 minutos de autoclave/secagem à 50°C; b) 22 minutos de autoclave/secagem à 60°C; c) 22 minutos de autoclave/secagem à 70°C. d) hidratação à 55°C durante 7 horas	92
Figura 4.24-	Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho submetido ao processo de parboilização e ao processo de hidratação à 55°C durante 7 horas: a) 30 minutos de autoclave/secagem à 50°C; b) 30 minutos de autoclave/secagem à 60°C; c) 30 minutos de autoclave/secagem à 70°C. d) hidratação à 55°C durante 7 horas	93
Figura 4.25-	Micrografias da estrutura morfológica do arroz vermelho ao longo do processo de parboilização com tempo de permanência em autoclave por 14, 22 e 30 minutos e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C ampliação de 1kx	95
Figura 4.26-	Dados experimentais da secagem do arroz vermelho em função do tempo de parboilização – 14 minutos	97

Figura 4.27-	Dados experimentais da secagem do arroz vermelho em função do tempo de parboilização – 22 minutos	97
Figura 4.28-	Dados experimentais da secagem do arroz vermelho em função do tempo de parboilização – 30 minutos	98
Figura 4.29-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, de acordo com o modelo de Fick com 6 termos da série	98
Figura 4.30-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, de acordo com o modelo de Fick com 6 termos da série	99
Figura 4.31-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, de acordo com o modelo de Fick com 6 termos da série	99
Figura 4.32-	Valores da difusividade efetiva do processo de secagem do arroz vermelho parboilizado às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, em função do número de termos da série do modelo de Fick, tendo os grãos um tempo autoclavagem de 14 minutos	103
Figura 4.33-	Valores da difusividade efetiva do processo de secagem do arroz vermelho parboilizado às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, em função do número de termos da série do modelo de Fick, tendo os grãos um tempo autoclavagem de 22 minutos	104
Figura 4.34-	Valores da difusividade efetiva do processo de secagem do arroz vermelho parboilizado às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, em função do número de termos da série do modelo de Fick, tendo os grãos um tempo autoclavagem de 30 minutos	104
Figura 4.35-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti-Mata	106
Figura 4.36-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti-Mata	106
Figura 4.37-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti-Mata	107

Figura 4.38-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata	109
Figura 4.39-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata	109
Figura 4.40-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata	110
Figura 4.41-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo I de Cavalcanti-Mata	111
Figura 4.42-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo I de Cavalcanti-Mata	112
Figura 4.43-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo I de Cavalcanti-Mata	112
Figura 4. 44-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo II de Cavalcanti-Mata	114
Figura 4. 45-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo II de Cavalcanti-Mata	114
Figura 4. 46-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo II de Cavalcanti-Mata	115
Figura 4. 47-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o Modelo de Midilli e seus colaboradores	116

Figura 4. 48-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o Modelo de Midilli e seus colaboradores	117
Figura 4. 49-	Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o Modelo de Midilli e seus colaboradores	117
Figura 4.50-	Equação de Arrhenius para determinação da energia de ativação do arroz vermelho as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, por diferentes modelos, parboilizado por 14 minutos em autoclave	124
Figura 4.51-	Equação de Arrhenius para determinação da energia de ativação do arroz vermelho as temperaturas de 50, 60 e 70°C, por diferentes modelos, parboilizado por 22 minutos em autoclave	124
Figura 4.52-	- Equação de Arrhenius para determinação da energia de ativação do arroz vermelho as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, por diferentes modelos, parboilizado por 30 minutos em autoclave	125
Figura 4.53-	Parâmetro texturométrico adesividade após a cocção dos grãos do arroz parboilizado Tio João e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos	132
Figura 4.54-	Parâmetro texturométrico firmeza após a cocção dos grãos do arroz Tio João parboilizado e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos	133
Figura 4.55-	Parâmetro texturométrico coesividade após a cocção dos grãos do arroz Tio João parboilizado e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos	134
Figura 4.56-	Parâmetro texturométrico gomosidade após a cocção dos grãos do arroz Tio João parboilizado e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos	135
Figura 4.57-	Parâmetro texturométrico mastigabilidade após a cocção dos grãos do arroz parboilizado Tio João e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos	136

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 -	Modelos matemáticos aplicados à cinética de hidratação de produtos alimentícios	40
Tabela 2.2 -	Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas	42
Tabela 2.3-	Primeiras seis raízes da função de Bessel de primeiro tipo e de ordem zero	45
Tabela 3. 1 -	Formulações para as análises de cocção do arroz vermelho parboilizado e o arroz parboilizado comercial Tio João	60
Tabela 4.1-	Valores médios dos parâmetros físicos e físico-químicos de arroz vermelho <i>in-natura</i> e do arroz vermelho parboilizado	64
Tabela 4.2 -	Dados da temperatura inicial (T_0), temperatura onset (Tonset), temperatura de pico (Tp), temperatura final (Tf), temperatura final (Tf) das curvas de DTG do arroz vermelho <i>in-natura</i> , arroz pré-seco e arroz hidratado	71
Tabela 4.3-	Estimativas dos Parâmetros do Modelo de Peleg (1988)	79
Tabela 4.4 -	Estimativas dos Parâmetros do Modelo de Cavalcanti Mata &Duarte (2018)	82
Tabela 4.5-	Estimativas dos Parâmetros do Modelo de Duarte & Cavalcanti Mata (2018)	83
Tabela 4.6-	Condições do ar de secagem e do arroz vermelho no início do processo, após diferentes períodos de permanência em autoclave	96
Tabela 4.7-	Valores da difusividade efetiva, obtidos em função do 1º ao 6º termos da série utilizando o modelo Fick, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e tempo de parboilizado do arroz vermelho em casca em autoclave por 14 minutos	100
Tabela 4.8-	Valores da difusividade efetiva, obtidos em função do 1º ao 6º termos da série utilizando o modelo Fick, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e tempo de parboilizado do arroz vermelho em casca em autoclave por 22 minutos	101
Tabela 4.9-	Valores da difusividade efetiva, obtidos em função do 1º ao 6º termos da série utilizando o modelo Fick, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e tempo de parboilizado do arroz vermelho em casca em autoclave por 30 minutos	102
Tabela 4.10-	Parâmetros do Modelo proposto por Henderson&Pabis modificado por Cavalcanti Mata, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave	107
Tabela 4. 11-	Parâmetros do Modelo proposto por Page modificado por Cavalcanti Mata, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave	110
Tabela 4. 12 -	Parâmetros do Modelo I proposto por Cavalcanti Mata, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave	113

Tabela 4. 13 -	Parâmetros do Modelo II proposto por Cavalcanti Mata, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave	115
Tabela 4. 14-	Parâmetros do Modelo de Midilli et al. (2002), com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave	118
Tabela 4. 15-	Parâmetros estatísticos do modelo de Fick com 6º termos da série	119
Tabela 4. 16-	Parâmetros estatísticos do Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata	120
Tabela 4. 17-	Parâmetros estatísticos do modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata	120
Tabela 4. 18-	Parâmetros estatísticos do Modelo I de Cavalcanti Mata (2018)	121
Tabela 4. 19-	Parâmetros estatísticos do Modelo II de Cavalcanti Mata	121
Tabela 4.20-		122
	Parâmetros estatísticos do Modelo de Midilli et al. (2002)	
Tabela 4.21	Valores da difusividade de massa efetiva em função da temperatura de secagem e do tempo de autoclave para os modelos estudados	123
Tabela 4.22-	Energia de ativação do arroz vermelho em função do tempo de parboilização e do Modelo de secagem	125
Tabela 4.23-	Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo de Fick com 6 termos da série	127
Tabela 4.24-	Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata	128
Tabela 4.25-	Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata	128
Tabela 4.26-	Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo I de Cavalcanti Mata	129
Tabela 4.27-	Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo II de Cavalcanti Mata	129
Tabela 4.28-	Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico adesividade para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos de autoclave e o arroz parboilizado Tio João	137

Tabela 4.29-	Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico firmeza, para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos de autoclave e o arroz parboilizado Tio João	138
Tabela 4.30-	Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico coesividade, para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos e o arroz parboilizado Tio João	139
Tabela 4.31-	Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico mastigabilidade, para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos e o arroz parboilizado Tio João	140
Tabela 4.32-	Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico gomosidade, para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos e o arroz parboilizado Tio João	141

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A1	Variáveis das formulações das análises de cocção do arroz vermelho parboilizado e do arroz parboilizado comercial Tio João
A ₁₀₂₂	Banda correspondente a região amorfa
A2	Variáveis das formulações das análises de cocção do arroz vermelho parboilizado e do arroz parboilizado comercial Tio João
A3	Variáveis das formulações das análises de cocção do arroz vermelho parboilizado e do arroz parboilizado comercial Tio João
A4	Variáveis das formulações das análises de cocção do arroz vermelho parboilizado e do arroz parboilizado comercial Tio João
A5	Variáveis das formulações das análises de cocção do arroz vermelho parboilizado e do arroz parboilizado comercial Tio João
A6	Variáveis das formulações das análises de cocção do arroz vermelho parboilizado e do arroz parboilizado comercial Tio João
Ad	Adesividade
Al	Aleatório
Coe	Coesividade
DQM	Desvio quadrático médio
DRX	Difração de Raios X
DSC	Calorimetria Exploratória Diferencial
DTG	Derivada da termogravimetria
E	Arroz vermelho <i>in-natura</i>
F	Arroz vermelho pré-seco
Fir	Firmeza
FTIR-ATR	Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com Transformada de Fourier
G	Arroz vermelho hidratado à 45°C
Gom	Gomosidade
H	Arroz vermelho hidratado à 55°C
I	Arroz vermelho hidratado à 65°C
J	Arroz vermelho hidratado à 75°C

Mast	Mastigabilidade
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
P	Erro médio relativo
R ²	Coefficiente de determinação
RC	Cristalinidade relativa
SE	Estimativa do desvio padrão
Te	Tendencioso
TG	Termogravimetria
Y	Função de resposta das variáveis adesividade, firmeza, coesividade, mastigabilidade, gomosidade
A ₁₀₄₇	Banda correspondente a região cristalina

LISTA DE SÍMBOLOS

RX_{exp}	Razão de teor de água experimental	[adimensional]
RX_{pred}	Razão de teor de água predito pelo modelo	[adimensional]
A	Os coeficientes dos modelos	
a^*	Intensidade de vermelho	
a'	Os coeficientes dos parâmetros de textura	
a_1	Os coeficientes dos modelos de secagem	
a_2	Os coeficientes dos modelos de secagem	
a_3	Os coeficientes dos modelos de secagem	
a_4	Os coeficientes dos modelos de secagem	
a_5	Os coeficientes dos modelos de secagem	
B	Os coeficientes dos modelos de secagem	
b^*	Intensidade de amarelo	
b'	Os coeficientes dos parâmetros de textura	
c'	Os coeficientes dos parâmetros de textura	
C	Croma	
D_{ef}	Coefficiente efetivo de difusão	$[m^2/s]$
D_o	Constante chamada de fator pré-exponencial	$[m^2 s^{-1}]$
E_a	Energia de ativação	$[J mol^{-1}]$
h_p	Constante de Plank	$[J.s^{-1}]$
H	Ângulo de tom	
K	Constantes de hidratação/secagem	
k_1	Constantes de hidratação/secagem	
k_2	Constante do modelo de Peleg	
k_B	Constante de Boltzmann	$[J.K^{-1}]$
L	Comprimento do grão	[m]
L^*	Luminosidade	
m_f	Massa final massa do cadinho mais a massa da semente seca	[g]
m_i	Massa inicial, massa do cadinho mais a massa dos grãos úmidos	[g]
N	Os coeficientes dos modelos de secagem	

n_1	Os coeficientes dos modelos de secagem	
n_2	Os coeficientes dos modelos de secagem	
R	Constante universal dos gases	$[J \text{ mol}^{-1} \text{ K}^{-1}]$
r'	Raio do cilindro reto	$[m]$
R_e	Raio equivalente	$[m]$
R_X	Razão de teor de água	$[\text{adimensional}]$
R_X'	Razão de teor de água durante o processo de hidratação	$[\text{adimensional}]$
T	Temperatura	$[K]$
t	Tempo	$[s]$
t'	Tara, massa do cadinho vazio	$[g]$
V	Volume do cilindro	$[m^3]$
T_f	Temperatura final	$[^\circ C]$
T_o	Temperatura inicial	$[^\circ C]$
T_{onset}	Temperatura de pico	$[^\circ C]$
X_0	Teor de água inicial do produto	$[\%]$
X_e	Teor de água de equilíbrio	$[\%]$
X_t	Teor de água para num dado tempo	$[\%]$
α	O índice de comportamento da absorção	
β	O parâmetro de escala da absorção	
ΔG	Energia livre de Gibbs	$[J \cdot \text{mol}^{-1} \cdot K^{-1}]$
ΔH	Entalpia	$[J \cdot \text{mol}^{-1}]$
ΔS	Entropia	$[J \cdot \text{mol}^{-1}]$
λ_n	Raízes da equação de Bessel	
$N - z$	- Os graus de liberdade do modelo	

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	22
1.1 Objetivos	24
1.1.1 Objetivo Geral	24
1.1.2 Objetivos Específicos	24
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	26
2.1 O arroz (<i>Oryza Sativa L.</i>)	26
2.2 O amido	29
2.3 Processo de parboilização	31
2.4 Características do arroz parboilizado	34
2.5 Análises Térmicas (TG e DTG), Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR-ATR) em alimentos	37
2.6 Modelagem matemática do processo de hidratação	38
2.7 Modelagem Matemática do Processo de Secagem	41
2.8 Modelos matemáticos para a determinação da difusividade efetiva (Def)	42
2.8.1 Modelo de Fick	42
2.8.2 Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata	45
2.8.3 Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata	46
2.8.4 Modelo I de Cavalcanti Mata	46
2.8.5 Modelo II de Cavalcanti Mata	47
3 MATERIAIS E MÉTODOS	48
3.1 Matéria Prima	49
3.2 Caracterização do arroz vermelho <i>in-natura</i> , arroz vermelho hidratado e do arroz vermelho parboilizado	50
3.3 Lavagem e pré-secagem	53
3.4 Hidratação: cinética de absorção de água	54
3.5 Modelagem matemática da cinética de hidratação	54
3.6 Vaporização	55
3.7 Cinética de secagem do arroz parboilizado	56
3.8 Determinação da difusividade efetiva (Def)	57
3.9 Energia da ativação (Ea)	58
3.10 Determinação das propriedades termodinâmicas	58
3.11 Análise estatística da etapa de hidratação e da secagem do arroz parboilizado	59
3.12 Análise de Textura	60
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
4.1 Caracterização centesimal (parâmetros químicos) do arroz <i>in-natura</i> e do arroz vermelho parboilizado	61
4.2 Análise termogravimétrica do arroz vermelho hidratado	66

4.3 Espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier (FTIR-ATR) do arroz vermelho hidratado	72
4.4 Análise morfológica por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do arroz vermelho hidratado	74
4.5 Cinética de absorção e modelagem matemática do arroz vermelho	77
4.6 Análise termogravimétrica do arroz parboilizado	83
4.7 Espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier (FTIR-ATR) do arroz vermelho parboilizado	90
4.8 Análise morfológica por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do arroz parboilizado	94
4.9 Modelagem matemática da secagem do arroz vermelho parboilizado	96
4.9. 1 Secagem do arroz vermelho parboilizado e seus modelos	96
4.9.2 Análise do comportamento da difusividade efetiva para os diferentes modelos matemáticos derivados do modelo de Fick	105
4.9.3 Modelo empírico de secagem do arroz vermelho parboilizado	116
4.9.4 Análise dos parâmetros estatísticos dos modelos	119
4.10 Energia de ativação	123
4.11 Propriedades termodinâmicas	126
4.12 Avaliação do efeito do processo de parboilização mediante os parâmetros texturométricos	131
5. CONCLUSÕES	142
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	144
APÊNDICE	159

1. INTRODUÇÃO

O arroz (*Oryza sativa L.*) é um dos cereais mais produzidos e consumidos em todos os continentes, caracterizando-se como alimento relevante para mais da metade da população mundial. O Brasil destaca-se como único país, fora do continente asiático, que está entre os 10 maiores produtores de arroz. No comércio, podem-se encontrar vários tipos de arroz, entre eles pode-se destacar os seguintes: arroz branco, arroz aromático, arroz verde, arroz preto, arroz arbóreo e o arroz vermelho (HUANG et al. 2009, BOÊNO et al. 2011, WEBER et al. 2012, AYAMDOO et al. 2014, HUANG et al. 2015).

O arroz vermelho, ou arroz da terra, foi o primeiro arroz introduzido pelos colonizadores portugueses no Brasil e o seu cultivo no País atualmente está restrito à pequenas áreas do semi-árido nordestino; destacando-se como área de cultivos, os estados da Paraíba, Rio Grande do Norte e Pernambuco. A Paraíba é o maior produtor de arroz vermelho do Brasil. Sua produção, concentrada nas regiões do Vale do Piancó e Vale do Rio do Peixe, é feita predominantemente por agricultores de base familiar (PEREIRA E MORAIS, 2014, SANTOS et al. 2020).

A área de plantio do arroz vermelho na Paraíba é bem irregular porque depende do período de chuvas e da produção de cada pequeno produtor, mas estima-se que a área plantada, atualmente, não atinja 10 mil hectares (PEREIRA E MORAIS, 2014).

No Brasil, o arroz é consumido na forma de grãos inteiros, em três tipos de produtos: arroz beneficiado polido, arroz parboilizado e arroz integral. O arroz beneficiado polido é o mais consumido na maioria das regiões brasileiras e é obtido a partir do polimento do grão integral, através de cilindros que promovem o atrito dos grãos, removendo suas camadas mais externas. Além da casca, resulta desse processo subprodutos em forma de grãos quebrados e farelo (CASTRO et al. 1999; BUGGENHOUT et al.; 2013).

Por sua vez, o arroz integral, passa pelo beneficiamento em que a casca é removida, e apesar de mais rico em nutrientes que o arroz polido, é pouco consumido no Brasil. Já com o arroz parboilizado, têm-se uma melhora na qualidade nutricional em relação ao produto beneficiado polido, devido à redistribuição de alguns componentes do grão em decorrência dos efeitos da temperatura e do teor de água durante o processo hidrotérmico. O arroz parboilizado pode ser consumido integral ou polido (CASTRO et al. 1999; BUGGENHOUT et al.; 2013).

O processo de parboilização inicia-se na etapa de hidratação. O teor de água inicial tem que estar na faixa de 15 % em base seca, para garantir uma absorção de água uniforme e irreversível, assim necessita-se de grãos com teor de água, após a hidratação, na faixa de 28 -

30% em base úmida. Após a hidratação o arroz segue a etapa de vaporização, em autoclave. A temperatura e tempo de permanência são variáveis dependentes da espécie do grão. No final do processo de vaporização, os grãos devem estar com teor de água na faixa de 35-40% em base úmida, assim garantindo a gelatinização do amido. A finalização do processo ocorre durante a secagem, onde grão do arroz parboilizado, deve apresentar teor de água em torno de 15% em base seca, para garantir um armazenamento seguro (BUGGENHOUT et al. 2013; DUTTA, MAHANTA, 2014; OLI et al. 2014).

Vários estudos têm demonstrado que o arroz parboilizado é usado para aumentar a renda de beneficiamento e o valor nutricional. Em comparação ao arroz polido ou integral, o arroz parboilizado, quando cozido, torna-se mais solto, mais rendoso, requer menos óleo durante o cozimento, pode ser reaquecido diversas vezes, preservando as propriedades nutritivas, tornando-se menos susceptível ao ataque de insetos e conserva-se por mais tempo, devido ao efeito de pasteurização enzimática e microbiológica (DEMONT et al. 2012, BALBINOTI et al. 2018^a).

Alguns autores, em diferentes pesquisas, identificaram as alterações provocadas na estrutura amilácea de diferentes fontes de amido por processos físicos, químicos e hidrotérmicos, tais como: acetilação do amido de arroz (BARTZ et al. 2012, COLUSSI et al. 2015 e COLUSSI et al. 2017); acetilação do amido de aveia (SHAH et al. 2017); parboilização do amido de arroz (SITTIPOD E SHI et al. 2016); parboilização do amido de arroz pigmentado (PAIVA et al. 2016).

Nesses estudos, as análises de Infravermelho com Transformada de Fourier, os Difractogramas de Raios X, análise termogravimétrica (TG) e a microscopia eletrônica de varredura (MEV) permitiram confirmar as alterações químicas, térmicas, estruturais e morfológicas das diferentes fontes de amido.

Neste contexto, objetiva-se definir os melhores parâmetros de parboilização e investigar as alterações provocadas no arroz vermelho hidratado e parboilizado pelas técnicas de espectroscopia de absorção na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR-ATR), análise termogravimétrica (TG) e sua derivada e microscopia eletrônica de varredura (MEV), quando este é submetido ao processo de parboilização em diferentes tempos de autoclave e temperaturas de secagem.

Além disso, objetiva-se avaliar a cinética de hidratação do arroz vermelho para diferentes variáveis de hidratação (temperaturas e tempos) mediante modelos empíricos; a

cinética de secagem do arroz vermelho parboilizado, analisado por meio de modelos teóricos, empíricos e semi-empíricos para os diferentes tempos de autoclave e temperaturas de secagem.

Tendo em vistas que ao longo do processo de parboilização, a estrutura amilácea do arroz vermelho sofre alterações irreversíveis, essa pesquisa visa investigar a influência das variáveis de processo durante as etapas de hidratação (temperatura e tempo), vaporização (tempo de permanência em autoclave) e secagem (temperatura de secagem) que proporcionam a parboilização do arroz vermelho. Assim, serão obtidas as melhores condições de parboilização do arroz vermelho.

1.1Objetivos

1.1.1Objetivo Geral

Tendo em vistas as especificidades do arroz vermelho da Paraíba e os ganhos advindos do seu beneficiamento, conforme relatado anteriormente, esta pesquisa foi realizada com o objetivo de definir parâmetros de parboilização para este produto, bem como avaliar as características químicas e tecnológicas resultantes da sua parboilização.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Estudar a caracterização centesimal e a determinação do conteúdo de amido do arroz vermelho.
- Estudar a caracterização do arroz vermelho *in-natura* e hidratado mediante as seguintes análises: estabilidade térmica (técnica de Termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG), identificação dos grupos funcionais (técnica de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier FTIR) e morfologia (técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).
- Avaliar a cinética de absorção e Modelagem matemática.
- Avaliar a cinética de secagem do arroz parboilizado, segundo o modelo de Fick, modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata, modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata, Modelo I de Cavalcanti Mata, Modelo II de Cavalcanti Mata e Modelo de Midilli et al. (2002)
- Estudar a caracterização do arroz parboilizado submetido às etapas de autoclavagem e secagem, mediante as seguintes análises: estabilidade térmica (técnica de termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG), identificação dos grupos funcionais (técnica de Espectroscopia de Infravermelho com Transformada de Fourier FTIR- ATR) e morfologia (técnica de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

- Estudar a caracterização centesimal e determinação do conteúdo de amido do arroz parboilizado.
- Comparar a cocção do arroz parboilizado vermelho em relação a cocção do arroz parboilizado do tipo comercial de marca (Tio João), mediante aos parâmetros texturométricos: adesividade, firmeza, gomosidade, coesividade, mastigabilidade e elasticidade.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 O arroz (*Oryza Sativa L.*)

Diversos historiadores e cientistas apontam o sudeste da Ásia como o local de origem do arroz. A literatura mostra duas formas silvestres como precursoras do arroz cultivado: a espécie *Oryza rufipogon*, proveniente da Ásia, originando a *O. sativa*; e a *Oryza barthii* (*Oryza breviligulata*), originária da África Ocidental, dando origem à *Oryza glaberrima* (PEREIRA, 2019).

O arroz (*Oryza sativa L.*) é um dos cereais mais produzidos e consumidos, caracterizando-se como principal alimento para mais da metade da população mundial. É um grão que fornece uma importante fonte calórica, além de contribuir para o suprimento de alguns minerais da dieta alimentar humana (BALBINOTI et al. 2018^a; BEHERA & SUTAR, 2018).

No consumo humano, o arroz pode ser utilizado sob diversas formas: arroz polido, parboilizado e integral; óleo e farinha comercial de arroz, entre outros (BASSINELO et al. 2017 e BEHERA & SUTAR, 2018). A Figura 2.1 ilustra as diversas possibilidades de se utilizar o grão de arroz.

O mercado mundial aponta a existência de vários tipos de arroz, sendo que os principais são: arroz polido (branco), arroz integral, arroz basmati, arroz arbóreo, arroz jasmine, arroz carolino, arroz japonês, arroz selvagem, arroz preto, arroz vermelho tradicional, dentre outros (DENARDIN et al. 2004; NAVES, 2007; BASSINELLO et al, 2008; WEBER, 2012; HUANG et al. 2009; AYAMDOO et al. 2014).

O arroz-vermelho também é conhecido como arroz da terra, arroz de veneza, arroz maranhão. No Brasil, o arroz vermelho é cultivado nas regiões do centro-oeste e norte, mas é no sertão do estado da Paraíba que se concentra a maior produção, sendo plantado, principalmente pelos pequenos agricultores (PEREIRA, 2019). Os genótipos do arroz vermelho são do tipo: arroz vermelho pequeno, arroz vermelho Virginia, arroz vermelho MN PB0405, MNA RN 0803; MNA 1105; MNA 1109, MNA CE0501, MNA CH0501 e arroz vermelho tradicional (MENEZES et al. 2011; BOÊNO et al. 2011; SOUZA et al. 2012).

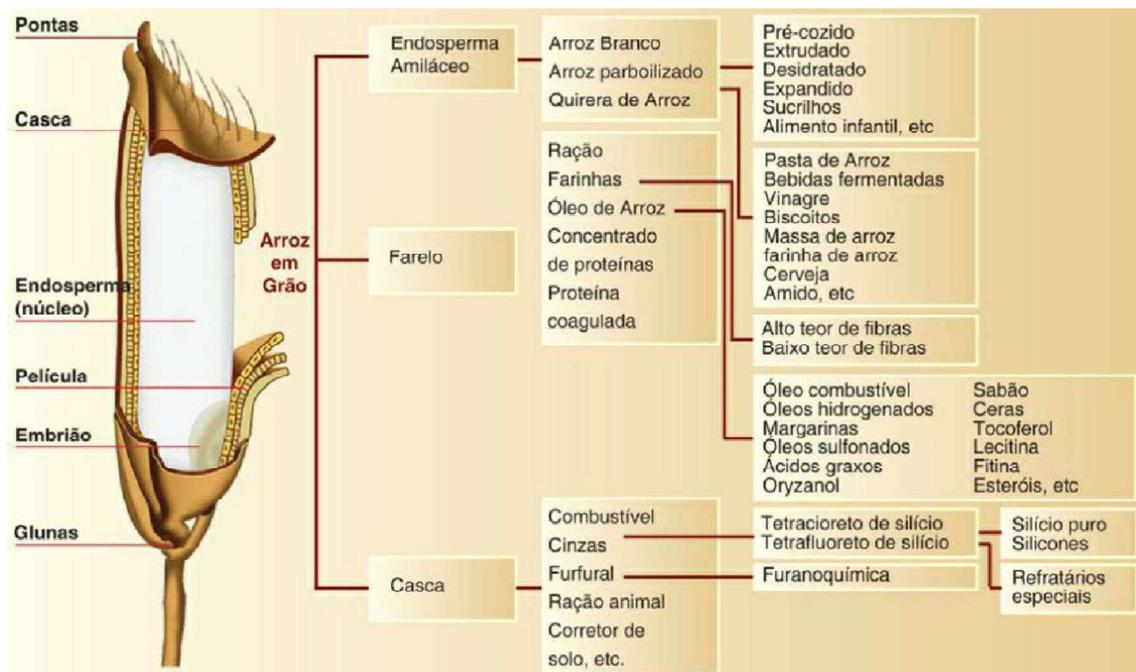


Figura 2. 1 - Produtos e subprodutos do grão de arroz

Fonte: Weber (2012)

O mercado brasileiro de arroz prioriza o consumo de arroz: branco polido, parboilizado e integral (Figura 2.2).



Figura 2. 2 - Arroz branco (a), parboilizado (b) e integral (c)

Fonte: Weber, 2012

O grão de arroz, Figura 2.3, é constituído de cariopse e casca. A casca, camada protetora do grão, é composta por pálea e lema, totalizando aproximadamente 20% da massa do grão, rico em fibras. A cariopse é organizada em camadas, sendo as externas conhecidas por pericarpo, tegumento e camada de aleurona, representando 5 a 8% do arroz integral. O gérmen (2-3% do arroz) está situado no lado ventral na base do grão, rico em lipídios e proteínas. A parte do grão de maior representatividade é o endosperma, totalizando 89 a 94% do arroz integral, rico em grânulos de amido (PASCUAL, 2010).

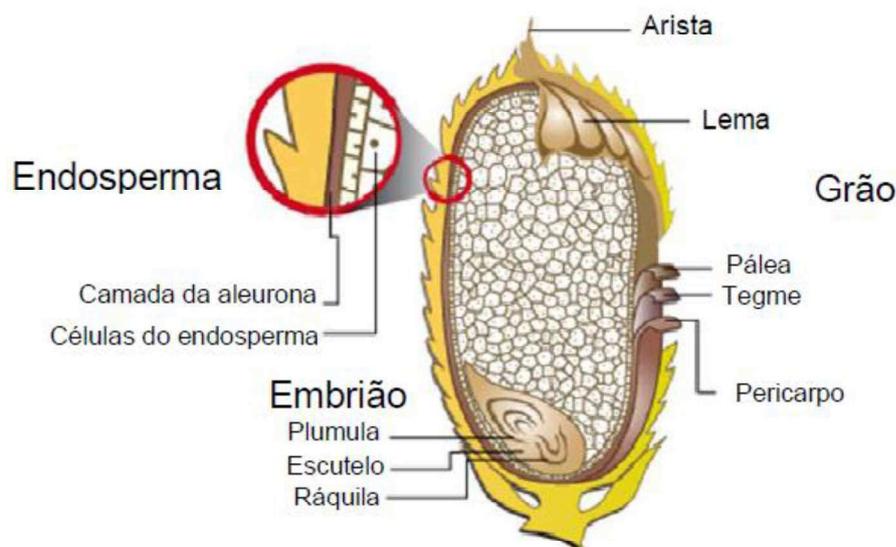


Figura 2. 3 - Corte longitudinal de um grão de arroz
 Fonte Pascual (2010)

Ao submeter o grão ao descascamento (Figura 2.4 A), separa-se a casca da cariopse, obtendo-se o arroz integral (Figura 2.4B). Este pode ser polido para remoção do farelo (pericarpo, tegumento, camada de aleurona e gérmen), que representa 8,5- 14,8% de sua totalidade (Figura 2.4 E), obtendo-se o arroz branco polido (Figura 2.4C). Os grãos também podem ser submetidos à parboilização, processo hidrotérmico através do qual se obtém o arroz parboilizado, que pode ser consumido na forma integral ou polido (WALTER et al. 2008; BUGGENHOUNT et al. 2013).

O grão de arroz, antes de estar na forma adequada para ser adquirido pelo consumidor, passa por processos de beneficiamento. As três principais formas que o arroz beneficiado é consumido, em ordem de importância, são: branco, parboilizado e integral (BUGGENHOUNT et al. 2013).

Durante o processo de beneficiamento, o arroz é separado do endosperma, parcial ou totalmente, do embrião e da película que recobre o grão. O arroz polido, constituído de amido, é composto de boa fonte de proteínas. As camadas periféricas que dão origem ao farelo (cerca de 8% do grão integral) destacam-se pela presença de nutrientes como fibras, gorduras e vitaminas do complexo B, com destaque ao ácido fólico. O germe ou embrião distingue-se pela composição em proteínas e lipídios (NAVES, 2007 e OLI et al. 2016).

Segundo Dutta&Mahanta, (2014) e Chavan et al. (2017), o teor nutritivo do arroz pode ser aumentado, mediante o processo de parboilização, que além de aprimorar algumas qualidades tecnológicas do grão, também possibilita um incremento do valor nutricional em

comparação com o arroz branco, sobretudo no conteúdo mineral, no amido digestível e nas frações de fibra alimentar.

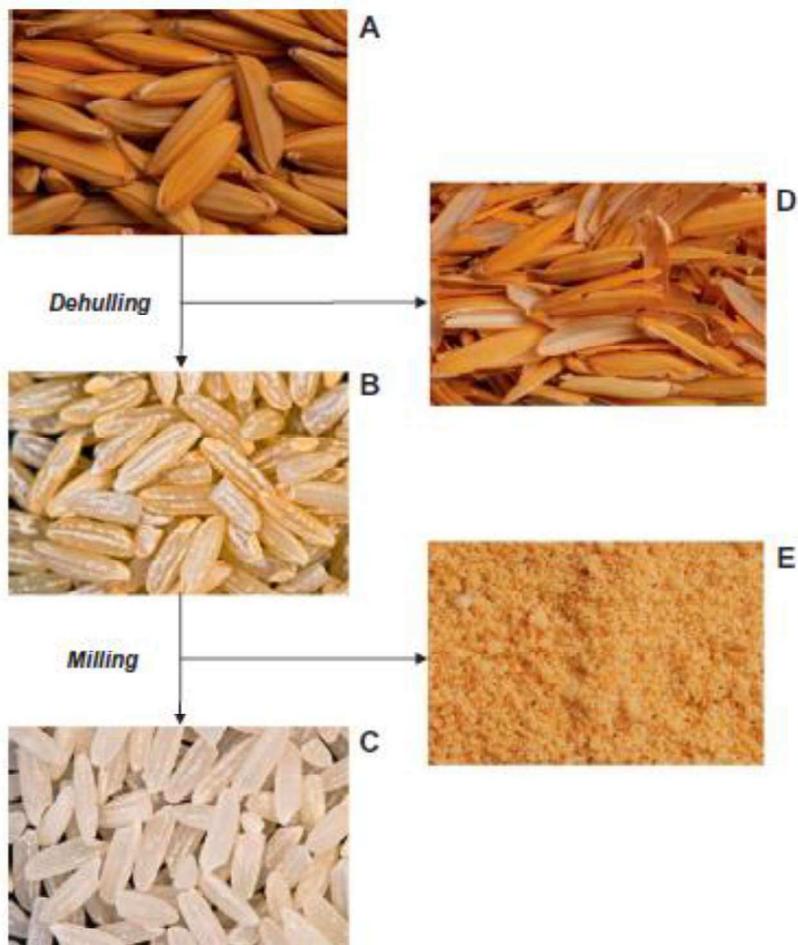


Figura 2. 4 - Imagens dos diferentes produtos obtidos do beneficiamento do arroz em casca (A); transformado em arroz integral (B), casca do arroz (D), polimento do arroz integral para obtenção do arroz branco (C) e obtenção do farelo (E).

Fonte: Buggenhout et al. (2013)

2.2 O Amido

O amido pode ser obtido de diversas fontes vegetais, como cereais, raízes e tubérculos, e também de frutas e legumes. No entanto, a extração em nível comercial de amido se restringe aos cereais, raízes e tubérculos. Em seu estado nativo, o amido é insolúvel em água fria, seus grãos são parcialmente cristalinos, cuja morfologia, composição química e estrutura molecular são características de cada espécie em particular, sendo abundante em grãos de cereais (40% a

90% da massa seca), leguminosas (30% a 50% da massa seca), tubérculos (65% a 85% da massa seca) e frutas imaturas ou verdes (40% a 70% da massa seca) (SAJILATA et al. 2006 e HOOVER et al. 2010).

Os componentes majoritários do amido são formados por dois tipos de polímeros de glicose: a amilose e a amilopectina, com estruturas e funcionalidades diferentes. A amilose é um polímero linear composto por unidades de D-glicose ligadas por ligações α -(1 \rightarrow 4), com grau de polimerização de 200 a 3000, dependendo da fonte do amido. A amilopectina é um polímero altamente ramificado, com unidades de D-glicose ligadas através de ligações α -(1 \rightarrow 4) e ramificações em α -(1 \rightarrow 6) (CEREDA, 2002; SAJILATA et al. 2006 e HOOVER et al. 2010).

A proporção entre a amilose e amilopectina contém cerca de 20-30% de amilose e 70-80% de amilopectina. (MALI et al. 2010, LUCHESE et al. 2017, MERCI et al. 2019).

A Figura 2.5 apresenta as representações das estruturas químicas da amilose e amilopectina. Além da amilose e amilopectina, outros componentes como proteínas e lipídeos podem ser encontrados na superfície granular. A presença de lipídeos faz com que haja uma redução na capacidade do amido ligar-se com água, portanto diminui a solubilidade do grânulo. Outros componentes como cálcio, fósforo, magnésio, potássio e sódio também podem ser encontrados em pequenas quantidades (menos que 4%) (CEREDA, 2002, BARTZ et al. 2012 e MERCI et al 2019).

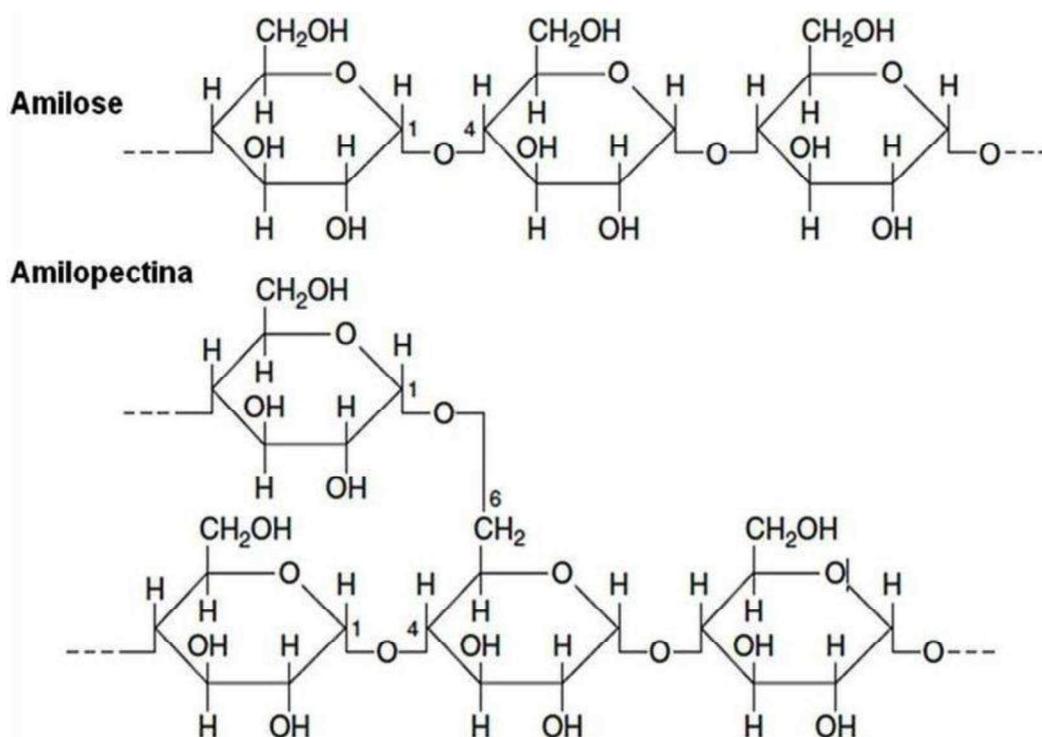


Figura 2. 5 - Estrutura química da amilopectina e da amilose

Fonte: Adaptado de Merci et al (2019)

Com relação às características do caráter semicristalino, os grânulos de amido apresentam birrefringência quando observados em microscópio óptico sob luz polarizada. A parte linear das moléculas de amilopectina forma estruturas helicoidais duplas, estabilizadas por ligações de hidrogênio entre agrupamentos hidroxila, dando origem às regiões cristalinas dos grânulos. A região amorfa é composta pelas cadeias de amilose e pelas ramificações da amilopectina (BALBINOTI et al. 2018^a, PIGŁOWSKA et al. 2020).

Lima et al. (2012), Shah et al. (2017) e Merci et al. (2019) afirmam que o espectro de infravermelho de 3400- 3465 cm^{-1} , atribuídas ao estiramento e a deformação angular das ligações -OH, 2900-3000 cm^{-1} (correspondente estiramento C-H), em 1163, 1150, 1124 e 1103 cm^{-1} , que correspondem ao estiramento C-O e C-C com alguma contribuição do estiramento C-OH. As bandas em 1077, 1067, 1047, 1022, 994 e 929 cm^{-1} são atribuídas às deformações C-OH e CH₂. O grupo C-O-C (éter) presente em um anel de seis átomos (como monômero de glucose) absorve em 1150-1085 cm^{-1} e dependendo de deformação axial (simétrica ou assimétrica) essas bandas irão se deslocar. Em 1737 cm^{-1} corresponde à vibração da carbonila.

A cristalinidade relativa (RC) pode ser determinada pelas análises de FTIR-ATR através do cálculo das áreas entre as bandas de 1047 cm^{-1} (banda correspondente a região cristalina) e as bandas em 1022 cm^{-1} (correspondente a região amorfa). Utilizando as deconvoluções dos espectros entre 950 -1100 cm^{-1}

$$RC = A_{1047}/A_{1022} \quad (2.1)$$

Shah et al. (2017) em seus resultados evidenciaram que, o cálculo da proporção de intensidade, 1047 cm^{-1} /1022 cm^{-1} , mostraram que a proporção de intensidade de amidos de aveia nativos mostrou valores mais elevados em relação às fontes de amido de aveia acetiladas. Esta redução possivelmente foi atribuída devido à substituição do grupo acetil que modificou o empacotamento entre a amilose e a amilopectina e formando regiões mais amorfas.

2.3 Processo de parboilização

O processo de parboilização é um tratamento hidrotérmico onde o arroz com casca é imerso em água aquecida, resultando no rompimento das ligações de hidrogênio entre a amilose e a amilopectina, proporcionando absorção de água de maneira uniforme e irreversível pelo

grão. Em sequência, o grão passa pelas etapas de gelatinização do amido e secagem do grão (OLI et al. 2014; EJEBE et al. 2015, BUGGENHOUT et al. 2013, CHAVAN et al. 2017).

Cada uma dessas etapas do processo de parboilização apresenta um objetivo específico que resultará em um grão com características diferenciadas, quando comparado com o arroz convencional. Após estas três etapas o arroz parboilizado pode ser comercializado na forma integral ou passar pelo polimento onde será obtido o grão parboilizado polido (DUTTA, MAHANTA, 2014, CHAVAN et al. 2017).

O processo de parboilização, tem princípio na etapa de hidratação dos grânulos de amido por imersão em água aquecida, rompendo as ligações de hidrogênio entre a amilose e a amilopectina, proporcionando absorção de água de maneira uniforme e irreversível pelo grão, conseqüentemente produzindo um arroz em casca com um teor de água em torno de 30-32%. (BUGGENHOUT et al. 2013).

O teor de água inicial é importante na etapa de hidratação do arroz parboilizado, pois interfere na integridade física dos grãos. Se estes estiverem com um teor de água inicial abaixo de 13% de base úmida haverá má distribuição da água no seu interior, dificultando a hidratação homogênea com um conseqüente aumento de grãos quebrados ao término do processo de parboilização (DUTTA, MAHANTA, 2014).

Para obtenção de uma boa hidratação, vários estudos demonstram que a temperatura ideal é aquela pouco abaixo da temperatura de gelatinização (própria de cada variedade de arroz), pois nestas condições, aumenta-se a velocidade de absorção sem que se aumente a quantidade de água absorvida. Quando a temperatura da água é superior à da gelatinização do amido, o tempo de absorção é reduzido, mas em troca o grão absorve mais água do que a necessário para umedecer sua parte interior, havendo aumento do volume do endosperma, tendendo a uma indesejável abertura da casca e cocção do arroz. O mero fato de que a casca se parta já constitui um grave inconveniente, visto que a água lava e arrasta muitas das substâncias contidas no grão (BUGGENHOUT et al. 2013; DUTTA, MAHANTA, 2014; OLI et al. 2014).

Após a hidratação, o arroz segue a etapa de gelatinização do amido que ocorre em paralelo a etapa de hidratação. Durante a gelatinização do amido, os grãos do arroz com casca são vaporizados em temperatura variando entre 100-120 °C durante 5-30 min, com teor de água em torno de 35% em base úmida. (BUGGENHOUT et al. 2013; DUTTA, MAHANTA, 2014; OLI et al. 2014). Na gelatinização, o amido passa da forma cristalina para amorfa e, como resultado desta transformação, adquire uma estrutura poliédrica ordenada e conseqüentemente, o endosperma apresenta maior força para resistir ao polimento e, assim, o grão quebra menos e

sofre menor perda nutricional. Então, quanto maior a temperatura e o tempo de vaporização, mais rígido e escuro fica o arroz (OLI et al. 2014).

Quando o amido entra em contato com a água fria, os grânulos incham ligeiramente (10 a 20%), devido à difusão e absorção de água nas regiões amorfas, mas esse processo é reversível pela secagem (BALBINOTI et al. 2018^a). Todavia, quando os grânulos são aquecidos em água, eles incham irreversivelmente, num fenômeno denominado gelatinização, em que ocorre perda da organização estrutural. À medida que os grânulos continuam se expandindo, ocorre a lixiviação da amilose da fase intergranular para a fase aquosa, resultando no aumento substancial das propriedades reológicas do sistema. O conjunto de mudanças que envolvem a ruptura da estrutura granular, o inchamento, a hidratação e a solubilização das moléculas de amido é definido como o fim da gelatinização (CHAVAN et al. 2017).

Balbinoti et al. (2018)^a e Zhu et al. (2021), explicam que quando as moléculas de amido são aquecidas em excesso de água, a estrutura cristalina é rompida e as moléculas de água formam pontes de hidrogênio entre a amilose e amilopectina, expondo seus grupos hidroxil, o que causa um aumento no inchamento e na solubilidade do grânulo. Esse poder de inchamento e solubilidade varia de acordo com a fonte do amido, fornecendo evidências da interação entre as cadeias de amido dentro dos domínios amorfos e cristalinos. A extensão destas interações é influenciada pela proporção amilose/amilopectina e pelas características dessas moléculas (distribuição e peso molecular, grau e comprimento de ramificações e conformação).

A gelatinização, geralmente, ocorre numa ampla faixa de temperatura característica para cada fonte de amido. A temperatura de gelatinização (TG) dos grãos de arroz de TG baixa: arroz cuja temperatura de gelatinização do amido ocorre entre 63 - 68 °C; TG intermediária: entre 69 - 73 °C e TG alta: entre 74 - 80 °C (OLI et al. 2014). Segundo Pagnan et al (2015), os grãos de arroz com TG baixa podem tornar-se excessivamente macios e até desintegrar-se durante o cozimento. Por outro lado, cultivares de arroz com TG alta requerem mais água e maior tempo de cozimento que aquelas com TG baixa ou intermediária, sendo geralmente rejeitadas em quase todos os mercados consumidores.

Chavan et al. (2017), Balbinoti et al. (2018)^a e Zhu et al. (2021) evidenciam que existem muitos fatores que afetam essa temperatura de gelatinização, sendo o principal deles a presença de água. Isso ocorre porque a água atua como agente plastificante nos cristais de amido, além de exercer efeito na condução de energia. Com isso, sua presença diminuirá a temperatura de transição vítrea, diminuindo, conseqüentemente, a temperatura de fusão (desorganização) dos

cristais e aumentando a suscetibilidade do amido à digestão pelas amilases do trato gastrointestinal.

Do ponto de vista nutricional, a gelatinização é importante, pois permite a fixação dos nutrientes transferidos na hidratação, como vitaminas e sais minerais solúveis em água. Quase todos os glóbulos de lipídios presentes nas células do aleurona e do gérmen são destruídos, ficando dispersos no endosperma amiláceo da cariopse. (PAIVA et al. 2016).

A gelatinização pode ser realizada de acordo com duas rotas tecnológicas: por autoclave ou por estufa cilíndrica rotativa, sendo que a primeira oferece mais vantagens do que a segunda (EJEBE et al. 2015, BALBINOTI et al. 2018^a, CHAVAN et al. 2017).

Para finalizar o processo de parboilização ocorre a secagem, quando o grão do arroz torna-se mais resistente às tensões provocadas durante o beneficiamento, aumentando, assim, o rendimento em grãos inteiros. Isto resulta num produto naturalmente mais nutritivo e com características físicas melhoradas quando comparado com o polido e o integral (DEMONT et al. 2012). Para o armazenamento seguro, o arroz tem que ser seco a um teor de água abaixo de 14% em base úmida (BUGGENHOUT et al.2013). Além disso, após o preparo para consumo, o grão apresenta características sensoriais de textura agradáveis e compatíveis com o perfil gastronômico do prato (DORS et al. 2009, Zhu et al. 2021).

2.4 Características do arroz parboilizado

Várias pesquisas evidenciaram que o processo de parboilização do arroz de diferentes cultivares provocam modificações nas características tecnológicas (físicas, físico-químicas, compostos fenólicos e antioxidantes), propriedades de cocção e análises sensoriais dos grãos de arroz, devido a ocorrência da gelatinização do amido existente no grão (DORS et al. 2009, FONSECA 2010, EJEBE et al. 2015; MIN et al. 2014, OLIVEIRA et al. 2014, AYAMDOO et al. 2014, PAIVA et al. 2016, SITTIPOD& SHI, 2016, PAL et al. 2018).

Walter et al. (2008) em seus estudos confirmam que o processo de parboilização resulta em uma redução do amido total em relação ao arroz branco polido, também a fibra total do arroz parboilizado é superior em relação ao arroz branco, devido a remoção do farelo. O arroz parboilizado resulta em grãos mais proteico em comparação com o arroz branco. Paiva et al. (2016) também evidenciou que o arroz vermelho e preto parboilizado também possuem característica de grãos mais proteicos, com teores de carboidratos totais e lipídios maiores em comparação ao arroz branco. Também em seus resultados Paiva et al. (2016) obteve grãos de

arroz parboilizado com pigmento (vermelho e preto) com teores de capacidade antioxidante fenólicos livres inferiores aos grãos de arroz vermelho e preto *in-natura* polido. Assim, em geral, Paiva et al. (2016) evidencia o impacto positivo do processo de parboilização nas propriedades nutricionais do arroz pigmentado.

Nos estudos Pal et al. (2018) observou-se que o processo de parboilizado realizado em diferentes cultivares de arroz proporcionou no aumento da atividade antioxidante e do conteúdo de ácido fenólico em relação aos cultivares *in-natura*. Também verificou-se que os grãos de arroz parboilizado de diferentes cultivares são mais protéicos e menos gordurosos em relação aos cultivares *in-natura*. O aumento da atividade antioxidante com parboilização pode ser atribuído à formação de pigmentos por reação de escurecimento não enzimática. Enquanto que o aumento do conteúdo de ácido fenólico nos grãos parboilizado ocorreu devido à presença de diferentes tipos de compostos fenólicos presentes nos cultivares avaliados.

Nos estudos de Dors et al. (2009) o conteúdo de fenóis totais no endosperma amiláceo ocorreu um aumento de 9%, no maior tempo de hidratação e menor tempo de autoclavagem. Também foi verificado com aumento de 12 % nos maiores tempos de hidratação e autoclavagem. Dors et al. (2009) afirmam a distribuição e a composição dos fotoquímicos fenólicos também são influenciadas pela variedade, procedimento e local de plantio, grau de amadurecimento, condições de estocagem e processo.

Estudos têm demonstrado maior concentração de alguns minerais em grãos de arroz parboilizado com pericarpo vermelho e preto (Paiva et al. 2016). Porém Denardin et al. (2004) constataram que, os teores de macro e microminerais em grãos de arroz integral, parboilizado e branco, influenciaram significativamente os teores da maioria dos minerais analisados, exceto o ferro, sendo os grãos integrais aqueles que apresentaram maiores teores. A parboilização, ao contrário do esperado, não aumentou o conteúdo de todos os minerais, sendo que, comparada ao arroz branco, teve menor teor de magnésio e zinco.

Zhu et al. (2021) observaram que diferentes temperaturas e os tempos de cozimento afetam os parâmetros textuométricos do arroz. Chavan et al. (2017) verificaram que os parâmetros de textura são afetados pelo processo de parboilização. Os estudos de Chavan et al. (2017) evidenciam que: os valores de firmeza dos grãos de arroz parboilizado são maiores em relação aos grãos de arroz não-parboilizado, porque o processo de parboilização proporcionam grãos de arroz mais duros e menos pegajosos, devido à gelatinização do amido que ocorre nos grãos. Os resultados de Chavan et al. (2017) também afirmam que os grãos de arroz parboilizado apresentam valores de coesividades maiores em relação ao arroz não parboilizado.

Isso ocorre devido, ao colapso estrutural que ocorre logo após a primeira compressão, assim o arroz não consegue voltar a sua estrutura após à compressão. Já com relação aos valores de adesividade, Chavan et al. (2017), observou que o processo de parboilização reduz à adesividade em relação ao arroz não – parboilizado. Os valores da elasticidade aumentam com o processo de parboilização.

Nos estudos de Zhu et al. (2021) observaram que a firmeza do arroz submetido à cocção diminuiu com o aumento na temperatura de cozimento e uma diminuição acentuada foi observada entre 70-100 °C. Isso ocorreu devido a gelatinização do amido presente no arroz cozido. O aumento do tempo de cocção de 5 minutos para 20 minutos observa-se uma redução da firmeza dos grãos de arroz, cozidos a temperatura de 100°C. Em seus resultados, Zhu et al. (2021), observou-se que o amido do arroz não gelatiniza totalmente em pouco tempo ou em temperatura baixa. Assim, o arroz submetido ao tempo de cocção de 20 -30 minutos, a firmeza do arroz cozido aumentou de 38,2N para 48,1N. Isso ocorre porque houve a absorção total e evaporação da água, que promoveu interações físicas entre cadeias moleculares do amido do arroz cozido.

Segundo Oli et al. (2014) e Oli et al. (2016) afirmam que as mudanças de coloração ocorridas nos grãos de arroz durante o processo de parboilização são ocasionadas pelas variáveis do processo de parboilização, tais como: temperatura e tempo de hidratação, tempo e temperatura de gelatinização, como também pelos métodos de secagem.

De acordo com Oli et al. (2014), as mudanças de coloração ocorridas nos grãos durante a parboilização podem ser devidas à migração de pigmentos da casca para o grão, escurecimento enzimático e ainda por escurecimento não - enzimático. Nos estudos de Fonseca et al. (2011), constaram que, como consequência do processo hidrotérmico, o arroz parboilizado, apresenta uma cor amarelo-pálida, grãos com textura rígida mesmo após o cozimento e um sabor característico, embora a extensão de tais alterações dependa da severidade do tratamento térmico aplicado.

Nos estudos de Pal et al. (2018) os valores de intensidade de vermelho (a^*), intensidade de amarelo (b^*) e a luminosidade (L^*) foram afetados pela parboilização. A diminuição nos valores de L^* ocorreu devido à transformação do arroz em grãos opacos e translúcidos devido ao processo de gelatinização. Em suma, a mudança de cor nos grãos submetidos à vaporização também pode ser atribuído à difusão de pigmentos da casca e do farelo em direção ao endosperma. A parboilização causou a degradação do amido em açúcares redutores que reagem com as proteínas.

2.5 Análises térmicas (TG e DTG), espectroscopia vibracional na região do infravermelho com transformada de fourier (FTIR-ATR) e microscopia eletrônica de varredura (MEV) em alimentos

A análise termogravimétrica (TG) e sua derivada (DTG) foi utilizada em vários trabalhos para identificar os principais eventos térmicos ocorridos nas amostras que contém amido presente, nos quais foram identificados a presença do principal evento térmico que é a modificação irreversível na estrutura amilácea destas fontes de amido. Nas pesquisas de Lima et al. (2012), Merci et al. (2019) e Pigłowska et al. (2020) foram caracterizados o amido *in-natura* e o amido modificado mediante a pirólise verificou-se a faixa de temperatura e o percentual de amostra de amido degradado mediante a eliminação do grupo polihidroxil acompanhada pela despolimerização e decomposição do amido presente.

A Espectroscopia vibracional na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR-ATR) é empregada para a identificação, determinação de grupos funcionais e em estudos de conformação e estrutura de macromoléculas. A radiação infravermelha corresponde à região situada entre as regiões do visível e das microondas.

Várias fontes de amidos foram caracterizados mediante o uso da FTIR-ATR. Lima et al. (2012) caracterizaram as farinhas de amido de milho, fécula de batata, banana verde e trigo. Bartz et al. (2012) confirmaram a acetilação do amido de arroz por espectroscopia de infravermelho com Transformada de Fourier. Colussi et al. (2015) também identificaram a acetilação do amido de arroz utilizando a FTIR-ATR.

Com a finalidade de complementar a metodologia é possível ainda aplicar a técnica MEV (Microscópio Eletrônico de Varredura). O MEV é um aparelho que pode fornecer rapidamente informações sobre a morfologia e identificação de elementos químicos de uma amostra sólida (KALE et al. 2015; PAIVA et al. 2016).

A aplicação do MEV também se destaca em estudos com arroz. Paiva et al. (2016), avaliaram o efeito dos processos de parboilização e polimento nas propriedades nutricionais e tecnológicas do arroz vermelho e preto. Os resultados de MEV detectaram que nos cultivares analisados, a parboilização favoreceu a maior migração da proteína no cultivar de arroz vermelho em relação ao cultivar de arroz preto. Angel et al. (2009) analisaram a casca de arroz. Volpe (2014) avaliaram a morfologia dos grãos de arroz das cultivares IRGA 417 e BR-IRGA 409 antes e após o processo de parboilização.

2.6 Modelagem matemática do processo de hidratação

Vários pesquisadores, a cada ano, exploram o processo de hidratação de produtos alimentícios (RESENDE e CORRÊA, 2007; OMOTTO et al. 2009; FRACASSO et al. 2014, MIANO e AUGUSTO 2018), com a finalidade de avaliar o efeito do tempo e da temperatura sobre as inúmeras características do alimento (expansão, nutrição e absorção), tomando por alicerce uma abordagem matemática.

Durante o processo de hidratação a água é absorvida continuamente pelo grão. Há um grande interesse em estudar o comportamento dinâmico do processo, a fim de estabelecer as melhores condições operacionais. Este estudo pode ser desenvolvido a partir de simulações de um modelo matemático devidamente validado frente a dados experimentais.

A cinética de absorção de água de leguminosas tem sido descrita pelo modelo empírico de Peleg (1988) ou por modelos analíticos derivados da lei de Fick da difusão (MIANO E AUGUSTO 2018). Apesar dos modelos empíricos serem de aplicação simples e descreverem adequadamente o processo de hidratação de vários grãos (RESENDE e CORRÊA, 2007; GHAFOR et al. 2014), este não é, no entanto, derivado de nenhum tipo de lei da física ou teoria de difusão (PELEG, 1988).

O processo de hidratação de grãos também descreve um fenômeno controlado pela difusão interna. A hidratação depende do tempo, da temperatura e da concentração de sólidos solúveis. A quantidade de água absorvida aumenta com o aumento da temperatura e do tempo de hidratação (RESENDE e CORRÊA, 2007; MIANO E AUGUSTO 2018).

O modelo empírico de Peleg (1988) representa bem a hidratação em produtos alimentícios. A maior vantagem deste modelo é sua simplicidade em relação aos outros modelos teóricos e empíricos. Este modelo já foi utilizado satisfatoriamente para descrever o fenômeno de hidratação em: amendoim bambara (JIDEANI&MPOTOKWANA, 2009), feijão (OLIVEIRA et al. 2013), grão-de-bico (SHAFAEI et al. 2016); arroz (CHEEVITSOPON&NOOMHORM, 2011), soja (QUICAZÁN et al. 2012; FRACASSO et al. 2014), dentre outros.

$$X_t = X_o + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (2.2)$$

em que: as constantes k_1 e k_2 do modelo proposto para modelagem do processo de hidratação de grãos foram obtidas pelo ajuste da Equação de Peleg linearizada, conforme descrito na Equação 2.3:

$$\frac{t}{X_o + X_t} = k_1 + k_2 t \quad (2.3)$$

em que: X_t : teor de água para num dado tempo, kg (kgms)⁻¹; X_o : teor de água inicial do produto, kga (kgms)⁻¹; k_1 : taxa constante de Peleg, (h kgms)kg⁻¹; k_2 : capacidade constante de Peleg, (kgms)kg⁻¹; e t : tempo, horas.

Uma das grandes vantagens do modelo de Peleg é o ganho de tempo para prever a cinética de sorção de água em alimentos, possibilitando o cálculo do teor de água de equilíbrio (PELEG, 1988). O teor de água de equilíbrio pode ser obtido pela própria Equação 2.4, quando o tempo tende ao infinito, resultando na Equação 2.4.

$$X_e = X_o + \frac{1}{k_2} \quad (2.4)$$

em que: X_e : teor de água de equilíbrio, kga (100 kgms)⁻¹.

Posteriormente às etapas de hidratação, o arroz apresenta elevado teor de água, variando de 30 a 35% em base úmida. Desta forma, antes do armazenamento e/ou beneficiamento, o arroz deve ser seco até o teor de água abaixo de 13 % em base úmida. Após seco, o arroz será descascado, polido opcionalmente e selecionado (BUGGENHOUT et al.2013; DUTTA, MAHANTA, 2014; OLI et al. 2014).

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de hidratação de produtos agrícolas. Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da hidratação de grãos e de sementes. Na maioria das vezes, as relações semiempíricas e empíricas têm sido as melhores opções para descrever o processo de hidratação apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992; CHEEVITSOPON &NOOMHORM, 2011, MIANO E AUGUSTO 2018).

Normalmente, os modelos se baseiam em variáveis externas (temperatura e teor de água) em relação ao produto, não fornecendo informações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água para o interior dos grãos, considerando-se que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (BROOKER et al., 1992, MIANO E AUGUSTO 2018).

Têm-se observado inúmeros trabalhos com o objetivo de identificar as características de diversos grãos e sementes durante a secagem como, por exemplo: sementes de crambe (FARIA et al. 2011); arroz em casca (MENEGETTI et al. 2012); feijão macassar (CAVALCANTI et al. 2012); casca da soja (TOÉ e FIORESE, 2012); café (ALVES et al. 2013); feijão guandu (SILVA et al. 2014); dentre outros produtos agrícolas.

Entre os modelos empíricos, um que vem sendo frequentemente utilizado para a representação da hidratação em produtos alimentícios, é o proposto por Peleg (1988). A maior vantagem deste modelo é sua simplicidade em relação aos outros modelos teóricos e empíricos. Este modelo já foi utilizado satisfatoriamente para descrever o fenômeno de hidratação em: amendoim bambara (JIDEANI & MPOTOKWANA, 2009), feijão (OLIVEIRA et al. 2013), grão-de-bico (SHAFAEI et al. 2016); arroz (CHEEVITSOPON & NOOMHORM, 2011), soja (QUICAZÁN et al. 2012) e FRACASSO et al. 2014) dentre outros.

A Tabela 2.1 expõe exemplos de trabalhos já realizados, nos quais os autores aplicaram modelos teóricos, empíricos e semi-teóricos para descrição da cinética de absorção de água de seus produtos alimentícios.

Tabela 2. 1 - Modelos matemáticos aplicados à cinética de hidratação de produtos alimentícios

Designação dos Modelos	Modelos	Uso	Numeração
Difusional (1960)	$RX = \frac{(X_t - X_e)}{(X_o - X_e)} = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left(-\frac{\lambda_n^2 D_{ef} t}{R_e^2}\right)$	Hidratação de arroz (BALBINOT I et al. 2018) ^b	(2.5)
Henderson & Pabis	$RX = \frac{(X_t - X_e)}{(X_o - X_e)} = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	Hidratação de arroz (BALBINOT I et al. 2018) ^c	(2.6)
Weibull	$RX = \frac{(X_t - X_e)}{(X_o - X_e)} = \exp(-t / \beta)^\alpha$	Hidratação de arroz (BALBINOT I et al. 2018) ^c	(2.7)

em que: RX é a razão de teor de água (adimensional); X_e, X_o e X_t são os teores de água de equilíbrio, inicial e final (kg/kg, em base seca) respectivamente; t é o tempo (s); n é o número de termos; R_e é o Raio equivalente; λ_n é a raízes da equação de Bessel. Def é o coeficiente efetivo (m²/s); k é a constante cinética, β é o parâmetro de escala, definido pela velocidade do processo de absorção de teor de água, α é o parâmetro de forma que representa o índice de comportamento (absorção); a é o coeficiente empírico.

2.7 Modelagem matemática do processo de secagem

Diversos modelos matemáticos têm sido utilizados para descrever o processo de secagem de produtos agrícolas. Embora várias teorias tenham sido propostas para prever o comportamento da secagem de grãos e de sementes, na maioria das vezes, as relações semi-empíricas e empíricas têm sido as melhores opções para descrever o processo de secagem apesar de sua validade estar restrita às condições sob as quais os dados experimentais foram obtidos (BROOKER et al., 1992 e MIANO E AUGUSTO 2018).

Comumente, os modelos se baseiam em variáveis externas em relação ao produto, como temperatura e umidade relativa do ar de secagem, não fornecendo, entretanto, indicações sobre os fenômenos de transporte de energia e de água do interior dos grãos, considerando-se, ainda, que todo o processo de secagem ocorre somente no período de taxa decrescente (BROOKER et al., 1992).

A Tabela 2.2 representam os modelos matemáticos mais utilizados para representação da secagem de produtos agrícolas cujas expressões estão apresentadas na Tabela 2.2.

Têm-se observado inúmeros trabalhos com o objetivo de identificar as características de diversos grãos e sementes durante a secagem como, por exemplo: sementes de crambe (FARIA et al. 2012); arroz em casca (MENEGETTI et al. 2012); feijão macassar (CAVALCANTI MATA et al. 2012); arroz vermelho em casca (SOUSA et al. 2016); café (ALVES et al. 2013); feijão guandu (SILVA et al. 2014); arroz vermelho (SANTOS et al. 2020) dentre outros produtos agrícolas.

Tabela 2. 2 - Modelos matemáticos utilizados para prever o fenômeno de secagem de produtos agrícolas

Autores dos Modelos	Modelos Matemáticos	Numeração dos modelos
Difusional	Teórica	
Cilindro Reto Difusional	$RX = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left(-\frac{\lambda_n^2}{R_e^2} D_{ef} t\right)$	(2.8)
	Semiempírica/ Semi-Teórica	
Cavalcanti Mata et al. (2006)	$RX = a_1 \cdot \exp(-(k \cdot t)^{n_1}) + a_2 \cdot \exp(-(k \cdot t)^{n_2}) + a_3$	(2.9)
Cavalcanti Mata modificado	$RX = a_1 \exp\left(\frac{-\lambda_1^2}{R_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t^{n_1}\right) + a_2 \exp\left(\frac{-\lambda_2^2}{R_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t^{n_2}\right) + a_3$ Onde, $a_1 + a_2 + a_3 = 1$, para $t=0$	(2.10)
Henderson & Pabis (1961)	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t)$	(2.11)
Page (1949)	$RX = \exp(-k \cdot t^n)$	(2.12)
Page modificado por Cavalcanti (2016)	$RX = \exp\left(\frac{-\lambda_1^2}{R_e^2}\right) \cdot D_{ef} \cdot t^n$	(2.13)
	Empírica	
Henderson (1974)	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t) + b \cdot \exp(-k_1 \cdot t)$	(2.14)
Midilli et al. (2002)	$RX = a \cdot \exp(-k \cdot t^n) + b \cdot t$	(2.15)

em que: RX é a razão de teor de água (adimensional); X_e , X_o e X_i são os teores de água de equilíbrio, inicial e final (kg/kg, em base seca) respectivamente; t é o tempo (s); R_e é o raio equivalente (m); n é o número de termos; λ_n é a raízes da equação de Bessel; D_{ef} é o coeficiente efetivo (m^2/s); k e k_1 são as constantes de hidratação/secagem – a mesma não apresenta unidade (adimensional); a , a_1 , a_2 , a_3 , b , n , n_1 , n_2 são os coeficientes dos modelos.

2.8 Modelos matemáticos para a determinação da difusividade efetiva (Def)

2.8.1 Modelo de Fick

A secagem de grãos é um processo simultâneo de transferência de calor e massa que ocorre entre o produto e o ar de secagem, onde o calor é transferido para o produto e a água é transportada, conseqüentemente, por convecção. A água pode se movimentar no interior do grão, por diferentes mecanismos, vai depender do material que se está secando. Em produtos capilares porosos, como a maioria dos produtos de origem agrícola, os possíveis mecanismos

de transporte de água são: difusão líquida, difusão capilar, difusão na superfície, fluxo hidrodinâmico, difusão de vapor e difusão térmica (BROOKER et al., 1992).

A difusão de água pode ser avaliada por meio do coeficiente de difusão, assim pode-se dizer, que este descreve a velocidade de saída de água do grão. Mendonça et al. (2019) ressalta que, como a difusividade varia conforme mudam as condições de secagem, ela não é intrínseca ao material, e assim, convencionou-se chamá-la de difusividade efetiva. Para o cálculo teórico do coeficiente de difusão de diversos produtos agrícolas, vários pesquisadores têm se baseado na teoria da difusão líquida, conhecida como segunda lei de Fick, que estabelece uma relação do coeficiente de difusão com o gradiente de concentração de um meio.

Sousa et al. (2016), constatou que o cálculo da difusividade efetiva mediante o modelo de Fick com seis termos da série, a partir do quarto termo da série não existe uma variação acentuada dos valores da difusividade efetiva, pois essas diferenças entre os valores de difusividade estimado com um termo e quatro termos são mínimas e estão na ordem da segunda e terceira casa decimal, tendo o coeficiente de determinação (R^2) para cada temperatura e teor de água analisado, valores que variaram entre 96 a 99%.

Nos seus estudos Sousa et al. (2016) também constatou que, a difusividade efetiva do arroz vermelho em casca, com diferentes teores de água iniciais foram bem avaliadas mediante os modelos de Page modificado e Cavalcanti Mata modificado representados na Tabela 2.2. Seus resultados experimentais evidenciaram que as equações propostas conseguiram obter coeficientes de determinação superiores a 99%.

Inúmeros trabalhos de pesquisa citado por Behera & Sutar (2018) constaram que o modelo teórico de Fick é o mais comumente empregado para se determinar a difusividade efetiva com bons ajustes dos dados experimentais ao modelo, mediante a análise dos coeficientes de determinação.

Visando a busca por novos modelos semi-teóricos descreve-se a seguir quatros modelos matemáticos derivados da equação de Fick, estabelecendo-se para cada um desses modelos uma nova abordagem que permitem a determinação dos respectivos coeficientes de difusividade efetiva.

A teoria da difusão é fundamentada na segunda lei de Fick que expressa a difusão da água em um sólido por meio de um gradiente de concentração (Cavalcanti-Mata et al., 2006). Essa conceituação pode ser expressa pela equação 2.16.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \nabla(D_{ef} \nabla X) \quad (2.16)$$

em que,

$\nabla f(x_1, \dots, x_n)$ - nábula é vetor das derivadas parciais

D_{ef} - coeficiente de difusão, m^2s^{-1} ;

t - tempo de secagem, s.

Crank (1975) propôs, para a equação de Fick, soluções para as diferentes condições iniciais e condições limites, para materiais com diferentes formas geométricas. A equação 2.16 expressa a equação para coordenadas cilíndricas.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = \frac{1}{r} \left\{ \frac{\partial}{\partial r} \left(r D_{ef} \frac{\partial X}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial \theta} \left(\frac{D_{ef}}{r} \frac{\partial X}{\partial \theta} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(r D_{ef} \frac{\partial X}{\partial z} \right) \right\} \quad (2.17)$$

em que, r é a coordenada radial, θ é a coordenada polar e “z” é a coordenada axial

A solução analítica dada por Crank (1975) para a segunda Lei de Fick, considerando a forma geométrica teórica de um cilindro infinito, desconsiderando a expansão volumétrica dos grãos e considerando a condição de contorno de equilíbrio de umidade conhecida na superfície do grão é expressa pela equação 2.17 (BROOKER et al. 1992).

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp \left[-\frac{\lambda_n^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{r_e^2} \right] \quad (2.18)$$

em que: RX é a razão de teor de água, adimensional; λ_n é a raiz da função de Bessel de ordem zero; D_{ef} é a coeficiente efetivo de difusão, m^2/s ; e r_e é o raio equivalente, m; t é o tempo, s.

O coeficiente efetivo de difusão pode ser obtido por meio de regressão não linear da Equação 2.18, com aproximação de seis termos.

A Tabela 2.3 contém as seis primeiras raízes da função de Bessel.

Tabela 2. 3 - Raízes da função de Bessel de primeiro tipo e de ordem zero: seis primeiros termos

N	1	2	3	4	5	6
λ_n	2,4048	5,5201	8,6537	11,7915	14,9309	18,0711

Desta forma, um número finito de termos (n) pode ser utilizado para uma precisão especificada. O raio equivalente de um grão pode ser definido como o raio da esfera com mesmo volume. Para se determinar o volume médio dos grãos de arroz, pode-se considerar o arroz como sendo um cilindro reto. Para cálculo do seu volume, toma-se uma amostra de grãos. O raio equivalente é obtido pela equação 2.20:

$$V = \pi \cdot r'^2 \cdot L \quad (2.19)$$

em que r' é o raio do cilindro reto, L é o comprimento do grão e V é o volume do cilindro, Figura 2.6.

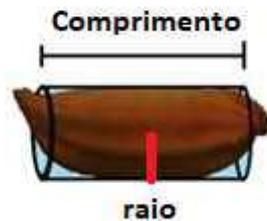


Figura 2.6- Raio do arroz vermelho de volume como se ele fosse um cilindro

O raio equivalente (r_e) é calculado segundo a Equação 2.19 considerando o volume do cilindro reto do arroz vermelho.

$$r_e = \sqrt{\left(\frac{V}{\pi \cdot L}\right)} \quad (2.20)$$

2.8.2 Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata

Ao se considerar apenas o primeiro termo da série a equação de Fick para coordenada cilíndrica, esta equação seria simplificada para a Equação 2.20

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \sum_{i=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left[-\frac{\lambda_n^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{r_e^2}\right] \quad (2.21)$$

Henderson & Pabis simplificaram essa equação para a Equação 2.20. Ou seja, atribuíram um valor “A” a ser identificado pela regressão e o termo de resistência interna a saída de água é substituído por uma constante de secagem.

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = A \exp[-k t] \quad (2.22)$$

Cavalcanti Mata (2018), considerando que: para um exemplo real de secagem para $t = 0$, $RX = 1$, e neste caso usando-se o valor para $t = 0$; $RX = 4 / \lambda_n^2$, ou seja 0,6917. Este valor, portanto, está distante da realidade dos fatos reais de secagem. Assim, o autor considera que esta condição poderia ser satisfeita substituindo o termo inicial, por um coeficiente A, a ser determinado pela regressão não linear, onde este valor estaria próximo de 1,0. Assim, a equação é similar a proposta por Henderson & Pabis, modificada pelo autor (Cavalcanti Mata, 2018), com a possibilidade de se obter a difusividade efetiva do produto no fenômeno de secagem. Desta forma, descreve-se essa nova equação como a Equação 2.23.

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = A \exp \left[- \frac{\lambda_n^2 \cdot D_{ef} \cdot t}{r_e^2} \right] \quad (2.23)$$

onde

$$K = \left(\frac{\lambda_n^2 D_{ef}}{r_e^2} \right) \quad (2.24)$$

2.8.3 Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata

Seguindo-se um raciocínio similar pode-se sugerir modificações na equação proposta por Page considerando-se $A=1$ e mantendo-se a correção de caráter temporal potencial N, podendo-se chegar a uma equação similar à de Page que pode ser escrita como a equação de Page modificada por Cavalcanti Mata, sendo dada pela Equação 2.25.

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \exp \left[- \frac{\lambda_1^2 \cdot D_{ef}}{r_e^2} t^N \right] \quad (2.25)$$

2.8.4 Modelo I de Cavalcanti Mata

Outras equações foram propostas por Cavalcanti-Mata (2018), utilizando 2 termos da série de Fick com algumas considerações. No modelo I de Cavalcanti Mata o primeiro termo da série do Modelo de Fick é mantido, fazendo-se no entanto a correção de ordem temporal. O segundo termo da série é substituído por um termo de ajuste as condições de contorno ($t = 0$; $RX = 1$). No segundo termo mantém-se também um coeficiente de ajuste de ordem temporal. Este Modelo pode ser escrito pela Equação 2.26.

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = \frac{4}{\lambda_1^2} \exp\left[-\frac{\lambda_1^2 \cdot D_{ef}}{r_e^2} t^{N_1}\right] + A \exp\left[-\frac{\lambda_2^2 \cdot D_{ef}}{r_e^2} t^{N_2}\right] \quad (2.26)$$

2.8.5 Modelo II de Cavalcanti Mata

No modelo II de Cavalcanti Mata, tanto o primeiro termo da série como o segundo termo da série são alterados e substituídos pelos coeficientes A_1 e A_2 para serem obtidos pela análise de regressão não linear e também considerou-se a existência da correção temporal de ordem potencial, em ambos os termos. A equação derivada de Fick com 2 termos da série modificada é dada pela Equação 2.27.

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} = A_1 \exp\left[-\frac{\lambda_1^2 \cdot D_{ef}}{r_e^2} t^{N_1}\right] + A_2 \exp\left[-\frac{\lambda_2^2 \cdot D_{ef}}{r_e^2} t^{N_2}\right] \quad (2.27)$$

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O arroz vermelho parboilizado foi obtido seguindo as etapas representadas no Fluxograma da Figura 3.1.

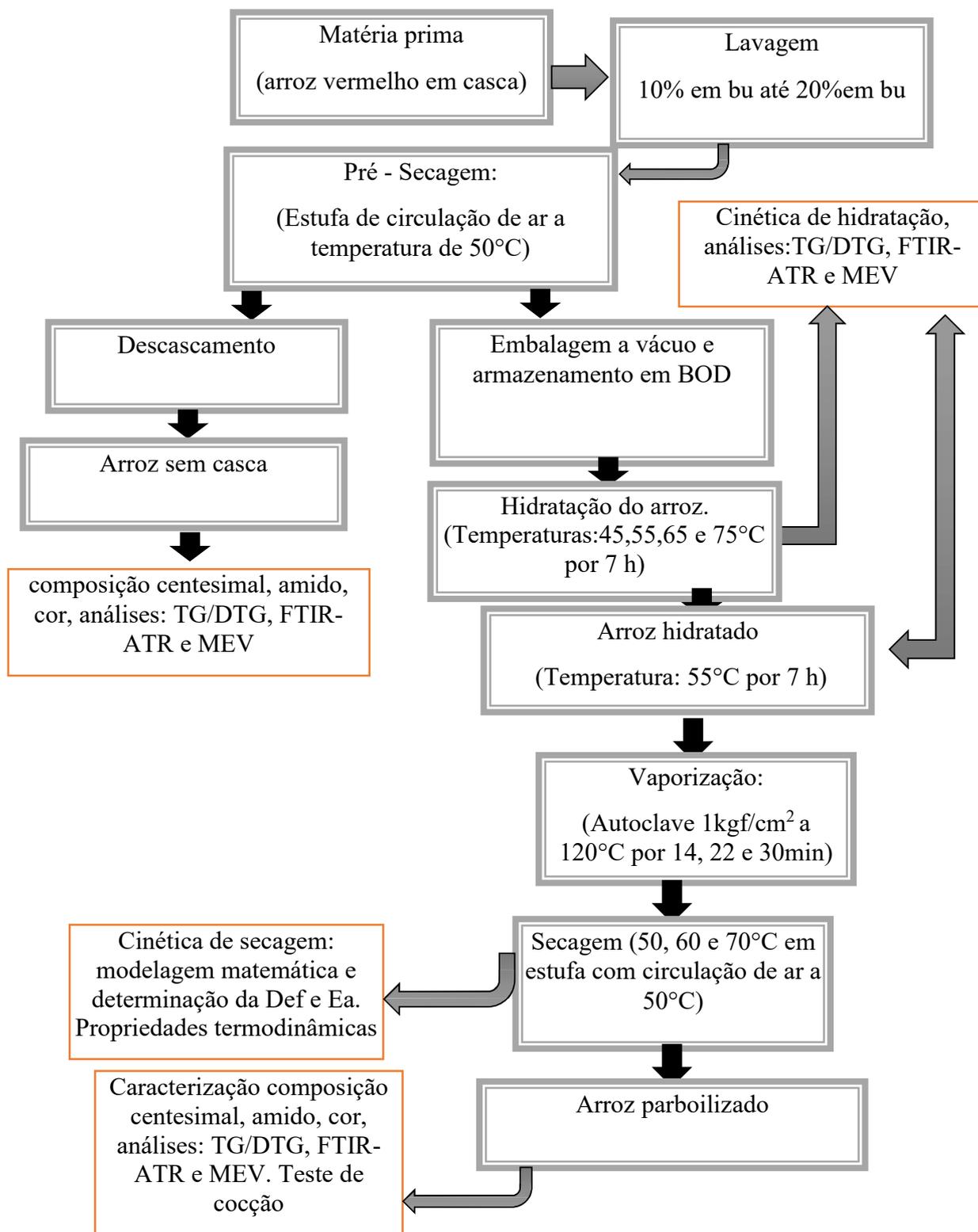


Figura 3. 1 - Fluxograma para a obtenção do arroz vermelho parboilizado

Esta pesquisa foi realizada nos Laboratórios de Fisiologia Vegetal e Fitopatologia, ambos pertencentes à Unidade Acadêmica de Agronomia da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campus de Pombal. Como também nos Laboratórios da Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), campus de Campina Grande.

As análises de termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG) foram realizadas no Laboratório de Nanotecnologia, do Centro de Tecnologias Estratégicas do Nordeste – Cetene. As análises de Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR-ATR), no Laboratório de Materiais Multifuncionais e Experimentação Numérica – ECT, UFRN. As análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) foram realizadas no Laboratório da Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Campina Grande e no Laboratório da Engenharia de Materiais da Universidade Federal do Rio Grande do Norte, UFRN. As análises de composição centesimal e conteúdo de amido foram realizadas no Núcleo de Processamento de Alimentos (NUPPA) da Universidade Federal da Paraíba, UFPB. As análises de cor e teste de cocção foram realizadas no Laboratório da Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Campina Grande, campus de Pombal e campus de Campina Grande.

3.1 Matéria prima

Para os ensaios, foi utilizado o arroz vermelho em casca, da variedade vermelho tradicional, safra 2014-2016, produzidos no Sertão da Estado da Paraíba. O campo amostral compreendeu um lote de 10 kg, oriundos do município de Santana dos Garrotes, do Estado da Paraíba, Brasil.

Inicialmente, foi feito pré-beneficiamento manual do material a fim de eliminar grãos defeituosos, cascas e materiais estranhos. Em seguida, as amostras foram armazenadas na ausência de luz, em temperatura ambiente, nas quantidades necessárias para cada experimento.

O teor de água inicial foi determinado pelo método padrão de estufa a $105 \pm 1^\circ \text{C}$, por um período de 24 h, utilizando cinco subamostras de 10 g de grãos de arroz vermelho, conforme descrito pelas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009). As pesagens das amostras foram realizadas por meio de uma balança analítica (Bel Engineering®) com precisão de 0,0001 g. A porcentagem de teor de água foi calculada em base úmida aplicando-se a Equação 3.1, tendo como resultado final expresso pela média aritmética das subamostras.

$$\text{Teor de água} = \frac{(m_i - m_f)}{(m_f - t')} \times 100 \quad (3.1)$$

em que:

m_i - massa inicial, massa do cadinho mais a massa dos grãos úmidos, g;

m_f - massa final, massa do cadinho mais a massa da semente seca, g;

t' - tara, massa do cadinho vazio, g.

3.2 Caracterização do arroz vermelho *in natura*, arroz vermelho hidratado e do arroz vermelho parboilizado

As amostras de arroz *in-natura* (amostra e) foram caracterizadas quanto às análises de cor, composição centesimal e conteúdo de amido, seguindo as metodologias de POLESI et al., (2014) e IAL (2008), respectivamente. Estas mesmas análises e metodologias foram realizadas e aplicadas para o arroz vermelho parboilizado autoclavado por 14, 22 e 30 minutos submetido ao processo de secagem à 50°C.

O arroz vermelho *in-natura* (amostra e), arroz submetido a pré-secagem ou arroz pré-seco (amostra f), arroz hidratado à 45°C (amostra g), arroz hidratado à 55°C (amostra h), arroz hidratado à 65°C (amostra i), arroz hidratado à 75°C (amostra j) foram caracterizados quanto ao comportamento térmico, composição química e morfologia. Empregaram-se as seguintes técnicas: termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG), Espectroscopia de Absorção na Região do Infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR-ATR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV). Também foi avaliado o comportamento térmico (TG/DTG), composição química (FTIR-ATR e morfologia (MEV) do arroz vermelho parboilizado durante 14, 22 e 30 minutos e submetido ao processo de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Cor

A avaliação de cor foi realizada nos grãos de arroz utilizando-se um colorímetro, segundo o sistema proposto pela Comissão Internationale de L'Eclairaige (CIE). Os resultados foram expressos na escala CIELab, onde a componente axial L^* é conhecida como luminosidade e se estende de 0 (preto) a 100 (branco), o croma (C), que varia na direção radial e representa a pureza de uma cor em relação ao cinza e o ângulo de tom ou “Hue” ($0^\circ \leq h^* \leq 360^\circ$), que varia na direção angular e representa as diferentes cores existentes (POLESI et al., 2014).

Composição centesimal

A composição centesimal é constituída pela determinação do teor de água, proteínas, lipídeos totais, carboidratos totais, valor calórico e cinzas.

Teor de água

O teor de água foi determinado de acordo foi determinado pelo método padrão de estufa a $105 \pm 1^\circ \text{C}$, por um período de 24 h, conforme descrito pelas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Proteína

A proteína bruta (PB) foi determinada através do método de Kjeldahl ($\text{N} \times 5,95$) de acordo com as técnicas descritas pela AOAC (2016).

Lipídios totais

Os lipídios totais foram determinados pelo método de extração Soxhlet, segundo IAL (2016).

Cinzas

O teor de cinzas foi determinado por incineração em mufla aquecida a 550°C , de acordo com a metodologia do IAL (2016).

Carboidratos totais

Os carboidratos foram calculados por diferença de 100 menos a soma das porcentagens dos teores de água, lipídeos, proteínas e cinzas.

Valor calórico

O valor calórico foi calculado multiplicando-se os teores de carboidratos e proteínas da amostra pelo fator de conversão 4 Kcal/g e teor de lipídeos pelo fator de conversão 9 K cal/g (ANVISA, 2005).

Amido

O amido foi determinado com ácido clorídrico diluído e aquecido e feita sua extração com etanol a 40%, segundo a metodologia da IAL (2016).

Os dados das análises de composição centesimal, cor e conteúdo de amido do arroz vermelho *in-natura* e das amostras do arroz vermelho parboilizado foram avaliados estatisticamente através de um delineamento inteiramente casualizado, por meio de análise de variância e teste de Tukey a 5% de probabilidade, utilizando-se o programa estatístico R Core Team (2019).

Análises de Termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG), Espectroscopia de Absorção na região do infravermelho com Transformada de Fourier (FTIR-ATR) e Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A preparação do arroz vermelho *in-natura* e o arroz vermelho hidratado com a finalidade verificar a sua estabilidade térmica (TG e DTG) e identificação dos grupos funcionais (FTIR-ATR) foi submetida à secagem em estufa com circulação, marca Marqlabor, à temperatura de 50°C por 24 horas, até atingir o teor de água de 10 em base úmida; em seguida foram guardados em tubos enpendof e submetidos às análises. Estas mesmas preparações descritas foram realizadas para o arroz vermelho parboilizado vaporizado durante 14, 22 e 30 minutos e submetido ao processo de secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Análises termogravimétricas por TG/DTG

A estabilidade térmica de decomposição do arroz *in-natura*, arroz pré-seco e o arroz hidratado e os eventos térmicos foram avaliados através da técnica de Termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG).

As análises termogravimétricas por TG e sua DTG foram realizadas em analisador termogravimétrico simultâneo TG/DTG, modelo Netzsch STA 449F3 - Jupiter. Com aproximadamente 15 mg da amostra de arroz em atmosfera de N₂, fluxo de 20 mL/min e em porta amostra de Al₂O₃, com intervalo de 40 °C até 600°C, com taxa de aquecimento de 10°C/min. Já as análises termogravimétricas por TG e sua derivada (DTG) foram realizadas com 20mg do arroz vermelho parboilizado autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e submetido a secagem nas temperaturas de 50 a 70°C. No arroz vermelho parboilizado às análises de TG/DTG também foram analisados no mesmo equipamento e nas mesmas condições do arroz vermelho *in-natura*.

Análises de espectroscopia de absorção na região do infravermelho (FTIR-ATR)

A técnica FTIR-ATR foi utilizada na caracterização da estrutura química dos materiais, para comparação do arroz *in-natura*, arroz pré-seco e arroz hidratado. Como também foi analisado a FTIR-ATR para as amostras do arroz vermelho parboilizado autoclavado durante 14, 22 e 30 minutos e submetido ao processo de secagem nas temperaturas de 50°C até 70°C.

O método de Espectroscopia no Infravermelho por Transformada de Fourier foi utilizado para investigar a composição química das amostras.

As amostras do arroz avaliadas foram submetidas à análise em espectrofotômetro Bruker na região do infravermelho, modelo FTIR-ATR VERTEX 70 no modo de Transmitância, com acúmulo de 16 varreduras e resolução de 4 cm⁻¹, numa faixa de 400-4000 cm⁻¹.

Análise de microscopia eletrônica de varredura

As imagens dos grãos de arroz vermelho do arroz *in-natura*, arroz pré-seco e arroz hidratado foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura, com aumentos de 200 x, realizadas em microscópio eletrônico de varredura, Modelo: Hitachi Table top Microscope TM-3000, Accelerating voltage: 5kV, 15kV Hitachi. Um grão de cada amostra em casca foi colocado sobre fita adesiva de carbono. As amostras assim foram observadas em microscópio.

As imagens dos grãos de arroz vermelho parboilizado sem casca com tempo de permanência em autoclave 14, 22 e 30 minutos e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C também foram obtidas por microscopia eletrônica de varredura, com aumentos de 1kx, realizadas em microscópio eletrônico de varredura, modelo Tescan Vega 3, operado a 10kV, com aumentos de 1000 x.

De maneira semelhante ao grão do arroz *in-natura*, um grão de cada amostra do arroz parboilizado sem casca foram colocados sobre fita adesiva de carbono. As amostras foram observadas em microscópio.

3.3 Lavagem e Pré-Secagem

Uma massa de 1kg de arroz vermelho foi submetido a lavagem para eliminação das sujidades. Os grãos com 20% de teor de água em base úmida foram submetidos à secagem em estufa, marca Marqlabor, com circulação de ar à temperatura de 50°C até atingir o teor de água de 13% em base úmida. Posteriormente, a massa de 1kg foi embalada à vácuo, na seladora de marca Selovac® e armazenada em B.O.D à temperatura de 8°C.

3.4 Hidratação: Cinética de absorção de água

A metodologia seguida nessa etapa foi desenvolvida tomando-se como base os estudos do processo de hidratação de vários autores (BOTELHO et al., 2010; MENEZES et al., 2011; AYAMDOO et al., 2014; SHAF AEI et al. 2016).

No processo de hidratação, foram utilizadas amostras de 200 g de arroz vermelho, que foram hidratadas com água destilada em um becker, numa relação de dois volumes de água para um de grãos, ou seja, para os 200 gramas de arroz vermelho, foram utilizados 400 g de água, às temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C, em banho-maria, (banho termostático Marca Quimis[®]), por um período de sete horas, com três repetições por temperatura.

Durante o período de hidratação, as amostras foram periodicamente pesadas em uma balança digital com precisão 0,001 g (Marca Bel Engineering[®]). Para tal, as amostras foram retiradas da imersão e deixadas por três minutos em exposição ao ar ambiente, para que a água superficial fosse evaporada. Então foram pesadas e, posteriormente, retornavam à imersão. O teor de água para um dado instante depois do início do experimento foi calculado com base no aumento de massa das amostras em relação à massa inicial.

3.5 Modelagem matemática da cinética de hidratação

Durante a hidratação de grãos, usualmente, a absorção de água ocorre de forma muito rápida no início seguido por uma absorção mais lenta nos tempos posteriores. A absorção de água ocorre devido ao gradiente de concentração entre a água do grão e da solução, que promovem a força motriz para a entrada de água, porém a taxa de absorção depende principalmente da permeabilidade do grão (JIDEANI, MPOTOKWANA 2009; OLIVEIRA et al. 2013; FRACASSO et al. 2014; MIANO et al. 2015; SHAF AEI et al. 2016, CORRÊA et al. 2016).

Os dados experimentais da hidratação de grãos de arroz em casca foram ajustados ao modelo de Peleg. A cinética de absorção de água durante as sete horas de hidratação nas temperaturas de 45°C, 55°C, 65°C e 75°C foi analisada pelo Modelo de Peleg, representado pela Equação (2.2). O teor de água de equilíbrio foi obtido pela Equação (2.4). As constantes deste modelo X_0 , k_1 e k_2 foram obtidas pelo software Estatística[®], com 1000 interações, com critério de convergência de 1×10^{-6} por meio de uma regressão não linear, utilizando o método de Gauss Newton.

Em seguida, a razão de absorção de água foi obtida pela seguinte equação:

$$RX' = \frac{X(t) - X_i(t)}{X_e(t) - X_i(t)} \quad (3.2)$$

em que: RX' é a razão de teor de água (adimensional); $X_e(t)$ é o teor de água até atingir às 7 horas de hidratação (base seca); $X_i(t)$ é o teor de água inicial (base seca).

Com os dados experimentais de RX' em função do tempo de hidratação foram utilizados para avaliar a cinética de absorção do arroz vermelho em casca mediante o Modelo de Cavalcanti Mata e Duarte (2018) e o Modelo de Duarte e Cavalcanti (2018), representados pelas Equações (3.3) e (3.4) a seguir:

Modelo de Cavalcanti e Duarte (2018):

$$RX' = 1 - a \cdot \exp[-b \cdot t^c] \quad (3.3)$$

Modelo de Duarte e Cavalcanti (2018):

$$RX' = 1 - \exp[-a \cdot t^b] \quad (3.4)$$

Os parâmetros a, b e c são constantes dos modelos, determinados mediante a análise de regressão não linear dos modelos com os dados experimentais, utilizando o programa computacional STATISTICA[®].

A modelagem matemática dos modelos da cinética de hidratação, ou seja, o modelo de Peleg (1988), o modelo de Cavalcanti e Duarte (2018) e o modelo de Duarte e Cavalcanti (2018) foram avaliados os seus parâmetros mediante os coeficientes de determinação (R^2), o desvio quadrático médio (DQM), a estimativa do desvio (SE) e o erro médio relativo (P). Sendo calculados pelas equações 3.11 a 3.13.

3.6 Vaporização

O arroz vermelho hidratado por 7 horas à temperatura de 55°C foi selecionado, porque durante a etapa de hidratação, o teor de água observado pelas curvas de absorção estava na faixa 28-30 % em base úmida, condição favorável para a completa gelatinização do amido do arroz vermelho (BOTELHO et al. (2010) e BALBINOTI et al. (2018)^{a,b}).

A etapa de vaporização iniciou-se logo após a hidratação. O arroz vermelho hidratado por 7 horas à 55°C foi colocado em uma peneira de nylon para eliminação da água. Posteriormente, o arroz hidratado foi submetido ao processo de vaporização, em autoclave vertical, de marca Primatec[®], a pressão de 1kgf/cm² e a temperatura de 120°C.

As condições avaliadas durante o processo de vaporização do arroz vermelho hidratado foram os seguintes tempos de permanência em autoclave: 14 minutos, 22 minutos e 30 minutos.

Após o processo de vaporização, o arroz parboilizado, permaneceu no dessecador por um período de 24 horas, para que ocorresse o esfriamento de seus grãos. Em seguida, os grãos do arroz parboilizado foram submetidos à etapa de secagem em estufa com circulação de ar, marca Marqlabor, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Antes do arroz vermelho parboilizado ser submetido à etapa de secagem foi determinado o seu teor de água final. Foi utilizado a metodologia de análise de teor de água descritas pelas Regras para Análise de Sementes (BRASIL, 2009).

Em suma, o arroz vermelho parboilizado foi submetido à etapa de secagem em estufa com circulação de ar nas temperaturas de 50 a 70°C. Os experimentos de autoclavagem e secagem foram repetidos 3 vezes para cada condição de tempo de permanência (14, 22 e 30 minutos) e temperatura de secagem (50, 60 e 70°C).

3.7 Cinética de secagem do arroz parboilizado

As curvas da cinética de secagem foram obtidas mediante a secagem em estufa com circulação de ar, marca Marqlabor, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C. As amostras de 50 gramas de arroz vermelho parboilizado em casca foram levadas à estufa em bandejas circulares e a redução do teor de água foi acompanhada por uma balança semianalítica com precisão de 0,01g, marca Bel Engineering[®], até a amostra atingir massa constante, alcançando o teor de água de equilíbrio.

As curvas de secagem foram obtidas pela conversão dos dados referentes à perda de água no parâmetro adimensional da razão de teor de água (RX). Para determinação da razão de teor de água dos grãos de arroz para as diferentes condições de secagem, foi utilizada a Equação 3.5:

$$RX = \frac{X_t - X_e}{X_o - X_e} \quad (3.5)$$

em que: RX é a razão de teor de água (adimensional); X_e é o teor de água de equilíbrio (base seca); X_o é o teor de água (base seca); X_o inicial é o teor de água inicial (base seca).

Os dados experimentais do processo de secagem foram ajustados ao modelo matemático de Midilli et al. (2002) frequentemente utilizado para representação da secagem de produtos agrícolas.

Para o ajuste do modelo matemáticos aos dados experimentais, foi realizado uma análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, empregando-se o programa computacional STATISTICA[®]. Estimaram-se os valores dos parâmetros do Modelo de Midilli et al. (2002), constante cinética (k) e as constantes (a), (n) e (b) em função da variável de temperatura do ar de secagem e do tempo de permanência em autoclave.

No critério de seleção para analisar o modelo de Midilli et. al. (2002) foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2), o desvio quadrático médio (DQM), a estimativa do desvio (SE) e o erro médio relativo (P), sendo calculados pelas Equações (3.11 a 3.13), respectivamente.

3.8 Determinação da difusividade efetiva (Def)

A difusividade efetiva foi avaliada pelos seguintes modelos: Modelo de Fick com seis termos da série, Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata, modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata, modelo I de Cavalcanti Mata e Modelo II de Cavalcanti Mata, descritos pelas Equações (2.18) até (2.27), respectivamente.

O cálculo do raio equivalente do arroz vermelho hidratado por sete horas foi realizado com uma amostra de cem grãos, na qual foram realizadas medidas no comprimento, diâmetros (diâmetro maior e diâmetro menor), com a ajuda de um paquímetro digital com precisão de 0,01 mm. O diâmetro do cilindro foi considerado a média das medidas do diâmetro maior e do diâmetro menor. O raio equivalente foi obtido pela equação (2.20).

A difusividade efetiva foi obtida por meio de uma regressão não linear das Equação (2.18) como também das Equações (2.23) até (2.27), utilizando o programa computacional STATISTICA. Com os dados da razão da cinética de secagem (RX) do arroz vermelho parboilizado autoclavado.

Como critério de seleção para analisar os modelos de descrição da difusividade foi utilizado o coeficiente de determinação (R^2), o desvio quadrático médio (DQM), a estimativa do desvio (SE) e o erro médio relativo (P), sendo calculados pelas Equações (3.11 a 3.13), respectivamente.

3.9 Determinação da energia de ativação (Ea)

A energia de ativação foi determinada utilizando-se equação do tipo Arrhenius onde a difusividade efetiva tem uma interdependência da temperatura, Equação 3.6:

$$Def = D_o \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{R \cdot T}\right) \quad (3.6)$$

em que:

Def- coeficiente efetivo de difusão, m²/s

Do - constante chamada de fator pré-exponencial, m² s⁻¹;

Ea - energia de ativação, J mol⁻¹;

R- constante universal dos gases, 8,314 J mol⁻¹ K⁻¹;

T - temperatura absoluta, K.

Essa equação de Arrhenius pode ser linearizada e pode ser descrita como a Equação 3.7

$$\ln(D_{ef}) = \ln(D_o) + \left(-\frac{E_a}{R}\right) \frac{1}{T} \quad (3.7)$$

3.10 Determinação das propriedades termodinâmicas

A obtenção do valor da energia de ativação possibilitou determinar diferentes parâmetros termodinâmicos para a hidratação dos grãos de arroz vermelho, como a entalpia, entropia e a energia livre de Gibbs de ativação, de acordo com as equações 3.8, 3.9 e 3.10 (BALBINOTI et al. 2018^{a,b}).

$$\Delta H = E_a - R \cdot T \quad (3.8)$$

$$\Delta S = R \cdot \left(\ln D_o - \ln \frac{k_B}{h_p} - \ln T \right) \quad (3.9)$$

$$\Delta G = \Delta H - T \cdot \Delta S \quad (3.10)$$

em que:

ΔH - entalpia, J mol⁻¹;

ΔS - entropia, J mol⁻¹;

ΔG - energia livre de Gibbs, J mol⁻¹;

k_B - constante de Boltzmann, $1,38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$;

h_p - constante de Planck, $6,626 \times 10^{-34} \text{ J/ s}$.

3.11 Análise estatística da etapa de hidratação e da secagem do arroz parboilizado

Como critério para análise da modelagem matemática da etapa de hidratação e secagem do arroz vermelho foram utilizados o coeficiente de determinação (R^2), o desvio quadrático médio (DQM), a estimativa do desvio (SE) e o erro médio relativo (P), sendo calculados pelas Equações (3.11 a 3.13), respectivamente.

$$DQM = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RX_{exp_i} - RX_{pre_i})^2}{N}} \quad (3.11)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (RX_{exp_i} - RX_{pre_i})^2}{N-Z}} \quad (3.12)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{|RX_{exp_i} - RX_{pre_i}|}{RX_{exp_i}} \right) \quad (3.13)$$

em que,

R^2 - coeficiente de determinação, %

SE - estimativa do desvio padrão

P - erro médio relativo, %

N - número de dados observados

Z - número de parâmetros do modelo

DQM - desvio quadrático médio

RX_{exp} - razão do teor de água experimental

RX_{pred} - razão do teor de água predito pelo modelo

$N - z$ - graus de liberdade do modelo (número de dados observados menos o número de parâmetros do modelo).

3.12 Análise de textura

O cozimento de 10 g de arroz vermelho parboilizado e do arroz parboilizado comercial de marca Tio João foi realizado, submetendo a amostra à cocção por 20, 22, 26, 30, 40 e 60 minutos; mantendo-se os grãos em cozimento à temperatura de $90\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Os grãos de arroz vermelho parboilizado e do arroz parboilizado comercial Tio João, após cada tempo de cocção, foram removidos e resfriados, sendo mantidos em temperatura ambiente, para a análise de textura. As formulações para os três tipos de arroz vermelho parboilizado autoclavados por 14, 22 e 30 minutos e um tipo de arroz parboilizado comercial de marca Tio João nos tempos de cocção de 20, 22, 26, 30, 40 e 60 minutos, podem ser visualizadas na Tabela 3.1 e foram analisadas com três repetições.

Tabela 3.1 – Formulações para as análises de cocção do arroz vermelho parboilizado e o arroz parboilizado comercial Tio João

Formulações	Tempo de cocção (minutos)	Tipo de Arroz: Arroz vermelho parboilizado	Tipo de Arroz: Arroz parboilizado comercial
A1	20	14, 22 e 30 minutos	Arroz Tio João
A2	22	14, 22 e 30 minutos	Arroz Tio João
A3	26	14, 22 e 30 minutos	Arroz Tio João
A4	30	14, 22 e 30 minutos	Arroz Tio João
A5	40	14, 22 e 30 minutos	Arroz Tio João
A6	60	14, 22 e 30 minutos	Arroz Tio João

O perfil textuométrico dos grãos cozidos foi determinado utilizando-se o analisador de textura TATX plus (StableMicro Systems). Para a obtenção dos parâmetros foi empregado o teste de resistência a compressão com auxílio do probe P/20R, cilíndrico de alumínio com diâmetro de 20 e a velocidade de retorno $1,0\text{ mms}^{-1}$. Uma força de compressão de dois ciclos de tempo foi utilizada para comprimir as amostras até 90% da espessura original de grão cozido, retornar à sua posição original e novamente comprimir (MEULLENET et al., 1997). No perfil de textura, os atributos avaliados foram firmeza, mastigabilidade, gomosidade, elasticidade, adesividade e coesividade. O software do equipamento produz um diagrama de onde se extraiu a representatividade de cada parâmetro configurado na Figura 3.2.

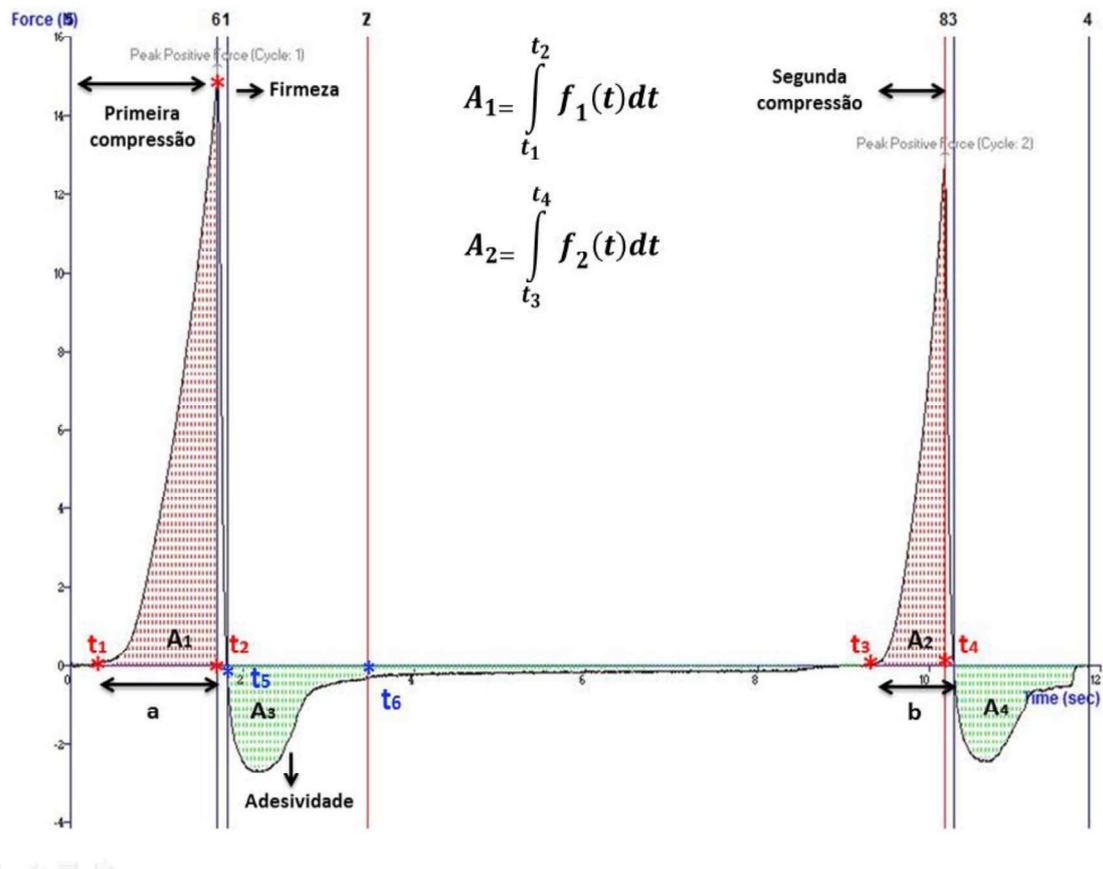


Figura 3.2- Curva típica de TPA no texturômetro TAXT-plus para o arroz vermelho parboilizado autoclavados a 14, 22 e 30 minutos e submetidos a secagem de 50, 60 e 70°C e do arroz parboilizado Tio João comercial
Adaptado de Bourne (2002)

Os parâmetros determinados, conforme descrito por Bourne (2002), foram:

Firmeza (Fir) - definida como a força máxima requerida para comprimir a amostra numa dada percentagem pré-estabelecida. É a força máxima obtida na primeira compressão, em Newton, N.

Coesividade (Coe): é a relação das áreas positivas (A_2/A_1), adimensional:

$$Coe = \frac{\int_{t_3}^{t_4} f_2(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} f_1(t) dt} \quad (3.14)$$

em que

$$A_1 = \int_{t_1}^{t_2} f_1(t) dt \quad e \quad A_2 = \int_{t_3}^{t_4} f_2(t) dt \quad (3.15)$$

Adesividade (Ad) - definida como a força necessária para remover o alimento que adere na língua, nos dentes e nas mucosas, em $N.s^{-1}$. A área negativa da força da primeira compressão, representada pela área 3 (Equação 3.16) corresponde ao trabalho necessário para mover o material aderido a uma superfície, N.m.

$$Ad = A_3 = \int_{t_5}^{t_6} f_3(t) dt \quad (3.16)$$

Gomosidade (Gom) - definida como a energia requerida para desintegrar um alimento semissólido para um estado pronto para ser engolido, sem mastigar, em Newton. Determina-se como o produto da Firmeza x Coesividade, expresso em N.

$$Gom = Firx \left[\frac{\int_{t_3}^{t_4} f_2(t) dt}{\int_{t_1}^{t_2} f_1(t) dt} \right] \quad (3.17)$$

Mastigabilidade (Mast)- definida como o número de mastigações necessárias para tornar o alimento com consistência adequada para ser engolido, em $N.s^{-1}$;

Elasticidade (Elast) - definida como o grau com que o alimento retoma a sua forma após uma compressão parcial da língua contra os dentes ou o céu da boca, em milímetros.

A partir dos dados experimentais dos parâmetros texturométricos (firmeza, mastigabilidade, gomosidade, elasticidade, adesividade e coesividade) em função do tempo de cocção. Estes dados foram avaliados pelo modelo exponencial sugerido representado pela Equação (3.18). Realizou-se uma análise de regressão não linear, pelo método Quasi-Newton, empregando-se o programa computacional STATISTICA®. Estes ajustes foram realizados para o arroz vermelho autoclavado e o arroz parboilizado comercial.

Como critério para análise do modelo matemático sugerido foram utilizados o coeficiente de determinação (R^2), o desvio quadrático médio (DQM), a estimativa do desvio (SE) e o erro médio relativo (P), calculados pelas Equações (3.11 a 3.13), respectivamente.

$$Y = a' \exp(b' \cdot t^{c'}) \quad (3.18)$$

em que,

Y – variáveis de respostas para os parâmetros textuométricos: firmeza (Fir), mastigabilidade (Mast), gomosidade (Gom), elasticidade (Elast), adesividade (Ad) e coesividade (Coe).

a', b' e c' – parâmetros do modelo matemático

t – variável do tempo de cocção em minutos.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização centesimal (parâmetros químicos) do arroz *in-natura* e do arroz vermelho parboilizado

Na Tabela 4.1 contém a média dos valores e desvio padrão da caracterização da composição centesimal (parâmetros químicos) do arroz vermelho *in-natura* e do arroz vermelho parboilizado autoclavado submetido ao processo de secagem à 50 °C.

Tabela 4. 1 - Valores médios e desvios padrões dos parâmetros físicos e químicos de arroz vermelho *in-natura* e do arroz vermelho parboilizado

Parâmetros Analisados	Arroz vermelho <i>in-natura</i>	Arroz com 14 minutos de vaporização	Arroz com 22 minutos de vaporização	Arroz com 30 minutos de vaporização
Teor de água (g/100g)	13,13 ±0,08 ^{a*}	10,60 ±0,20 ^b	10,03 ±0,24 ^{bc}	9,83 ±0,15 ^c
Proteínas (g/100g)	6,83 ±0,11 ^b	7,13 ±0,08 ^{ab}	7,30 ±0,06 ^a	7,13 ±0,06 ^{ab}
Cinzas (g/100g)	2,33 ±0,13 ^a	1,37 ±0,08 ^b	1,03 ±0,04 ^c	1,10 ±0,06 ^{bc}
Gorduras totais (g/100g)	2,11 ±0,20 ^b	3,13 ±0,57 ^b	3,77 ±0,51 ^a	2,87 ±0,51 ^b
Carboidratos (g/100g)	75,63 ±0,17 ^{bc}	77,27 ±0,82 ^{ac}	74,97 ±0,62 ^b	79,03 ±0,35 ^a
Valor calórico total (Kcal /100g)	348,77 ±1,35 ^c	367,80±1,73 ^b	392,27 ±1,48 ^a	370,47 ±3,17 ^b
Amido (g/100g)	72,17 ±1,82 ^a	70,33 ±0,42 ^a	70,50 ±0,13 ^a	71,70 ±1,86 ^a
Luminosidade (L*)	48,82 ±1,12 ^a	37,88 ±0,86 ^b	38,42 ±0,25 ^b	38,18 ±0,30 ^b
Intensidade de vermelho (a*)	10,58 ±0,38 ^a	6,62 ±0,61 ^b	6,88 ±0,11 ^b	6,34 ±0,07 ^b
Intensidade de amarelo (b*)	20,48 ±0,38 ^a	16,26 ±0,36 ^b	16,90 ±0,3 ^b	17,34 ±1,18 ^b

*Tratamentos com letras semelhantes não diferem estatisticamente entre si de acordo com o teste de Tukey a 5% de probabilidade.

O arroz vermelho parboilizado autoclavado descascado apresentaram teor de água entre 9,83 (g/100g) a (10,60g/100g) em base úmida. Os valores encontrados para o arroz vermelho parboilizado foram bem próximos ao valor do teor de água (13,13 g/100g) do arroz vermelho *in-natura*. Observa-se que o processo de secagem do arroz vermelho à 50°C contribuiu para que os valores de teor de água das amostras do arroz vermelho parboilizado fosse inferior em relação ao valor do arroz vermelho *in-natura*.

Nas análises de proteínas, o processo de parboilização conferiu aos grãos valores de proteínas (7,13 % a 7,30 g/100g) relativamente maiores em relação ao grão *in-natura* (6,83

g/100g). Esta pequena diferença entre o arroz vermelho parboilizado e o arroz vermelho *in-natura* é devido as diferenças do teor de água entre as amostras. Estes valores proteicos estão bem próximo aos valores de proteína (5,91 a 7,50 g/100g) do arroz vermelho parboilizado estudado por OLI et al (2016).

Observa-se mediante às análises de cinzas que os valores do arroz vermelho parboilizado (1,10 g/100g a 1,37g/100g) em relação ao valor de cinzas (2,33 g/100g) do arroz vermelho *in-natura* foram reduzidos. Isto possivelmente ocorreu durante a hidratação dos grãos, assim ocorre a lixiviação dos minerais. Pode-se também verificar que os teores de cinzas (0,6 a 1,6 g/100g) para arroz parboilizado da variedade marrom e vermelho polido e não -polido avaliado por Paiva et al. (2016) estando próximos aos resultados do presente estudo.

Em relação aos valores de gorduras totais, os valores do arroz vermelho *in-natura* foram de (2,11%), estando inferiores em relação aos valores das gorduras totais do arroz vermelho parboilizado por 14 minutos de autoclave, que foram de (3,13%) e, o arroz vermelho parboilizado por 22 minutos de autoclave (3,77%) e o arroz vermelho parboilizado por 30 minutos de autoclave (2,87%). Observa-se que os valores encontrados foram bem superiores aos valores de gorduras totais do arroz integral (2,52%) e do arroz parboilizado polido (0,69%) relatados por Walter et al. (2008). Os resultados de gorduras totais do arroz parboilizado não-polido da variedade preto e vermelho avaliados por Paiva et al. (2016) variaram de 2,6 a 3,0 (%), respectivamente. Esses valores foram próximos aos resultados da gordura total do arroz vermelho parboilizado por 14 minutos e 30 minutos, que variaram de (3,13) e (2,87%), respectivamente.

Observa-se que o conteúdo de carboidratos para o arroz vermelho *in-natura* e o arroz parboilizado variaram de 75,63g/100 g para 74,97 g/100g até 79,03g/100g. Tendo como componente principal o conteúdo de amido com valor de 72,17 g/100g para o arroz vermelho *in-natura*. Observa-se que, o processo de vaporização reduziu o conteúdo de amido do arroz vermelho. Possivelmente, a redução do conteúdo de amido pode ser atribuída à hidrólise do amido em compostos de baixo peso molecular que lixiviam durante a parboilização (PAL et al. 2018).

Pelos dados da Tabela 4.1 também observa-se que o valor calórico total (348,77 kcal/100g) para o arroz vermelho *in-natura*. Enquanto que para o arroz vermelho parboilizado os valores calóricos foram aumentados para 367,80 g/100 até 392,27 g/100g. Isto ocorreu porque o conteúdo de carboidratos foi aumentado de 74,97 g/100g até 79,03 g/100g durante o processo de vaporização.

Os dados que representam a cor do arroz vermelho *in-natura* e das amostras do arroz vermelho parboilizado vaporizados por 14 minutos até 30 minutos também podem ser visualizados na Tabela 4.1. Observa-se que os valores da intensidade da luminosidade (L^*) foram reduzidos durante o processo de vaporização de (48,82) para (37,88) até (38,88). Também observa-se que os valores da intensidade de vermelho (a^*) também foram reduzidos de (10,58) para (6,34) até (6,88). Bem como ocorreu a redução dos valores da intensidade de amarelo (b^*) de (20,48) para (16,26) até (17,34). Assim, pode-se afirmar que o arroz vermelho parboilizado ficou mais escuro em relação ao arroz vermelho *in-natura*. Como também que a redução dos valores de (a^*) e (b^*) significa que as amostras se tornaram menos vermelha e menos amarela. Este resultado sugere que os pigmentos vermelhos e amarelos podem ser lixiviados, difundidos da camada de farelo para o endosperma ou degradados durante as etapas de parboilização. Além disso, as alterações de cor podem ser atribuídas ao movimento de moléculas, como aminoácidos, açúcares e lipídios, para fora da casca, aumentando a taxa de reação de Maillard. (Oli et al., 2016).

4.2 Análise termogravimétrica do arroz vermelho hidratado

A partir das curvas obtidas por análise termogravimétrica contidas nas Figuras (4.1 até 4.6) observam-se as análises termogravimetria (TG) e sua derivada (DTG) como também a partir dos dados da Tabela 4.2 que contém os valores da temperatura inicial (T_0), temperatura onset (T_{onset}), temperatura de pico (T_p), temperatura final (T_f) obtidas das curvas da DTG do arroz vermelho *in-natura*, arroz pré seco e arroz hidratado. Vamos analisar os eventos térmicos ocorridos durante a degradação térmica aproximadamente entre 40°C até 600°C.

A partir dos resultados das curvas (Figuras 4.1 até 4.3) pode-se observar que o arroz vermelho *in-natura*, arroz vermelho pré-seco e o arroz vermelho hidratado à 45°C apresentam três eventos de decomposição. O primeiro evento térmico corresponde à desidratação da amostra em aproximadamente 40°C até aproximadamente 68,88°C, ocorrendo também de perda de massa de 9,68% até 10,65% até atingir aproximadamente 246,97°C (início do próximo evento térmico).

O segundo evento térmico ocorre aproximadamente 246,97°C até 356,43°C. Neste estágio, observa-se uma acentuada degradação da amostra com perda de massa de 51,92% até 56,77%. A partir dos dados contidos na Tabela 4.2 observa-se que os picos nas curvas de DTG indicam que as máximas taxas de degradação ocorreram na temperatura de pico

aproximadamente entre 289,93 °C até 290,45°C. Este evento é denominado de degradação do polissacarídeo por despolimerização quando a temperatura onset aproximadamente 269,42°C até a temperatura final de 300,60°C.

O terceiro evento térmico ocorre na faixa de temperatura de 340,55°C até 551,54°C. Nestes estágios, nas curvas de DTG, representadas pelas Figuras 4.1 até 4.3, observa-se perdas de massa correspondentes a 11,87% até 13,13%. Segundo Piglowska et al. (2020), os produtos voláteis liberados nesta etapa de decomposição podem ser principalmente água ligada, monóxido de carbono (CO) e dióxido de carbono (CO₂).

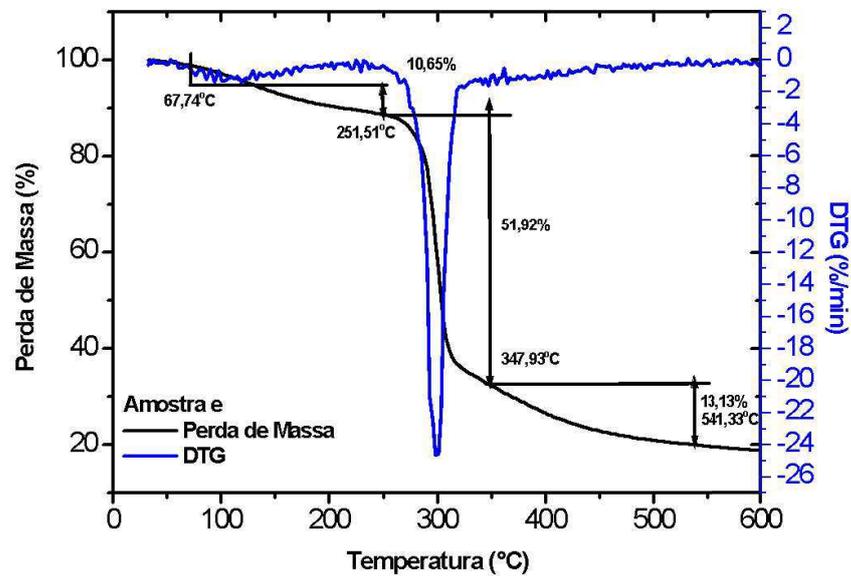


Figura 4.1- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho *in-natura*

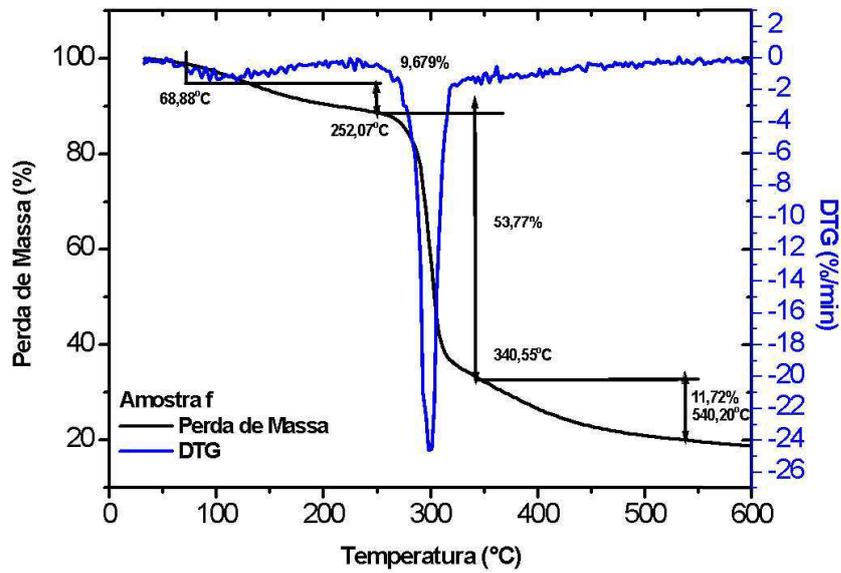


Figura 4. 2 - Análise de TG-DTG para o arroz vermelho pré seco

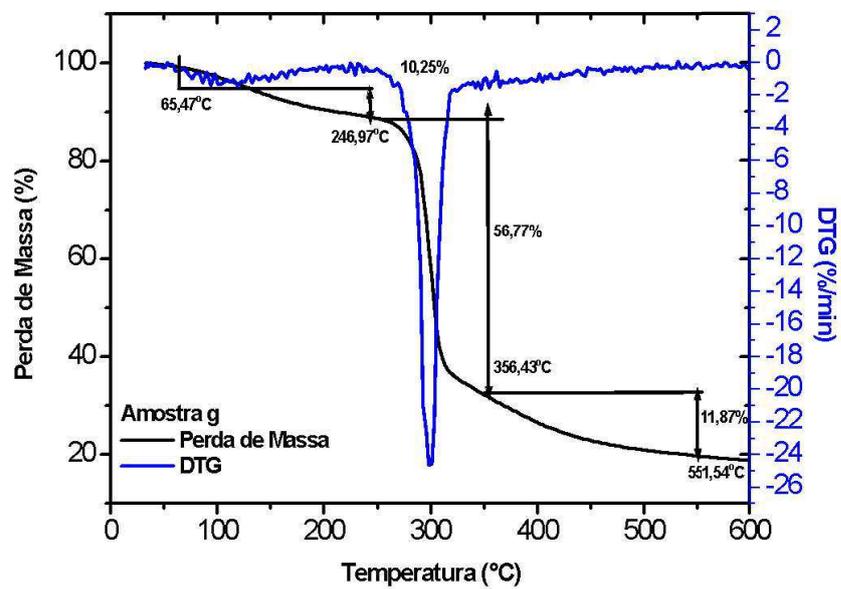


Figura 4. 3 - Análise de TG-DTG para o arroz vermelho hidratado à 45°C

Nas Figuras 4.4 e 4.5 e 4.6 são observadas as análises termogravimétricas (TG) e sua derivada (DTG) do arroz vermelho hidratado à 55°C, 65°C e 75°C. Também observa-se a partir das curvas de DTG a ocorrência de três estágios de degradação térmica registrados nas temperaturas aproximadamente de 54,11-258,31°C; 258,31-350,20°C e 350,20-540,20 °C.

O primeiro evento térmico ocorre perda de massa de 8,87% até 9,86%, na faixa de aproximadamente 54,11 até 81,35°C. A temperatura de início do segundo evento térmico ocorre aproximadamente 240,16°C até 350,20°C. Nestas temperaturas ocorre a máxima taxa de degradação com perda de massa de 53,74% até 57,07% relacionada à completa degradação do amido. Pela observação dos dados contidos na Tabela 4.2, a temperatura de pico deste principal evento térmico ocorre aproximadamente entre 292,00°C até 294,05°C para o arroz hidratado à 55°C até 75°C. O terceiro evento térmico ocorre aproximadamente 350,20°C até 540,20°C. Observa-se que a massa continua diminuindo, com perda de 11,81% até 13,10%. Neste último evento térmico ocorre eliminação de produtos carbonáceos.

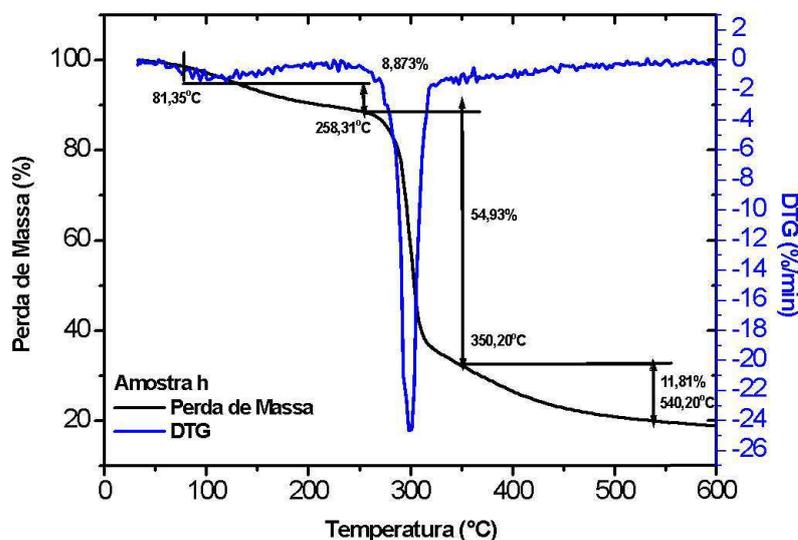


Figura 4. 4 - Análise de TG-DTG para o arroz vermelho hidratado à 55°C

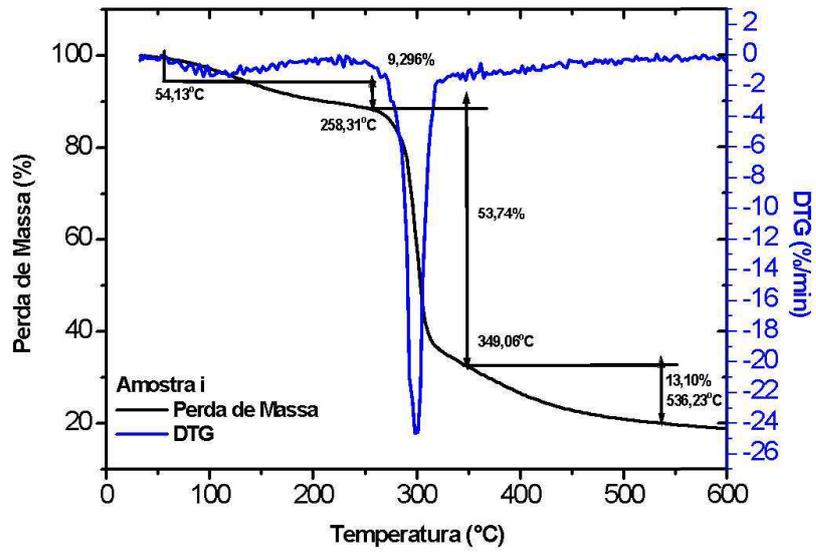


Figura 4. 5- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho hidratado à 65°C

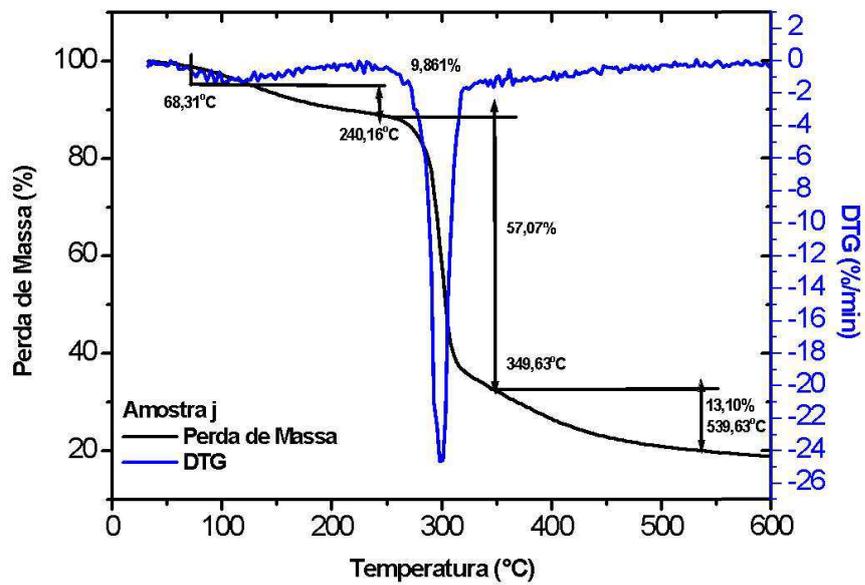


Figura 4. 6 - Análise de TG-DTG para o arroz vermelho hidratado à 75°C

Tabela 4.2 - Dados da temperatura inicial (To), temperatura onset (Tonset), temperatura de pico (Tp), temperatura final (Tf) das curvas de DTG do arroz vermelho *in-natura*, arroz pré seco e arroz hidratado

Arroz vermelho	To (°C)	Tonset (°C)	Tp (°C)	Tf (°C)
<i>In-natura</i>	250,3	269,48	289,93	298,22
Pré-seco	257,11	269,42	290,22	298,07
Hidratado a 45°C	258,78	271,78	290,45	300,60
Hidratado a 55°C	254,36	269,45	292,0	300,64
Hidratado a 65°C	260,88	272,02	293,14	293,14
Hidratado a 75°	263,90	272,0	294,05	300,0

Em suma, as análises de DTG evidencia que o principal evento térmico ocorre com as amostras de arroz vermelho *in-natura*, arroz pré-seco e o arroz vermelho hidratado em casca foi a degradação do polissacarídeo que ocorre por despolimerização quando a temperatura aplicada aproximadamente entre 289,93°C até 294,05°C. Valores próximos aos resultados de Lima et al. (2012), Machado et al. (2014), Colussi et al. (2017).

4.3 Análise de Espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier (FTIR-ATR) do arroz vermelho hidratado

A técnica de espectroscopia de absorção na região do infravermelho foi utilizada na identificação, determinação de grupos funcionais e nos estudos de conformação e estrutura do arroz vermelho *in-natura*, arroz vermelho pré-seco e o arroz vermelho hidratado.

Na Figura 4.7 encontram-se ilustrados os espectros na região de infravermelho para o arroz vermelho *in-natura* e o arroz vermelho pré-seco, como também as principais bandas de absorção.

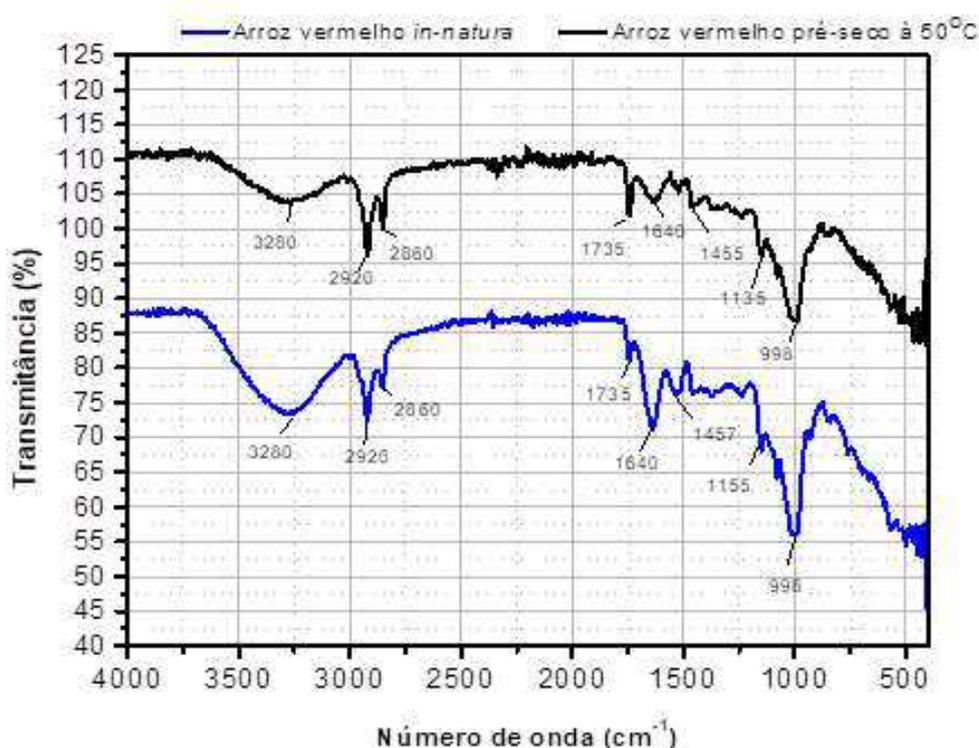


Figura 4. 7- Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho *in –natura* e do arroz vermelho pré-seco

As principais bandas observadas para o arroz vermelho *in-natura* e o arroz vermelho pré-seco apresentam picos intensos em números de onda em torno de 998 cm^{-1} , atribuídos à vibração da ligação C-O em alcoóis. Observa-se picos em 1150 cm^{-1} e 1135 cm^{-1} , correspondentes à deformação axial da vibração da ligação O-C-O. Também foi registrado pico em 1640 cm^{-1} correspondente a água fortemente ligada. Observa-se também em 1735 cm^{-1} a deformação da carbonila C=O. Já a deformação em torno de 1457 cm^{-1} e 1455 cm^{-1} é a

correspondente a deformação axial de C-OH e CH₂. Finalmente, observa-se também que, em 3280 cm⁻¹, à vibração dos grupos hidrofílicos hidroxilas (O-H), e em 2920 cm⁻¹, derivados da vibração do estiramento axial assimétrica de C-H da molécula de anidroglicose e em, 2860 cm⁻¹, correspondente à vibração da ligação da deformação axial simétrica C-H.

A partir da Figura 4.7 observa-se para o arroz vermelho pré-seco observa-se as principais bandas nos seus respectivos números de ondas: 3280 cm⁻¹ correspondentes a deformação axial do grupo OH; 2918 cm⁻¹ e 2847 cm⁻¹ que correspondem à deformação axial assimétrica e simétrica do grupo C-H, respectivamente. A banda correspondente a deformação angular de O-H (H₂O) vibra em 1630 cm⁻¹. Também observa-se que, em 1442 cm⁻¹, ocorre à vibração do grupo C-OH e CH₂ e entre 1150 cm⁻¹ e 1000 cm⁻¹ ocorrem às vibrações das bandas correspondentes às deformações axiais do grupo O-C-O e do grupo C-O em álcoois.

Não existem diferenças significativas entre as amostras do arroz *in-natura* e o arroz pré-seco à 50°C observadas entre as principais bandas dos grupos funcionais analisadas.

Na Figura 4.8 encontram-se ilustrados os espectros de infravermelho do arroz vermelho hidratado nas temperaturas de 45°C até 75°C, bem como as principais bandas dos grupos funcionais.

A partir da Figura 4.8 observa-se que não há diferenças significativa entre as amostras do arroz vermelho hidratado à 45°C e à 55°C, porque os picos em números de onda estão em torno 1146 cm⁻¹ e 998 cm⁻¹ são as bandas atribuídas às vibrações da ligação O-C-O (éter) e a deformação axial do grupo C-O em álcoois, respectivamente. Observa-se também picos em 1450cm⁻¹ correspondentes aos picos do grupo C-OH e CH₂ como também na região de absorção de 1747 cm⁻¹, referente ao grupo da carbonila (C=O). Os picos em número de ondas em torno de 2918 cm⁻¹ e 2850 cm⁻¹ ocorrem às vibrações dos derivados do estiramento C-H da molécula de hidrogênio assimétrico e simétrico.

Na Figura 4.8 observa-se que o aumento da temperatura de hidratação de 55°C para 75°C ocorreu o desaparecimento da intensidade do pico na região de absorção dos grupos hidrofílicos (OH) em 3256 cm⁻¹ e 1641 cm⁻¹. Como também o desaparecimento do grupo éter em torno de 1070 cm⁻¹. Em relação ao aumento da temperatura de hidratação de 55°C para 65°C ocorreu o desaparecimento das bandas em 2850 cm⁻¹ e 1742 cm⁻¹, correspondentes a deformação axial da ligação C-H e da carbonila C=O, respectivamente.

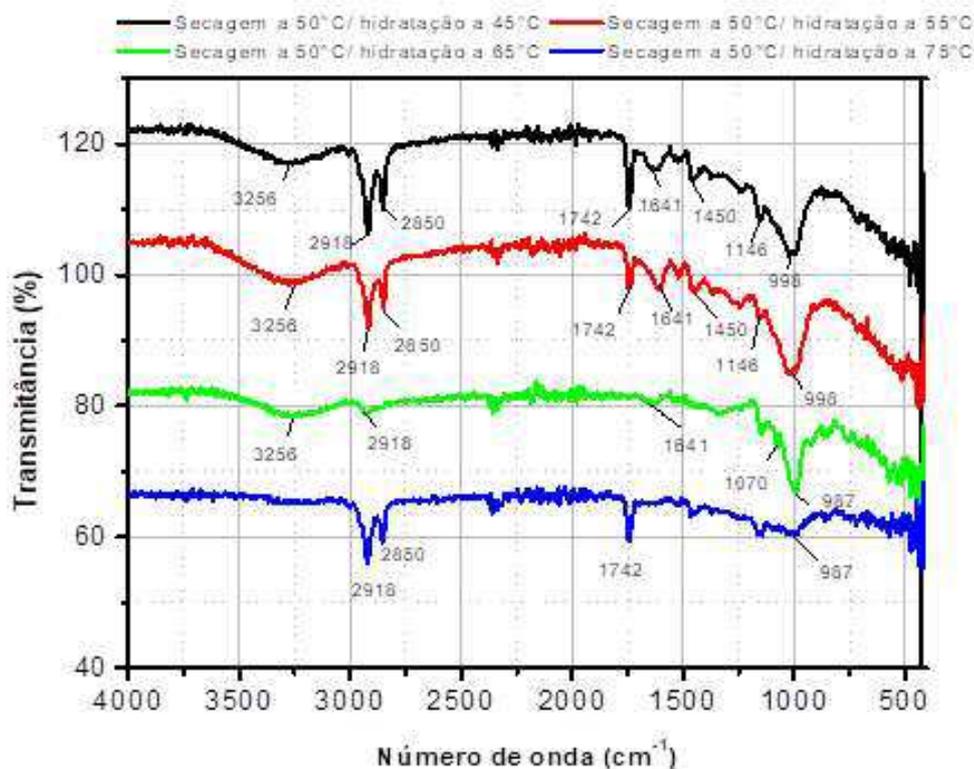


Figura 4. 8- Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho hidratado nas temperaturas de 45°C até 75°C

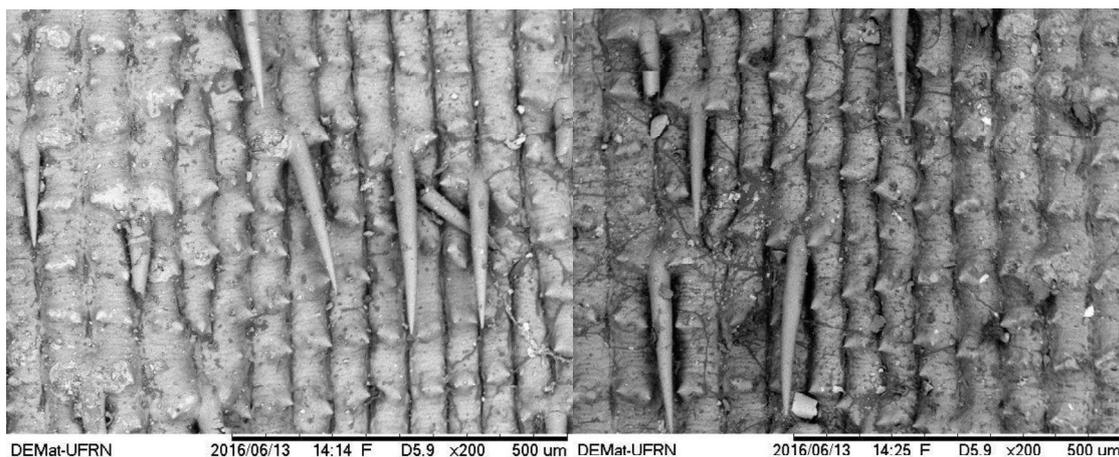
4.4 Análise morfológica por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do arroz vermelho hidratado

Nas Figuras 4.9 (a) e 4.9 (b) observa-se as micrografias da superfície do arroz vermelho em casca tradicional *in-natura* e submetida à secagem a 50°C. Já nas Figuras 4.9 (c), 4.9 (d), 4.9 (e) e 4.9 (f) observa-se o arroz vermelho pré-seco em casca e o arroz vermelho hidratado em casca nas temperaturas de 45°C, 55°C, 65°C e 75°C por 7 horas.

Observa-se nas Figuras 4.9 (a) e 4.9 (b) que a superfície do arroz vermelho é toda irregular com alguns “espinhos” e pontos brancos que são sílicas. Segundo Angel et al. (2009) a casca do arroz é o revestimento protetor composto por quatro camadas estruturais.

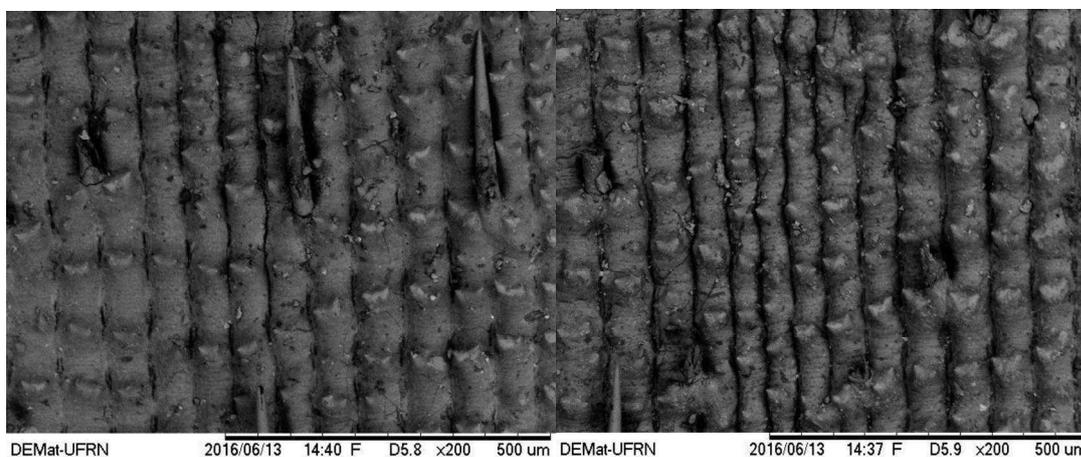
A partir das Figuras 4.9 (c), 4.9 (d), 4.9 (e) e 4.9 (f) observa-se que a hidratação durante 7 horas de imersão conferiu aos grãos do arroz vermelho uma eliminação dos “espinhos”, bem como a hidratação na faixa de temperatura de 45 até 75°C proporcionou alteração da sua estrutura morfológica, porém não há evidências pelas micrografias que caracterizem a ocorrência da gelatinização completa das estruturas químicas, uma vez que, quando o grão

atinge essa condição, há a ruptura dos complexos de amido e as moléculas, conseqüentemente, adotam orientação aleatória, permitindo que fissuras e espaços intermoleculares no grão sejam preenchidos, possibilitando uma estrutura sólida e de alto grau de compactação. Essa condição de gelatinização foi observada nos estudos da etapa de hidratação do arroz realizados por Wu et al. (2010), Genkawa et al. (2011), Pineda – Gómes et al (2012) e Balbinoti et al. (2018)^{a,b}.



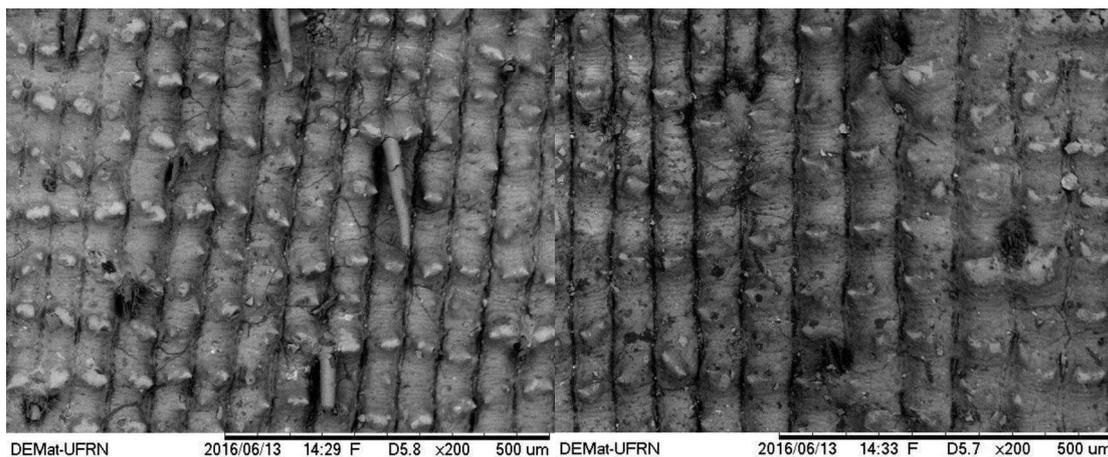
(a)

(b)



(c)

(d)



(e)

(f)

Figura 4. 9 – Micrografias do arroz vermelho em casca: (a) *in-natura*, (b) pré-seco, (c) hidratado a 45°C, (d) hidratado a 55°C, (e) hidratado a 65°C, (f) hidratado a 75°C

4.5 Cinética de absorção e modelagem matemática do arroz vermelho

Os valores de absorção de água iniciais para todos os ensaios foram em torno de 15% em base seca. O percentual de absorção de água dos grãos do arroz vermelho durante a hidratação é visualizado na Figura 4.10. Na Figura 4.10 também observa-se a modelagem matemática em relação ao modelo de Peleg (1988), para descrever o fenômeno de absorção de água para as temperaturas de 45°C, 55°C, 65°C e 75°C.

Pelos dados de absorção de água em função da temperatura e tempo da hidratação do arroz vermelho na Figura 4.10, constata-se que o arroz vermelho em casca exibiu um comportamento característico de produtos agrícolas submetidos ao processo de hidratação. Pode se observar que ao longo do processo de hidratação exibe uma alta taxa de absorção de água, com tendência a estabilizar com o tempo, à medida que o teor de água do produto se aproxima do equilíbrio.

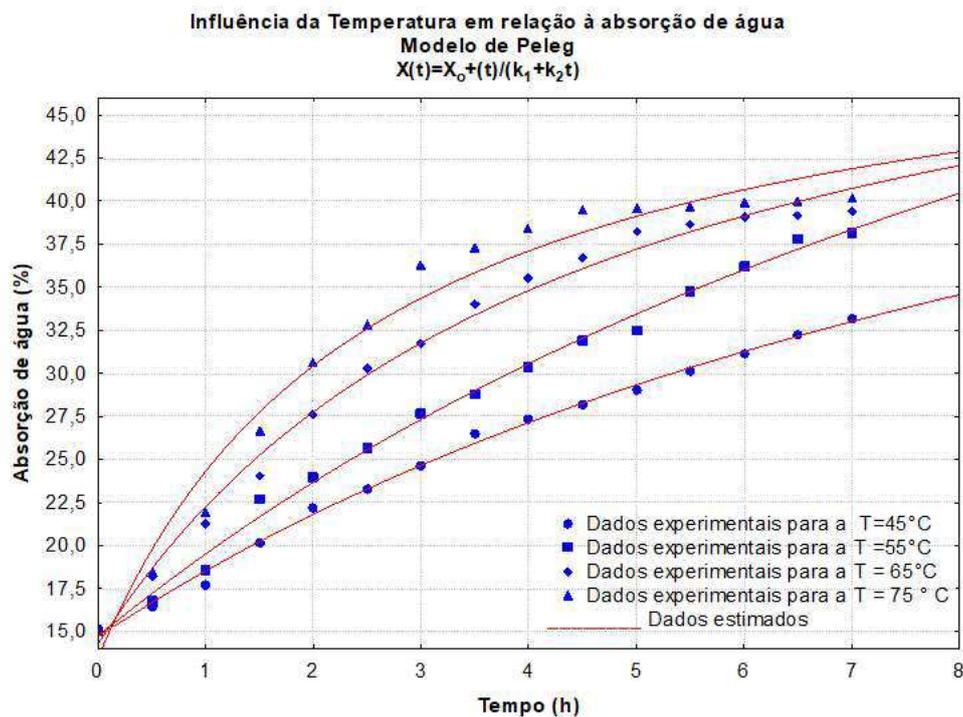


Figura 4. 10 - Valores observados e estimados pelo modelo de Peleg (1988) para as temperaturas de 45, 55, 65 e 75 °C em função do tempo de hidratação

A absorção de água aumentou rapidamente na fase inicial de hidratação, devido, principalmente, à capilaridade natural existente nas camadas mais externas dos grãos, próximas

ao pericarpo, e ao processo de difusão. Segundo Resio et al. (2006), Corrêa et al. (2016), Balbinoti et al. (2018)^{a,b}, a taxa de absorção de água depende da diferença entre o teor de água de saturação e o teor de água em um determinado tempo, a chamada força motriz. Assim, a hidratação, ao longo do tempo, ocorre com o aumento do teor de água associado à diminuição da força motriz e, conseqüentemente, à redução da taxa de absorção de água.

Observa-se, ainda, na Figura 4.10, que, com o aumento da temperatura, ocorreu elevação da taxa de absorção de água, intensificando a dinâmica do fenômeno de hidratação do produto. Resultados semelhantes foram observados em vários processos de hidratação de grãos de arroz (BOTELHO et al. 2010; CHEEVITSOPON & NOOMHORM(2011); grãos de soja (QUICAZÁN et al. 2012); grãos de bico e feijão (SHAFAEI et al. 2016); grãos de soja transgênica e convencional (FRACASSO et al. 2014); grãos de feijão (MIANO et al. 2015) e grão de arroz (BALBINOTI et al. 2018^{a,b}).

Observa-se, também, um aumento regular na absorção de água à medida que se aumenta a temperatura de 45°C para 55 e 65 °C. Esse comportamento elevado na absorção de água foi observado para as temperaturas de 55 e 65 °C. Para a faixa de temperatura de 55 a 65°C, o arroz vermelho apresenta um teor de água igual a 28% a partir das 5 horas de processo. Segundo Amato et al. (2005), Genkawa et al. (2011) e Balbinoti et al. (2018)^{a,b}, o teor de água na faixa 28-30 % é indispensável para a completa gelatinização do amido do endosperma do grão de arroz.

Na Tabela 4.3 encontram-se os parâmetros dos modelos de Peleg (1988), os teores de água de equilíbrio e os parâmetros estatísticos P, SE, DQM e R² para hidratação do arroz em casca em função da temperatura de hidratação em seu processo.

Pela análise dos dados da Figura 4.10, observa-se que o modelo de Peleg (1988) mostrou-se adequado para descrever o processo de hidratação nos grãos de arroz em casca da variedade analisada. Pode-se verificar que, o modelo de Peleg (1988) apresentou valores de R² maiores que 97,54%, os valores de P menores que 4,05%, os valores de SE inferiores a 2,06 e DQM inferiores a 1,31. Nota-se também que, os valores de SE, DQM e P, não apresentam tendência definida quando aumenta-se a temperatura. De acordo com esses parâmetros R², DQM, P e SE pode-se afirmar que o modelo de Peleg (1988) é satisfatório para descrever a cinética de hidratação do arroz vermelho em casca.

Tabela 4. 3- Estimativas dos parâmetros do Modelo de Peleg (1988)

Modelo de Peleg (1988)				
Temperatura (°C)	45	55	65	75
Xo	45	55	65	75
k₁	14,68878	14,72751	14,22337	13,40719
k₂	0,24009	0,19438	0,10126	0,06611
Xe	0.02029	0,01457	0,02326	0,02568
DQM	0,33271	0,10374	0,75735	1,30608
SE	0,13837	0,01345	2,06353	1,8703
P(%)	1,1845	1,3061	2,1323	4,0473
R²(%)	99,65	99,51	99,09	97,54

Os resultados de Resende e Corrêa (2007) acerca da cinética de hidratação do feijão nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50°C comprovaram que, a constante k_1 do modelo de Peleg (1988) está relacionada com a taxa de transferência de massa, sendo que, quanto menores forem os valores de k_1 , maiores serão as taxas iniciais de absorção de água.

Os resultados do presente estudo, representados na Tabela 4.3, para as constantes k_1 , indicam que os valores de k_1 decresceram com o aumento da temperatura, comportamentos semelhantes foram encontrados pelos pesquisadores Botelho et al. (2010) ao investigarem a cinética de hidratação do arroz variedade IRGA 424, para as temperaturas de hidratação de 35, 45, 55 e 75°C. Comportamentos semelhantes também foram encontrados pelos pesquisadores Shafaei et al. (2016) ao avaliarem a hidratação de grãos de bico e feijão nas temperaturas de 5, 25 e 45°C para três variedades desses grãos. Como também nos estudos de Fracasso et al. (2014) ao investigarem a cinética de hidratação da soja convencional e transgênica nas temperaturas de 25, 35, 45, 55 e 65°C.

O comportamento físico da constante cinética k_1 avaliado pelos pesquisadores Quicazán et al. (2012) ao avaliarem a cinética de hidratação da soja nas temperaturas de 20, 40 e 80°C foram semelhante aos estudos de Resende, Corrêa (2007), Botelho et al. (2010), Shafaei et al. (2016), Fracasso et al. (2014) e Balbinoti et al. (2018)^{a,b}.

Resende e Corrêa (2007) ao investigarem a cinética de hidratação do feijão, comprovaram que a constante k_2 do modelo de Peleg (1988) está relacionada com a capacidade máxima de absorção de água, sendo que, quanto menor o seu valor, maior será a adsorção de

água do produto. Estudos feitos por Botelho et al. (2010) para o arroz em casca, variedade IRGA 424 proveniente da região de Pelotas – RS, seguiram o mesmo comportamento, assim como Shafaei et al (2016), ao estudarem a cinética de hidratação do feijão e do grão de bico nas temperaturas de 5, 25 e 45°C para três variedades de feijão e grão de bico.

Diferentemente dos estudos citados acima, os resultados da Tabela 4.3 para a constante k_2 demonstram que, os valores de k_2 não tiveram um comportamento definido ao variar a temperatura. De maneira semelhante, o teor de água de equilíbrio não apresentou comportamento definido com a mudança de temperatura, resultados semelhantes foram encontrados pelos pesquisadores Fracasso et al. (2014) nos estudos com a soja tradicional e transgênica, os resultados demonstraram que os valores encontrados para a constante k_2 e o teor de água de equilíbrio não apresentaram comportamentos bem definidos com a variação da temperatura.

As Figuras 4.11 e 4.12 descrevem o comportamento da cinética de absorção de água durante a etapa de hidratação do arroz vermelho descrita pelos modelos propostos por Cavalcanti Mata&Duarte (2018) e Duarte&Cavalcanti Mata (2018). Observa-se a partir das Figuras 4.11 e 4.12, comportamentos semelhantes ao aumentar-se a temperatura de hidratação de 45°C até 75°C. A influência da temperatura de hidratação é bem significativa, pois a medida em que esta é aumentada observa-se um aumento na razão de absorção de água em qualquer tempo de hidratação. O aumento da temperatura de 45°C para 55°C promove um leve aumento da razão de absorção de água, no entanto o aumento de 55°C para 65°C e 75°C eleva-se consideravelmente com a subida da temperatura.

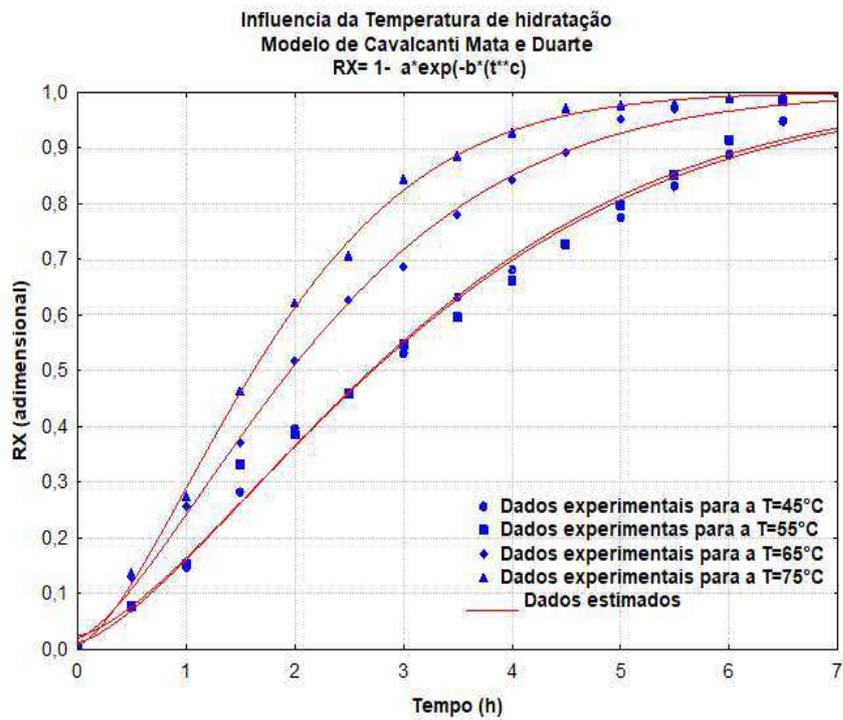


Figura 4. 11 - Cinética de absorção de água proposto pelo modelo de Cavalcanti Mata & Duarte (2018)

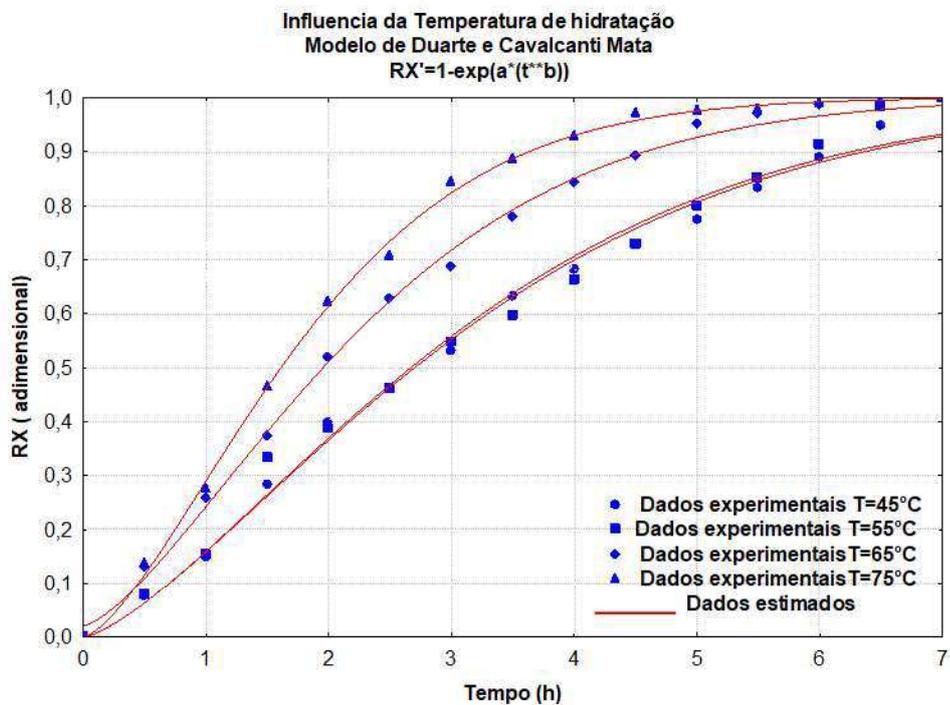


Figura 4. 12 - Cinética de absorção de água proposto pelo modelo de Duarte & Cavalcanti Mata (2018)

Nas Tabelas 4.4 e 4.5 encontram-se ilustrados os valores estatísticos dos coeficientes de determinação (R^2), desvio quadrático médio (DQM), erro médio relativo (P) e estimativa do desvio padrão (SE) para os modelos ajustados da cinética de absorção do arroz vermelho em diferentes temperaturas.

Tabela 4. 4 - Estimativas dos parâmetros do Modelo de Cavalcanti Mata & Duarte (2018)

Modelo de Cavalcanti Mata & Duarte (2018)				
Temperatura (°C)	45	55	65	75
(a)	0,9872	0,9754	0,9794	0,9913
(b)	-0,1627	-0,1548	-0,2564	-0,3328
(c)	1,4324	1,4741	1,4368	1,4993
DQM	$2,76 \times 10^{-2}$	$3,67 \times 10^{-2}$	$1,67 \times 10^{-2}$	$8,41 \times 10^{-2}$
SE	$3,08 \times 10^{-2}$	$4,10 \times 10^{-2}$	$1,86 \times 10^{-2}$	$9,40 \times 10^{-4}$
P(%)	3,97	4,79	2,85	15,88
R²(%)	99,21	98,64	99,74	99,87

Observam-se na Tabela 4.4 as estimativas dos parâmetros a, b e c do modelo proposto por Cavalcanti Mata&Duarte (2018). Já na Tabela 4.5, observa-se as estimativas dos parâmetros a e b do modelo proposto por Duarte&Cavalcanti Mata (2018). Observa-se que os coeficientes dos parâmetros expressos nas Tabelas 4.4 e 4.5 não apresentaram uma tendência clara com a elevação da temperatura de hidratação.

O modelo matemático proposto por Cavalcanti Mata & Duarte (2018), ajustados aos dados experimentais, apresentaram coeficientes de determinação superiores a 98,64%, os valores do erro médio relativo (P) são inferiores a 15,88 os valores do desvio quadrático médio (DQM) são inferiores a $8,41 \times 10^{-2}$ e a estimativa do desvio padrão (SE) os valores são inferiores a $4,1 \times 10^{-2}$.

Já os valores dos parâmetros estatísticos para o modelo matemático proposto por Duarte e Cavalcanti Mata (2018) apresentaram coeficientes de determinação superiores a 98,64%, os valores do erro médio relativo (P) são inferiores a 5,86%, os valores do desvio quadrático médio (DQM) são inferiores a $3,75 \times 10^{-2}$ e a estimativa do desvio padrão (SE) os valores são inferiores a $4,0 \times 10^{-2}$.

Diante dos resultados observa-se que os modelos propostos por Cavalcanti Mata & Duarte (2018) e Duarte&Cavalcanti Mata (2018) representam bem a cinética de absorção do arroz vermelho.

Tabela 4. 5 - Estimativas dos parâmetros do Modelo de Duarte & Cavalcanti Mata (2018)

Modelo de Duarte & Cavalcanti Mata (2018)				
Temperatura (°C)	45	55	65	75
(a)	-0,1721	-0,1734	-0,2754	-0,3417
(b)	1,4013	1,4102	1,3909	1,4792
DQM	$27,91 \times 10^{-3}$	$37,49 \times 10^{-3}$	$17,71 \times 10^{-3}$	$12,09 \times 10^{-3}$
SE	$30,0 \times 10^{-3}$	$40,00 \times 10^{-3}$	$19,0 \times 10^{-3}$	$12,1 \times 10^{-3}$
P(%)	4,5433	5,8571	3,4044	2,1525
R ² (%)	99,20	98,58	99,71	99,87

4.6 Análise Termogravimétrica do arroz parboilizado

As Figuras 4.13 até 4.21 ilustram as análises termogravimétrica e sua derivada, para o arroz vermelho parboilizado nas seguintes condições: 14 minutos de autoclave e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C (Figuras 4.13 até 4.15); 22 minutos de autoclave e temperaturas de secagem de 50,60 e 70°C (Figuras 4.16 até 4.18) e 30 minutos de autoclave e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C (Figuras 4.19 até 4.21).

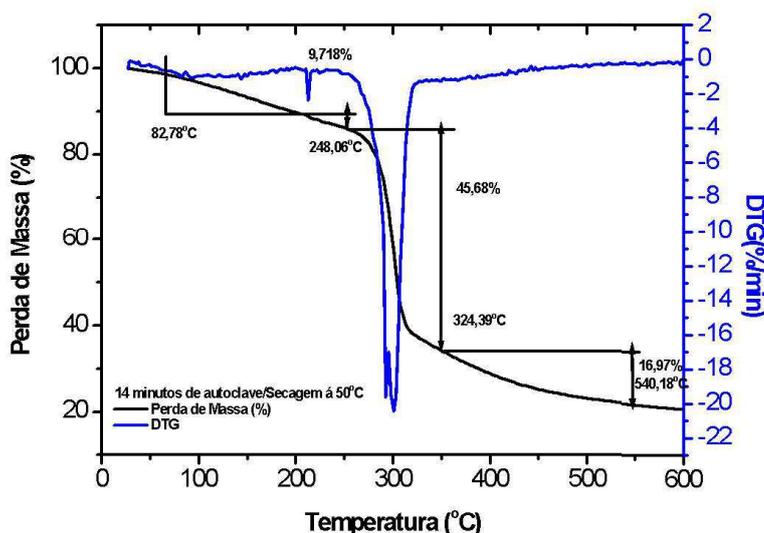


Figura 4. 13 - Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 14 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 50°C

A partir das curvas termogravimétrica, Figuras 4.13 até 4.15 observa-se que são muito similares entre si e termicamente estáveis na faixa de temperatura aproximadamente entre 40°C até 252,08°C. Na análise de sua derivada (DTG), observa-se que há uma perda de massa entre 9,718% até 11,53% correspondente ao primeiro evento térmico de desidratação das amostras que ocorre entre 76,47°C e 83,35°C.

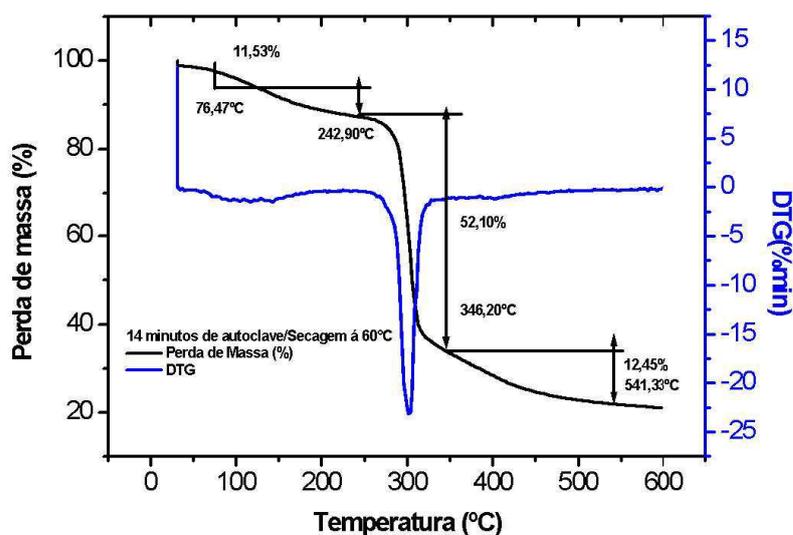


Figura 4. 14- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 14 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 60°C

O segundo evento térmico é o correspondente a máxima decomposição do amido presente no arroz vermelho parboilizado. A perda de massa correspondente à degradação máxima do amido corresponde ocorreu entre 45,68% até 52,10%. As curvas de DTG evidenciam que amostras submetidas a 14 minutos de autoclave e temperatura de secagem a 50°C, 60°C e 70°C atingem a máxima decomposição dentro da faixa de temperatura de 242,08°C até 346,20°C. Nessa faixa de temperatura, o amido do arroz vermelho parboilizado sofreu mudanças irreversíveis em sua estrutura amilácea, evidenciando a eliminação do grupo polihidroxil do amido acompanhada pela despolimerização e decomposição do amido.

O terceiro estágio de decomposição, a massa continua a ser reduzida com percentuais de 12,45% até 16,97% para a faixa de temperatura 324,39°C até 541,33°C.

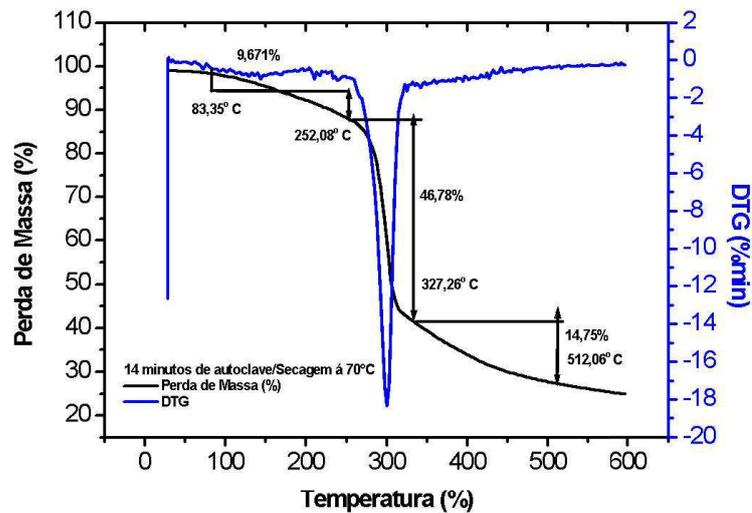


Figura 4.15- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 14 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 70°C

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 correspondem as curvas termogravimétricas do arroz vermelho parboilizado com 22 minutos de tempo de autoclave e temperaturas de secagem a 50, 60 e 70 °C. Pela observação da DTG percebe-se que são bem similares e termicamente estáveis entre 40°C até 253,80°C.

Nas curvas de DTG observa-se que o primeiro estágio de decomposição ocorre aproximadamente entre 54,08°C até 253,80°C, com perda de massa de 9,729% até 12,86%. Este evento térmico corresponde a desidratação das amostras que ocorreu entre 54,08°C até 71,80°C.

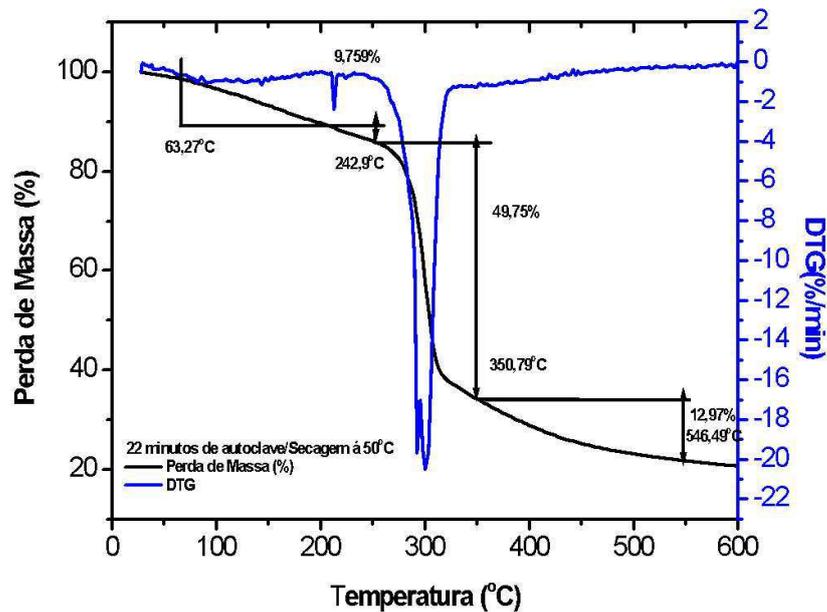


Figura 4. 16- Análise de TG-DSC para o arroz vermelho parboilizado com 22 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 50°C

O segundo evento térmico ocorre perda de massa de 45,46% até 53,22%. As curvas de DTG evidenciaram decomposição ocorre entre 230,27°C até 350, 79°C. Este evento térmico é o mais importante porque é o evento de degradação do polissacarídeo ocorre por despolimerização na faixa de temperatura indicada.

O terceiro evento térmico ocorre na temperatura acima de 331,28°C e a perda de massa entre 12,72% até 16,48%. Este evento térmico correspondem a eliminação dos resíduos carbonáceos.

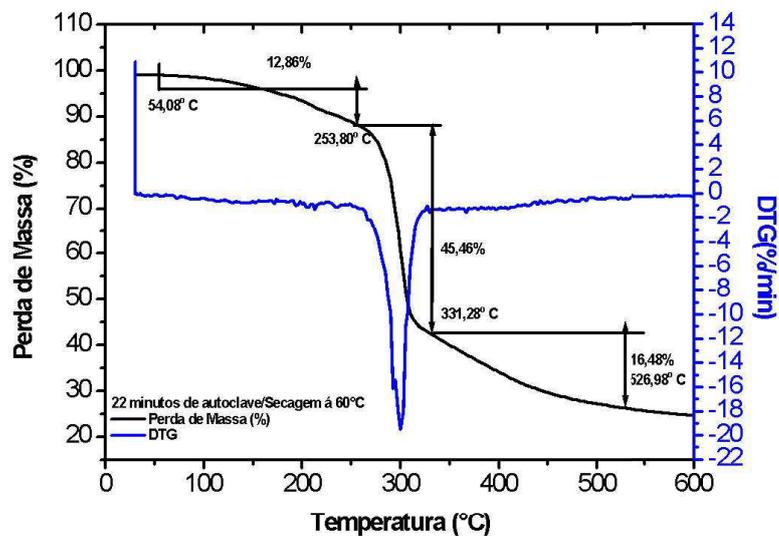


Figura 4. 17- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 22 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 60°C

As Figuras 4.19, 4.20 e 4.21 correspondem às curvas termogravimétrica e sua derivada do arroz vermelho parboilizado com 30 minutos de tempo de autoclave e temperaturas de secagem a 50, 60 e 70 °C, respectivamente. Estas curvas de DTG são bem similares e termicamente estáveis entre 40°C até 254,21°C.

As curvas de DTG evidenciaram o primeiro evento térmico com perda de massa de de 8,913% a 11,29%. Este evento térmico é o característico da desidratação das amostras que ocorre entre 61,54°C até 68,20°C.

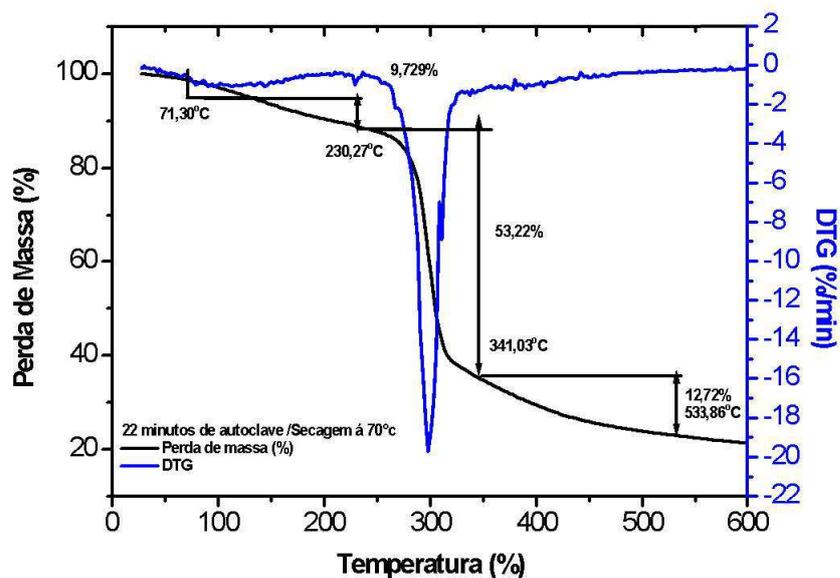


Figura 4. 18- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 22 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 70°C

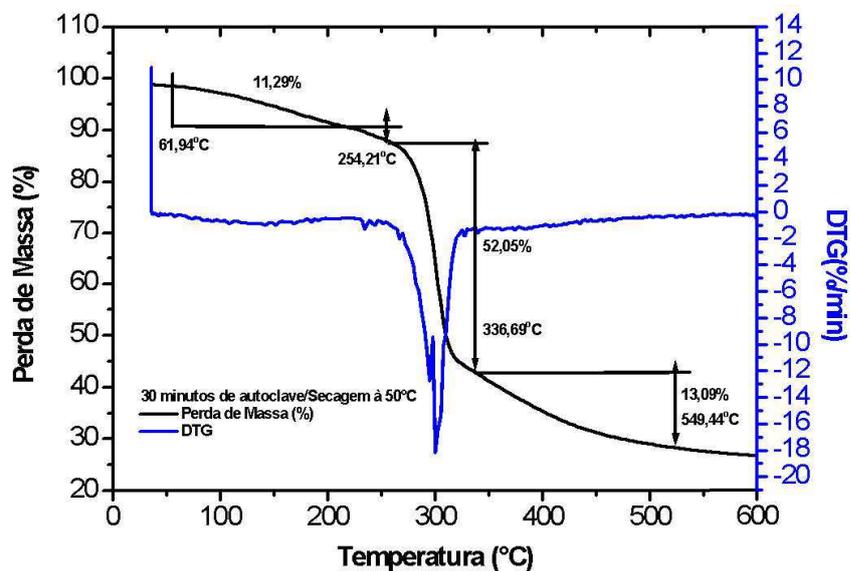


Figura 4. 19- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 30 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 50°C

O segundo evento ocorreu entre 246,24°C até 346,77°C com perda de massa entre 45,00% até 52,05%. Essa etapa de degradação térmica correspondente a máxima de

decomposição do amido presente nas amostras. Observa-se pelas curvas de DTG que esta decomposição máxima é a região de pico da derivada das análises termogravimétricas. O terceiro evento térmico ocorre com perda de massa entre 10, 20% até 13,53% entre 336,69°C até 567,64 °C, para o arroz vermelho submetido a 30 minutos de autoclave e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C.

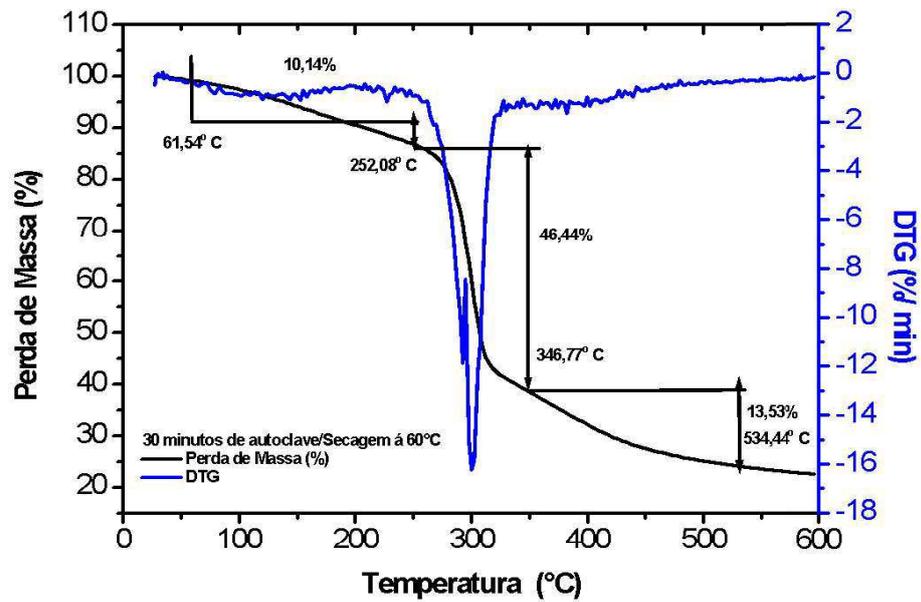


Figura 4. 20- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 30 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 60°C

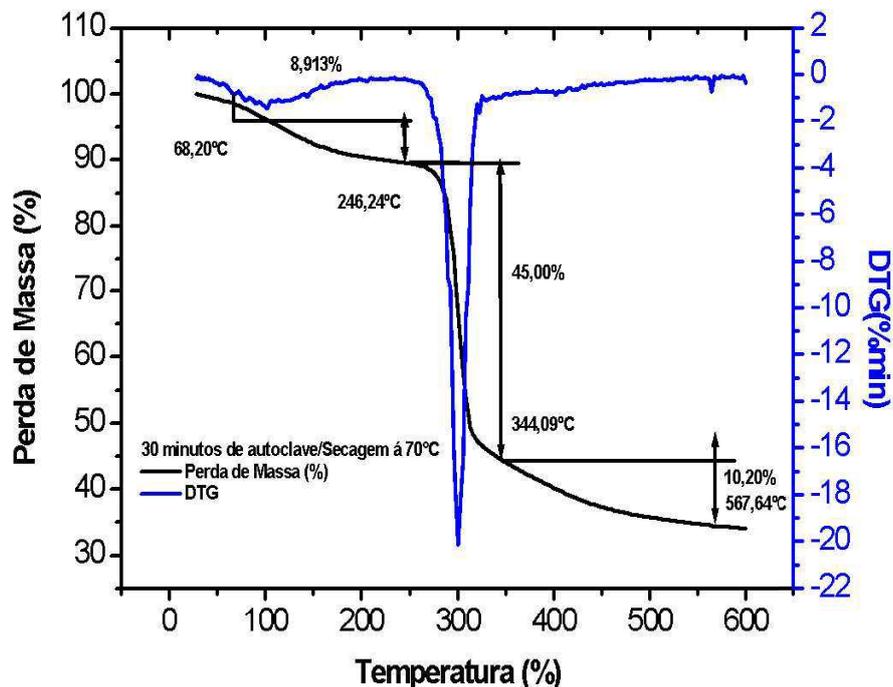


Figura 4. 21- Análise de TG-DTG para o arroz vermelho parboilizado com 30 minutos de permanência em autoclave, seguida de secagem a 70°C

Em suma, a presença dos três eventos térmicos durante a degradação térmica do amido presente nas amostras do arroz vermelho parboilizado também foram encontrados nos estudos de degradação térmica de diferentes fontes de amidos como nas pesquisas realizadas por Beninca et al. (2013), Merci et al. (2019) e Piglowska et al. (2020).

4.7 Análise da Espectroscopia de infravermelho com transformada de fourier (FTIR-ATR) do arroz vermelho parboilizado

A técnica de espectroscopia de absorção na região do infravermelho foi utilizada na identificação, na determinação de grupos funcionais e nos estudos de conformação e estrutura do arroz vermelho hidratado à 55°C, bem como do arroz vermelho submetido ao processo de parboilização nas seguintes condições: 14 minutos de autoclave e secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C; 22 minutos de autoclave e secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C; 30 minutos de autoclave e secagem nas temperaturas de 50, 60 e 70°C.

Na Figura 4.22, observam-se as características do espectro na região do infravermelho para as principais bandas referentes ao arroz vermelho parboilizado, com tempo de permanência em autoclave de 14 minutos e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C e do arroz vermelho hidratado à 55°C.

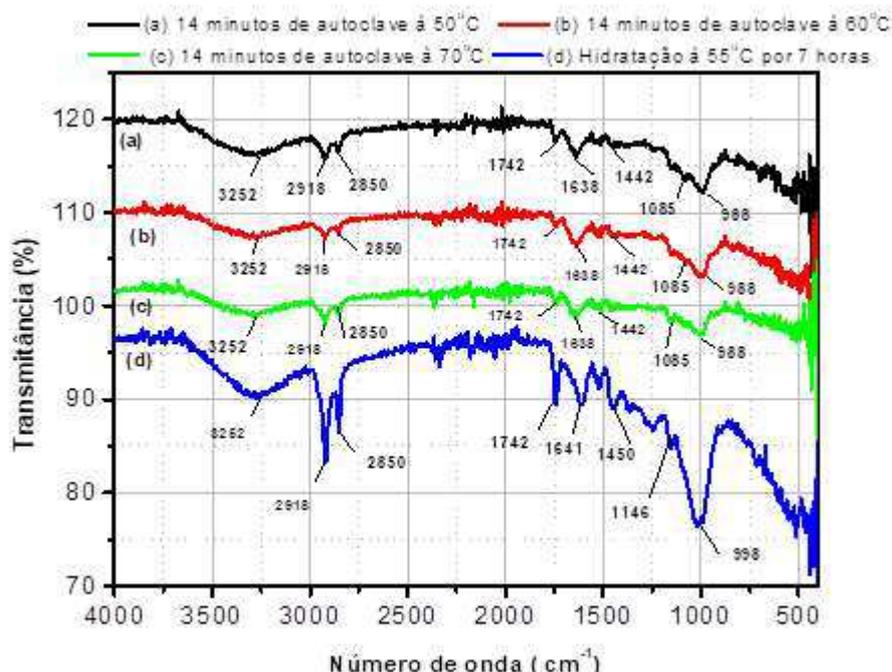


Figura 4. 22- Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho parboilizado e do arroz hidratado: a)14 minutos de autoclave/secagem à 50°C; b) 14 minutos de autoclave/secagem à 60°C; c) 14 minutos de autoclave/secagem à 70°C. d) hidratado à 55°C durante 7 horas.

Para a condição de parboilização de 14 minutos de autoclave e seco nas temperaturas de 50 a 70°C foram observadas as principais bandas nos seus respectivos número de onda: 1641 cm^{-1} , específicas para a deformação axial do grupo -OH; 2918 e 2850 cm^{-1} , as deformações axiais dos grupos C-H assimétrica e simétrica, respectivamente; 1742 cm^{-1} é a banda de deformação do grupo carbonila, 1638 cm^{-1} é a banda correspondente à deformação angular de O-H; em 1442 cm^{-1} é a deformação axial da ligação C-OH e H₂; a banda na região em torno de 988 cm^{-1} são as correspondentes às deformações axiais de C-O em álcoois e a do grupo O-C-O.

As principais diferenças nas bandas verificadas do arroz vermelho hidratado e o arroz parboilizado autoclavado por 14 minutos e seco, estão no deslocamento da banda OH, sendo que, para o arroz parboilizado foi observada uma banda em 16418 cm^{-1} . Já para o arroz vermelho hidratado observou -se uma banda em 1638 cm^{-1} , indicando um deslocamento dos grupos

hidrofilicos (OH). Observa-se também o deslocamento da banda da deformação axial C-OH e CH₂ em 1450 cm⁻¹ do arroz vermelho hidratado para 1442 cm⁻¹ da ligação C-OH e CH₂ do arroz vermelho parboilizado por 14 minutos e seco.

Foram observados os deslocamentos da banda na região 998-1146 cm⁻¹ (arroz vermelho hidratado) para 988-1085 cm⁻¹ (arroz vermelho parboilizado com 14 minutos de autoclave e seco), ambos atribuídos às vibrações de deformação axial de C-O em alcoóis e à vibração de deformação axial do sistema O-C-O, respectivamente.

Na Figura 4.23 estão ilustrados os espectros de infravermelho do arroz vermelho submetido ao processo de parboilização com tempo de permanência em autoclave por 22 minutos e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C. Como também as principais bandas dos grupos funcionais existentes.

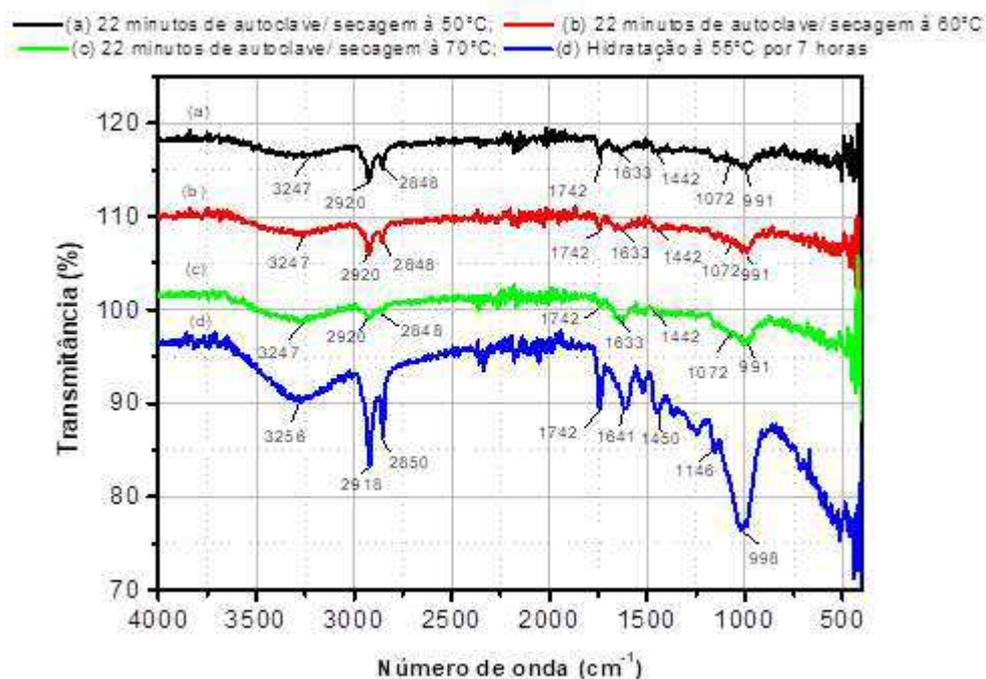


Figura 4. 23 - Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho parboilizado e do arroz vermelho hidratado: a) 22 minutos de autoclave/secagem à 50°C; b) 22 minutos de autoclave/secagem à 60°C; c) 22 minutos de autoclave/secagem à 70°C; d) hidratação à 55°C durante 7 horas.

Diante destes resultados observa-se que houve deslocamento em todas as ligações das bandas do arroz vermelho parboilizado por 22 minutos e seco em relação ao arroz vermelho hidratado.

Os espectros correspondentes ao arroz vermelho hidratado à 55°C, ilustram os deslocamentos nas vibrações das bandas correspondentes, ao estiramento C-H, nas regiões de

2918-2850 cm^{-1} para 2920- 2848 cm^{-1} nas bandas do arroz vermelho parboilizado por 22 minutos e seco; em 1641 cm^{-1} ocorreu a deformação angular da água do arroz vermelho hidratado à 55°C e, em 1633 cm^{-1} , ocorreu o deslocamento da deformação angular da água do arroz vermelho parboilizado por 22 minutos e seco. Os picos em 1450 cm^{-1} é a banda correspondente ao grupo C-OH e CH_2 do arroz vermelho hidratado que ocorreu o deslocamento desta banda para 1442 cm^{-1} em relação ao arroz vermelho parboilizado a 22 minutos e seco. A banda em 998 cm^{-1} é atribuída à deformação C-O em álcool e a banda em 1146 cm^{-1} é a deformação axial do éter (O-C-O), correspondentes ao arroz hidratado. Observa-se que para estas bandas correspondentes ao grupo álcool e éter houve o deslocamento para 991-1072 cm^{-1} nas amostras do arroz vermelho parboilizado por 22 minutos e seco.

Na Figura 4.24, observam-se as características dos espectros de FTIR-ATR para o arroz vermelho submetido ao processo de parboilização, com tempo de permanência em autoclave de 30 minutos e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C em relação a FTIR -ATR do arroz vermelho hidratado à 55°C.

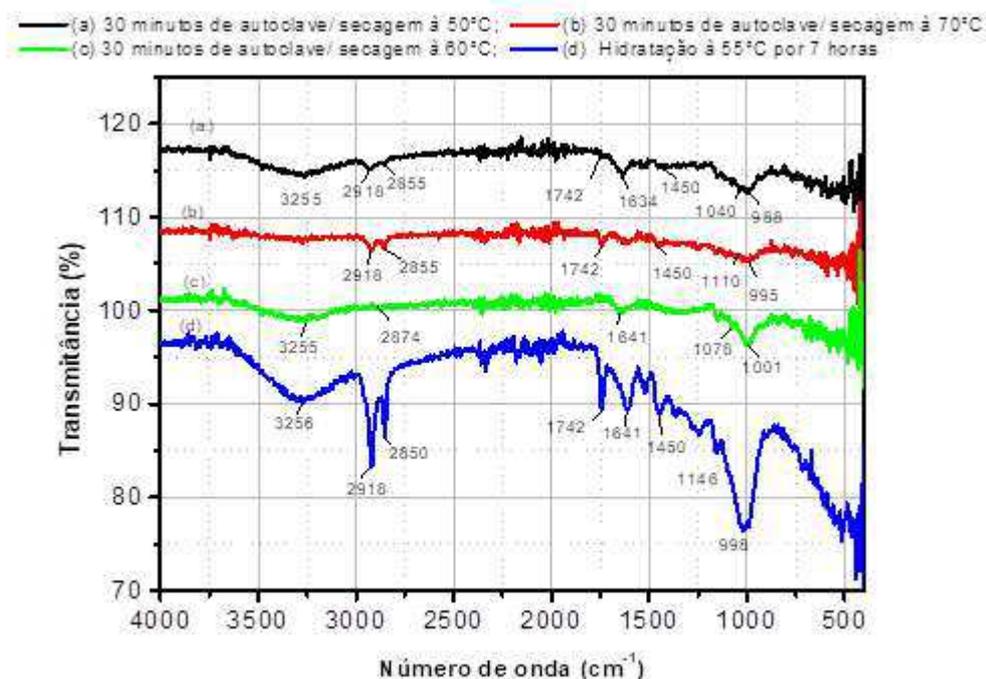


Figura 4. 24- Espectros de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho parboilizado e do arroz vermelho hidratado: a) 30 minutos de autoclave/secagem à 50°C; b) 30 minutos de autoclave/secagem à 60°C; c) 30 minutos de autoclave/secagem à 70°C; d) hidratação à 55°C durante 7 horas

Observa-se que há diferenças significativas entre as principais bandas dos grupos funcionais entre o arroz hidratado e o arroz vermelho parboilizado por 30 minutos e seco. A principal diferença ocorreu com o arroz vermelho parboilizado por 30 minutos e seco à 70°C, porque ocorreu a eliminação dos grupos hidrofílicos em 3255 cm^{-1} , da ligação C-H em 2918 cm^{-1} e da ligação angular da água em 1641 cm^{-1} . Em relação ao arroz vermelho parboilizado 30 minutos e seco à 60°C observa-se a eliminação dos grupos funcionais da carbonila em 1742 cm^{-1} e da ligação C-OH e CH₂ em 1450 cm^{-1} . Todavia, a comparação do arroz vermelho parboilizado em 30 minutos de autoclave e seco à 50°C em comparação com o arroz hidratado observa-se o deslocamento nos grupos funcionais em 1641 cm^{-1} para 1634 cm^{-1} correspondente a deformação da ligação angular da água e dos grupos éter e álcool de 1146-998 cm^{-1} para 1040-988 cm^{-1} .

4.8 Análise morfológica por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do arroz parboilizado

Na Figura 4.25 encontram-se ilustradas as micrografias do arroz vermelho parboilizado em autoclave durante 14, 22 e 30 minutos e submetidos ao processo de secagem nas temperaturas 50, 60 e 70°C. Observa-se que há diferenças na estrutura morfológica do arroz vermelho sem casca ao submetê-lo aos diferentes tempos de autoclave (14, 22 e 30 minutos) e temperaturas de secagem (50, 60 e 70°C).

Observa-se que a vaporização do arroz vermelho, com tempo de permanência em autoclave de 14, 22 e 30 minutos, proporciona a ruptura dos complexos de amido e as moléculas, conseqüentemente, adotam orientação aleatória, permitindo que fissuras e espaços intermoleculares no grão sejam preenchidos, possibilitando uma estrutura sólida e de alto grau de compactação (SITTIPOD & SHI (2016), BALBINOTI et al. (2018)^{a, b}).

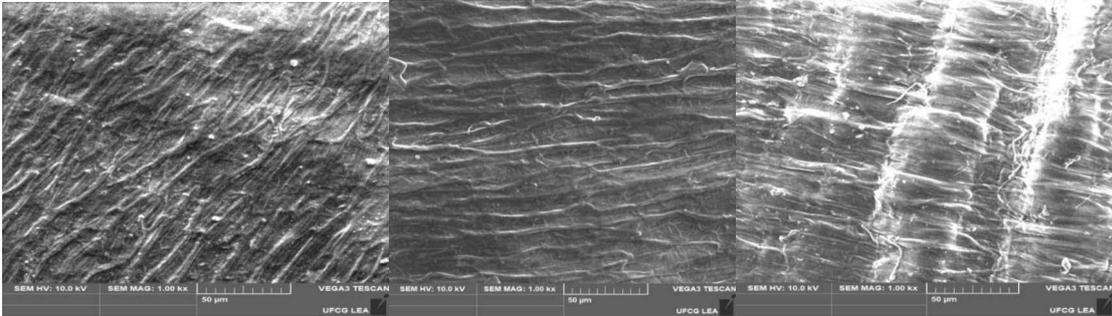
Diante dessas micrografias, observa-se que o arroz vermelho parboilizado, atingiram a gelatinização completa do amido. Também observa-se que o tempo de vaporização (tempo de autoclave) de 14, 22 e 30 minutos e a temperatura de secagem 50, 60 e 70°C intensificam a modificação da estrutura amilácea do amido, confirmando os resultados de Lamberts et. al. (2009) e Sittipod & Shi (2016).

Autoclave por 14 minutos

50°C

60°C

70°C

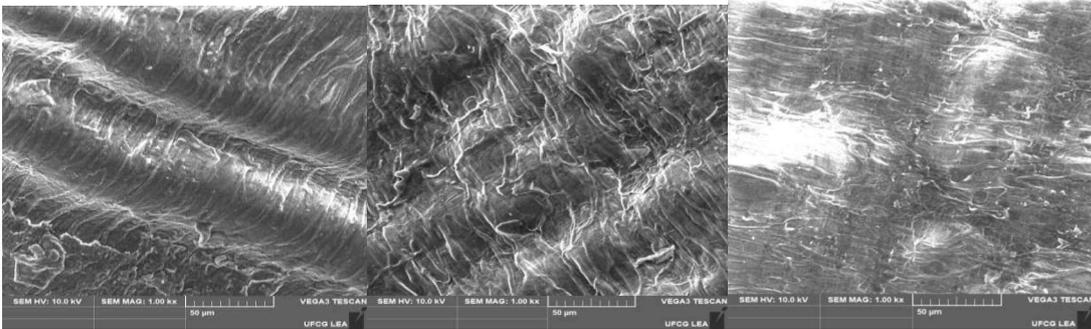


Autoclave por 22 minutos

50°C

60°C

70°C



Autoclave por 30 minutos

50°C

60°C

70°C

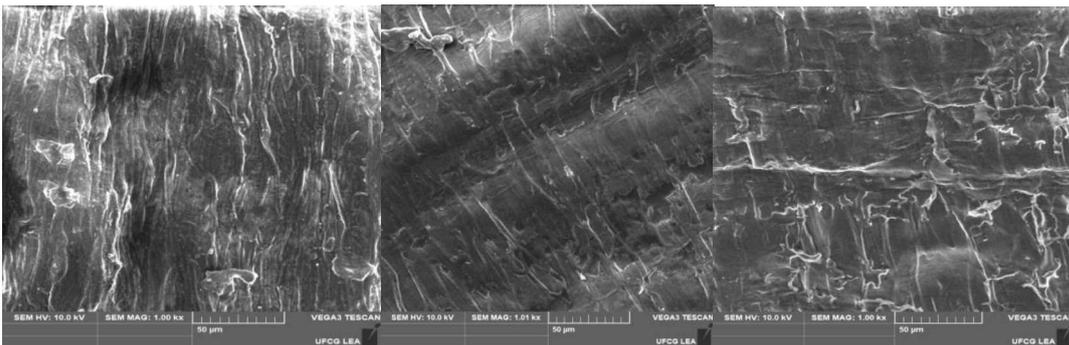


Figura 4. 25 - Micrografias da estrutura morfológica do arroz vermelho ao longo do processo de parboilização com tempo de permanência em autoclave por 14, 22 e 30 minutos e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C ampliação de 1kx

4.9 Modelagem Matemática da secagem do arroz vermelho parboilizado

Na Tabela 4.6 encontram-se as condições de secagem do arroz vermelho após o período de tempo de permanência na autoclave a 1kgf/cm^2 a 120°C . Observe que nesta tabela também constam os dados do teor de água de equilíbrio para cada condição de secagem, que implica em dados onde a secagem se encerra.

Tabela 4.6 - Condições do ar de secagem e do arroz vermelho no início do processo, após diferentes períodos de permanência em autoclave

Nomenclatura	Tempo								
	14 minutos			22 minutos			30 minutos		
Temperatura ($^\circ\text{C}$)	50	60	70	50	60	70	50	60	70
Umidade Relativa (decimal)	0,27	0,18	0,115	0,27	0,18	0,115	0,27	0,18	0,115
Teor de água inicial (% base úmida)	33,8	33,8	33,8	35,4	35,4	35,4	37,3	37,3	37,3
Teor de água inicial (% base seca)	51,1	51,1	51,1	54,8	54,8	54,8	59,5	59,5	59,5
Teor de água de equilíbrio (% base seca)	6,24	4,75	3,58	6,24	4,75	3,58	6,24	4,75	3,58

4.9.1 Secagem do arroz vermelho parboilizado e seus modelos

Os dados experimentais da secagem do arroz vermelho parboilizado para os diferentes tempos de parboilização em autoclave, 14, 22 e 30 minutos estão respectivamente na Figuras 4.40, 4.41 e 4.42.

O raio equivalente foi calculado, considerando uma massa de 100 grãos de arroz vermelho hidratado por 7 horas. A média do raio equivalente do arroz vermelho foi igual a $1,4253 \pm 0,0527$ mm.

As Figuras de 4.26 a 4.28 correspondem, respectivamente a equação de Fick com 6 termos da série para os tempos de autoclavagem do arroz de 14, 22 e 30 minutos e nas Tabelas 4.17 até 4.22 encontram-se os valores das difusividades efetivas do processo de secagem de arroz vermelho obtido pelo Modelo de Fick, para as temperaturas de 50°C , 60°C e 70°C , considerando-se até o 6º termo da série.

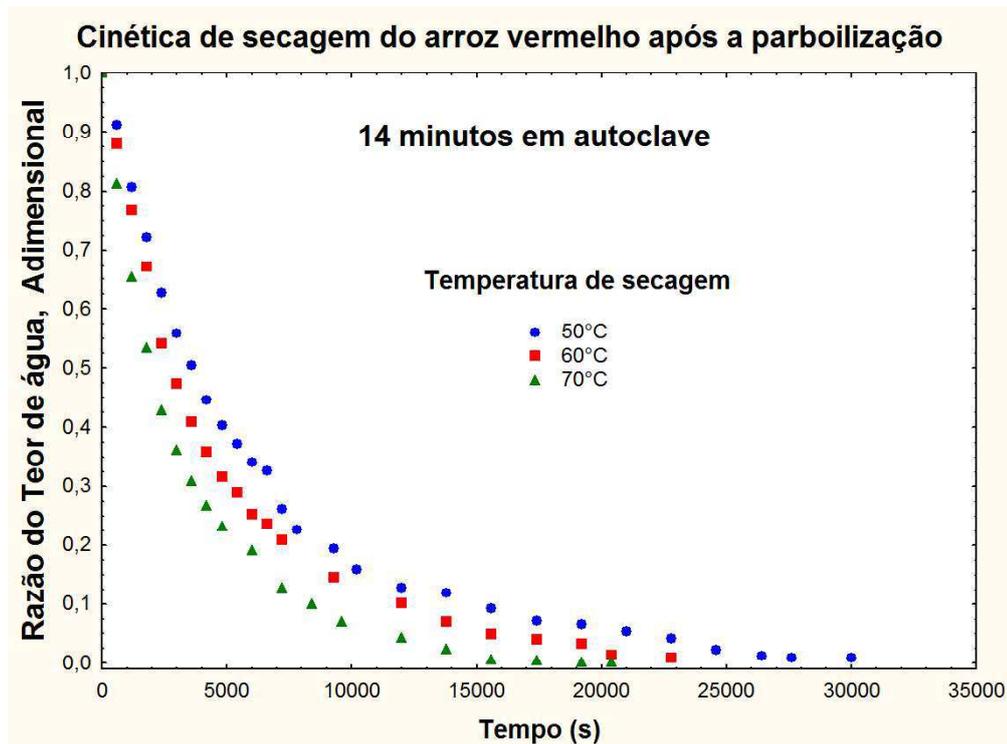


Figura 4.26 - Dados experimentais da secagem do arroz vermelho em função do tempo de parboilização – 14 minutos

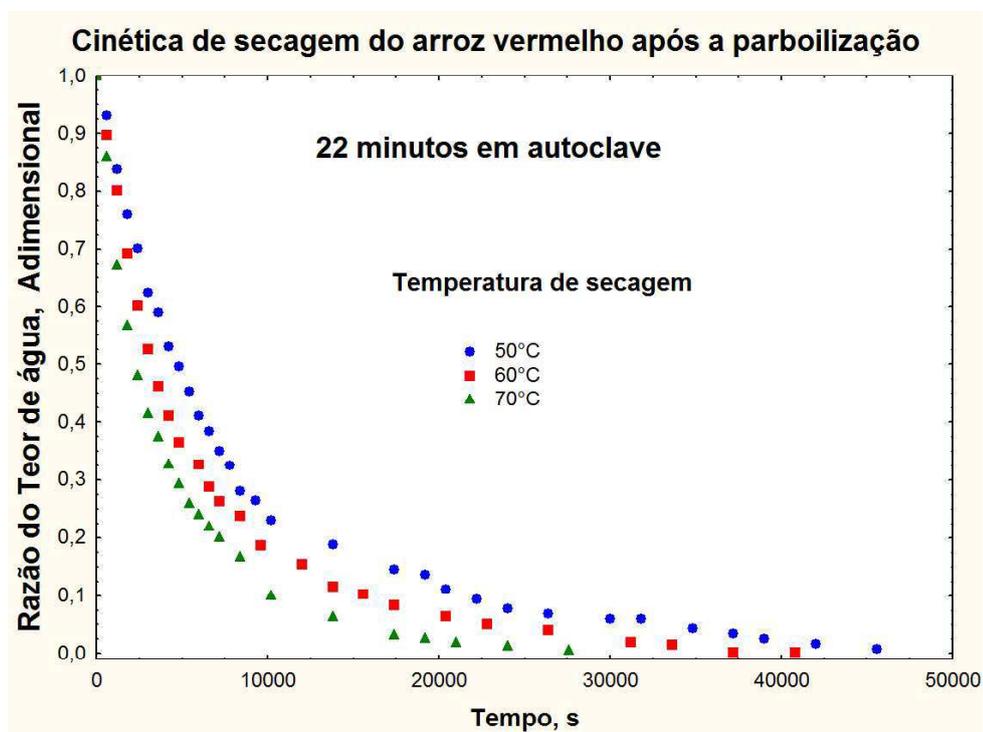


Figura 4. 27 -Dados experimentais da secagem do arroz vermelho em função do tempo de parboilização – 22 minutos

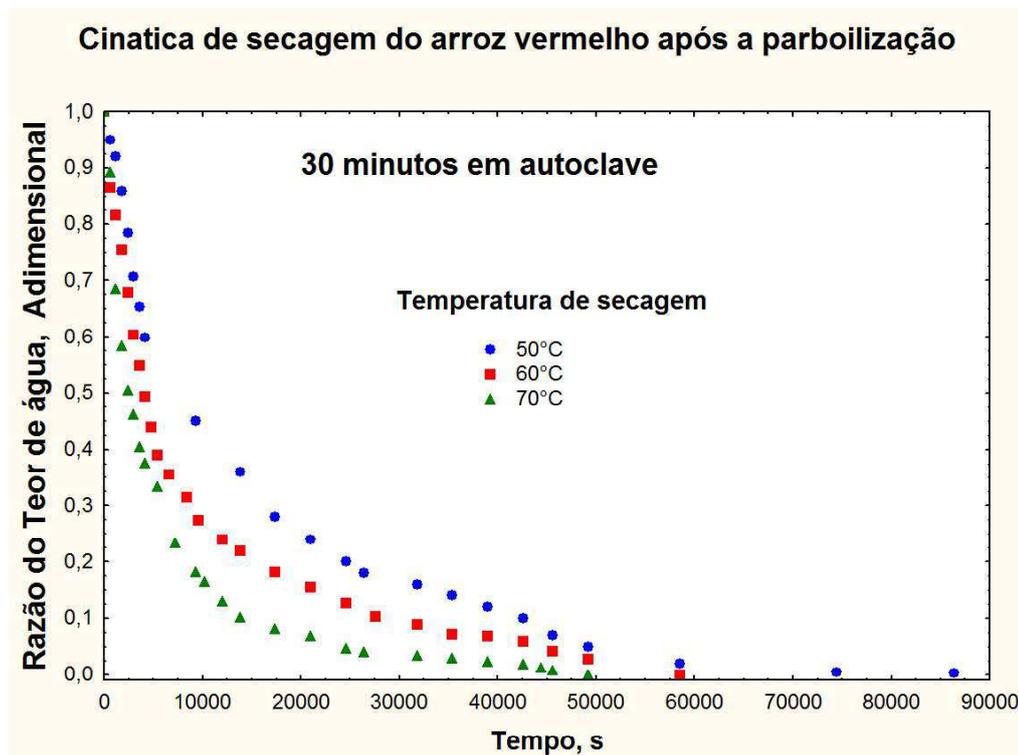


Figura 4.28 - Dados experimentais da secagem do arroz vermelho em função do tempo de parboilização – 30 minutos

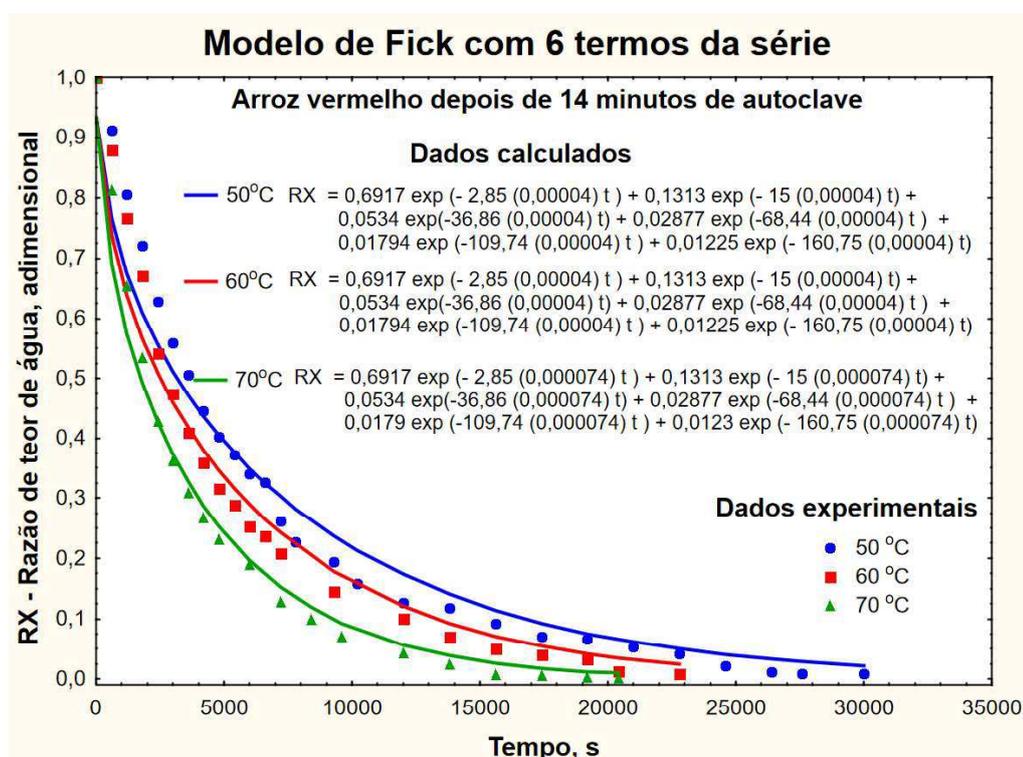


Figura 4.29 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, de acordo com o modelo de Fick com 6 termos da série

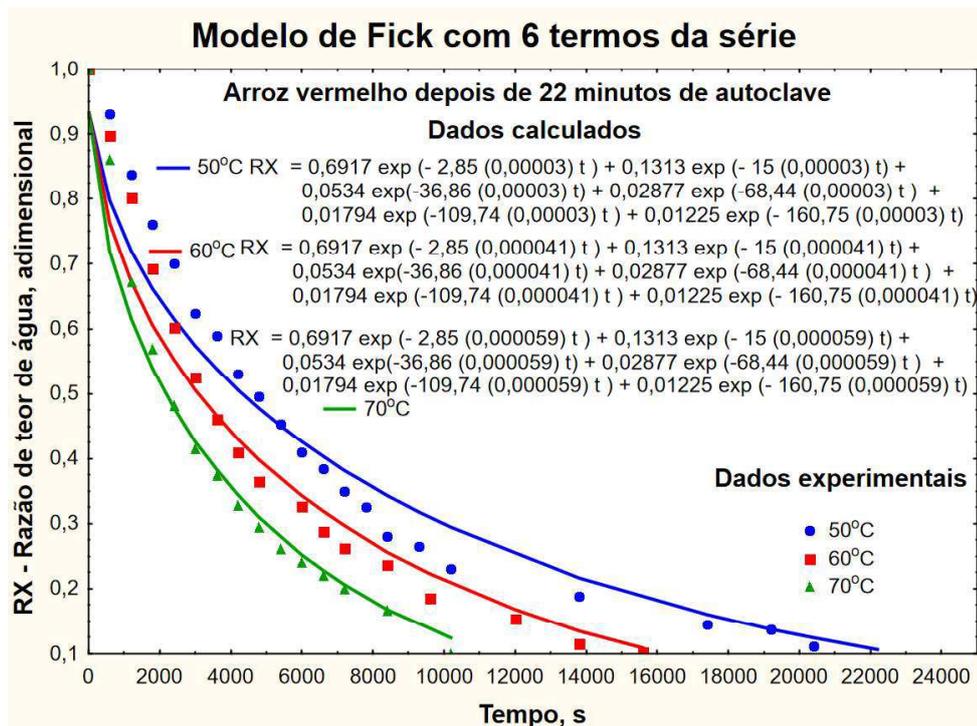


Figura 4.30- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, de acordo com o modelo de Fick com 6 termos da série

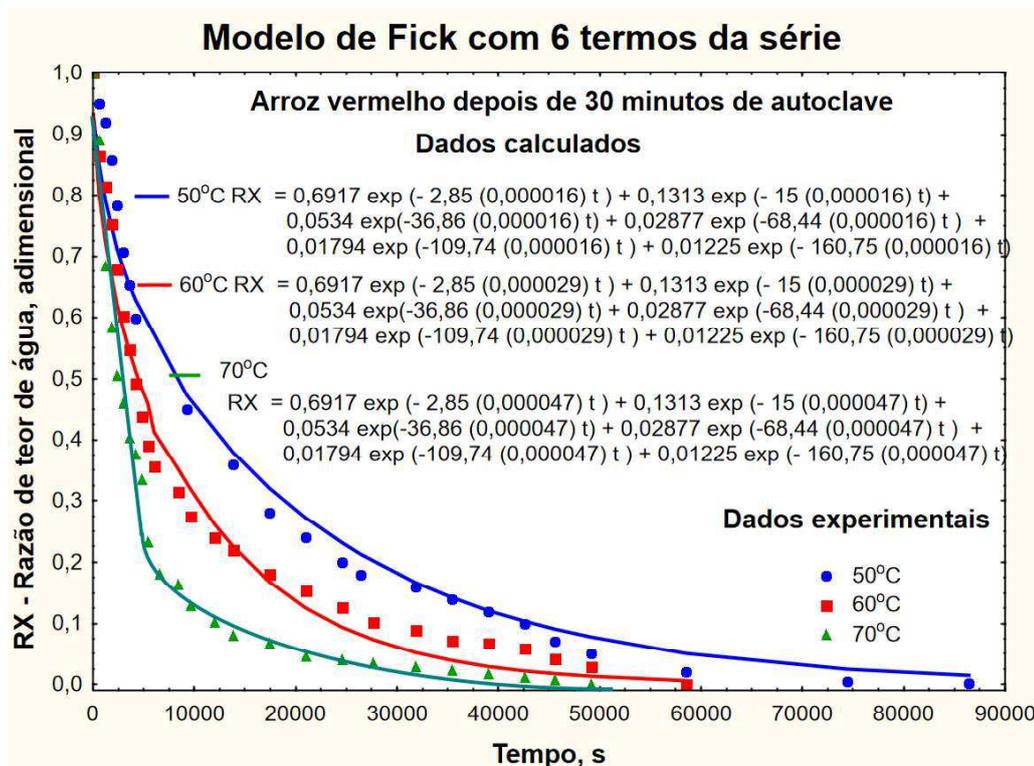


Figura 4.31- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, de acordo com o modelo de Fick com 6 termos da série

autoclave, às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, de acordo com o modelo de Fick com 6 termos da série

Tabela 4.7 – Valores da difusividade efetiva, obtidos em função do 1° ao 6° termos da série utilizando o modelo Fick, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e tempo de parboilizado do arroz vermelho em casca em autoclave por 14 minutos

T (°C)	Modelo de Fick					
	$RX = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left(-\frac{\lambda_n^2}{r_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t\right)$					
	Parâmetros					
	1°		2°		3°	
$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	
50	0,000044	87,84	0,000044	94,31	0,000040	95,90
60	0,000050	87,45	0,000050	94,45	0,000052	95,80
70	0,000076	89,91	0,000076	95,99	0,000074	97,28
			Parâmetros			
	4°		5°		6°	
T(°C)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)
50	0,000035	93,49	0,000039	93,80	0,000040	96,50
60	0,000044	93,48	0,000044	93,84	0,000040	96,51
70	0,000063	95,54	0,000063	95,93	0,000074	98,01

Tabela 4.8 – Valores da difusividade efetiva, obtidos em função do 1º ao 6º termos da série utilizando o modelo Fick, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e tempo de parboilizado do arroz vermelho em casca em autoclave por 22 minutos

T (°C)	Modelo de Fick					
	$RX = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left(-\frac{\lambda_n^2}{r_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t\right)$					
	Parâmetros					
	1º		2º		3º	
	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)
50	0,000032	88,36	0,000032	95,05	0,000029	96,51
60	0,000044	88,79	0,000044	95,29	0,000041	96,73
70	0,000054	89,38	0,000054	95,75	0,000059	97,37
T(°C)	Parâmetros					
	4º		5º		6º	
	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)
50	0,000025	94,56	0,000025	94,87	0,000003	97,10
60	0,000035	94,92	0,000035	95,24	0,000041	97,35
70	0,000050	95,81	0,000050	96,21	0,000059	98,12

Tabela 4.9 – Valores da difusividade efetiva, obtidos em função do 1º ao 6º termos da série utilizando o modelo Fick, nas temperaturas de 50, 60 e 70°C e tempo de parboilizado do arroz vermelho em casca em autoclave por 30 minutos

T (°C)	Modelo de Fick					
	$RX = \sum_{n=1}^{\infty} \frac{4}{\lambda_n^2} \exp\left(-\frac{\lambda_n^2}{r_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t\right)$					
	Parâmetros					
	1º		2º		3º	
	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)
50	0,000012	84,95	0,000016	95,37	0,000016	96,04
60	0,000032	88,29	0,000028	95,76	0,000028	96,98
70	0,000044	91,19	0,000048	96,58	0,000048	97,70
			Parâmetros			
	4º		5º		6º	
	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)	$D_{ef} \cdot$ (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)
50	0,000014	95,25	0,000013	95,58	0,000016	97,78
60	0,000023	96,16	0,000022	96,48	0,000029	97,60
70	0,000039	96,85	0,000039	97,18	0,000047	98,33

Constata-se nessas Tabelas de 4.7 a 4.9 que o coeficiente de difusividade efetiva é alterado não só em função da temperatura, mas também em função do tempo de autoclavagem do arroz vermelho. Os valores da difusividade efetiva diminuem na medida em que se aumenta o tempo de autoclavagem de 14 minutos para 30 minutos. Contata-se também que a difusividade efetiva do arroz vermelho, no sexto termo da série, com 14 minutos de autoclavagem varia de 0,00004 mm²s⁻¹ a 0,000074 mm²s⁻¹, em função do aumento da temperatura de secagem de 50 para 70°C.

Para 22 minutos de autoclavagem a difusividade efetiva no sexto termo da série, varia de 0,00003 mm²s⁻¹ a 0,000059 mm²s⁻¹, em função do aumento da temperatura de secagem de 50 para 70°C e para 30 minutos de autoclavagem essa difusividade efetiva varia de 0,000016 mm²s⁻¹ a 0,000047 mm²s⁻¹.

Na Tabela 4.7, encontra-se a evolução dos parâmetros de secagem e dos coeficientes de determinação da secagem de arroz vermelho depois de 14 minutos de autoclavagem, percebe-

se que existe uma melhoria do coeficiente de determinação indo de 87,45% a 89,91% com o 1º termo da série e entre 96,5 a 98,01%, no 6º termo da série.

Similar evolução é notada na Tabela 4.8, correspondente ao coeficiente de determinação do processo de secagem do arroz vermelho depois de 30 minutos de autoclavagem, onde com o 1º termo da série o coeficiente de determinação variou de 88,36 a 89,38% em função da temperatura e com o 6º termo da série essa variação ocorre entre 97,1% a 98,12%.

Na Tabela 4.9 contém a evolução dos coeficientes de determinação da secagem de arroz vermelho depois de 30 minutos de autoclavagem, e estes coeficientes vão de 84,95 a 91,19% no 1º termo da série e de 97,6 para 98,33%, com o 6º termo da série.

Para melhor visualização do processo de secagem do arroz vermelho levando-se em consideração o uso de até 6 termos da série, foram elaboradas as Figuras 4.32, 4.33 e 4.34 de modo a dar uma maior percepção do comportamento da difusividade efetiva na medida em que se acrescentam um maior termos da série.

É possível perceber que as alterações na difusividade efetiva ocorrem, contudo elas não configuram um diferencial notável. Essas diferenças se caracterizam em valores oscilatórios que retornam, na maioria dos casos, a um valor próximo do valor inicial, embora o aumento do número de termos da série aumente o coeficiente de determinação.

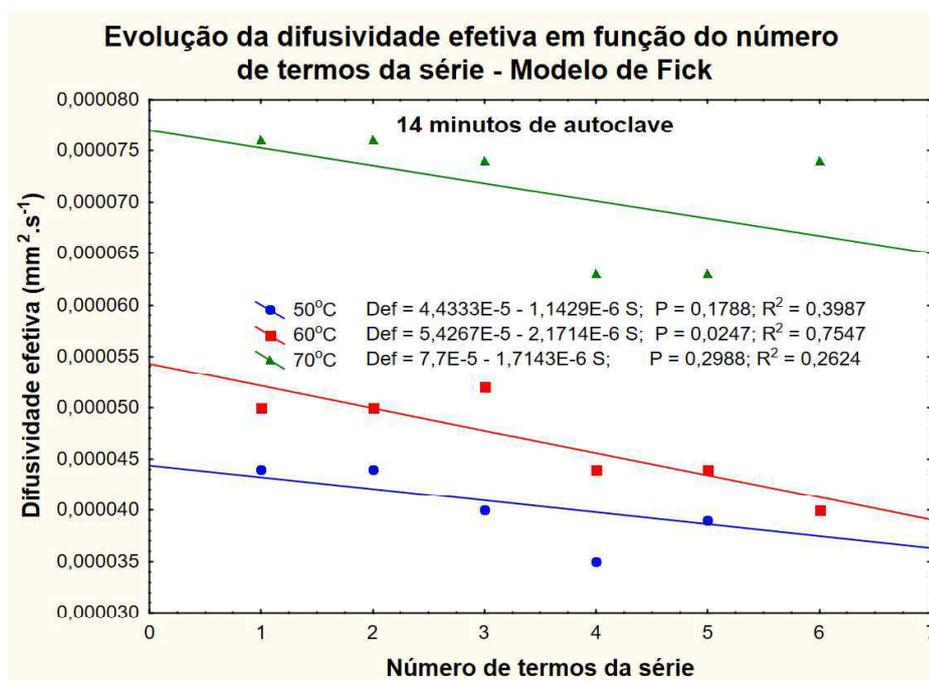


Figura 4.32 - Valores da difusividade efetiva do processo de secagem do arroz vermelho parboilizado às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, em função do número de termos da série do modelo de Fick, tendo os grãos um tempo autoclavagem de 14 minutos

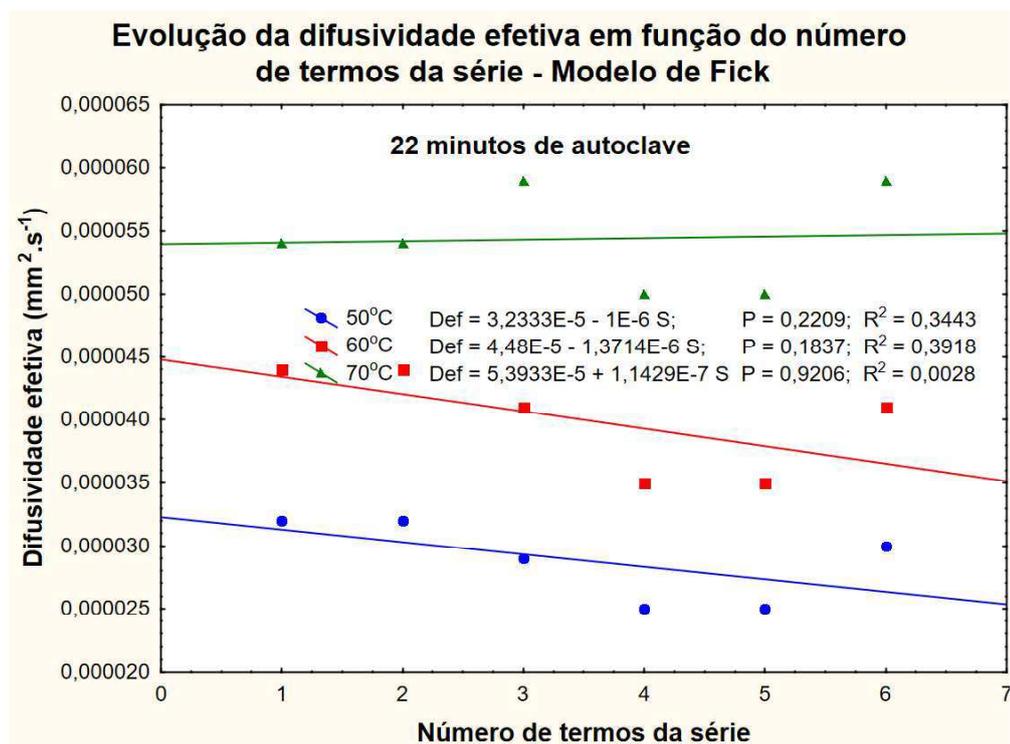


Figura 4.33 - Valores da difusividade efetiva do processo de secagem do arroz vermelho parboilizado às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, em função do número de termos da série do modelo de Fick, tendo os grãos um tempo autoclavagem de 22 minutos

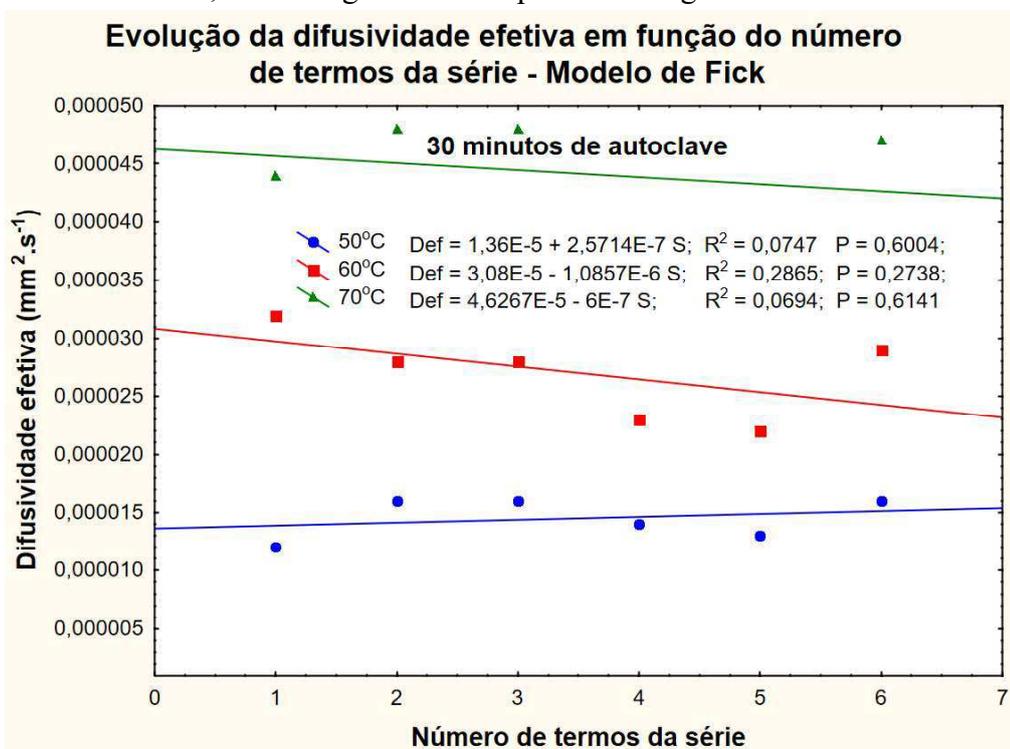


Figura 4.34 - Valores da difusividade efetiva do processo de secagem do arroz vermelho parboilizado às temperaturas de secagem de 50, 60 e 70 °C, em função do número de termos da série do modelo de Fick, tendo os grãos um tempo autoclavagem de 30 minutos

Essa observação enseja em uma afirmativa, onde o número de termos dá mais fidelidade do comportamento das curvas em relação aos seus dados experimentais, mas tem pouco reflexo sobre a sua curvatura. No entanto, tal afirmativa só pode ser feita até o sexto termo da série, pois na medida em que avance o número termos da série o valor para $t = 0$, este deverá tender a $RX = 1,0$ o que evidenciará uma mudança de curvatura com reflexo na difusividade efetiva.

4.9.2 Análise da difusividade efetiva para os diferentes modelos matemáticos derivados do Modelo de Fick

Nas Figuras 4.35 a 4.37 estão os dados experimentais e os calculados de secagem do arroz vermelho para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C e três tempos de autoclavagem (14, 22 e 30 minutos), utilizando-se o modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata, e na Tabela 4.10 estão os parâmetros do modelo proposto, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2). Percebe-se que os coeficientes de determinação são quase todos superiores aos obtidos pelo Modelo de Fick utilizando 6 termos da série. Contudo, foram identificados que as temperaturas de 60 e 70°C com o arroz parboilizado na autoclave por 30 minutos os coeficientes de determinação do Modelo Fick utilizando-se 6 termos da série são superiores ao do Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata (2018). Constatam-se também, nessa Tabela, que a difusividade efetiva encontram-se na mesma ordem de grandeza das obtidas pelo Modelo de Fick com 6 termos da série, seguindo a mesma a tendência de aumento da difusividade efetiva (Def) com o aumento da temperatura, assim como a redução dessa difusividade efetiva com a elevação do tempo de autoclave do arroz.

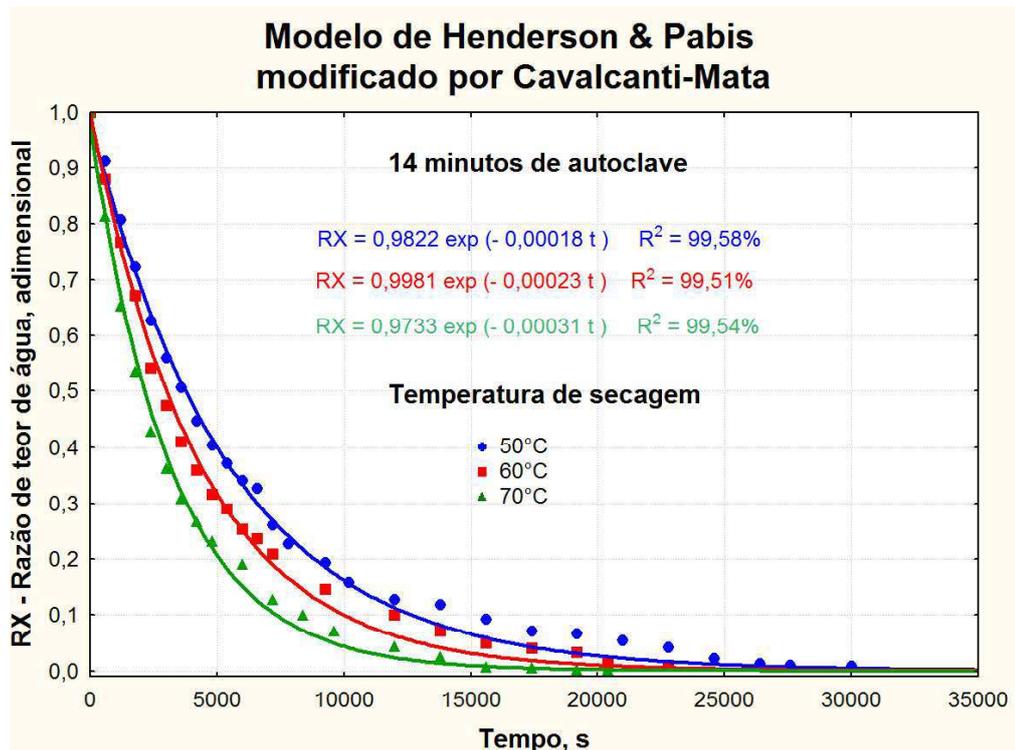


Figura 4.35 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti-Mata

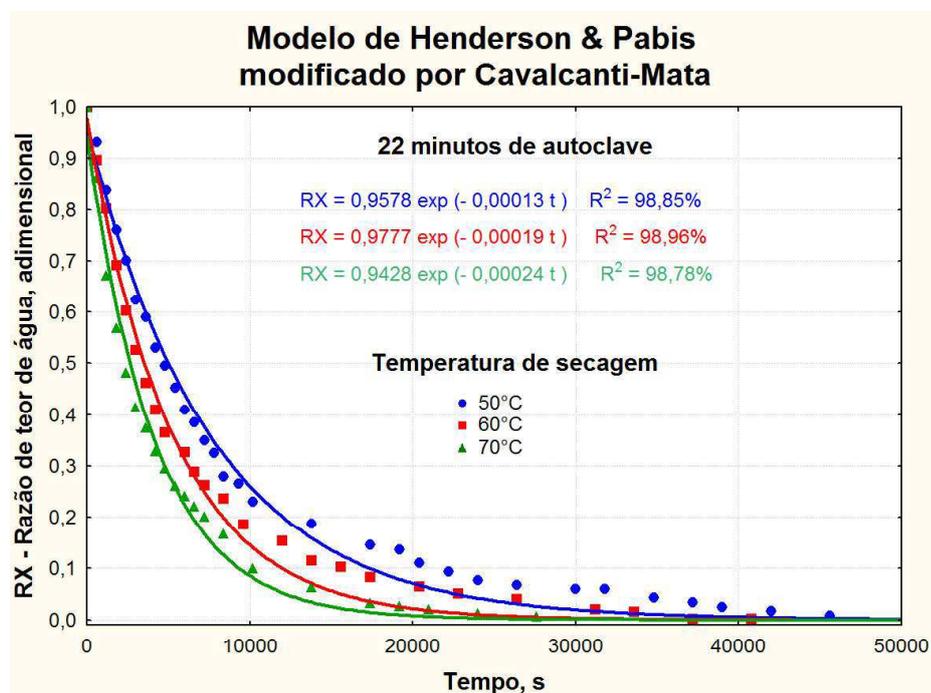


Figura 4.36- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti-Mata

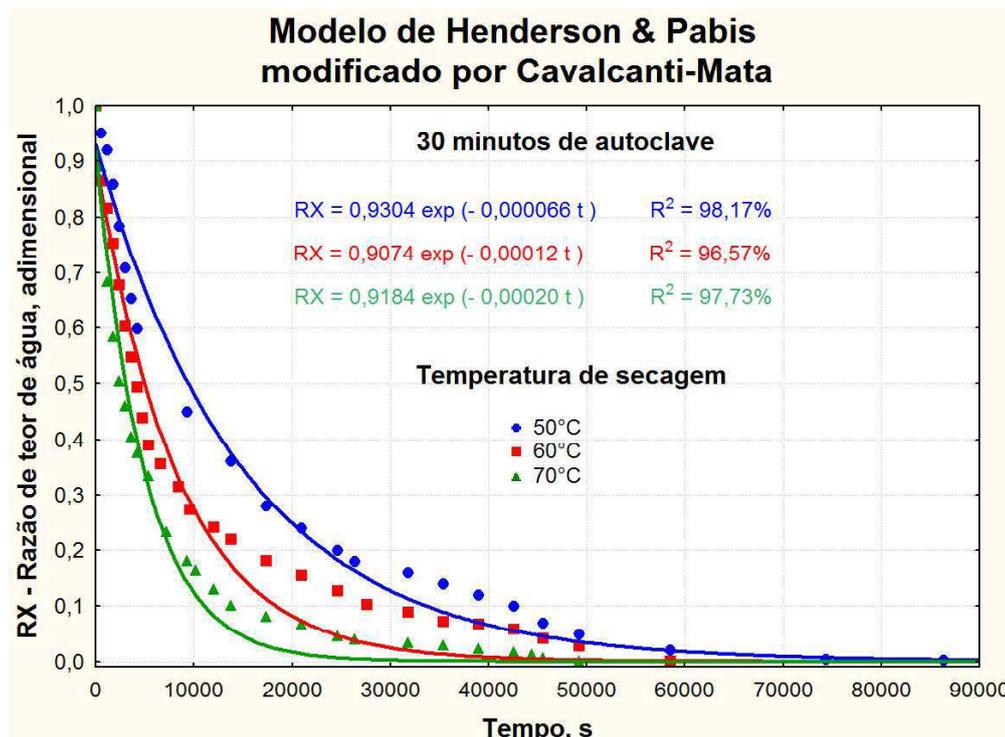


Figura 4.37- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti-Mata

Tabela 4.10– Parâmetros do modelo proposto por Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti- Mata, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave

Tempo de Auto clave (minutos)	Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti- Mata					
	$RX = A \exp\left(-\frac{\lambda_1^2}{r_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t\right)$					
	Parâmetros					
	T (°C)	A	K	$\frac{2,4048^2}{1,4253_e^2}$	Def (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)
14	50	0,9822	0,00018	2,8467	0,0000632	99,58
	60	0,9981	0,00023	2,8467	0,0000808	99,51
	70	0,9733	0,00031	2,8467	0,0001089	99,54
22	50	0,9578	0,00013	2,8467	0,0000457	98,85
	60	0,9777	0,00019	2,8467	0,0000667	98,96
	70	0,9428	0,00024	2,8467	0,0000843	98,78
30	50	0,9304	0,000066	2,8467	0,0000232	98,17
	60	0,9074	0,00012	2,8467	0,0000422	96,57
	70	0,9184	0,00020	2,8467	0,0000703	97,73

A cinética de secagem do arroz vermelho utilizando-se o Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata, para as três de temperaturas (50, 60 e 70 °C) e três períodos de parboilização (14, 22 e 30 minutos), estão nas Figuras 4.38 a 4.40 e a difusividade efetiva e os coeficientes de determinação dessas equações estão na Tabela 4.11.

Nas Figuras 4.38 a 4.40 e na Tabela 4.11, constata-se que os coeficientes de determinação do Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata são superiores aos outros dois modelos (Fick com 6 termos da série e Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata), implicando em dizer que o Modelo de Page modificado representa melhor os dados experimentais. Nota-se também que os valores de difusividade efetiva seguem a mesma tendência dos 2 outros modelos, ou seja de aumento da difusividade efetiva com o aumento da temperatura, contudo os valores embora em mesma ordem de grandeza, são superiores aos encontrados nos outros 2 modelos.

Enquanto no modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata os valores da difusividade efetiva varia de $6,32 \cdot 10^{-5}$ a $10,89 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$ para as respectivas temperaturas de 50 a 70°C, representando as difusividades mais elevadas na condição do arroz parboilizado por 14 minutos em autoclave e de $2,32 \cdot 10^{-5}$ a $7,03 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente para as temperaturas de 50 a 70°C, representando as menores difusividades na condição do arroz parboilizado por 30 minutos; no modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata as difusividades são de $24,6 \cdot 10^{-5}$ a $44,0 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, respectivamente para as temperaturas de 50 a 70°C na condição do arroz parboilizado por 14 minutos em autoclave e de $13,8$ a $34,0 \cdot 10^{-5} \text{ mm}^2 \text{ s}^{-1}$, na condição do arroz parboilizado por 30 minutos em autoclave. Assim, é possível perceber que os valores da difusividade em ambos os modelos (Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata e Page modificado por Cavalcanti Mata), decrescem com o aumento do tempo de parboilização.

Este fato pode ser explicado uma vez que o teor de água inicial após 14 minutos de autoclave foi de 51,1% b.s e é inferior ao teor de água inicial do arroz vermelho com 30 minutos de parboilização em autoclave que foi de 59,5% b.s.. Este fato também foi observado por Dors et al. (2009) quando estudou a influência das condições de parboilização na composição química do arroz. Os autores estudaram o tempo de autoclavagem 15 minutos, 22,5 e 30 minutos a uma pressão de 1 atmosfera a 120°C na autoclave, e constataram que houve uma diferença significativa do parâmetro tempo de autoclavagem no teor de água, tendo este teor aumentado com o aumento do tempo do grão de arroz na autoclave.

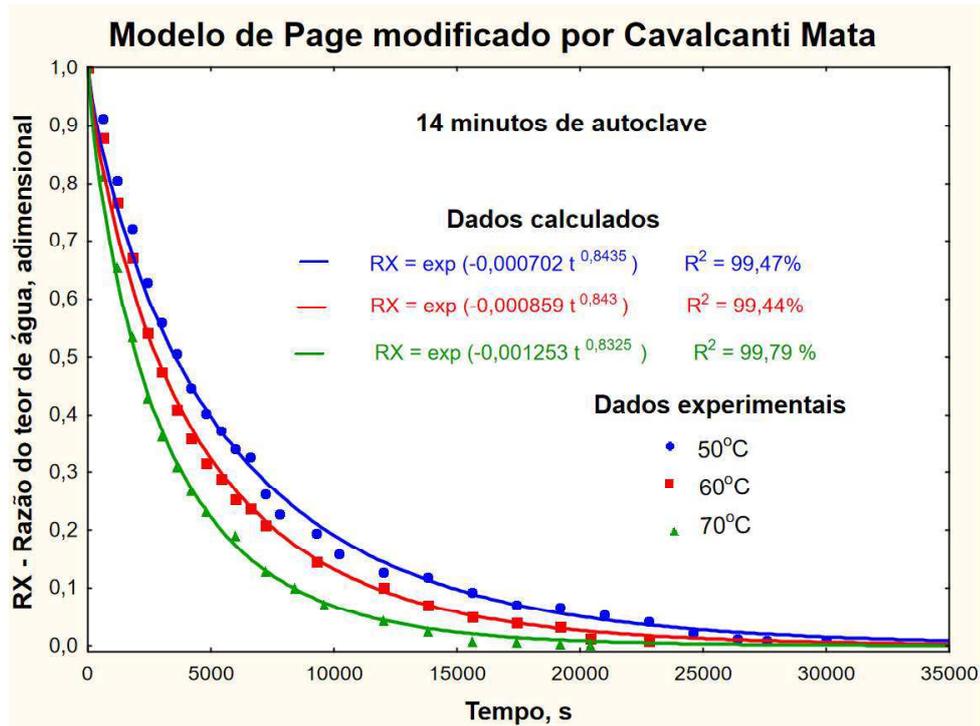


Figura 4.38- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata

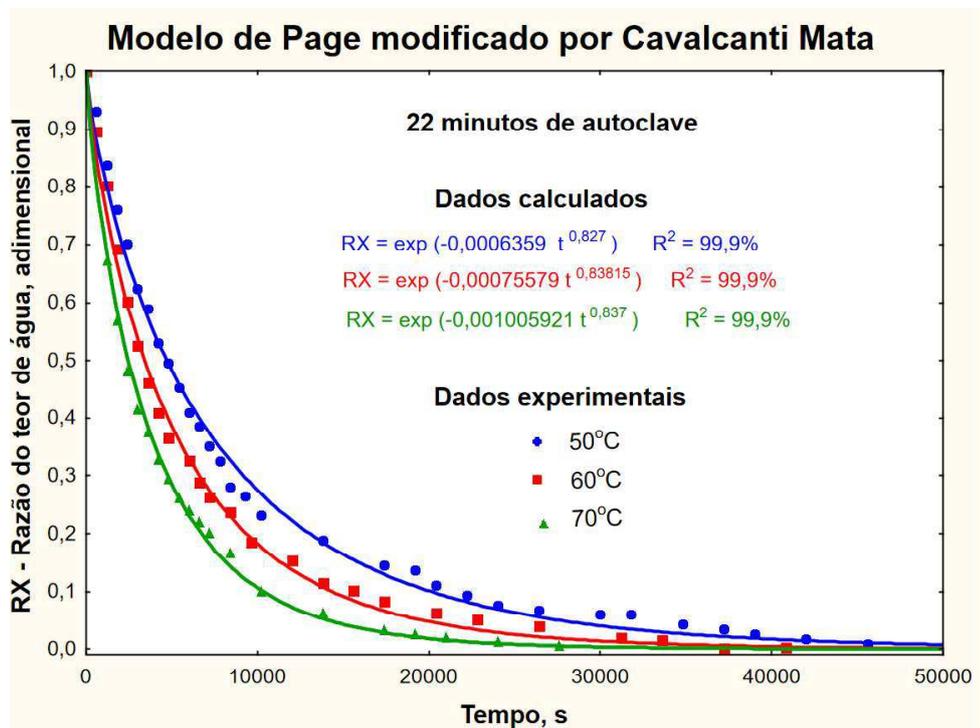


Figura 4.39- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata

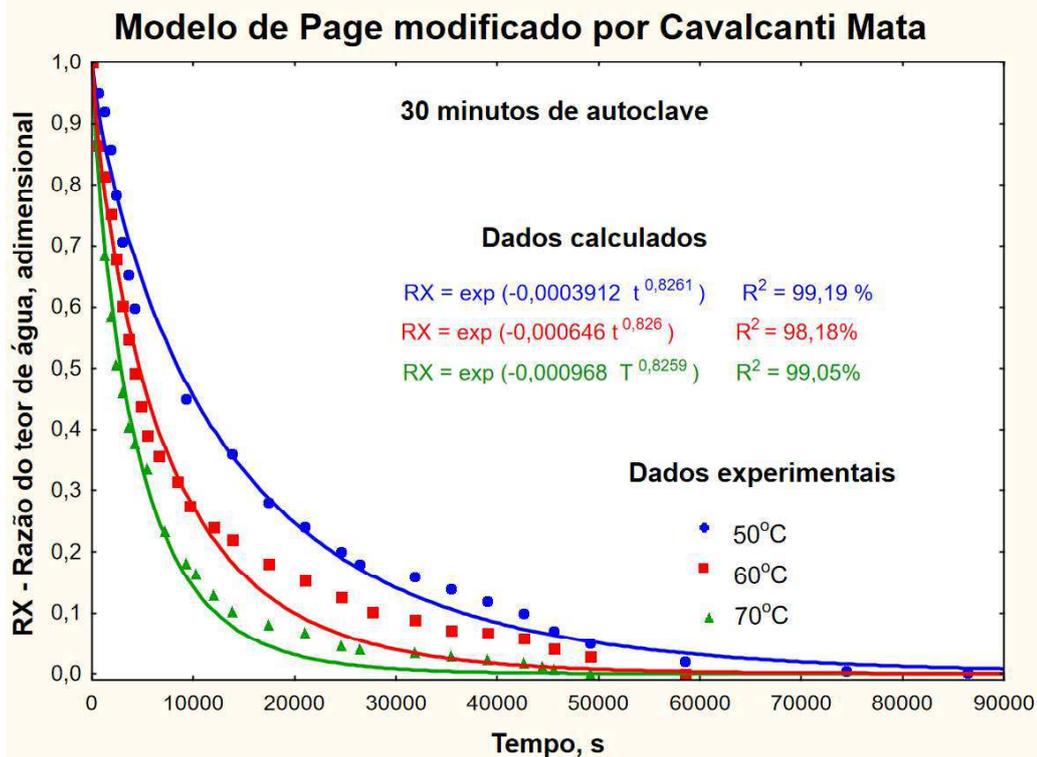


Figura 4.40- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo de Page modificado por Cavalcanti-Mata

Tabela 4.11– Parâmetros do modelo proposto por Page, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave

Tempo de autoclave (minutos)	Modelo de Page modificado por Cavalcanti- Mata					
	$RX = \exp\left(-\frac{\lambda_1^2}{r_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t^N\right)$					
	Parâmetros					
	T (°C)	K	N	$\frac{2,4048^2}{1,4253_e^2}$	Def (mm ² . s ⁻¹)	R ² (%)
14	50	0,000702	0,8435	2,8467	0,000246	99,47
	60	0,000859	0,8430	2,8467	0,000302	99,44
	70	0,001253	0,8325	2,8467	0,000440	99,79
22	50	0,000636	0,8270	2,8467	0,000223	99,41
	60	0,000756	0,8382	2,8467	0,000266	99,50
	70	0,001006	0,8370	2,8467	0,000353	99,62
30	50	0,000392	0,8261	2,8467	0,000138	99,19
	60	0,000646	0,8260	2,8467	0,000227	98,18
	70	0,000968	0,8259	2,8467	0,000340	99,05

O Modelo I de Cavalcanti Mata encontram-se nas Figuras 4.41 a 4.43, respectivamente para os três tempos de autoclavagem de 14, 22 e 30 minutos para as temperaturas de 50, 60 e 70 °C e na Tabela 4.12 estão os parâmetros do modelo proposto com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2). Os dados experimentais e os calculados de secagem do arroz vermelho neste modelo apresentam coeficientes de determinação superiores aos Modelos até agora relatados, constatando-se que todos são superiores a 99,0%. Observa-se nessas Figuras e na Tabela que a difusividade efetiva tem um valor superior de ordem decimal ou centesimal, constatando-se que enquanto a difusividade efetiva no Modelo de Fick varia entre 0,000014 e 0,000074 $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, no Modelo I de Cavalcanti Mata os valores estão entre 0,001447 e 0,006560 $\text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. No entanto é de se esperar que o modelo I de Cavalcanti Mata tenha coeficientes de determinação superiores aos modelos anteriormente relatados devido a este modelo ter um maior número de coeficientes, contudo a ordem de grandeza da difusividade nos parece estar elevada em comparação com os outros modelos. Em contra ponto os dados experimentais estão melhor ajustados ao Modelo I proposto por Cavalcanti Mata. Percebe-se também que a difusividade efetiva obedece a uma diminuição de valores com o aumento do tempo de autoclavagem do arroz.

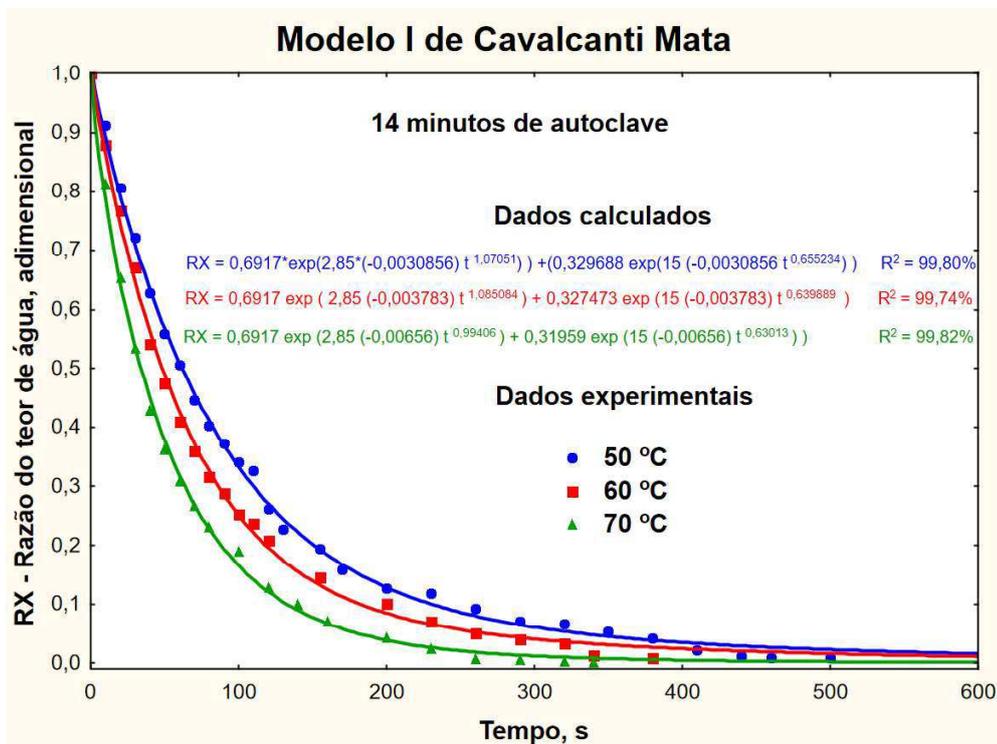


Figura 4.41- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o Modelo I de Cavalcanti-Mata

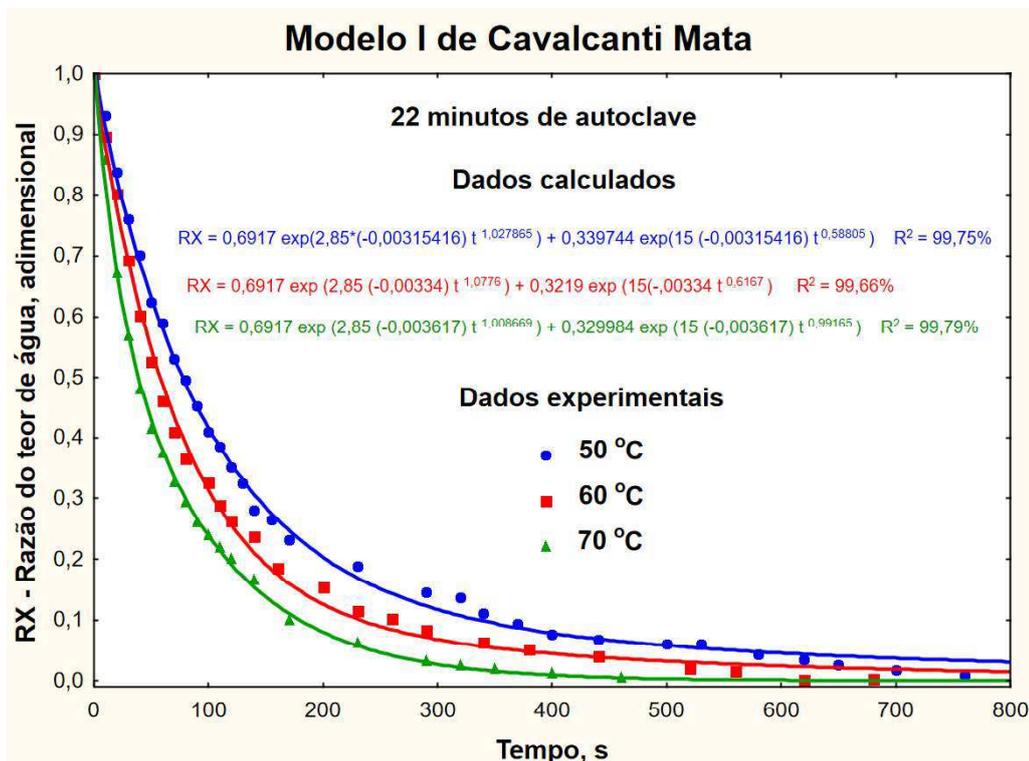


Figura 4.42- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o Modelo I de Cavalcanti-Mata

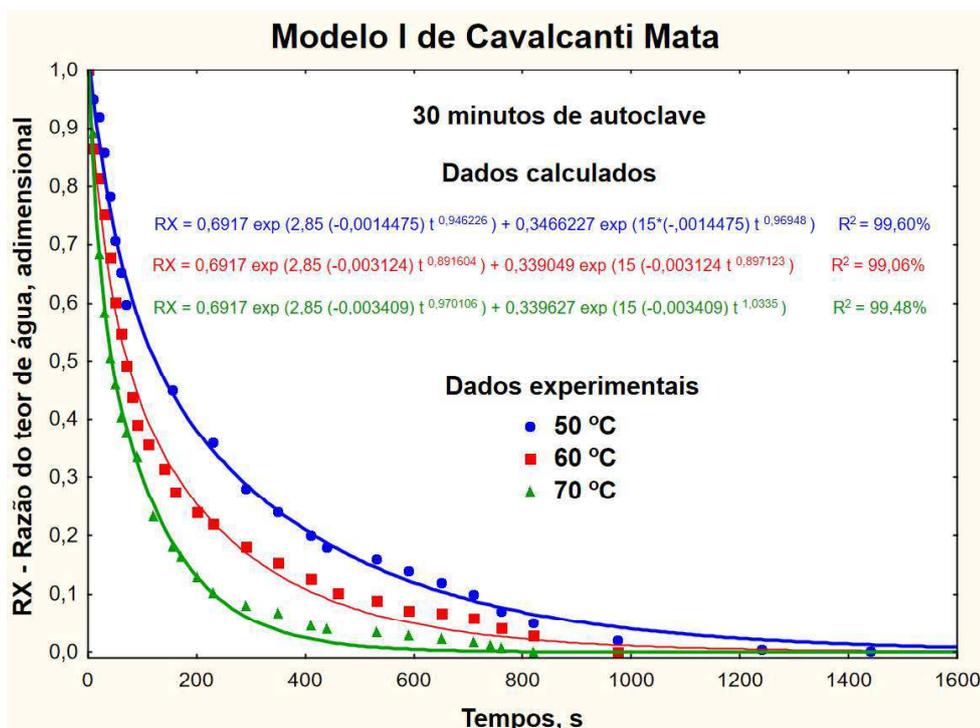


Figura 4.43- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o Modelo I de Cavalcanti-Mata

Tabela 4. 12 – Parâmetros do modelo I proposto por Cavalcanti Mata, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave

Tempo de autoclave (minutos)	Modelo I de Cavalcanti Mata								
	$RX = 0,6917 \exp\left(-\frac{\lambda_1^2}{r_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t^{n_1}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{\lambda_2^2}{r_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t^{n_2}\right)$								
	Parâmetros								
T (°C)	a ₁	$\frac{\lambda_1^2}{r_e^2}$	Def (mm ² . s ⁻¹)	n ₁	a ₂	$\frac{\lambda_2^2}{r_e^2}$	n ₂	R ² (%)	
14	50	0,6917	2,85	0,003086	1,070506	0,329688	15,0	0,655234	99,80
	60	0,6917	2,85	0,003783	1,085084	0,327473	15,0	0,639889	99,74
	70	0,6917	2,85	0,006560	0,99406	0,319590	15,0	0,630131	99,82
22	50	0,6917	2,85	0,003154	1,027865	0,339744	15,0	0,588048	99,75
	60	0,6917	2,85	0,003340	1,077599	0,321903	15,0	0,6167	99,66
	70	0,6917	2,85	0,003617	1,008669	0,329984	15,0	0,991648	99,79
30	50	0,6917	2,85	0,001447	0,946226	0,346623	15,0	0,969481	99,60
	60	0,6917	2,85	0,003124	0,891604	0,339049	15,0	0,897123	99,06
	70	0,6917	2,85	0,003409	0,970106	0,339627	15,0	1,0335	99,48

Os dados experimentais e os calculados da secagem de arroz vermelho as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, utilizando o Modelo II de Cavalcanti Mata encontram-se nas Figuras 4.44, 4.45 e 4.46, respectivamente para os três tempos do arroz submetido a autoclave de 14, 22 e 30 minutos. Os parâmetros do modelo proposto estão na Tabela 4.12 conjuntamente com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2). Nota-se nessa tabela que os coeficientes de determinação se assemelham aos da Tabela 4.11, indicando que ambos os modelos podem ser utilizados para expressar os dados experimentais de secagem de arroz vermelho, pois na maioria das secagens as diferenças dos valores de R^2 estão na segunda casa decimal.

Os dados contidos nas Tabelas e Figuras até aqui estudados mostram que, os modelos de Page modificado por Cavalcanti Mata e os Modelos I e II de Cavalcanti Mata têm valores do coeficiente de determinação superiores aos Fick até o 6º termos da série e Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata e que estes modelos são equivalentes, contudo as difusividades de massa efetiva (Def) do arroz vermelho parboilizado tem grandezas diferentes embora tenha o mesmo comportamento de aumento com o aumento da temperatura e diminuição com aumento do tempo de autoclave, o que evidencia uma menor resistência interna ao transporte de água do interior para a superfície do grão, com a elevação de temperatura e do teor de água, uma vez que a vaporização, em autoclave, eleva o teor de água do arroz vermelho parboilizado. Resultados semelhantes foram obtidos por Sousa (2016), que observou na

secagem, do arroz vermelho em casca as temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80°C, que os teores de água inicial de 30, 25 e 20 % base úmida, influenciavam na difusividade de massa efetiva.

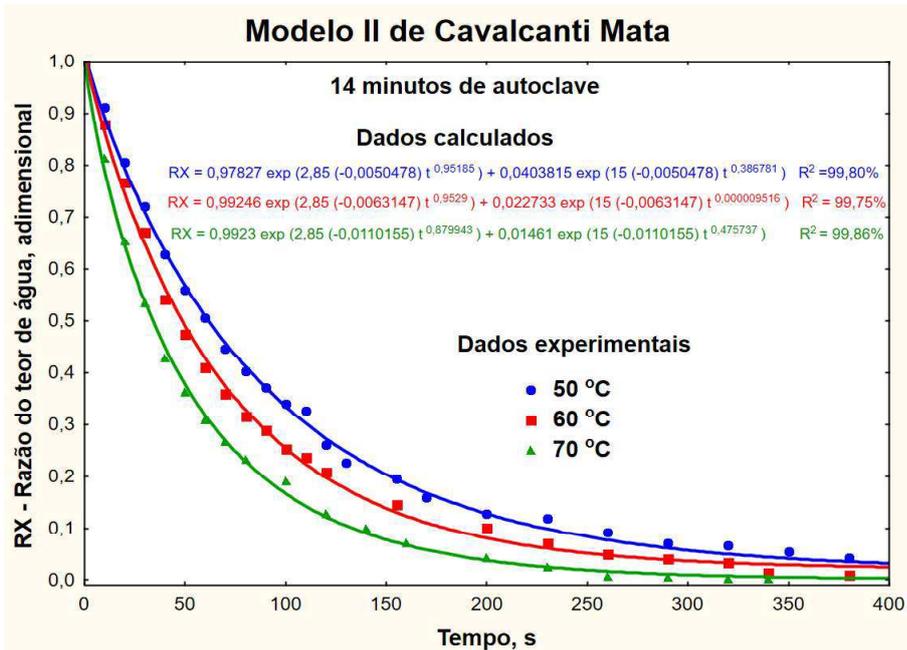


Figura 4.44 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo II de Cavalcanti-Mata

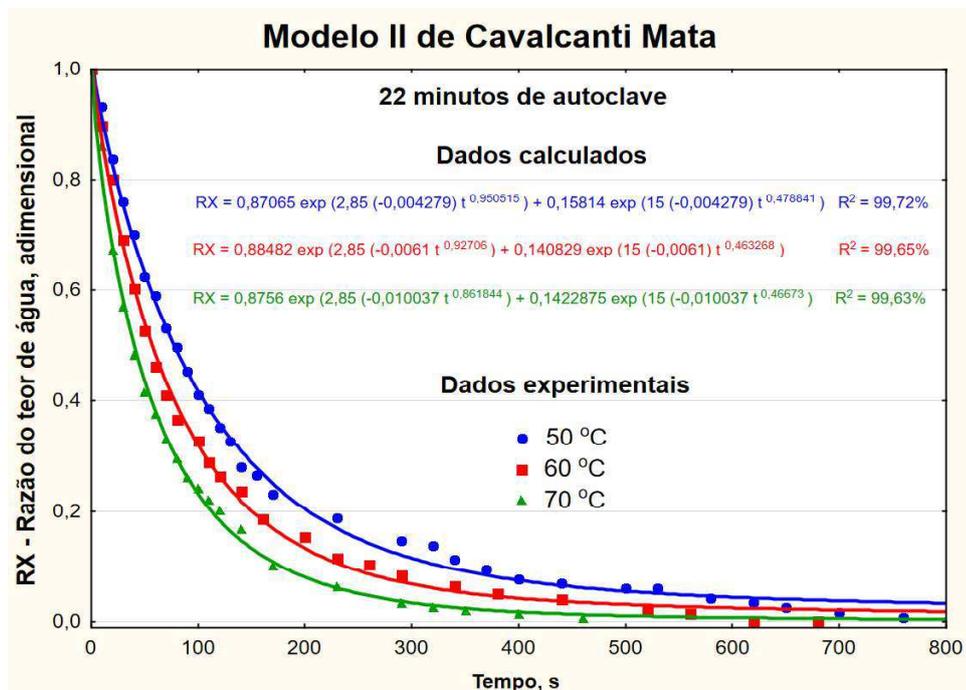


Figura 4.45 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo II de Cavalcanti-Mata

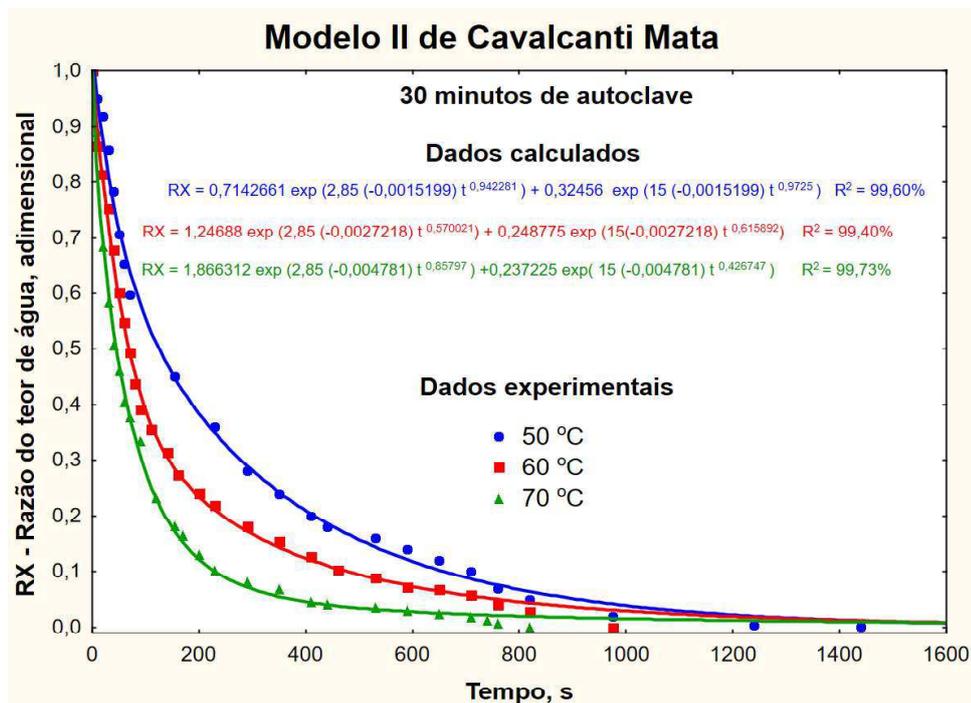


Figura 4.46 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o modelo II de Cavalcanti-Mata

Tabela 4.13– Parâmetros do Modelo II proposto por Cavalcanti Mata, com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave

Tempo de autoclave (minutos)	Modelo II de Cavalcanti Mata								
	$RX = a_1 \exp\left(-\frac{\lambda_1^2}{r_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t^{n_1}\right) + a_2 \exp\left(-\frac{\lambda_2^2}{r_e^2} \cdot D_{ef} \cdot t^{n_2}\right)$								
	Parâmetros								
T (°C)	a ₁	$\frac{\lambda_1^2}{r_e^2}$	Def (mm ² · s ⁻¹)	n ₁	a ₂	$\frac{\lambda_2^2}{r_e^2}$	n ₂	R ² (%)	
14	50	0,978271	2,85	0,005048	0,951848	0,040382	15,0	0,386781	99,80
	60	0,992455	2,85	0,006315	0,952936	0,022733	15,0	0,000010	99,75
	70	0,99231	2,85	0,011016	0,879943	0,014610	15,0	0,475737	99,86
22	50	0,870647	2,85	0,004279	0,950515	0,158138	15,0	0,478841	99,72
	60	0,88482	2,85	0,006100	0,927061	0,140829	15,0	0,463268	99,65
	70	0,87560	2,85	0,010037	0,861844	0,142287	15,0	0,466730	99,63
30	50	0,714266	2,85	0,001520	0,942281	0,324505	15,0	0,972501	99,60
	60	1,246881	2,85	0,002722	0,570021	0,248775	15,0	0,615892	99,40
	70	1,866312	2,85	0,004781	0,552432	0,861591	15,0	0,407386	99,73

4.9.3 Modelo empírico de secagem do arroz vermelho parboilizado

O modelo de Midilli e seus colaboradores tem sido relatado por diversos pesquisadores como um dos melhores modelos empíricos para descrever o comportamento cinético da secagem. Dentre esses autores pode-se citar o estudo da cinética de secagem realizada Hacıhafizog˘lu et al. (2008), com arroz, onde concluíram que os modelos de Midilli et al. (2002) e Henderson ajustaram-se muito bem aos dados experimentais nas condições de secagem, variando-se a temperatura de 40, 45, 50, 55 e 60°C e velocidade de ar de secagem de 1,5 e 3,0 cm/s, com coeficientes de determinação superiores a 99%.

Assim, nas Figuras 4.47, 4.48 e 4.49 e na Tabela 4.14 também se constata que o modelo de Midilli e seus colaboradores tem coeficiente de determinação superiores a 99,0%, indicando que a cinética de secagem tanto para o arroz vermelho com 14 minutos de autoclave quanto o arroz vermelho seco depois de 22 minutos de autoclave e do arroz seco depois de 30 minutos de autoclave as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, representam satisfatoriamente os dados experimentais.

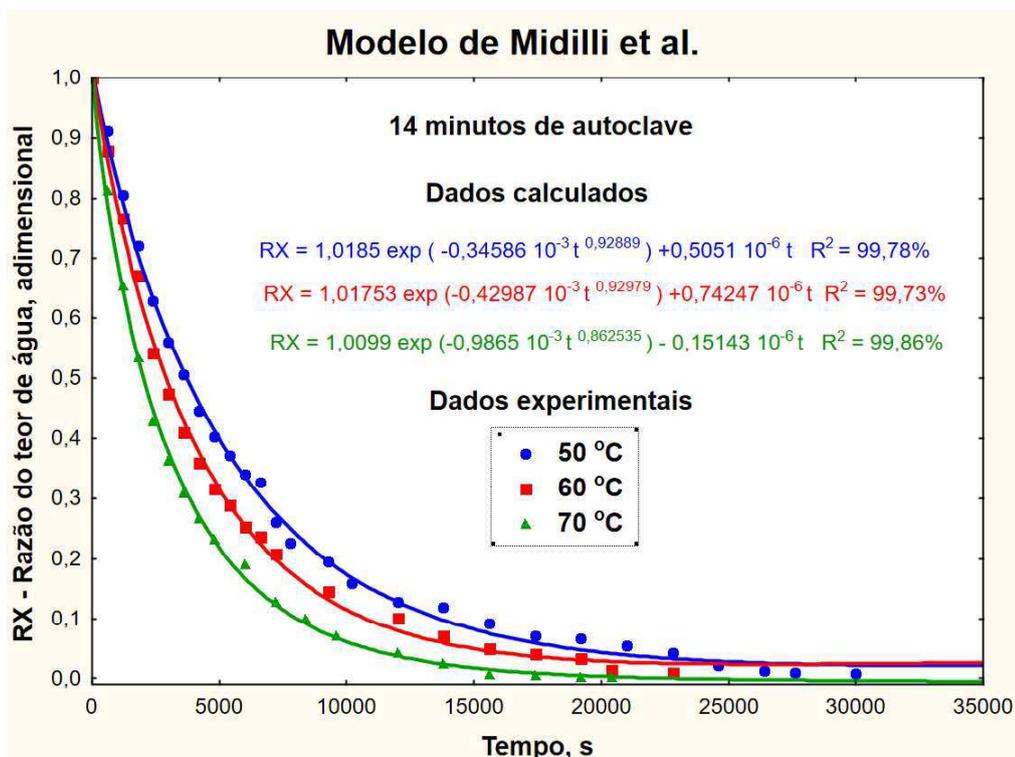


Figura 4.47 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 14 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o Modelo de Midilli e seus colaboradores

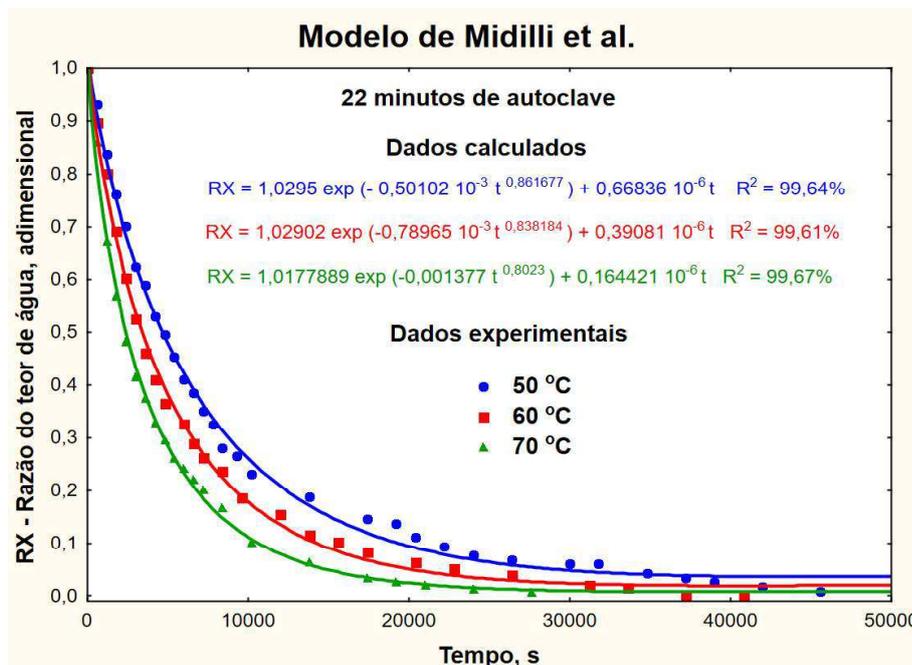


Figura 4.48 - Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 22 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o Modelo de Midilli e seus colaboradores

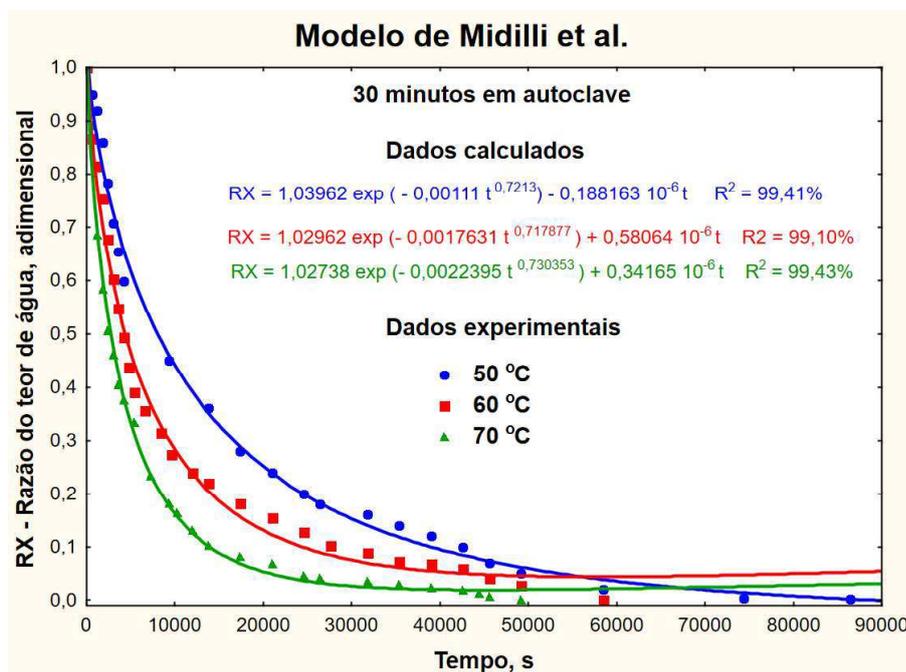


Figura 4.49- Valores experimentais e estimados da razão de teor de água em função do tempo para a secagem do arroz vermelho parboilizado com tempo de permanência de 30 minutos em autoclave, às temperaturas de secagem de 50 a 70 °C, de acordo com o Modelo de Midilli e seus colaboradores

Tabela 4.14– Parâmetros do Modelo de Midilli et al. (2002), com seu respectivo coeficiente de determinação (R^2) para diferentes condições de temperatura e tempo de autoclave

Tempo de autoclave (minutos)	Modelo de Midilli					
	$RX = a_1 \exp(K \cdot t^{n_1}) + a_2 \cdot t$					
	Parâmetros					
	T (°C)	a ₁	K	n ₁	a ₂	R ² (%)
14	50	1,018468	-0,000346	0,928888	0,00000050511	99,78
	60	1,017533	-0,000430	0,929791	0,00000074247	99,73
	70	1,009901	-0,000986	0,862535	-0,0000001514	99,86
22	50	1,029466	-0,000501	0,861677	0,00000066836	99,64
	60	1,029024	-0,000790	0,838184	0,000000391	99,61
	70	1,017789	-0,001377	0,802302	0,000000164	99,63
330	50	1,039619	-0,001110	0,721300	0,000000188	99,41
	60	1,029619	-0,001763	0,717877	0,000000581	99,10
	70	1,027383	-0,002240	0,730353	0,000000341	99,43

Hasan et al. (2014) estudando a cinética de secagem do arroz híbrido, constataram que os modelos de Midilli et al. (2002) e de Henderson também foram os que melhores se ajustaram aos dados experimentais para a faixa de temperatura de 40, 50 e 60°C, com coeficientes de determinação superiores a 98,26%. De maneira semelhante, na cinética de secagem do café, avaliada por Corrêa et al. (2011), foi observado que dentre os modelos avaliados, os modelos matemáticos de Midilli et al. (2002) e Henderson foram igualmente os melhores modelos que se ajustaram aos dados experimentais com coeficientes de determinação superiores a 99%.

Trabalhos mais recentes tem feito tais afirmativas de que o modelo de Midilli e seus colaboradores tem representado satisfatoriamente a cinética de secagem como é o caso de Avhad & Marchetti, (2016), trabalhando com a secagem de sementes de abacate; Sousa (2016) trabalhando com arroz vermelho em casca nas temperaturas de 40, 50, 60, 70 e 80°C com teor de água inicial de 30, 25 e 20 % base úmida; Silva et al. (2019) trabalhando com grãos de soja nas temperaturas de secagem de 20, 30, 40 e 50 °C e fluxos do ar de secagem $3,1 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $6,2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $9,3 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$, $12,4 \cdot 10^{-2} \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$; e Mendonça et al. (2019) estudando 2 espécies de sementes de andiroba as temperaturas de 40, 50 e 60 °C acrescentado que os melhores modelos matemáticos que representam a cinética de secagem das sementes de foram modelos os Logarítmico e de Midilli.

A deficiência da utilização do Modelo de Midilli et al. (2002) em relação aos modelos anteriores é que por ser um modelo empírico ele não permite determinar a difusividade de massa do processo e os parâmetros termodinâmicos do processo de secagem.

4.9.4 Análise dos parâmetros estatísticos dos modelos

Nas Tabelas 4.15 a 4.20, contém os valores dos coeficientes de determinação (R^2), desvio quadrático médio (DQM), estimativa do erro (SE) e o erro médio relativo (P) para os seis modelos analisados: Fick com 6 termos da série, Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata, Page modificado por Cavalcanti Mata, Modelo I de Cavalcanti Mata, Modelo II de Cavalcanti Mata e Midilli et al. (2002), para a secagem dos grãos de arroz vermelho parboilizado nas condições de 14, 22 e 30 minutos em autoclave e temperaturas de secagem de 50, 60, e 70°C. Nessas Tabelas também encontram-se a nomenclatura Te ou Al referente a relação dos valores dos resíduos versus os valores preditos, onde, se essa relação tem a nomenclatura Te a relação é tendenciosa e se tem a nomenclatura Al essa relação é aleatória.

Segundo Sousa et al (2016), a análise de um modelo não linear utilizando um único parâmetro estatístico (R^2) não constitui uma forma eficiente de avaliação. Para que um modelo seja considerado aceitável para descrever o processo, o valor de P deve ser menor do que 10% e o valor de SE menor do que 5% (SOUSA et al. (2016) e SILVA et al. (2020). Além disso, quando P é menor do que 5%, é atribuído um ótimo ajuste ao modelo (BARROS NETO et al (1996). Com relação aos coeficientes de determinação (R^2), quanto maior o (R^2), isto é, quanto mais próximo de 1, menor será o erro e melhor o modelo.

Tabela 4.15 - Parâmetros estatísticos do modelo de Fick com 6º termos da série

Tempo de autoclave (minutos)	Parâmetros					
	Temperatura (°C)	R^2 (%)	DQM	SE	P(%)	Classificação do Modelo
14	50	99,58	0,102014	0,280983	22,13	Te
14	60	99,51	0,054280	0,248742	23,60	Te
14	70	99,54	0,096472	0,17683	38,44	Te
22	50	98,85	0,094058	0,274253	10,85	Te
22	60	98,96	0,097327	0,236815	10,49	Te
22	70	98,78	0,090817	0,173201	6,39	Te
30	50	98,17	0,102228	0,240363	10,88	Te
30	60	96,57	0,093434	0,226978	21,72	Te
30	70	97,73	0,085529	0,182879	27,35	Te

Al: Aleatório; Te:Tendencioso

Tabela 4.16 - Parâmetros estatísticos do modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata

Tempo de autoclave (minutos)	Parâmetros					
	Temperatura (°C)	R ² (%)	DQM	SE	P(%)	Classificação do Modelo
14	50	99,58	0,018807	0,097725	13,87	Te
14	60	99,51	0,020406	0,093511	17,87	Te
14	70	99,54	0,019485	0,084934	13,13	Te
22	50	98,85	0,031035	0,172797	26,08	Te
22	60	98,96	0,029713	0,148567	27,86	Te
22	70	98,78	0,02843	0,139276	22,55	Te
30	50	98,17	0,045439	0,21792	21,16	Te
30	60	96,57	0,053283	0,271689	24,27	Te
30	70	97,73	0,042638	0,213189	45,92	Te

Al: Aleatório; Te:Tendencioso

Tabela 4.17- Parâmetros estatísticos do modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata

Tempo de autoclave (minutos)	Parâmetros					
	Temperatura (°C)	R ² (%)	DQM	SE	P(%)	Classificação do Modelo
14	50	99,47	0,016721	0,086884	13,43	Al
14	60	99,44	0,019925	0,091307	8,07	Al
14	70	99,79	0,011431	0,049827	10,97	Te
22	50	99,41	0,023144	0,128862	9,68	Te
22	60	99,50	0,021015	0,105077	11,13	Te
22	70	99,62	0,015498	0,075925	4,98	Te
30	50	99,19	0,028315	0,135796	13,05	Te
30	60	98,18	0,030214	0,154064	13,60	Te
30	70	99,05	0,023463	0,117317	11,56	Te

Al: Aleatório; Te:Tendencioso

Tabela 4.18 - Parâmetros estatísticos do Modelo I de Cavalcanti Mata (2018)

Tempo de autoclave (minutos)	Parâmetros					
	Temperatura (°C)	R ² (%)	DQM	SE	P (%)	Classificação do Modelo
14	50	99,80	0,026082	0,135527	7,74	Al
14	60	99,74	0,024018	0,110064	4,82	Al
14	70	99,82	0,015558	0,067816	5,05	Al
22	50	99,75	0,025386	0,141345	8,21	Al
22	60	99,66	0,025834	0,129168	6,73	Al
22	70	99,79	0,018375	0,09002	8,30	Al
30	50	99,60	0,028066	0,134599	7,09	Te
30	60	99,06	0,027421	0,139819	8,93	Te
30	70	99,48	0,021464	0,107321	5,82	Al

Al: Aleatório; Te:Tendencioso

Tabela 4.19- Parâmetros estatísticos do Modelo II de Cavalcanti Mata

Tempo de autoclave (minutos)	Parâmetros					
	Temperatura (°C)	R ² (%)	DQM	SE	P (%)	Classificação do Modelo
14	50	99,80	0,01032	0,053669	9,10	Al
14	60	99,75	0,011539	0,052879	8,85	Te
14	70	99,86	0,010317	0,044969	3,26	Te
22	50	99,72	0,014301	0,079627	8,96	Al
22	60	99,65	0,01289	0,064449	9,60	Al
22	70	99,63	0,010079	0,049377	5,43	Te
30	50	99,60	0,023122	0,110887	6,82	Al
30	60	99,76	0,026092	0,133043	7,82	Al
30	70	99,44	0,021449	0,107244	6,26	Te

Al: Aleatório; Te:Tendencioso

Tabela 4.20 - Parâmetros estatísticos do Modelo de Midilli et al. (2002)

Tempo de autoclave (minutos)	Parâmetros					
	Temperatura (°C)	R ² (%)	DQM	SE	P (%)	Classificação do Modelo
14	50	99,78	0,013462	0,069953	11,79	Al
14	60	99,73	0,015064	0,06903	11,18	Te
14	70	99,86	0,010589	0,046159	20,41	Te
22	50	99,64	0,017416	0,096968	12,62	Al
22	60	99,61	0,018173	0,090863	9,77	Te
22	70	99,63	0,014851	0,072756	4,657	Te
30	50	99,41	0,025885	0,12414	10,87	Te
30	60	99,10	0,027264	0,139022	12,07	Te
30	70	99,43	0,021324	0,106621	11,32	Te

Al: Aleatório; Te:Tendencioso

Portanto, analisando-se os parâmetros estatísticos dos modelos constata-se que os que tem coeficiente de correlação acima de 99,0% são os modelos Page modificado por Cavalcanti Mata; Modelos I e II de Cavalcanti Mata e de Midilli e seus colaboradores. Analisando-se os outros parâmetros estatísticos percebe-se que só os modelos de Modelos I e II de Cavalcanti Mata tem o erro médio relativo (P) abaixo de 10%, contudo o Modelo I de Cavalcanti Mata apresenta mais classificações do Modelo como Aleatórios.

Assim, conclui-se que o Modelo I de Cavalcanti Mata, que é um modelo semi-teórico, é o que representa melhor os dados experimentais do processo de secagem dos grãos de arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22 e 30 minutos, nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C.

Diversos pesquisadores têm sugerido os modelos de Page (1949), Henderson & Pabis (1961), Midilli et al. (2002), Henderson (1974) e Cavalcanti Mata et al. (2006), contudo a introdução das modificações sugeridas por Cavalcanti Mata, ou mesmo os Modelo apresentados por Cavalcanti Mata (2018) existem poucos relatos quanto ao seu desenvolvimento semiteóricos e a percepção de que os modelos de Page e de Henderson & Pabis podem ter um outro significado onde se permite determinar a difusividade de massa e seus parâmetros termodinâmicos.

4.10 Energia de ativação

A energia de ativação é um conceito que vem da química envolvendo as reações químicas e ela representa a menor energia necessária que se deve fornecer aos reagentes para a formação do complexo ativado, resultando na ocorrência da reação. Assim, a cinética de secagem por similaridade torna o significado de energia de ativação como sendo a energia mínima necessária para que se inicie o processo difusivo de massa no interior do produto.

Na Tabela 4.21 estão os valores de difusividade de massa efetiva (D_{ef}), para todos os modelos que permitem a sua determinação, da secagem do arroz vermelho parboilizado, observando-se que a difusividade se reduz com a elevação do tempo de autoclave, o que evidencia uma menor resistência interna ao transporte de água do interior para a superfície do grão, uma vez que a vaporização, em autoclave, eleva o teor de água do arroz vermelho parboilizado.

A equação de Arrhenius que relaciona os coeficientes de difusividade efetiva dos grãos de arroz vermelho em casca, com relação ao inverso da temperatura do ar de secagem e determina a Energia de ativação encontram-se representados para cada modelo nas Figuras 4.50, 4.51 e 4.52 para os respectivos tempos de autoclave de 14, 22 e 30 minutos de autoclave.

Tabela 4.21- Valores da difusividade de massa efetiva em função da temperatura de secagem e do tempo de autoclave para os modelos estudados

Tempo de autoclave (minutos)	Temperatura °C	Fick com 6 termos da série	Henderson & Pabis modificado	Page modificado	Cavalcanti Mata I	Cavalcanti Mata II
		D_{ef} ($m^2 \cdot s^{-1}$) 10^{-11}				
14 min	50	4,0	6,32	24,6	308,6	504,8
	60	4,0	8,08	30,2	378,3	631,5
	70	7,4	10,89	44,0	656,0	1101,6
22 min	50	3,0	4,57	22,3	315,4	427,9
	60	4,1	6,67	26,6	334,0	610,0
	70	5,9	8,43	35,3	361,7	1003,7
30 min	50	1,6	2,32	13,8	144,7	152,0
	60	2,9	4,22	22,7	312,4	177,2
	70	4,7	7,03	34,0	340,9	947,8

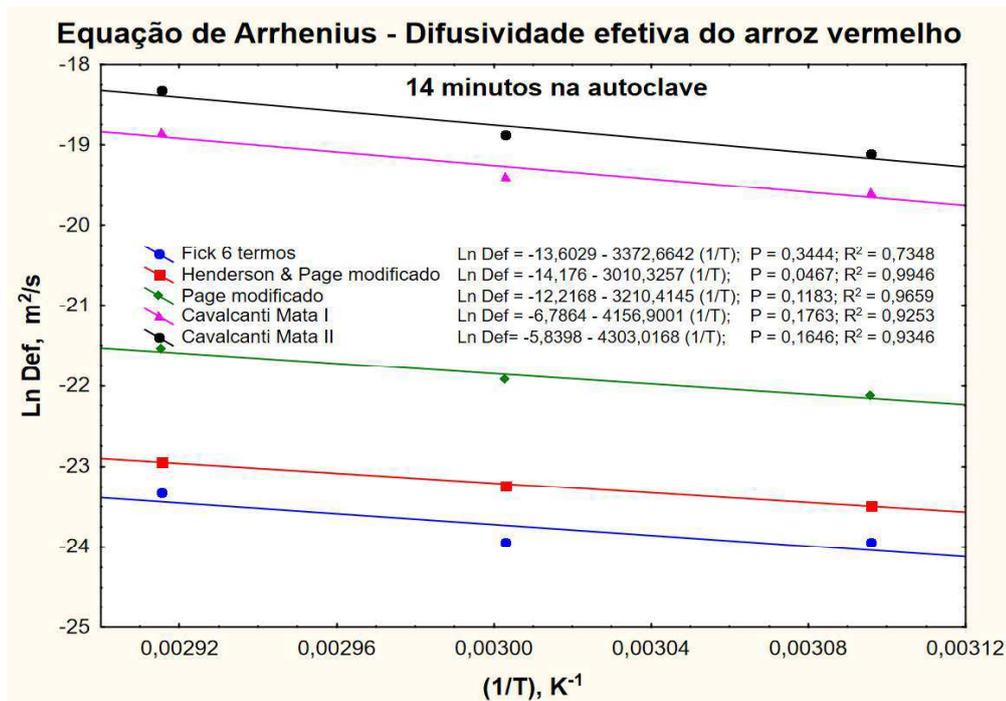


Figura 4.50- Equação de Arrhenius para determinação da energia de ativação do arroz vermelho as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, por diferentes modelos, parboilizado por 14 minutos em autoclave

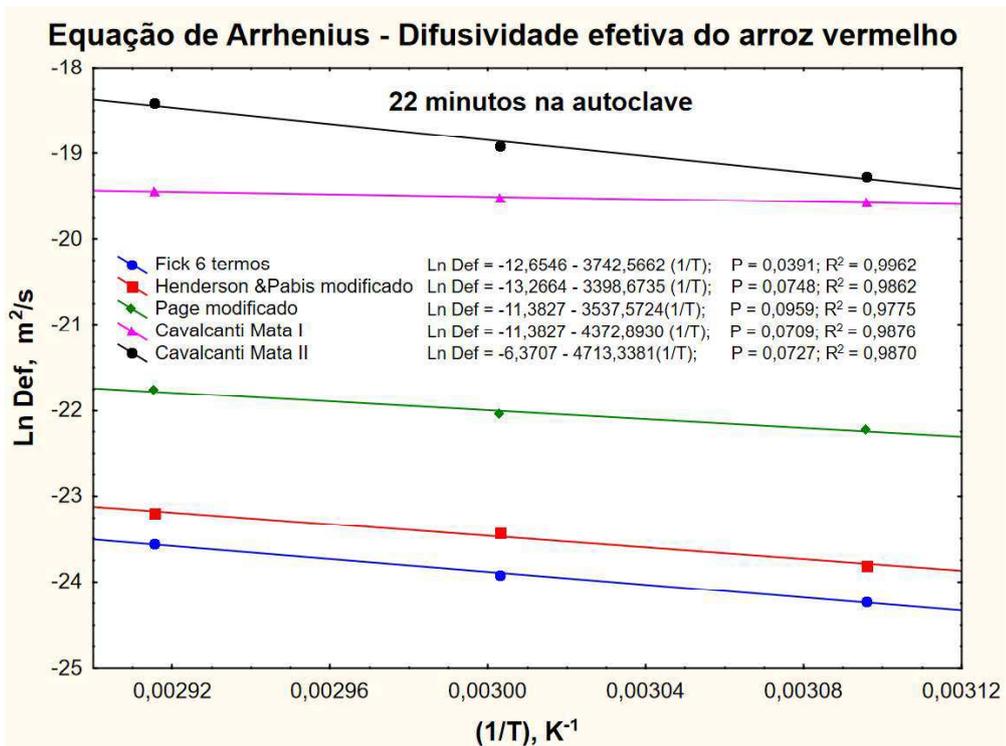


Figura 4.51 - Equação de Arrhenius para determinação da energia de ativação do arroz vermelho as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, por diferentes modelos, parboilizado por 22 minutos em autoclave

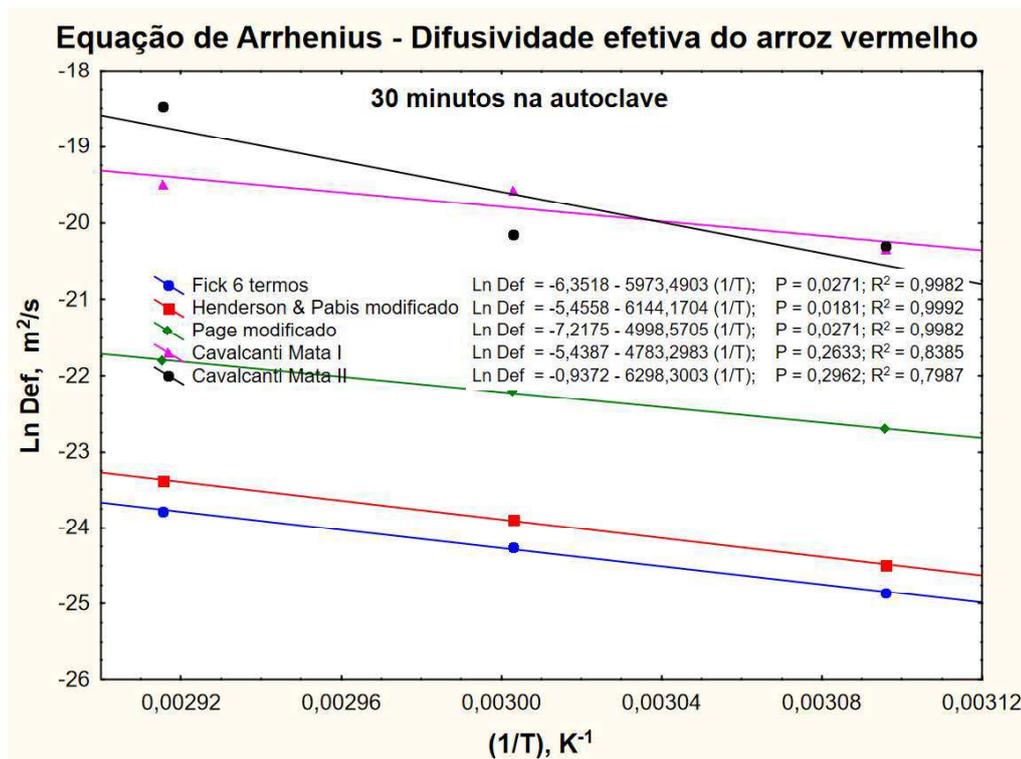


Figura 4.52-Equação de Arrhenius para determinação da energia de ativação do arroz vermelho as temperaturas de 50, 60 e 70 °C, por diferentes modelos, parboilizado por 30 minutos em autoclave

Na Tabela 4.22 encontra-se a energia de ativação extraída das equações de cada modelo se secagem do arroz vermelho em diferentes tempos de parboilização em autoclave. Observa-se nessa tabela que a energia de ativação estão na mesma ordem de grandeza para todos os modelos, indo de valores de 25,0278 a 51,0826 kJ mol⁻¹. Constata-se também que a energia de ativação aumenta com o aumento do tempo de parboilização na autoclave. Exceção se faz no Modelo de Page modificado para 14 e 22 minutos.

Tabela 4.22 - Energia de ativação do arroz vermelho em função do tempo de parboilização e do Modelo de secagem

Tempo de autoclave (minutos)	Energia de ativação				
	Fick com 6 termos da série	Henderson & Pabis modificado	Page modificado	Cavalcanti Mata I	Cavalcanti Mata II
	kJ mol ⁻¹	kJ mol ⁻¹	kJ mol ⁻¹	kJ mol ⁻¹	kJ mol ⁻¹
14 min	28,0403	25,0278	26,6914	34,5605	35,7753
22 min	31,1157	28,2566	29,4114	35,3562	39,1867
30 min	49,6636	51,0826	41,5581	39,7683	46,1523

O objetivo da autoclavagem do arroz é de realizar a transferência para o endosperma de parcela das vitaminas hidrossolúveis e de sais minerais contidos no tegumento. No entanto como constatado por Dors et al., (2009), neste processo o tempo de permanência de autoclave existe um aumento significativo do teor de água, embora este não seja o objetivo da autoclavagem. Esta ocorrência também aconteceu com a parboilização do arroz vermelho que teve seu teor de água modificado aumentando de 51,1% base seca para 59,5% b.s. com o tempo de parboilização de 14 para 30 minutos de autoclave. Este resultado de aumento da energia de ativação em função do aumento do teor de água é similar aos resultados obtidos por Sousa et al. (2016), que observou na secagem, em um secador de leito fixo, do arroz vermelho em casca com teores de água inicial de 30, 25 e 20 % base úmida, ocorria um aumento da energia de ativação com o aumento do teor de água inicial.

Este fato pode ser explicado ao se afirmar que quanto maior a energia de ativação, mais difícil será para que processo inicial ocorra e, conseqüentemente, ela se dará de forma mais lenta. O inverso também pode ser relatado, quanto menor a energia de ativação, menor a “barreira” de energia, mais movimentações efetivas e, portanto, o processo é mais rápido. Este fato está relacionado com o teor de água inicial mais elevado onde a cinética de secagem é mais lenta e o tempo mais longo até que o processo de secagem atinja o seu equilíbrio,

De outra forma, podendo-se afirmar que uma menor energia de ativação ocorre uma maior velocidade do processo de secagem. Isso significa que a energia de ativação é na verdade uma barreira energética a ser ultrapassada para que ocorra o início do processo de transporte de água. Diferentes pesquisadores realizaram tais afirmações em diferentes produtos. (HASAN et al., (2014) com grãos de arroz; SILVA et al., (2014) com sementes feijão guandu; SILVA et al., (2019) com grãos de soja; MENDONÇA et al. (2019), com sementes de andiroba; ALMEIDA et al. 2020 com grãos de feijão azuki).

4.11 Propriedades termodinâmicas

Pode-se observar nas Tabela 4.23 a 4.40 que os valores de entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e a energia livre de Gibbs (ΔG) variam em função do Modelo de secagem estudados, no entanto todos esses parâmetros encontram-se na mesma ordem de grandeza.

Os valores de entalpia para o tempo de autoclave de 14 minutos variaram-se 25,41 a 25,25 kJmol⁻¹, enquanto que para 22 minutos variaram de 28,48 a 28,32 kJmol⁻¹ e para o tempo de autoclave de 30 minutos de 47,04 a 46,87 kJmol⁻¹. Esse comportamento está relacionado

com o aumento da pressão parcial de vapor de água nos grãos, a medida em que ocorre o aumento da temperatura do ar de secagem. Desta forma, há um aumento da velocidade de difusão da água do interior para a superfície do grão, ocorrendo perda da água do produto por dessecamento (SOUSA et.al, 2016). Segundo Corrêa et.al (2010) e Corrêa et.al (2016), o menor valor de entalpia para temperaturas maiores de secagem indica que menor será a quantidade de energia necessária para remover a água ligada ao produto durante a secagem.

O efeito da entalpia com a variação do tempo de autoclave de 14, 22 e 30 minutos fixando-se a temperatura de secagem de 50 até 70°C, observa-se que a entalpia aumenta com o aumento do tempo do arroz na autoclave, possivelmente devido aos teores de água inicial dos grãos serem diferentes exigindo-se uma maior quantidade de energia para concluir o processo de secagem do arroz vermelho com 30 minutos de autoclave.

Percebe-se que o comportamento da entalpia tem o mesmo comportamento para todos os modelos estudados, exceção se faz ao modelo de Page que apresenta uma diminuição da entalpia quando se compara o tempo de autoclave de 14 minutos com 22 minutos, não se verificando qualquer razão para a ocorrência deste comportamento.

Tabela 4.23– Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo de Fick com 6 termos da série

Fick com 6 termos da série			
Temperatura	ΔH	ΔS	ΔG
K	Jmol ⁻¹	Jmol ⁻¹ K ⁻¹	Jmol ⁻¹
14 minutos de autoclave			
323	25.413,018	-350,901	138.754,149
333	25.331,678	-351,149	142.264,408
343	25.250,338	-351,390	145.777,111
22 minutos de autoclave			
323	28.488,418	-343,188	139.338,097
333	28.407,078	-343,436	115.398,092
343	28.325,738	-343,677	118.833,660
30 minutos de autoclave			
323	47.036,318	-291,921	141.326,764
333	46.954,978	-292,169	144.247,220
343	46.873,638	-292,410	147.170,118

Tabela 4.24– Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata

Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata			
Temperatur a	ΔH	ΔS	ΔG
K	$Jmol^{-1}$	$Jmol^{-1}k^{-1}$	$Jmol^{-1}$
14 minutos de autoclave			
323	22.400,518	-355,563	137.247,344
333	22.319,178	-355,811	140.804,220
343	22.237,838	-356,052	144.363,538
22 minutos de autoclave			
323	25.629,318	-348,164	138.086,368
333	25.547,978	-348,412	141.569,257
343	25.466,638	-348,653	145.054,589
30 minutos de autoclave			
323	48.455,318	-284,633	140.391,720
333	48.373,978	-284,881	143.239,294
343	48.292,638	-285,121	146.089,312

Tabela 4.25 – Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata

Page modificado por Cavalcanti Mata			
Temperatur a	ΔH	ΔS	ΔG
K	$Jmol^{-1}$	$Jmol^{-1}k^{-1}$	$Jmol^{-1}$
14 minutos de autoclave			
323	24.064,118	-339,627	133.763,573
333	23.982,778	-339,875	137.161,088
343	23.901,438	-340,115	140.561,045
22 minutos de autoclave			
323	26.784,095	-332,842	134.292,134
333	26.702,755	-333,090	137.621,803
343	26.621,415	-333,331	140.953,915
30 minutos de autoclave			
323	38.930,818	-298,962	135.495,702
333	38.849,478	-299,210	138.486,574
343	38.768,138	-299,451	141.479,888

Tabela 4.26 – Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo I de Cavalcanti Mata

Modelo I de Cavalcanti Mata			
Temperatur a	ΔH	ΔS	ΔG
K	$Jmol^{-1}$	$Jmol^{-1}k^{-1}$	$Jmol^{-1}$
14 minutos de autoclave			
323	31.933,218	-295,456	127.365,481
333	31.851,878	-295,704	130.321,287
343	31.770,538	-295,945	133.279,535
22 minutos de autoclave			
323	33.728,918	-295,219	128084,727
333	33.647,578	-295,467	131038,166
343	33.566,238	-295,708	133994,047
30 minutos de autoclave			
323	37.141,018	-284,494	131038,166
333	37.059,678	-284,742	133994,047
343	36.978,338	-284,982	134.727,303

Tabela 4.27 – Propriedades termodinâmicas obtidas pela cinética de secagem dos grãos de arroz vermelho em casca para diferentes temperaturas e diferentes tempos de autoclave pelo Modelo II de Cavalcanti Mata

Modelo II de Cavalcanti Mata			
Temperatur a	ΔH	ΔS	ΔG
K	$Jmol^{-1}$	$Jmol^{-1}k^{-1}$	$Jmol^{-1}$
14 minutos de autoclave			
323	33.148,018	-287,756	126.093,296
333	33.066,678	-288,004	128.972,105
343	32.985,338	-288,245	131.853,357
22 minutos de autoclave			
323	36.559,418	-278,522	126.521,943
333	36.478,078	-278,770	129.308,406
343	36.396,738	-279,010	132.097,313
30 minutos de autoclave			
323	43.525,018	-247,879	123.589,783
333	43.443,678	-248,127	126.069,815
343	43.362,338	-248,367	128.552,289

Os valores da entalpia da presente pesquisa variaram de 25,41 kJmol⁻¹ (14 minutos de autoclave) a 46,87 kJmol⁻¹ (30 minutos de autoclave) para o Modelo de Fick com 6 termos da série; de 22,4 kJmol⁻¹ (14 minutos de autoclave) a 46,29 kJmol⁻¹ (30 minutos de autoclave) para o Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata; variaram de 24,06 kJmol⁻¹ (14 minutos de autoclave) a 38,77 kJmol⁻¹ (30 minutos de autoclave) para o Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata; de 31,93 kJmol⁻¹ (14 minutos de autoclave) a 36,98 kJmol⁻¹ (30 minutos de autoclave) para o Modelo I de Cavalcanti Mata; de 33,15 kJmol⁻¹ (14 minutos de autoclave) a 80,77 kJmol⁻¹ (30 minutos de autoclave) para o Modelo II de Cavalcanti Mata, portanto percebe-se que em todos os casos numericamente a entalpia está bem acima dos valores da entalpia do arroz vermelho avaliados por Sousa et. al (2016) cujos valores variaram de 17,53kJmol⁻¹ a 17, 19 kJmol⁻¹ para uma secagem com teor de água inicial de 30, 25 e 20% base seca e uma faixa de temperatura de 40°C até 80°C, podendo, portanto, ser atribuído ao tempo de autoclave que implicou no aumento do teor de água e conseqüentemente um tempo maior do processo de secagem do arroz vermelho.

A entropia (ΔS) também foi reduzida com o aumento da temperatura de secagem. Nos estudos de Jideani & Mpotokwana (2009) e Corrêa et al. (2016) indicam que, a entropia tende a diminuir com o aumento de temperatura, uma vez que, a diminuição da temperatura acarreta em menor excitação das moléculas de água e aumenta o grau de ordem entre o sistema água e grão. Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos de Sousa et al (2016), nos quais os valores variaram de -172,72 Jmol⁻¹K⁻¹ a -173,72 Jmol⁻¹K⁻¹ para o arroz vermelho submetido a secagem em 40°C até 80°C, enquanto que a entropia do arroz parboilizado autoclavado por 14, 22 e 30 minutos variaram de -350,04 Jmol⁻¹K⁻¹ a -292,41 Jmol⁻¹K⁻¹ para a faixa de temperatura de 50°C até 70°C, para o modelo de Fick com 6 termos da série; de -355,56 a -285,12 Jmol⁻¹k⁻¹ para o Modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata; de -339,627⁻¹ a -299,45 Jmol⁻¹k⁻¹ para o Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata; de -295,46 a -279,01 Jmol⁻¹k⁻¹ para o Modelo I de Cavalcanti Mata. Contudo, para o Modelo II de Cavalcanti Mata verifica-se que a entropia apresenta um comportamento contrário onde para modelo de variou de -287,76 a -326,23 Jmol⁻¹k⁻¹, assim neste este modelo não deve ser utilizado, pois contradiz o processo de análise teórica sem uma razão plausível, exceto que o valores dos coeficientes de regressão linear obedecem um ajuste aos dados experimentais, não obedecendo a conceitos teóricos.

Verifica-se, ainda, nas Tabela 4.23 a 4.27, que a energia livre de Gibbs (ΔG) aumentou com o aumento da temperatura, sendo seus valores positivos ($\Delta G > 0$) para todas as condições

avaliadas, o que caracteriza um processo não espontâneo, ocorrendo na direção oposta a que leva a um aumento na entropia total do universo. De acordo com Corrêa et.al (2010) e Corrêa et. al (2016), o valor positivo da energia livre de Gibbs é característico de uma reação endotérmica, em que requer o fornecimento de uma energia proveniente do meio em que o produto está envolvido para que ocorra a reação, assim, observando-se a absorção dessa energia pelo sistema. Portanto, este resultado é coerente, tendo em vista que o processo de secagem não é espontâneo.

Resultados semelhantes foram encontrados nos estudos de Sousa et al. (2016) durante a secagem do arroz vermelho. Os valores da energia livre de Gibbs do arroz vermelho avaliados por Sousa et. al (2016) variaram de 71,67 kJmol⁻¹ a 78,54 kJmol⁻¹, no entanto esse arroz não foi parboilizado. Neste trabalho observa-se que o arroz vermelho parboilizado com vaporizado por 14, 22 e 30 minutos, os valores da energia livre de Gibbs variaram de 138,75 até 147,17 kJmol⁻¹, pelo Modelo de Fick com 6 termos da série; 137,25 até 146,09 kJmol⁻¹ pelo modelo de Henderson & Pabis modificado por Cavalcanti Mata; de 133,76 até 141,48 kJmol⁻¹ pelo Modelo de Page modificado por Cavalcanti Mata; de 127,36 até 134,73 kJmol⁻¹ pelo Modelo I de Cavalcanti Mata e de 126,09 até 128.552,289 kJmol⁻¹ pelo Modelo II de Cavalcanti Mata.

Embora esses valores sejam praticamente o dobro dos valores encontrados por Sousa et. al (2016), essas diferenças podem ser justificadas em função das diferenças do teor de água inicial, pois os teores de água inicial no processo de secagem no presente trabalho foram de 51,1 % base seca (b.s.), para 14 minutos de vaporização de autoclave; 54,8% b.s. para 22 minutos de vaporização em autoclave e 59,5% b.s. para 30 minutos de vaporização em autoclave, enquanto a secagem feita por Sousa et. al (2016) os teores de água inicial foram de 30, 25 e 20% (b.s.).

4.12 Avaliação do efeito do processo de parboilização mediante os parâmetros texturométricos

Nas Figuras 4.53 até 4.57 observam-se os parâmetros de adesividade, firmeza, coesividade, gomosidade e mastigabilidade em função do tempo de cocção.

Na Figura 4.53 observam-se os valores da adesividade ajustados ao modelo proposto $y = a'exp(b't^{c'})$ para o arroz parboilizado Tio João e para o arroz vermelho parboilizado autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e submetidos ao processo de secagem à 50°C. Pela observação da Figura, verificou-se uma redução dos valores de adesividade em relação aos

valores do arroz parboilizado Tio João. Todavia, o comportamento dos modelos exponenciais para o parâmetro adesividade possuem uma tendência de aumentar os seus valores com o aumento do tempo de cocção.

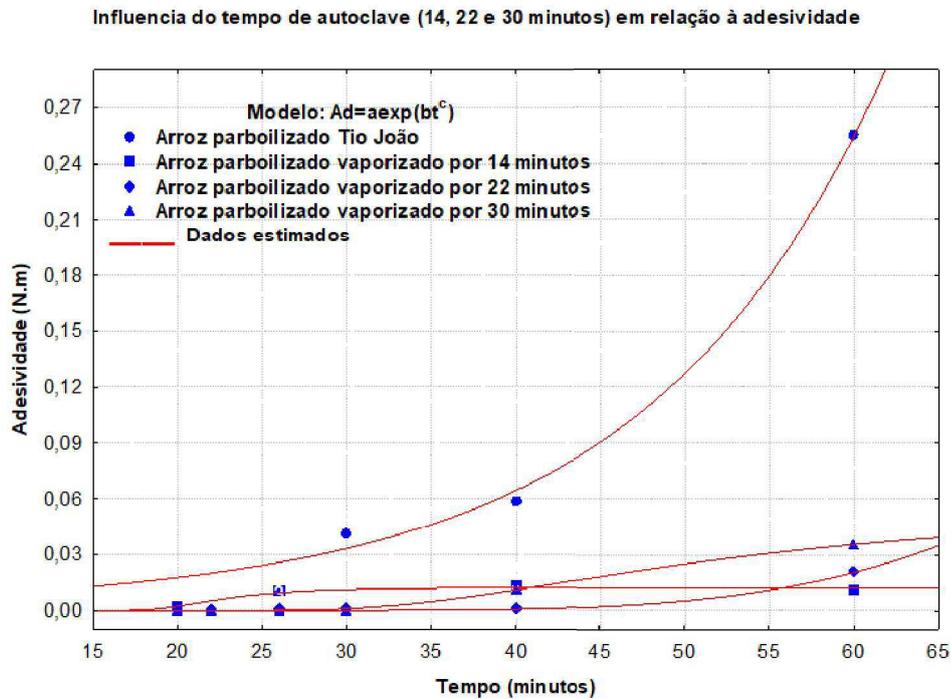


Figura 4. 53- Parâmetro texturométrico adesividade após a cocção dos grãos do arroz parboilizado Tio João e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos

Nas Figuras 4.54 até 4.57 observam-se os valores para os parâmetros firmeza, coesividade, gomosidade e mastigabilidade ajustados ao modelo proposto

$y = a' \exp(b't^{c'})$ para o arroz parboilizado Tio João e para o arroz vermelho parboilizado autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e submetidos ao processo de secagem à 50°C.

Diferente da adesividade, os valores dos parâmetros firmeza, coesividade, gomosidade e mastigabilidade foram maiores em relação aos resultados dos parâmetros do arroz parboilizado Tio João, conforme observa-se nas Figuras 4.54 a 4.57, respectivamente. Pela observação destas Figuras, os comportamentos dos modelos propostos foram exponencialmente decrescentes com os valores de firmeza, coesividade, gomosidade e mastigabilidade, em relação aos resultados dos parâmetros do arroz parboilizado Tio João, que reduziu os seus valores com o aumento do tempo de cocção.

Os resultados das Figuras 4.54 a 4.57 no que diz respeito ao arroz vermelho parboilizado autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e submetido ao processo de secagem a 50°C, conseguiram

comprovar que atingiram a condição de gelatinização, confirmada pelo parâmetro firmeza. O aumento do tempo de autoclave tornou os tipos de arroz analisados mais "soltinhos", o que foi confirmado pela adesividade. Resultados semelhantes foram encontrados por Oliveira et al. (2014), Chavan et al. (2017) e Zhu et al. (2021) que também verificaram que os valores dos parâmetros textuométricos de firmeza, elasticidade, gomosidade e mastigabilidade aumentaram durante a parboilização e os valores de adesividade foram reduzidos durante o processo.

Os resultados de elasticidade não foram expressos nas Figuras 4.53 até 4.57 porque os valores foram estatisticamente próximos ao valor de 1mm.N para todos os tipos de arroz vermelho parboilizado, vaporizados por 14, 22 e 30 minutos e submetidos ao processo de secagem a 50°C.

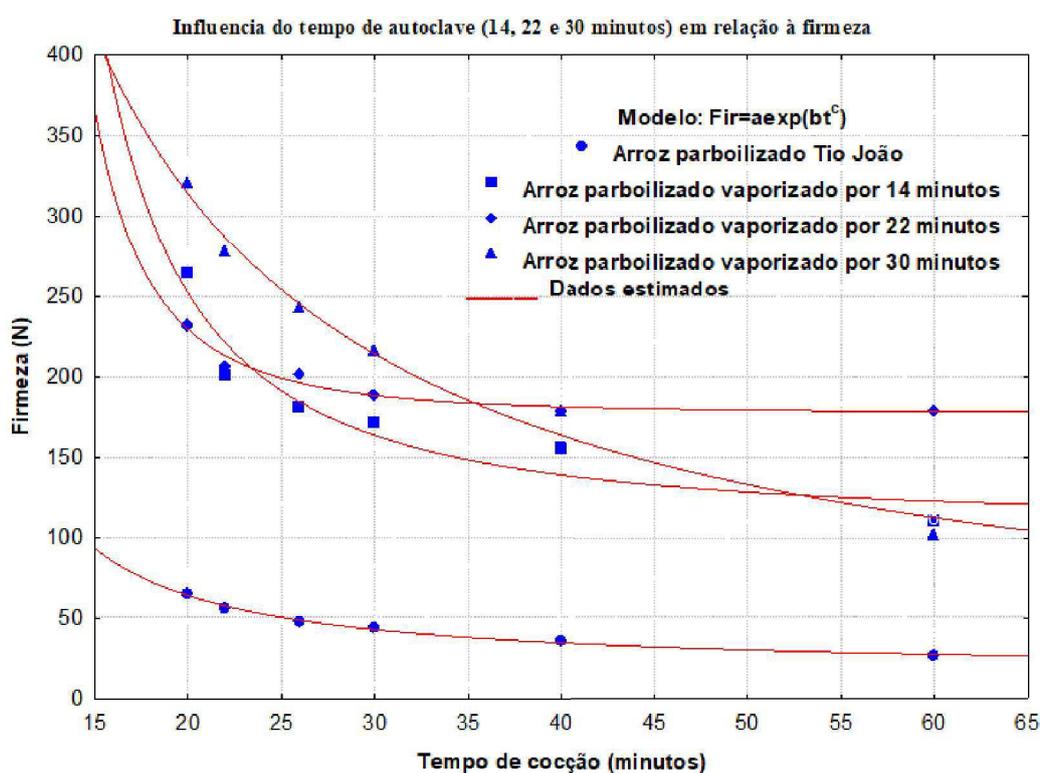


Figura 4. 54- Parâmetro textuométrico firmeza após a cocção dos grãos do arroz Tio João parboilizado e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos

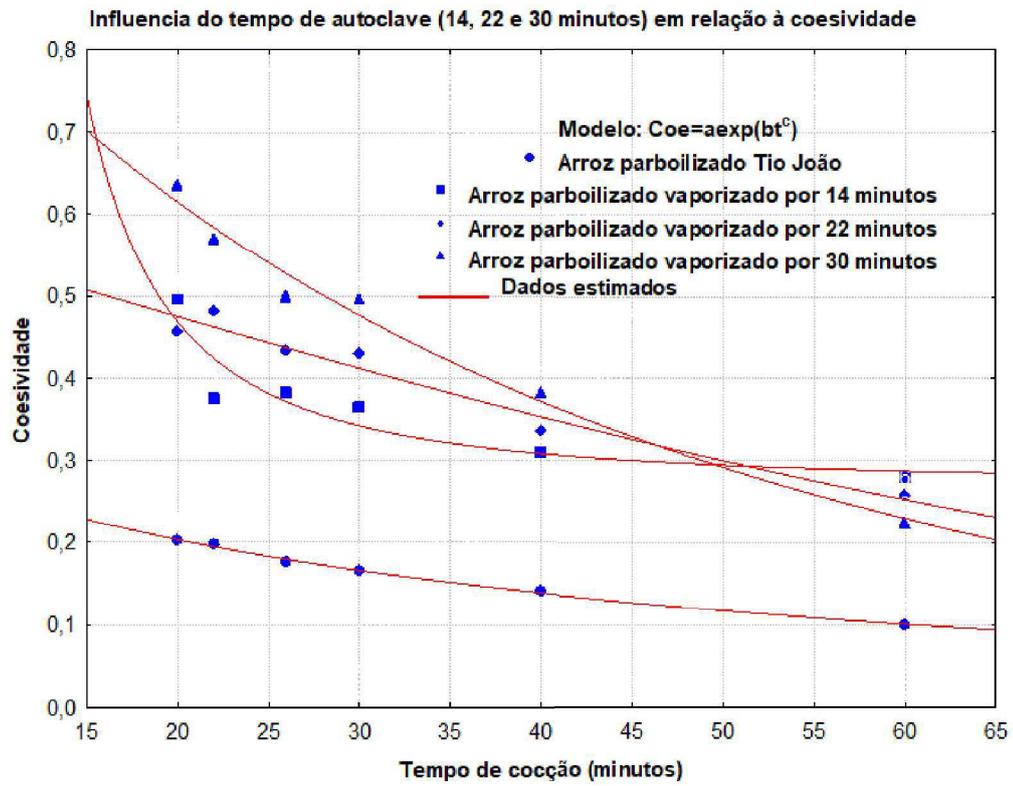


Figura 4.55- Parâmetro texturométrico coesividade após a cocção dos grãos do arroz Tio João parboilizado e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos

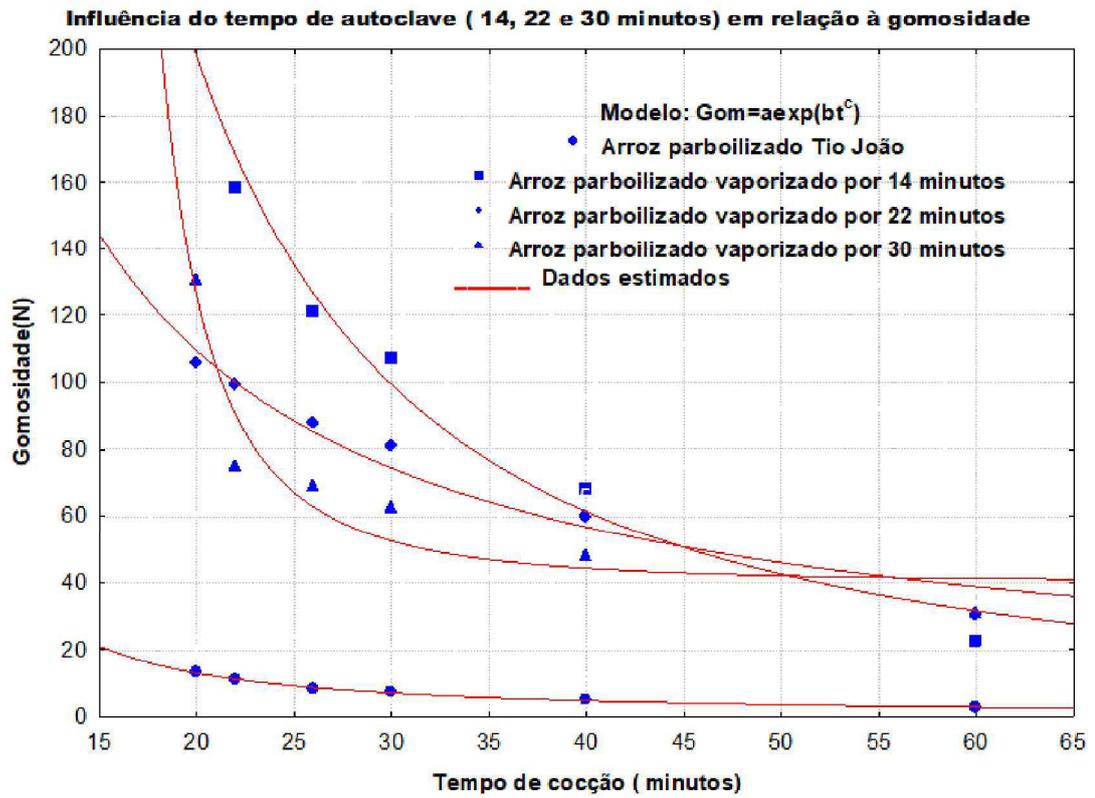


Figura 4.56- Parâmetro texturométrico gomosidade após a cocção dos grãos do arroz Tio João parboilizado e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos

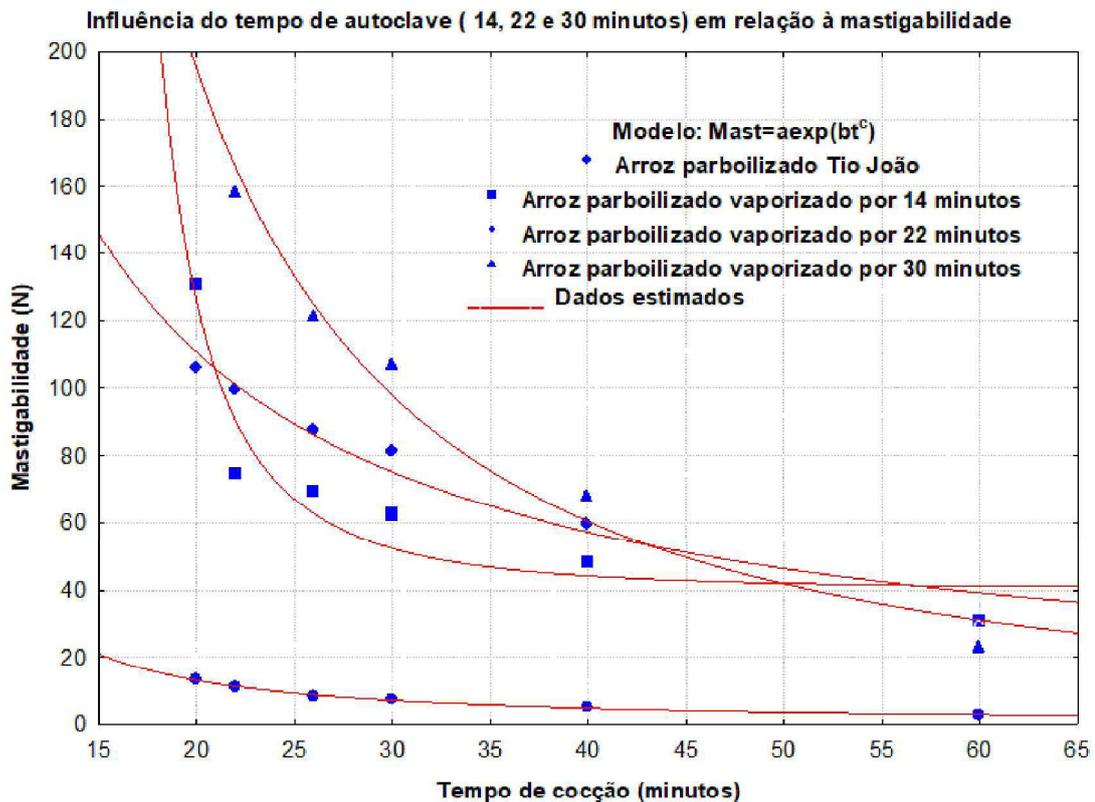


Figura 4.57- Parâmetro texturométrico mastigabilidade após a cocção dos grãos do arroz parboilizado Tio João e o vermelho parboilizado autoclavado a 14, 22 e 30 minutos

Pela análise dos dados da Tabela 4.28, observa-se que o modelo exponencial do tipo $y = a' \exp(b't^{c'})$ adequado para descrever a adesividade. Pode-se verificar que os modelos de adesividade para o arroz autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e os modelos para o arroz parboilizado Tio João apresentaram R^2 maiores a 84,19%, os valores de DQM inferiores a $1,48 \times 10^{-2}$, os valores de P inferiores a 18%, os valores de SE inferiores a $2,96 \times 10^{-2}$. Logo, os valores observados e estimados pelo modelo exponencial possuem um comportamento aleatório.

Com relação aos coeficientes (a' , b' e c') dos modelos exponenciais contidos na Tabela 4.28, para adesividade não se observou uma tendência definida dos seus valores em relação ao tempo de autoclave e ao tempo de cocção.

Tabela 4.28- Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico adesividade para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos de autoclave e o arroz parboilizado Tio João

Tipos de arroz	Adesividade					Classificação do Modelo
	Modelo $y = a' \exp \exp (b'x^{c'})$	R ² (%)	DQM	SE	P (%)	
14 minutos	$a'=2,93 \times 10^8$ $b'=-88$ $c'=3,23 \times 10^{-1}$	99,71	$5,82 \times 10^{-4}$	$5,82 \times 10^{-4}$	7	Al
22 minutos	$a'=0,02$ $b'=-1483,80$ $c'=-2,05$	97,97	$3,70 \times 10^{-4}$	$2,68 \times 10^{-4}$	11	Al
30 minutos	$a'=7,05 \times 10^{10}$ $b'=-3,70 \times 10^1$ $c'=-6,52 \times 10^{-2}$	84,19	$5,66 \times 10^{-3}$	$1,13 \times 10^{-2}$	16	Al
Tio João	$a'=4,46 \times 10^{-2}$ $b'=8,02 \times 10^{-9}$ $c'=4,69$	98,06	$1,48 \times 10^{-2}$	$2,96 \times 10^{-2}$	18	Al

Al: Aleatório; Te: Tendencioso

De acordo com os resultados observados na Tabela 4.29 para o parâmetro firmeza, o arroz autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e o arroz parboilizado Tio João apresentaram R² maiores a 91,88%, os valores de DQM inferiores a 20, os valores de P inferiores a 9 % e os valores de SE inferiores a 28,29. Assim, pode-se afirmar que os valores da Tabela 4.29 dos modelos exponenciais foram satisfatórios para descreverem a firmeza, uma vez que os valores observados e estimados pelo modelo exponencial foram ajustados de forma tendenciosa.

Com relação aos coeficientes (a', b' e c') dos modelos exponenciais contidos na Tabela 4.29 para firmeza, não se observou uma tendência definida dos seus valores em relação ao tempo de autoclave e ao tempo de cocção.

Tabela 4.29- Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico firmeza, para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos de autoclave e o arroz parboilizado Tio João

Tipos de arroz	Firmeza					Classificação do Modelo
	Modelo $y = a' \exp \exp (b' x^{c'})$	R ² (%)	DQM	SE	P (%)	
14 minutos	a'=109,29 b'=176,36 c'=-1,79	91,88	8,2	11,6	4	Te
22 minutos	a'=177,63 b'=12278,5 9 c'=-3,60	95,5	20,00	28,29	9	Te
30 minutos	a'=2,02x10 ⁻¹⁰ b'=3,11x10 ¹ c'=-3,38x10 ⁻²	98,34	11,14	15,75	5	Te
Tio João	a'=15,212 b'=15,927 c'=-0,803	99,03	3,47	4,91	7	Te

Al:Aleatório; Te: Tendencioso

Nos resultados ilustrados na Tabela 4.30 para o parâmetro coesividade, observa-se que os modelos exponenciais foram adequados. Pode-se verificar que o modelo exponencial para coesividade, quanto ao arroz autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e o arroz parboilizado Tio João apresentaram R² maiores a 85,96%, os valores de DQM inferiores a 2,79x10⁻² os valores de P inferiores a 6,25% e os valores de SE inferiores a 4,45x10⁻², com classificação dos valores observados e estimados pelo modelo exponencial de forma aleatória.

Na análise dos coeficientes (a' e c') dos modelos exponenciais contidos na Tabela 4.30 para coesividade, não se observou uma tendência definida dos seus valores em relação ao tempo de autoclave e ao tempo de cocção. No entanto, o coeficiente (b') reduz seu valor com o aumento do tempo de autoclave e o aumento do tempo de cocção.

Tabela 4.30- Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico coesividade, para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos e o arroz parboilizado Tio João

Tipos de arroz	Coesividade					Classificação do Modelo
	Modelo $y = a' \exp \exp (b'x^{c'})$	R ² (%)	DQM	SE	P (%)	
14 minutos	a'=0,27 b'=336,68 c'=-2,15	85,96	2,79x10 ⁻²	4,42x10 ⁻²	6,2	Al
22 minutos	a'=0,59 b'=-0,01 c'=1,23	96,31	1,63x10 ⁻²	2,58x10 ⁻²	4,01	Al
30 minutos	a'=1,09 b'=-0,04 c'=0,91	98,15	1,99x10 ⁻²	4,45x10 ⁻²	4,11	Al
Tio João	a'=0,41 b'=-0,10 c'=0,63	99,72	2,03x10 ⁻³	1,03x10 ⁻⁵	1,02	Al

Al:Aleatório; Te: Tendencioso

Já nos resultados observados na Tabela 4.31 para o parâmetro mastigabilidade, verificou-se que os modelos exponenciais para o arroz autoclavado por 14, 22 e 30 minutos e o arroz parboilizado Tio João apresentaram R² maiores a 90,87 %, os valores de DQM inferiores a 15,54; os valores de P inferiores a 18,6% e os valores de SE inferiores a 21,98; assim os valores observados e estimados pelos modelos exponenciais comportaram-se de forma tendenciosa.

Tabela 4.31- Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico mastigabilidade, para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos e o arroz parboilizado Tio João

Tipos de arroz	Mastigabilidade					Classificação do Modelo
	Modelo $y = a' \exp \exp (b' x^{c'})$	R ² (%)	DQM	SE	P (%)	
14 minutos	a'=40,24 b'=53815,59 c'=-3,59	90,89	1,34	1,89	2,1	Te
22 minutos	a'=4,3726x10 ⁻¹⁵ b'=40,74327 c'=-0,02536	96,46	15,54	21,98	18,6	Te
30 minutos	a'=2,12618x10 ⁻¹² b'=37,74664 c'=-0,05346	98,34	13,80	9,7	9,0	Te
Tio João	a'=3,5026x0 ⁻² b'=1,323x10 ¹ c'=-2,6862x10 ⁻¹	99,68	0,63	0,89	9,7	Te

Al:Aleatório; Te: Tendencioso

Observa-se que, para o parâmetro texturométrico da gomosidade, os coeficientes (a' e c') dos modelos contidos na Tabela 4.32 não apresentam uma tendência definida quando aumenta-se o tempo de autoclave e o tempo de cocção. Já o coeficiente (b') aumenta seu valor com o aumento do tempo de autoclave e tempo de cocção. Todavia, pode-se afirmar pela análise que os parâmetros estatísticos R² foram maiores a 90,87 %; os valores de DQM foram inferiores a 15,57; os valores de P foram inferiores a 18,6 % e os valores de SE foram inferiores a 13,73. Logo, os valores observados e estimados do modelo exponencial comportaram-se de forma tendenciosa.

Tabela 4.32- Estimativas dos parâmetros do modelo para o parâmetro texturométrico gomosidade, para o arroz vermelho parboilizado em autoclave por 14, 22, 30 minutos e o arroz parboilizado Tio João

Tipos de arroz	Gomosidade					Classificação do Modelo
	Modelo $y = a' \exp \exp (b'x^{c'})$	R ² (%)	DQM	SE	P (%)	
14 minutos	a'=40,28 b'=55145,03 c'=-3,60	90,87	1,33	1,88	2,06	Te
22 minutos	A'=3,52 x10 ⁻¹⁵ B'=40,9 6132 C'=- 0,02522	96,46	15,57	11,05	18,6	Te
30 minutos	a'=1,796 6 x10 ⁻¹² b'=37,91 03 c'=- 0,0532	98,34	9,71	13,73	8,9	Te
Tio João	a'=0,03 55 b'=13,2 309 c'=- 0,2692	99,68	0,63	0,88	9,7	Te

Al:Aleatório; Te: Tendencioso

5. CONCLUSÕES

- As análises da composição centesimal e conteúdo de amido do arroz vermelho parboilizado vaporizados por 14, 22 e 30 minutos e submetidos ao secagem à 50°C foram modificados em relação ao arroz vermelho *in-natura*.
- A caracterização por análise termogravimétrica permitiu a determinação da temperatura de degradação e a obtenção da DTG, e forneceram os valores nos quais ocorrem o fenômeno de desidratação e os eventos de degradação dos polissacarídeos.
- A análise de espectroscopia de absorção na região do infravermelho do arroz vermelho hidratado nas temperaturas de 45°C até 75°C, apresentaram bandas características, modificadas em relação ao arroz vermelho pré-seco.
- A análise morfológica por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) evidenciou que o arroz vermelho hidratado em casca, nas temperaturas 45°C até 75°C, promoveram alteração da sua estrutura morfológica.
- A cinética de absorção descrita pelo modelo de Peleg (1988) evidenciou que, nas temperaturas de 55°C, 65°C e 75°C, o arroz vermelho em casca atingiu o teor de água acima de 30 % em base úmida, acima de 5 horas de hidratação condição ideal para que ocorra a gelatinização do amido.
- A modelagem matemática mediante avaliação dos parâmetros estatísticos P, SE, DQM e R² comprovam que, os modelos propostos por Cavalcanti Mata & Duarte (2018) e Cavalcanti Mata & Duarte (2018), em relação ao modelo de Peleg (1988), foram os melhores para toda a faixa de temperatura avaliada.
- A análise termogravimétrica permitiu a determinação da temperatura de degradação e a obtenção da DTG, que forneceu os valores nos quais ocorrem o fenômeno de desidratação e os eventos de degradação dos polissacarídeos presentes nas diferentes amostras de arroz vermelho parboilizado.
- A análise de espectroscopia de absorção na região do infravermelho confirmou a modificação na estrutura química do arroz parboilizado, com tempo em autoclave de 14, 22 e 30 minutos e temperaturas de secagem 50, 60 e 70°C, uma vez que, as bandas características correspondente aos estiramentos: OH-, C-H, C-O e C-OH e as bandas correspondentes às deformações C=O, C-OH e CH₂, bem como às vibrações dos grupos C-O-C e C-O em álcoois, tiveram deslocamento e eliminações de grupos funcionais em relação às bandas características do arroz vermelho *in natura*.

- As análises morfológicas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) apresentaram que, para todas as condições de tempo de autoclave 14, 22 e 30 minutos e temperaturas de secagem 50, 60 e 70°C de arroz vermelho parboilizado sem casca houve a gelatinização do amido.
- O Modelo I de Cavalcanti Mata (2018), modelo semi-teórico, é o melhor para representar os dados experimentais do processo de secagem dos grãos de arroz vermelho parboilizado, em autoclave por 14, 22 e 30 minutos, nas temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C. A Avaliação foi confirmada mediante análise dos parâmetros estatísticos P, SE, DQM e R².
- O coeficiente de difusividade efetiva avaliado pelo Modelo I de Cavalcanti Mata (2018), para os grãos do arroz vermelho parboilizado, aumentou com a elevação de temperatura para o mesmo tempo de autoclave durante o processo de vaporização. Conclui-se, também, que em cada temperatura analisada, a difusividade efetiva reduz com o aumento do tempo de autoclave.
- A energia de ativação avaliada pelo Modelo I de Cavalcanti Mata os grãos de arroz vermelho parboilizado foi reduzida, enquanto que, o tempo em autoclave foi aumentado.
- A entalpia e entropia avaliada pelo Modelo I de Cavalcanti Mata reduziram os seus valores com a elevação da temperatura de secagem do arroz parboilizado, enquanto que o tempo de autoclave foi aumentado.
- O modelo proposto para avaliação dos parâmetros texturométricos de adesividade, firmeza, coesividade, mastigabilidade e gomosidade para o arroz parboilizado comercial Tio João e o arroz vermelho parboilizado em autoclave 14, 22 e 30 minutos submetidos a secagem de 50°C, foram considerados satisfatórios mediante a análise dos parâmetros estatísticos R², DQM, SE e P.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, R. L. J.; SANTOS, N. C.; PEREIRA, T. S.; QUEIROGA, A.P. R.; SILVA, V. M. A.; RIBEIRO, V. H. A.; ARAÚJO, R. D. A.; CABRAL, M. B.; SILVA, L. R. I.; BORGES, E. M. E. S. Cinética de secagem do feijão azuki: modelagem matemática e propriedades termodinâmicas. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 3, p. 3, 2020.

ALVES, G.E.; ISQUIERDO, E.P.; BORÉM, F.M.; SIQUEIRA, V.C.; OLIVEIRA, P.D.; ANDRADE, E.T. Drying Kinetics of Natural Coffee For Different Temperatures and Low Relative Humidity. **Coffee Science**, Lavras, v. 8, n. 2, p. 226 - 236, 2013.

ANVISA. Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 269, de 22 de setembro de 2005. Regulamento Técnico sobre a Ingestão Diária Recomendada (IDR) de proteína, vitaminas e minerais.

AMATO, G. W.; ELIAS, M. C. Parboilização do arroz. Porto Alegre: Editora Ricardo Lenz Ziede, p.160, 2005.

ANGEL, J. D. M.; VÁSQUEZ, T. G. P.; JUNKES, J. A.; HOTZA, D. Caracterização de cinza obtida por combustão de casca de arroz em reator de leito fluidizado. **Química Nova**, v. 32, n. 5, p. 1110-1114, 2009.

Association of Official Analytical chemistry. Official Methods of Analysis of AOC International, 20 ed: AOAC, 2016.

AYAMDOO, A.J.; DEMUYAKOR, B.; SAALIA, F.K.; FRANCIS, A. Effects of Varying Parboiling Conditions on the Cooking and Eating/Sensory Characteristics of Jasmine 85 and Nerica 14 Rice Varieties. **American of Food Technology**. V,9, n,1, p 1-14, 2014.

AVHAD, M.R.; MARCHETTI, J.M. Mathematical modelling of the drying kinetics of Hass avocado seeds. **Industrial Crops and Products**. v.91; p.76–87, 2016.

BALBINOTI^a, T. C. V.; NICOLIN, D. J.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Parboiled Rice and Parboiling Process. **Food Engineering Reviews**. v. 10, p. 165-185, 2018.

BALBINOTI^b, C.V.; JORGE, L.M.M.; JORGE, R.M.M. Modeling the hydration step of the rice (*Oryza sativa*) parboiling Process. **Journal of Food Engineering**. v.216; p.81-89, 2018.

BALBINOTI^c, T.C.V.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R.M.M.. Mathematical modeling of paddy (*Oryza sativa*) hydration in diferente thermal conditions assisted by Raman spectroscopy. **Journal of Cereal Science**. v.79, p.390-398, 2018.

BARTZ, J.; MADRUGA, K.M.; KLEIN, B.; PINTO, V.Z.; DIAS, A.R.G. Propriedades de pasta de amidos de arroz nativo e acetilados. **Brazilian Journal. Food Technology**, p. 78-83, 2012.

BASSINELLO, P. Z.; GARCIA, J. S.; SOARES, L. A.; KOAKUZU, S. N.; NETO, F. P. N.; FERREIRA, R. A.; MENDONÇA, J. A.; SANTIAGO, C. M.; RANGEL, P. H. N. Arroz preto: nova opção culinária para o Brasil. Embrapa arroz e Feijão. Comunicado técnico 147. ISSN 1678-961X, 2008.

BASSINELLO, P.Z.; LUZ, T.C.L.; FERREIRA, C.M. Farinha de arroz: alternativa alimentar e econômica. Santo Antônio de Goiás: Embrapa Arroz e Feijão. Documentos, 315. ISSN 1678-9644, 28 p., 2017.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S. & BRUNS, R. E. Planejamento e otimização de experimentos. Campinas, Brasil, Editora da Unicamp, 299p, 1996.

BENINCA, C.; COLMAN, T.A.D.; LACERDA, L.G.; CARVALHO FILHO, M.A.S.; BANNACH, G.; SCHNITZLER, E. The thermal, rheological and structural properties of cassava starch granules modified with hydrochloric acid at different temperatures. **Thermochimica Acta**. V. 552. p.65-69, 2013.

BEHERA, G.; SUTAR, P. A comprehensive review of mathematical modeling of paddy parboiling and drying: Effects of modern techniques on process kinetics and rice quality. **Trends in Food Science & Technology**. V.75, 2018.

BHAT, F.M.; RIAR, C.S. Effect of amylose, particle size & morphology on the functionality of starches of traditional rice cultivars. **International Journal of Biological Macromolecules** V.92, p. 637–644, 2016.

BÍBLIA SAGRADA: Nova Versão Transformadora. 1ª edição, São Paulo: Mundo Cristão, p. 956, 2016.

BOTELHO, F.M.; CORRÊA, P.C.; GONELI, A. L.D.; MARTINS, M.A.; BAPTESTINI, F. M. Análise da hidratação do arroz na parboilização. **Ciências e Tecnologia de Alimentos**, V.30, n. 3, p 713-718, 2010.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 398 p, 2009.

BOÊNO, J.A.; ASCHERI, D. P.R.; BASSINELLO, P.Z.; Qualidade tecnológica de grãos de quatro genótipos de arroz-vermelho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.15, n.7, p.718–723, 2011.

BOURNE, M.C. **Food texture and viscosity concept and measurement**. 2 ed. Academic Press. 2002.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Secretaria de Defesa Agropecuária. Regras para análise de sementes. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, p.398, 2009.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying and storage of grains and oil seeds. New York: The AVI Van Nostrand Reinhold, p. 450, 1992.

BUGGENHOUT, J.; BRIJS, K; DELCOUR, J.A. The breakage susceptibility of raw and parboiled rice: A review. **Journal of Food Engineering**, v. 117, p.304-315, 2013.

CAPPA, C.; MARA LUCISANO, M.; CÁNOVAS, G.V.B.; MARIOTTI, M. Physical and structural changes induced by high pressure on corn starch, rice flour and waxy rice flour. **Food Research International**. V.85; p. 95–103, 2016.

CARVALHO J. M. G.; BUENO, S. G. S.; OLIVEIRA, D. E. C.; RESENDE, O. Modelagem matemática e propriedades termodinâmicas da secagem do grão de girassol. **Global Science and Technology**, Rio Verde, v.11, n.02, p.136-149, 2018.

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; ALMEIDA, F. A. C.; DUARTE, M. E. M. Secagem de sementes. In: ALMEIDA, F. A. C.; DUARTE, M. E. M.; CAVALCANTI MATA, M. E. R. M. (Ed.). **Tecnologia de armazenamento em sementes**. Campina Grande: UFCG, p. 271-370, 2006.

CAVALCANTI, M.E.R.R.M; MATA, M.E.R.M.; DUARTE, M.E.M.; ALMEIDA, R.D.; PAULO, F.F. Secagem de Sementes de Feijão Macassar Destinadas a Crioconservação. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.13, n.Especial, p.511-524, 2012.

CASTRO, E.M.; VIEIRA, N. R.A.; RABELO, R. R.; SILVA, S. A. Qualidade de grãos em arroz. Embrapa Arroz e Feijão. Circular técnica, 34, ISSN: 1516-8476. 30p,1999.

CHAVAN, P.; SHARMA, S. R.; MITTAL, T. C.; MAHAJAN, G.; GUPTA, S. K.. Optimization of Parboiling Parameters to Improve the Quality Characteristics of Pusa basmati 1509. **Journal of Food Process Engineering**. V. 40, No. 3, 2017.

CEREDA, M.P. Propriedades gerais do amido. São Paulo: Fundação Cargil. p. 219, 2002.

CHEEVITSOPON, E.; NOOMHORM, A. Kinetics of Hydration and Dimensional Changes of Brown Rice. **Journal of Food Processing and Preservation**.v.35, p. 840–849, 2011.

COLUSSI, R.; EL HALAL, S.L.M.; PINTO, V.Z., BARTZ, J.; GUTKOSKI, L.C.; ZAVAREZE, E.R.; DIAS, A. R.G. Acetylation of rice starch in an aqueous medium for use in food. **Food Science and Technology**. V.62, p.1076-1082, 2015.

COLUSSI, R.; PINTO, V.Z.; EL HALAL, S.L.M.; BIDUSKI, B.; PRIETTO, L.; CASTILHOS, D.D.; ZAVAREZE, E.R.; DIAS, A.R.G. Acetylated rice starches films with different levels of amylose: Mechanical, water vapor barrier, thermal, and biodegradability properties. **Food Chemistry**. V.221, p.1614–1620, 2017.

COUTINHO, M. R. Modelagem, simulação e análise da hidratação de grãos de soja. Maringá, PR, 2006. 178 p. Tese (Doutorado em Engenharia Química) - Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá – UEM.

CORRÊA, P.C.; BOTELHO, F. M.; OLIVEIRA, G. H. H.;GONELI, A. L.D.;RESENDE, O.;Campos, S.C. Mathematical modeling of the drying processo f corn ears. **Acta Scientiarum Agronomy**,V.33, n.4, p. 575-581, 2011.

CORRÊA, P.C.; OLIVEIRA, G. H. H. de; OLIVEIRA, A. P. L. R. de; BOTELHO, F. M.; GONELI, A. L. D. Thermodynamic properties of drying process and water absorption of rice grains. **Cyta - Journal of Food**,V.5, n.2, p. 204-210, 2016.

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.

DEMONT, M.; ZOSSOU, E.; RUTSAERT, P.; NDOUR, M.; MELE, P. V.; VERBEKE, W. Consumer valuation of improved rice parboiling technologies in Benin. **Food Quality and Preference**, v. 23, p. 63–70, 2012.

DENARDIN, C.C.; SILVA, L.P.; STORK, C.R.; NORBERG, J.L. Composição Mineral de Cultivares de Arroz integral, Parboilizado e Branco. **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v.15, p.125-130, 2004.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. da. Estrutura dos grânulos de amido e sua relação com propriedades físico-químicas. **Ciência Rural**, V.39, n.3, 2009.

DORS, G. C.; PINTO, R. H.; BADIALE-FURLONG, E. Influência das condições de parboilização na composição química do arroz. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**. V. 29. n. 1. p.219-224, 2009.

DUTTA, H.; MAHANTA, C. L. Traditional Parboiled Rice-Based Products Revisited: Current Status and Future Research Challenges. **Rice Science**, V. 21, no 4, p 187-200, 2014.

DUTTA, H.; MAHANTA, C.L.; SINGH, V.; Changes in the properties of rice varieties with different amylose content on dry heat parboiling. **Journal of Cereal Science**. V.65, p.227-235, 2015.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Oxford: Clarendon Press, Ed. 2ª, 414p, 1975.

EJEBE, C.; DANBABA, N.; NGADI. M. Effect of steaming on physical and thermal properties of parboiled rice. **European International Journal of Science and Technology**. V. 4 N. 4, 2015.

FARIA, R. Q.; TEIXEIRA, I.R.; DEVILLA, I.A.; ASCHERI, D.P.R.; RESENDE, O. Cinética de secagem de sementes de crambe. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.16, n.5, p.573–583, 2012.

FONSECA, F. A. Condições de Encharcamento sobre a Qualidade de Arroz Parboilizado Cultivado em Terras Altas. Dissertação apresentada à coordenação do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos da Universidade Federal de Goiás, 2010.

FONSECA, F. A.; JÚNIOR, M. S. S.; CALIARI, M.; GARCIA, D. M; BASSINELLO, P. Z.; EIFERT, E. C. Efeito da temperatura e do tempo de imersão da etapa de encharcamento sobre a cor dos grãos de arroz parboilizado de cultivares de terras altas. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, V. 32, n. 1, p. 221-234, 2011.

FRACASSO, A.F.; PERUSSELLO, C.A.; HAMINIUK, C.W.I; JORGE, L.M.M.; JORGE, R.M.M. Hydration kinetics of soybeans: Transgenic and conventional cultivars. **Journal of Cereal Science**.V. 60, no 3, p.584–588, 2014.

GENKAWA, T.; TANAKA, F.; HAMANAKA, D.; UCHINO, T. Incidence of open crack formation in short-grain polished rice during soaking in water at different temperatures, **Journal of Food Engineering**, V.103, n. 4, p.457-463, 2011.

GHAFOOR, M; MISRA, NN; MAHADEVAN, K; TIWARI, BK. Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*), **Ultrasonics Sonochemistry**, v.21, n1, p.409-414, 2014.

HASAN, A.A.M.; BALA, B.K; ROWSHON, M.K. Thin layer drying of hybrid rice seed. **Engineering in Agriculture, Environment and Food**. V. 7; p.169-175, 2014.

HACIHAFIZOG˘ LU, O.; AHMET CIHAN, A.; KAHVECI, K. Mathematical modelling of drying of thin layer rough rice food and bioproducts processing. **Food Science and Technology International**. V. 8, no 6, p. 268-275, 2008.

HELBIG, E.; ROMANO, C. M.; RADÜNZ, A. L.; RUTZ, D.; DIAS, A. R. G.; ELIAS, M. C. Efeitos da Amilose e do Processamento na Formação e Estabilidade do Amido Resistente em Arroz. Campinas: **Brazilian Journal of Food Technology**, v. 10, n. 4, p. 296-301, 2008.

HENDERSON, S.M. Progress in developing the thin layer drying equation. **Transaction of the American Society of Agriculture Engineering**, V.17: p.1167-1168, 1974.

HENDERSON, S. M.; PABIS, S. Graindryingtheory. I. Temperature effect on drying coefficient. **Journal of Agriculture e Engineering Research**, v. 6, n. 3, p. 169-174, 1961.

HUANG, J.; ZHAO, L.; MAN, J.; WANG, J.; ZHOU, W.; HUAI, H.; WEI, C., Comparison of physicochemical properties of B-type nontraditional starches from different sources. **International Journal of Biological Macromolecules**. V. 78, p. 165–172, 2015.

HUANG, S.L.; JAO, C. L.; HSU, K.C.; Effects of Hydrostatic Pressure/Heat Combinations on Water Uptake and Gelatinization Characteristics of Japonica Rice Grains: A Kinetic Study. **Journal of Food Science**. V.74, n.8, 2009.

HOOVER, R.; HUGHES, T.; CHUNG, H.J.; LIU, Q. Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches: A review. **Food Research International**, V.43, no 2, p.399-413, 2010.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolfo Lutz. Instituto Adolfo Lutz, São Paulo, 2016.

ITANI, T.; TAMAKI, M.; ARAI, E.; HORINO, T. Distribution of amylose, nitrogen, and minerals in rice kernels with various characters. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, V.50, p.5326-5332, 2002.

JIDEANI, V.A.; MPOTOKWANA, S.M. Modeling of water absorption of Botswana bambara varieties using Peleg's equation. **Journal of Food Engineering**, V.92, n 2, p 182-188, 2009.

LIMA, F. F. & ANDRADE, C. T. Effect of melt – processing and ultrasonic treatment on physical properties of high amylose maize starch. **Ultrasonics Sonochemistry**, V. 17, p.637, 2010.

KALE, S. J.; JHA, S. K.; JHA, G. K.; SINHA, J. P.; LAL, S. B. Soaking Induced Changes in Chemical Composition, Glycemic Index and Starch Characteristics of Basmati Rice. **Rice Science**, V. 22, no 5, p.227– 236, 2015.

LAMBERTS, L.; GOMAND, S.V.; DERYCKE, V.; DELCOUR, J.A. Presence of Amylose Crystallites in Parboiled Rice. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. v.57, p.3210–3216, 2009.

LIMA, B. N. B.; CABRAL, T. B.; NETO, R. P. C.; TAVARES, M. I. B. Estudo do Amido de Farinhas Comerciais Comestíveis. **Polímeros**, v. 22, n. 5, p. 486-490, 2012.

LIMA, F. F. & ANDRADE, C. T. **Ultrasonics Sonochemistry**. V. 17, n. 4, p.637-641, 2010.

LUCHESE, C.L.; SPADA, J.C.; TESSARO, I.C. Starch content affects physicochemical properties of corn and cassava starch based films, **Industrial Crops and Products**, V.109, p.619-626, 2017.

MALI, S.; GROSSMANN, M.V.E.; YAMASHITA, F. Filmes de amido: produção, propriedades e potencial de utilização. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 31, n. 1, p.137-156, 2010.

MACHADO, B. A. S.; REIS, J. H. O.; SILVA, J. B.; CRUZA, L. S.; NUNES, I. L.; PEREIRA, F. V.; DRUZIAN, J. I. Obtenção de nanocelulose da fibra de coco verde e incorporação em filmes biodegradáveis de amido plastificados com glicerol. **Química Nova**, V.37, No. 8, p.1275-1282, 2014.

MAHANTA, C. L.; BHATTACHARYA, K. Thermal degradation of starch in parboiled rice. **Starch Staerke**, V.41, n 3, p.91–94.1989.

MATA, M.E.R.M. Tecnologia de armazenamento em sementes, Ed. Campina Grande: UFCG, p. 197-198, 2006.

MENEZES, B.R.S; MOREIRA, L.B.; LOPES, H.M.; PEREIRA, M.B. Caracterização Morfoagronômica em Arroz Vermelho e Arroz de Sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 41, n. 4, p. 490-499, 2011.

MENEGHETTI, V.L.; AOSANI, E.; ROCHA, J.C.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M.C.; POHNDORF, R.S. Modelos matemáticos para a secagem intermitente de arroz em casca. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. V.16, n.10, p.1115–1120, 2012.

MEULLENET, J. F. C.; CARPENTER, J. A.; LYON, B. G.; LYON, C. E. Bi-cyclical instrument for assessing texture profile parameters and its relationship to sensory evaluation of texture. *Journal of Texture Studies*, Raleigh, V. 28, n. 1, p. 101-118, 1997.

MERCI, A.; MARIM, R. G.; URBANO, A. ; MALI, S..Films based on cassava starch reinforced with soybean hulls or microcrystalline cellulose from soybean hulls. **Food Packaging and Shelf Life**. V. 20, 2019.

MENDONÇA, A. P.; SILVA, L. M., M.; SOUSA, F. C.; SILVA, J. R.,; ROSA, J. C. Modelagem matemática das curvas de secagem de sementes de duas espécies de andiroba. **Revista Engenharia na Agricultura**, v. 27, n. 4, p. 293-303, 2019.

MIANO, A.C.; AUGUSTO, P.E.D. The Hydration of Grains: A Critical Review from Description of Phenomena to Process Improvements. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, 17: 352-370. 2018.

MIANO, A.C.; GARCÍA, J.A.; AUGUSTO, P.E.D. Correlation between morphology, hydration kinetics and mathematical models on Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet) grains. **Food Science and Technology**. V.6, p.290 - 298, 2015.

MIDILLI, A.; KUCUK, H.; YAPAR, Z. A new model for single-layer drying. **Drying Technology**, Philadelphia, V. 20, n. 7, p. 1503-1513, 2002.

MIN, B, MCCLUNG, A., CHEN, M-H. Effects of hydrothermal processes on antioxidants in brown, purple and red bran whole grain rice (*Oryza sativa* L.), **Food Chemistry**, V. 159, p.106-115, 2014.

MOREIRA, S.M.C.; CHAVES, M.A.; OLIVEIRA, L.M. Comparação da eficiência de líquidos na determinação da massa específica aparente de grãos agrícolas. **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, V. 9, n. 1 e 2, p. 22-24, 1984.

NAVES, M.M.V. Características químicas e nutricionais do arroz, **Boletim do Centro de Pesquisa de Processamento de Alimentos**. V. 25, n. 1, p. 51-60, 2007.

OLI, P.; WARD, R.; ADHIKARI, B.;TORLEY, P. Parboiled rice: Understanding from a materials Science approach. **Journal of Food Engineering**, V.124, p 173-183, 2014.

OLI, P.; WARD, R.; ADHIKARI, B.;TORLEY, P. Colour change in rice during hydration: Effect of hull and bran layers. **Journal of Food Engineering**. V. 173, p 49 58, 2016.

OLIVEIRA, A.L.; COLNAGHI, B.G.; SILVA, E.Z; GOUVÊA, I.R.; VIEIRA, R.L.; AUGUSTO, P.E.D. Modelling the effect of temperature on the hydration kinetic of adzuki beans (*Vignaangularis*). **Journal of Food Engineering**. V. 118, n. 4, p. 417–420, 2013.

OMOTO, E.S.; ANDRADE, C.M.G.; JORGE, R.M.M; COUTINHO, M.R.; PARAÍSO, P.R.; JORGE, L.M.M. Modelagem matemática e análise da hidratação de grãos de ervilha. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**.V. 29, n. 1, p. 12-18, 2009.

PAGE, G. E. Factors influencing the maximum air drying shelled corn in thin layer. Dissertation (Master'sThesis). Department of Mechanical Engineering, Purdue University, Purdue, 1949.

PASCUAL, C. S. C. I. Efeitos da parboilização do arroz (*Oryza sativa* L.) integral sobre os compostos bioativos e a disponibilidade do amido. 2010. 102 f. Tese (Doutorado em Bromatologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PAIVA, F.F.; VANIER, N.L.; BERRIOS, J.J; PINTO, V.Z.; WOOD, D.; WILLIAMS, T.; PAN, J.; ELIAS, M.C. Polishing and parboiling effect on the nutritional and technological properties of pigmented rice. **Food Chemistry**. V.191, p.105–112. 2016.

PAGNAN, M. F.; BASSINELLO, P. Z.; PRUDENCIO, S. H. Características sensoriais, físicas e químicas e aceitação de arroz irrigado ou de terras altas. **Pesquisa agropecuária brasileira**, V. 50, n. 10, p. 979-988, 2015.

PAL, P.; SINGH, N.; KAUR, P.; KAUR, A. Effect of Parboiling on Phenolic, Protein, and Pasting Properties of Rice from Different Paddy Varieties. **Journal of Food Science**. V. 83, n. 11, p. 2761-2771, 2018.

PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, V. 52, n. 4, p. 1216-1219, 1988.

PEREIRA, J.A. Os arrozos vermelhos *Oryza Glaberrima Steud.* e *Oryza sativa L.* Embrapa Meio Norte. Documentos, 262, ISSN 0104-866X, 30p, 2019.

PEREIRA, J. A.; MORAIS, O.P. As variedades de arroz vermelho brasileiras. Embrapa Meio-Norte. Documentos, 229, ISSN 0104-866X, 39p, 2014.

PINEDA-GÓMEZ, P.; ROSALES-RIVER; RODRÍGUEZ-GARCÍA, M.E. Modeling calcium and water in take in thre shed corn grain during thermo-alkalin e treatment. **Journal of Food Engineering**. p. 434–441, 2012.

POLESI, L.F.; LIMA, D.C.; MORAIS, P.G.; ROMO, I.C.F.; SARMENTO, S.B.S.; BRAZACA, S.G.C. Caracterização Físico-química, Funcional e Nutricional de duas cultivares Brasileiras de Arroz. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindústria**, V.8; n.1, p. 1262-1273, 2014.

QUINCAZÁN, M.C.; CAICEDO, L. A.; CUENCA, M. Appling Peleg's equation to modelling the kinetics of solid hydration and migration during soy bean soaking. **Ingeniería e Investigación**, V. 32, n.3, p 53-57, 2012.

R Core Team (2019) R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

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

RESIO, A.C., AGUERRE, R.J.; SUAREZ, C. Hydration kinetics of amaranth grain. **Journal Food Engineering**. V.72, p.247–253, 2006.

ROCHA, T. S.; DEMIATE, I.M.; FRANCO, C.M.L. Características estruturais e físico-químicas de amidos de mandioquinha-salsa (*Arracacia xanthorrhiza*). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, V.28, n 3, p 620-628, 2008.

SILVA, J. P. S.; OLIVEIRA, V. H. Q.; DOS SANTOS, S. G. F.; RODOVALHO, R. S.; QUEIROZ, J. S.; SILVA, D. P. Cinética de secagem dos grãos de soja em secador experimental. **Global Science and Technology**, v. 12, n. 2, 2019.

SILVA, V. M. A, ALMEIDA, R. L. J., SANTOS, N. C., MUNIZ, C. E. S., BARROS, E. R. Predição de modelos matemáticos sobre a cinética de secagem de nozes (*Juglans regia L.*) sem casca. **Research, Society and Development**, V. 9, n.7, 2020.

SOUSA, R. V.; CAVALCANTI MATA, M. E. R.M.; DUARTE, M. E.M.; ALMEIDA, R. D.; ROSA, M. E. C. Análise da cinética de secagem em camada fina do arroz vermelho em casca. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, V.18, n. Especial, p. 517-529, 2016.

SAJILATA, M.G.; SINGHAL, R.S.; KULKARNI, P.R. Resistant Starch - A Review. **Comprehensive Reviews in food science and food safety**, V. 5, p. 1-17, 2006.

SANTOS, N.C.; SILVA, W.P.; BARROS, S.L.; ALMEIDA, ARAÚJO, A.J.B.; NASCIMENTO, A.P.S. Red rice (*Oryza sativa L.*) use in flour production: Convective drying and bioactive quality. **Journal of Food Process Engineering**. V. 43, n.10, p. 1-10, 2020.

SHAFAEI, S.M.; MASOUMI, A.A.; ROSHAN, H. Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg Model. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Science**, V. 15, p 135-144, 2016.

SHAH, A.; MASOODI, F.A.; GANI, A.; ASHWAR, B.A. Physicochemical, rheological and structural characterization of acetylated oat starches. **Food Science and Technology**. V. 80. p.19-26, 2017.

SILVA, L.M.M; SOUSA, F.C.; SOUSA, E.P.; MATA, M.E.R.M.C.; DUARTE, M.E.M. Modelos de predição da cinética de secagem dos grãos de guandu. **Brazilian Journal Food Technology**., Campinas, V. 17, n. 4, p. 310-318, 2014.

SITTIPOD, S.; SHI, Y.C. Changes of starch during parboiling of rice kernels. **Journal of Cereal Science**. V. 69. p.238-244, 2016.

SOUZA, M.S.M; SILVA, L.A.; LIRA, J.F.B.; MENDONÇA, J. D. J.; Miranda, N. O.; PEREIRA, J. A. Desempenho de Cultivares de Arroz Vermelho em Apodi-RN. In: Inovagri International Meeting e IV Winotec Workshop International de Inovações Tecnológicas na Irrigação. Anais do Inovagri International Meeting & IV Winotec Workshop International de Inovações Tecnológicas na Irrigação. Fortaleza, CE, 28 a 31 de maio de 2012.

SOUZA, R.C.R.; ANDRADE, C. T. Investigação dos Processos de Gelatinização e Extrusão de Amido de Milho. **Polímeros: Ciência e Tecnologia**, V. 10, n. 1, p. 24-30, 2000.

OLIVEIRA, M. de; PARAGINSKI, R. T.; ZIEGLER, V.; TALHAMENTO, A.; ELIAS, M. C. Propriedades tecnológicas e de cocção em grãos de arroz condicionados em diferentes temperaturas antes da parboilização. **Brazilian Journal of Food Technology**. V. 17, n. 2, p. 146-153. 2014.

PASCUAL, C. S. C. I. Efeitos da parboilização do arroz (*Oryza sativa* L.) integral sobre os compostos bioativos e a disponibilidade do amido. 2010. 102 f. Tese (Doutorado em Bromatologia) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

PAGNAN, M. F.; BASSINELLO, P. Z.; PRUDENCIO, S. H. Características sensoriais, físicas e químicas e aceitação de arroz irrigado ou de terras altas. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**., V. 50, n. 10, p. 979-988, 2015.

TOÉ, A.T.O.D.; FIORESE, M.L. Estudo da secagem da casca de soja para utilização com fins alimentícios. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, V.14, n.4, p.363-372, 2012.

VOLPE, T. C. Cinética da hidratação do grão de arroz no processo de parboilização. 121 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, 2014.

WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; AVILA, L.A. Arroz: Composição e caracterização nutricionais. **Ciência Rural**, Santa Maria, V. 38, n.4, p. 1184-1192, 2008.

WEBER, J. M. ARROZ: Características Químicas, Culinárias e Nutricionais das Diferentes Variedades Consumidas no Brasil. Universidade de Brasília Faculdade de Ciências da Saúde. Curso de Nutrição Trabalho de Conclusão de Curso, Brasília – DF, 2012.

WOGGUM, T.; SIRIVONGPAISA, P.; WITTAYA, T. Properties and characteristics of dual-modified rice starch based biodegradable films. **International Journal of Biological Macromolecules**. V.67, p. 490–502, 2014.

WOGGUM, T.; SIRIVONGPAISAL, P.; WITTAY, T. Properties and characteristics of dual-modified rice starch based biodegradable films. **International Journal of Biological Macromolecules**. V. 67 p.490–502, 2014.

WOGGUM, T.; SIRIVONGPAISA, P.; WITTAYA, T. Characteristics and properties of hydroxypropylated rice starch based biodegradable films. **Food Hydrocolloids**. V. 50, P.54-64, 2015.

WU, Y.; CHEN, Z.; LI, X.; WANG, Z. Retrogradation properties of high amylose rice flour and rice starch by physical modification. **Food Science and Technology**, V. 43, p. 492–497, 2010.

ZHU, L.; ZHANG, H.; WU, G.; QI, X. WANG, L. QIAN, H. Effect of structure evolution of starch in rice on the textural formation of cooked rice. **Food Chemistry**. V. 342, p. 128205-128216, 2021.

YI, X.K; WU, W. F.; ZHANG, Y.Q.; LI, J.X.; LUO, H. P. Thin-Layer Drying Characteristics and Modeling of Chinese Jujubes. **Mathematical Problems in Engineering**. V. 2012, p. 1-18, 2012.

APÊNDICE

Tabela A1 – Dados experimentais da absorção de água durante a hidratação do arroz vermelho em casca durante 7 horas, como também os dados de razão de teor de água em base seca para o arroz vermelho hidratado

Tempo (h)	Absorção de água %/45°C	Absorção de água %/55°C	Absorção de água %/65°C	Absorção de água %/75°C	RX'/45°C	RX''/55°C	RX'/65°C	RX'/75°C
0,0	15,00	15,00	15,00	15,00	0,000	0,000	0,000	0,000
0,5	16,36	16,79	18,15	18,48	0,075	0,077	0,129	0,138
1,0	17,71	18,58	21,30	21,95	0,149	0,154	0,258	0,276
1,5	20,14	22,74	24,07	26,70	0,284	0,333	0,372	0,464
2,0	22,22	23,96	27,63	30,68	0,398	0,386	0,518	0,622
2,5	23,33	25,65	30,29	32,81	0,459	0,459	0,627	0,707
3,0	24,63	27,69	31,76	36,27	0,531	0,547	0,687	0,844
3,5	26,46	28,82	34,00	37,34	0,632	0,596	0,779	0,886
4,0	27,35	30,36	35,57	38,43	0,681	0,662	0,843	0,929
4,5	28,20	31,91	36,73	39,51	0,728	0,729	0,891	0,972
5,0	29,06	33,53	38,22	39,60	0,775	0,799	0,951	0,976
5,5	30,09	34,77	38,66	39,68	0,832	0,852	0,969	0,979
6,0	31,13	36,21	39,09	39,95	0,889	0,914	0,987	0,990
6,5	32,22	37,83	39,15	39,97	0,949	0,984	0,990	0,991
7,0	33,14	38,20	39,40	40,21	1,000	1,000	1,000	1,000

Tabela A2- Dados experimentais da secagem do arroz vermelho parboilizado autoclado por 14, 22 e 30 minutos e temperaturas de secagem de 50, 60 e 70°C

Tempo			14 minutos			22 minutos			30 minutos		
S	Minutos	hora	50° C	60° C	70° C	50°C	60° C	70° C	50° C	60° C	70° C
0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1
600	10	0,17	0,9119	0,88	0,813	0,9316	0,8974	0,86	0,95	0,8651	0,8914
1200	20	0,33	0,8068	0,7671	0,6534	0,8376	0,8013	0,6723	0,9201	0,8151	0,6847
1800	30	0,5	0,7215	0,6717	0,5346	0,7607	0,6923	0,5687	0,8584	0,7534	0,5837
2400	40	0,67	0,6277	0,5417	0,4277	0,7009	0,6026	0,4817	0,7831	0,6781	0,5052
3000	50	0,83	0,5595	0,4736	0,3623	0,6239	0,5256	0,4148	0,7077	0,6027	0,4603
3600	60	1	0,5055	0,4096	0,3089	0,5897	0,4615	0,3746	0,6529	0,5479	0,4042
4200	70	1,17	0,4457	0,3594	0,2673	0,5299	0,4103	0,3278	0,5982	0,4932	0,3761
4800	80	1,33	0,4031	0,3162	0,2317	0,4957	0,3654	0,2943		0,4384	
5400	90	1,5	0,3718	0,2896		0,453		0,2609		0,3904	0,3344
6000	100	1,67	0,3406	0,2535	0,1901	0,4103	0,3269	0,2408			
6600	110	1,83	0,3263	0,2367		0,3846	0,2885	0,2207		0,3562	
7200	120	2	0,261	0,2091	0,128	0,3504	0,2628	0,2006			0,2331
7800	130	2,17	0,2269			0,3248					
8400	140	2,33			0,0993	0,28	0,2372	0,1672		0,3151	
9288	155	2,58	0,1942	0,1454		0,265			0,45		0,1807
9600	160	2,67			0,0705		0,1859			0,274	
10200	170	2,83	0,1585			0,2308		0,1003			0,1639
12000	200	3,33	0,1271	0,1004	0,043		0,1538			0,2403	0,1302
13800	230	3,83	0,1186	0,0705	0,0246	0,188	0,1154	0,0634	0,36	0,2197	0,1021
15600	260	4,33	0,0919	0,05	0,0072		0,1026				
17400	290	4,83	0,0712	0,041	0,0053	0,1453	0,0833	0,0333	0,28	0,1818	0,0809

1920 0	320	5,3 3	0,06 6	0,03 3	0,00 24	0,136 8		0,026 6			
2040 0	340	5,6 7		0,01 35	0,00 18	0,111 1	0,06 41				
2100 0	350	5,8 3	0,05 4					0,02	0,24	0,15 44	0,06 85
2220 0	370	6,1 7				0,094					
2280 0	380	6,3 3	0,04 21	0,00 9			0,05 13				
2400 0	400	6,6 7				0,076 9		0,013 3			
2460 0	410	6,8 3	0,02 21						0,2	0,12 7	0,04 6
2640 0	440	7,3 3	0,01 2			0,068 4	0,04		0,18		0,04 04
2760 0	460	7,6 7	0,00 9					0,006 36		0,10 27	
3000 0	500	8,3 3	0,00 87			0,059 8					
3120 0	520	8,6 7					0,02				
3180 0	530	8,8 3				0,059 8			0,16	0,08 9	0,03 48
3360 0	560	9,3 3					0,01 6				
3480 0	580	9,6 7				0,042 7					
3540 0	590	9,8 3							0,14	0,07 24	0,02 92
3720 0	620	10, 33				0,034 2	0,00 2				
3840 0	640	10, 67									
3900 0	650	10, 83				0,025 6			0,12	0,06 85	0,02 36
4080 0	680	11, 33					0,00 25				
4200 0	700	11, 67				0,017 1					
4260 0	710	11, 83							0,1	0,05 85	0,01 8
4440 0	740	12, 33									0,01 23
4560 0	760	12, 67				0,008 5			0,07	0,04 16	0,00 67
4920 0	820	13, 67							0,05	0,02 83	0

58500	975	16,25							0,02	0	
74400	1240	20,67							0,004		
86400	1440	24							0,002		
100800	1680										

Tabela A3- Dados experimentais da Firmeza, adesividade, coesividade, elasticidade, gomosidade e mastigabilidade do arroz vermelho submetido a secagem de 50°C e do arroz Tio João parboilizado

Amostra	Firmeza	Adesividade	Coesividade	Elasticidade	Gomosidade	Mastigabilidade
Arroz Tio Joao 20minutos 1	65,607	0,025	0,2	0,999492257	13,1214	13,1147377
Arroz Tio Joao 20minutos 2	66,458	0,024	0,214580617	0,999633565	14,26059865	14,25537308
Arroz Tio Joao 20minutos 3	63,517	0,036	0,192484649	1,000349162	12,22604742	12,23031629
Arroz Tio Joao 22minutos 1	55,532	0,057	0,206346011	1	11,45880666	11,45880666
Arroz Tio Joao 22minutos 2	53,408	0,096	0,19898434	1,000727537	10,62735564	10,63508744
Arroz Tio Joao 22minutos 3	58,632	0,041	0,18735501	1,000389257	10,98499893	10,98927491
Arroz Tio Joao 26minutos 1	48,684	0,061	0,171723678	0,99965998	8,360195558	8,35735292
Arroz Tio Joao 26minutos 3	47,242	0,067	0,185988855	1,000345543	8,786485502	8,789521607

Arroz Tio Joao 26minutos 5	48,429	0,02	0,170815706	1	8,272433832	8,272433832
Arroz Tio Joao 30minutos 1	42,06	0,062	0,139542086	1	5,869140139	5,869140139
Arroz Tio Joao 30minutos 2	44,981	0,029	0,146338008	1,000325309	6,582429948	6,584571272
Arroz Tio Joao 30minutos 6	44,651	0,033	0,211362917	0,999773037	9,437565614	9,435423634
Arroz Tio Joao 40minutos 1	33,73	0,074	0,13740749	0,999688279	4,634754629	4,633309881
Arroz Tio Joao 40minutos 3	34,586	0,024	0,135960959	1,000698324	4,702345715	4,705629476
Arroz Tio Joao 40minutos 5	37,932	0,078	0,145829428	1	5,531601874	5,531601874
Arroz Tio Joao 60minutos 3	26,36	0,326	0,100225785	1,000681663	2,641951705	2,643752626
Arroz Tio Joao 60minutos 6	26,029	0,114	0,094927297	1	2,470862607	2,470862607
Arroz Tio Joao 60minutos 7	28,459	0,325	0,105684121	1	3,007664392	3,007664392
Arroz vermelho 20minutos p203	264,522	0,001	0,488987315	1	129,3479025	129,3479025
Arroz vermelho 20minutos p204	264,543	0	0,498716157	0,999343832	131,9318683	131,8452989

Arroz vermelho 20minutos p206	263,842	0	0,495630383	0,999164229	130,7681116	130,6588194
Arroz vermelho 22minutos p206	195,645	0,018	0,379198937	1	74,18837594	74,18837594
Arroz vermelho 22minutos p208	201,801	0,001	0,378304923	1	76,34231168	76,34231168
Arroz vermelho 22minutos p209	203,505	0,007	0,363427098	1,000672495	73,95923152	74,00896873
Arroz vermelho 26minutos p201	180,435	0,001	0,370998154	0,999659052	66,94105185	66,91822844
Arroz vermelho 26minutos p203	178,528	0,001	0,400980705	1	71,58628321	71,58628321
Arroz vermelho 26minutos p207	184,761	0	0,374437339	1	69,18141727	69,18141727
Arroz vermelho 30minutos p202	163,004	0,002	0,355021777	0,999343832	57,8699698	57,83199738
Arroz vermelho 30minutos p205	175,327	0	0,393366519	0,999362651	68,96777168	68,92381516
Arroz vermelho 30minutos p206	175,235	0	0,345079674	0,999670619	60,47003662	60,45011895
Arroz vermelho 40minutos p203	151,736	0,001	0,28513533	0,999371662	43,26529439	43,23810915
Arroz vermelho 40minutos p206	159,53	0,001	0,325943884	0,999712726	51,99782779	51,98289018

Arroz vermelho 40minutos p209	154,635	0	0,316454843	1,000576535	48,93499465	48,96320738
Arroz vermelho 60minutos p202	104,121	0,058	0,249387346	0,999746771	25,96645988	25,95988443
Arroz vermelho 60minutos p204	111,035	0,002	0,270719539	0,999755082	30,05934401	30,05198193
Arroz vermelho 60minutos p207	116,492	0,002	0,313926723	1,00052233	36,56995178	36,58905335
Arroz vermelho 2 20min1	231,839	0,002	0,463374882	0,999594814	107,4283693	107,3848408
Arroz vermelho 2 20min2	232,317	0,001	0,450017704	0,999609984	104,5467631	104,5059882
Arroz vermelho 2 20min8	232,078	0,0015	0,456696293	0,999602399	105,9875662	105,9454145
Arroz vermelho 2 22min3	212,641	0	0,56724722	1,000416753	120,620016	120,6702849
Arroz vermelho 2 22min4	208,436	0,001	0,480579131	1	100,1699917	100,1699917
Arroz vermelho 2 22min6	197,377	0	0,39284556	0,999441964	77,53867819	77,49540884
Arroz vermelho 2 26min4	211,757	0,011	0,437483797	1	92,64025631	92,64025631
Arroz vermelho 2 26min5	187,262	0,01	0,396674892	0,999727223	74,28213363	74,26187118
Arroz vermelho 2 26min6	206,509	0,01	0,466243207	1	96,28341849	96,28341849
Arroz vermelho 2 30min1	183,64	0,001	0,464873049	1	85,36928675	85,36928675
Arroz vermelho 2 30min2	193,042	0,001	0,419618565	0,99968264	81,00400703	80,97829964

Arroz vermelho 2 30min4	190,476	0,01	0,40282978 2	1	76,7294056 1	76,72940561
Arroz vermelho 2 40min1	183,802	0,007	0,30994228 5	1,00064850 8	56,9680119	57,00495614
Arroz vermelho 2 40min2	174,123	0,019	0,35929154 9	1,00027631 9	62,5609224 5	62,57820925
Arroz vermelho 2 40min5	178,962 5	0,013	0,33461691 7	1,00046241 4	59,7644671 8	59,79158269
Arroz vermelho 2 60min1	127,38	0,002	0,28871017 3	0,99970140 3	36,7759018 5	36,7649207
Arroz vermelho 2 60min5	116,233	0,001	0,25059703 2	1,00050200 8	29,1276448 7	29,14226719
Arroz vermelho 2 60min6	110,877	0,03	0,23359612	1	25,9004370 1	25,90043701
Arroz vermelho 3 20min3	319,602	0	0,66255215 2	1	211,752992 8	211,7529928
Arroz vermelho 3 20min5	323,526	0,001	0,59395182 7	1,00035791	192,158858 7	192,2276343
Arroz vermelho 3 20min6	317,854	0	0,65015481 1	1,00077851 3	206,654307 3	206,8151904
Arroz vermelho 3 22min1	271,322	0	0,55556760 4	1,00037608 1	150,737713 4	150,794403
Arroz vermelho 3 22min2	285,03	0	0,57697186 2	0,99969173 9	164,454289 7	164,4035948
Arroz vermelho 3 22min6	277,404	0	0,57501533 6	0,99962672 6	159,511554 4	159,4520129
Arroz vermelho 3 26min1	245,792	0	0,54849974 5	0,99962672 6	134,816849 2	134,7665257
Arroz vermelho 3 26min2	236,957	0	0,45299186 3	0,99962908	107,339592 9	107,2997785
Arroz vermelho 3 26min5	245,1	0	0,49270951 2	1	120,763101 4	120,7631014

Arroz vermelho 3 30min2	245,098	0,051	0,48136993 5	0,99966375 3	117,982808 3	117,9431369
Arroz vermelho 3 30min3	203,144	0,001	0,52982242 3	1,00046739 9	107,630246 3	107,6805525
Arroz vermelho 3 30min4	199,851	0	0,47676909 2	1,00036509 7	95,2827798 9	95,31756733
Arroz vermelho 3 40min1	173,299	0,007	0,36686275 1	0,99970361 6	63,5769478 8	63,55810469
Arroz vermelho 3 40min2	175,101	0,02	0,36896054 2	1,00034234 9	64,6053598 8	64,62747743
Arroz vermelho 3 40min5	187,539	0,007	0,40667087 3	1,00029841 8	76,2666487 6	76,28940813
Arroz vermelho 3 60min2	96,373	0,013	0,23335233 6	1,00037750 1	22,4888646 5	22,49735421
Arroz vermelho 3 60min4	99,039	0,045	0,22615266 4	0,99973139 9	22,3979337 1	22,39191761
Arroz vermelho 3 60min7	110,146	0,049	0,21263615 4	1,00027670 2	23,4210217 8	23,42750242