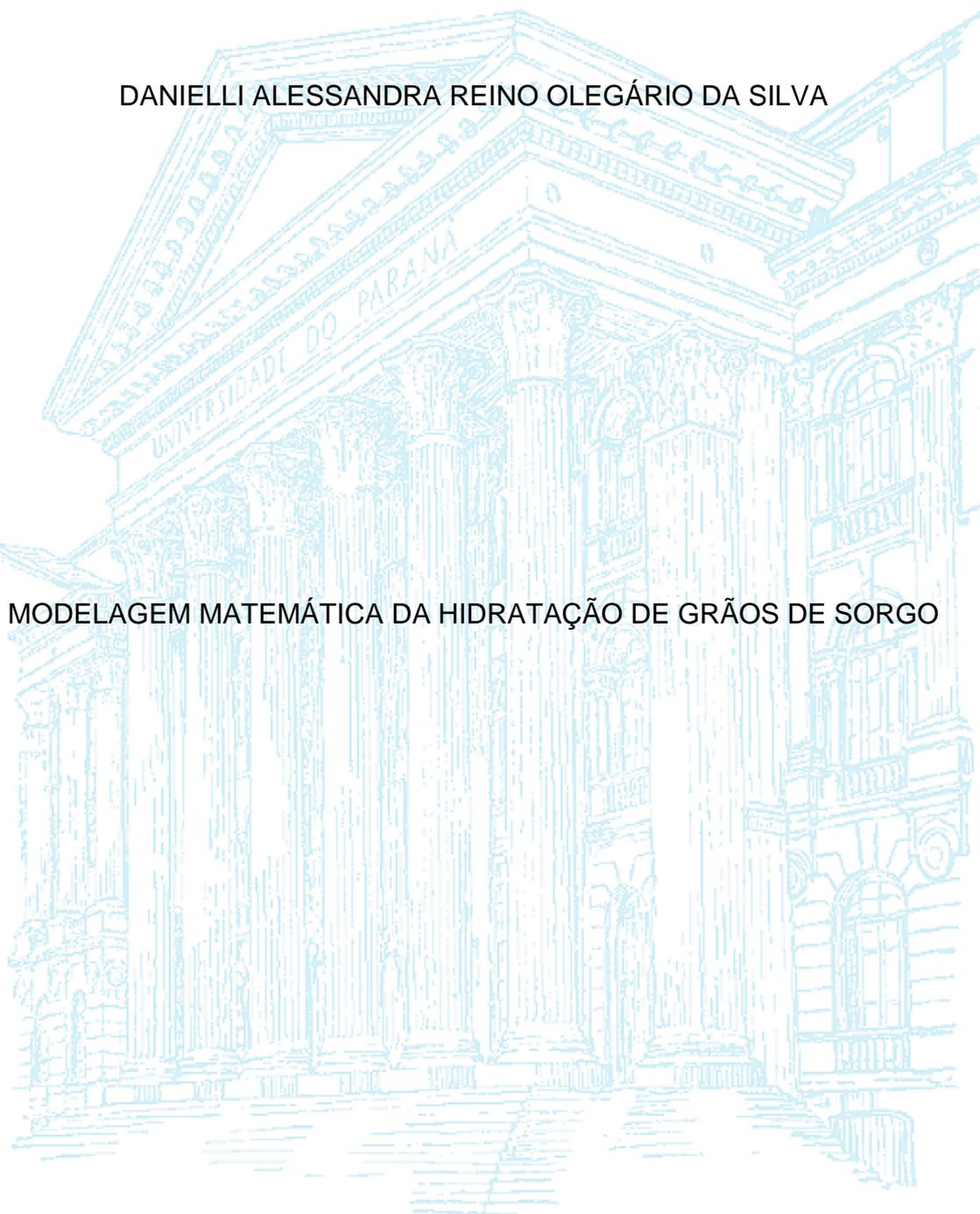


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

DANIELLI ALESSANDRA REINO OLEGÁRIO DA SILVA



MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRATAÇÃO DE GRÃOS DE SORGO

CURITIBA  
2016

DANIELLI ALESSANDRA REINO OLEGÁRIO DA SILVA

MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRATAÇÃO DE GRÃOS DE SORGO

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre em Engenharia de Alimentos, no Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Regina Maria Matos Jorge  
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Mario de Matos Jorge

CURITIBA

2016

---

S586m

Silva, Danielli Alessandra Reino Olegário da Silva  
Modelagem matemática da hidratação de grãos de sorgo/ Danielli  
Alessandra Reino Olegário da Silva Silva. – Curitiba, 2016.  
122 f. : il. color. ; 30 cm.

Dissertação - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia,  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, 2016.

Orientador: Regina Maria Matos Jorge – Co-orientador: Luiz Mario de  
Matos Jorge.

Bibliografia: p. 107-122.

1. Sorgo - Hidratação. 2. Cinética química - Modelos matemáticos. 3.  
Difusão em sólidos. 4. Amido - Química. I. Universidade Federal do Paraná.  
II. Jorge, Regina Maria Matos. III. Jorge, Luiz Mario de Matos. IV. Título.

CDD: 664.7

---

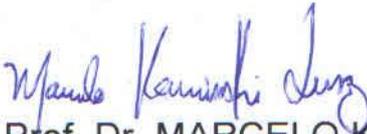
**DANIELLI ALESSANDRA REINO OLEGÁRIO DA SILVA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRATAÇÃO DE GRÃOS DE SORGO**

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre no Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, da Universidade Federal do Paraná, pela Comissão formada pelos professores:

Orientadora:

  
Prof.<sup>a</sup>. Dr.<sup>a</sup>. REGINA MARIA MATOS JORGE  
Setor de Tecnologia, UFPR

  
Prof. Dr. MARCELO KAMINSKI LENZI  
Setor de Tecnologia, UFPR

  
Prof. Dr. MARCOS LUCIO CORAZZA  
Setor de Tecnologia, UFPR

Curitiba, 08 de março de 2016.

Dedico este trabalho à minha família,  
principalmente aos que se foram nesses  
últimos anos, em especial ao meu avô  
Gustavo Reino.

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ter me permitido viver essa jornada, aprender a cada dia com ela e me acompanhado sempre.

Aos meus pais Daniel Olegário da Silva e Donise Reino da Silva pelo carinho, amor, dedicação, preocupação, atenção e apoio incondicional. Ao meu irmão Diogo A. R. Olegário da Silva e a minha cunhada Alessandra de Oliveira pelo companheirismo, carinho e parceria. À minha avó Amélia pelo exemplo de vida e aos meus demais familiares por me ensinarem os caminhos da vida pela força e união.

Agradeço aos professores Dr<sup>a</sup> Regina Maria Matos Jorge e Dr. Luiz Mario de Matos Jorge pela orientação, conselhos e apoio profissional.

Aos meus amigos e parceiros de vida por serem fundamentais em muitos momentos difíceis na minha caminhada: meu parceiro de experimentos Gabriel, e também à Camila, Isabel, Madeline, Mônica, Marlene, Alessandra, Laryssa, Giovanna, Kathelyn, Thaísa, Fernanda, Chacon, Ana e aos demais que contribuíram na minha caminhada.

Ao PPGEQ pela estrutura cedida, em especial ao Prof Dr. Marcelo Lenzi pelo suporte técnico.

Ao PPGEAL, pela oportunidade.

À CAPES pelo financiamento.

## RESUMO

A modelagem matemática é uma importante ferramenta utilizada para otimizar processos na indústria de alimentos, como a hidratação de grãos. Neste trabalho, grãos de sorgo foram submetidos à hidratação para modelar o processo com equações matemáticas. O efeito do tempo e da temperatura nos sólidos lixiviados, umidade, volume e densidade dos grãos foram avaliados. Além disso, possíveis modificações no amido do grão ao longo da hidratação foram verificadas. Para esse fim, as cultivares de sorgo BRS 310 e BRS 655 foram imersas em água a 30, 40, 50 e 60 °C por 12 horas. Alterações na morfologia e nas propriedades térmicas do amido foram avaliadas em Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), respectivamente. A cinética de hidratação foi modelada por equações empíricas (Peleg e Page) e fenomenológicas (Difusão e Omoto). Não houve modificação morfológica do amido ao longo do processo. Todavia, a temperatura e o grau de gelatinização foram maiores a 60 °C ( $p < 0,05$ ), condição que aumenta a proporção de amidos gelatinizados, porém eleva a temperatura necessária para que os grânulos se gelatinizem. O volume dos grãos variou significativamente ( $p < 0,05$ ) ao longo do tempo para as diferentes temperaturas, enquanto a densidade se manteve constante nas mesmas condições. A quantidade de sólidos lixiviados na água de imersão foram significativos ( $p < 0,05$ ) somente a 60 °C, temperatura que deve ser evitada para que o grão não perca parte de sua estrutura. Na cinética de hidratação, os grãos apresentaram absorção inicial rápida em todas as temperaturas, seguida por redução da taxa de absorção até atingir o equilíbrio. O tempo e a temperatura de processo foram significativos ( $p < 0,05$ ) na hidratação, onde um incremento da temperatura resulta em redução do tempo de processo. A cultivar BRS 655 apresentou maior concentração de água no equilíbrio ( $p < 0,05$ ) para todas as condições testadas. Na modelagem, o modelo de Omoto não descreveu o processo adequadamente ( $RMSE \geq 5\%$ ). Contudo, os modelos empíricos de Peleg e Page e o modelo teórico da Difusão apresentaram ajustes satisfatórios. As equações matemáticas de Peleg e da Difusão foram generalizadas para as duas variedades, a fim de prever o ganho de umidade em função do tempo para distintas temperaturas de hidratação. Os modelos generalizados descreveram o processo satisfatoriamente (desvios menores que 4%) e podem ser utilizados para prever a umidade das cultivares de sorgo BRS 310 e BRS 655 em função do tempo e da temperatura de hidratação. O coeficiente de difusão do processo apresentou valores semelhantes entre os híbridos estudados e variou entre  $2,755 \cdot 10^{-11}$  e  $4,387 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  para BRS 655 e entre  $2,017 \cdot 10^{-11}$  e  $6,342 \cdot 10^{-11} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$  para BRS 310, respectivamente. A partir do coeficiente de Difusão foi obtida uma energia de ativação de 11,52 kJ/mol para a cultivar BRS 655 e de 31,21 kJ/mol para a cultivar BRS 310. Assim, o processo de hidratação da cultivar BRS 655 possui menor sensibilidade à variação de temperatura do que para a BRS 310.

Palavras-chave: Cinética de hidratação. Coeficiente de Difusão. Gelatinização do amido.

## ABSTRACT

Mathematical modeling is an important tool used to optimize processes in the food industry such as grain hydration. Sorghum grains were soaking in water to model the hydration with mathematical equations. The effects of time and temperature on leaching loss, humidity, volume, grain density were evaluated. Therefore, possible changes in grain starch along the hydration were verified. Thus, sorghum BRS 310 and BRS 655 were immersed in water at 30, 40, 50 and 60 ° C for 12 hours. Changes in morphology and the thermal properties of the starch were evaluated by Scanning Electron Microscopy (SEM) and Differential Scanning Calorimetry (DSC), respectively. The hydration kinetics were modeled by empirical (Peleg and Page) and theoretical (Diffusion and Omoto) equations. There was no morphological modification on starch during the process. However, the temperature and gelatinization degree were higher at 60 ° C. This temperature increases the percentage of gelatinized starches, but it also increase the temperature required to gelatinize the granules. Volume change was affect by time and temperatures while the density was constant in the same conditions. The leaching loss were significant ( $p < 0.05$ ) at 60 ° C. This temperature should be avoided to keep the grain intact. The initial absorption of water was faster, followed by reduction of the absorption rate until to achieve equilibrium. Time and temperature had significant effect, where time is reduced by using higher temperatures. The BRS 655 sorghum absorbed more water in equilibrium for all conditions tested. The Peleg and Page and Diffusion models showed satisfactory fit. Therefore the Peleg and Diffusion equations were generalized was used to formed a generalized model as function of soaking temperature. The generalized models predicted process successfully (error less than 4%) and can be used to predict the moisture as a function of time and temperature of sorghum BRS 310 and BRS 655. From the diffusion model was obtained the activation energy and the diffusion coefficient were obtained: 11.52 kJ.mol<sup>-1</sup> and from 2,755.10<sup>-11</sup> to 4,387.10-11 m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> to BRS 655 and 31.21 kJ.mol<sup>-1</sup> and from 2,017.10<sup>-11</sup> to 6,342.10<sup>-11</sup> m<sup>2</sup>.s<sup>-1</sup> for BRS 310, respectively. Therefore, BRS 655 has lower sensitivity to temperature variation in the process that the BRS 310, but both have similar effective diffusion coefficients.

Palavras-chave: Hidratyon kinects. Diffusion coefficient. Starch Gelatinization

## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – PLANTIO DE SORGO DAS CULTIVARES BRS 655 (LADO ESQUERDO) E BRS 310 (LADO DIREITO). FONTES: Embrapa (2015) e Biomatrix (2015).....	22
FIGURA 2 – ESTRUTURA DO GRÃO DE SORGO.....	23
FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DE ANÁLISES DAS AMOSTRAS RETIRADAS DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO. ....	54
FIGURA 4 – GRAU DE GELATINIZAÇÃO DO AMIDO DA CULTIVAR BRS 310 AO LONGO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO. ....	67
FIGURA 5 – GRAU DE GELATINIZAÇÃO DO AMIDO DA CULTIVAR BRS 655 AO LONGO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO. ....	67
FIGURA 6 – GRÃOS DE SORGO INTEIROS: PERTENCENTES À CULTIVAR BRS 310 (a); BRS 655 (c), E CORTADOS PERTENCENTES À CULTIVAR BRS 310 (b) E BRS 655 (d) COM AS REGIÕES DOS CORTES: ENDOSPERMA FARINÁCEO (A); ENDOSPERMA VÍTREO (B); HILO (C) E PERICARPO (D) .....	70
FIGURA 7 – CORTES TRANSVERSAIS DOS GRÃOS DE SORGO BRS 310 (a) E BRS 655 (b) COM APROXIMAÇÃO DE 300 VEZES NA REGIÃO DO HILO.....	71
FIGURA 8 – PARTE EXTERNA DO HILO DO GRÃO AMPLIADA 300 VEZES: PARA A CULTIVAR BRS 310 (a) E BRS 655 (d); AMPLIADA 2.000 VEZES PARA A CULTIVAR BRS 310 (b) E BRS 655 (e); E DEMAIS REGIÕES DA PARTE EXTERNA DO GRÃO AMPLIADA 2.000 VEZES PARA A CULTIVAR BRS 310 (c) E BRS 655 (f). ....	71
FIGURA 9 – PERICARPO DOS GRÃOS DE SORGO DA CULTIVAR BRS 310 (a) E (c); E BRS 655 (b) E (d). ....	72
FIGURA 10 – ENDOSPERMA FARINÁCEO DA CULTIVAR BRS 310 (A) E BRS 655 (D); REGIÃO DE TRANSIÇÃO ENTRE ENDOSPERMA FARINÁCEO E ENDOSPERMA VÍTREO PARA A CULTIVAR BRS 310 (B) E BRS 655 (E); ENDOSPERMA VÍTREO PERTENCENTE A CULTIVAR BRS 310 (C) E BRS 655 (F). ....	73

FIGURA 11 – GRÂNULOS DE SORGO EXTRAÍDOS EM UMA AMPLIAÇÃO DE 200 (a) E 500 VEZES (b). .....	74
FIGURA 12 – DIFERENTES GRÂNULOS DE SORGO OBTIDOS DAS CULTIVARES BRS 655 (a E b) E BRS 310 (c). .....	75
FIGURA 13 – AMIDOS DE SORGO EM DIFERENTES TEMPOS E TEMPERATURAS DE HIDRATAÇÃO PERTENCENTES A CULTIVAR BRS 310. ....	77
FIGURA 14 – AMIDOS DE SORGO EM DIFERENTES TEMPOS E TEMPERATURAS DE HIDRATAÇÃO PERTENCENTES A CULTIVAR BRS 655. ....	78
FIGURA 15 – VARIAÇÃO DE VOLUME EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO PARA A CULTIVAR DE SORGO BRS 310 (a) E A CULTIVAR BRS 655 (b). ....	79
FIGURA 16 – VARIAÇÃO NA DENSIDADE DO SORGO BRS 310 (a) E BRS 655 (b) AO LONGO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO .....	81
FIGURA 17 – SÓLIDOS SOLÚVEIS PERDIDOS DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DOS GRÃOS DE SORGO DA CULTIVAR BRS 310. ...	82
FIGURA 18 – SÓLIDOS SOLÚVEIS PERDIDOS DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DOS GRÃOS DE SORGO DA CULTIVAR BRS 655. ...	82
FIGURA 19 – ABSORÇÃO DE ÁGUA NA CULTIVAR DE SORGO BRS 310 (a) E BRS 655 (b), NAS FASES I, II E III AO LONGO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO A DIFERENTES TEMPERATURAS .....	85
FIGURA 20 – DADOS EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO DA CULTIVAR DE SORGO BRS 310 E PREDIÇÃO DOS MODELOS DE PELEG (a), PAGE (b), DIFUSÃO (c) E OMOTO (d) NAS TEMPERATURAS ESTUDADAS. ....	93
FIGURA 21 – DADOS EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO DA CULTIVAR DE SORGO BRS 655 E PREDIÇÃO PELOS MODELOS DE PELEG (a), PAGE (b), DIFUSÃO (c) E OMOTO (d) NAS TEMPERATURAS ESTUDADAS. ....	94
FIGURA 22 – MODELO GENERALIZADO DE PELEG (a) E DE DIFUSÃO (b) PARA A CULTIVAR BRS 310. ....	101
FIGURA 23 – MODELO GENERALIZADO DE PELEG (a) E DE DIFUSÃO (b) PARA A CULTIVAR BRS 655. ....	102

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE GRÃOS DE SORGO ENCONTRADA NA LITERATURA.....	25
TABELA 2 – MODELOS EMPÍRICOS E TEÓRICOS (FENOMENOLÓGICO) ESTUDADOS.....	50
TABELA 3 – TEMPO DE RETIRADA DAS AMOSTRAS DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO POR ANÁLISE.....	55
TABELA 4 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CULTIVARES DE GRÃOS DE SORGO ESTUDADOS.....	60
TABELA 5 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DO AMIDO EXTRAÍDO DA CULTIVAR BRS 310 AO LONGO DA HIDRATAÇÃO .....	62
TABELA 6 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DO AMIDO EXTRAÍDO DA CULTIVAR BRS 655 AO LONGO DA HIDRATAÇÃO .....	63
TABELA 7 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE AMIDOS DE SORGO DA LITERATURA.....	66
TABELA 8 – VARIAÇÃO NO TAMANHO DOS GRÂNULOS DE AMIDO DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO .....	75
TABELA 9 – EQUAÇÃO QUE RELACIONA O ACÚMULO DE ÁGUA ( $M_A$ ) À VARIAÇÃO DO VOLUME ( $\Delta V$ ).....	81
TABELA 10 – TAXA DE ABSORÇÃO EM DIFERENTES FASES DA HIDRATAÇÃO, UMIDADE ABSORVIDA E UMIDADE DE EQUILÍBRIO NAS TEMPERATURAS ESTUDADAS.....	86
TABELA 11 – PARÂMETROS DO MODELO DE PELEG .....	88
TABELA 12 – PARÂMETROS DO MODELO DE PAGE .....	90
TABELA 13 – PARÂMETRO DO MODELO DE DIFUSÃO .....	91
TABELA 14 – PARÂMETRO DO MODELO DE OMOTO.....	92
TABELA 15 – PARÂMETROS DE AJUSTE DOS MODELOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA .....	95
TABELA 16 – EQUAÇÕES DOS PARÂMETROS DOS MODELOS PELA LEI DE ARRHENIUS .....	99
TABELA 17 – AJUSTE DE $K_2$ PARA A GENERALIZAÇÃO DE PELEG.....	100
TABELA 18 – ERROS DOS MODELOS GENERALIZADOS .....	102

TABELA 19 – ENERGIA DE ATIVAÇÃO DE ALGUNS CEREAIS NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.....	104
---	-----

## LISTA DE SIMBOLOS

$A$	área superficial do grão ( $\text{cm}^2$ )
$a$	coordenada radial (m)
$D_0$	constante de proporcionalidade entre o coeficiente de difusão efetivo e a temperatura ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
$D_{ef}$	coeficiente de difusão efetivo ( $\text{m}^2/\text{s}$ )
DG	grau de gelatinização (%)
$E_a$	energia de ativação (J/mol)
GRL	graus de liberdade
$k_0$	parâmetro de ajuste entre a constante $k_1$ de Peleg e a temperatura ( $\text{h}\cdot\% \text{ b.u.}^{-1}$ )
$k_1$	taxa constante de Peleg ( $\text{h}\cdot\% \text{ b.u.}^{-1}$ )
$k_2$	constante de capacidade de Peleg ( $\% \text{ b.u.}^{-1}$ )
$k_p$	constante de Page relacionada à taxa de absorção do processo ( $\text{h}^{-1}$ )
$K_s$	coeficiente de transferência de massa ( $\text{cm}\cdot\text{min}^{-1}$ )
$M$	umidade ( $\% \text{ b.u.}$ )
$M_0$	umidade inicial do grão ( $\% \text{ b.u.}$ )
$m_A$	massa de água no grão (g)
$M_e$	umidade de equilíbrio do grão ( $\% \text{ b.u.}$ )
$M_{exp}$	umidade obtido experimentalmente ( $\% \text{ b.u.}$ )
$M_{pre}$	umidade prevista pelo modelo ( $\% \text{ b.u.}$ )
$M_t$	umidade no instante de tempo $t$ ( $\% \text{ b.u.}$ )
$N$	constante adimensional de Page
$n$	número de observações
$N_A$	fluxo mássico de água ( $\text{g}\cdot\text{min}^{-1}\cdot\text{cm}^{-2}$ )
P	erro médio relativo (%)
R	constante universal dos gases (J/K.mol)
$r$	raio do grão (m)
$R^2$	coeficiente de determinação (%)
RMSE	raiz quadrada do erro médio quadrático (%)
SE	erro padrão da estimativa ( $\% \text{ b.u.}$ )
T	temperatura (K)

$t$	tempo (h)
$T_0$	temperatura inicial de gelatinização inicial (°C)
$T_e$	temperatura final de gelatinização (°C)
$T_p$	temperatura de pico da gelatinização de pico (°C)
$V$	volume do grão (cm <sup>3</sup> )
$\Delta H$	variação da entalpia de gelatinização (J/g)
$\Delta H_n$	variação de entalpia de gelatinização do amido no estado nativo (J/g)
$\Delta H_t$	variação de entalpia de gelatinização do amido tratado (J/g)
$\Delta V$	variação do volume dos grãos (cm <sup>3</sup> )
$\rho_A$	concentração de água no grão (g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{A0}$	concentração inicial de água do grão (g/cm <sup>3</sup> )
$\rho_{eq}$	concentração de equilíbrio do grão (g/cm <sup>3</sup> )

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>17</b>
1.1	OBJETIVOS	18
1.1.1	Objetivo Geral	18
1.1.2	Objetivos Específicos	18
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>20</b>
2.1	O SORGO	20
2.2	Cultivares DE SORGO	21
2.3	ESTRUTURA DO GRÃO	23
2.4	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	25
2.5	SORGO: produtos para celíacos e outros benefícios	27
2.6	PRODUTOS A BASE DE SORGO	29
2.7	HIDRATAÇÃO NO PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS	30
2.8	IMPORTÂNCIA DA HIDRATAÇÃO NO PROCESSAMENTO DE SORGO	31
2.8.1	Moagem	31
2.8.2	Malteação	32
2.8.3	Extração do amido	33
2.9	EFEITO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO NA gelatinização do amido	34
2.10	MECANISMOS PRESENTES NO TRANSPORTE DE ÁGUA PARA O INTERIOR DO GRÃO DURANTE HIDRATAÇÃO	38
2.11	FATORES QUE AFETAM o processo de HIDRATAÇÃO	39
2.11.1	Estrutura	40
2.11.2	Composição química	41
2.11.3	Tempo e temperatura	41
2.12	MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS NA CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DURANTE A HIDRATAÇÃO DE GRÃOS	42
2.12.1.1.1	Modelos Fenomenológicos	43
2.12.1.1	Modelo de Difusão	45
2.12.1.1.1	Energia de Ativação do Processo de Hidratação	45
2.12.1.2	Modelo de Omoto	46
2.12.1.1.2	Modelos empíricos	47
2.12.2.1	Modelo de Peleg	49

2.12.2.2	Modelo de Page.....	49
2.13	ESTUDO DA HIDRATAÇÃO com GRÃOS DE SORGO.....	50
2.14	CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	52
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS.....</b>	<b>53</b>
3.1	AMOSTRAS.....	53
3.2	ANÁLISES QUÍMICAS.....	53
3.3	ANÁLISES MORFOLÓGICAS.....	53
3.4	HIDRATAÇÃO.....	54
3.5	EXTRAÇÃO DO AMIDO.....	55
3.5.1	Avaliação das Propriedades Térmicas do Amido por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	56
3.5.2	Modificações na Morfologia do Amido durante a Hidratação por análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).....	56
3.6	VOLUME E DENSIDADE.....	57
3.7	SÓLIDOS LIXIVIADOS.....	57
3.8	CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO.....	57
3.9	MODELAGEM MATEMÁTICA E ESTIMATIVA DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.....	58
3.10	ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	59
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>60</b>
4.1	ANÁLISES QUÍMICAS.....	60
4.2	EFEITO DA HIDRATAÇÃO NAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO AMIDO.....	61
4.2.1	Temperatura e Entalpia de Gelatinização.....	61
4.2.2	Grau de Gelatinização (GD).....	67
4.3	MORFOLOGIA DOS GRÃOS E O EFEITO DA HIDRATAÇÃO NA ESTRUTURA DO AMIDO DE SORGO.....	69
4.3.1	Avaliação Morfológica dos grãos de sorgo.....	69
4.3.2	Avaliação Morfológica dos grânulos de amido de sorgo e suas modificações ao longo do processo de hidratação.....	74
4.4	VARIAÇÃO DE VOLUME E DENSIDADE DOS GRÃOS NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.....	79
4.5	SÓLIDOS SOLÚVEIS.....	82
4.6	CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO.....	84

4.7	MODELAGEM DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO.....	88
4.2.1	Parâmetros dos modelos .....	88
4.2.1.1	Modelo de Peleg .....	88
4.2.1.2	Modelo de Page.....	89
4.2.1.3	Modelo de difusão.....	90
4.2.1.4	Modelo de Omoto .....	91
4.2.2	Nível de ajuste dos modelos.....	92
4.2.3	Avaliação dos modelos .....	97
4.2.4	Modelos generalizados .....	100
4.2.5	Energia de Ativação .....	103
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES .....</b>	<b>106</b>
	<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>107</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O sorgo é o quinto cereal mais produzido no mundo, atrás apenas do milho, arroz, trigo e cevada. No Brasil, a produção vem crescendo nas últimas décadas. Em 2014 chegou a mais de 2 milhões de toneladas colhidas, montante ainda destinado exclusivamente para fabricação de ração animal (IBGE, 2015). Porém, o sorgo pode ser utilizado na alimentação humana, como na produção de cervejas, mingau, cuscuz, sorgo parboilizado, amido, pães e outras massas fermentadas e não fermentadas, alimentos comuns em muitos países da África, Ásia e América Central.

O alto potencial desse grão no ramo alimentício é evidente por se tratar de um cereal livre de glúten, ao contrário da cevada, trigo, aveia e centeio. Por conseguinte, o sorgo pode, então, ser utilizado em produtos dedicados ao público celíaco ou a consumidores adeptos a dietas livres de glúten.

O pré-processamento do sorgo para fabricação de alimentos geralmente envolve a etapa de hidratação, como é o caso da extração do amido, malteação para fabricação de cerveja e moagem para a produção de farinha e farelo. A hidratação facilita a retirada do pericarpo no processo de moagem na fabricação da farinha e extração do amido, auxilia na liberação das enzimas responsáveis pela hidrólise do amido para a liberação de açúcares fermentescíveis durante a produção do malte, além de facilitar e otimizar etapas subsequentes da linha de produção de processos como fermentação, germinação e enlatamento.

Dessa forma, pesquisas sobre o comportamento da absorção de água durante a hidratação de grãos de sorgo são de extrema importância industrial para o controle e otimização do processo e para elaboração do projeto de equipamentos. Dentro deste contexto, modelos matemáticos tem sido desenvolvidos e aplicados, como ferramenta essencial, na otimização e criação de sensores que ajustem a umidade dos grãos em função do tempo e temperatura de processo.

Por meio dos modelos é possível ainda estimar propriedades do processo, como a energia de ativação e o coeficiente de difusão, além de avaliar a sensibilidade da absorção de água dos grãos em relação à temperatura de hidratação.

Equações empíricas e teóricas são frequentemente utilizadas na modelagem da hidratação de cereais e legumes, como evidencia os trabalhos de Volpe (2014), Montanuci (2014), Marques (2014) e Nicolin et al. (2012) ao imergirem arroz, cevada, milho e soja, respectivamente.

Devido à necessidade de maiores estudos sobre a aplicação de diferentes modelos no processo de hidratação de grãos de sorgo, este trabalho teve por finalidade estudar o comportamento da cinética de hidratação em grãos de sorgo e avaliar a capacidade preditiva de quatro modelos para duas cultivares de sorgo: dois fenomenológicos (Difusão e Omoto) e dois empíricos (Peleg e Page). Os modelos com melhores ajustes foram generalizados para obter equações de umidade em função de tempo e temperatura de processo.

Durante a hidratação, parâmetros como estrutura, composição química, tempo e temperatura de processo foram avaliados quanto à influência no mecanismo de difusão de água nos grãos, assim como possíveis variações de volume, densidade e sólidos lixiviados durante o processo.

Como a hidratação possivelmente pode afetar componentes microestruturais do grão, como o amido, este trabalho igualmente priorizou pelo estudo das alterações morfológicas e térmicas do amido, como temperatura e grau de gelatinização ao longo do processo.

## 1.1OBJETIVOS

### 1.1.1Objetivo Geral

Estudar o processo de hidratação de duas cultivares de sorgo.

### 1.1.2Objetivos Específicos

-Estudar a cinética de hidratação de duas cultivares brasileiras de sorgo;

- Observar possíveis modificações morfológicas e térmicas nos grânulos de amido de sorgo durante o processo de hidratação;
- Avaliar o efeito da temperatura e do tempo na absorção de água, variação de volume e densidade dos grãos e nos sólidos lixiviados ao longo da hidratação;
- Modelar a cinética de hidratação empregando modelos empíricos e fenomenológicos;
- Selecionar o(s) melhor(es) modelo(s) matemático(s);
- Generalizar o(s) modelo(s) de maior capacidade preditiva para obtenção de uma equação de umidade em função do tempo e temperatura de processo.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 O SORGO

O grão de sorgo é um cereal pertencente à família das gramíneas e seus cultivares compõem uma única espécie, *Sorghum bicolor* L. Moench, também conhecido como *S. vulgare*. Domesticado pelo homem há cerca de 5.000 anos no leste da África (região que abrange Sudão e Etiópia), o cultivo do sorgo se espalhou para algumas partes do mundo, incluindo Europa, Índia e China. Atualmente é uma das principais culturas agrícolas encontradas na Índia, parte da China, África, Austrália, México Central, Argentina e região central e sul dos Estados Unidos (MATZ, 1991; TESHOME et al., 1997).

Na lista de cereais mais produzidos no mundo, o sorgo aparece em quinto lugar, atrás apenas do milho, arroz, trigo e cevada. Os Estados Unidos se destacam como maior produtor mundial, seguido por México e Nigéria. Somente em 2014, o país norte americano produziu mais de 10 milhões de toneladas do grão, que são utilizados principalmente para a produção de ração animal no país (ARENDDT; ZANNINI, 2013; FAO, 2014).

Em contrapartida, em muitos países da Ásia e da África, o sorgo é empregado como alimento de primeira necessidade, já que o grão é uma das principais fontes de carboidratos e proteínas para a população que vive nessas regiões. Além da importância nutritiva, a relevância econômica fica evidente em países como Sudão e Níger, onde o grão chega a representar mais de 70% da produção total de cereais (KASHIRI; KASHANINEJAD; AGHAJANI, 2010; ARENDT; ZANNINI, 2013; FAO, 2013).

No Brasil, os primeiros cultivares de sorgo provavelmente foram trazidos durante o tráfico de escravos que vinham da África para o Nordeste brasileiro, onde o grão era chamado de “Milho d’ Angola” ou “Milho da Guiné”. No final da década de 1960, foram realizados os primeiros estudos sobre a cultura no Brasil, por meio de institutos de pesquisa e universidades (EMBRAPA, 2008). Alguns anos mais tarde, com o desenvolvimento de novos híbridos de sorgo na Argentina, muitos cultivares chegaram pela fronteira ao Rio Grande do Sul e, posteriormente, foram levados para

o Estado de São Paulo. Nessa época, o sorgo começou a ser cultivado e comercializado de forma mais significativa no país e atualmente a cultura se concentra principalmente nos estados do Centro-Oeste e Sudeste (EMBRAPA, 2008; SIMONI et al., 2011; BONFIM-SILVA et al., 2012).

Os Estados de Goiás, Minas Gerais e Mato Grosso são os maiores produtores nacionais e, juntos, detêm mais de 90% da produção nacional, estimada em 2 milhões de toneladas em 2014. Esse montante correspondente a 8 vezes mais do que o colhido em 1990, revelando o aumento significativo da produção nas últimas décadas (FAO, 2013; IBGE, 2015). Praticamente todo o sorgo produzido no Brasil ainda é destinado para a fabricação de ração animal, que pode ser composta pelos grãos, por partes da planta ou por ambos, e são utilizados como substituto total ou parcial do milho na alimentação de aves, bovinos e suínos (EMBRAPA, 2014).

Dessa forma, o valor comercial do sorgo ainda está atrelado ao do milho no Brasil (seu preço equivale a cerca de 80% do preço do milho), fato que cria dificuldades financeiras e culturais para que agricultores brasileiros se tornem novos adeptos ao seu cultivo. Por outro lado, essa cultura tem despertado o interesse de alguns produtores do país, porque o sorgo apresenta maior tolerância do que a maioria dos outros cereais quando submetido a altas temperaturas, excesso de umidade no solo e estresse hídrico (GUERRA et al., 2009; LEÃO et al., 2011).

## 2.2 CULTIVARES DE SORGO

Por possuir grande variabilidade genética, há diversas cultivares de sorgo com características diferentes, que vão desde a variação na altura da planta, tamanho de folhas e colmo até diferentes colorações do grão como marrom, vermelho e branco. Essa diversidade dentro da espécie é oriunda do cruzamento entre suas raças selvagens primárias e intermediárias (combinações das raças iniciais), o que torna sua classificação complexa (TESHOME et al., 1997; PEDREIRA et al., 2003).

Uma das classificações mais comuns está relacionada à função a que a planta se destina, e é definida principalmente com base nas características físicas e químicas da cultivar. Essa classificação pode ser dividida em cinco tipos: sorgo granífero – a planta apresenta baixo porte (entre 1,0 e 1,6 m), adaptada à colheita

mecanizada e possui maior rendimento na produção de grãos, utilizados para fabricação de alimentos e ração animal; sorgo forrageiro - possui alto porte (mais de 2 metros de altura) e se destina a produção silagem; sorgo sacarino – com colmos suculentos contendo grande quantidade de açúcares fermentáveis, é utilizado na fabricação de açúcar e álcool; sorgo pastejo - apresenta folhas abundantes e colmos finos, aproveitados principalmente para pasto, feno e cobertura morta; e por fim, o sorgo vassoura que, como o nome sugere, é utilizado para a fabricação de vassouras. Nessa forma de classificação, cada cultivar pode se enquadrar em mais de uma categoria, dependendo de suas características fisiológicas (EMBRAPA, 2011 mercado 2011 2012; ARENDT 2013).

No Brasil, a Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA – Milho e Sorgo) é a que mais tem desenvolvido novas cultivares de sorgo nos últimos anos, com destaque para o híbrido BRS 310 (Figura 1 lado direito), que tem sido utilizado com sucesso em pesquisas para a produção de alimentos à base de sorgo no país pela própria EMBRAPA, como é o caso de pipoca e barra de cereais dedicados ao público celíaco. Essa cultivar é do tipo granífero, com altura da planta de aproximadamente 1,15 m e alta produtividade de grãos e semente de coloração vermelha.

Outra cultivar desenvolvida pela EMBRAPA e considerada de grande importância é o híbrido BRS 655 (Figura 1 lado esquerdo), que também possui uma alta produtividade de grãos, além do que, suas folhas e colmos também podem ser utilizados para a produção de silagem de excelente qualidade. A planta possui altura de mais de 2,5 m e seus grãos são de coloração marrom (EMBRAPA, 2009; QUEIROZ et al., 2010, 2012).



FIGURA 1 – PLANTIO DE SORGO DAS CULTIVARES BRS 655 (LADO ESQUERDO) E BRS 310 (LADO DIREITO). FONTES: Embrapa (2015) e Biomatrix (2015)

### 2.3 ESTRUTURA DO GRÃO

O grão de sorgo possui formato esférico e é composto por gérmen, endosperma e pericarpo (Figura 2), com ausência de casca em sua estrutura, diferentemente do que ocorre com o arroz ou a cevada (ARENDETT; ZANNINI, 2013).

A proporção entre pericarpo, endosperma e gérmen dentro do grão varia de acordo com a cultivar de sorgo e pode afetar, assim como o tamanho e a forma, a captação de água, a susceptibilidade aos fungos e as propriedades do grão após a moagem (ROONEY; MILLER, 1981).

O pericarpo é a camada mais externa, que se subdivide em três partes: endocarpo, mesocarpo e epicarpo. O epicarpo constitui a camada mais externa do pericarpo e possui células cerosas, enquanto o mesocarpo (camada intermediária) pode possuir grânulos de amido em sua estrutura. O endocarpo, por sua vez, é composto por células que tem como função principal transportar a umidade através do grão, além de desempenhar um importante papel como ponto de ruptura durante a moagem, quando ocorre a separação entre o pericarpo (farelo) e as demais estruturas do grão (ROONEY; MILLER, 1981; ROONEY; MURTY, 1982; ARENDETT; ZANNINI, 2013).

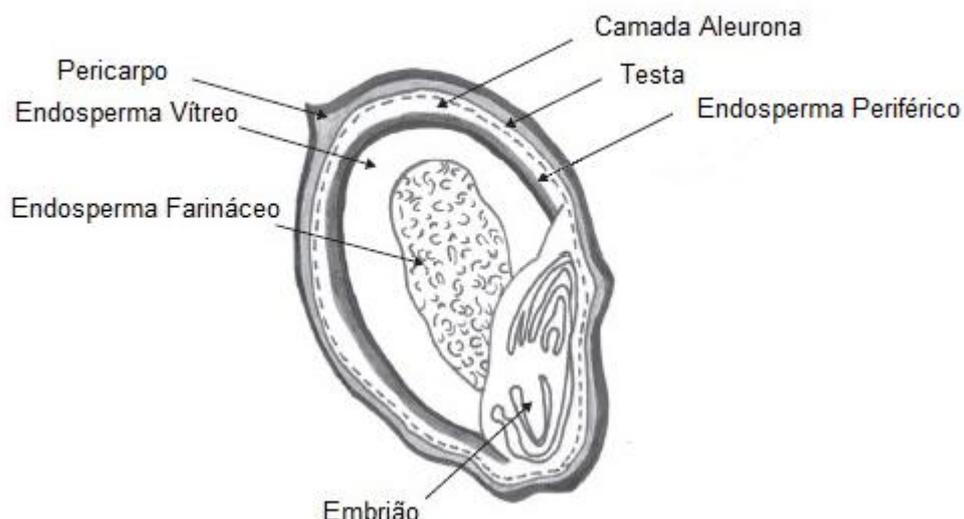


FIGURA 2 – ESTRUTURA DO GRÃO DE SORGO.  
FONTE: ARENDETT e ZANNINI (2013).

Algumas variedades de sorgo possuem uma camada entre o pericarpo e o endosperma, chamada testa, que é pigmentada devido à alta concentração de

taninos (ROONEY; MILLER, 1981; ROONEY; MURTY, 1982; ARENDT; ZANNINI, 2013).

O endosperma se localiza abaixo do pericarpo ou da testa, se ela existir, e está dividido em quatro camadas: aleurona, endosperma periférico, endosperma vítreo e endosperma farináceo. A aleurona é composta por uma camada de células que são ricas em vitaminas hidrossolúveis, óleo, proteínas e minerais. Esta desempenha um importante papel na movimentação de constituintes do grão durante a germinação (ROONEY; MILLER, 1981; ROONEY; MURTY, 1982; ARENDT; ZANNINI, 2013).

Abaixo da camada aleurona está localizado o endosperma periférico, que possui pequenos grânulos de amido densamente incorporados a uma mistura de corpos protéicos e matriz protéica, compostos principalmente por glutelinas e prolaminas (kafirinas), respectivamente (ROONEY; MILLER, 1981; TAYLOR, J. R. N. et al., 1984). Posterior ao endosperma periférico se encontra o endosperma vítreo, onde os grânulos de amido são maiores, apresentam geometria de poliedros convexos irregulares e formam uma interface densa e contínua com a matriz e pequenos corpos protéicos em formato aproximadamente esférico (ROONEY; MILLER, 1981; ARENDT; ZANNINI, 2013).

O endosperma farináceo se localiza abaixo do endosperma vítreo, e ambos possuem os mesmos componentes, porém, a estrutura do endosperma farináceo é bem menos compacta. Nessa camada, os grânulos de amido são esféricos e não estão incorporados à matriz protéica, que existe apenas em forma de finas lâminas descontínuas na superfície dos grânulos. Os corpos protéicos do endosperma farináceo também são menores do que aqueles encontrados no endosperma vítreo, favorecendo a formação de espaços vagos entre os grânulos de amido (ROONEY; MILLER, 1981; ARENDT; ZANNINI, 2013).

O embrião ou gérmen é composto por duas partes majoritárias, o eixo embrionário e o escutelo/cotilédone. O escutelo é a camada de reserva que contém grandes quantidades de proteínas, lipídeos e minerais, e conecta o endosperma ao gérmen. O eixo embrionário é a parte vital do grão que contém a nova planta. As células do gérmen são modificadas em células de transferência que trabalham na movimentação de umidade, microrganismos e solubilização dos componentes do endosperma, desempenhando assim, um papel importante na captação de água pelo grão (ROONEY; MILLER, 1981; ARENDT; ZANNINI, 2013).

## 2.4 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A composição centesimal de grãos de sorgo de diferentes variedades encontradas na literatura pode ser observada na Tabela 1. Os carboidratos são os componentes em maior quantidade e apresentam, em média, 67% da massa do grão, dos quais o amido é o principal representante, compondo aproximadamente 83% da massa total do endosperma. Os principais açúcares simples encontrados no cereal são frutose, glicose, sacarose, maltose, rafinose e estaquiose constituindo em um total de 2,2 a 3,8% de açúcares solúveis contidos no grão maduro (WALL et al., 1969; ANGLANI, 1998a; ARENDT; ZANNINI, 2013).

TABELA 1 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DE GRÃOS DE SORGO ENCONTRADA NA LITERATURA.

Variedad e	Carb. <sup>b</sup> (% m/m)	Prot. <sup>c</sup> (% m/m)	Lip. <sup>d</sup> (% m/m)	Cinzas (% m/m)	Umid. <sup>e</sup> (% m/m)	Fibras (% m/m)	Autor
BX- Borno	66,8	11,3	5,3	5,6	11,0	-	Sopade, Ajisegiri e Badau (1992)
-	76,0	11,0	2,2	1,5	11,7	-	Kashiri, Kashanineja e Aghajani (2010)
-	-	10,52	3,97	-	-	-	Buffo, Weller e Parkhurst (1998)
Kafir Atlas	73,6 76,3	10,7 8,9	3,2 3,6	1,7 1,5	10,7 9,7	1,87 1,76	Fan, Chu e Shellenberg er (1963)
BRS 322	62,2	11,2	3,5	1,47	10,2	11,5	Queiroz et al. (2015)
AG 1040	62,1	11,7	4,1	1,64	10,1	10,3	
DKB 551	61,1	10,9	4,0	1,58	10,3	12,2	
BRS 308	59,3	12,8	4,4	1,42	10,3	11,8	
Dabar Feterita	- -	- -	- -	- -	- -	7,6 9,2	Knudsen et al. (1985)

<sup>a</sup>Variedades; <sup>b</sup>Carboidratos; <sup>c</sup>Proteínas; <sup>d</sup>Lipídeos; <sup>e</sup>Umidade

Os lipídeos representam entre 2,2% e 5,3% do grão e são formados majoritariamente por óleos. Na composição estrutural, os lipídeos se fazem presentes principalmente no gérmen, enquanto o pericarpo apresenta a maior concentração de ceras dentre as demais regiões do cereal (ROONEY, 1978; ARENDT; ZANNINI, 2013).

As fibras encontradas nos grãos de sorgo apresentam variações de acordo com a metodologia utilizada, apresentando entre 10,3% e 12,2% para o método de fibras insolúveis em detergente neutro (QUEIROZ et al., 2015), entre 7,6% e 9,2% para o método de fibra alimentar (KNUDSEN et al., 1985) e entre 1,76% e 1,87% pelo método de fibras brutas (FAN; CHU; SHELLENBERGER, 1963). As fibras são compostas principalmente por celulose, hemicelulose, lignina, pectina e gomas, e estão localizadas principalmente nas paredes celulares do pericarpo e endosperma (ARENDT; ZANNINI, 2013).

A maioria das vitaminas do complexo B está presente no grão de sorgo, como a tiamina, riboflavina, vitamina B6, biotina e niacina, além das vitaminas lipossolúveis D, E e K contidas no gérmen. Porém, como ocorre em outros cereais nos processos de refinamento, o sorgo perde parte importante de suas vitaminas e, por isso, não é considerado fonte na forma em que comumente é consumido (ROONEY, 1978; ANGLANI, 1998b; ARENDT; ZANNINI, 2013). Já os minerais presentes no sorgo estão localizados principalmente no pericarpo, camada aleurona e gérmen. O sorgo é pobre em cálcio, e seus minerais mais abundantes são potássio e fósforo (KHALIL et al., 1984; ANGLANI, 1998b; ARENDT; ZANNINI, 2013).

Todas as cultivares de sorgo possuem compostos fenólicos que estão localizados no pericarpo, testa (quando existe) e endosperma do grão (HAHN et al., 1983). Os compostos fenólicos são divididos em taninos, flavonóides e ácidos fenólicos. Os ácidos fenólicos contidos nos grãos de sorgo são, em sua maioria, derivados dos ácidos benzóico e cinâmico, que se encontram principalmente no pericarpo, e os mais abundantes são os ácidos felúrico, caféico, protocaféico, siringico, protocatecuico, p-cumparico e sinápico (AWIKA; ROONEY, 2004). As antocianinas são a maior classe de flavonóides encontradas no sorgo, e em geral, estão presentes em grãos de coloração vermelha, marrom e preta (DYKES; ROONEY, 2006). E por fim, os taninos presentes no grão (quando há presença de

testa) são os chamados condensados, que não são absorvidos pelo trato intestinal (PRICE, 1977; WANISKA, 1989; HARBONE 1992).

As proteínas compõem entre 8,9 e 12,8% da massa do grão, das quais aproximadamente 81% se encontram no endosperma, 16% no pericarpo e 3% no gérmen (FAN; CHU; SHELLENBERGER, 1963; TAYLOR; SCHÜSSLER, 1986; SOPADE; AJISEGIRI; BADAU, 1992; KASHIRI; KASHANINEJAD; AGHAJANI, 2010). As proteínas presentes em maior quantidade no sorgo são as kafirinas (prolaminas), que juntamente com as gluteninas, representam aproximadamente 76% de todas as proteínas do grão e 80% das proteínas no endosperma. Por outro lado, o gérmen é formado principalmente pelas proteínas globulina e albumina, e o pericarpo por uma mescla entre esses dois grupos de proteínas (TAYLOR, J. R. et al., 1984; ARENDT; ZANNINI, 2013).

As principais proteínas do sorgo, as kafirinas, apesar de também pertencerem ao grupo das prolaminas, possuem diferenças estruturais das prolaminas formadoras de glúten que pertencem ao gênero *Triticum sp* e, por isso, o sorgo é considerado um cereal isento de glúten e uma fonte de alimento seguro para pacientes celíacos (CIACCI; MAIURI; CAPORASO, 2007).

## 2.5 SORGO: PRODUTOS PARA CELÍACOS E OUTROS BENEFÍCIOS

A procura por produtos livres de glúten vem crescendo nos últimos anos no Brasil e no mundo, tanto por portadores da doença celíaca quanto por consumidores que se interessam por uma dieta livre de glúten. Segundo o Conselho Nacional de Saúde (CNS, 2014) existem cerca de 2 milhões de celíacos no Brasil, mas a maioria não sabe que possui a doença.

A doença celíaca é causada por uma intolerância à ingestão de glúten que causa inflamação da mucosa do intestino delgado e possui base genética (MURRAY, 1999). O termo intolerante às proteínas do glúten é utilizado para abranger as prolaminas presentes nos cereais do gênero *Triticum sp*. como a gliadina no trigo, a secalina no centeio e a hordeína na cevada, e o único tratamento para a doença é evitar o consumo de produtos que as contenham ao longo da vida (CIACCI; MAURI; CAPORASO, 2007; CAPRILES; ARÊAS, 2014).

Além de poder ser utilizado em produtos para consumidores celíacos, o sorgo ainda possui compostos fenólicos com alta atividade antioxidante, presentes principalmente nos sorgos vermelhos e negros (TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006). Dykes et al. (2005) encontrou fortes correlações entre a quantidade de polifenóis e a atividade antioxidantes em grãos de sorgo vermelhos e negros, com alta atividade antioxidante *in vitro*, responsável por combater o estresse oxidativo que por sua vez contribui para o desenvolvimento de doenças crônicas, como as cardiovasculares (SITI; KAMISAH; KAMSIAH, 2015).

O efeito dos compostos fenólicos obtidos a partir de grãos de sorgo na prevenção de doenças também tem sido pesquisado. Chung et al. (2011) avaliaram o efeito de extratos fenólicos de grãos de sorgo em ratos diabéticos, e verificaram que os extratos aumentaram a atividade hipoglicêmica e a quantidade de insulina, enquanto diminuíram a quantidade de colesterol, triglicerídeos, uréia e ácido úrico nos animais. Como resultado, Chung et al. (2011) recomendaram o uso de compostos fenólicos extraídos do sorgo como suplemento no tratamento contra a diabetes.

Gómez-Cordovez et al. (2001) avaliaram o efeito anti-carcinogênico de taninos condensados extraídos de grãos de sorgo contra melanoma humano, e observaram que as frações fenólicas utilizadas possuem potencial como agentes terapêuticos no tratamento contra as células cancerígenas. Segundo Awika e Rooney (2004), o consumo de grãos de sorgo inteiros tem longa relação com a redução do risco de formação de câncer no trato intestinal.

O sorgo também é conhecido como fonte de 3-deoxiantocianidinas, um composto fenólico presente nos pigmentos da semente, que apresentam citotoxicidade às células de câncer (SHIH et al., 2007). Bralley et al. (2008) observaram que extratos de sorgo com 3-deoxiantocianididas causaram alto efeito inibidor à uma enzima associada a inflamação, a hialuronidase, enquanto extratos de arroz e trigo obtiveram fraca ação inibitória. Burdette et al. (2010) também encontraram significativa ação anti-inflamatória em farelos de algumas variedades de sorgo.

Shelembe et al. (2014) observaram que compostos fenólicos extraídos do farelo de sorgo apresentaram efeito protetor contra a oxidação *in vitro* de lipoproteínas de alta densidade (HDL), conhecidas como colesterol “bom”, associada a redução de riscos de doenças cardiovasculares (MARTINO et al., 2014).

Estudos *in vitro* demonstraram que além de compostos fenólicos, alguns lipídios presentes no sorgo também podem diminuir o risco de doenças cardiovasculares. Hwang et al. (2004) verificaram que grãos de sorgo possuem grandes quantidades de policosanols, lipídios de cadeia longa que diminuem a quantidade de lipoproteína de baixa densidade (LDL), o colesterol “ruim”, e aumenta a quantidade de HDL, o que ajuda na prevenção de doenças cardiovasculares (TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006; HARGROVE; GREENSPARN; HARTLE et al., 2004).

Assim, o sorgo, além de ser um cereal livre de glúten, possui compostos fenólicos e lipídios que podem trazer benefícios a saúde humana, o que ressalta a importância do desenvolvimento de produtos alimentícios a base desse grão (ARENDDT; ZANNINI, 2013).

## 2.6 PRODUTOS A BASE DE SORGO

No Brasil, pesquisas sobre a fabricação de produtos para alimentação humana a base de sorgo tem sido desenvolvidas com o interesse voltado a produtos dedicados para celíacos, como bolos, barrinhas de cereais e pipoca, porém praticamente toda a produção atual ainda é destinada para a alimentação animal (DEGÁSPARI; WASZCZYNSKYJ, 1998; QUEIROZ et al., 2010, 2012).

O sorgo possui potencial para aplicações em alimentos e bebidas e pode ser utilizado em produtos não fermentados fabricados a base de farinha de sorgo como o *Roti*, popular na Índia e as tortilhas na América central, além de biscoitos tipo “cookies”, macarrão e panquecas (CHOTO et al., 1985; SERNA-SALDIVAR et al., 1988; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006; FERREIRA et al., 2009; LIU et al., 2012; ARENDT; ZANNINI, 2013).

Dentre os produtos fermentados que podem ser fabricados a base de farinha de sorgo se encontram o pão tradicional, a *injera* que é produzida em larga escala na Etiópia, e a *kisra*, popular no Sudão (HAMAD et al., 1992; BLANDINO et al., 2003; SCHOBBER et al., 2005, 2007; ALI; MUSTAFA, 2009; ARENDT; ZANNINI, 2013). O mingau de sorgo também é tradicionalmente servido no café da manhã para mães lactantes e crianças em países da África e da América Central. Outra

variedade de produtos a base de grãos sorgo podem ser fabricados como o sorgo parboilizado, cuscuz, amido, bebidas alcoólicas e não alcoólicas com diversos atributos nutricionais e organolépticos (ABOUBACAR; YAZICI; HAMAKER, 2006; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006; ARENDT; ZANNINI, 2013).

Todos esses produtos podem ser utilizados para alimentação humana, além de serem adequados para pessoas com doença celíaca (OWUAMA, 1997; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006; CIACCI; MAURI; CAPORASO, 2007; ARENDT; ZANNINI, 2013). A maioria dos processos envolvendo a elaboração desses alimentos passa por uma etapa de produção realizada inicialmente com os grãos, a hidratação, que geralmente se faz presente também no processamento de outros cereais.

## 2.7 HIDRATAÇÃO NO PROCESSAMENTO DE ALIMENTOS

A hidratação é uma operação muito importante no processamento de alguns alimentos devido às mudanças morfológicas e bioquímicas que ocorrem no produto, responsáveis pela definição da qualidade do produto final (BOTELHO et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013).

Na prática, a imersão ou hidratação é aplicada tanto em temperaturas abaixo da temperatura de gelatinização do amido, processo chamado de condicionamento, como em temperaturas acima da temperatura de gelatinização, o que ocorre durante a cocção (SAYAR et al., 2001; TURHAN; SAYAR; GUNASEKARAN, 2002).

O condicionamento define propriedades e, dependendo do processo, propicia a umidade necessária para melhorar a qualidade do produto final, reduzir o tempo de cozimento, aumentar o rendimento da extração de alguns componentes, além de facilitar e otimizar as etapas subsequentes das linhas de produção, como a fermentação, a germinação e o enlatamento (COUTINHO et al., 2010; MONTANUCI et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013). Por outro lado, na etapa de cocção podem ocorrer outras modificações benéficas como o aumento na palatabilidade, desnaturação de proteínas, inativação ou eliminação de fatores antinutricionais, melhora da digestibilidade e gelatinização do amido (IGATHINATHANE; CHATTOPADHYAY, 1997; TAIWO et al., 1998; YILDIRIM et al., 2011; MONTANUCI et al., 2013).

O processo de hidratação é frequentemente utilizado no polimento de grãos, parboilização do arroz, moagem da soja, trigo e milho, na produção de milho e ervilha enlatados, extração de amido de milho, no processamento de grãos de bico e gergelim, e em uma variedade de outros processos destinados a produção de alimentos (ABU-GHANNAM; MCKENNA, 1997; IGATHINATHANE; CHATTOPADHYAY, 1997; VERMA; PRASAD, 1999; KANG; DELWICHE, 1999, 2000; PAN; TANGRATANAVALEE, 2003; KASHANINEJAD; DEHGHANI; KASHIRI, 2009; KHAZAEI; MOHAMMADI, 2009; OMOTO; ANDRADE; JORGE, 2009; PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010; BOTELHO et al., 2013; OLI et al., 2014).

## 2.8 IMPORTÂNCIA DA HIDRATAÇÃO NO PROCESSAMENTO DE SORGO

A hidratação também é o pré-tratamento mais comum utilizado em processos para fabricação de produtos para a alimentação humana a base de sorgo, como a moagem para a fabricação de farinha e farelo, a malteação para a produção de cerveja e a extração do amido. O processo de hidratação de grãos de sorgo pode ocorrer de diferentes formas dependendo do produto a que se destina e alguns desses processos são descritos a seguir (ADEYEMI 1983; BADAU; NKAMA; JUDEANI, 2005).

### 2.8.1 Moagem

A tecnologia de moagem do sorgo ainda está em processo de desenvolvimento e, como na moagem do trigo, passa pelas etapas de limpeza, condicionamento (hidratação), decortificação (retirada das camadas externas do grão), e então é realizada a moagem do endosperma para transformá-lo em farinha (REICHERT, 1982; ADEYEMI, 1983; SALINAS et al., 1999; RIBEIRO, 2009; ADBELRAHIM; MUDAWI, 2014).

Nesse processamento, a hidratação é a etapa que envolve a adição da quantidade de água necessária para que ele atinja uma umidade ótima, que está

entre 15% e 17% para o grão de sorgo, em um período que pode variar de minutos a horas. A agitação é geralmente utilizada nos instantes iniciais para acelerar a absorção de água pelos grãos (ABDELRAHMAN; FARREL, 1981; PEDERSEN; EGGUM, 1983; GUTKOSKI et al., 1999; LEE et al., 2002; MERWE et al., 2005; FREDERICK, 2009).

O condicionamento faz com que o pericarpo (farelo) se torne resistente e elástico pelo aumento de umidade, enquanto torna o endosperma macio e capaz de se transformar em farinha mais facilmente, o que ajuda gérmen e pericarpo a se separarem do endosperma. Dessa forma, a hidratação reduz a energia necessária para a moagem, além de evitar quebras do grão durante a separação entre pericarpo e endosperma (SALINAS et al., 1999; MERWE et al., 2005; FREDERICK, 2009).

### 2.8.2 Malteação

Na África, o sorgo é comumente utilizado como malte para produzir cervejas tradicionais que tem como características a turbidez e a coloração escura (BRIGGS et al., 2004; TAYLOR, 2005; ARENDT; ZANNINI, 2013). As cervejas convencionais claras e translúcidas produzidas a partir de malte de sorgo também tem sido comercializadas em larga escala em países onde a cevada maltada tem alto custo, ou em regiões em que a importação de cevada e outros cereais é proibida para proteção do mercado interno (OWUAMA, 1997; BRIGGS, 1998; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006; ARENDT; ZANNINI, 2013).

O processo de malteação de sorgo inclui as etapas de maceração (hidratação), germinação e secagem (TAYLOR, 2005). A hidratação inicia o processo de liberação das enzimas que catalisam as reações de hidrólise do amido para a liberação de açúcares fermentescíveis (OWUAMA, 1997; MUNSON-MCGEE, 2014).

O tempo e a temperatura de hidratação tem efeito significativo na qualidade do malte e, tipicamente, temperaturas que variam de 25 °C a 40 °C durante períodos entre 6 e 24 horas são utilizados no processo (RATNAVATHI; RAVI, 1991; DEWAR et al., 1997; BRIGGS et al., 2004; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006; KASHIRI;

KASHANINEJAD; AGHAJANI, 2010). Soluções de formaldeído ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) ou hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) são utilizadas para acelerar a hidratação, melhorar a atividade enzimática e controlar a atividade microbiana (BETA et al., 2000; BRIGGS et al., 2004; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006).

Ao final do processo, o sorgo consegue atingir umidade entre 33-36%, diferentemente da cevada, que alcança quantidades em torno de 46%, fato que pode interferir negativamente na ação máxima das enzimas durante a hidrólise do amido de sorgo (AGU; PALMER, 1998).

A etapa de maceração também é utilizada para remoção de sujeira, palha, pigmentos e grãos quebrados por lavagem e flotação (OWUAMA, 1997; TAYLOR, 2005). O controle da umidade ao final do processo é essencial para que a germinação se inicie, evitando, ao mesmo tempo, que a umidade excessiva do grão cause a morte do gérmen (OWUAMA, 1997).

A cerveja produzida a partir de malte de sorgo possui diferenças em suas características organolépticas em relação à cerveja de malte de cevada, mas é uma opção para os consumidores que procuram alternativas, e principalmente para os consumidores de cerveja que possuem intolerância ao glúten (OWUAMA, 1997).

### 2.8.3 Extração do amido

Entre o final da década de 1940 e o início dos anos de 1970, sorgo e milho eram as duas maiores fontes de amido da indústria mundial (TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006). Após esse período, o amido de sorgo parou de ser produzido em larga escala porque a qualidade do produto final era inferior ao amido fabricado a partir do milho, além de possuir problemas de processamento, como o baixo rendimento e a difícil purificação (YANG; SEIB, 1995; SIRA; AMAIZ, 2004; BELHADI et al., 2013). Porém, nos últimos anos tem crescido o interesse por pesquisas que explorem o potencial de produção de amido de sorgo por meio da otimização do processo e melhora nas características do produto final (BUFFO; WELLER; PARKHURST, 1997; KASHIRI; KASHANINEJAD; AGHAJANI, 2010).

A extração do amido é realizada principalmente através da imersão dos grãos em água para facilitar a retirada do pericarpo, seguida por enxágüe, moagem

úmida e filtração para remoção da fibra. O excesso de água é retirado por sedimentação e centrifugação, com posterior separação da camada protéica remanescente e, por fim, o amido é seco (BETA et al., 2001a; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006).

A hidratação inicial dos grãos amacia a estrutura e facilita a separação entre os componentes do sorgo durante a moagem. Nesse processo, o grão pode ser imerso em água pura ou em diferentes soluções aquosas, como a solução de dióxido de enxofre ( $\text{SO}_2$ ), hidróxido de sódio ( $\text{NaOH}$ ) e ácido láctico ( $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ ). Esses reagentes podem ajudar no controle microbiano, aumentar a degradação da proteína, acelerar a absorção de água, facilitar a retirada do amido, melhorar a eficiência da extração e melhorar a qualidade do produto final (FAN, CHU e SHELLENBERGER, 1963; SHANDERA et al., 1995; BUFFO; WELLER; PARKHURTS, 1997; BETA et al., 2001b; PÉREZ et al., 2001; BELHADI et al., 2013).

Como citado, mesmo com os problemas encontrados na fabricação de amido de sorgo, pesquisas tem sido realizadas para melhorar o processo. Períodos de hidratação que podem variar de poucas horas até alguns dias, com diferentes soluções de  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NaOH}$  e  $\text{C}_3\text{H}_6\text{O}_3$ , e temperaturas de imersão geralmente entre 25 °C e 60 °C tem conseguido bons índices de rendimento no processo e melhora na qualidade do amido produzido (YANG; SEIB, 1995, 1996; BUFFO, WELLER; PARKHURST, 1997; BETA et al., 2001b; XIE; SEIB, 2002; BELHADI et al., 2013).

A partir do amido de sorgo podem ser fabricados uma variedade de produtos como amidos modificados, adoçantes, ácidos orgânicos, polímeros biodegradáveis, aditivos e biocombustíveis (XIE; SEIB, 2002; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006).

## 2.9 EFEITO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO NA GELATINIZAÇÃO DO AMIDO

A gelatinização do amido de sorgo em processos industriais, tais como a fabricação de cerveja, sorgo parboilizado, pães, bolos e biscoitos, tem grande impacto na qualidade do produto final (DICKO et al., 2006; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006). O amido presente em grãos de sorgo possui uma temperatura de gelatinização com valor aproximado de 75 °C, considerada alta em relação a outros cereais como a cevada, em que a temperatura de gelatinização é de

aproximadamente 62 °C, o que resulta em reduzida quantidade de amido de sorgo gelatinizado durante alguns processos (PALMER et al., 1989).

Assim, no processo de malteação, por exemplo, diferentemente do que ocorre com a cevada, a alta temperatura de gelatinização dos grãos de sorgo provoca a presença de grânulos não gelatinizados enquanto o amido é hidrolisado. Esse fato impede o enfraquecimento das ligações entre amido e matriz protéica, deixando-os menos susceptíveis à hidrólise e limitando a quantidade de açúcares fermentáveis liberados (PALMER et al., 1989; RATNAVATHI; RAVI, 1991; DEWAR et al., 1997; DICKO et al., 2006; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006).

Durante a fabricação de pão a base de farinha de sorgo, o amido também não se gelatiniza completamente e se aglomera no centro do produto, prejudicando a formação da rede do miolo e tornando-o oco. Desse modo, além da ausência das proteínas formadoras do glúten, que fornecem a viscoelasticidade necessária para a massa, a alta temperatura de gelatinização do amido também contribui para os problemas tecnológicos envolvidos na fabricação de pães de sorgo, que resultam em menor volume e textura inferior àqueles produzidos com farinha de trigo. Os grânulos não gelatinizados também parecem ser os responsáveis pela arenosidade encontrada em outros produtos fabricados a partir de farinha de sorgo, como é o caso de biscoitos tipo “cookies” (TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006; ONYANGO et al., 2011).

No processo de parboilização do sorgo, a gelatinização completa dos grânulos de amido também é um dos fatores críticos para que o produto final aumente seu volume, firmeza, rendimento durante a extração do pericarpo, e reduza a quebra e a aderência quando cozido (DICKO et al., 2006; TAYLOR; SCHOBBER; BEAN, 2006).

Dessa forma, o conhecimento sobre a temperatura e o grau ou porcentagem de amido gelatinizado após o processo de hidratação, que faz parte da linha de processamento desses produtos, é de extrema importância para a indústria.

O amido consiste em dois principais polissacarídeos, amilose e amilopectina, ambas baseadas em ligações 1→4 D-glicose. Enquanto a amilose é essencialmente linear e possui menor massa molar (em torno de  $10^6$  g/mol), a amilopectina é altamente ramificada contendo pontos de ramificações (1→6) ligados a cada 20-25 resíduos com massa em torno de  $10^8$  g/mol (PARKER; RING, 2001; BULÉON et al., 1998).

Grânulos de amido de sorgo possuem tamanhos entre 4 e 10  $\mu\text{m}$  constituídos de camadas amorfas e semicristalinas alternadas com 100 a 400 nm de espessura cada. A camada semi-cristalina, que possui entre 9 e 10 nm, é constituída por lamelas cristalinas e amorfas. As ramificações de amilopectina encontram-se na lamela amorfa, a partir da qual as cadeias externas curtas se prolongam e formam duplas hélices na região cristalina (PÉREZ; BERTOFT, 2010; ZHU, 2014).

Quando os grânulos de amido com quantidade de água suficiente são aquecidos, os grânulos inicialmente absorvem água por meio das regiões amorfas e começam a inchar. Enquanto isso, alguns componentes, principalmente amilose com pequenas quantidades de amilopectina, são lixiviados e solubilizados. Com o aquecimento e absorção de água ocorre o rompimento e hidratação da parte cristalina, resultando em um estado amorfo nas cadeias do amido (VALLONS; ARENDT, 2009b; DAMODARAN et al., 2010; ZHU, 2014).

Os grânulos de amido contidos no grão se gelatinizam acima de uma determinada faixa de temperatura, que é influenciada por diversos fatores, incluindo a variedade do grão, o comprimento da molécula de amilopectina, o método de análise e a quantidade de endosperma farináceo e vítreo do grão (TAYLOR; SCHOBER; BEAN, 2006; DAMODARAN et al., 2010). Dentro dessa faixa de temperatura, podem ser determinadas a temperatura inicial ( $T_0$ ), temperatura média ( $T_p$ ) e a temperatura final de gelatinização do amido ( $T_e$ ) (TAYLOR; SCHOBER; BEAN, 2006).

Uma vez que a gelatinização é um processo endotérmico, a temperatura em que esse fenômeno ocorre e a quantidade de grânulos gelatinizados podem ser avaliados pela técnica de calorimetria exploratória diferencial (DSC), que é capaz de mensurar a temperatura e a variação de entalpia que ocorre durante a gelatinização (DAMODARAN et al., 2010).

O DSC é uma técnica em que a variação de energia entre a amostra e uma referência (geralmente sem amostra alguma) é acompanhada durante um processo de resfriamento ou aquecimento. Processos endotérmicos ou exotérmicos que podem ocorrer na amostra durante a análise resultam no surgimento de picos de variação de energia em função da temperatura. Dessa forma, a área do pico formado está relacionada à energia envolvida no processo, e é utilizada para o cálculo da variação da entalpia (BERNAL et al., 2002).

Assim, a temperatura de gelatinização do amido de sorgo pode ser obtida pela mudança no fluxo de calor (energia) do sistema quando o amido passa pelo processo de gelatinização, gerando um pico com temperatura inicial, temperatura de pico e temperatura final (BETA et al., 2001a).

Utilizando a técnica de DSC, Beta et al. (2001a) identificaram que a temperatura do pico de gelatinização de nove cultivares de sorgo variou entre 66 °C e 69 °C, enquanto Błaszczak et al. (2013) observou picos de temperatura de gelatinização em torno de 70 °C para o mesmo grão. Beta et al. (2001b) encontraram temperaturas de pico de gelatinização entre 67 °C e 70 °C em amidos de sorgo que passaram pelo processo de hidratação por um período de 24 horas.

De acordo Błaszczak et al. (2007), o grau de gelatinização pode ser calculado relacionando a diferença entre a variação de entalpia medida durante a gelatinização do amido na forma nativa e após o processamento (Equação 11) (BETA et al., 2001a; BŁASZCZAK et al., 2007; VALLONS; ARENDT, 2009b; DAMODARAN et al., 2010).

Vallons e Arendt (2009b) trataram amidos de sorgo em temperaturas de 60 °C a 95 °C durante 10 minutos, e por meio da técnica de DSC verificaram que o aumento de temperatura resultou em uma redução na variação da entalpia do processo de gelatinização, e conseqüentemente, aumentou a quantidade de amido gelatinizado, calculada pelo método descrito por Błaszczak et al. (2007).

Aumentos significativos na temperatura de gelatinização de amidos de milho foram relatados por Pérez e Soares (2001) e Perez et al. (2003) causados pelo aumento do tempo de hidratação dos grãos a 52 °C, avaliados entre 8 e 40 horas. Enquanto a entalpia de gelatinização durante o processo se manteve inalterada para os amidos de milho estudados por Perez, Suarez e Rosell (2003), um aumento foi relatado por Pérez, Haros e Suarez (2001), particularmente durante as primeiras 24 horas de hidratação. Pérez, Haros e Suarez (2001) sugerem que esse fenômeno é provavelmente devido às interações entre proteínas e grânulos de amidos nos momentos iniciais de hidratação que reduzem a difusão da água no amido durante as análises de DSC.

Lorenz, Collins e Kulp (1978) avaliaram o efeito da hidratação em grãos de trigo entre 10 °C e 60 °C por 24 horas nas propriedades térmicas do amido. Eles observaram pequenos aumentos na temperatura final de gelatinização dos grânulos, o que sugere que alguns grânulos foram afetados pelo tratamento.

Ainda existem poucos estudos que avaliem o efeito do tempo e da temperatura de hidratação de grãos de sorgo na temperatura e na entalpia de gelatinização dos grânulos de amido, bem como a porcentagem de amido gelatinizado. Esse fato mostra a necessidade desse tipo de avaliação para maiores avanços no entendimento desse processo e suas conseqüências na qualidade dos produtos finais produzidos a base de sorgo.

## 2.10 MECANISMOS PRESENTES NO TRANSPORTE DE ÁGUA PARA O INTERIOR DO GRÃO DURANTE HIDRATAÇÃO

Diversos mecanismos de transporte de massa são responsáveis pela migração da água para interior do grão durante o processo de hidratação como a capilaridade, a difusão líquida e a difusão por vapor, porém, o processo de hidratação tem sido considerado um fenômeno controlado principalmente pela difusão líquida (ENGELS et al., 1986; SINGH; KULSHRESTHA, 1987; IGATHINATHANE; CHATTOPADHYAY, 1997; RESENDE; CORRÊA, 2007; PRASAD; VAIRAGAR; VERA, 2010; SHANTHILAL; ANANDHARAMAKRISHNAN, 2013; OLI et al., 2014).

Por outro lado, o mecanismo inicial de transferência de massa, que resulta em uma alta taxa de absorção de água no grão, parece ser a capilaridade (FAN; CHU; SHELLENBERGER, 1963). Becker (1960) observou que uma alta taxa de absorção instantânea de água no grão se dá pela capilaridade, devido à saturação inicial do pericarpo que possui estrutura altamente porosa.

Ainda segundo Becker (1960), durante o processo de hidratação em água, a difusão possivelmente é acelerada pela ação de capilares naturais, defeitos e fissuras da estrutura que facilitam a migração da água no interior do grão e, a partir desses canais, a água se difunde e o fluxo é mantido pela ação da difusão. Entretanto, a existência da capilaridade não significa que a taxa de absorção é controlada por esse mecanismo. Os capilares potencialmente possuem o importante papel de conduzir o líquido no interior do grão e, então, acelerar o processo de difusão, fenômeno que, de fato, tem se mostrado o principal mecanismo que

controla o processo, independente do modo de entrada da água no grão (BECKER, 1960; HSU, 1983a).

A difusão de água no interior da partícula é causada pelo gradiente de umidade entre o centro e a superfície, que tende a mover as moléculas de água em direção ao núcleo de amido depois de penetrar nas camadas externas do grão, até que a concentração de água no interior chegue ao equilíbrio (IGATHINATHANE; CHATTOPADHYAY, 1997; VERMA; PRASAD, 1999; OLI et al., 2014).

A alta taxa de absorção no início do processo pode ser explicada, além do efeito da capilaridade, pela força motriz do fenômeno de difusão que é maior inicialmente devido ao alto gradiente de concentração de água. À medida que o processo de hidratação ocorre e a umidade de equilíbrio vai se aproximando, a concentração de água no interior do grão aumenta, diminuindo o gradiente de umidade entre a superfície e o centro, o que reduz a velocidade do processo (KASHIRI; KASHANINEJAD; AGHAJANI, 2010; PRASAD; VAIRAGAR; VERA, 2010).

## 2.11 FATORES QUE AFETAM O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

A absorção de água durante o período de hidratação sofre influencia de fatores intrínsecos e extrínsecos (KAPTSO et al., 2008). Dois dos fatores intrínsecos que mais influenciam na captação de água são a estrutura e a composição química do grão (KANG; DELWICHE, 1999; OMOTO; ANDRADE; JORGE, 2009; MONTANUCI et al., 2013; OLI et al., 2014). Dentre os fatores extrínsecos existentes, se encontram as condições de estocagem e processamento realizado no período pós-colheita, o método de hidratação e as condições de processo como pressão, tempo e temperatura. Desses, a temperatura se destaca porque tem grande efeito sobre a velocidade de hidratação e é uma variável de controle de processo que pode ser utilizada para definir o tempo necessário para que o grão alcance a umidade desejada (AHROMRIT et al., 2006; COUTINHO et al., 2010; YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2010; MONTANUCI et al., 2013; OLI et al., 2014).

Pela influência que possuem na absorção de água, estrutura, composição química, tempo e temperatura são fatores que podem ser avaliados durante a hidratação para que se possa adquirir maior conhecimento sobre o processo.

### 2.11.1 Estrutura

A hidratação resulta em mudanças físicas e químicas causadas durante o processo, quando o grão pode sofrer alterações de cor, aroma, textura, volume, ruptura da estrutura, além de diversas outras modificações que alteram a estrutura do grão e influenciam diretamente nas características do produto final (MASKAN, 2001; THAKUR; GUPTA, 2006; KASHANINEJAD et al., 2007; RESENDE; CORRÊA, 2007; KAPTSO et al., 2008; BOTELHO et al., 2013).

Concomitantemente, a estrutura do grão pode influenciar de maneira relevante o modo como a água é absorvida e sua velocidade durante o processo de hidratação. Assim, é importante investigar e analisar a morfologia do grão e como ela afeta a absorção de água (BECKER, 1960; KANG; DELWICHE, 1999; RESENDE; CORRÊA, 2007; OMOTO; ANDRADE; JORGE, 2009; MONTANUCI et al., 2013; OLI et al., 2014).

A microscopia eletrônica de varredura (MEV) é uma técnica que tem sido utilizada para observar a morfologia de materiais e pode ser aplicada para avaliar a estrutura de cereais. Essa técnica utiliza um feixe de elétrons que possuem o comprimento de onda muito curto como fonte de iluminação da amostra, e por isso, tem um alto poder de resolução (DEDAVID et al., 2007).

O MEV também tem sido utilizado em estudos sobre a morfologia de grãos de sorgo. Hosoney, Davis e Harbers (1974) utilizaram o MEV para analisar a estrutura do pericarpo e do endosperma vítreo e farináceo de doze variedades, verificando a diferença na morfologia de cada estrutura, enquanto Chandrashekar e Kerlies (1988) avaliaram a diferença estrutural de amidos nativos, danificados e corpos protéicos do endosperma vítreo e farináceo de grãos de sorgo. Vallons e Arendt (2009b) observaram a modificação estrutural ocorrida em amidos de sorgo que sofreram tratamentos de pressão e temperatura, e Błaszczak et al. (2013)

analisaram a retenção de aroma em grânulos de amido de sorgo com a mesma técnica.

### 2.11.2 Composição química

Durante o processo de hidratação, a absorção de água é influenciada pela composição química do grão (MONTANUCI et al., 2013; SOPADE; AJISEGIRI; BADAU, 1992; BUFFO; WELLER; PARKHURST, 1998). Segundo Sopade, Ajisegiri e Badau (1992), o principal componente que ajuda na absorção de água em grãos é a proteína, embora outros componentes como as mucilagens, celulose, amido e substâncias pécnicas contribuam para o fenômeno. Em pesquisa realizada por Buffo, Weller e Parkhurst (1998), a quantidade de amido influenciou negativamente a absorção de água em grãos de sorgo durante a hidratação. Segundo o autor, uma grande quantidade de amido, que é insolúvel em água e possui elevada massa molecular, possivelmente reduz o gradiente de concentração e, por conseguinte, a força motriz para a captação de água.

### 2.11.3 Tempo e temperatura

O aumento da temperatura resulta em uma maior taxa de absorção de água no interior do grão, e por isso tem sido utilizado para acelerar a captação de água e reduzir o tempo do processo de hidratação (BELLO et al., 2004; KASHANINEJAD et al., 2007; YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2010). Por outro lado, temperaturas muito elevadas são indesejáveis no processo, pois não preservam a estrutura do grão, maximizam os sólidos lixiviados e aumentam a energia gasta no processo (MASKAN, 2001).

O tempo do processo também é um fator crítico. Períodos muito longos de hidratação também causam aumento na perda de sólidos lixiviados, favorecem o crescimento microbiano e aumentam custos de produção (KANG; DELWICHE, 1999;

VERMA; PRASAD, 1999; COUTINHO et al., 2007; KAPTSO et al., 2008; KHAZAEI; MOHAMMADI, 2009).

Assim, é necessário identificar condições de tempo e temperatura que otimizem o processo, com redução de tempo e custos, enquanto proporcionam a umidade desejada aos grãos ao final da hidratação, mas que, ao mesmo tempo, não promovam problemas durante o processamento ou na qualidade do produto final.

Por essa razão, a predição do ganho de umidade como função do tempo e da temperatura durante a hidratação pode ser utilizada para projetar equipamentos, otimizar, simular, controlar e investigar o comportamento do processo (ABU-GHANNAM; MCKENNA, 1997; VERMA; PRASAD, 1999; YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2010; GARCIA, 2013). A modelagem matemática da hidratação dos grãos é a ferramenta responsável por representar, interpretar e promover essas informações básicas e essenciais sobre o processo (BECKER, 1960; KANG; DELWICHE, 2000; TURHAN; SAYAR; GUNASEKARAN, 2002; RESENDE; CORRÊA, 2007).

## 2.12 MODELOS MATEMÁTICOS UTILIZADOS NA CINÉTICA DE ABSORÇÃO DE ÁGUA DURANTE A HIDRATAÇÃO DE GRÃOS

Os modelos matemáticos podem ser classificados em modelos de parâmetros concentrados e distribuídos. Nos modelos de parâmetros concentrados as variações espaciais são negligenciadas e o sistema é considerado homogêneo em todo seu volume, assim, no processo de hidratação, o grão teria umidade constante em toda sua extensão em determinado instante de tempo. Para o modelo de parâmetros distribuídos, as variações espaciais possuem comportamento variável e a diferença de umidade entre as regiões do próprio grão é considerada (COUTINHO et al., 2007, 2010; GARCIA, 2013).

Outra forma de classificação para os modelos é a divisão entre fenomenológicos ou teóricos e empíricos (COUTINHO et al., 2007; OMOTO; ANDRADE; JORGE, 2009). Os modelos fenomenológicos são aplicados utilizando princípios físicos ou químicos básicos, como leis de difusão e balanços de massa, e geralmente seus parâmetros possuem significado físico. Os modelos empíricos

geralmente são correlações matemáticas simples que descrevem o processo, obtidas por observação dos dados experimentais e, na maioria das vezes, o modelo gerado é válido somente na região próxima às condições obtidas experimentalmente (COUTINHO et al., 2007; OMOTO; ANDRADE; JORGE, 2009; NICOLIN et al., 2011; GARCIA, 2013).

#### 2.12.1.1.1 Modelos Fenomenológicos

Os modelos fenomenológicos possuem uma faixa de validade mais ampla e, ao contrário dos modelos empíricos, geralmente podem ser extrapolados em condições além das operacionais, além de promoverem uma maior visão física do processo (GARCIA, 2013).

Modelos teóricos de parâmetros distribuídos para a hidratação de grãos tem sido desenvolvidos a partir da lei de difusão de Fick, que diz que a taxa de difusão de água ocorre na direção do fluxo, da superfície para o centro do grão, e é proporcional ao gradiente de concentração de umidade entre essas duas regiões (OLI et al., 2014). Esses modelos tem sido utilizados para descrever a hidratação em pesquisas com milho (VERMA; PRASAD, 1999), arroz (ENGELS et al., 1986; THAKUR; GUPTA, 2006; BAKALIS et al., 2009); trigo (BECKER, 1960; IGATHINATHANE; CHATTOPADHYAY, 1997; KANG; DELWICHE, 1999, 2000), soja (HSU, 1983a, 1983b; COUTINHO et al., 2010; NICOLIN et al., 2011, 2012) e grãos de bico (SAYAR et al., 2001; YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2011).

O modelo de difusão obtido com base nas leis de Fick com solução analítica proposta por Crank (1975) (item 2.10.1.1) é um dos modelos de parâmetros distribuídos mais comuns, utilizado para descrever o processo de hidratação de cereais e estimar o coeficiente de difusão efetivo médio ( $D_{ef}$ ) do processo (IGATHINATHANE; CHATTOPADHYAY, 1997; BELLO et al., 2004; THAKUR; GUPTA, 2006; KASHANINEJAD et al., 2007; PRASAD; VAIRAGAR; VERA, 2010). Bello et al. (2004) utilizou o modelo de difusão para descrever a hidratação de grãos de arroz entre 25 °C e 65 °C, enquanto Kang e Delwiche (1999) modelaram a hidratação de grãos de trigo a 22 °C e Gowen et al. (2007) encontrou o  $D_{ef}$  para

grãos de soja entre 25 °C e 60 °C com o mesmo modelo, todos com ajustes satisfatórios em relação aos dados experimentais.

O  $D_{ef}$  é uma propriedade importante empregada para delinear e otimizar os processos que envolvem o transporte de água no interior de grãos. Seu valor é dito aparente porque compreende todos os fatores envolvidos no processo, além de se tratar da representação da difusividade da água por uma simples propriedade média (SAGUY; MARABI; WALLACH, 2005; YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2011; GAFHOOR et al., 2014).

Diferente dos modelos fenomenológicos de parâmetros distribuídos, os modelos teóricos de parâmetros concentrados geralmente são mais fáceis de serem desenvolvidos, aplicados e resolvidos por possuírem menor número de parâmetros e, por isso, também tem sido aplicados para descrever o processo de hidratação de grãos (COUTINHO et al., 2005, 2007; OMOTO; ANDRADE; JORGE, 2009).

Coutinho et al. (2005) e Coutinho et al. (2007) analisaram o comportamento de grãos de soja durante a hidratação em temperaturas entre 10 °C e 49 °C, e desenvolveram um modelo fenomenológico de parâmetros concentrados obtido a partir de um balanço de massa em regime transiente considerando o grão esférico. Enquanto Coutinho et al. (2005) utilizaram uma equação de volume em função do tempo obtida experimentalmente para inserir no modelo, Coutinho et al. (2007) consideraram que a variação do volume dos grãos durante a hidratação é diretamente proporcional ao aumento de sua massa, e ambos os modelos descreveram o processo de forma satisfatória.

Omoto, Andrade e Jorge (2009) propuseram um modelo de parâmetros concentrados a volume constante considerando etapas elementares da transferência de massa por convecção para a hidratação de grãos de ervilha. Os autores utilizaram temperaturas entre 20 °C e 60 °C, e o modelo apresentou maior simplicidade na construção se comparado aos modelos de Coutinho et al. (2005) e Coutinho et al. (2007). Além disso, o modelo de Omoto, Andrade e Jorge (2009) conseguiram prever o processo adequadamente com desvios máximos de até 7%.

Os modelos fenomenológicos de difusão (parâmetros distribuídos) e de Omoto et al. (2009) (parâmetros concentrados), chamado aqui de modelo de Omoto, estão descritos nos itens 2.10.1.1 e 2.10.1.2, respectivamente.

### 2.12.1.1 Modelo de Difusão

Com a aplicação das leis de difusão de Fick e um balanço de massa na superfície do grão, a difusão em um corpo esférico, considerando o transporte de água somente na direção radial, pode ser representada pela Equação 1 (Crank, 1975).

$$\frac{\partial M}{\partial t} = D_{ef} \left( \frac{\partial^2 M}{\partial a^2} + \frac{2}{a} \frac{\partial M}{\partial a} \right) \quad (1)$$

Onde  $M$  é a umidade (% b.u.);  $a$  é a coordenada radial (m) e  $t$  o tempo (s).

Assumindo os grãos esféricos, o volume da partícula constante, o coeficiente de difusão efetivo ( $D_{ef}$ ) independente da concentração, que a superfície do grão chega ao equilíbrio instantaneamente logo após sua imersão e as seguintes condições inicial e de contorno:

- Condição inicial: a umidade do grão é uniforme,  $M_0$ ;
- Condição de contorno: a superfície do grão mantém uma umidade de equilíbrio  $M_e$ .

A solução analítica para a Equação 1 é a Equação 2.

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{D_{ef} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (2)$$

Onde  $r$  é o raio do grão (m).

#### 2.12.1.1.1 Energia de Ativação do Processo de Hidratação

A energia de ativação ( $E_a$ ) do processo de hidratação pode ser influenciada por uma série de fatores, como a composição química do grão (MONTANUCI et al., 2013) e sua umidade (HSU, 1983b). A  $E_a$  é utilizada para mensurar a sensibilidade do processo à variação de temperatura, ou seja, uma maior energia de ativação indica maior sensibilidade na absorção de água durante a hidratação dos grãos à mudança de temperatura (MONTANUCI et al., 2013). Segundo Hsu (1983b), a  $E_a$  se

mostra maior em baixo conteúdo de umidade, indicando que o processo tende a ser mais sensível a temperatura no início da hidratação.

Tanto modelos fenomenológicos como alguns modelos empíricos tem utilizado uma equação do tipo Arrhenius para obter a energia de ativação do processo e gerar modelos generalizados que possam prever a umidade do grão em função do tempo e da temperatura (HSU, 1983b; SOPADE; AJISEGIRI; BADAU, 1992; BADAU; NKAMA; JIDEANI, 2005; KAPTSO et al., 2008; OMOTO; ANDRADE; JORGE, 2009).

O modelo fenomenológico de difusão é comumente utilizado para essa finalidade, relacionando diretamente o coeficiente de difusão efetivo,  $D_{ef}$ , à temperatura por uma equação do tipo Arrhenius, na forma  $D_{ef} = D_0 \cdot e^{(-E_a/RT)}$ , onde  $D_0$  é a constante de proporcionalidade,  $T$  a temperatura em Kelvin,  $E_a$  a energia de ativação (J/mol) e  $R$  é a constante universal dos gases (8,314 J/K.mol) (KASHANINEJAD et al., 2007; SEYHAN-GRUTAS et al., 2001; THAKUR; GUPTA, 2006; KHAEZEI, 2009; PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010).

#### 2.12.1.2 Modelo de Omoto

O modelo de parâmetros concentrados desenvolvido por Omoto, Andrade e Jorge (2009) é gerado a partir das etapas elementares de transferência de massa por convecção em um sistema de parâmetros concentrados. Com um balanço de massa no grão em regime transiente a volume constante:

$$\frac{dm_A}{dt} = N_A \cdot A \quad (3)$$

Onde  $m_A$  é a massa de água no grão (g),  $N_A$  o fluxo mássico de água ( $\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$ ) e  $A$  é a área superficial do grão ( $\text{cm}^2$ ). Como a massa de água no interior do grão ( $m_A$ ) é o produto de sua concentração ( $\rho_A$ ) pelo volume do grão ( $V$ ), e considerando-se que o gradiente de concentração é dado pela diferença entre a concentração média interna do grão e a concentração de equilíbrio, o fluxo mássico é dado por  $N_A = K_s (\rho_{Aeq} - \rho_A)$  e a Equação 4 pode ser obtida.

$$\frac{d(\rho_A \cdot V)}{dt} = K_s (\rho_{Aeq} - \rho_A) A \quad (4)$$

Onde  $\rho_{eq}$  é a concentração de equilíbrio do grão alcançada após longos períodos de tempo e  $K_s$  é o coeficiente de transferência de massa ( $\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ). Considerando a geometria do grão esférica a volume constante de raio,  $r$ , e que no instante  $t=0$ ;  $\rho_A = \rho_{A0}$  obtém-se a Equação 5.

$$\frac{d(\rho_A)}{dt} = \frac{3K_s}{r} (\rho_{Aeq} - \rho_A) \quad (5)$$

No modelo de parâmetros concentrados, a constante  $K_s$  pode ser obtida pela linearização da Equação 5:

$$\ln \left( \frac{\rho_{Aeq} - \rho_A}{\rho_{Aeq} - \rho_{A0}} \right) = - \frac{3K_s}{r} t \quad (6)$$

#### 2.12.1.1.2 Modelos empíricos

Modelos fenomenológicos geralmente possuem equações complexas, de difícil resolução e que envolvem funções e parâmetros numéricos que não são capazes de descrever o processo de hidratação de maneira simples (SOPADE; AJISEGIRI; BADAU, 1992; ABU-GHANNAM; MCKENNA, 1997; MASKAN, 2002). Na escolha do melhor modelo a ser utilizado, o ajuste da equação aos dados experimentais e a simplicidade do modelo devem ser levados em conta, e por isso, os modelos empíricos tem sido extensivamente utilizados (TURHAN; SAYAR; GUNASEKARAN, 2002; KASHIRI; KASHANINEJAD; AGHAJANI, 2010; YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2010).

O modelo empírico de Peleg é o modelo não exponencial mais utilizado para descrever o processo de hidratação de grãos e legumes (MASKAN, 2002; KASHIRI; KASHANINEJAD; AGHAJANI, 2010; YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2010; OLIVEIRA et al., 2013). Esse modelo foi desenvolvido por Michel Peleg (1988) para prever a

absorção de água em função do tempo de hidratação em leite em pó e arroz, e obteve bons ajustes.

A equação de Peleg também foi utilizada satisfatoriamente para descrever o processo de hidratação de grãos de arroz por Bello et al. (2008), alcançando coeficientes de determinação entre 0,986 e 0,999. A hidratação de uma variedade de grãos ainda foi modelada adequadamente pela equação de Peleg, como em pesquisas realizadas com feijão (RESENDE; CORRÊA, 2007), trigo (MASKAN, 2002), soja (PAN; TANGRATANAVALEE, 2003), cevada (MONTANUCI et al., 2013), milho (BOTELHO et al., 2013; MARQUES, 2014) e grãos de bico (YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2010).

Outros modelos empíricos também tem sido aplicados na hidratação de cereais, como o modelo de Page e o modelo Exponencial, que é matematicamente idêntico ao modelo fenomenológico desenvolvido por Omoto, Andrade e Jorge (2009) (KAPTSO et al., 2008; KASHANINEJAD; DEHGHA; KASHIRI, 2009; KASHIRI; GARMAKHANY; DEGHANI, 2012). Kashaninejad et al. (2007) modelaram a absorção de água em grãos de arroz com o modelo Exponencial e o modelo de Page, que obteve melhor ajuste. Kashaninejad, Dehgha e Kashiri (2009) utilizaram novamente o modelo de Page para descrever a hidratação de grãos de trigo em temperaturas entre 25 e 65 °C. A hidratação de grãos de gergelim foi descrita por Khazaei e Mohammadi (2009) com os modelos empíricos Exponencial, função distribuição de Weibull (similar ao modelo de Page) e o modelo de Peleg, que melhor se ajustou aos dados experimentais (CUNHA; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 1998). O mesmo aconteceu com Prasad, Vairagar e Bera (2010) que utilizaram as equações de Peleg, Weibull e Exponencial para modelar a hidratação de grãos de bico e, novamente, o modelo de Peleg foi o que melhor se adequou ao processo.

Gowen et al. (2007) comparou dois modelos empíricos (modelo Exponencial e modelo de Peleg) e um fenomenológico (modelo de difusão) para descrever a hidratação de grãos de soja pré-branqueados. Os três modelos foram considerados satisfatórios, mas os menores desvios foram obtidos pelos modelos empíricos.

As equações dos modelos empíricos de Peleg e Page são apresentadas a seguir, juntamente com equações lineares geradas para a obtenção de seus parâmetros.

### 2.12.2.1 Modelo de Peleg

O modelo proposto por Michel Peleg (1998) é uma equação não exponencial com dois parâmetros, como indica a Equação 7.

$$M_t = M_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 \cdot t} \quad (7)$$

Onde  $t$  é o tempo (h);  $M_t$ , a umidade no instante de tempo  $t$  (% b.u.);  $M_0$ , a umidade inicial (% b.u.);  $k_1$ , a taxa constante de Peleg (h.% b.u.<sup>-1</sup>) e  $k_2$ , a constante de capacidade de Peleg (% b.u.<sup>-1</sup>).

Para encontrar os dois parâmetros do modelo de Peleg ( $k_1$  e  $k_2$ ), sua equação pode ser linearizada no formato de uma equação de reta na forma da Equação 8.

$$\frac{t}{M_t - M_0} = k_1 + k_2 t \quad (8)$$

### 2.12.2.2 Modelo de Page

Em 1949, Glen E. Page desenvolveu uma equação (Equação 9) para descrever a secagem de grãos de milho, matematicamente idêntica ao modelo da função distribuição de Weibull, comumente utilizada em modelagem de hidratação de grãos (CUNHA; OLIVEIRA; OLIVEIRA, 1998; KHAZAEI; MOHAMMADI, 2009).

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = e^{(-k_p \cdot t^N)} \quad (9)$$

Onde  $k_p$  ( $h^{-1}$ ) está relacionado à taxa de absorção do processo e  $N$  é uma constante adimensional;  $t$  é o tempo (h);  $M_t$  a umidade no instante de tempo  $t$  (% b.u.);  $M_0$ , a umidade inicial (% b.u.) e  $M_e$  a umidade de equilíbrio (% b.u.).

Essa equação requer duas constantes  $M_0$  e  $M_e$  e possui dois parâmetros ( $k_p$  e  $N$ ). Os parâmetros do modelo de Page podem ser encontrados pela linearização da Equação 9, que resulta na Equação 10.

$$\ln\left(-\ln\left(\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e}\right)\right) = N \cdot \ln(t) + \ln(k_p) \quad (10)$$

Os modelos fenomenológicos e empíricos apresentados podem ser visualizados na Tabela 2.

TABELA 2 – MODELOS EMPÍRICOS E TEÓRICOS (FENOMENOLÓGICO) ESTUDADOS

<b>Modelo</b>	<b>Classificação</b>	<b>Equação</b>
<b>Peleg</b>	Empírico	$\frac{t}{M_t - M_0} = k_1 + k_2 t$
<b>Page</b>	Empírico	$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = e^{(-k_p \cdot t^N)}$
<b>Difusão</b>	Fenomenológico	$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{D_{ef} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right)$
<b>Omoto</b>	Fenomenológico	$\frac{d(\rho_A)}{dt} = \frac{3K_s}{r} (\rho_{Aeq} - \rho_A)$

### 2.13 ESTUDO DA HIDRATAÇÃO COM GRÃOS DE SORGO

Em uma pesquisa realizada sobre o processo de absorção de água em grãos de sorgo, Buffo, Weller e Parkhurst (1998) hidrataram 46 cultivares a 50 °C durante 20 horas para estudar as propriedades de absorção de água dos grãos. Os autores verificaram uma captação instantânea no pericarpo durante a primeira hora de processo, e que o equilíbrio foi alcançado entre a 7ª e 8ª hora.

Modelos fenomenológicos e empíricos também tem sido utilizados para prever o processo de hidratação de grãos de sorgo. Fan, Chu e Shellenberger (1963) utilizaram um modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos desenvolvido por Becker (1960), baseado na lei de difusão de Fick para uma partícula de formato arbitrário, a fim de encontrar o coeficiente de difusão da água em grãos de milho e sorgo em temperaturas que variaram de 0 a 100 °C. Apesar da alta taxa de hidratação inicial atribuída ao fenômeno de capilaridade, o processo de hidratação dos grãos de sorgo obedeceu à segunda Lei de Fick. O coeficiente de difusão e a temperatura foram relacionados por uma equação do tipo Arrhenius e a energia de ativação do processo de hidratação foi estimada (FAN; CHU; SHELLENBERGER, 1963).

Sopade, Ajisehiri e Badau (1992) modelaram a absorção de água em grãos de sorgo, milho e milheto nas temperaturas de 10 °C, 30 °C e 50 °C utilizando a equação de Peleg que descreveu o processo adequadamente, alcançando coeficientes de correlação entre 0,990 e 0,999 para os grãos de sorgo. O autor ainda relacionou o parâmetro  $k_1$ , de Peleg, à temperatura por uma equação do tipo Arrhenius.

A equação de Peleg ainda foi utilizada para modelar a hidratação de grãos de sorgo inteiros por Kashiri, Kashaninejad e Aghajani (2010), polidos por Badau, Nkama e Jideani (2005) e inteiros e polidos por Vasudeva et al. (2010), que verificaram uma taxa de absorção de água maior para os grãos polidos em temperaturas entre 10 °C e 50 °C.

Kashiri, Garmakhany e Dehghani (2012) modelou a hidratação de grãos de sorgo com a equação de Page e por redes neurais, e obteve modelos generalizados, dos quais o modelo das redes neurais apresentou menor desvio (13,34%) em relação ao modelo de Page (24,7%).

Um modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos obtido a partir da lei de difusão de Fick, e do coeficiente de difusão de grãos de sorgo encontrado por Kashiri, Kashaninejad e Aghajani (2010) a 30 °C foi desenvolvido por Munson-Mcgee (2014). Munson-Mcgee (2014) analisou o perfil de umidade ao longo do raio do grão em um cenário de imersão contínua em água, comparando-o a outros dois cenários onde o grão era imerso e drenado em três ciclos (processo que pode ser utilizado durante a malteação do sorgo). Os ciclos de imersão e drenagem se

mostraram mais eficientes do que a imersão contínua para uniformizar a umidade no interior do grão.

Patero e Augusto (2015) hidrataram grãos de sorgo avaliando o efeito da alta temperatura (53 °C), da utilização do ultra-som (0,026 W/mL) e da combinação das duas tecnologias no processo. A aplicação do ultrassom aumentou a umidade de equilíbrio e a taxa de absorção de água dos grãos, com menor efeito, porém, do que a alta temperatura. O processo ainda foi modelado satisfatoriamente com a equação de Peleg.

## 2.14 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Por meio da revisão bibliográfica pôde-se verificar a importância dos grãos de sorgo no desenvolvimento de produtos destinados ao público celíaco no país e que o desenvolvimento desses produtos envolvem a etapa de hidratação. A revisão da literatura também revelou a relevância de estudos sobre o comportamento da absorção de água nos grãos durante a hidratação e a quantidade de trabalhos já realizados que utilizaram a modelagem matemática para descrever o processo.

Porém, escassos foram os trabalhos que estudaram cultivares brasileiras de sorgo e que compararam diversos modelos para indicar o mais adequado para descrever o processo, que podem ser utilizados para otimizar e desenvolver sensores de umidade teóricos para a indústria de alimentos. Desse modo, observa-se a importância da análise do comportamento de cultivares brasileiras de grãos de sorgo durante o processo de hidratação e a comparação de diferentes modelos que possam descrevê-lo.

Além disso, observando os trabalhos realizados, nota-se a importância da gelatinização do amido de sorgo durante o processamento de alimentos e que raras são as pesquisas que abordam possíveis modificações nos grânulos durante o processo de hidratação. Dessa forma este trabalho também teve como objetivo estudar essas modificações nos amidos de sorgo durante a etapa de hidratação.

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 AMOSTRAS

Neste trabalho foram utilizadas duas cultivares de grãos de sorgo desenvolvidas pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (EMBRAPA), o híbrido BRS 310 (sorgo de grãos vermelhos, tipo granífero, sem taninos) e o híbrido BRS 655 (sorgo de grãos marrons, tipo pastejo, sem taninos), ambos cultivados em fazendas pertencentes ao município de Paracatu, no Estado de Minas Gerais (BR) relativas à safra 2014/2014.

#### 3.2 ANÁLISES QUÍMICAS

A composição química das amostras foi realizada no laboratório de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Paraná (proteínas, umidade e lipídios) e nos Laboratórios pertencentes ao Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Ponta Grossa (cinzas e fibras brutas).

O conteúdo de proteínas foi determinado pelo método de Kjeldahl de acordo com a metodologia 920.87 da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, 1995), com fator de conversão do nitrogênio em proteína de 6,25. O teor de lipídios foi obtido pelo método de extração por Soxhlet, (norma 920.85 AOAC, 1995). A quantidade de cinzas foi determinada por incineração em mufla a 550 °C, conforme o método 923.03 da AOAC (1995). A análise de fibra bruta foi realizada utilizando a metodologia de Silva (2002). A umidade foi obtida pelo método gravimétrico em estufa a 105 °C por 24 horas (INSTITUTO ADOLF LUTZ, 1985). O teor de carboidratos foi estimado pelo método da diferença, subtraindo-se a porcentagem dos componentes citados de 100%.

#### 3.3 ANÁLISES MORFOLÓGICAS

Características morfológicas dos grãos de sorgo foram analisadas por imagens obtidas em Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV) pertencente ao Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná, para identificar possíveis relações entre a estrutura e a absorção de água.

Os grãos *in natura* foram colocados em bases de alumínio e recobertos com uma camada de ouro. As amostras preparadas foram submetidas à análise utilizando voltagem de aceleração de 10 kV no microscópio TESCAN, modelo VEJA3 LMU, pertencente ao Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná.

### 3.4 HIDRATAÇÃO

Os ensaios de hidratação foram realizados no LPSP/CEREAIS e GRÃOS – Laboratório de Processos e Sistemas Particulados, localizado na Usina Piloto A do Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná.

Amostras de cada cultivar foram imersas em água destilada na proporção 1:3 de grãos:água (m/v) e hidratadas sem agitação por um período de 12 horas nas temperaturas de 30 °C, 40 °C, 50 °C e 60 °C em banho-maria (SOLAB, modelo SL-155/22). As amostras foram retiradas em triplicata e o excesso de água foi removido com papel toalha para determinação da umidade, volume, sólidos lixiviados e extração de amido.

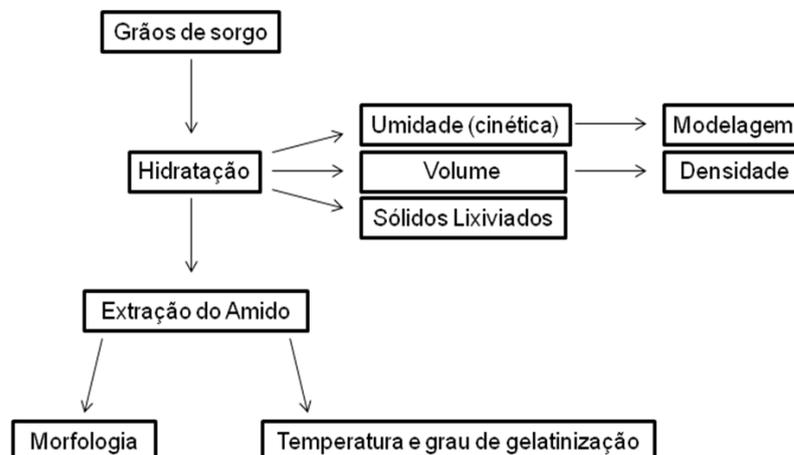


FIGURA 3 – FLUXOGRAMA DE ANÁLISES DAS AMOSTRAS RETIRADAS DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.

A Figura 3 resume as análises realizadas, enquanto a Tabela 3 esboça o tempo de retirada das amostras para cada análise.

TABELA 3 – TEMPO DE RETIRADA DAS AMOSTRAS DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO POR ANÁLISE

Análises	Tempo de retirada das amostras durante a hidratação (min)
Umidade, volume e densidade	0, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 720
Sólidos lixiviados e extração do amido para análise de temperatura e grau de gelatinização (DSC)	0, 120, 240, 360, 480, 600, 720
Extração do amido para análise das modificações morfológicas (MEV)	0, 360, 480, 720

### 3.5 EXTRAÇÃO DO AMIDO

Utilizando a metodologia desenvolvida por Bultosa et al. (2002) e Vallons e Arendt (2009b) com modificações, os grãos de sorgo foram moídos em moedor de facas (MARCONI, modelo: MA 630/01) e peneirados a 20 mesh (850  $\mu\text{m}$ ). O material retido foi descartado e a farinha obtida foi misturada com água destilada em proporção de 1:5 (m/v), com agitação da mistura em intervalos ao longo de uma hora. A suspensão formada foi triturada, filtrada em peneira de 48 mesh (300  $\mu\text{m}$ ) e 150 mesh (106  $\mu\text{m}$ ). O filtrado foi então centrifugado a 5.000 rpm por 20 minutos. Após a retirada da fase sobrenadante, a camada de proteína (marrom) foi descartada e o amido re-suspendido em água destilada e centrifugado novamente. O processo foi repetido até que o amido obtivesse aparência pura (coloração branca), para secagem em estufa com circulação de ar a 50 °C por 24 horas.

### 3.5.1 Avaliação das Propriedades Térmicas do Amido por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

Para a análise da temperatura e do grau de gelatinização do amido durante o processo de hidratação nas diferentes temperaturas, o amido extraído dos grãos hidratados a cada duas horas de hidratação foram avaliados por calorimetria diferencial de varredura (DSC) no equipamento Netzsch/204-F1/Alemanha utilizando a metodologia de Vallons e Arendt (2009b) com modificações.

Os grânulos de amido extraídos foram suspensos em água destilada (25%), e aproximadamente 6 mg da solução formada foram colocados em placas de alumínio de 20  $\mu$ l e submetidos à análise, utilizando Nitrogênio como gás de purga com fluxo de 20 mL/min e placa vazia como referência. Os testes foram realizados entre 10 °C e 100 °C sob taxa de aquecimento de 5 °C/min.

As transições térmicas do amido em suspensão foram avaliadas pela temperatura de gelatinização inicial ( $T_0$ ), pico ( $T_p$ ) e final ( $T_e$ ). A variação de entalpia ( $\Delta H$ ) associada à gelatinização do amido foi obtida pela área do pico endotérmico e seu grau de gelatinização (GD) calculado por meio da diferença do  $\Delta H$  entre o amido nativo (sem tratamento) e o amido submetido ao processo de hidratação de acordo com a Equação 11 utilizada por Błaszczak et al. (2007):

$$GD(\%) = \left[ (\Delta H_n - \Delta H_t) \Delta H_n^{-1} \right] 100\% \quad (11)$$

Onde  $\Delta H_n$  é a variação de entalpia associada ao evento de gelatinização do amido no estado nativo e  $\Delta H_t$  é a variação de entalpia associada ao evento de gelatinização do amido que passou por tratamento (hidratação).

### 3.5.2 Modificações na Morfologia do Amido durante a Hidratação por análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

Para a análise das modificações estruturais ocorridas nos amidos de sorgo durante o processo de hidratação, o amido extraído dos grãos retirados do experimento a cada quatro horas foram colocadas em bases de alumínio e

recobertas com uma camada de ouro. As amostras preparadas foram submetidas à análise de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) utilizando a mesma metodologia e equipamento do item 3.3.

O tamanho dos amidos ainda foi mensurado utilizando as imagens obtidas pelo MEV por meio do software IMAGEJ versão 1.49t.

### 3.6 VOLUME E DENSIDADE

Para estimar a variação de volume dos grãos durante a hidratação, 100 grãos foram separados manualmente de meia em meia hora nas primeiras quatro horas de experimento e de uma em uma hora a partir da 4ª hora. Os grãos foram pesados e seu volume deslocado mensurado. A densidade foi calculada dividindo a massa dessa amostra por seu volume conforme Tavakoli, Rajabipour e Mohtasebi (2009).

### 3.7 SÓLIDOS LIXIVIADOS

Os sólidos lixiviados foram determinados a cada duas horas de experimento, a partir de uma alíquota de 10 mL retirada da água de hidratação, que posteriormente foi submetida à evaporação em uma temperatura de 105 °C por 24 horas, seguida por pesagem do resíduo seco. Os sólidos perdidos foram avaliados calculando a concentração de resíduo seco na massa inicial de água em g/100g de amostra (MASKAN, 2001; RESIO; AGUERRE; SUARÉZ, 2003).

### 3.8 CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO

Aproximadamente 5 gramas de grãos de sorgo foram retiradas do processo de hidratação de meia em meia hora nas quatro primeiras horas e de uma em uma

hora até o término do experimento. As amostras retiradas foram pesadas e submetidas à análise de umidade pelo método de estufa a 105 °C durante 24 horas (INSTITUTO ADOLF LUTZ, 1985).

### 3.9 MODELAGEM MATEMÁTICA E ESTIMATIVA DA ENERGIA DE ATIVAÇÃO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

A modelagem da hidratação dos grãos de sorgo foi realizada com os modelos empíricos de Peleg e Page os e modelos fenomenológicos de Difusão e Omoto.

Os parâmetros pertencentes aos modelos de Peleg, Page e Omoto foram encontrados pelo método de linearização (Equações 8, 10 e 6, respectivamente), enquanto para o modelo de Difusão foi realizada regressão não linear da Equação 2, truncada no 8º termo, todos pelo software ORIGINPRO versão 8.5. Além disso, a umidade de equilíbrio utilizada no modelo de Page, Difusão e Omoto foi obtida experimentalmente mensurando a umidade ao final da hidratação.

A energia de ativação do processo foi calculada por meio do modelo de difusão, pela equação do tipo Arrhenius que relaciona o coeficiente de difusão efetivo,  $D_{\text{eff}}$ , e a temperatura, apresentada no item 2.10.3.

O nível de ajuste dos modelos foi avaliado pelo coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e pela análise de desvios realizada por meio da raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE), do erro médio relativo (P) e do erro padrão da estimativa (SE) (Equações (12), (13) e (14), respectivamente).

$$RMSE = 100 \sqrt{\frac{1}{n} \sum \left( \frac{M_{\text{exp}} - M_{\text{pre}}}{M_{\text{exp}}} \right)^2} \quad (12)$$

$$P = \frac{100}{n} \sum \left( \frac{M_{\text{exp}} - M_{\text{pre}}}{M_{\text{exp}}} \right) \quad (13)$$

$$SE = 100 \sqrt{\frac{\sum (M_{exp} - M_{pre})^2}{GRL}} \quad (14)$$

Onde  $n$  é o número de observações,  $M_{exp}$  é o valor de umidade obtido experimentalmente,  $M_{pre}$  é a umidade prevista pelo modelo e  $GRL$  é o grau de liberdade, que compreende o número de observações menos o número de parâmetros do modelo.

### 3.10 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

O efeito do tempo e da temperatura na cinética de hidratação, variação de sólidos lixiviados, volume, densidade e umidade de equilíbrio dos grãos de sorgo e na variação de tamanho, temperatura e grau de gelatinização dos grânulos de amido durante o processo de hidratação foi avaliado estatisticamente pela análise de variância (ANOVA) a 95% de significância, com comparação das médias pelo teste de Tukey a 95% e comparação das variâncias dos dados de volume e densidade realizados pelo teste de Levene também a 95%.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados estão apresentados na seguinte sequência: análises químicas dos grãos de sorgo; avaliação da morfologia do grão e de possíveis modificações estruturais dos grânulos de amido no processo; modificações nas propriedades térmicas (temperatura, entalpia e grau de gelatinização) do amido ao longo da hidratação; variações de volume e densidade dos grãos durante a hidratação; sólidos lixiviados; cinética de hidratação e modelagem matemática

### 4.1 ANÁLISES QUÍMICAS

A quantidade de carboidratos, proteínas, lipídios, cinzas, fibras e umidade dos grãos de sorgo são apresentadas neste item (Tabela 4), bem como a comparação com os dados da literatura (Tabela 1).

TABELA 4 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DAS CULTIVARES DE GRÃOS DE SORGO ESTUDADOS

<sup>A</sup>	Carb. <sup>B</sup> (% m/m)	Prot. <sup>C</sup> (% m/m)	Lip. <sup>D</sup> (% m/m)	Cinzas (% m/m)	Umid. <sup>E</sup> (% m/m)	Fibras (% m/m)
<sup>F</sup>	67,65±1,29 <sup>a</sup>	12,98±0,09 <sup>b</sup>	3,41±0,32 <sup>a</sup>	1,56±0,02 <sup>b</sup>	13,46±0,10 <sup>b</sup>	1,62±0,07 <sup>a</sup>
<sup>G</sup>	65,37±1,55 <sup>b</sup>	13,93±0,41 <sup>a</sup>	3,54±0,35 <sup>a</sup>	1,73±0,10 <sup>a</sup>	13,74±0,11 <sup>a</sup>	1,69±0,02 <sup>a</sup>

<sup>A</sup>Cultivares; <sup>B</sup>Carboidratos; <sup>C</sup>Proteínas; <sup>D</sup>Lipídeos; <sup>E</sup>Umidade; <sup>F</sup> Cultivar BRS 310; <sup>G</sup> Cultivar BRS 655  
\*Letras minúsculas diferentes na mesma coluna representam diferença significativa entre as cultivares (p<0,05).

A cultivar BRS 310 apresentou maiores valores de carboidratos (p<0,05), e menor quantidade de proteínas, cinzas e umidade (p<0,05) se comparada a cultivar BRS 655. A quantidade de fibras e lipídios não diferiu significativamente ao nível de 5%. A quantidade de carboidratos, lipídeos e cinzas está dentro da faixa encontrado em literatura (Tabela 1), enquanto a umidade dos grãos se mostrou ligeiramente maior (aproximadamente 3%).

A quantidade de fibras na literatura varia de acordo com método utilizado. Queiroz et al. (2015) analisou as fibras de grãos de sorgo pelo método de detergente neutro, enquanto Knudsen et al. (1985) utilizou a metodologia de fibra alimentar. Por outro lado, Fan, Chu e Shellenberger (1963) utilizaram igualmente o método de

fibras brutas e encontrou valores próximos ao observados para as cultivares BRS 310 e BRS 655.

A absorção de água pode ser influenciada pela composição química do grão. Maior quantidade de proteínas estaria relacionada ao aumento na taxa de absorção de água (SOPADE; AJISEGIRI; BADAU, 1992), enquanto um aumento na quantidade de amido reduziria captação de água pelos grãos (BUFFO; WELLER; PARKHURST, 1998). Desse modo, analisando somente a composição química, a cultivar BRS 310 que possui menor quantidade de proteínas e maior quantidade de carboidratos, possivelmente absorveria menor quantidade de água durante o processo de hidratação do que a cultivar BRS 655.

## 4.2 EFEITO DA HIDRATAÇÃO NAS PROPRIEDADES TÉRMICAS DO AMIDO

### 4.2.1 Temperatura e Entalpia de Gelatinização

As transições térmicas observadas nos amidos de sorgo durante as análises de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) em diferentes tempos e temperaturas de hidratação para as cultivares BRS 310 e BRS 655 são apresentadas nas Tabelas 4 e 5, respectivamente. A cultivar BRS 310 apresentou temperaturas de gelatinização inicial ( $T_0$ ) entre 62,8 °C e 67,0 °C, temperaturas de pico ( $T_p$ ) de 66,6 °C a 69,9 °C e temperatura final de gelatinização ( $T_e$ ) entre 70,3 °C e 72,9 °C, enquanto a cultivar BRS 655 obteve uma  $T_0$  entre 62,1 °C e 67,3 °C,  $T_p$  de 65,9 °C a 70,1 °C e  $T_e$  entre 69,8 °C e 72,9 °C. A entalpia de gelatinização dos amidos variou entre 2,43 e 3,63 J/g para a cultivar BRS 310 e de 2,18 a 3,38 J/g para a cultivar BRS 655.

Em relação às possíveis alterações que o processo de hidratação dos grãos possa causar nas propriedades térmicas dos grânulos de amido, o tempo de hidratação dos grãos não teve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) nas temperaturas de gelatinização ( $T_0$ ,  $T_p$  e  $T_e$ ) para as duas cultivares estudadas (Tabelas 5 e 6). Por outro lado, o processo de hidratação a 60 °C aumentou significativamente as

temperaturas  $T_0$ ,  $T_p$  e  $T_e$  se comparada às demais temperaturas de hidratação estudadas, tanto para a cultivar BRS 310 quanto para a BRS 655.

As interações entre amilose-amilose e amilose-amilopectina durante o tratamento térmico podem reduzir a mobilidade da água na região amorfa e, por conseguinte, requerer maior temperatura para que ocorra o inchaço do grânulo, aumentando assim a temperatura de gelatinização do amido (HOOVER; MANUEL, 1996; HOOVER, 2010; CHUNG; LIU; HOOVER, 2009).

TABELA 5 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DO AMIDO EXTRAÍDO DA CULTIVAR BRS 310 AO LONGO DA HIDRATAÇÃO

Temperatura de hidratação (°C)	Tempo de hidratação (h)	$T_0$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_e$ (°C)	Delta H (J/g)
-	0	62,8	66,6	70,9	3,63 <sup>a</sup>
30	2	63,2	66,8	70,7	2,84 <sup>b</sup>
30	4	62,7	66,7	70,9	2,61 <sup>b</sup>
30	6	64,5	67,7	71,1	2,58 <sup>b</sup>
30	8	64,7	68,1	71,6	2,58 <sup>b</sup>
30	10	64,0	67,4	71,3	2,51 <sup>b</sup>
30	12	63,6	67,1	70,8	2,48 <sup>b</sup>
40	2	63,7	67,4	71,1	2,75 <sup>b</sup>
40	4	63,5	66,9	70,6	2,68 <sup>b</sup>
40	6	64,0	67,1	70,5	2,64 <sup>b</sup>
40	8	64,0	67,2	70,6	2,55 <sup>b</sup>
40	10	63,9	66,9	70,3	2,51 <sup>b</sup>
40	12	63,8	67,3	71,2	2,51 <sup>b</sup>
50	2	63,2	66,8	70,5	2,85 <sup>b</sup>
50	4	63,9	67,1	70,4	2,65 <sup>bc</sup>
50	6	63,7	67,3	70,7	2,58 <sup>bc</sup>
50	8	64,2	67,7	71,1	2,53 <sup>bc</sup>
50	10	64,5	67,9	71,3	2,52 <sup>bc</sup>
50	12	64,0	67,2	70,6	2,45 <sup>c</sup>
60	2	64,4	67,8	71,2	2,75 <sup>b</sup>
60	4	65,6	68,8	71,8	2,46 <sup>c</sup>
60	6	66,9	69,7	72,7	2,39 <sup>c</sup>
60	8	66,3	69,1	72,2	2,36 <sup>c</sup>
60	10	66,5	69,4	72,6	2,35 <sup>c</sup>
60	12	67,0	69,9	72,9	2,34 <sup>c</sup>

Letras minúsculas diferentes na mesma coluna possuem diferença significativa ( $p < 0,05$ ) na mesma temperatura para uma mesma cultivar.

Hoover e Vasathan (1994) sugeriram que as interações entre amilose e amilopectina dentro do grânulo de amido podem ser influenciadas pela proximidade

entre a temperatura do tratamento térmico e a temperatura do início da gelatinização ( $T_0$ ). Assim, quanto menor a diferença entre a temperatura de hidratação e a  $T_0$ , supostamente, maior seria a temperatura de gelatinização do amido. No presente trabalho, o tratamento térmico a 60 °C é o que possui temperatura mais próxima à de gelatinização inicial dos amidos das cultivares BRS 310 e BRS 655 *in natura* (aproximadamente 62 °C) e, de fato, foi o único que aumentou significativamente a temperatura de gelatinização dos amidos analisados.

TABELA 6 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DO AMIDO EXTRAÍDO DA CULTIVAR BRS 655 AO LONGO DA HIDRATAÇÃO

Temperatura de hidratação (°C)	Tempo de hidratação (h)	$T_0$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_e$ (°C)	Delta H (J/g)
-	0	62,6	66,3	70,2	3,38 <sup>a</sup>
30	2	62,1	65,9	70,1	2,63 <sup>b</sup>
30	4	62,2	65,8	69,9	2,55 <sup>b</sup>
30	6	63,6	66,8	70,4	2,55 <sup>b</sup>
30	8	63,1	66,4	70,3	2,48 <sup>b</sup>
30	10	63,8	66,7	70,0	2,43 <sup>b</sup>
30	12	62,3	65,9	69,8	2,45 <sup>b</sup>
40	2	59,8	66,0	69,8	2,51 <sup>b</sup>
40	4	62,2	65,9	69,8	2,48 <sup>b</sup>
40	6	63,6	66,7	70,0	2,43 <sup>b</sup>
40	8	63,2	66,3	69,8	2,47 <sup>b</sup>
40	10	62,8	66,0	69,6	2,48 <sup>b</sup>
40	12	62,7	66,1	69,8	2,45 <sup>b</sup>
50	2	62,5	66,0	69,8	2,65 <sup>b</sup>
50	4	63,0	66,5	70,3	2,48 <sup>b</sup>
50	6	62,4	66,2	70,1	2,42 <sup>b</sup>
50	8	62,9	66,1	69,9	2,43 <sup>b</sup>
50	10	63,0	66,6	70,5	2,38 <sup>b</sup>
50	12	63,1	66,5	70,2	2,40 <sup>b</sup>
60	2	62,8	66,7	70,8	2,54 <sup>b</sup>
60	4	65,5	68,6	71,7	2,38 <sup>b</sup>
60	6	66,3	69,3	72,5	2,32 <sup>b</sup>
60	8	65,9	69,0	72,1	2,23 <sup>b</sup>
60	10	65,8	69,2	72,9	2,19 <sup>b</sup>
60	12	67,3	70,1	72,9	2,18 <sup>b</sup>

Letras minúsculas diferentes na mesma coluna possuem diferença significativa ( $p < 0,05$ ) na mesma temperatura para uma mesma cultivar.

A entalpia de gelatinização dos amidos da cultivar BRS 310 sofreu efeito significativo ( $p < 0,05$ ) do tempo ao longo da hidratação, entre o  $\Delta H$  do amido nativo e

do hidratado em todas as temperaturas, e também houve um decréscimo na entalpia entre a 2ª e a 12ª hora de processo na temperatura de 50 °C, além de uma redução significativa após a 2ª de hidratação a 60 °C. O valor da entalpia do amido extraído da cultivar BRS 655 não sofreu efeito ( $p < 0,05$ ) do tempo de hidratação, exceto pelo decréscimo da entalpia em amidos hidratados em comparação ao amido nativo para todas as temperaturas estudadas.

O processo de hidratação dos grãos realizado a 60 °C apresentou menor valor ( $p < 0,05$ ) de entalpia de gelatinização dos amidos de sorgo em relação às demais temperaturas para as cultivares estudadas. O decréscimo no valor de  $\Delta H$  causado pelo tratamento térmico é atribuído principalmente ao rompimento de duplas hélices (formadas por interações entre amilose e amilopectina), assim o número de duplas hélices que se rompem e fundem durante a gelatinização é menor do que o observado no amido nativo (pertencente aos grãos não hidratados) (HOOVER, 2010; CHUNG; LIU; HOOVER, 2009; SINGH; KAUR; McCARTHY, 2007; COOKE; GIDLEY, 1992).

O tratamento hidrotérmico dos grãos de sorgo a 60 °C sugere, então, que nessa temperatura ocorre uma ruptura parcial ou um enfraquecimento nas estruturas de dupla hélice presentes nos grânulos de amido, o que implica em uma quantidade menor de energia necessária para que a gelatinização ocorra (SINGH; KAUR; McCARTHY, 2007; CHUNG; LIU; HOOVER, 2010; HOOVER, 2010).

O mesmo comportamento de aumento de temperatura de gelatinização e queda no  $\Delta H$  em amidos de sorgo com tratamento térmico realizado diretamente nos grânulos foi relatado por Vallons e Arendt (2009b) em temperaturas maiores do que 60 °C.

Como não houve mudanças significativas nas propriedades térmicas dos grânulos durante a hidratação realizada entre as temperaturas de 30 °C e 50 °C, o aumento da temperatura de hidratação dentro dessa faixa, tendo em vista somente as propriedades térmicas, além de aumentar o gasto energético do processo, não resulta em benefícios para a qualidade do produto final. Observando a temperatura de hidratação a 60 °C, que aumentou diminuiu a entalpia e aumentou a temperatura de gelatinização dos grânulos, mesmo com uma menor energia requerida para que a gelatinização ocorra, uma maior temperatura de gelatinização aumenta o custo energético de processo. Esse fato torna claro que o aumento da temperatura de

hidratação, observando temperatura e  $\Delta H$  de gelatinização, não torna-se desinteressante.

Avaliando as propriedades térmicas entre os híbridos de sorgo estudados nesta pesquisa, a cultivar BRS 310 apresentou maiores valores de entalpia de gelatinização se comparada à BRS 655 ( $p < 0,05$ ). Esse fato sugere que os grãos de sorgo BRS 655 possuem maior proporção de amilopectina de cadeias curtas, que são pequenas para formar duplas hélices estáveis e que menor quantidade de energia é requerida para fundi-las durante a gelatinização (CHUNG; LIU; HOOVER, 2009). Do mesmo modo, as duas cultivares parecem possuir maior proporção de cadeias curtas de amilopectina do que a maioria dos amidos de sorgo encontrados na literatura (Tabela 7), por apresentarem menores valores de  $\Delta H$ .

A Tabela 6 indica temperaturas e entalpias de gelatinização encontradas em trabalhos que analisaram as propriedades térmicas de amidos de grãos de sorgo. Faixas iniciais de temperatura de gelatinização ( $T_0$ ), similares às observadas nas cultivares BRS 310 e BRS 655, foram encontradas por Beta et al. (2000), e temperaturas de pico semelhantes foram observadas por Beta et al. (2001b). As temperaturas finais de gelatinização ( $T_e$ ) analisadas no presente trabalho foram menores do que a maioria dos trabalhos descritos na literatura com amidos de sorgo.

Entalpias de gelatinização próximas às observadas pelas cultivares BRS 310 e BRS 655 foram encontradas por Vallons e Arendt (2009b) e Subrahmanyam e Hosney (1995) (Tabela 7). De um modo geral, as temperaturas de gelatinização e o  $\Delta H$  das cultivares estudadas foram menores do que os observadas em outras pesquisas realizadas com amidos de sorgo (SINGH; SODHI; SINGH, 2010; LI et al., 2011; BOUDRIES et al., 2009; SANG et al., 2008; GAFFA et al., 2004; PEDERSEN; GRAYBOSCH; FUNNELL, 2007; AKINGBALA et al., 1988).

Beta et al. (2001a) estudaram as propriedades térmicas de amidos pertencentes a dez cultivares de sorgo do Zimbábue (sudoeste da África) e também encontraram temperaturas de gelatinização menores do que aquelas geralmente relatados pela literatura, e atribuiu as diferenças à fatores genéticos e ambientais. Os autores encontraram também uma relação positiva entre a temperatura de pico e a quantidade de amilose presente nos grãos. Segundo Chung, Liu e Hoover (2009), maiores temperaturas de gelatinização estão relacionadas a uma maior quantidade

de amilopectina, enquanto menores valores de  $\Delta H$  ocorrem devido à maior proporção de amilopectinas de cadeias curtas.

Diferenças nas propriedades térmicas de amidos podem ser observadas ainda devido às diferenças nas metodologias utilizadas na extração do amido e nas análises de DSC, como taxa de aquecimento e proporção amido:água (ZHU, 2014; Beta et al., 2001b). Desse modo, menores valores nas propriedades térmicas observadas nas cultivares BRS 310 e BRS 655 em comparação a maioria das pesquisas realizadas com sorgo podem ser atribuídos a fatores ambientais, genéticos e metodológicos.

TABELA 7 – PROPRIEDADES TÉRMICAS DE AMIDOS DE SORGO DA LITERATURA

$T_0$ (°C)	$T_p$ (°C)	$T_e$ (°C)	$\Delta H$ (J/g)	Autor
			16-22	Błaszczak et al. (2013)
65,5	70,6		10,9	Alamri, Mohamed e Hussain (2012)
68,6	71,5	82,9	12,3	Ali e Hasnain (2012)
66,6-67,4	69,9-71,1	74,4-75,5	13,0-14,0	Ai et al. (2011)
67,1-67,2	71,2-71,4	75,0-75,3	5,7-6,7	Li et al. (2011)
66,1-73,1	70,1-77,8	75,0-81,2	9,26-13,5	Singh, Sodhi e Singh (2010)
66,6-68,4	70,6-72,3	76,8-77,1	8,3-9,1	Boudries et al. (2009)
62,3-73,3	67,0-76,4	71,6-79,9	0,2-2,5	Vallons e Arendt (2009b)
67,7-69,6	70,7-73,0	75,7-82,1	13,2-14,7	Sang et al. (2008)
66,8-70,1	72,0-74,7	77,6-80,8	15,3-16,9	Pedersen, Graybosch e Funnell (2007)
67,4-68,9	70,6-72,5	90,0-91,3	13,3-14,1	Gaffa et al. (2004)
59,7-62,9	66,5-69,3	75,8-79,4	9,0-10,8	Beta et al. (2001b)
	65,8-68,7		6,9-8,3	Beta et al. (2001a)
59,4-66,2	66,0-72,0	77,4-81,5	9,8-9,9	Beta et al. (2000)
60,4-70,8			2,3-3,4	Subrahmanyam e Hosney (1995)
69,0-73,1	74,3-77,3	79,4-83,4	10,5-16,6	Akingbala et al. (1988)

#### 4.2.2 Grau de Gelatinização (GD)

Modificações no grau de gelatinização (GD) dos amidos de sorgo pertencentes às cultivares BRS 310 e BRS 655, ao longo o processo de hidratação dos grãos, podem ser observadas pelas Figuras 4 e 5, respectivamente.

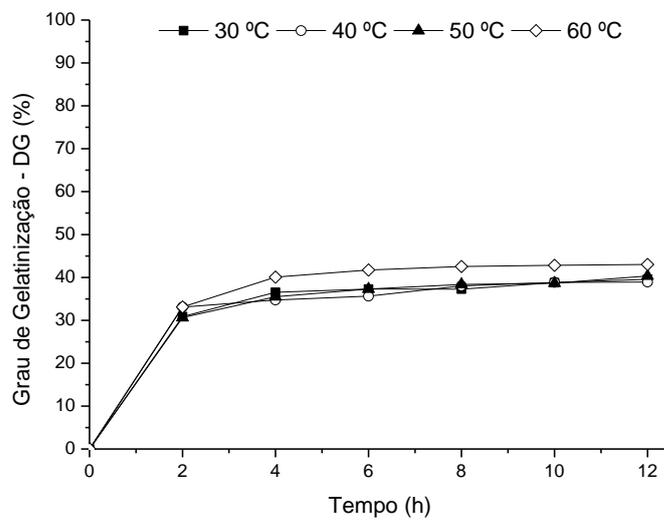


FIGURA 4 – GRAU DE GELATINIZAÇÃO DO AMIDO DA CULTIVAR BRS 310 AO LONGO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.

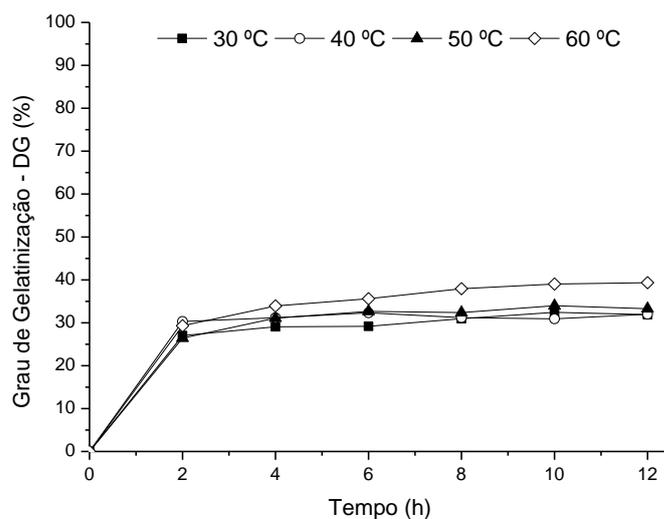


FIGURA 5 – GRAU DE GELATINIZAÇÃO DO AMIDO DA CULTIVAR BRS 655 AO LONGO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.

O grau de gelatinização do amido a partir da segunda hora de hidratação dos grãos variou entre 30,9% e 39,6% no processo de hidratação dos grãos a 30 °C, de 33,1% a 38,9% em 40 °C, entre 30,6% e 40,0% a 50 °C e entre 33,1 e 43,0% a 60 °C para a cultivar BRS 310. Da mesma forma, para a cultivar BRS 655 os valores variaram de 27,0% a 32,4%; de 30,3% a 32,3%; entre 26,4% e 33,3% e de 29,3% a 39,3% nas temperaturas de hidratação de 30 °C, 40 °C, 50 °C e 60 °C, respectivamente.

Por meio dos gráficos das Figuras 4 e 5, pode-se observar que o grau de gelatinização (GD) é praticamente constante após a segunda hora de hidratação para as temperaturas de 30 °C, 40 °C e 50 °C, enquanto a 60 °C ocorre um pequeno deslocamento na curva pelo aumento no GD para ambas as cultivares.

Como o GD depende da entalpia de gelatinização do amido hidratado (Equação 11), a queda no  $\Delta H$  esta relacionada ao aumento da porcentagem de amidos gelatinizados. Desse modo, como ocorreu com o  $\Delta H$ , de um modo geral, o tempo de hidratação não teve efeito significativo ( $p < 0,05$ ) sobre o GD após a segunda hora de hidratação, o que pode ocorrer provavelmente porque todos os grânulos capazes de se gelatinizar nessas temperaturas, se gelatinizam no início do processo.

Somente a temperatura de hidratação a 60 °C aumentou a porcentagem de amido gelatinizado ( $p < 0,05$ ) em relação às demais temperaturas porque essa é uma temperatura muito próxima à de início de gelatinização dos grânulos (aproximadamente 62 °C) e a quantidade amidos gelatinizados aumentam significativamente em relação a temperaturas menores.

Vallons e Arendt (2009a) realizaram tratamento hidrotérmico diretamente em grânulos de amido de trigo entre 60 °C e 75 °C por 10 minutos e observaram que o grau de gelatinização aumentou drasticamente no tratamento entre 60 °C e 70 °C (de 3% para 96%), porque esta é a faixa de gelatinização do amido *in natura*.

Também com tratamentos de 10 minutos realizados diretamente em amidos de sorgo entre 60 °C e 75 °C, Vallons e Arendt (2009b) encontraram aumentos no grau de gelatinização menores do que 20% até os 60 °C, e maiores do que 50% após essa temperatura. A porcentagem de amidos gelatinizados até 60 °C encontrada pelos autores foi aproximadamente metade das observadas nas cultivares BRS 310 e BRS 655, o que provavelmente se dá pelo curto período de

tratamento térmico aplicado por Vallons e Arendt (2009b) (dez minutos) em comparação ao realizado neste trabalho (entre 2 e 12 horas).

Ambos os trabalhos citados (VALLONS; ARENDT, 2009b; VALLONS; ARENDT, 2009a) observaram curvas de graus de gelatinização em forma de sigmóides, diferentemente do presente trabalho em que observa-se formatos hiperbólicos, que ocorrem porque o grau de gelatinização aumenta drasticamente antes e praticamente se estabiliza após a segunda hora de hidratação.

Com os estudos realizados, percebe-se que, em relação ao grau de gelatinização, em termos de variáveis do processo, pode ser viável um aumento da temperatura de hidratação de 30 °C para 60 °C com o objetivo de aumentar a porcentagem de grânulos gelatinizados. O aumento médio no grau de gelatinização do amido com uma hidratação passando de 30 °C para 60 °C é de 14% para a BRS 310 e 23% para a BRS 655.

#### 4.3 MORFOLOGIA DOS GRÃOS E O EFEITO DA HIDRATAÇÃO NA ESTRUTURA DO AMIDO DE SORGO

##### 4.3.1 Avaliação Morfológica dos grãos de sorgo

A morfologia dos grãos analisada pelas imagens de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), e possíveis relações entre sua estrutura e a absorção de água durante o processo de hidratação são avaliadas nesse item.

Na Figura 6 são apresentadas as imagens obtidas dos grãos de sorgo inteiros (Figuras 6a e 6c) e em cortes transversais (Figuras 6b e 6d).

Pode-se perceber que o grão possui formato muito próximo ao esférico para ambas as cultivares. Pelas imagens foi possível mensurar o tamanho dos grãos, que apresentaram comprimento de 3,187 mm e largura de 3,191 mm para a cultivar BRS 310, enquanto o grão da cultivar BRS 655 apresentou comprimento de 3,187 mm e largura de 3,191 mm.

Na análise de MEV realizada no grão em corte transversal (Figuras 6b e 6d), é possível identificar diferentes regiões como o endosperma farináceo (A), endosperma vítreo (B), hilo (C) e pericarpo (D).

As imagens registradas dos cortes realizados nos grãos mostram canais existentes na região do hilo, o que provavelmente provoca o efeito da capilaridade nos instantes iniciais do processo de hidratação. Esses canais, em destaque na Figura 7, podem ser preenchidos rapidamente com água no início do processo e provocar um grande aumento na taxa de absorção de água até a saturação.

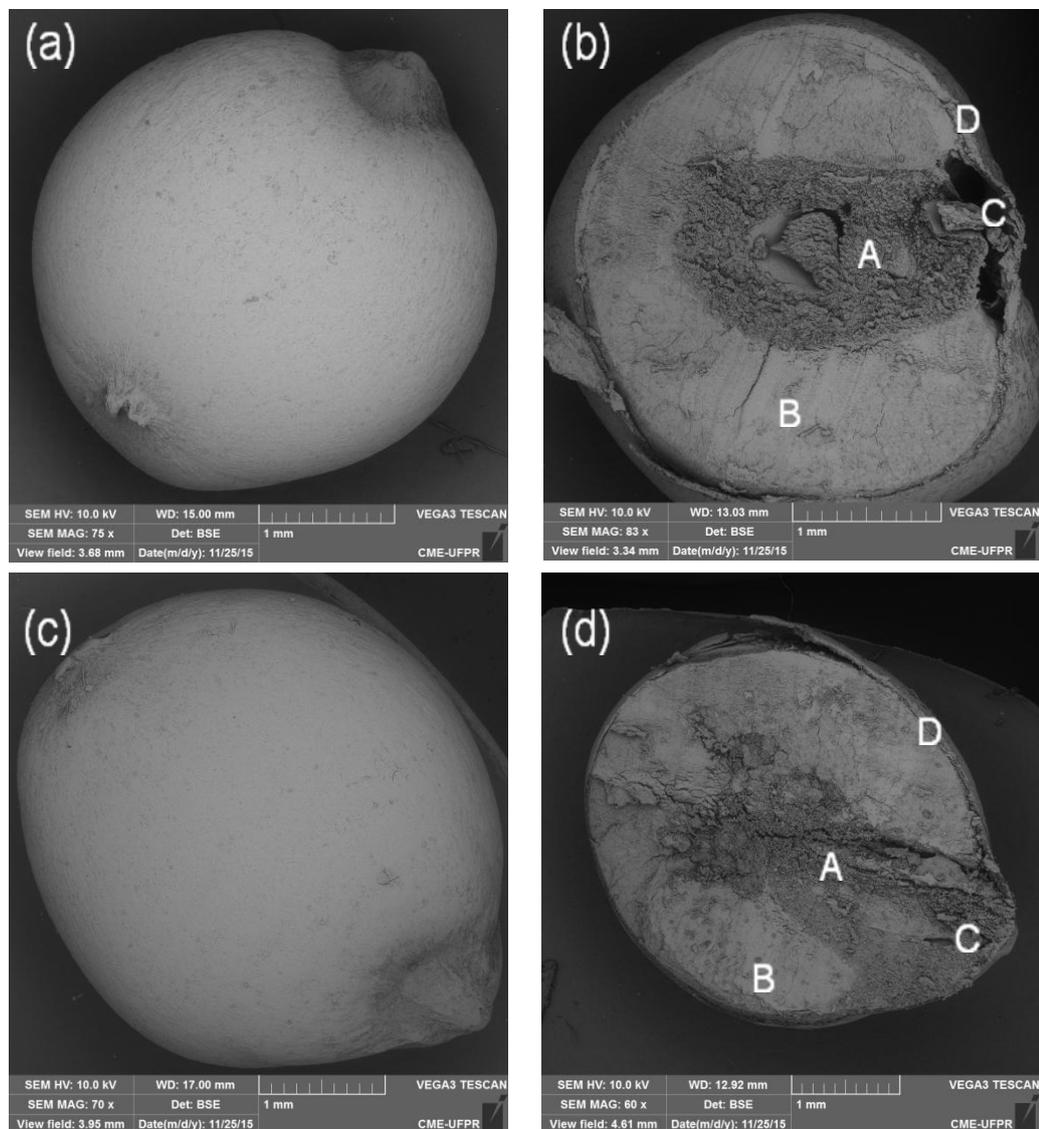


FIGURA 6 – GRÃOS DE SORGO INTEIROS: PERTENCENTES À CULTIVAR BRS 310 (a); BRS 655 (c), E CORTADOS PERTENCENTES À CULTIVAR BRS 310 (b) E BRS 655 (d) COM AS REGIÕES DOS CORTES: ENDOSPERMA FARINÁCEO (A); ENDOSPERMA VÍTREO (B); HILO (C) E PERICARPO (D) .

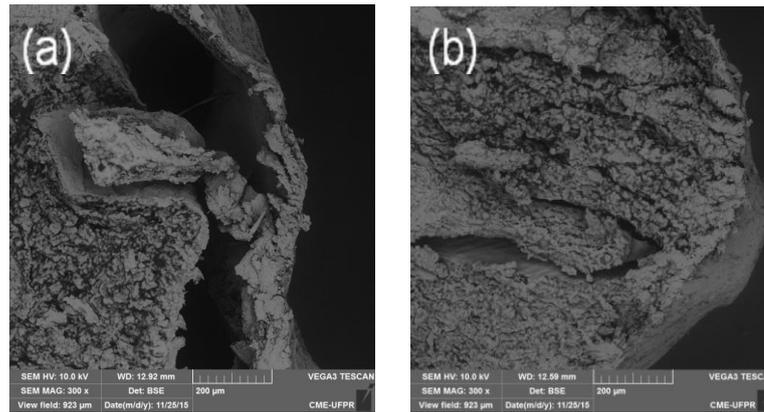


FIGURA 7 – CORTES TRANSVERSAIS DOS GRÃOS DE SORGO BRS 310 (a) E BRS 655 (b) COM APROXIMAÇÃO DE 300 VEZES NA REGIÃO DO HILO.

Além disso, a água absorvida pelo grão durante o processo de hidratação provavelmente entra pela parte externa do hilo (Figura 8).

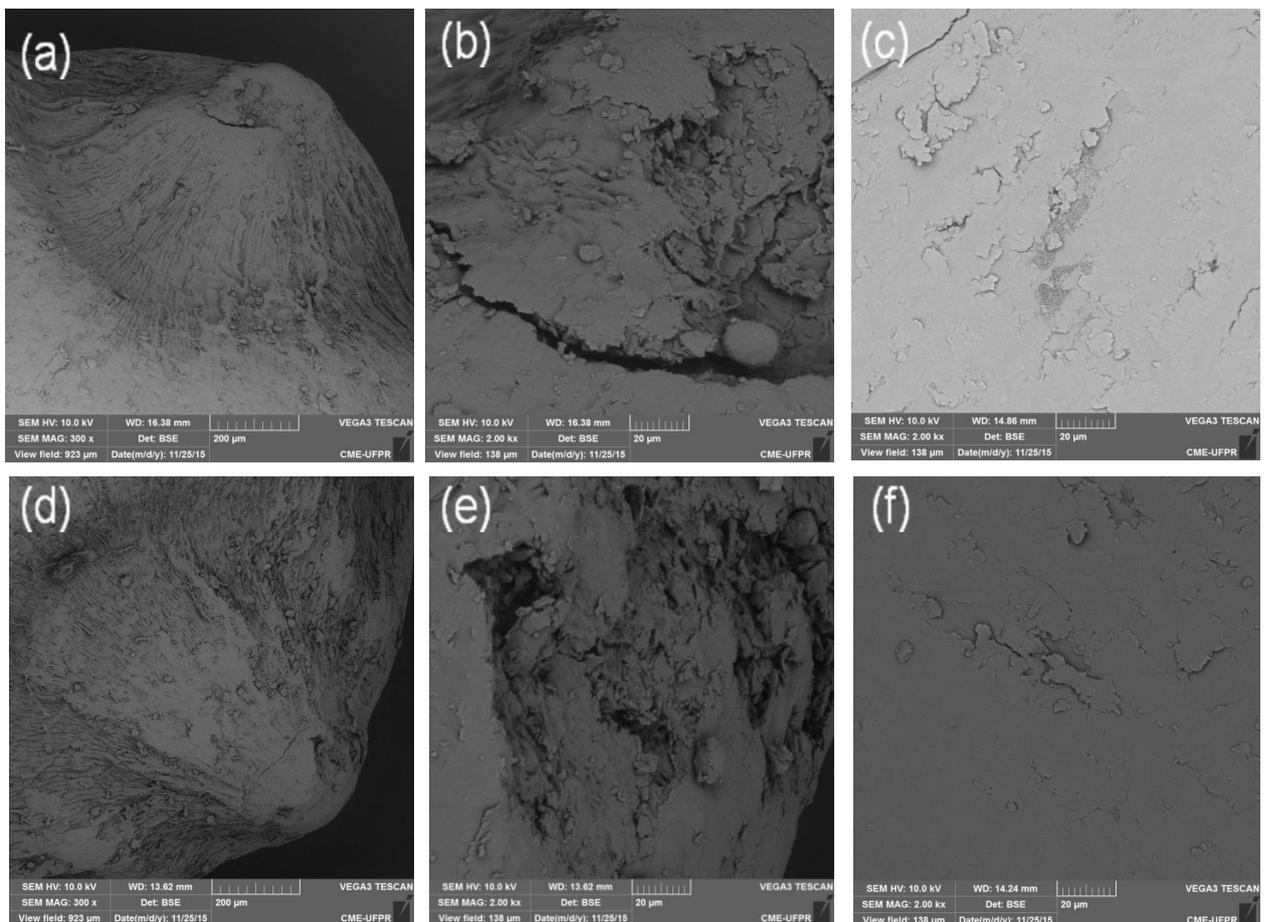


FIGURA 8 – PARTE EXTERNA DO HILO DO GRÃO AMPLIADA 300 VEZES: PARA A CULTIVAR BRS 310 (a) E BRS 655 (d); AMPLIADA 2.000 VEZES PARA A CULTIVAR BRS 310 (b) E BRS 655 (e); E DEMAIS REGIÕES DA PARTE EXTERNA DO GRÃO AMPLIADA 2.000 VEZES PARA A CULTIVAR BRS 310 (c) E BRS 655 (f).

Nas Figuras 8a e 8b encontram-se a parte externa do hilo da cultivar BRS 310, ampliada 300 e 2.000 vezes, respectivamente. Da mesma forma, nas Figuras

8d e 8e são apresentadas a parte externa do hilo ampliada 300 e 2.000 vezes para a cultivar BRS 655, enquanto as Figura 8c e 8f revelam a estrutura das demais regiões da parte externa do grão em uma ampliação de 2.000 vezes.

Como citado, a água absorvida pelo grão durante a hidratação se dá possivelmente pelo hilo, o que pode ser confirmado pela diferença de porosidade entre o hilo (Figura 8b e 8e), que é muito poroso e possui “rachaduras”, e as demais regiões externas (Figura 8c e 8f), onde quase não se observa porosidade ou entradas que permitam um acesso fácil à entrada de água no grão.

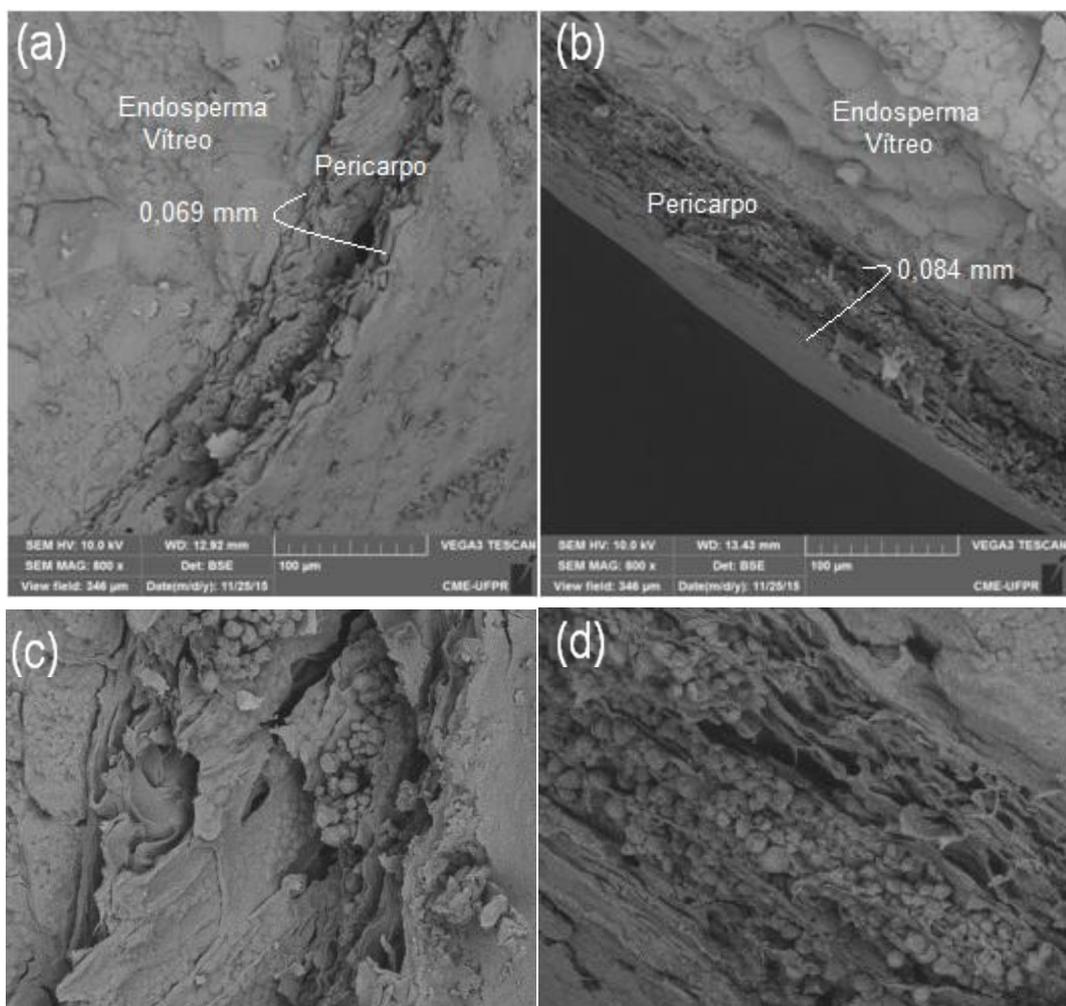


FIGURA 9 – PERICARPO DOS GRÃOS DE SORGO DA CULTIVAR BRS 310 (a) E (c); E BRS 655 (b) E (d).

Nas imagens obtidas dos cortes do grão inteiro (Figuras 6b e 6d) ainda pode ser observada a estrutura do pericarpo, melhor identificada na Figura 9. O pericarpo dos grãos apresentou espessura de 0,069 mm para a cultivar BRS 310 (Figura 9a) e de 0,083 mm para a cultivar BRS 655 (Figura 9b), espessuras próximas que

possivelmente não interferem de modo significativo na absorção de água pelo grão, já que a hidratação ocorre principalmente pelo hilo. Diferente de outros cereais, o pericarpo dos grãos de sorgo contém pequenos grânulos de amido, que podem ser melhor observados nas ampliações da estrutura obtidas nas Figuras 9c (BRS 310) e 9d (BRS 655).

Com a ampliação realizada nas imagens dos grãos cortados (Figuras 6b e 6d) na região do endosperma, é possível observar as diferenças entre o amido presente no vítreo e farináceo dos grãos de sorgo (Figura 10). Os amidos do endosperma vítreo possuem formato de poliedros convexos irregulares e estão densamente envoltos na matriz protéica (Figuras 10c e 10f), enquanto o endosperma farináceo possui formato aproximadamente esférico com pequenas lamínas de proteínas (Figura 10b e 10e). A mesma estrutura foi observada por Hosney, Davis e Harbers (1974) também em grânulos de amido de sorgo.

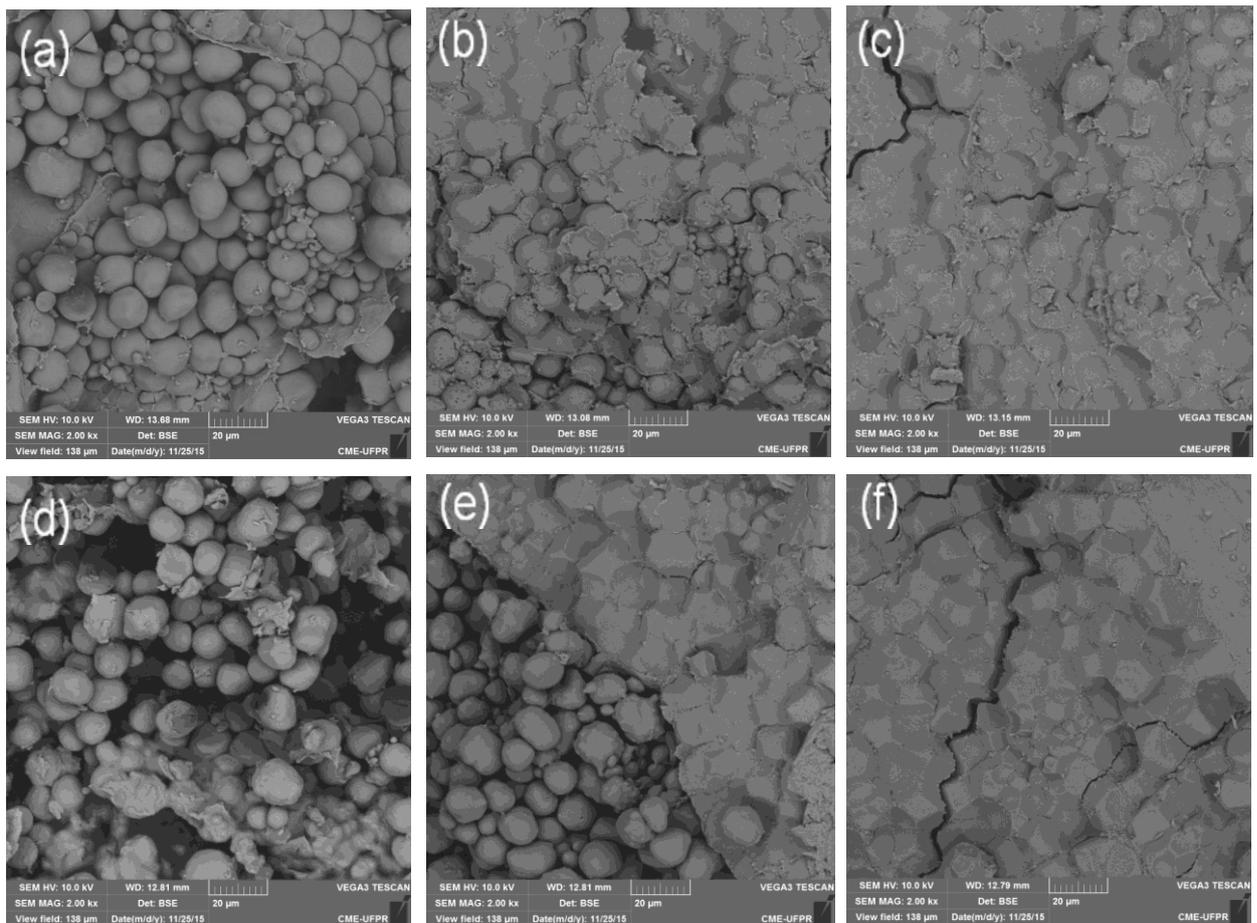


FIGURA 10 – ENDOSPERMA FARINÁCEO DA CULTIVAR BRS 310 (A) E BRS 655 (D); REGIÃO DE TRANSIÇÃO ENTRE ENDOSPERMA FARINÁCEO E ENDOSPERMA VÍTREO PARA A CULTIVAR BRS 310 (B) E BRS 655 (E); ENDOSPERMA VÍTREO PERTENCENTE A CULTIVAR BRS 310 (C) E BRS 655 (F).

Pode-se observar nas Figuras 10b e 10e, a transição do endosperma vítreo para o farináceo dentro do grão. Com as modificações, o grão passa de um estado compacto (endosperma vítreo) para um estado mais livre (endosperma farináceo).

#### 4.3.2 Avaliação Morfológica dos grânulos de amido de sorgo e suas modificações ao longo do processo de hidratação

Nesse item são analisados os grânulos de amido extraídos dos grãos de sorgo após o processo de hidratação em diferentes temperaturas. A Figura 11a é uma aproximação dos grânulos em 200 vezes e a Figura 11b uma aproximação de 500 vezes que confirmam que a metodologia utilizada para a extração dos amidos foi eficiente.

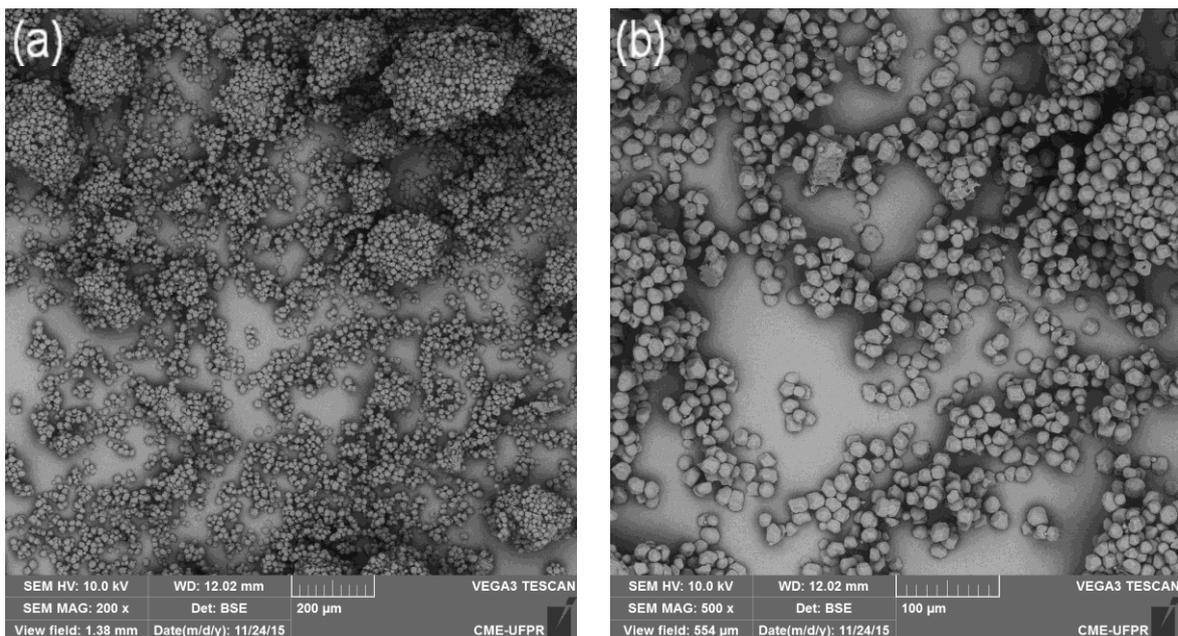


FIGURA 11 – GRÂNULOS DE AMIDO DE SORGO EXTRAÍDOS EM UMA AMPLIAÇÃO DE 200 (a) E 500 VEZES (b).

Os grânulos de amido de sorgo apresentam-se em sua maioria na forma poligonal e esférica com poros e depressões (Figura 12), assim como observado por Ai et al. (2011) e Sing et al. (2010). Segundo Ai et al. (2011), as depressões presentes nos grânulos de amido poligonais, perceptíveis na figura 12b, ocorrem devido aos corpos protéicos localizados entre os grânulos na estrutura do

endosperma vítreo. Já os furos encontrados em alguns grânulos (Figura 12c) provavelmente se devem aos ataques iniciais de enzimas (CLAVER et al. 2010).

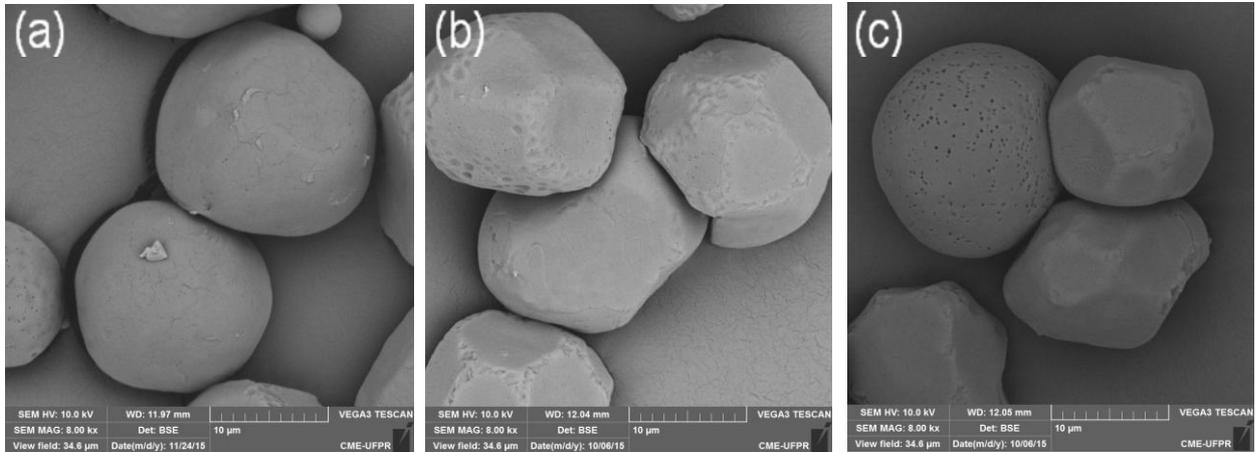


FIGURA 12 – DIFERENTES GRÂNULOS DE SORGO OBTIDOS DAS CULTIVARES BRS 655 (a E b) E BRS 310 (c).

Tamanhos entre 10 e 25 µm foram observados pela análise das imagens de MEV para a cultivar BRS 655 e entre 8 e 23 µm para a cultivar BRS 310. Ai et al. (2011) encontraram diâmetros entre 4 e 35 µm em grânulos de sorgo, enquanto Vallons e Arendt (2009b) encontrou valores entre 2 e 30 µm. A cultivar BRS 655 apresentou tamanhos de grânulos de amido significativamente ( $p < 0,05$ ) maiores do que a cultivar BRS 310 (Tabela 8).

TABELA 8 – VARIAÇÃO NO TAMANHO DOS GRÂNULOS DE AMIDO DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

Temperatura	Tamanho do grânulo (µm)	
	BRS 310	BRS 655
30	16,56±2,02 <sup>a</sup>	17,65±2,68 <sup>a</sup>
40	16,56±2,61 <sup>a</sup>	17,03±2,81 <sup>a</sup>
50	16,29±2,09 <sup>a</sup>	16,85±3,49 <sup>a</sup>
60	16,30±2,71 <sup>a</sup>	16,73±2,57 <sup>a</sup>
Média	16,43±2,37 <sup>B</sup>	17,07±2,91 <sup>A</sup>

Letras minúsculas diferentes na mesma coluna possuem diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as temperaturas para uma mesma cultivar;

Letras maiúsculas diferentes na mesma linha se diferem significativamente ( $p < 0,05$ ) entre as cultivares.

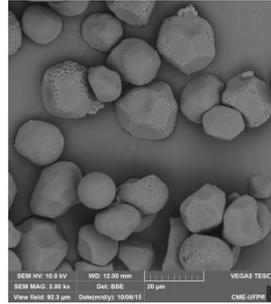
Não houve diferença significativa no tamanho dos grânulos de amido com o aumento da temperatura de processo (Tabela 8), demonstrando que não houve inchaço significativo do grânulo. O possível rompimento de duplas hélices das regiões do grânulo, e as interações entre amilopectina e amilose que teriam aumentado a temperatura de gelatinização e diminuído a entalpia na temperatura de 60 °C como visto no item 4.2.1, parece não ter alterado a estrutura do amido nessa temperatura, o que pode ser confirmado pelas Figuras 13 e 14.

Os grânulos de amido da cultivar BRS 310 são menores ( $p < 0,05$ ) (Tabela 8) e apresentaram maiores temperaturas e entalpia de gelatinização do que a cultivar BRS 655 como visto no item 4.2.1. Um aumento nos valores das propriedades térmicas em grânulos de tamanhos menores também foram observados por Narvaéz-González et al. (2007) em amidos de milho, e Singh e Kaur (2004) também reportaram um aumento na temperatura de gelatinização com a redução do tamanho de grânulos de amidos de batata.

Segundo Li et al. (2013), fatores ambientais podem influenciar o tamanho dos grânulos de amido, com menores grânulos resultantes do cultivo em regiões onde a temperatura é mais alta. No presente trabalho, fica evidente, que como os sorgos BRS 310 e BRS 655 foram cultivados na mesma fazenda e com o mesmo sistema de cultivo, os fatores genéticos é que influenciaram na diferença entre os tamanhos dos grânulos.

Os grânulos de amido submetidos ao processo de hidratação (Figuras 13 e 14) não foram afetados morfológicamente pelo efeito do tempo e temperatura de processo. Embora o efeito da temperatura de gelatinização, entalpia e grau de gelatinização dos amidos foram significativos ( $p < 0,05$ ) com o aumento da temperatura para 60 °C como visto no Item 4.2, nenhuma alteração estrutural pode ser observada a essa temperatura. Isso pode ocorrer porque modificações morfológicas podem não acompanhar os fenômenos que envolvem mudanças nas propriedades térmicas dos grânulos, como ainda não estarem inchados o suficiente para que o aumento do volume seja significativo a essa temperatura, ou ainda, como a quantidade de amidos gelatinizados ainda é pequena, essas modificações estruturais provavelmente não sejam perceptíveis.

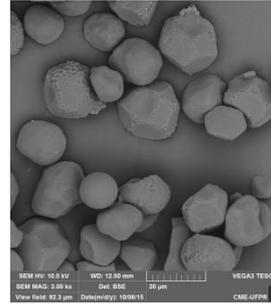
## Amido não tratado



Temperatura (°C)	Tempo de processo (h)		
	4	8	12
30			

FIGURA 13 – AMIDOS DE SORGO EM DIFERENTES TEMPOS E TEMPERATURAS DE HIDRATAÇÃO PERTENCENTES A CULTIVAR BRS 310

## Amido não tratado



Temperatura (°C)	Tempo de processo (h)		
	4	8	12
30			
40			
50			
60			

FIGURA 14 – AMIDOS DE SORGO EM DIFERENTES TEMPOS E TEMPERATURAS DE HIDRATAÇÃO PERTENCENTES A CULTIVAR BRS 655.

#### 4.4 VARIAÇÃO DE VOLUME E DENSIDADE DOS GRÃOS NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

A cultivar BRS 655 apresentou como característica volume inicial maior (0,027 cm<sup>3</sup>) do que a BRS 310 (0,020 cm<sup>3</sup>) por grão.

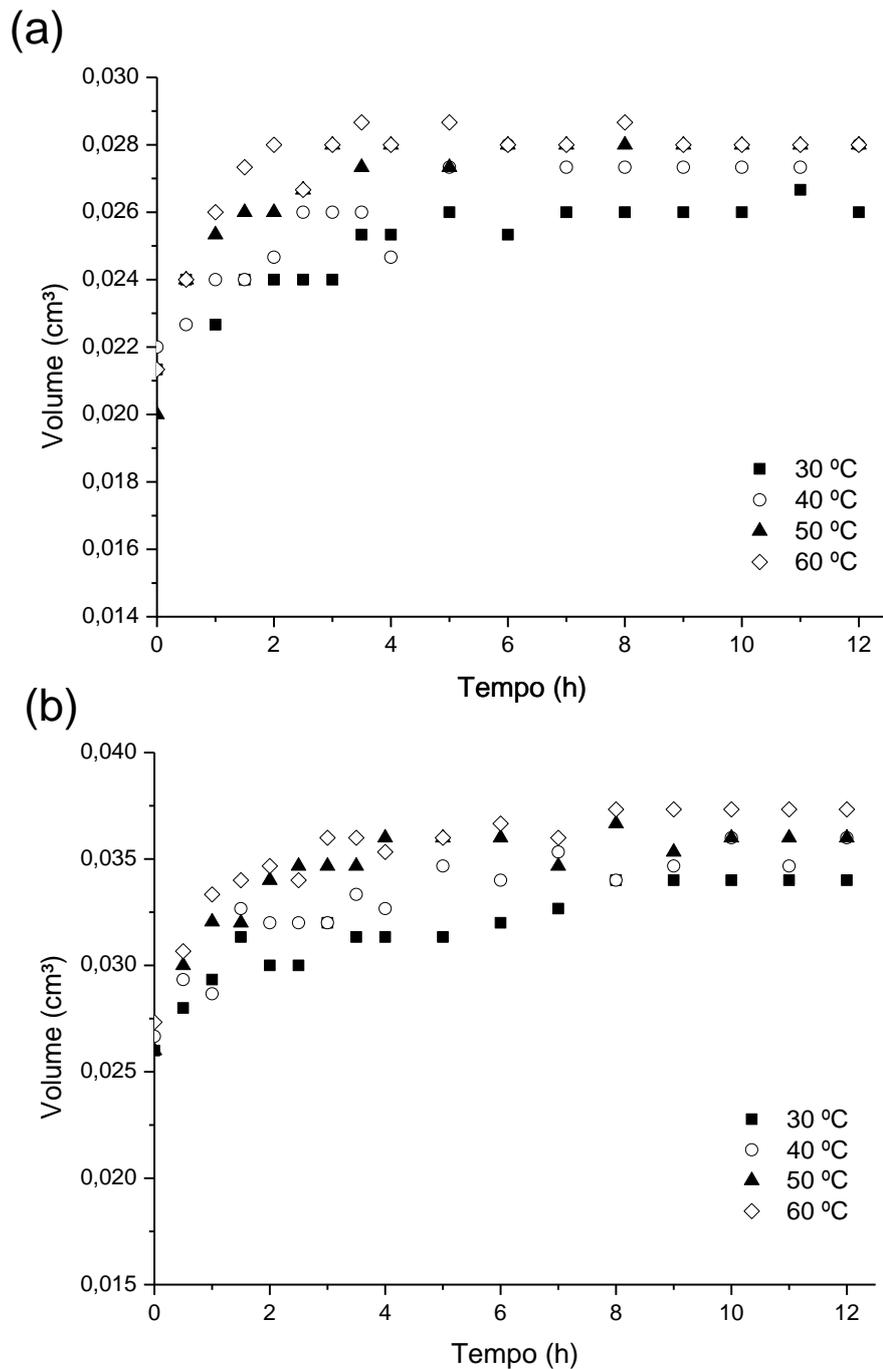


FIGURA 15 – VARIAÇÃO DE VOLUME EM FUNÇÃO DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO PARA A CULTIVAR DE SORGO BRS 310 (a) E A CULTIVAR BRS 655 (b)

Os testes de homogeneidades de variâncias não mostraram diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as variâncias, validando os testes de médias realizados.

Durante o processo de hidratação, o volume dos grãos aumentou, em média, significativamente ( $p < 0,05$ ) com o aumento da temperatura e do tempo para as duas cultivares (Figura 15). Esse aumento ocorre devido à massa de água adquirida ao longo da hidratação, que aumenta em temperaturas mais elevadas (MASKAN, 2001; COUTINHO et al., 2007).

Enquanto a cultivar BRS 310 aumentou, dentre as temperaturas estudadas, aproximadamente entre 20% e 40% em volume, a cultivar BRS 655 obteve um aumento de 60% a 80%. Como a cultivar BRS 655 possui maior volume, provavelmente sua capacidade de absorção de água é maior, o que explicaria um aumento mais expressivo no tamanho do grão.

Em grãos de soja, Coutinho et al. (2005) observaram um aumento de 30% em volume durante a hidratação, enquanto Maskan (2001) relatou modificações de aproximadamente 60% no volume de grãos de trigo. Segundo Xu (2010), muitos grãos e legumes podem chegar a aumentos de mais de 100% e até 200% durante a hidratação.

A densidade dos grãos de sorgo não foi alterada significativamente ( $p < 0,05$ ) pelo tempo e nem mesmo pela temperatura do processo, com uma média de  $1,26 \text{ g/cm}^3$  para a cultivar BRS 655 e  $1,23 \text{ g/cm}^3$  para a BRS 310 (Figura 16). Buffo, Weller e Parkhurst (1998) encontrou uma densidade média próxima em 24 cultivares de sorgo de  $1,34 \text{ g/cm}^3$ .

A invariabilidade da densidade ao longo do processo de hidratação também foi encontrada em grãos de ervilha (OMOTO; ANDRADE; JORGE, 2009) e cevada (MONTANUCI et al., 2015). A variação no volume dos grãos ( $\Delta V$ ) pôde ser relacionado com o ganho de massa de água durante a hidratação ( $m_A$ ), como observado na Tabela 9, com um coeficiente de correlação entre 87% e 97% para a cultivar BRS 310 e entre 87 % e 96% para a cultivar BRS 655. Como o aumento de massa e volume são proporcionais, a densidade absoluta dos grãos e mantém praticamente constante ao longo do processo, e por isso a densidade não se altera significativamente.

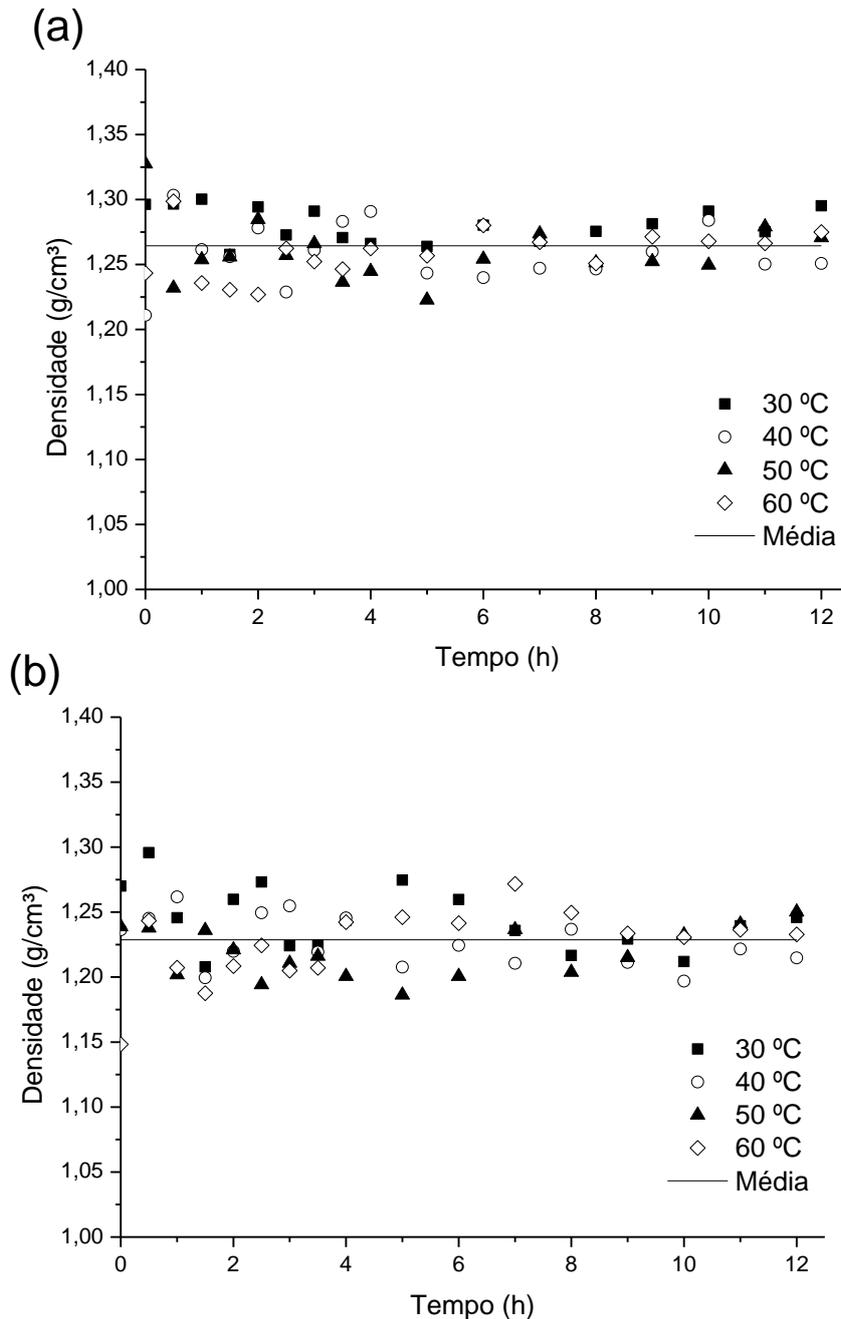


FIGURA 16 – VARIAÇÃO NA DENSIDADE DO SORGO BRS 310 (a) E BRS 655 (b) AO LONGO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

TABELA 9 – EQUAÇÃO QUE RELACIONA O ACÚMULO DE ÁGUA ( $m_A$ ) À VARIAÇÃO DO VOLUME ( $\Delta V$ )

Cultivar	Equação	$R^2$	
BRS 310	30 °C	$\Delta V^* = 0,005 m_A^{**}$	0,895
	40 °C	$\Delta V = 0,006 m_A - 0,001$	0,874
	50 °C	$\Delta V = 0,007 m_A$	0,972
	60 °C	$\Delta V = 0,006 m_A$	0,938
BRS 655	30 °C	$\Delta V = 0,009 m_A$	0,873
	40 °C	$\Delta V = 0,009 m_A - 0,001$	0,878
	50 °C	$\Delta V = 0,009 m_A - 6.10^{-5}$	0,949
	60 °C	$\Delta V = 0,008 m_A$	0,958

$\Delta V^*$  – variação do volume (mL);  $m_A^{**}$  - massa de água acumulada no grão (g).

## 4.5 SÓLIDOS SOLÚVEIS

Os sólidos solúveis lixiviados na água durante o processo de hidratação analisada a cada duas horas são apresentados nas Figuras 17 (BRS 310) e 18 (BRS 655).

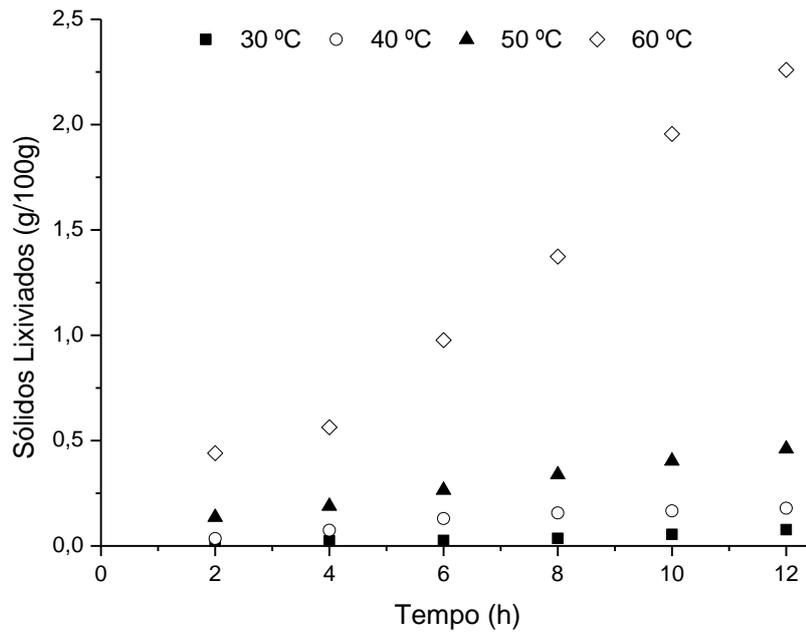


FIGURA 17 – SÓLIDOS SOLÚVEIS PERDIDOS DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DOS GRÃOS DE SORGO DA CULTIVAR BRS 310.

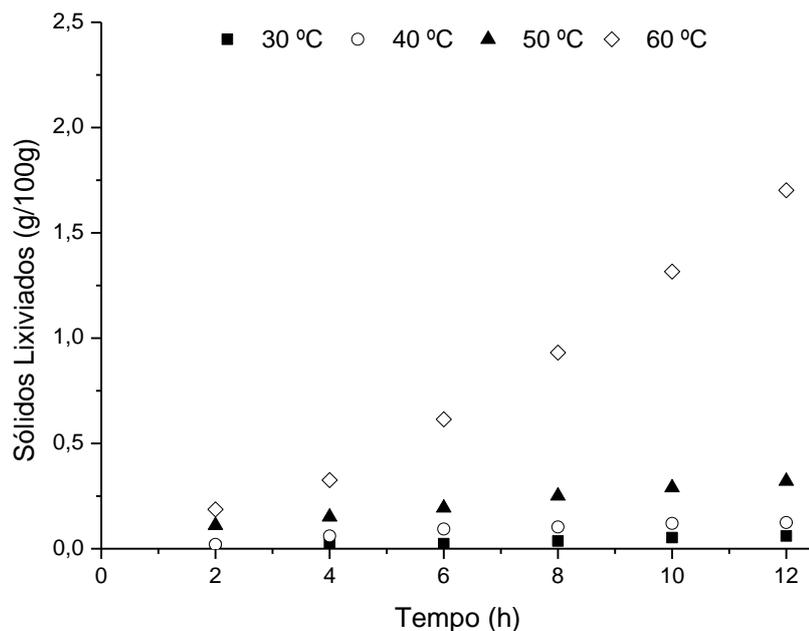


FIGURA 18 – SÓLIDOS SOLÚVEIS PERDIDOS DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DOS GRÃOS DE SORGO DA CULTIVAR BRS 655.

A cultivar BRS 310 apresentou entre 0,02 e 2,26 g/100g de sólidos perdidos durante a hidratação e houve diferença significativa no tempo ( $p < 0,05$ ) para as temperaturas de 30 °C, 50 °C e 60 °C. A 30 °C os sólidos lixiviados foram maiores na 12<sup>a</sup> hora de experimento, enquanto a 50 °C a perda de sólidos aumentou significativamente a cada tempo analisado, e a 60 °C, até a 10<sup>a</sup> hora, houve aumento significativo.

Valores entre 0,01 a 1,70 g/100g de sólidos lixiviados foram observados durante a hidratação da cultivar BRS 655, e o tempo afetou significativamente ( $p < 0,05$ ) esse processo em todas as temperaturas. Na temperatura de 30 °C houve diferença significativa entre todos os tempos, exceto entre a 4<sup>a</sup> e 6<sup>a</sup> hora, e entre a 10<sup>a</sup> e a 12<sup>a</sup> hora, enquanto a 40 °C não houve diferença significativa após a 6<sup>a</sup> hora. As temperaturas de 50 °C e 60 °C apresentaram diferença significativa entre todos os tempos.

Uma maior quantidade de sólidos lixiviados é observada no híbrido BRS 310 do que no BRS 655 ( $p < 0,05$ ). Por possuir grãos vermelhos, a cultivar BRS 310 provavelmente possui maior quantidade de polifenóis totais que são solúveis em água, o que explicaria a maior quantidade de sólidos solúveis.

Somente na temperatura de 60 °C a quantidade de sólidos perdidos pelos grãos foi maior ( $p < 0,05$ ) do que as demais, com grande deslocamento dos dados experimentais nessa temperatura em ambas as cultivares (Figura 17 e 18). Khaezei e Mohammadi (2009) também encontraram um crescimento dos sólidos lixiviados de acordo com o tempo e temperatura de hidratação para grãos de gergilim, com valores similares (de 0,3% a 2,9%) ao deste trabalho para temperaturas entre 27 e 60 °C com 225 minutos de hidratação.

Para manter os grãos intactos e os sólidos perdidos menores do que 1%, a temperatura de hidratação deve ser menor do que 50 °C para ambas as cultivares estudadas. Entretanto a temperatura apresentou efeito significativo na redução do tempo do processo de hidratação (Item 4.6), fato que deve ser levado em consideração na escolha da melhor temperatura para o processo.

## 4.6 CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO

A variação da umidade das amostras de sorgo BRS 310 e BRS 655 durante a hidratação dos grãos em diferentes temperaturas pode ser observada na Figura 19. O comportamento das amostras durante o processo apresentou o mesmo padrão, sem diferença significativa entre as cultivares ( $p > 0,05$ ). No início, ocorreu uma alta taxa de absorção de água, que diminuiu ao longo do tempo com a aproximação da umidade de equilíbrio. Tendência similar tem sido relatada em estudos realizados na hidratação de outros grãos como o trigo (MASKAN, 2001), feijão (ABU-GHANNAM; MCKENNA, 1997), soja (PAN; TANGRATANAVALEE, 2003), milho (BOTELHO et al., 2013), gergelim (KHAZAEI; MOHAMMADI, 2009) e grãos de bico (PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010).

Durante a hidratação, o tempo teve um efeito significativo ( $p < 0,05$ ) na quantidade de água absorvida pelos grãos de sorgo para as duas cultivares. Devido à diferença na velocidade de absorção de água ao longo do processo, este pôde ser dividido em três fases (Figura 19): a primeira fase (fase I) se inicia desde o instante  $t = 0$  até a 1ª hora de hidratação, quando os grãos apresentaram a maior taxa de absorção (entre 0,349 e 0,734 g/h); a fase II se localiza entre a 1ª e a 5ª hora de hidratação com uma taxa de absorção de água moderada, variando de 0,069 e 0,116 g/h; e a terceira e última fase (fase III) vai da 5ª até a 12ª hora de hidratação, e possui a menor taxa de absorção do processo, que variou entre 0,003 e 0,032 g/h para as duas cultivares nas condições estudadas (Tabela 10).

Até a primeira hora da hidratação (fase I), como citado, as cultivares de sorgo apresentaram a maior taxa de absorção de água, período em que os grãos absorveram mais de 74% do total da água adquirida durante o processo. A alta taxa de absorção inicial da fase I ocorre, provavelmente, devido ao fenômeno da capilaridade que acelera a difusão da água no interior do grão na fase inicial da hidratação (FAN; CHU; SHELLENBERGER, 1963).

Nesse período, a estrutura porosa do hilo que contém fissuras e canais, como visto no Item 4.3.1, provavelmente permite uma rápida entrada de água no grão, aumentando a taxa de absorção inicial. Dessa forma, até a completa saturação do hilo e também do pericarpo, a absorção de água é extremamente acelerada (BECKER, 1960; KASHANINEJAD; DEHGHA; KASHIRI, 2009). Além disso, a

difusão inicial de água no interior do grão também é elevada porque o gradiente de concentração e, por conseguinte, a força motriz do processo são maiores (PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010; KASHIRI; GARMAKHANY; DEGHANI, 2012).

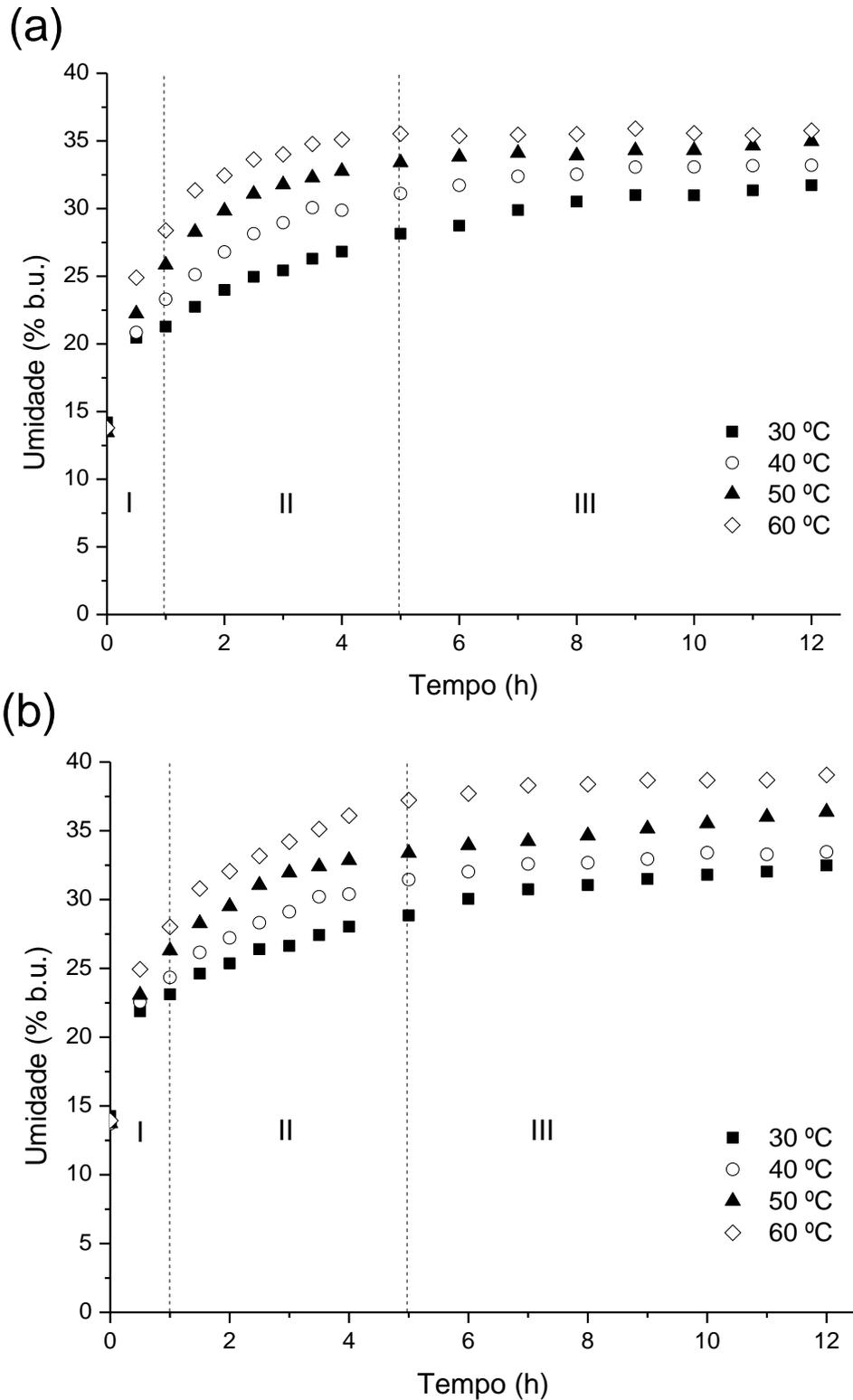


FIGURA 19 – ABSORÇÃO DE ÁGUA NA CULTIVAR DE SORGO BRS 310 (a) E BRS 655 (b), NAS FASES I, II E III AO LONGO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO A DIFERENTES TEMPERATURAS

TABELA 10 – TAXA DE ABSORÇÃO EM DIFERENTES FASES DA HIDRATAÇÃO, UMIDADE ABSORVIDA E UMIDADE DE EQUILÍBRIO NAS TEMPERATURAS ESTUDADAS

Cultivar	Temperatura	T.A.*	T.A.*	T.A.*	T.A.*	Me (%b.u.)
		(g/h) Fase I <sup>1</sup>	(g/h) Fase II <sup>2</sup>	(g/h) Fase III <sup>3</sup>	Media (g/h)	
BRS 310	30 °C	0,349	0,085	0,032	0,076	31,73±0,36 <sup>dB</sup>
	40 °C	0,482	0,098	0,015	0,082	33,20±0,85 <sup>CA</sup>
	50 °C	0,622	0,096	0,012	0,090	34,97±0,32 <sup>bB</sup>
	60 °C	0,734	0,089	0,003	0,092	35,59±0,17 <sup>aB</sup>
BRS655	30 °C	0,444	0,069	0,026	0,075	32,48±0,41 <sup>dA</sup>
	40 °C	0,564	0,082	0,015	0,083	33,46±0,31 <sup>CA</sup>
	50 °C	0,630	0,089	0,022	0,095	36,37±0,20 <sup>bA</sup>
	60 °C	0,704	0,116	0,013	0,105	39,05±0,62 <sup>aA</sup>

\*T.A.: Taxa de absorção de água; <sup>1</sup> Período correspondente à 1ª hora de hidratação; <sup>2</sup> Período entre a 1ª e a 5ª hora de hidratação; <sup>3</sup> Período entre 5ª e 12ª hora de hidratação.

Letras minúsculas diferentes na mesma coluna possuem diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as temperaturas para uma mesma cultivar;

Letras maiúsculas diferentes na mesma coluna possuem diferença significativa ( $p < 0,05$ ) entre as cultivares para uma mesma temperatura.

Na fase II, os grãos de sorgo absorveram entre 10 e 18% da quantidade total de água adquirida na hidratação. A queda na taxa de absorção de água, de mais de quatro vezes se comparada à primeira fase, foi responsável pela redução da quantidade de água absorvida (Figura 19). Esse fato se deve às fissuras do grão que se saturam ao longo do processo, reduzindo o efeito da capilaridade, e ao aumento da concentração de água no interior do grão, resultando na redução do gradiente de concentração e, por conseguinte, da taxa de difusão de água no grão (KASHANINEJAD; DEHGHA; KASHIRI, 2009; PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010; KASHIRI; GARMAKHANY; DEGHANI, 2012).

À medida que a umidade de equilíbrio se aproxima e o processo de hidratação chega à fase III, a força motriz da difusão diminui ainda mais e a taxa de absorção dos grãos de sorgo torna-se mínima, indicando uma queda acentuada na absorção de água (KASHANINEJAD; DEHGHA; KASHIRI, 2009; KASHIRI; GARMAKHANY; DEGHANI, 2012). Assim, os grãos de sorgo absorveram, em média, pouco mais de 2% do total de água adquirida durante o processo na fase III.

As cultivares BRS 310 e BRS 655 absorveram mais água em temperaturas mais elevadas durante a hidratação ( $p < 0,005$ ), comportamento também observado em outros trabalhos (PAN; TANGRATANAVALEE, 2003; RESENDE; CORRÊA, 2007; KHAZAEI; MOHAMMADI, 2009; MONTANUCI et al., 2013). Esse fato ocorre

porque o aumento da temperatura expande e amacia o grão, aumentando sua taxa de hidratação (AHROMRIT et al., 2006; KASHANINEJAD; DEHGHA; KASHIRI, 2009).

Como apresentado na Tabela 9, o aumento da temperatura elevou a taxa de absorção de água principalmente na fase I, onde a maior quantidade da umidade é adquirida pelo grão, além de aumentar significativamente ( $p < 0,05$ ) a umidade de equilíbrio das cultivares de sorgo. Trabalhos similares tem encontrado o mesmo comportamento, como o realizado por Kashaninejad et al. (2007) e Oliveira et al. (2013) em grãos de arroz.

Observando a interferência da temperatura na hidratação, verifica-se que o tempo de processo pode ser reduzido em temperaturas mais elevadas (KASHANINEJAD; GEHGHA; KASHIRI, 2009), que também são indicadas para aumentar a umidade de equilíbrio dos grãos de sorgo estudados. Dessa forma, o monitoramento da temperatura na água de hidratação é de extrema importância para o controle da capacidade de absorção de água e da taxa de absorção de água durante o processo de hidratação das cultivares de sorgo BRS 310 e BRS 655 (SOPADE; AJISEGIRI; BADAU, 1992).

Avaliando diferenças entre as cultivares, a amostra BRS 655 obteve maior umidade de equilíbrio do que a BRS 310 ( $p < 0,05$ ) nas temperaturas de 30 °C, 50 °C e 60 °C, demonstrando, assim, uma maior capacidade de absorção de água. O maior volume da cultivar BRS 655, observado no Item 4.4, pode ser um dos responsáveis por sua maior capacidade de absorção de água. Além disso, a composição química também parece afetar esse fenômeno. Uma maior quantidade de proteínas e menor quantidade de carboidratos, que sugere menor teor de amido, encontrados na cultivar BRS 655 favorecem a absorção de água em relação a cultivar BRS 310 (BUFFO; WELLER; PARKHURST, 1998; SOPADE; AJISEGIRI; BADAU, 1992)

Assim, em relação à cinética estudada, a utilização da cultivar BRS 655 hidratada na temperatura de 60 °C é a mais adequada em processos onde o grão de sorgo precisa obter altos níveis de umidade após a hidratação. Na malteação, por exemplo, estudos apontam que após a etapa hidratação, grãos de sorgo chegam a umidades próximas a 33% e 36%, porém, níveis maiores são desejados para que as enzimas hidrolisem com maior facilidade os grânulos de amido, liberando mais açúcares fermentáveis (AGU; PALMER, 1998).

## 4.7 MODELAGEM DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO

Nesse tópico são apresentados os parâmetros obtidos dos modelos utilizados (Peleg, Page, Difusão e Omoto), o nível de ajuste dos modelos gerados, o desenvolvimento de modelos generalizados a partir dos melhores modelos e, por fim, a energia de ativação do processo de hidratação obtida por meio do coeficiente de difusão efetivo.

### 4.2.1 Parâmetros dos modelos

#### 4.2.1.1 Modelo de Peleg

Os parâmetros  $k_1$  e  $k_2$  do modelo de Peleg (Equação 7) são apresentados na Tabela 11 para cada temperatura estudada.

TABELA 11 – PARÂMETROS DO MODELO DE PELEG

Cultivar	Temperatura (°C)	$k_1$ (h.%b.u <sup>-1</sup> )	$k_2$ (%b.u <sup>-1</sup> )
BRS 310	30	0,101±0,007	0,049±0,001
	40	0,056±0,002	0,046±0,001
	50	0,034±0,001	0,044±0,001
	60	0,017±0,002	0,043±0,001
BRS 655	30	0,077±0,006	0,049±0,001
	40	0,049±0,003	0,046±0,001
	50	0,041±0,003	0,041±0,001
	60	0,033±0,002	0,037±0,001

A constante  $k_2$  variou entre 0,037 e 0,049 % b.u.<sup>-1</sup> para as duas cultivares de sorgo, e se mostrou função da temperatura, resultado encontrado também por outros autores (ABU-GHANNAM; MCKENNA, 1997; TURHAN; SAYAR; GUNASEKARAN, 2002; PAN; TANGRATANAVALEE, 2003; KASHIRI; KASHANINEJAD; AGHAJANI, 2010), enquanto algumas pesquisas tem observado valores de  $k_2$  independentes da temperatura (SOPADE; AJISEGIRI; BADAU, 1992; MASKAN, 2002; BADAU; NKAMA; JIDEANI, 2005).

Segundo Resende e Corrêa (2007), a constante  $k_2$  está inversamente relacionada com a capacidade de absorção de água do grão, ou seja, quanto menor seu valor, maior é sua capacidade (SOPADE; AJISEGIRI; BADAU, 1992). Dessa forma, a redução do parâmetro  $k_2$  com o aumento da temperatura, indica que a capacidade de absorção de água dos grãos de sorgo estudados aumentou nessas condições, corroborando com o aumento significativo ( $p < 0,05$ ) da umidade de equilíbrio em temperaturas mais elevadas (Tabela 9).

Valores de  $k_2$  entre 0,0100 e 0,0147 %b.u<sup>-1</sup> foram encontrados por Badau, Nkama e Jideani (2005), enquanto Kashiri, Kashaninejad e Aghajani (2010) encontraram valores entre 0,0206 e 0,0246 %b.u<sup>-1</sup> e Sopade, Ajisegiri e Badau (1992) de 0,0102 a 0,0115 %b.u<sup>-1</sup> na hidratação de grãos de sorgo usando o modelo de Peleg. Isso mostra uma maior capacidade de absorção de água das cultivares BRS 310 e BRS 655 em relação às cultivares de sorgo encontradas na literatura.

O parâmetro  $k_1$  se relaciona inversamente com a taxa de absorção de água do grão (MONTANUCI et al., 2013), e seu valor também diminuiu com o aumento da temperatura nos grãos de sorgo, evidenciando o aumento na taxa de absorção nessas condições, comportamento também observado em outros trabalhos com o mesmo parâmetro (MASKAN, 2002; BADAU; NKAMA; JIDEANI, 2005; YILDIRIM; ÖNER; BAYRAM, 2010). Os valores passaram de 0,101 para 0,017 h.%b.u<sup>-1</sup> na cultivar BRS 310 da menor para a maior temperatura, enquanto na cultivar BRS 655 foram de 0,077 a 0,033 h.%b.u<sup>-1</sup> na temperatura de 30 °C e 60 °C, respectivamente.

Valores de  $k_1$  menores encontrados para o processo de hidratação de grãos de sorgo por Badau, Nkama e Jideani (2005) (entre 0,009 %b.u. e 0,029 %b.u. e maiores por Kashiri, Garmakhany e Dehghani (2012) (de 0,0095 a 0,118 %b.u.) entre as temperaturas de 10 °C e 50 °C, revelando taxas de absorção de água intermediárias em relação às observadas nas cultivares BRS 310 e BRS 655.

#### 4.2.1.2 Modelo de Page

No modelo de Page, seus parâmetros  $k_p$  e  $N$  (Equação 9) são apresentados na Tabela 12 para as diferentes temperaturas de hidratação dos grãos de sorgo.

O parâmetro  $k_p$  está relacionado diretamente à taxa de hidratação do grão, e aumentou com o aumento da temperatura, passando de  $0,530 \text{ h}^{-1}$  em  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  para  $1,182 \text{ h}^{-1}$  em  $60 \text{ }^\circ\text{C}$  para a cultivar BRS 310, e de  $0,655$  para  $0,833 \text{ h}^{-1}$  nas temperaturas de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  e  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ , respectivamente, para a cultivar BRS 655. Esse comportamento também foi observado por Kashaninejad et al. (2007) em grãos de arroz com o mesmo modelo e ocorre devido ao aumento da taxa de absorção do grão com o aumento da temperatura.

TABELA 12 – PARÂMETROS DO MODELO DE PAGE

Cultivar	Temperatura ( $^\circ\text{C}$ )	$k_p$ ( $\text{h}^{-1}$ )	N
BRS 310	30	$0,530 \pm 0,070$	$0,738 \pm 0,0445$
	40	$0,658 \pm 0,065$	$0,836 \pm 0,042$
	50	$0,892 \pm 0,030$	$0,640 \pm 0,019$
	60	$1,181 \pm 0,079$	$0,789 \pm 0,053$
BRS 655	30	$0,655 \pm 0,060$	$0,641 \pm 0,038$
	40	$0,785 \pm 0,042$	$0,680 \pm 0,028$
	50	$0,803 \pm 0,032$	$0,602 \pm 0,021$
	60	$0,833 \pm 0,030$	$0,695 \pm 0,019$

Por outro lado, o parâmetro N não variou proporcionalmente com a mudança da temperatura, aumentando de  $30 \text{ }^\circ\text{C}$  para  $40 \text{ }^\circ\text{C}$ , diminuindo em  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  e aumentando novamente em  $60 \text{ }^\circ\text{C}$ . Fato observado também por Kashiri, Garmakhany e Dehghani (2012) na hidratação de grãos de sorgo, que encontrou valores para a constante N semelhantes (entre  $0,466$  e  $0,606$ ).

#### 4.2.1.3 Modelo de difusão

O coeficiente de difusão efetivo,  $D_{ef}$ , único parâmetro obtido a partir do modelo de difusão (Equação 2), para as cultivares BRS 310 e BRS 655 nas diferentes temperaturas estudadas, pode ser observado na Tabela 13.

O  $D_{ef}$  aumentou com o aumento da temperatura para a cultivar BRS 310, assim como observado em trabalhos com soja (Gowen et al., 2007), arroz (KASHANINEJAD et al., 2007) e grãos de bico (PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010). Porém, para a cultivar BRS 655 seu valor caiu de  $40 \text{ }^\circ\text{C}$  para  $50 \text{ }^\circ\text{C}$ , como relatado

por Thakur e Gupta (2006) em grãos de arroz integral e Montanuci (2014) em cevada.

TABELA 13 – PARÂMETRO DO MODELO DE DIFUSÃO

Cultivar	Temperatura (°C)	$D_{ef}$ ( $10^{-11}$ m <sup>2</sup> /s)
BRS 310	30	2,017±0,008
	40	3,098±0,010
	50	4,113±0,015
	60	6,342±0,025
BRS 655	30	2,755±0,012
	40	3,907±0,012
	50	3,802±0,015
	60	4,387±0,120

Os coeficientes de difusão encontrados variaram entre  $2,017 \cdot 10^{-11}$  e  $6,342 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s para a cultivar BRS 310 e entre  $2,755 \cdot 10^{-11}$  e  $4,387 \cdot 10^{-11}$  m<sup>2</sup>/s para a cultivar BRS 655. Valores menores de  $D_{ef}$  foram encontrados em cevada, entre  $4,60 \cdot 10^{-12}$  e  $19,20 \cdot 10^{-12}$  por Montanuci (2014) e Mayolle (2012) em temperaturas entre 10 °C e 35 °C, e em grãos de sorgo por Kashiri, Kashaninejad e Aghajani (2010) (entre  $2,22 \cdot 10^{-12}$  e  $8,32 \cdot 10^{-12}$  m<sup>2</sup>/s) em temperaturas de hidratação entre 10 °C e 50 °C. Esse fato revela que as cultivares de sorgo BRS 310 e BRS 655 possuem coeficientes de difusão maiores, e por isso a difusão de água no interior dos grãos ocorre de forma mais rápida durante a hidratação em relação às pesquisas citadas. Por outro lado, essa diferença provavelmente se deve às menores temperaturas de hidratação utilizadas na literatura que diminuem o coeficiente de difusão do processo (KASHANINEJAD, DEHGHA; KASHIRI, 2009).

#### 4.2.1.4 Modelo de Omoto

No modelo fenomenológico de parâmetros concentrados de Omoto, o coeficiente de transferência de massa,  $K_s$  (Equação 6) é apresentado pela Tabela 14 para as diferentes temperaturas estudadas.

Seu valor aumentou com o aumento da temperatura entre 30 °C e 40 °C e entre 40 °C e 60 °C, porém, apresentou queda da temperatura de 40 °C para 50 °C.

Por outro lado, no estudo da hidratação de grãos de ervilha realizado por Omoto, Andrade e Jorge (2009), o parâmetro  $K_s$  aumentou com o aumento da temperatura, e comportamento similar foi observado com coeficiente de transferência de massa aparente por Coutinho et al. (2007) e Coutinho et al. (2005) na hidratação de grãos de soja.

Neste trabalho, a falta de relação entre a temperatura de hidratação e a constante  $K_s$  provavelmente se deve aos desvios observados no modelo (Item 4.2.2 - Tabela 14). O principal fator que pode contribuir para a falta de ajuste dessa equação, é que o modelo desenvolvido por Omoto, Andrade e Jorge (2009), além negligenciar a variação de volume ao longo do tempo durante a hidratação que se mostrou significativa ( $p < 0,05$ ) (Item 4.3), é desenvolvido a partir de etapas fundamentais da transferência de massa por convecção. Porém, o processo de hidratação dos grãos, principalmente sem agitação (realizado experimentalmente) é controlado pelo fenômeno de difusão e não por convecção e, por isso, provavelmente o modelo de Omoto não consegue descrever o processo de hidratação dos grãos de sorgo com ajustes satisfatórios.

TABELA 14 – PARÂMETRO DO MODELO DE OMOTO

Cultivar	Temperatura (°C)	$K_s$ ( $10^{-4}$ cm.min <sup>-1</sup> )
BRS 310	30	3,018±0,001
	40	4,893±0,001
	50	4,329±0,001
	60	6,845±0,001
BRS 655	30	3,265±0,001
	40	4,636±0,001
	50	4,026±0,001
	60	4,739±0,001

#### 4.2.2 Nível de ajuste dos modelos

Os modelos obtidos, por meio dos parâmetros encontrados em cada equação para a cultivar BRS 310 (Figura 20) e BRS 655 (Figura 21) (Item 4.2.1),

apresentaram níveis de ajuste em relação ao  $R^2$ , SE, RMSE e P que podem ser observados na Tabela 15.

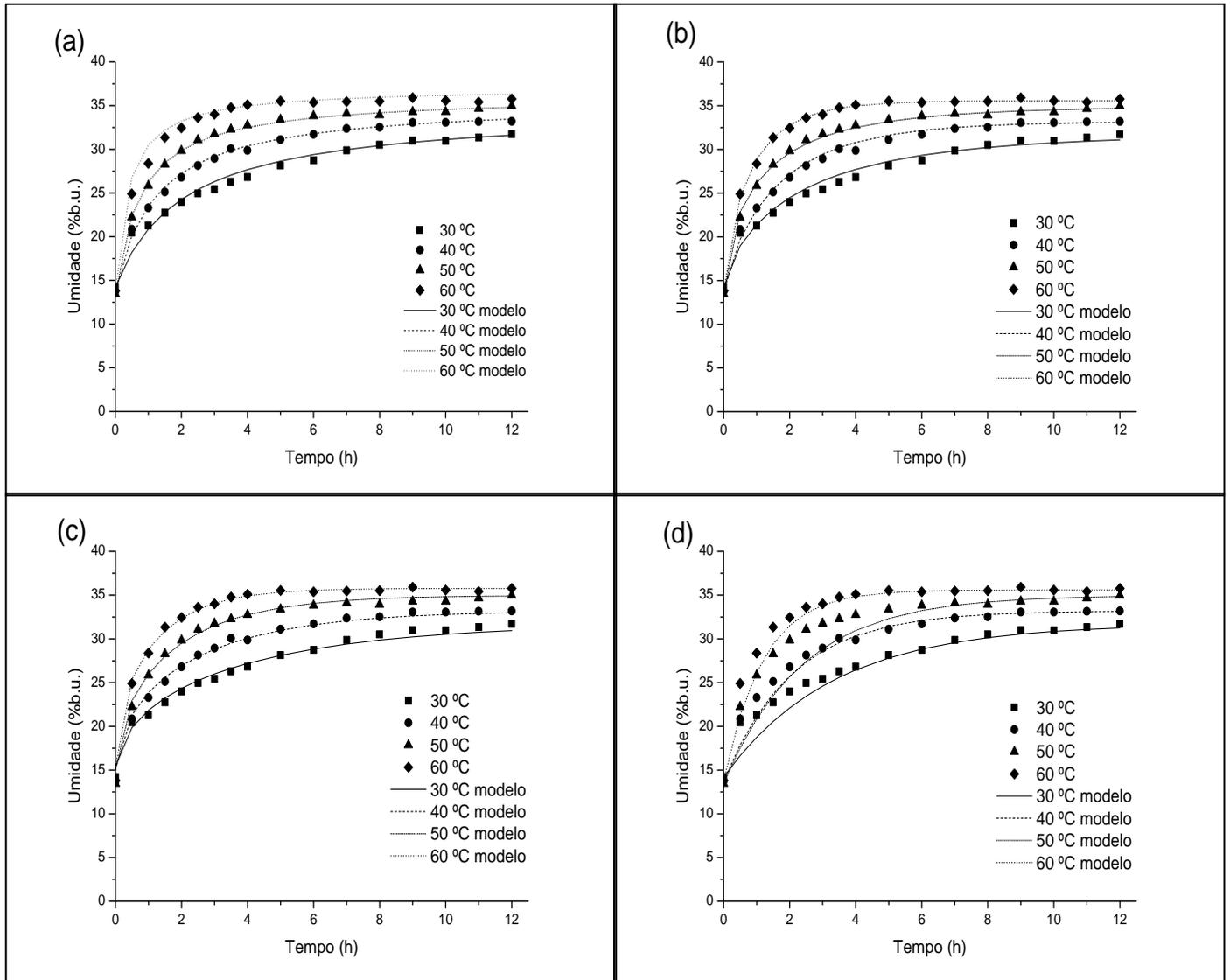


FIGURA 20 – DADOS EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO DA CULTIVAR DE SORGO BRS 310 E PREDIÇÃO DOS MODELOS DE PELEG (a), PAGE (b), DIFUSÃO (c) E OMOTO (d) NAS TEMPERATURAS ESTUDADAS.

Na verificação da qualidade de ajuste dos modelos, um dos fatores importantes é o coeficiente de determinação ( $R^2$ ) que indica o quanto o modelo foi capaz de explicar o processo. O modelo empírico de Peleg obteve o maior coeficiente de determinação dentre os demais modelos com valores entre 99,2% e 99,9% para as duas cultivares. Kashiri, Kashaninjead e Aghajani et al. (2010) encontraram valores de  $R^2$  que variaram de 99,8% a 99,9% na modelagem da hidratação de grãos de sorgo em temperaturas entre 10 °C e 50 °C com a equação

de Peleg, enquanto valores que variaram de 99,1% a 99,9 % e de 99,6% a 99,9% foram encontrados por Sopade, Ajisegiri e Badau (1992) e Badau, Nkama e Jideani (2005), respectivamente, também para grãos de sorgo nas mesmas condições.

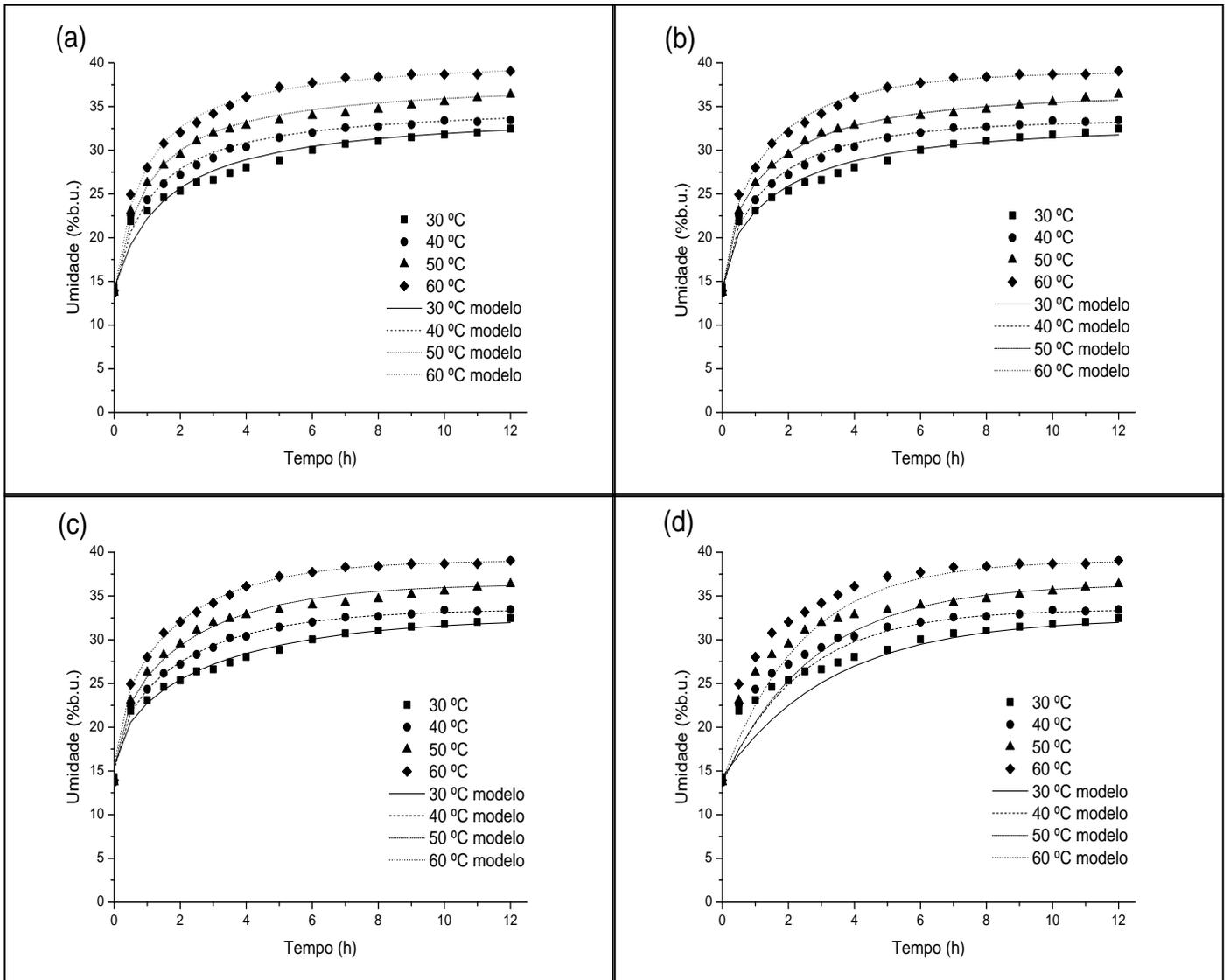


FIGURA 21 – DADOS EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO DA CULTIVAR DE SORGO BRS 655 E PREDIÇÃO PELOS MODELOS DE PELEG (a), PAGE (b), DIFUSÃO (c) E OMOTO (d) NAS TEMPERATURAS ESTUDADAS.

Valores de  $R^2$  do modelo de Omoto foram os mais baixos dentre as duas cultivares ( $81,5 \leq R^2 \leq 98,2\%$ ), enquanto Marques (2014) encontrou valores entre 99,7% e 99,8% para grãos de milho com o mesmo modelo. No modelo de Page, o coeficiente de determinação variou entre 95,4% e 99,0%. Aplicando o mesmo modelo, outros estudos realizados com grãos observaram valores de  $R^2$  entre 99,3% e 99,5% para sorgo (KASHIRI; GARMAKHANY; DEGHANI, 2012), entre 95,7% e

99,6% para trigo (KASHANINEJAD; DEHGHA; KASHIRI, 2009) e em grãos de arroz de 93,7% a 99,1% (KASHANINEJAD et al., 2007).

TABELA 15 – PARÂMETROS DE AJUSTE DOS MODELOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA

Modelo	Cultivar	Temperatura (°C)	SE (%b.u.)	P (%)	RMSE (%)	R <sup>2</sup> (%)
Peleg	BRS 310	30	0,75	1,87	3,16	99,2
		40	0,35	0,93	1,33	99,9
		50	0,23	0,61	0,72	99,9
		60	0,87	1,88	2,88	99,9
	BRS 655	30	0,91	2,30	3,64	99,4
		40	0,61	1,34	2,35	99,9
		50	0,57	1,37	1,83	99,8
		60	0,48	1,01	1,57	99,9
Page	BRS 310	30	0,68	2,05	2,64	95,4
		40	0,48	1,24	1,78	96,8
		50	0,29	0,77	0,98	98,8
		60	0,24	0,52	0,75	97,4
	BRS 655	30	0,65	1,75	2,36	95,5
		40	0,46	1,11	1,68	97,9
		50	0,30	0,64	0,81	98,5
		60	0,40	0,82	1,25	99,0
Difusão	BRS 310	30	0,60	2,15	2,81	98,4
		40	0,48	1,57	2,71	99,2
		50	0,52	1,59	2,98	99,1
		60	0,47	1,32	2,84	99,3
	BRS 655	30	0,56	1,72	2,85	98,6
		40	0,44	1,21	2,69	99,3
		50	0,66	2,00	3,22	98,7
		60	0,49	1,21	3,14	99,5
Omoto	BRS 310	30	1,86	4,08	6,45	98,2
		40	1,34	2,63	4,56	96,5
		50	3,44	6,68	9,75	81,5
		60	1,52	2,29	4,38	90,7
	BRS 655	30	2,74	5,93	9,04	96,6
		40	2,44	4,70	7,92	96,4
		50	3,64	7,15	10,69	87,0
		60	3,52	6,29	9,75	93,3

O modelo de Difusão obteve valores de  $R^2$  maiores (entre 98,4 e 99,5%) do que o modelo de Page, similares aos encontrados por Thakur e Gupta (2006) na hidratação de grãos de arroz ( $94,7 \leq R^2 \leq 99,9\%$ ) e por Yildirim, Öner e Bayram (2011) em grãos de bico ( $98,9 \leq R^2 \leq 99,6\%$ ) com o mesmo modelo.

Em relação ao  $R^2$ , os modelos se mostraram razoavelmente adequados, já que de um modo geral, representaram de 81,5% a 99,9% do processo de hidratação dos grãos de sorgo, nas condições estudadas. Porém, esse parâmetro não é suficiente para verificar o ajuste dos modelos. Demais análises se fazem necessárias a fim de identificar os desvios registrados entre a umidade real do processo e a umidade prevista por cada modelo. Para esse fim, o erro padrão da estimativa (SE), o erro médio relativo (P) e a raiz quadrada do erro médio quadrático (RMSE) foram calculados (RESENDE; CORRÊA, 2007; KHAZAEI; MOHAMMADI, 2009; PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010).

O erro padrão da estimativa (SE) se mostrou maior no modelo de Omoto ( $1,34 \leq SE \leq 3,64$  %b.u.). No modelo de Page, o SE variou entre 0,24 a 0,68% %b.u., enquanto o modelo de Peleg apresentou SE entre 0,23 e 0,91 %b.u. e no modelo de Difusão variou entre 0,44 e 0,6 %b.u.

O modelo de Page obteve o menor SE nas temperaturas de 30 °C, 40 °C e 60 °C para a cultivar BRS 655, enquanto o modelo de Difusão obteve o menor valor a 50 °C. Para a cultivar BRS 310, um menor SE foi encontrado para o modelo de Peleg nas temperaturas de 40 °C e 50 °C, enquanto o modelo de Difusão obteve o menor SE a 30 °C e o modelo de Page a 60 °C. Valores similares de SE foram encontrados por Resende e Corrêa (2007) (entre 0,53 e 1,47% b.u.) em grãos de feijão e por Botelho et al. (2013) (de 0,85 a 1,79% b.u.) em grãos de milho, aplicando o modelo de Peleg.

O mesmo comportamento foi observado no RMSE dos modelos. O maior valor de RMSE foi observado no modelo de Omoto ( $4,56 \leq RMSE \leq 10,69\%$ ). Valores entre 0,72% a 3,64% foram obtidos para o modelo de Peleg, de 0,81% a 2,64%, para o modelo de Page e entre 2,29% e 3,33% para o modelo de difusão. Um menor RMSE foi observado para o modelo de Page em todas as condições estudadas na cultivar BRS 655 e nas temperaturas entre 30 °C e 60 °C para a cultivar BRS 310, enquanto o modelo de Peleg obteve a menor RMSE nas demais temperaturas (40 °C e 50 °C).

Valores de RMSE semelhantes ao deste trabalho foram observados na modelagem da hidratação com a equação de Peleg em grãos de gergelim por Khazaei e Mohammadi (2009) (entre 1,40% a 2,27%) e com a equação de Page por Kashiri, Garmakhani e Gehghani (2012) ( $0,77 \leq \text{RMSE} \leq 1,97\%$ ) na hidratação de grãos de sorgo. Yldirim et al. (2011) encontraram valores de RMSE entre 2,70% e 8,93% para grãos de bico, enquanto Bello et al. (2004) encontraram valores entre 0,6% e 2,2% na hidratação de arroz com o modelo de Difusão.

Para o erro médio relativo (P), novamente o modelo de Omoto obteve os maiores desvios ( $2,63 \leq P \leq 7,15\%$ ). Valores ainda maiores foram encontrados em estudos com grãos de arroz realizados por Kashaninejad et al. (2007) com o modelo Exponencial ( $25,16 \leq P \leq 51,85\%$ ). No presente trabalho, valores de P para o modelo de Page variaram entre 0,52% e 2,55%, similares aos encontrados no modelo de Peleg ( $0,614 \leq P \leq 2,297\%$ ) e no modelo de difusão ( $1,21 \leq P \leq 2,15\%$ ). O modelo de Peleg obteve os menores valores de P a 30 °C, 40 °C e 50 °C, enquanto o modelo de Page obteve o menor valor a 60 °C para a cultivar BRS 310. Por outro lado, para a cultivar BRS 655, os menores valores de P foram encontrados para o modelo de Page a 40 °C, 50 °C e 60 °C e a 30 °C o modelo de Difusão obteve o menor desvio.

Resende e Corrêa (2007) encontraram valores de P entre 0,38% e 0,93% modelando a hidratação de grãos de feijão com a equação de Peleg, enquanto valores maiores para o modelo de Page foram observados por Kashaninejad et al. (2007) ( $8,41 \leq P \leq 25,2\%$ ) em grãos de arroz. Em estudo posterior, valores semelhantes (entre 0,66 e 4,62%) foram obtidos em grãos de trigo também com o modelo de Page (KASHANINEJAD; DEHGHA; KASHIRI, 2009).

#### 4.2.3 Avaliação dos modelos

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 RMSE menor do que 5% (KAYMAK-ERTEKIN; SULTANOGLU, 2001; MAIORANO et al., 2010; BOTELHO et al., 2013; RESIO; AGUERRE; SUARÉZ, 2003; KHAZAEI; MOHAMMADI, 2009). Além disso, quando P é menor do que 5%, é atribuído um ótimo ajuste ao modelo (LOMAURO; BAKSHI; LABUZA, 1985).

Dessa forma, o modelo de Omoto não foi considerado adequado para descrever o processo de absorção de água dos grãos de sorgo BRS 310 e BRS 655, já que apresentou valores de RMSE maiores do que 5%, os menores coeficientes de determinação e os maiores erros dentre os demais modelos. Como citado no Item 4.2.1.4, o modelo de Omoto foi desenvolvido com base em etapas fundamentais da transferência de massa por convecção, mas o processo de hidratação dos grãos realizado experimentalmente não possui, ao menos, agitação. Dessa forma, a hipótese de que o processo seja controlado pela convecção ao invés da difusão não é coerente e, provavelmente por isso, o modelo de Omoto obteve desvios tão grandes em relação aos demais modelos.

Por outro lado, os modelos de Peleg, Page e de Difusão conseguiram prever com bons ajustes o processo de hidratação para as cultivares de sorgo estudadas, por obterem valores de P e RMSE menores do que 5% (KAYMAK-ERTEKIN; SULTANOGLU, 2001; MAIORANO; MANCINI; REYNER, 2010). Para a escolha do modelo mais adequado é levado em consideração aquele que contém o maior coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e os menores valores de SE, P e RMSE (KASHANINEJAD et al., 2007; PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010; BOTELHO et al., 2013; CHARNET et al., 2008).

O modelo de Peleg apresentou os maiores valores de  $R^2$  para as duas cultivares, enquanto os modelos de Page, Peleg e Difusão apresentaram menores SE, RMSE ou P em determinadas temperaturas. Dessa forma, para comparar um modelo fenomenológico e um empírico, o modelo de Peleg e o modelo de Difusão foram utilizados para desenvolver uma equação generalizada do processo. Para isso, os parâmetros  $k_1$  do modelo de Peleg e  $D_{ef}$  do modelo de difusão puderam ser relacionados com a temperatura empregando-se equação do tipo Arrhenius, por meio das Equações 15 para o modelo de Peleg e Equação 16 para o modelo de Difusão.

$$\frac{1}{k_1} = k_0 \cdot e^{\left(\frac{E'}{T}\right)} \quad (15)$$

$$D_{ef} = D_0 \cdot e^{\left(\frac{E'}{T}\right)} \quad (16)$$

Onde  $k_0$ ,  $D_0$  e  $E'$  são parâmetros ajustados por regressão linear.

Os parâmetros obtiveram ajustes dentro dos limites aceitáveis ( $P < 10\%$ ) para os dois modelos com os valores de  $R^2$  maiores do que 80% e erro médio relativo (P) menor do que 6% para as duas cultivares de sorgo (Tabela 16) (MAIORANO; MANCINI; REYNER, 2010; BOTELHO et al., 2013).

Pode-se observar (Tabela 16) que o parâmetro  $k_1$  do modelo de Peleg obteve maiores valores de  $R^2$  do que o  $D_{ef}$  do modelo de Difusão para as duas cultivares, indicando que a Equação de Arrhenius explica melhor a influência da temperatura sobre o comportamento do parâmetro  $k_1$  do que sobre  $D_{ef}$ . Porém, o erro médio relativo percentual é maior na equação do parâmetro de Peleg, ou seja, seus desvios são maiores do que para o parâmetro do modelo de Difusão.

TABELA 16 – EQUAÇÕES DOS PARÂMETROS DOS MODELOS PELA LEI DE ARRHENIUS

Cultivar BRS	Modelo	Parâmetro	Equação	$R^2$ (%)	P (%)	
310	Peleg	$k_1$	$\frac{1}{k_1} = 3.10^9 \cdot e^{\left(\frac{5892}{T}\right)}$	(17)	99,3	4,39
	Difusão	$D_{ef}$	$D_{ef} = 2,90 \cdot e^{\left(\frac{3754}{T}\right)}$	(18)	99,2	2,87
655	Peleg	$k_1$	$\frac{1}{k_1} = 1.10^5 \cdot e^{\left(\frac{2758}{T}\right)}$	(19)	96,1	5,10
	Difusão	$D_{ef}$	$D_{ef} = 1,77 \cdot e^{\left(\frac{1393}{T}\right)}$	(20)	80,0	4,58

Para a obtenção do modelo generalizado, o parâmetro  $k_2$  do modelo de Peleg pôde ser relacionado à temperatura por uma relação linear (RESENDE; CORRÊA, 2007) com bom ajuste para a cultivar BRS 310 que apresentou coeficiente de determinação de 95,2% e um erro médio relativo (P) de 6,07%. Para a cultivar BRS 655, a mesma relação apresentou um  $R^2$  de 99,1% e um erro médio relativo menor do que 1%, ajustes considerados excelentes (Tabela 17) (MAIORANO; MANCINI; REYNER, 2010).

TABELA 17 – AJUSTE DE  $k_2$  PARA A GENERALIZAÇÃO DE PELEG.

Cultivar	Parâmetro	Equação	$R^2$ (%)	P (%)
BRS 310	$k_2$	$k_2 = -2.10^{-4}T + 5,45.10^{-2}$ (21)	95,2	6,07
BRS 655	$k_2$	$k_2 = -4.10^{-4}T + 6,17.10^{-2}$ (22)	99,1	0,47

#### 4.2.4 Modelos generalizados

Um modelo generalizado fornece informações sobre a umidade do grão, durante a etapa de hidratação, em função do tempo e da temperatura, e são de interesse para a indústria de processamento de amido, malte e farinha de sorgo.

Para generalizar o modelo de Peleg, as funções de  $k_1$  (Tabela 16) e  $k_2$  (Tabela 17) foram substituídas na Equação 7, obtendo-se as Equações do modelo generalizado para as cultivares BRS 310 (Equação 23) e BRS 655 (Equação 24).

$$M_t = M_0 + \frac{t}{\frac{1}{2.10^9 \cdot e^{\left(\frac{-6}{T}\right)} + \left(-2.10^{-4} \cdot T + 5,45.10^{-2}\right)} t} \quad (23)$$

$$M_t = M_0 + \frac{t}{\frac{1}{1.10^5 \cdot e^{\left(\frac{-2758}{T}\right)} + \left(-4.10^{-4} \cdot T + 6,17.10^{-2}\right)} t} \quad (24)$$

Da mesma forma, para obter o modelo generalizado de Difusão, a equação do coeficiente de difusão efetivo,  $D_{ef}$ , (Tabela 15) foi substituída na Equação 2 para as cultivares BRS 310 (Equação 25) e BRS 655 (Equação 26).

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{2,90 \cdot e^{\left(\frac{3754}{T}\right)} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (25)$$

$$\frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \exp\left(-\frac{1,77 \cdot 10^{-3} \cdot e^{\left(\frac{1393}{T}\right)} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (26)$$

Os modelos generalizados de Peleg e de Difusão são apresentados nas Figuras 22 e 23 para as cultivares BRS 310 e BRS 655, respectivamente.

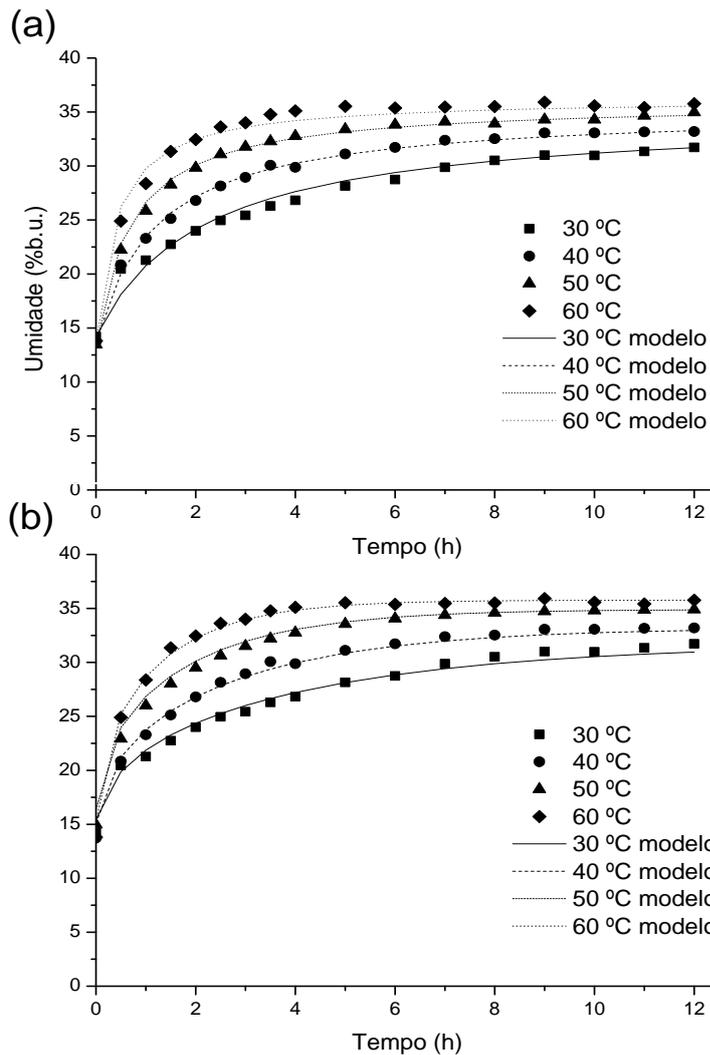


FIGURA 22 – MODELO GENERALIZADO DE PELEG (a) E DE DIFUSÃO (b) PARA A CULTIVAR BRS 310

Os dois modelos generalizados descrevem de modo adequado o processo de hidratação para as duas cultivares de sorgo estudadas, apresentando erro médio relativo (P) menor que 2% e raiz quadrada do erro médio (RMSE) menor do que 4% (Tabela 18), ajustes considerados excelentes.

TABELA 18 – ERROS DOS MODELOS GENERALIZADOS

Cultivar	Modelo	P (%)	RMSE (%)	SE
BRS 310	Peleg	1,29	2,14	0,54
	Difusão	1,70	2,80	0,53
BRS 655	Peleg	1,53	2,53	0,64
	Difusão	1,81	3,12	0,59

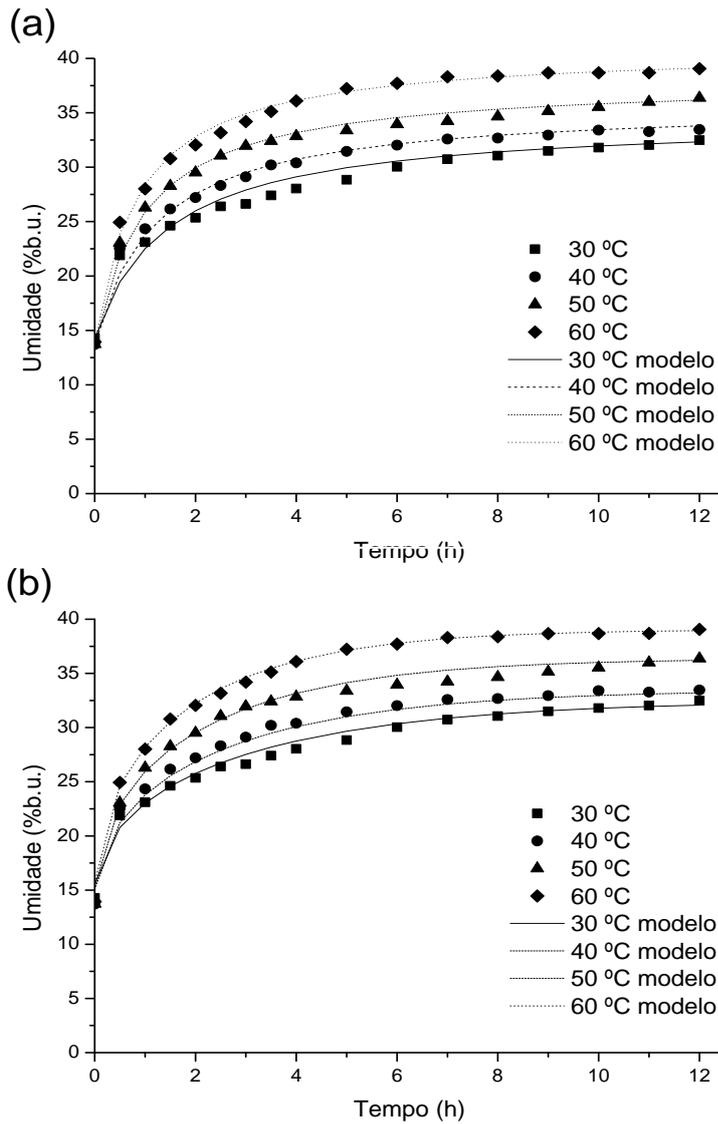


FIGURA 23 – MODELO GENERALIZADO DE PELEG (a) E DE DIFUSÃO (b) PARA A CULTIVAR BRS 655

Dessa forma, os dois modelos podem ser utilizados em processos de hidratação das cultivares BRS 310 e BRS 655 para prever a umidade em função do

tempo e da temperatura, fornecendo a ferramenta necessária para a exploração do processo industrialmente.

Por fim, o modelo generalizado de Difusão apresentou menores valores de SE e maiores valores de RMSE e P em relação ao modelo generalizado de Peleg. Por isso, não há indicação de que o modelo empírico ou o fenomenológico seja o melhor para descrever o processo de hidratação dos grãos de sorgo estudados de forma generalizada (Tabela 18), já que ambos foram satisfatórios. Por outro lado, o modelo de Difusão, por ser fenomenológico, apresenta maior significado físico e fornece o coeficiente de difusão efetivo do processo, enquanto o modelo empírico permite rapidez de ajuste e praticidade em sua resolução.

#### 4.2.5 Energia de Ativação

A energia de ativação ( $E_a$ ) do processo foi obtida a partir da constante  $E'$  encontrada na relação entre o parâmetro  $D_{ef}$ , do modelo de difusão, e a temperatura pela relação de Arrhenius (Equação 15), conforme apresentado no Item 2.10.3 (KASHANINEJAD et al., 2007; SEYHAN-GRUTAS, 2001; THAKUR; GUPTA, 2006; KHAEZEI; MOHAMMADI, 2009; PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010). O ajuste obtido para essa relação foi adequado, com coeficiente de determinação maior do que 80% para as duas cultivares e valores de P menores do que 5% (Tabela 16).

Alguns valores de  $E_a$  típicos encontrados na literatura são apresentados na Tabela 19 juntamente com os resultados obtidos neste trabalho.

Os valores estimados da  $E_a$  para os grãos de sorgo estudados foram de 31,21 kJ/mol para a cultivar BRS 310 e 11,52 kJ/mol para a cultivar BRS 655, que obteve menor  $E_a$ , indicando sua menor sensibilidade a mudança de temperatura no processo de hidratação realizado entre 30 °C e 60 °C. Esse fato mostra que a energia necessária para que os grãos da cultivar BRS 655 sejam hidratados é menor em relação a cultivar BRS 310 em determinada temperatura. Além disso, uma menor energia de ativação sugere que a taxa de absorção de água é maior no processo com a cultivar BRS 655, o que de fato ocorre nas temperaturas de 40 °C, 50 °C e 60 °C com as taxas de absorção média de água (Tabela 10).

Comparando com os dados encontrados na literatura para outros cereais (Tabela 19), a  $E_a$  estimada dos grãos de sorgo da cultivar BRS 655 apresentou valor semelhante em relação a grãos de trigo (MASKAN, 2002), enquanto a cultivar BRS 310 obteve uma  $E_a$  próxima às encontradas por Marques (2014) em grãos de milho, e ambas as cultivares obtiveram valores menores do que os obtidos em grãos de cevada por Montanuci, Jorge e Jorge (2015).

TABELA 19 – ENERGIA DE ATIVAÇÃO DE ALGUNS CEREAIS NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

Grão	Variedade	Temperatura (°C)	$E_a$ (kJ/mol)	Autor
sorgo	ICSV 111	10-50	3,88	Badau, Nkama e Jideani (2005)
sorgo	-	10-50	24,21	Kashiri, Kashaninejad e Aghajani (2010)
sorgo	White Kafir	0-100	8,34	Fan, Chu e Shellenberger (1963)
trigo	Atlas		8,42	
	-		11,98	Maskan (2002)
milho	DKB 240PRO	40-67	37,50	Marques (2014)
	DKB 245PRO		35,90	
	DKB 390PRO		34,50	
	2B587x		35,00	
	2B587x		34,80	
cevada	BRS ELIS	10-35	51,67	Montanuci, Jorge e Jorge (2015)
<b>sorgo</b>	<b>BRS 310</b>	<b>30-60</b>	<b>31,21</b>	<b>Presente trabalho</b>
	<b>BRS 655</b>		<b>11,52</b>	

Em grãos de sorgo, Fan, Chu e Shellenberger. (1963) encontraram energias de ativação próximas ao da cultivar BRS 655. Badau, Nkama e Jideani (2005) obtiveram o menor valor de  $E_a$  em grãos de sorgo (3,88 kJ/mol), enquanto Kashiri, Kashaninejad e Aghajani (2010) encontraram valor intermediário de 24,21 kJ/mol para o processo de hidratação em temperaturas entre 30 °C e 50 °C.

Fica claro que as diferenças entre as energias de ativação do processo de hidratação ocorrem de espécie para espécie, mas são muito mais expressivas entre as cultivares dentro de uma mesma espécie. As diferenças nos valores da  $E_a$ , mesmo para uma espécie, podem ocorrer devido às variações na composição química e na estrutura do grão existentes entre as cultivares (MONTANUCI; JORGE; JORGE, 2013).

## 5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho, pode-se observar que os grânulos de amido de sorgo não foram alterados morfológicamente pelo processo de hidratação, porém sua temperatura e grau de gelatinização aumentaram a 60 °C. Com o aumento da temperatura de hidratação dos grãos de sorgo de 30 °C para 60 °C, a porcentagem de amidos gelatinizados aumentou, em média, de 35,3% para 38,1% na cultivar BRS 310 e de 29,7% para 34,3% na cultivar BRS 655. Nas mesmas condições, a temperatura de pico de gelatinização dos amidos ( $T_p$ ) passou de 67,3 °C para 69,1 °C nos grânulos da cultivar BRS 310 e de 66,3 °C para 68,8 °C nos grânulos da cultivar BRS 655.

O volume do grão aumentou significativamente ( $p < 0,05$ ) com o tempo e a temperatura de hidratação, enquanto sua densidade se manteve constante ( $p > 0,05$ ) e a quantidade de sólidos solúveis liberados na água foi maior na temperatura de 60 °C ( $p < 0,05$ ).

O tempo e a temperatura de processo afetaram a umidade dos grãos de sorgo estudados e uma maior temperatura pode efetivamente diminuir o tempo necessário para se chegar à umidade desejada entre 30 °C e 60 °C. O aumento da temperatura também aumentou a umidade de equilíbrio dos grãos.

O processo foi modelado por duas equações empíricas (Peleg e Page) e duas fenomenológicas (Difusão e Omoto). Os modelos de Peleg, Page e Difusão, conseguiram os melhores ajustes. O modelo de Peleg e o de Difusão foram utilizados na construção de modelos generalizados, que apresentaram excelentes ajustes. Por ser um modelo fenomenológico que fornece o valor do coeficiente de difusão efetivo, o modelo de Difusão é o mais indicado para a modelagem do processo de hidratação dos grãos de sorgo estudados.

O coeficiente de difusão efetivo aumentou de 2,02 m<sup>2</sup>/s para 6,34 m<sup>2</sup>/s no híbrido BRS 310 e de 2,76 para 4,39 m<sup>2</sup>/s no híbrido BRS 655 com o aumento da temperatura de hidratação, de 30 °C para 60 °C, e puderam ser relacionados com a temperatura por uma relação do tipo Arrhenius. A energia de ativação ( $E_a$ ) do processo de hidratação foi de 11,52 kJ/mol para a cultivar BRS 655 e 31,21 kJ/mol para a cultivar BRS 310.

## REFERÊNCIAS

- ABDELRAHMAN, A. A.; FARREL, E. P. Grits from grain sorghum dry milled in roller mills. **Cereal Chemistry**, v. 58, n. 6, p. 521–524, 1981.
- ABOUBACAR, A.; YAZICI, N.; HAMAKER, B. R. Extent of decortication and quality of flour, couscous and porridge made from different sorghum cultivars. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 41, n. 6, p. 698–703, 2006.
- ABU-GHANNAM, N. Modelling textural changes during the hydration process of red beans. **Journal of Food Engineering**, v. 38, n. 3, p. 341–352, 1998.
- ABU-GHANNAM, N.; MCKENNA, B. The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 32, n. 4, p. 391–401, 1997.
- ADBELRAHIM, S. M. K.; MUDAWI, H. A. Some sorghum milling techniques versus flour quality. **Egyptian Academic Journal of Biological Sciences**, v. 6, n. 2, p. 115–124, 2014.
- ADEYEMI, I. A. Dry-milling of sorghum for ogi manufacture. **Journal of Cereal Science**, v. 1, n. 3, p. 221–227, 1983.
- AGU, R. C.; PALMER, G. H. A reassessment of sorghum for larger-beer brewing. **Bioresource Technology**, v. 66, n. 3, p. 253–261, 1998.
- AHROMRIT, A.; LEDWARD, D. A.; NIRANJAN, K. High pressure induced water uptake characteristics of Thai glutinous rice. **Journal of Food Engineering**, v. 72, n. 3, p. 225–233, 2006.
- AI, Y.; MEDIC, J.; JIANG, H.; WANG, D.; JANE, J. Starch characterization and ethanol production of sorghum. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 59, n. 13, p. 7385–7392, 2011.
- AKINGBALA, J. O.; GOMEZ, M. H.; ROONEY, L. W.; SWEAT, V. E. Thermal properties of sorghum starch. **Starch**, v. 40, n. 10, p. 375–378, 1988.
- ALAMRI, M. S.; MOHAMED, A. A.; HUSSAIN, S. Effect of okra gum on the pasting, thermal, and viscous properties of rice and sorghum starches. **Carbohydrate Polymers**, v. 89, n.1, p. 199–207, 2012.
- ALI, T. M.; HASNAIN, A. Thermal characterization of native and modified white sorghum. **International Journal of Polymer Analysis and Characterization**, v. 13, n. 3, p. 227–234, 2012.
- ALI, A. A.; MUSTAFA, M. M. Use of starter cultures of lactic acid bacteria and yeasts in the preparation of kisra, a Sudanese fermented food. **Pakistan Journal of Nutrition**, v. 8, n. 9, p. 1349–1353, 2009.

ANGLANI, C. Sorghum carbohydrates-a review. **Plant foods for human nutrition**, v. 52, n. 1, p. 77–83, 1998a.

ANGLANI, C. Sorghum for human food-a review. **Plant foods for human nutrition**, v. 52, n. 1, p. 85–95, 1998b.

AOAC. Association Of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis**, 1995. Washington.

ARENDR, E. K.; ZANNINI, E. Sorghum. In. **Cereal grains for the food and beverage industries**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2013. p.283–305.

BADAU, M. H.; NKAMA, I.; JIDEANI, I. A. Water-absorption characteristics of various pearl millet cultivars and sorghum grown in Northern Nigeria. **Journal of Food Process Engineering**, v. 28, n. 3, p. 282–298, 2005.

BAKALIS, S.; KYRITSI, A.; KARATHANOS, V. T.; YANNIOTIS, S. Modeling of rice hydration using finite elements. **Journal of Food Engineering**, v. 94, n. 3-4, p. 321–325, 2009.

BECKER, H. A. On the absorption of liquid water by the wheat kernel. **Cereal Chemistry**, v. 37, p. 309–323, 1960.

BELHADI, B.; DJABALI, D.; SOUILAH, R.; YOUSFI, M.; NADJEMI, B. Three small-scale laboratory steeping and wet-milling procedures for isolation of starch from sorghum grains cultivated in Sahara of Algeria. **Food and Bioproducts Processing**, v. 91, n. 3, p. 225–232, 2013.

BELLO, M. O.; TOLABA, M. P.; SUÁREZ, C. Hydration kinetics of rice kernels under vacuum and pressure. **International Journal of Food Engineering**, v. 4, n. 4, p. Article 3, 2008.

BELLO, M.; TOLABA, M. P.; SUAREZ, C. Factors affecting water uptake of rice grain during soaking. **LWT - Food Science and Technology**, v. 37, n. 8, p. 811–816, 2004.

BENMOUSSA, M.; SUHENDRA, B.; ABOUBACAR, A.; HAMAKER, B. R. Distinctive sorghum starch granule morphologies appear to improve raw starch digestibility. **Starch/Särke**, v. 52, n. 2, p. 92-99, 2006.

BERNAL, C.; COUTO, A. B.; BREVIGLIERI, S. T.; CAVALHEIRO, É. T. G. Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais - DSC. **Química Nova**, v. 25, n. 5, p. 849–855, 2002.

BETA, T.; CORKE, H.; ROONEY, L. W.; TAYLOR, J. R. N. Starch properties as affected by sorghum grain chemistry. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 81, n. 2, p. 245–251, 2001a.

BETA, T.; CORKE, H.; TAYLOR, J. R. N.; ROONEY, L. W. Effect of steeping treatment on pasting and thermal properties of sorghum starches. **Cereal Chemistry**, v. 78, n. 3, p. 303–306, 2001b.

BETA, T.; ROONEY, L. W.; MAROVATSANGA, L. T.; TAYLOR, J. R. N. Effect of chemical treatments on polyphenols and malt quality in sorghum. **Journal of Cereal Science**, v. 31, n. 3, p. 295–302, 2000.

BIOMATRIX. SORGO BRS 310, 2015. Disponível em: <<http://www.biomatrix.com.br/pt/BRS310.php>>. Acesso em: 06/05/2015

BLANDINO, A.; AL-ASEERI, M. E.; PANDIELLA, S. S.; CANTERO, D.; WEBB, C. Cereal-based fermented foods and beverages. **Food Research International**, v. 36, n. 6, p. 527–543, 2003.

BŁASZCZAK, W.; FORMAL, J.; KISELEVA, V. I.; et al. Effect of high pressure on thermal, structural and osmotic properties of waxy maize and Hylon VII starch blends. **Carbohydrate Polymers**, v. 68, n. 3, p. 387–396, 2007.

BŁASZCZAK, W.; MISHARINA, T. A.; FESSAS, D.; SIGNORELLI, M.; GÓRECKI, A. R. Retention of aroma compounds by corn, sorghum and amaranth starches. **Food Research International**, v. 54, n. 1, p. 338–344, 2013.

BONFIM-SILVA, E. M.; KROTH, B. E.; SILVA, T. J. A. Disponibilidades hídricas no desenvolvimento inicial de sorgo e pH do solo. **Eciclopédia Biosfera, Centro científico Conhecer**, v. 8, n. 14, p. 397–407, 2012.

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

BOTELHO, F. M.; CORRÊA, P. C.; MARTINS, M. A.; BOTELHO, S. DE C. C.; OLIVEIRA, G. H. H. DE. Effects of the mechanical damage on the water absorption process by corn kernel. **Food Science and Technology**, v. 33, n. 2, p. 282–288, 2013.

BOUDRIES, N.; BELHANECHÉ, N.; NADJEMI, B.; DEROANNE, C.; MATHLOUTHI, M.; ROGER, B.; SINDIC, M. Physicochemical and functional properties of starches from sorghum cultivated in the Sahara of Algeria. **Carbohydrate Polymers**, v. 78, n. 3, p. 475–480, 2009.

BRALLEY, E.; GREENSPAN, P.; HARGROVE, J. L.; HARTLE, D. Inhibition of hyaluronidase activity by select sorghum brans. **Journal of Medicinal Food**, v. 11, n. 2, p. 307 – 312, 2008.

BRIGGS, D. E. **Malt and Malting**. 1st ed. London: Blackie Academic & Professional, 1998.

BRIGGS, D. E.; BOULTON, C. A.; BROOKES, P. A.; STEVENS, R. **Brewing: Science and Practice**. 1. ed. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2004.

BULÉON, A.; COLONNA, P.; PLANCHOT, V.; BALL, S. Starch granules: structure and biosynthesis. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 23, n. 2, p. 85-112, 1998.

BUFFO, R. A.; WELLER, C. L.; PARKHURST, A. M. Optimization of Sulfur Dioxide and Lactic Acid Steeping Concentrations for Wet-Milling of Grain Sorghum. **American Journal for Clinical Nutrition**, v. 40, n. 6, p. 1643–1648, 1997.

BUFFO, R. A.; WELLER, C. L.; PARKHURST, A. M. Relationships among grain sorghum quality factors. **Cereal Chemistry**, v. 75, n. 1, p. 100–104, 1998.

BULTOSA, G.; HALL, A. N.; TAYLOR, J. R. N. Physico-chemical characterization of grain tef [*Eragrostis tef* (Zucc.) Trotter] starch. **Starch/Stärke**, v. 54, n. 10, p. 461–468, 2002.

BURDETTE, A.; GARNER, P. L.; MAYER, E. P.; HARGROVE, J. L.; HARTLE, D. K.; GREENSPAN, P. Anti-Inflammatory activity of select sorghum (*Sorghum bicolor*) brans. **Journal of Medicinal Food**, v. 13, n. 4, p. 1-9, 2010.

CAPRILES, V. D.; ARÊAS, J. A. G. Novel approaches in gluten-free breadmaking: Interface between food science, nutrition, and health. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 13, n. 5, p. 871–890, 2014.

CHANDRASHEKAR, A.; KERLIES, A. W. Influence of protein in starch gelatinization on sorghum. **Cereal Chemistry**, v. 65, n. 6, p. 457–462, 1988.

CHARNET, R.; FREIRE, C. A. L.; CHARNET, E. M. R.; BONVINO, H. **Análise de Modelos de Regressão linear**. 2. ed. Campinas: Editora da Unicamp, 2008

CHOTO, C. E.; MORAD, M. M.; ROONEY, L. W. The quality of tortillas containing whole sorghum and pearled sorghum alone and blended with maize. **Cereal Chemistry**, v. 62, n. 1, p. 51–55, 1985.

CHUNG, I.; KIM, E.; YEO, M.; KIM, S.; SEO, M.; MOON, H. Antidiabetic effects of three Korean sorghum phenolic extracts in normal and streptozotocin-induced diabetic rats. **Food Research International**, v. 44, n. 1, p. 127-132, 2011.

CHUNG, H.; LIU, Q.; HOOVER, R. Effect of single and dual hydrothermal treatments on the crystalline structure, thermal properties, and nutritional fractions of pea, lentil, and navy bean starches. **Food Research International**, v. 43, n. 2, p. 501-508, 2010.

CHUNG, H.; LIU, Q.; HOOVER, R. Impact of annealing and heat-moisture treatment on rapidly digestible, slowly digestible and resistant starch levels in native and gelatinized corn, pea and lentil starches. **Carbohydrate Polymers**, v. 75, n. 3, p. 436-447, 2009.

CLAVER, I. P.; ZHANG, H.; LI, Q.; ZHU, K.; ZHOU, H. Impact of the soak and the malt on the physicochemical properties of the sorghum starches. **International Journal of Molecular Science**, v. 11, n. 8, p. 3002 – 3015, 2010.

CIACCI, C.; MAIURI, L.; CAPORASO, N.; et al. Celiac disease: In vitro and in vivo safety and palatability of wheat-free sorghum food products. **Clinical Nutrition**, v. 26, n. 6, p. 799–805, 2007.

CNS - Conselho Nacional de Saúde. Dia 18 é dia do celíaco. 2014 Disponível em: <[http://conselho.saude.gov.br/ultimas\\_noticias/2014/05mai\\_16\\_celiacos.html](http://conselho.saude.gov.br/ultimas_noticias/2014/05mai_16_celiacos.html)>. Acesso em: 10/3/2015.

COOKE, D.; GIDLEY, M. Loss of crystalline and molecular order during starch gelatinisation: origin of the enthalpic transition. **Carbohydrate Research**, v. 227, p. 103-112, 1992.

COUTINHO, M. R.; CONCEIÇÃO, W. A. D. S.; OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. D. M. Novo modelo de parâmetros concentrados aplicado à hidratação de grãos. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 27, n. 3, p. 451–455, 2007.

COUTINHO, M. R.; CONCEIÇÃO, W. A. DOS S.; PARAÍSO, P. R.; et al. Application of the Hsu model to soybean grain hydration. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, n. 1, p. 19–29, 2010.

COUTINHO, M. R.; OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. D. M. Modelagem e validação da hidratação de grãos de soja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 3, p. 603–610, 2005.

CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. 2. ed. London: Oxford University Press, 1975.

CUNHA, L. M.; OLIVEIRA, F. A. R.; OLIVEIRA, J. C. Optimal experimental design for estimating the kinetic parameters of processes described by the Weibull probability distribution function. **Journal of Food Engineering**, v. 37, n. 2, p. 175–191, 1998.

DAMODARAN, S.; PARKIN, K. L.; FENNEMA, O. R. **Química de Alimentos de Fennema**. 4. ed. Porto Alegre: ARTMED, 2010.

DEDAVID, B. A.; GOMES, C. I.; MACHADO, G. **Microscopia eletrônica de varredura - Aplicações e preparação de amostras**. Porto Alegre: EDIPUCRS, 2007.

DEGÁSPARI, C. H.; WASZCZYNSKYJ, N. Desenvolvimento de aplicações tecnológicas para o sorgo (sorghum bicolor L. MOENCH). **Alimentos e Nutrição Araraquara**, v. 9, n. 1, p. 17–26, 1998.

DEWAR, J.; TAYLOR, J. R. N.; BERJAK, P. Determination of Improved Steeping Conditions for Sorghum Malting. **Journal of Cereal Science**, v. 26, n. 1, p. 129–136, 1997.

DICKO, M. H.; GRUPPEN, H.; TRAORÉ, A. S.; VORAGEN, A. G. J.; BERKEL, W. J. H. VAN. Sorghum grain as human food in Africa : relevance of content of starch and amylase activities. **African Journal of Biotechnology**, v. 5, n. 5, p. 384–395, 2006.

EMBRAPA. Cultivo do Sorgo - Importância Econômica. Sistemas de produção 2. ISSN 1679-012X, 4. ed. 2008 Disponível em: <[http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo\\_4\\_ed/importancia.htm](http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/sorgo_4_ed/importancia.htm)>. Acesso em: 12/3/2015.

EMBRAPA. SORGO BRS 655. DISPONÍVEL EM: <[http://spm.sede.embrapa.br/produtos/mostrar\\_produto/99/](http://spm.sede.embrapa.br/produtos/mostrar_produto/99/)>. Acesso em: 06/05/2015.

EMBRAPA. BRS 655 - Híbrido de sorgo forrageiro para produção de silagem de alta qualidade - Circular Técnica 107, 2009. Sete Lagoas, 2002.

EMBRAPA. Cultivo de sorgo - mercado e comercialização. Sistemas de produção 2. ISSN 1679-012X, 8. ed. 2012. Disponível em: <[https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p\\_p\\_id=conteudoportlet\\_WAR\\_sistemaasdeproducaolf6\\_1ga1ceportlet&p\\_p\\_lifecycle=0&p\\_p\\_state=normal&p\\_p\\_mode=view&p\\_p\\_col\\_id=column1&p\\_p\\_col\\_count=1&p\\_r\\_p\\_76293187\\_sistemaProducaold=3809&p\\_r\\_p\\_-996514994\\_topicold=3](https://www.spo.cnptia.embrapa.br/conteudo?p_p_id=conteudoportlet_WAR_sistemaasdeproducaolf6_1ga1ceportlet&p_p_lifecycle=0&p_p_state=normal&p_p_mode=view&p_p_col_id=column1&p_p_col_count=1&p_r_p_76293187_sistemaProducaold=3809&p_r_p_-996514994_topicold=3)>. Acesso em: 12/3/2015.

ENGELS, C.; HENDRICKX, M.; SAMBLANX, S. DE; GRYZE, I. DE; TOBBACK, P. Modelling water diffusion during long-grain rice soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 5, n. 1, p. 55–73, 1986.

FAN, L.-T.; CHU, P.-S.; SHELLENBERGER, J. A. Diffusion of water in kernels of corn and sorghum. **Cereal Chemistry**, v. 40, n. 4, p. 303–313, 1963.

FAO. STATISTICS DIVISION. Disponível em: <<http://faostat3.fao.org/browse/Q/QC/E>>. Acesso em: 10/3/2015.

FERREIRA, S. M. R.; LUPARELLI, P. C.; SCHIEFERDECKER, M. E. M.; VILELA, R. M. Cookies sem glúten a partir da farinha de sorgo. **Archivos Latinoamericanos de Nutricion**, v. 59, n. 4, p. 433–440, 2009.

FREDERICK, E. J. **Effect of sorghum flour composition and particle size on quality of gluten-free bread**. 123 p. Thesis (Master of Science) - College of Agriculture, Kansas State University, Manhattan, 2009.

GAFFA, T.; YOSHIMOTO, Y.; HANASHIRO, I.; HONDA, O.; KAWASAKI, S.; TAKEDA, Y. Physicochemical properties and molecular structures of starches from millet (*Pennisetum typhoides*) and sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) cultivars in Nigeria. **Cereal Chemistry**, v. 81, n. 2, p. 255-260, 2004.

GAFHOOR, M.; MISRA, N. N.; MAHADEVAN, K.; TIWARI, B. K. Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 21, n. 1, p.409-414, 2014.

GARCIA, C. **Modelagem e simulação de processos industriais e sistemas eletromecânicos**. 2. ed. São Paulo: Editora da Universidad de São Paulo, 2013.

GÓMEZ-CORDOVÉS, C.; BARTOLOMÉ, B.; VIEIRA, W.; VIRADOR, V. M. Effects of wine phenolics and sorghum tannins on tyrosinase activity and growth of melanoma cells. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, v. 49, n. 3, p. 1620-1624, 2001.

GOWEN, A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J. Influence of pre-blanching on the water absorption kinetics of soybeans. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 965–971, 2007.

GUERRA, A.; BARROS, A. S.; HENRIQUE, L.; et al. Avaliação de cultivares de sorgo granífero na safrinha do Sudoeste do Estado de Goiás. , v. 2009, p. 168–174, 2009.

GUTKOSKI, L. C.; ANTUNES, E.; ROMAN, I. T. Avaliação do grau de extração de farinhas de trigo e de milho em moinho tipo colonial. **B. Ceppa**, v. 17, n. 2, p. 153–166, 1999.

HAMAD, S. H.; BÖCKER, G.; VOGEL, R. F.; HAMMES, W. P. Microbiological and chemical analysis of fermented sorghum dough for Kisra production. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 37, n. 6, p. 728–731, 1992.

HARGROVE, J. L.; GREENSPARN, P.; HARTLE, D. K. Nutritional significance and metabolism of very long chain fatty alcohols and acids from dietary waxes. **Experimental Biology and Medicine**, v. 229, n. 3, p. 215-226, 2004.

HOOVER, R. The impact of heat-moisture treatment on molecular structures and properties of starches isolated from different botanical sources. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 50, n. 9, p. 835-847, 2010.

HOOVER, R.; MANUEL, H. Effect of heat-moisture treatment on the structure and physicochemical properties of legumes starches. **Food Research International**, v. 29, n. 8, p. 731-750, 1996.

HOOVER, R.; VASANTHAN, T. The effect of annealing on the physicochemical properties of wheat, oat, potato and lentil starches. **Journal of Food Biochemistry**, v. 17, n. 5, p. 303-325, 1994.

HOSENEY, R. C.; DAVIS, A. B.; HARBERS, L. H. Pericarp and endosperm structure of grain shown by scanning electron microscopy. **Cereal Chemistry**, v. 51, n. 5, p. 552–558, 1974.

HSU, K. H. A diffusion model with a concentration-dependent diffusion coefficient for describing water movement in legumes during soaking. **Journal of Food Science**, v. 48, n. 2, p. 618–622, 1983a.

HSU, K. H. Effect of Temperature on Water Diffusion in Soybean. **Journal of Food Science**, v. 48, n. 4, p. 1364–1365, 1983b.

HWANG, K. T.; WELLER, C. L.; CUPPET, S. L.; HANNA, M. A. Policosanol contents and composition of grain sorghum kernels and dried distillers grains. **Cereal Chemistry**, v. 81, n. 3, p. 345-349, 2004.

IBGE, G. E. E. Estatística da Produção Agrícola. Disponível em: <ftp://ftp.ibge.gov.br/Producao\_Agricola/Fasciculo\_Indicadores\_IBGE/estProdAgr\_201504.pdf>. .

IGATHINATHANE, C.; CHATTOPADHYAY, P. K. Mathematical prediction of moisture profile in layers of grain during pre-conditioning. **Journal of Food Engineering**, v. 31, n. 2, p. 185–197, 1997.

INSTITUTO ADOLF LUTZ. **Normas analíticas do Instituto Adolf Lutz**. 3<sup>a</sup> ed. São Paulo, 1985.

INSTITUTO ADOLF LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4<sup>a</sup> ed. Brasília, 2008.

KANG, S.; DELWICHE, S. R. Moisture diffusion modeling of wheat kernels during soaking. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 42, n. 5, p. 1359–1365, 1999.

KANG, S.; DELWICHE, S. R. Moisture diffusion coefficients of single wheat kernel with assumed simplified geometries: analytical approach. **American Society of Agricultural Engineers**, v. 43, n. 6, p. 1653–1659, 2000.

KAPTSO, K. G.; NJINTANG, Y. N.; KOMNEK, A. E.; et al. Physical properties and rehydration kinetics of two varieties of cowpea (*Vigna unguiculata*) and bambara groundnuts (*Voandzeia subterranea*) seeds. **Journal of Food Engineering**, v. 86, n. 1, p. 91–99, 2008.

KASHANINEJAD, M.; DEHGHANI, A. A.; KASHIRI, M. Modeling of wheat soaking using two artificial neural networks (MLP and RBF). **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 4, p. 602–607, 2009.

KASHANINEJAD, M.; MAGHSOUDLOU, Y.; RAFIEE, S.; KHOMEIRI, M. Study of hydration kinetics and density changes of rice (Tarom Mahali) during hydrothermal processing. **Journal of Food Engineering**, v. 79, n. 4, p. 1383–1390, 2007.

KASHIRI, M.; GARMAKHANY, A. D.; DEHGHANI, A. A. Modelling of sorghum soaking using artificial neural networks (MLP). **Quality Assurance and Safety of Crops & Foods**, v. 4, n. 4, p. 179–184, 2012.

KASHIRI, M.; KASHANINEJAD, M.; AGHAJANI, N. Modeling water absorption of sorghum during soaking. **Latin American Applied Research**, v. 40, n. 4, p. 383–388, 2010.

KAYMAK-ERTEKIN, F.; SULTANOGLU, M. Moisture sorption isotherm characteristics of peppers. **Journal of Food Engineering**, v. 47, n. 3, p. 225–231, 2001.

KHALIL, J. K.; SAWAYA, W. N.; SAFI, W. J.; AL-MOHAMMAD, H. M. Chemical composition and nutritional quality of sorghum flour and bread. **Plant foods for human nutrition**, v. 34, n. 2, p. 141–150, 1984.

KHAZAEI, J.; MOHAMMADI, N. Effect of temperature on hydration kinetics of sesame seeds (*Sesamum indicum* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 4, p. 542–552, 2009.

LEÃO, D. A. S.; FREIRE, A. L. O.; MIRANDA, J. R. P. DE. Estado Nutricional De Sorgo Cultivado Sob Estresse Hídrico E Adubação Fosfatada. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 41, n. 1, p. 74–79, 2011.

LEE, W. J.; PEDERSEN, J. F.; SHELTON, D. R. Relationship of sorghum kernel size to physicochemical, milling, pasting, and cooking properties. **Food Research International**, v. 35, n. 7, p. 643–649, 2002.

LI, E.; HASJIM, J.; DHITAL, S.; GODWIN, I.; GILBERT, R. G. Effect of a gibberellin-biosynthesis inhibitor treatment on the physicochemical properties of sorghum starch. **Journal of Cereal Science**, v. 53, n. 3, p. 328-334, 2011.

LI, E.; HASJIM, J.; SINGH, V.; TIZZOTTI, M.; GODWIN, I. D.; GILBERT, R. G. Insights into sorghum starch biosynthesis from structure changes induced by different growth temperatures. **Cereal Chemistry**, v. 90, n. 3, p. 223-230, 2013.

LIU, L.; HERALD, T. J.; WANG, D.; et al. Characterization of sorghum grain and evaluation of sorghum flour in a Chinese egg noodle system. **Journal of Cereal Science**, v. 55, n. 1, p. 31–36, 2012.

LOMAURO, C. J.; BAKSHI, A. S.; LABUZA, T. P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations: Part I: Fruit, vegetable and meat products. **LWT - Food Science and Technology**, v. 18, n. 2, p. 111–117, 1985.

LORENZ, K.; COLLINS, F.; KULP, K. Steeping of wheat at various temperatures – effects on physicochemical characteristics of the starch. **Starch/Särke**, v. 30, n. 10, p. 333-336, 1978.

MAIORANO, A.; MANCINI, M. C.; REYNERI, A. Water interactions in maize grain during maturation: Differences among commercial hybrids. **Maydica**, v. 55, n. 3-4, p. 209–217, 2010.

MARQUES, B. C. **Cinética de hidratação de grãos de milho transgênico e convencional e estudo de sus propriedades físico-químicas e tecnológicas**. 124 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MARTINO, H. S. D.; CARDOSO, L. M.; MORAES, E. A.; SANT'ANA, H. M. P.; QUEIROZ, V. A. V. Por que utilizar o sorgo na alimentação humana?. In: KARAM, D.; MAGALHÃES, P. C. **Eficiência nas cadeias produtivas e o abastecimento global**. Sete Lagoas: Associação Brasileira de Milho e Sorgo, 2014. p. 95-114.

MASKAN, M. Effect of maturation and processing on water uptake characteristics of wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 47, n. 1, p. 51–57, 2001.

MASKAN, M. Effect of processing on hydration kinetics of three wheat products of the same variety. **Journal of Food Engineering**, v. 52, n. 4, p. 337–341, 2002.

MATZ, S. A. The chemistry and technology of cereals as food and feed. **Sorghum**. 2.ed. ed., p.187–212, 1991. New York.

MAYOLLE J. E.; LULLIEN-PELLERIN V.; CORBINEAU F.; BOIVIN P.; GUILLARD V. Water diffusion and enzyme activities during malting of barley grains: a relationship assessment. **Journal of Food Engineering**, v. 109, n. 3, p. 358–365, 2012.

MERWE, M. VAN DER; OSTHOFF, G.; PRETORIUS, A. J. Determining milling performance of sorghum cultivars by means of abrasive decortication and roller milling techniques. **South African Journal of Plant and Soil**, v. 22, n. 4, p. 229–235, 2005.

MONTANUCI, F. D. **Avaliação do efeito das variáveis de processo na produção de malte de cevada e na produção de bebidas tipo chá**. 129 f. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. DE M.; JORGE, R. M. M. Kinetic , thermodynamic properties , and optimization of barley hydration. **Food Science and Technology**, v. 33, n. 4, p. 690–698, 2013.

MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Effect of time and temperature on the hydration process of barley grains. **Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 3, p. 363–372, 2015.

MUNSON-MCGEE, S. H. Moisture profiles during intermittent soaking of an oblate spheroid. **Journal of Food Engineering**, v. 125, n. 1, p. 77–83, 2014.

MURRAY, J. A. The widening spectrum of coeliac disease. **American Journal for Clinical Nutrition**, v. 69, p. 354–365, 1999.

NARVÁEZ-GONZÁLEZ, E. D.; CÁRDENAS, J. D. F.; TABA, S.; TOSTADO, E. C.; PENICHE, R. Á. M. Effect of starch granule size on the thermal and pasting properties of maize. **Rev. Fitotecnia Mexicana**, v. 30, n. 3, p. 269-277, 2007.

NICOLIN, D. J.; COUTINHO, M. R.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. M. Hsu model analysis considering grain volume variation during soybean hydration. **Journal of Food Engineering**, v. 111, n. 3, p. 496–504, 2012.

NICOLIN, D. J.; MARCONDES, B. L.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, L. M. D. M. Comparação de modelos fenomenológicos para a hidratação de grãos de soja. In: VII EPCC ENCONTRO INTERNACIONAL DE PRODUÇÃO CIENTÍFICA, 2011, Maringá. **Anais...** Maringá: CESUMAR, 2011. p.1–5.

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.

OLIVEIRA, A. L.; COLNAGHI, B. G.; SILVA, E. Z. DA; et al. Modelling the effect of temperature on the hydration kinetic of adzuki beans (*Vigna angularis*). **Journal of Food Engineering**, v. 118, n. 4, p. 417–420, 2013.

OMOTO, E. S.; ANDRADE, C. M. G.; JORGE, R. M. M.; et al. Modelagem matemática e análise da hidratação de grãos de ervilha. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 1, p. 12–18, 2009.

ONYANGO, C.; MUTUNGI, C.; UNBEHEND, G.; LINDHAUER, M. G. Modification of gluten-free sorghum batter and bread using maize, potato, cassava or rice starch. **LWT - Food Science and Technology**, v. 44, n. 3, p. 681–686, 2011.

OWUAMA, C. I. Review Sorghum : a cereal with lager beer brewing potential. **World Journal of Microbiology & Biotechnology**, v. 13, n. 11, p. 253–260, 1997.

PALMER, G. H.; ETOKAKPAN, O. U.; IGYOR, M. A. Sorghum as brewing material. **MIRCEN Journal of Applied Microbiology and Biotechnology**, v. 5, n. 3, p. 265–275, 1989.

PAN, Z.; TANGRATANAVALEE, W. Characteristics of soybeans as affected by soaking conditions. **LWT - Food Science and Technology**, v. 36, n. 1, p. 143–151, 2003.

PARKER, R.; RING, S. G. Aspects of the physical chemistry of starch. **Journal of Cereal Science**, v. 34, n. 1, p. 1-17, 2001.

PATERO, T.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound (US) enhances the hydration of sorghum (*Sorghum bicolor*) grains. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 23, p. 11–15, 2015.

PEDERSEN, B.; EGGUM, B. O. The influence of milling on the nutritive value of flour from cereal grains. 6. sorghum. **Qualitas Plantarum Plant Foods for Human Nutrition**, v. 33, n. 4, p. 313–326, 1983.

PEDERSEN, J. F.; GRAYBOSCH, R. A.; FUNNELL, D. L. Occurrence of the waxy alleles *wxa* and *wxb* in waxy sorghum plant introductions and their effect on starch thermal properties. **Crop Science**, v. 47, n. 5, p. 1927-1933, 2007.

PEDREIRA, M. DOS S.; REIS, R. A.; BERCHIELLI, T. T.; MOREIRA, A. L.; COAN, R. M. Características Agronômicas e Composição Química de Oito Híbridos de Sorgo [ *Sorghum bicolor* ( L .) Moench ]. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 32, n. 5, p. 1083–1092, 2003.

PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, p. 1216–1219, 1988.

PÉREZ, S.; BERTOFT, E. The molecular structures of starch components and their contribution to the architecture of starch granules: A comprehensive review. **Starch/Särke**, v. 62, n. 8, p. 389-420, 2010.

PÉREZ, O. E.; HAROS, M.; SUAREZ, C. Corn steeping : influence of time and lactic acid on isolation and thermal properties of starch. **Journal of Food Engineering**, v. 48, n. 3, p. 251–256, 2001.

PEREZ, O. E.; SUAREZ, C.; ROSELL, C. M. Effect of steeping time on the starch properties from ground whole corn. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 3, p. 281-287, 2003.

PRASAD, K.; VAIRAGAR, P. R.; BERA, M. B. Temperature dependent hydration kinetics of *Cicer arietinum* splits. **Food Research International**, v. 43, n. 2, p. 483–488, 2010.

QUEIROZ, V. A. V.; ARRUDA, A. C.; RODRIGUES, J. A. DOS S.; SCHAFFERT, R. E.; SOUZA, G. K. DE. Avaliação da aceitação sensorial de bolo integral à base de farinha de sorgo. In: XXII CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 2010, Salvador. **Anais...** Campinas: SBCTA, 2010. p.149.

QUEIROZ, V. A. V.; CARNEIRO, H. L.; DELIZA, R.; et al. Genótipos de sorgo para produção de barra de cereais. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira**, v. 47, n. 2, p. 287–293, 2012.

QUEIROZ, V. A. V.; MENEZES, C. B.; SILVA, C. S.; MIGUEL, R. A. Composição centesimal de cultivares comerciais de sorgo para uso na alimentação humana. In: 5<sup>o</sup> SIMPÓSIO DE SEGURANÇA ALIMENTAR E SAÚDE, 2015, Bento Gonçalves. **Anais...** Campinas: SBCTA, 2015. p.1–5, 2015.

RATNAVATHI, C. V.; RAVI, S. B. Effect of different durations of steeping and malting on the production of Alpha-amylase in sorghum. **Journal of Cereal Science**, v. 14, n. 3, p. 287–296, 1991.

REICHERT, R. D. Sorghum dry milling. **Sorghum in the Eighties: Proceedings Symposium on Sorghum**. p.547–565, 1982.

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

RESIO, A. N. C.; AGUERRE, R. J.; SUÁREZ, C. Study of some factors affecting water absorption by Amaranth grain during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 60, n. 4, p. 391–396, 2003.

RIBEIRO, M. N. **Influência do tempo de condicionamento do trigo na qualidade tecnológica da farinha**. 80 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Universidade Federal do Ceará, Ceará, 2009.

ROONEY, L. W. Sorghum and pearl millet lipids. **Cereal Chemistry**, v. 55, n. 5, p. 584–590, 1978.

ROONEY, L. W.; MILLER, F. R. Variation in the Structure and Kernel Characteristics of Sorghum. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SORGHUM GRAIN QUALITY, 1981, Patancheru. **Anais...** Patancheru: ICRISAT , 1981. p.143–162.

ROONEY, L. W.; MURTY, D. S. Evaluation of Sorghum Food Quality. In: Sorghum in the Eighties. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON SORGHUM, 1982, Patancheru. **Anais...** Patancheru: ICRISAT, 1982. p.571–588, 1982.

SAGUY, I. S.; MARABI, A.; WALLACH, R. New approach to model rehydration of dry food particulates utilizing principles of liquid transport in porous media. **Trends in Food Science & Technology**, v. 16, n.11, p. 495-506, 2005.

SALINAS, J.; ALVAREZ, E. G.; ZINN, A. Influence of tempering on the feeding value of steam-flaked sorghum for feedlot cattle. **Proceedings-American Society of Animal Science Western Section**, v. 50, p. 325–331, 1999.

SANG, Y.; BEAN, S.; SEIB, P. A.; PEDERSEN, J.; SHI, Y. Structure and functional properties of sorghum starches differing in amylose content. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 56, n. 15, p. 6680-6685, 2008.

SAYAR, S.; TURHAN, M.; GUNASEKARAN, S. Analysis of chickpea soaking by simultaneous water transfer and water-starch reaction. **Journal of Food Engineering**, v. 50, n. 2, p. 91–98, 2001.

SCHOBBER, T. J.; BEAN, S. R.; BOYLE, D. L. Gluten-free sorghum bread improved by sourdough fermentation: biochemical, rheological, and microstructural background. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 13, p. 5137–5146, 2007.

SCHOBBER, T. J.; MESSERSCHMIDT, M.; BEAN, S. R.; PARK, S. H.; ARENDT, E. K. Gluten-free bread from sorghum: Quality differences among hybrids. **Cereal Chemistry**, v. 82, n. 4, p. 394–404, 2005.

SERNA-SALDIVAR, S. O.; TELLEZ-GIRON, A.; ROONEY, L. W. Production of tortilla chips from Sorghum and maize. **Journal of Cereal Science**, v. 8, n. 3, p. 275–284, 1988.

SEYHAN-GRÜTAS, F.; AK, M. M.; EVRANUZ, E. Ö. Water diffusion coefficients of selected legumes grown in Turkey as affected by temperature and variety. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 25, n. 5, p. 297 – 304, 2001.

SHANDERA, D. L.; PARKHURST, A. M.; JACKSON, D. S. Interactions of sulfur dioxide, lactic acid, and temperature during simulated corn wet milling. **Cereal Chemistry**, v. 72, n. 4, p. 371–378, 1995.

SHANTHILAL, J.; ANANDHARAMAKRISHNAN, C. Computational and numerical modeling of rice hydration and dehydration: a review. **Trends in Food Science and Technology**, v. 31, n. 2, p. 100–117, 2013.

SHELEMBE, J. S.; CROMARTY, D.; BESTER, M.; MINNAAR, A.; DUODU, K. G. Effect of acidic condition on phenolic composition and antioxidant potential of aqueous extracts from sorghum (*Sorghum bicolor*) bran. **Journal of Food Biochemistry**, v. 38, n. 1, p. 110 – 118, 2014.

SHIH, C.; SIU, S.; NG, R.; WONG, E. CHIU, L. C. M.; CHU, I. K.; LO, C. Quantitative analysis of anticancer 3-deoxyanthocyanidins in infected sorghum seedlings. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 55, n. 2, p. 254-259, 2007.

SIMONI, F. DE; COSTA, R. S.; GEROLINETO, E. Sementes de *Sorghum bicolor* L. – Gramineae, submetidas ao estresse hídrico simulado com PEG (6000). **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 11, n. 1, p. 188–192, 2011.

SINGH, N.; KAUR, L. Morphological, thermal, rheological and retrogradation properties of potato starch fractions varying in granule size. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 84, n. 10, p. 1241-1252, 2004.

SINGH, J.; KAUR, L.; MCCARTHY, O. J. Factors influencing the physico-chemical, morphological, thermal and rheological properties of some chemically modified starches for food applications—A review. **Food Hydrocolloids**, v. 21, n. 1, p. 1-22, 2007.

SINGH, B. P. N.; KULSHRESTHA, S. P. Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains. **Journal of Food Science**, v. 52, n. 6, p. 1538–1541, 1987.

SINGH, H.; SODHI, N. S.; SINGH, N. Characterisation of starches separated from sorghum cultivars grown in India. **Food Chemistry**, v. 19, n. 1, 2010.

SIRA, E. E. P.; AMAIZ, M. L. A laboratory scale method for isolation of starch from pigmented sorghum. **Journal of Food Engineering**, v. 64, n. 4, p. 515–519, 2004.

SITI, H. N.; KAMISAH, Y.; KAMSIAH, J. The role of oxidative stress, antioxidants and vascular inflammation in cardiovascular disease (a review). **Vascular Pharmacology**, v. 71, p. 40-56, 2015.

SOPADE, P. A.; AJISEGIRI, E. S.; BADAU, M. H. The use of Peleg's equation to model water absorption in some cereal grains during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 15, n. 4, p. 269–283, 1992.

SUBRAHMANYAM, S. N.; HOSENEY, R. C. Shear-thinning properties of sorghum starch. **Cereal Chemistry**, v. 72, n. 1, p. 7-10, 1995.

TAIWO, K. A.; AKANBI, C. T.; AJIBOLA, O. O. Regression relationships for the soaking and cooking properties of two cowpea varieties. **Journal of Food Engineering**, v. 37, n. 3, p. 331–344, 1998.

TAVAKOLI, H.; RAJABIPOUR, A.; MOHTASEBI, S. S. Moisture-dependent some engineering properties of soybean grains. **Agricultural Engineering International: I: the CIGR Ejournal**, v. XI. Manuscript 1110, 2009

TAYLOR, J. R. N. Oview: Importance of Sorghum in Africa. Disponível em: <[www.plantzafrica.com](http://www.plantzafrica.com)>. Acesso em: 2/3/2015.

TAYLOR, J. R. N.; NOVELLIE, L.; LIEBENBERG, N. V. D. W. Sorghum Protein Body Composition and Ultrastructure. **Cereal Chemistry**, v. 61, n. 1, p. 69–73, 1984.

TAYLOR, J. R. N.; SCHOBER, T. J.; BEAN, S. R. Novel food and non-food uses for sorghum and millets. **Journal of Cereal Science**, v. 44, n. 3, p. 252–271, 2006.

TAYLOR, J. R. N.; SCHÜSSLER, L. The protein compositions of the different anatomical parts of sorghum grain. **Journal of Cereal Science**, v. 4, n. 4, p. 361–369, 1986.

TAYLOR, J. R.; SCHÜSSLER, L.; WALT, W. H. VAN DER. Fractionation of proteins from low-tannin sorghum grain. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 32, n. 1, p. 149–154, 1984.

TESHOME, A.; BAUM, B. R.; FAHRIG, L.; et al. Sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] landrace variation and classification in North Shewa and South Welo, Ethiopia. **Euphytica**, v. 97, n. 3, p. 255–263, 1997.

THAKUR, A. K.; GUPTA, A. K. Water absorption characteristics of paddy, brown rice and husk during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 75, n. 2, p. 252–257, 2006.

TURHAN, M.; SAYAR, S.; GUNASEKARAN, S. Application of Peleg model to study water absorption in chickpea during soaking. **Journal of Food Engineering**, v. 53, n. 2, p. 153–159, 2002.

VALLONS, K. J. R.; ARENDT, E. K. Effects of high pressure and temperature on buckwheat starch characteristics. **European Food Research and Technology**, v. 230, n. 2, p. 343–351, 2009a.

VALLONS, K. J. R.; ARENDT, E. K. Effects of high pressure and temperature on the structural and rheological properties of sorghum starch. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 10, n. 4, p. 449–456, 2009b.

VASUDEVA, S.; VISHWANATHAN, K. H.; ASWATHANARAYANA, K. H.; SWAMY, Y. M. I. Hydration behaviour of food grains and modelling their moisture pick up as per Peleg's equation: Part I. Cereals. **Journal of Food Science and Technology**, v. 47, n. 1, p. 34–41, 2010.

VERMA, R. C.; PRASAD, S. Kinetics of absorption of water by maize grains. **Journal of Food Engineering**, v. 39, n. 4, p. 395–400, 1999.

VOLPE, T. C. Cinética da hidratação do grão de arroz no processo de parboilização. 122f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

WALL, J. S.; BLESSIN, C. W.; PAGE, I. Composition e Structure of Sorghum Grains. **Cereal Science Today**, v. 14, n. 8, p. 264–271, 1969.

XIE, X. J.; SEIB, P. A. Laboratory wet-milling of grain sorghum with abbreviated steeping to give two products. **Starch/Staerke**, v. 54, n. 5, p. 169–178, 2002.

XU, S. **Development and application of an automatic system for determining seed volume kinetics during soaking**, 2010. University of Tennessee.

YANG, P.; SEIB, P. A. Low-input wet-milling of grain-sorghum for readily accessible starch and animal feed. **Cereal Chemistry**, v. 72, n. 5, p. 498–503, 1995.

YANG, P.; SEIB, P. A. Wet milling of grain sorghum using a short steeping period. **Cereal Chemistry**, v. 73, n. 6, p. 751–755, 1996.

YILDIRIM, A.; ÖNER, M. D.; BAYRAM, M. Modeling of water absorption of ultrasound applied chickpeas ( *Cicer arietinum* L .) using peleg's equation. **Journal of Agricultural Science**, v. 16, n. 4, p. 278–286, 2010.

YILDIRIM, A.; ÖNER, M. D.; BAYRAM, M. Fitting Fick's model to analyze water diffusion into chickpeas during soaking with ultrasound treatment. **Journal of Food Engineering**, v. 104, n. 1, p. 134–142, 2011.

ZHU, F. Structure, physicochemical properties, modifications, and uses of sorghum starch. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 13, n. 4, p. 597-610, 2014.