

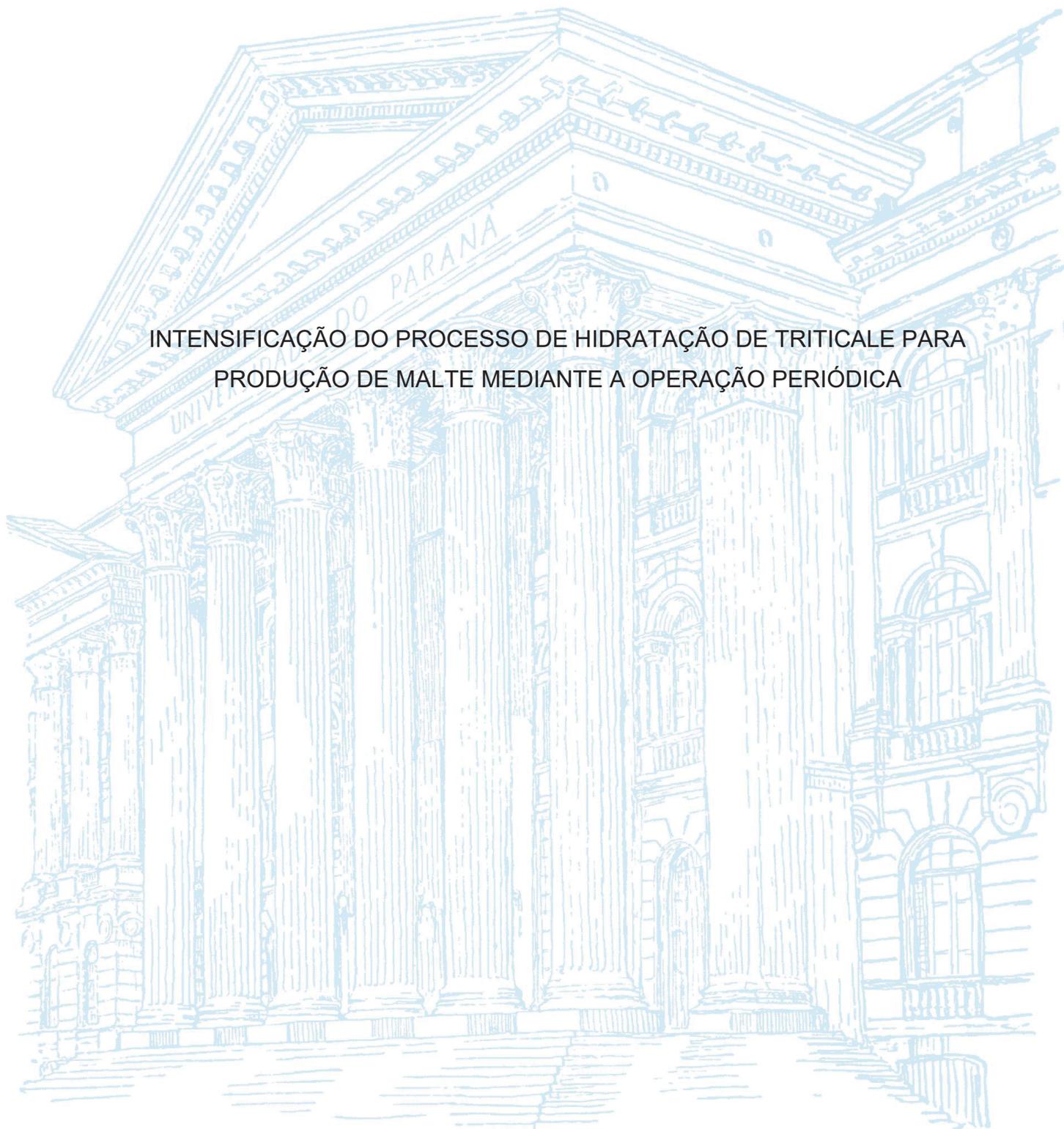
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

LUCAS CARVALHO DE OLIVEIRA

INTENSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DE TRITICALE PARA
PRODUÇÃO DE MALTE MEDIANTE A OPERAÇÃO PERIÓDICA

CURITIBA

2020



LUCAS CARVALHO DE OLIVIERA

INTENSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DE TRITICALE PARA
PRODUÇÃO DE MALTE MEDIANTE A OPERAÇÃO PERIÓDICA

Tese apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos, Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Doutor em Engenharia de Alimentos.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Regina Maria Matos Jorge

Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge

CURITIBA

2020

Catálogo na Fonte: Sistema de Bibliotecas, UFPR
Biblioteca de Ciência e Tecnologia

- O49i Oliviera, Lucas Carvalho de
 Intensificação do processo de hidratação de triticales para produção de malte mediante a operação periódica [recurso eletrônico] / Lucas Carvalho de Oliviera – Curitiba, 2020.
- Tese - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos.
- Orientadora: Profa. Dra. Regina Maria Matos Jorge
 Coorientador: Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge
1. x Tritico-secale Wittmack (Cereal). 2. Germinação. 3. Operação isotérmica. 4. Modelagem matemática. I. Universidade Federal do Paraná. II. Jorge, Regina Maria Matos. III. Jorge, Luiz Mário de Matos. IV. Título.
- CDD: 664.7

Bibliotecária: Roseny Rivelini Morciani CRB-9/1585



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA DE
ALIMENTOS - 40001016019P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ENGENHARIA DE ALIMENTOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da tese de Doutorado de **LUCAS CARVALHO DE OLIVEIRA** intitulada: **INTENSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO DE TRITICALE PARA PRODUÇÃO DE MALTE MEDIANTE A OPERAÇÃO PERIÓDICA**, sob orientação da Profa. Dra. REGINA MARIA MATOS JORGE, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de doutor está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 10 de Agosto de 2020.

Assinatura Eletrônica

10/08/2020 15:36:26.0

REGINA MARIA MATOS JORGE

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

10/08/2020 15:51:49.0

DOUGLAS JUNIOR NICOLIN

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO
PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/08/2020 16:16:41.0

ALVARO LUIZ MATHIAS

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

10/08/2020 22:45:56.0

THAISA CARVALHO VOLPE BALBINOTI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO MATO GROSSO DO
SUL)

Assinatura Eletrônica

10/08/2020 17:14:15.0

CHARLES WINDSON ISIDORO HAMINIUK

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Dedico este trabalho a todos que participaram dessa caminhada, principalmente aos meus pais Laumar e Lúcia, maiores incentivadores e fontes inesgotáveis de apoio, amor e compressão.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à minha fé que me sustentou nesta difícil jornada, me proporcionando essa vida cheia de oportunidades e obstáculos a serem vencidos.

Aos meus pais de uma forma mais que especial, visto que até hoje eles deixam de fazer suas próprias vontades para atender aos meus sonhos. Agradeço a toda minha família, em especial minhas avós Irene (*in memoriam*) e Laura, também aos familiares que me apoiaram de longe em especial minha Dinda Tânia, minhas primas Débora e Cláudia, e aqueles que me acolheram em Curitiba, meu primo Leandro e seus filhos Lucas e Liriam.

À minha orientadora Professora Regina, que foi tão humana em me conceder a confiança necessária para o desenvolvimento desse trabalho, visto que ao curto tempo que me restava se mostrou disposta a me ajudar na realização desse sonho. Estendo essa gratidão ao meu co-orientador Professor Luiz Mário de Matos Jorge quem me apoiou e me direcionou em certos momentos.

A todos os meus amigos e colegas do grupo de pesquisa de Engenharia de Processos em Sistemas Particulados (LEPSP) e do Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos (PPGEAL). Em especial, Fernanda, Chacón, Ithi, Thaisa, Andressa, Cris, Tati, Fran, Vanessa, Jéssica, Kauyse, Ivisson, Thai e a minha namorada Manu, pelo apoio, ajuda, conhecimento e muita força que me proporcionaram.

Aos coordenadores, professores e funcionários do PPGEAL e laboratórios utilizados durante a pesquisa. Em especial a professora Michele e ao secretário Rubens por toda compreensão e paciência a mim prestada.

A todos os amigos que consegui fazer ao longo desses 4 anos e meio anos em Curitiba, em especial Caio, Theo, João e Tucho.

À UFPR pela infraestrutura disponibilizada.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo subsídio para o LEPSP – Laboratório de Processos em Sistemas Particulados. À Capes, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil, pela concessão da bolsa, Código 1551248 e Financiamento 001.

À Central Analítica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos pelas análises termogravimétricas.

Ao Centro de Microscopia Eletrônica da UFPR por providenciar as imagens MEV.

Ao Iapar, na pessoa da Sra Maria Brigida dos S. Scholz pela doação das amostras.

À Cooperativa Agrária Agroindustrial de Guarapuava, na pessoa da Sra. Crislane Brazil pelas análises de qualidade do malte realizadas.

E por fim, à todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

Minha sincera gratidão!

Tu és um indivíduo entre outros 6,4 bilhões de indivíduos, pertencente a uma única espécie, entre outras 3 milhões de espécies já classificadas, que vive num planetinha, que gira em torno de uma estrelinha, que é uma entre outras 100 bilhões de estrelas compondo uma única galáxia, que é uma entre outras 200 bilhões de galáxias num dos universos possíveis que de tanto se expandir um dia irá desaparecer...

Quem és tu?

(Mario Sergio Cortella, 2010)

RESUMO

O triticale é a primeira espécie de cereal híbrido originária entre o trigo e o centeio. O presente trabalho teve como objetivo avaliar a cinética de hidratação de triticale (cultivares IPR 111 e IPR Aimoré), mediante a operação periódica com a modulação da temperatura, comparada à operação isotérmica convencional, visando a produção de malte. Concorrentemente, foram observadas alterações da estrutura morfológica dos grânulos de amido e o processo de germinação ao longo do tempo (fases) de hidratação. Para entender a dinâmica do processo de hidratação foram empregados os modelos de Peleg, Difusão e Omoto-Jorge. A hidratação isotérmica foi realizada nas temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C e a operação periódica foi realizada com a amplitude de 10 °C e período de 30 min. Mediante o ajuste dos modelos aos dados foi constatado que a elevação da temperatura proporciona um aumento na taxa de transferência de água no grão, sendo que o processo de hidratação é intensificado com a utilização da operação periódica. O modelo de Difusão apresentou os melhores resultados de qualidade do ajuste (R^2 , P e $RMSE$). As propriedades termodinâmicas indicam um processo energeticamente não espontâneo e endotérmico para ambos os cultivares. As melhores condições experimentais para a germinação do triticale foram: cultivar IPR 111, hidratado tanto no processo isotérmico quanto no periódico, nos menores níveis de temperatura (20 °C ou 10-30 °C) e nos tempos de 660 min (Fases II) e 900 min (Fase III). A hidratação até 660 min proporcionou uma economia de aproximadamente 27% no tempo requerido quando comparado a 900 min. A aplicação da operação periódica (P30-A10) precisou de 540 min para atingir a umidade equivalente a 37,94% na hidratação isotérmica à 20 °C (660 min), representando uma economia de 18% no tempo requerido. Além disso, a utilização diferentes períodos e amplitudes (P10-A5; P16-A10; P24-A15) foi favorecida com o aumento da amplitude, visto que a combinação de P24-A15 reduziu o consumo energético da operação em 27,27% em relação a isotérmica a 20 °C (660 min). Os resultados do malte de triticale o caracterizam como malte especial, do qual pode ser aplicado na fabricação de cervejas escuras ou ainda na formulação de diferentes tipos de alimentos. A redução no tempo de hidratação demonstra que operação periódica é uma estratégia altamente promissora para a intensificação do processo de hidratação de triticale.

Palavras-chave: *x Triticosecale* Wittmack. Modulação da temperatura. Operação isotérmica. Modelagem matemática. Germinação.

ABSTRACT

Triticale is the first man-made cereal grain crop species originated between wheat and rye. The present work has aimed to evaluate hydration kinetics of triticale (IPR 111 and IPR Aimoré cultivars), under periodic operation with the temperature modulation, compared to conventional isothermal operation, to obtain the malt from triticale. Concomitantly it was observed morphological changes of starch granules structure and germination process of cultivates throughout hydration time (phases). To understand the hydration process dynamics, Peleg, Diffusion and Omoto-Jorge models were used. The isothermal hydration was evaluated at temperatures of 20, 30, 40 and 50 °C and the periodic operation was used with a thermal amplitude of 10 °C and period at 30 min. Through the models adjusted to the data was observed that the rise in the temperature provides a higher water transfer rate to the grain which was intensified by using periodic operation. The Diffusion model has shown better results obtained with regard to the fitting quality (R^2 , P and $RMSE$). The thermodynamic properties dictate a not spontaneous and endothermic process for both cultivars. The best experimental conditions to triticale germination were: IPR 111 cultivar, hydrated both of isothermal and periodic process, at lowest levels of temperature (20 °C or 10-30 °C) and in the times 660 min (Phase II) and 900 min (Phase III). The hydration up 660 min provided economy of 27% in the time required when compared to 900 min. The application of periodic operation (P30-A10) needed 540 min to achieve the moisture equivalent 37.94% to isotherm at 20 °C (660 min), representing an economy of 18% at the required time. Furthermore, the use of different periods and amplitudes (P10-A5; P16-A10; P24-A15) was favored with the increase in amplitude, since the combination of P24-A15 reduced the energy consumption of the operation by 27.27% in relation to isotherm at 20 °C (660 min). The triticale malt results it characterizes as special malt, which can be applied in the dark beer manufacturing or yet being used in the formulation of different types of food. This reduction in hydration time shows that periodic operation is a highly promising strategy to improve the grain hydration process.

Keywords: *x Triticosecale* Wittmack. Temperature modulation. Isothermal operation. Mathematical modeling. Germination.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 2.1 – PRODUÇÃO MUNDIAL DE TRITICALE DE 2004 A 2018.....	33
FIGURA 2.2 – PRODUÇÃO NACIONAL DE TRITICALE DE 2004 A 2020.....	34
FIGURA 2.3 – CORTE DA SESSÃO RADIAL DO TRIGO E DO TRITICALE E AS PRINCIPAIS PARTES QUE COMPÕEM OS GRÃOS.....	35
FIGURA 2.4 – ILUSTRAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO BIMODAL DOS GRÂNULOS DE AMIDO PRESENTE NO ENDOSPERMA DO GRÃO TRITICALE.	38
FIGURA 2.5 – MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A PARTIR DA CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	56
FIGURA 2.6 – MODULAÇÃO DA PRESSÃO DO SISTEMA NA OPERAÇÃO DE SECAGEM.	57
FIGURA 2.7 – ILUSTRAÇÃO DA MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA DE HIDRATAÇÃO PARA A OPERAÇÃO PERIÓDICA, A PARTIR DA ISOTÉRMICA.....	59
FIGURA 2.8 – MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA DE HIDRATAÇÃO COM DUAS COMBINAÇÕES DE AMPLITUDE E PERÍODO.....	60
FIGURA 2.9 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA OPERAÇÃO PERIÓDICA COM O PERÍODO DE 30 MIN E AMPLITUDE DE 10 °C, EM TORNO DA ISOTÉRMICA DE 30 °C.....	61
FIGURA 3.1 – AMOSTRAS DE TRITICALE: CULTIVARES IPR 111 (A) E IPR AIMORÉ (B).	71
FIGURA 3.2 – DIAGRAMA SEQUENCIAL DAS PRINCIPAIS ETAPAS DESENVOLVIDAS NO ESTUDO.....	72
FIGURA 3.3 – INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL UTILIZADA NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	78
FIGURA 3.4 – REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DA MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.	80
FIGURA 3.5 – REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DAS DIFERENTES COMBINAÇÕES DE PERÍODO E AMPLITUDE ESTIPULADAS PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	85
FIGURA 4.1 – ESTRUTURA DO GRÃO DE TRITICALE MEDIANTE UM (A) CORTE TRANSVERSAL (AUMENTO DE 40x) EVIDENCIANDO AS SUAS PRINCIPAIS PARTES, COM ÊNFASE PARA O (B) PERICARPO E A ALEURONA (AUMENTO DE 500x) E (C) A MICRÓPILA E O GERME (AUMENTO DE 120x).	95
FIGURA 4.2 – ESTRUTURA DO GRÃO DE TRITICALE MADIANTE UM CORTE ORTOGONAL RADIAL (AUMENTO DE 100x) E OS GRÂNULOS DE AMIDO EXTRAÍDOS DOS CULTIVARES, COM AMPLIAÇÃO SEQUENCIAL DE 300x, 1000x e 3000x.....	97
FIGURA 4.3 – EFEITO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO AMIDO EXTRAÍDO DO CULTIVAR IPR 111.	98

FIGURA 4.4 – EFEITO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO AMIDO EXTRAÍDO DO CULTIVAR IPR AIMORÉ.	99
FIGURA 4.5 – COMPORTAMENTO CINÉTICO E IDENTIFICAÇÃO DAS FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.....	101
FIGURA 4.6 – COMPORTAMENTO CINÉTICO E IDENTIFICAÇÃO DAS FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.....	102
FIGURA 4.7 – COMPORTAMENTO CINÉTICO E IDENTIFICAÇÃO DAS FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	102
FIGURA 4.8 – COMPORTAMENTO CINÉTICO E IDENTIFICAÇÃO DAS FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	103
FIGURA 4.9 – VARIAÇÃO DO VOLUME DO CULTIVAR IPR 111 DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA.	107
FIGURA 4.10 – VARIAÇÃO DO VOLUME DO CULTIVAR IPR AIMORÉ DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA.	107
FIGURA 4.11 – VARIAÇÃO DO VOLUME DO CULTIVAR IPR 111 DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	108
FIGURA 4.12 – VARIAÇÃO DO VOLUME DO CULTIVAR IPR AIMORÉ DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	108
FIGURA 4.13 – ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO AMIDO DO CULTIVAR IPR 111, EXTRAÍDO NAS DIFERENTES FASES E PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO, COM O AUMENTO DE IMAGEM EM 3000x.	110
FIGURA 4.14 – ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO AMIDO DO CULTIVAR IPR AIMORÉ, EXTRAÍDO NAS DIFERENTES FASES E PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO, COM O AUMENTO DE IMAGEM EM 3000x. .	112
FIGURA 4.15 – MONITORAMENTO DO MECANISMO DE TRANSPORTE DE ÁGUA PARA O GRÃO AO LONGO DA HIDRATAÇÃO, MEDIANTE AO EMPREGO DE UM AGENTE TRAÇADOR.	115
FIGURA 4.16 – AJUSTE DO MODELO DE PELEG PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	116
FIGURA 4.17 – AJUSTE DO MODELO DE PELEG PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	117
FIGURA 4.18 – AJUSTE DO MODELO DE PELEG PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	117
FIGURA 4.19 – AJUSTE DO MODELO DE PELEG PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	118
FIGURA 4.20 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	121
FIGURA 4.21 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	121

FIGURA 4.22 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	122
FIGURA 4.23 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	122
FIGURA 4.24 – AJUSTE DO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	124
FIGURA 4.25 – AJUSTE DO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	125
FIGURA 4.26 – AJUSTE DO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	125
FIGURA 4.27 – AJUSTE DO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	126
FIGURA 4.28 – PREVISÃO DO AJUSTE DO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	132
FIGURA 4.29 – PREVISÃO DO AJUSTE DO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	132
FIGURA 4.30 – PREVISÃO DO AJUSTE DO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	133
FIGURA 4.31 – PREVISÃO DO AJOSTE DO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	133
FIGURA 4.32 – RELAÇÃO DOS VALORES DE UMIDADE EXPERIMENTAL COM OS PREVISTOS PELO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	134
FIGURA 4.33 – RELAÇÃO DOS VALORES DE UMIDADE EXPERIMENTAL COM OS PREVISTOS PELO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.	134
FIGURA 4.34 – RELAÇÃO DOS VALORES DE UMIDADE EXPERIMENTAL COM OS PREVISTOS PELO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	135
FIGURA 4.35 – RELAÇÃO DOS VALORES DE UMIDADE EXPERIMENTAL COM OS PREVISTOS PELO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.	135
FIGURA 4.36 – ANÁLISE DO EFEITO DAS TEMPERATURAS DE HIDRATAÇÃO SOBRE: (a) CULTIVARES, (b) PROCESSOS, E (c) FASES, NA ENERGIA DE GERMINAÇÃO.	142
FIGURA 4.37 – EFEITO DOS CULTIVARES SOBRE AS DIFERENTES FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O ÍNDICE DE GERMINAÇÃO.	144

- FIGURA 4.38 – MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DE HIDRATAÇÃO DOS GRÃOS E COMPARAÇÃO DO GANHO DE UMIDADE ENTRE OS PROCESSOS ISOTÉRMICO (20 °C) E PERIÓDICO (10-30 °C) PARA O CULTIVAR IPR 111: (a) 900 MIN E (b) 660 MIN..... 145
- FIGURA 4.39 – MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DE HIDRATAÇÃO DOS GRÃOS E COMPARAÇÃO DO GANHO DE UMIDADE EM DIFERENTES COMBINAÇÕES DE PERÍODO E AMPLITUDE, PARA O CULTIVAR IPR 111: (a) PERÍODO 10 MIN E AMPLITUDE 5 °C, (b) PERÍODO 16 MIN E AMPLITUDE 10 °C E (c) PERÍODO 24 MIN E AMPLITUDE 15 °C..... 148
- FIGURA 4.40 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 NOS PROCESSOS ISOTÉRMICO (I20) E PERIÓDICO (P30-A10, P16-A10, P10-A5 E P24-A15), POR 660 MIN. 153
- FIGURA 4.41 – ETAPAS DO PROCESSO DE MALTEÇÃO DO TRITICALE. 156
- FIGURA 4.42 – COMPARATIVO ENTRE A ESTRUTURA DO GRÃO DE TRITICALE *IN NATURA* (A) E DO GRÃO MALTADO (B) (AUMENTO DE 30x): ÊNFASE PARA A REGIÃO DO GERME (A1 e B1) (AUMENTO DE 60x) E O ENDOSPERMA (A2 e B2) (AUMENTO DE 1000x). 158

LISTA DE QUADROS

QUADRO 2.1 – AS PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TRITICALE NOS ÚLTIMOS ANOS APLICADA NA ELABORAÇÃO DE FILMES. 41	
QUADRO 2.2 – AS PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TRITICALE NOS ÚLTIMOS ANOS APLICADA A PRODUÇÃO DE ALIMENTOS PARA O CONSUMO HUMANO.....	43
QUADRO 2.3 – AS PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TRITICALE NOS ÚLTIMOS ANOS APLICADA A PRODUÇÃO DE MALTE E FERMENTAÇÃO.	46
QUADRO 2.4 – ESTUDOS RELACIONADOS A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA EM CEREAIS E LEGUMINOSAS NOS ÚLTIMOS ANOS.....	52

LISTA DE TABELAS

TABELA 2.1 – COMPOSIÇÃO CENTENSIMAL MÉDIA DOS GRÃOS DE TRITICALE E SEUS PARENTAIS <i>IN NATURA</i>	36
TABELA 3.1 – TEMPO DE COLETA DOS GRÃOS DE TRITICALE DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO POR ANÁLISE.....	80
TABELA 4.1 – COMPOSIÇÃO CENTENSIMAL <i>IN NATURA</i> DOS CULTIVARES AVALIADOS E OS VALORES DE REFERÊNCIA, EXPRESSOS EM BASE ÚMIDA.....	91
TABELA 4.2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS CULTIVARES DE TRITICALE <i>IN NATURA</i>	93
TABELA 4.3 – PROPRIEDADES DE GELATINIZAÇÃO DO AMIDO DOS CULTIVARES.....	100
TABELA 4.4 – QUANTIDADE DE ÁGUA ABSORVIDA NOS DIFERENTES PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO PARA CADA FASES E UMIDADE FINAL OBTIDA PARA OS CULTIVARES AVALIADOS.	105
TABELA 4.5 – PARÂMETROS E ERROS OBTIDOS PARA O MODELO DE PELEG NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE HIDRATAÇÃO.	118
TABELA 4.6 – PARÂMETROS E ERROS OBTIDOS PARA O MODELO DE DIFUSÃO NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE HIDRATAÇÃO.	123
TABELA 4.7 – PARÂMETROS E ERROS OBTIDOS PARA O MODELO DE OMOTO-JORGE NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE HIDRATAÇÃO.....	126
TABELA 4.8 – PARÂMETROS DE QUALIDADE OBTIDOS PARA OS MODELOS DE PELEG, DIFUSÃO E OMOTO-JORGE NOS DIFERENTES PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO.	129
TABELA 4.9 – DEPENDÊNCIA DO PARÂMETRO DO MODELO DE DIFUSÃO (<i>Def</i>) COM A TEMPERATURA DE HIDRATAÇÃO, POR MEIO DA EQUAÇÃO DE ARRHENIUS.	130
TABELA 4.10 – PARÂMETROS DE QUALIDADE DO AJUSTE DOS MODELOS GENERALIZADO DE DIFUSÃO NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE HIDRATAÇÃO.....	136

TABELA 4.11 – ENERGIA DE ATIVAÇÃO E OS PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA PARA OS CULTIVARES DE TRITICALE.....	137
TABELA 4.12 – VALORES PARA A ENERGIA DE GERMINAÇÃO NAS TRÊS FASES DE HIDRATAÇÃO DOS CULTIVARES, EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA.....	140
TABELA 4.13 – VALORES PARA O ÍNDICE DE GERMINAÇÃO NAS TRÊS FASES DE HIDRATAÇÃO DOS CULTIVARES, EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA.....	140
TABELA 4.14 – COMPARAÇÃO DA UMIDADE FINAL E DA GERMINAÇÃO DO IPR 111 PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO AVALIADAS.....	151
TABELA 4.15 – PARÂMETRO, ERRO E QUALIDADE DE AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA (20 °C) E AS DIFERENTES COMBINAÇÕES DE PERÍODO E AMPLITUDE PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA (P30-A10, P16-A10, P10-A5 E P24-A15).	154
TABELA 4.16 – COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO CENTENSIMAL DO CULTIVAR IPR 111 <i>IN NATURA</i> E MALTADO, EXPRESSOS EM BASE ÚMIDA.....	157
TABELA 4.17 – ANÁLISE DA QUALIDADE DO MALTE E DO MOSTO CONGRESSO DE TRITICALE.	160

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Anvisa	-	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
ANOVA	-	Teste de Análise de Variância
AOAC	-	Association of Official Analytical Chemists
Cimmyt	-	Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo
CME	-	Centro de Microscopia Eletrônica
Conab	-	Companhia Nacional de Abastecimento
DSC	-	Calorimetria Exploratória Diferencial
EBC	-	European Brewery Convention
Embrapa	-	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPM	-	Escola Paulista de Medicina
FAO	-	Organização das Nações Unidas para Agricultura e Alimentação
FAN	-	Nitrogênio Amido Livre
IAC	-	Instituto Agrônomo de São Paulo
IAL	-	Instituto Adolfo Lutz
Iapar	-	Instituto Agrônomo do Paraná
ISO	-	International Organization for Standardization
LEPSP	-	Laboratório de Engenharia de Processos em Sistemas Particulados
LQAA	-	Laboratório de Química Analítica Aplicada
MEBAK	-	Middle European Brewery Commission
MEV	-	Microscopia Eletrônica de Varredura
Senai	-	Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial
TGA	-	Análise Termogravimétrica
UEPG	-	Universidade Estadual de Ponta Grossa
UFPR	-	Universidade Federal do Paraná
Unipampa	-	Universidade Federal do Pampa
Unifesp	-	Universidade Federal de São Paulo
USAD	-	National Nutrient Database for Standard Reference

LISTA DE SÍMBOLOS

τ	Período (soma dos ciclos quente e frio – operação periódica)	(min)
\emptyset	Esfericidade	(%)
ρ_A	Concentração de água em função do tempo	(kg m ⁻³)
ρ_{Aeq}	Concentração de água no equilíbrio	(kg m ⁻³)
ρ_{A0}	Concentração de água inicial	(kg m ⁻³)
ρ_{real_liq}	Massa específica real – Picnometria líquida	(kg m ⁻³)
ρ_{real_gas}	Massa específica real – Picnometria por gás Hélio	(kg m ⁻³)
$\rho_{aparente}$	Massa específica aparente	(kg m ⁻³)
ε	Porosidade intergranular	(-)
A	Amplitude	(°C)
A_0	Fator de frequência (constante de Arrhenius)	(m ² s ⁻¹)
$A_{partícula}$	Área superficial da partícula	(m ²)
a	Comprimento longitudinal	(mm)
b	Comprimento transversal	(mm)
c	Comprimento circunferencial	(mm)
E_a	Energia de ativação	(J mol ⁻¹)
EG	Energia de Germinação	(%)
IG	Índice de Germinação	(-)
D_{ef}	Parâmetro do modelo de Difusão	(m ² s ⁻¹)
k	Parâmetro geral dos modelos sensíveis a temperatura	(m ² s ⁻¹)
k_1	Parâmetro do modelo de Peleg	(min % ⁻¹)
k_2	Parâmetro do modelo de Peleg	(% ⁻¹)
k_s	Parâmetro do modelo de Omoto-Jorge	(m s ⁻¹)
$m_{40grãos}$	Massa de sólido de 40 grãos	(kg)
$m_{sólido}$	Massa de sólidos dos grãos	(kg)
N_A	Fluxo mássico	(kg m ⁻² min ⁻¹)
n	N° de termos da série utilizado no modelo de difusão	(-)
nn	N° de observações experimentais	(-)
P_{mf}	Platô para a moagem fina	(°P)
P_{mg}	Platô para a moagem grossa	(°P)
P_g	Leitura do grau de Platô no sacarômetro	(°P)
P	Erro médio relativo	(%)

R^2	Coeficiente de determinação	(-)
$RMSE$	Raiz quadrada média do erro	(%)
R	Constante universal dos gases	(J mol ⁻¹ K ⁻¹)
RU	Razão de umidade	(-)
r	Raio inicial da partícula	(m)
rm	Raio médio da partícula	(m)
R_{mf}	Rendimento da moagem fina	(%)
R_{mg}	Rendimento da moagem grossa	(%)
S_s	Parâmetro de referência do sacarômetro	(°P)
S	Split (razão entre os semiperíodos – operação periódica)	(-)
T	Temperatura absoluta	(K)
T_c	Temperatura do ciclo frio	(°C)
T_h	Temperatura do ciclo quente	(°C)
T_i	Temperatura isotérmica	(°C)
T_{ig}	Temperatura inicial da gelatinização	(°C)
T_{pg}	Temperatura do pico da gelatinização	(°C)
T_{fg}	Temperatura final da gelatinização	(°C)
T_1	Temperatura de operação referente ao ciclo frio	(°C)
T_2	Temperatura de operação referente ao ciclo quente	(°C)
ΔT	Varição da faixa de temperatura da gelatinização	(°C)
t	Tempo	(min ou s)
U	Concentração de umidade	(%)
U_{malte}	Umidade do malte	(%)
$U_{(eq)}$	Umidade de equilíbrio	(%)
$U_{(t)}$	Umidade em função do tempo	(%)
U_0	Umidade inicial	(%)
V	Volume da partícula	(m ³)
$V_{deslocado}$	Volume deslocado na proveta	(m ³)
$V_{comporos}$	Volume considerando os poros do grão	(m ³)
$V_{semporos}$	Volume desconsiderando os poros do grão	(m ³)
ΔH_g	Varição da entalpia de gelatinização	(J g ⁻¹)
ΔH	Varição da entalpia	(kJ mol ⁻¹)
ΔS	Varição da entropia	(kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)
ΔG	Varição da energia livre de Gibbs	(kJ mol ⁻¹)

h_p	Constante de Planck	(J s)
k_b	Constante de Boltzmann	(J K ⁻¹)
$X_{e_{exp}}$	Valores observados experimentalmente	(-)
$X_{e_{pre}}$	Valores preditos pelos modelos	(-)
I20	Hidratação isotérmica a 20 °C	(-)
P30-A10	Hidratação periódica com período de 30 min e amplitude de 10 °C	(-)
P10-A5	Hidratação periódica com período de 10 min e amplitude de 5 °C	(-)
P16-A10	Hidratação periódica com período de 16 min e amplitude de 10 °C	(-)
P24-A15	Hidratação periódica com período de 24 min e amplitude de 15 °C	(-)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	24
1.1. OBJETIVO GERAL	26
1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	26
1.3. DIAGRAMA VISUAL DO TRABALHO DE DOUTORADO	28
2. REVISÃO DE LITERATURA	29
2.1. TRITICALE – ASPECTOS GERAIS	29
2.1.1. Visão Histórica do Triticale	30
2.1.2. Classificação do Triticale	31
2.1.3. Panorama de Produção Mundial e Nacional de Triticale	32
2.1.4. Estrutura Morfológica e Composição Nutricional do Triticale	35
2.1.5. Aplicação e Utilização do Triticale	40
2.2. PRODUÇÃO E QUALIDADE DO MALTE	47
2.3. HIDRATAÇÃO DE GRÃOS	50
2.3.1. Processo de Hidratação Isotérmica	52
2.3.2. Intensificação do Processo – Hidratação Periódica	55
2.4. CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO A PARTIR DE MODELOS MATEMÁTICOS	61
2.4.1. Modelo Empírico de Hidratação – Modelo de Peleg	62
2.4.2. Modelos Fenomenológicos de Hidratação	64
2.4.2.1. Modelo de Difusão	64
2.4.2.2. Modelo de Omoto-Jorge	67
2.5. CONSIDERAÇÕES GERAIS	69
3. MATERIAL E MÉTODOS	71
3.1. MATÉRIA-PRIMA E SÍNTESE ORGANIZACIONAL DOS EXPERIMENTOS	71
3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS <i>IN NATURA</i>	72
3.2.1. Análise Físico-Química dos Cultivares	73
3.2.2. Análise Física dos Cultivares	73
3.2.3. Análise Estrutural dos Cultivares	75
3.2.4. Análises Térmicas do Amido dos Cultivares	76
3.3. PROCESSO DE HIDRATAÇÃO POR IMERSÃO	77
3.3.1. Dispositivos Experimentais de Hidratação	77
3.3.2. Procedimento Experimental para a Hidratação	80
3.3.3. Regime de Hidratação	81
3.3.4. Modelagem Matemática dos Processos de Hidratação	82
3.3.5. Qualidade do Ajuste dos Modelos	82

3.3.6. Propriedades Termodinâmicas do Processo.....	83
3.4. ANÁLISE DE GERMINAÇÃO DO TRITICALE	83
3.5. AVALIAÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO DA OPERAÇÃO PERIÓDICA.....	85
3.6. PARÂMETROS DE QUALIDADE DO MALTE DE TRITICALE	86
3.6.1. Caracterização dos Grãos de Triticale Maltados.....	86
3.6.2. Análise do Mosto Congresso.....	88
3.7. ANÁLISES ESTATÍSTICAS	90
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	91
4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS CULTIVARES.....	91
4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS CULTIVARES.....	93
4.3. MORFOLOGIA DO GRÃO E DOS GRÂNULOS DE AMIDO <i>IN NATURA</i> DO TRITICALE	95
4.4. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO AMIDO DOS CULTIVARES <i>IN NATURA</i> ..	98
4.5. ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA.....	101
4.5.1. Cinética de Hidratação e Identificação das Fases.....	101
4.5.2. Variação do Volume dos Cultivares	106
4.5.3. Avaliação Morfológica dos Grânulos de Amido ao Longo das Fases de Hidratação	109
4.5.4. Avaliação do Transporte de Água ao Longo do Regime de Hidratação	115
4.6. AJUSTE DOS MODELOS EMPÍRICO E FENOMENOLÓGICOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA HIDRATAÇÃO DO TRITICALE	116
4.6.1. Ajuste do Modelo de Peleg.....	116
4.6.2. Ajuste do Modelo de Difusão.....	121
4.6.3. Ajuste do Modelo de Omoto-Jorge	124
4.6.4. Análise da Qualidade do Ajuste dos Modelos	127
4.7. AVALIAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO	130
4.8. PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DO PROCESSO.....	137
4.9. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO NA GERMINAÇÃO DOS CULTIVARES.....	139
4.10. AVALIAÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO DA OPERAÇÃO PERIÓDICA.....	144
4.11. CARACTERIZAÇÃO DO MALTE DE TRITICALE	156
4.11.1. Caracterização Físico-química dos Grãos de Triticale Maltados.....	157
4.11.2. Caracterização Morfológica dos Grãos de Triticale Maltados	158
4.11.3. Caracterização do Parâmetro de qualidade dos Grãos de Triticale Maltados.....	159
5. CONCLUSÕES	165
REFERÊNCIAS.....	168

1. INTRODUÇÃO

A busca por uma alimentação mais saudável e o crescimento da população mundial têm estimulado a pesquisa para a elaboração de novos produtos. Tal fato tem sido direcionado principalmente aos produtos de origem vegetal, como cereais e leguminosas, uma vez que estas classes apresentam uma grande diversidade que ainda pode ser explorada. Dentre os grãos cereais, o triticale (*x Triticosecale* Wittmack), primeira espécie de cereal desenvolvido a partir do cruzamento sintético entre o trigo (*Triticum* spp.) e o centeio (*Secale cereale* L) (Baier, 1986; Oettler, 2005; McGoverin et al. 2011), destaca-se como cereal com potencial para novas aplicações.

Os primeiros relatos sobre um possível cruzamento dos progenitores de linhagens diferentes (trigo e centeio) foram descritos na Alemanha em 1876, mas só no ano de 1883 nos Estados Unidos foi possível o desenvolvimento do primeiro híbrido fértil de triticale (Ammar; Mergoum; Rajaram, 2004; Nascimento Junior et al. 2008). O desenvolvimento do triticale foi impulsionado visando combinar os atributos positivos das espécies parentais, devido à alta produtividade e valor nutricional do trigo e à tolerância às condições adversas para o cultivo advindos do centeio (Oettler, 2005; McGoverin et al. 2011; Zhu, 2018). No entanto, a qualidade inferior de glúten, a coloração escura e o menor rendimento de moagem da farinha produzida pelo triticale, impuseram limitações para a utilização desse cereal na indústria de panificação, destinando-o quase em sua totalidade à alimentação animal (Marciniak; Obuchowski; Makowska, 2008).

A importância nutricional favorável e os altos índices de germinação propiciam o uso do triticale na elaboração de produtos que não careçam primordialmente da qualidade do glúten e do rendimento da farinha, como por exemplo, a germinação e a elaboração de malte. A produção de malte depende basicamente de três etapas (hidratação, germinação e secagem), as quais devem garantir a máxima produção de enzimas para a hidrólise do amido e das proteínas presentes no grão, bem como a formação características de cor, aroma e sabor, sendo de fundamental importância para elevar as qualidades nutricionais e sensoriais de diversos produtos, como bebidas (chás, cafés, cervejas e uísques) e alimentos (pães, bolos, biscoitos, cereais matinais, comidas infantis, entre outros) (Schmitt e Marinac, 2007; Lima, 2010; Miano e Augusto, 2018).

Os grãos são colhidos e mantidos com baixo teor de umidade para prolongar a vida útil durante o armazenamento. Posteriormente, para que os grãos sejam consumidos ou processados, como é o caso do processo de germinação, há necessidade de hidratá-los para aumentar o teor de umidade, visando ativar as reações bioquímicas relacionadas ao metabolismo do grão (Bewley e Black, 1978; Beckert et al. 2000; Miano e Augusto, 2018). Logo, a etapa de hidratação torna-se a operação de maior interesse nesse estudo, uma vez que as condições aplicadas no processo de hidratação do triticales são desconhecidas até o presente momento. Além disso, atualmente as condições industriais aplicadas na hidratação de grãos torna-a um processo que pode levar muitas horas e com uma grande demanda de água, sendo desejável avaliar tecnologias alternativas com o intuito de intensificar o processo de hidratação, possibilitando diminuir o tempo e o volume de água utilizado durante a aplicação dessa operação.

A modelagem matemática ajuda a entender a operação de hidratação mediante o uso de modelos, avaliando o comportamento de absorção de água dos grãos a partir dos parâmetros que compõem os modelos.

Estes modelos são uma ferramenta necessária para descrever, interpretar e identificar as melhores condições operacionais, de forma rápida e eficiente para a indústria de alimentos (Montanuci; Jorge; Jorge, 2013; Marques; Jorge; Jorge, 2014; Nicolin et al. 2015). Adicionalmente, há a necessidade de se observar os efeitos das variáveis: tempo, temperatura e umidade; nas transformações que ocorrem na estrutura morfológica do material, sendo que as alterações das propriedades físico-químicas e bioquímicas acontecem em paralelo à difusão de água nos grãos.

Conhecer as alterações ocasionadas pelas diferentes condições utilizadas na operação de hidratação, auxilia na compreensão dos fenômenos envolvidos, na futura otimização do processo para o controle de qualidade do produto. Diante disso, estudos relacionados aos grãos de triticales são essenciais, visto que esse cereal possui uma boa composição nutricional no que diz respeito às proteínas e os carboidratos para ser utilizado na alimentação humana. Além disso, não foram encontradas na literatura abordagens referentes ao comportamento cinético de hidratação no triticales, sendo importante avaliar a influência das variáveis tempo e temperatura no ganho de umidade e no processo de germinação.

Além de compreender o processo de absorção de água, este projeto visou também observar o ganho de umidade dos grãos a partir de um processo caracterizado por manter o sistema em operação periódica. No presente estudo a temperatura foi modulada na forma de ondas quadradas. Considerando que o processo é não linear, o sistema pode alcançar maior eficiência no ganho de umidade do material quando comparado ao método convencional, possibilitando reduzir o tempo de hidratação, aumentando a capacidade de processamento e diminuindo o consumo energético da operação (Silveston, 1998; Silveston e Hugins, 2013; Mattioda; Jorge; Jorge, 2019).

Sendo a hidratação uma etapa que antecede a germinação, essa operação foi investigada em diferentes condições de temperatura a partir das operações isotérmica e periódica, a fim de observar a intensificação do processo de hidratação mediante a operação periódica com a modulação da temperatura, para posterior produção de malte. Foram avaliadas as possíveis alterações da estrutura morfológica dos grânulos de amido dos cultivares ao longo da hidratação. Além disso, o modelo empírico (Peleg) e os modelos fenomenológicos (Difusão e Omoto-Jorge) foram empregados para compreender a dinâmica do processo. O trabalho também buscou correlacionar as características do grão e do malte, visando potencializar o uso do malte de triticales em bebidas ou produtos alimentícios.

1.1. OBJETIVO GERAL

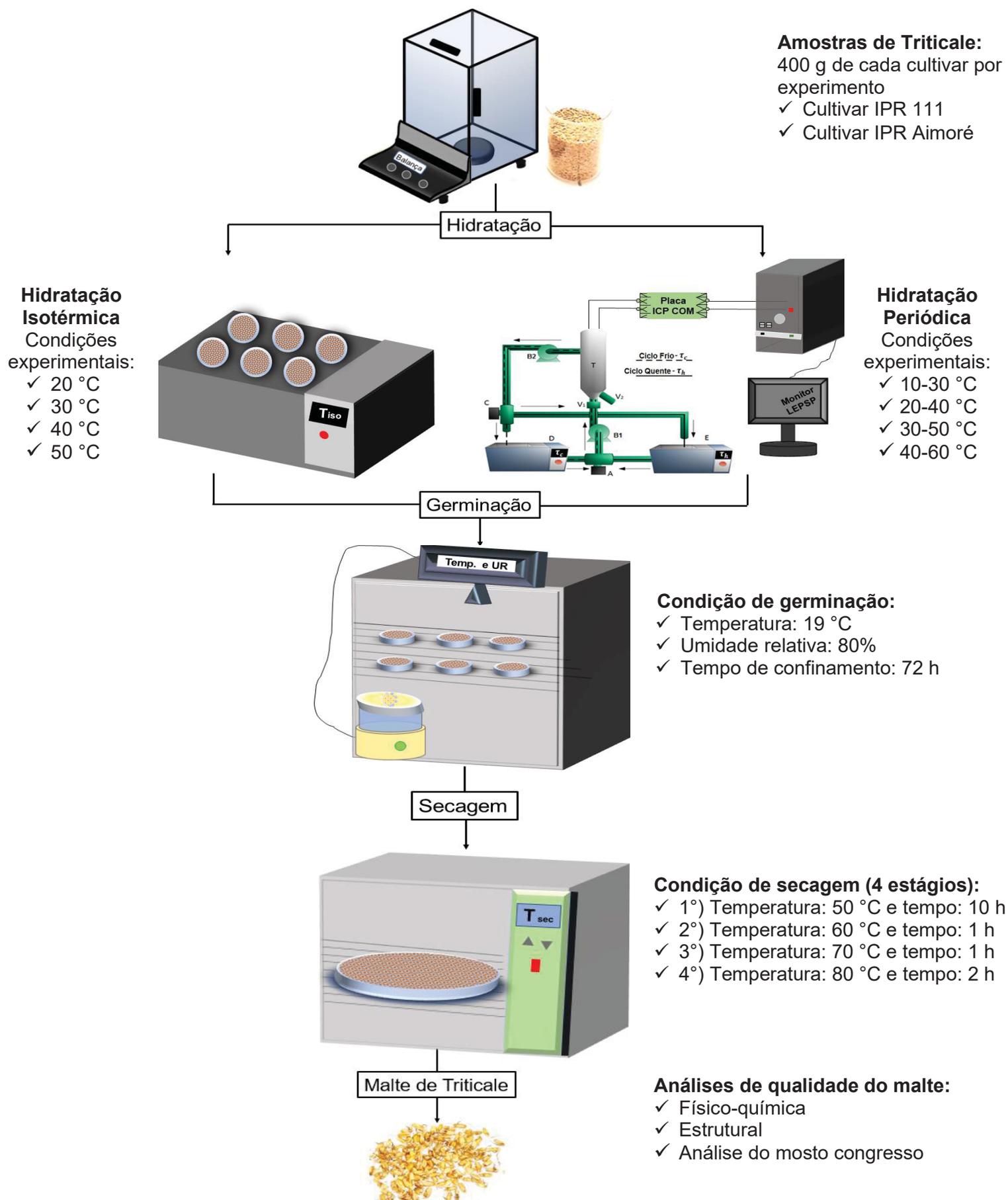
Estudar o processo de hidratação do triticales (*x Triticosecale* Wittmack), mediante a operação periódica e isotérmica para a produção de malte.

1.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar os cultivares (IPR 111 e IPR Aimoré) de triticales *in natura* quanto às suas propriedades físico-química, física, morfológica e termogravimétricas;
- Estudar a cinética de hidratação isotérmica e hidratação periódica dos grãos em diferentes temperaturas, avaliando a absorção de água, variação de volume e morfologia dos cultivares;
- Comparar a hidratação isotérmica e periódica, em função do consumo de energia e tempo requerido, para se atingir um teor de umidade especificado;

- Investigar o mecanismo de transferência de massa durante o regime de hidratação do grão com o uso de um agente traçador;
- Avaliar a capacidade dos modelos cinéticos, empírico de Peleg e fenomenológicos de Difusão e Omoto-Jorge para descrever o comportamento experimental da absorção de água dos grãos de triticales;
- Selecionar o modelo que melhor representa o processo de hidratação isotérmica e periódica e obter sua forma generalizada;
- Estimar a energia de ativação e as propriedades termodinâmicas (Entropia, Entalpia e Energia Livre de Gibbs) do processo de hidratação isotérmica e periódica do triticales;
- Avaliar a influência do tempo e temperatura na energia de germinação e no índice de germinação dos cultivares;
- Obter a melhor combinação de período e amplitude utilizados na operação periódica para a hidratação do triticales;
- Estabelecer a melhor condição das variáveis: fases (tempo), processos, cultivares e temperatura, para a produção do malte;
- Realizar a caracterização do malte de triticales: físico-química, morfológica e parâmetros de qualidade.

1.3. DIAGRAMA VISUAL DO TRABALHO DE DOUTORADO



2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão da literatura está dividida em tópicos. Inicialmente é abordado o triticales, relatando sobre seus aspectos gerais e aplicações. O segundo tópico aborda a produção e a qualidade do malte. O terceiro tópico enfatiza o processo de hidratação de grãos e sementes a partir dos métodos de operação isotérmica e periódica. O quarto tópico ressalta a importância da cinética de hidratação a partir de modelos empírico e fenomenológico. E por fim, finaliza-se a revisão com as considerações gerais desta seção.

2.1. TRITICALE – ASPECTOS GERAIS

O triticales (*X tritico-secale* Wittmack) é a primeira espécie de cereal sintética, resultante do cruzamento de dois gêneros distintos e com expressiva barreira de incompatibilidade: o trigo (*Triticum* spp.) progenitor feminino e o centeio (*Secale* spp) progenitor masculino (Baier, 1986; McGoverin et al. 2011). A concepção inicial para o desenvolvimento do triticales era realizar a duplicação cromossômica, mediante o cruzamento artificial entre o trigo e o centeio, com a finalidade de produzir híbridos férteis que unisse os atributos positivos desses dois cereais em uma única planta (Ammar; Mergoum; Rajaram, 2004; McGoverin et al. 2011; Zhu, 2018).

Inicialmente a combinação genética do trigo e do centeio era estudada apenas a título de curiosidade. No entanto, com o passar dos anos foi se tornando um fato importante para a agricultura, uma vez que o trigo representava a expansão do cultivo de grãos no mundo, devido ao seu potencial produtivo e valor alimentício; e o centeio com seu vigoroso sistema radicular e tolerância a fatores abióticos, permitia vegetar em condições mais adversas, como em solos arenosos de baixa fertilidade e em regiões de temperaturas menores que as suportadas pelo grão de trigo (Niedziela et al. 2014; Zhu, 2018). A combinação dessas duas espécies se tornaria de grande valia para o cultivo de grãos no mundo, uma vez que o foco para produção de triticales estava atribuído inicialmente a alimentação humana.

Atualmente, o triticales apresenta diversas culturas de alto rendimento, tendo como destaque a qualidade nutricional suficiente para ser implementado na alimentação, além do alto rendimento de germinação em condições adversas.

2.1.1. Visão Histórica do Triticale

Os primeiros estudos motivados a unir o trigo e o centeio foram realizados na Alemanha pelo botânico escocês Alexander Stephen Wilson, no ano de 1876. No entanto, o progresso inicial não prosperou devido à incompatibilidade genética, uma vez que o híbrido desenvolvido se apresentava estéril. Em 1883, o americano Elbert Carman, publicou na revista *Rural New Yorker*, a obtenção de uma verdadeira planta de triticale híbrido parcialmente fértil, mas com baixa viabilidade de reprodução (Baier, 1986; Ammar; Mergoum; Rajaram, 2004; Nascimento Junior et al. 2008).

A fertilidade do triticale foi realmente evidenciada em 1881, na Alemanha, pelo do pesquisador Wilhelm Rimpau, após uma série de cruzamentos entre o trigo e o centeio, que acarretaria o desenvolvimento de híbridos com sementes férteis. No entanto, a baixa fertilidade e a desuniformidade dos grãos acarretaram à falta de interesse do triticale como cultura alimentar até meados da década de 1930 (Ammar; Mergoum; Rajaram, 2004; León; Pérez; Ribotta, 2008).

Somente no ano de 1938, o pesquisador sueco Arne Müntzing, usando a colchicina (composto químico), conseguiu desenvolver o primeiro triticale cujos descendentes apresentavam-se férteis e com fenótipo uniforme. Além disso, a partir de 1940, a técnica de cultura de embriões *in vitro* passou a ser uma alternativa utilizada para o melhoramento na incidência de anormalidades do triticale (Baier, 1986; Varughese; Barker; Saari, 1987).

As primeiras variedades de triticale, conhecida como triticale primário, apresentaram inúmeras desvantagens agrônômicas, como o baixo rendimento, a desuniformidade dos grãos, o excesso de altura da planta, o desenvolvimento tardio, além da baixa germinação. O aperfeiçoamento e a expansão mundial desse híbrido ocorreram somente na década 1960, quando pesquisadores da Universidade de Manitoba no Canadá iniciaram os cruzamentos secundários, a partir de uma grande coleção de triticales primários. Em 1966, foi instituído o programa de melhoramento genético do triticale no Centro Internacional de Melhoramento de Milho e Trigo (CIMMYT), localizado no México, que passaram a pesquisar o triticale de forma intensiva, desenvolvendo grande parte das linhagens que foram distribuídas para os diversos campos do mundo (Baier, 1986; Ammar; Mergoum; Rajaram, 2004).

No Brasil, os ensaios com os cultivares de triticales foram iniciados no Rio Grande do Sul no ano de 1961, a partir de uma coleção de cultivares originários do Canadá (Baier, 1986; Lima; Viola; Kratz, 2001). O primeiro cultivar de triticales registrado no Brasil, foi a BR1 oriunda do CIMMYT, lançada pela Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa) no ano de 1985. Em 2004, a Embrapa registrou o primeiro cultivar, BRS Minotauro (triticales hexaploide), desenvolvido no Brasil a partir de híbridos já adaptados às condições climáticas do país (Nascimento Junior et al. 2008).

2.1.2. Classificação do Triticales

A classificação dos cultivares de triticales é baseada de acordo com a hibridização dos cromossomos entre o trigo e o centeio, podendo ser classificados em três diferentes tipos: os triticales tetraploides ($2n = 28$) advindos da hibridação do trigo diploide ($2n = 14$) da espécie *T. monococcum* com o centeio diploide ($2n = 14$); os triticales octoploides ($2n = 56$) oriundos do cruzamento da espécie *T. aestivum* (trigo hexaploide ($2n = 42$)) e do centeio diploide ($2n = 14$), contendo os genomas A, B e D do trigo e R do centeio; e por fim, os triticales hexaploides ($2n = 42$) proveniente da hibridização da espécie *T. durum* (trigo tetraploide ($2n = 28$)) e do centeio diploide ($2n = 14$), totalizando 42 cromossomos atribuídos aos genomas A e B do trigo e R do centeio (Baier et al. 1994; Oettler, 2005; León; Pérez; Ribotta, 2008; Zanoto et al. 2009).

A variabilidade de híbridos de trigo e centeio resultaram em diferentes estruturas e níveis de ploidia. Logo, foi proposta uma distinção de acordo com o tipo de cruzamento, compreendida em triticales primário ou triticales secundário. Os triticales primários provêm diretamente do cruzamento das espécies ancestrais, sendo considerados pobres do ponto de vista agrônomo devido a sua genética instável. Os triticales secundários são genótipos derivados de triticales primários cruzados com um dos seus progenitores ou cruzamento entre triticales independentemente do nível de ploidia. Os triticales secundários podem ser divididos em completos quando apresentam constituições genômicas hexaploide (AABBRR) ou octaploide (AABBDDRR), ou ainda substituídos quando há uma alteração cromossômica do genoma D pelo genoma R sendo AABBDR para os hexaploide e AABBDDR para os octaploide (Varughese; Barker; Saari, 1987; Oettler, 2005; Carvalho et al. 2008; McGoverin et al. 2011; Brambatti et al. 2016).

As alterações cromossômicas que ocorrem nos cultivares de triticale acarretam a diminuição de glúten, devido à remoção de gluteninas (Glu-D1 e Glu-D3) e introdução das secalinas (proteína do centeio), proporcionando uma redução na qualidade tecnológica da farinha de triticale. No entanto, mesmo que essa modificação cromossômica represente um fator negativo para o desenvolvimento de produtos alimentícios, a hibridação da classe hexaploide é considerada a mais rentável economicamente, devido à estabilidade cromossômica que possibilita uma melhor adaptação a condições edafoclimáticas (solos ácidos, manchas foliares e germinação) (Schlegel, 1996; Oettler, 2005; Zanoto et al. 2009).

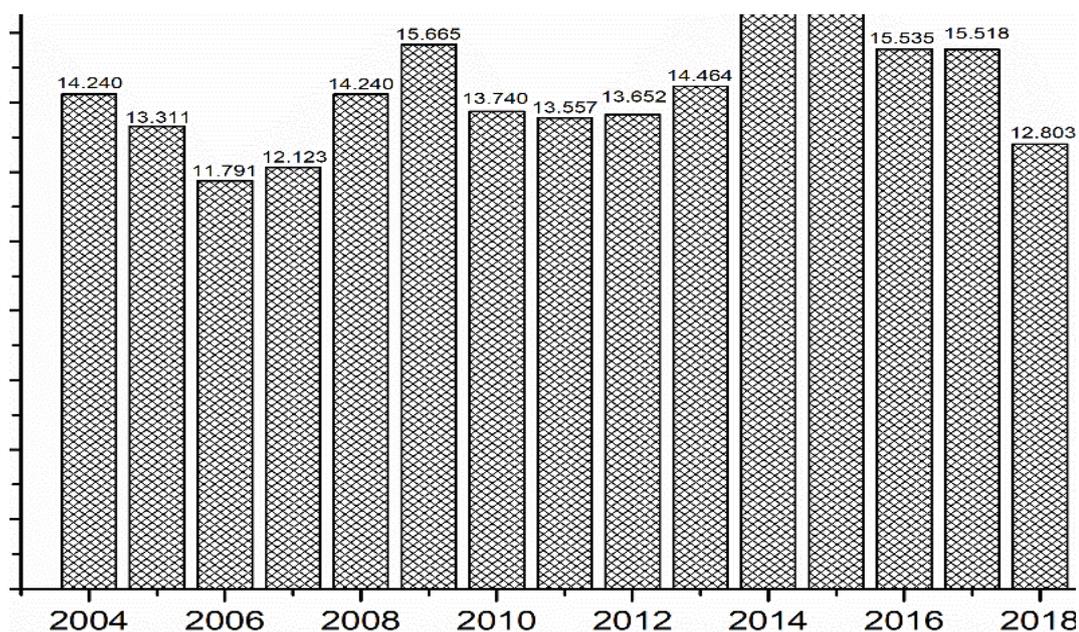
2.1.3. Panorama de Produção Mundial e Nacional de Triticale

Apesar de todos os esforços empreendidos para desenvolver o melhoramento do triticale no mundo, sua evolução como cultura comercial foi lenta até meados da década de 1980. Segundo a Food and Agriculture Organization of the United Nations – FAO (FAO, 2015), durante o período de 1975-1979, a área anual média colhida foi de 13,3 mil hectares, com uma produção de 35,1 mil toneladas de triticale, com registro de cultivo apenas na China (78,5% da área total), Espanha (12,7%) e Hungria (8,7%).

Entre os anos de 1990 a 2000, a área anual colhida praticamente dobrou, passando de 1,73 milhões para 3,50 milhões de hectares, com registro do cultivo do triticale em 17 países. Em 2012, foi registrado o cultivo de triticale em 38 países com uma produção de 13,65 milhões de toneladas (FAO, 2019). De acordo com a FAO (2019), mesmo que a produção de triticale não tenha grande representatividade quando comparada a outros cereais, a sua produção apresentou um aumento até 2014 chegando próxima a 17,0 milhões de toneladas, sendo o maior recorde já registrado (FIGURA 2.1). No entanto, houve uma queda na produção de triticale nos anos posteriores, devido ao incentivo para o plantio de outros cereais. Segundo o último levantamento, a produção de triticale chegou próxima a 13,0 milhões de toneladas (FAO, 2019).

Segundo a FAO (2019), o continente Europeu é responsável por aproximadamente 90% da produção mundial referente aos anos de 1994 a 2018. Segundo o último levantamento, mais de 65% do volume produzido advém da Polônia (4,05 milhões de toneladas), Alemanha (1,94 milhões de toneladas), França (1,38 milhões de toneladas) e Bielorrússia (1,01 milhões de toneladas) (FAO, 2019).

FIGURA 2.1 – PRODUÇÃO MUNDIAL DE TRITICALE DE 2004 A 2018.



FONTE: FAO (2019).

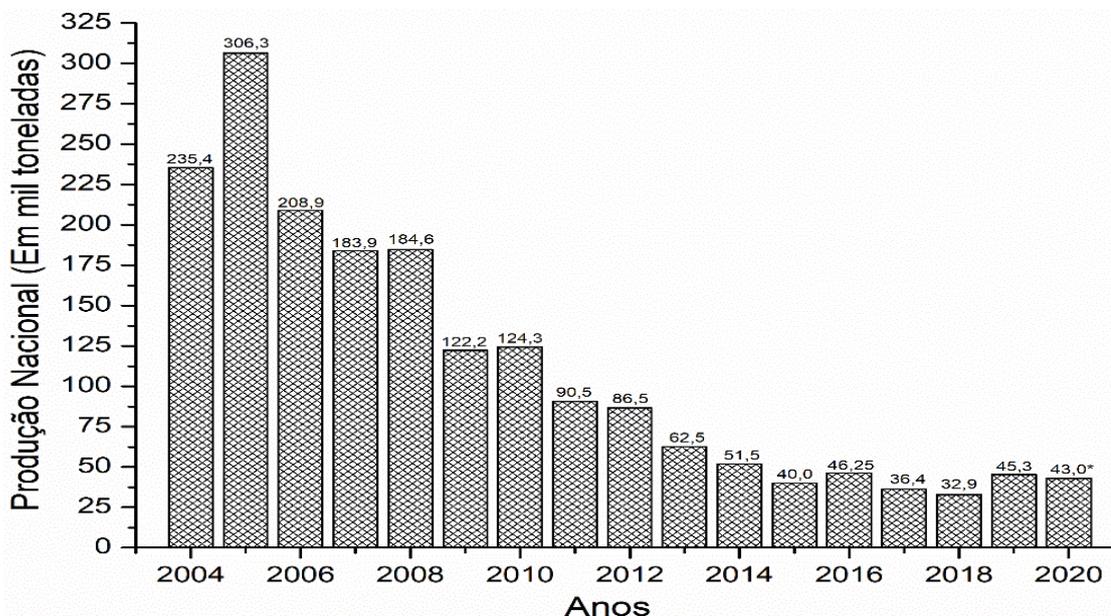
No Brasil, o cultivo de triticale foi iniciado em 1961, mas o desenvolvimento da cultura ocorreu anos mais tarde, em 1983 com a produção de 600 toneladas, após a implantação da Portaria nº420.84 instaurada pelo Conselho Monetário Nacional que equiparou as condições do triticale ao trigo quanto à política de comercialização, industrialização e financiamento de produção (Hubner, 2008). No entanto, a baixa qualidade apresentada pela farinha, aliada aos menores rendimentos do produto, reduziram o interesse pelo triticale (Mori; Nascimento Junior; Miranda, 2014).

No início dos anos 2000, o cultivo de triticale voltou a ganhar força no Brasil, mas voltado para alimentação animal (prática que já era exercida nos principais países da Europa), em virtude do elevado preço do milho. A expansão da cultura do triticale perdurou até o ano de 2005, com uma produção de 306,30 mil toneladas (CONAB, 2017). O milho de segunda safra promoveu uma redução no seu preço ocasionando o desinteresse pela cultura do triticale nos anos posteriores (Mori; Nascimento Junior; Miranda, 2014). Segundo último levantamento da CONAB (2020), a produção de triticale em 2019 foi de 45,30 mil toneladas (FIGURA 2.2).

O cultivo de triticale no Brasil tem uma regionalização bastante acentuada, com as maiores áreas de plantio situadas nos estados de São Paulo, Paraná e Rio Grande do Sul, devido principalmente às condições climáticas mais favoráveis apresentadas por esses Estados. Segundo a CONAB (2020), em 2019 o Estado do

Paraná obteve o maior índice de produtividade agrícola para o triticale com 18,1 mil toneladas, seguido dos Estados do Rio Grande do Sul e São Paulo com 17,1 e 9,9 mil toneladas, respectivamente.

FIGURA 2.2 – PRODUÇÃO NACIONAL DE TRITICALE DE 2004 A 2020.



*Previsão de produção para 2020.

FONTE: Mori; Nascimento Junior; Miranda (2014); FAO (2019); CONAB (2020).

Atualmente, no Brasil apenas três instituições estão voltadas ao estudo de triticale: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (Embrapa), Instituto Agrônomo do Paraná (Iapar) e Instituto Agrônomo de São Paulo (IAC). Dentre os cultivares de triticale desenvolvidos no Brasil, encontra-se o Triticale IPR 111 advindo do cruzamento dos cultivares ANOAS 5/STIER13 e o Triticale IPR Aimoré desenvolvido a partir dos cultivares 804/BAT/3/MUSX/LYNX/STIER_12/4/VARSA_3/5/FAHAD_81/HARE_263/CI VET. Os cultivares IPR 111 e IPR Aimoré apresentam como principais características a alta produtividade, a moderada resistência à debulha (separação do grão da espiga) e a suscetibilidade à germinação pré-colheita, além da possibilidade de serem incorporadas na produção de biscoitos, pães, massas de pizzas e principalmente na alimentação de animais ruminantes (Bassol et al. 2014).

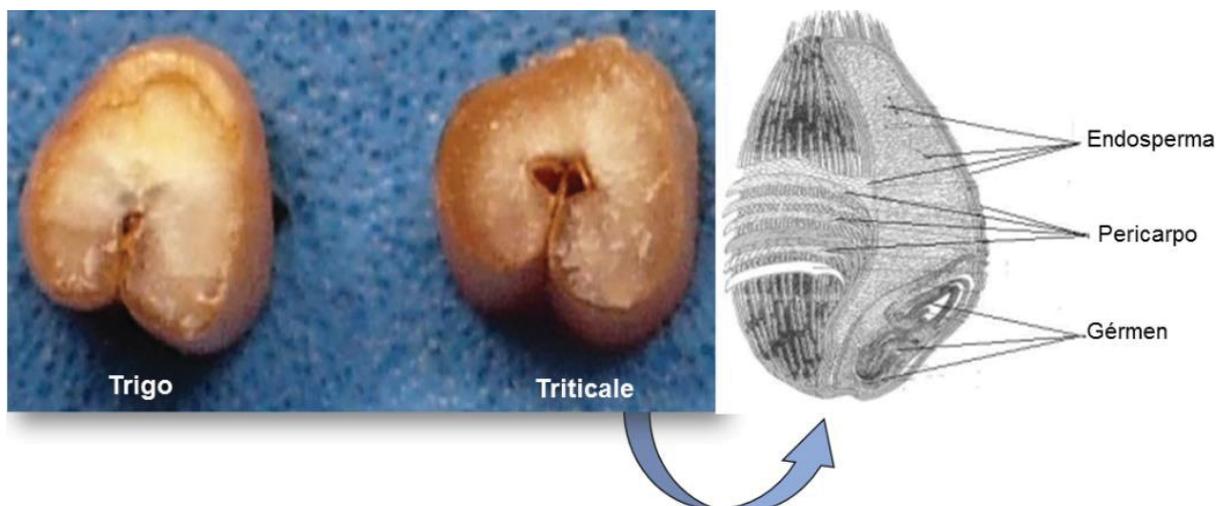
Os dois cultivares citados (IPR 111 e IPR Aimoré) são disponibilizados pelo Instituto Agrônomo do Paraná (Iapar) para as organizações públicas e privadas que atuam no agronegócio paranaense (agricultura, produtores de base familiar, instituições de pesquisa e ensino, universidades e empresas de planejamento e extensão) de modo que os grãos são patenteados e protegidos pela instituição.

2.1.4. Estrutura Morfológica e Composição Nutricional do Triticale

A estrutura morfológica do triticale apresenta-se como um intermédio entre as duas espécies que a originaram. O triticale é mais longo que o grão de trigo e com o diâmetro maior que o grão de centeio. Todavia, o triticale apresenta variações morfológicas para cada genótipo em virtude da sua constituição cromossômica diversificada (Baier et al. 1994; Lima; Viola; Kratz, 2001; León; Pérez; Ribotta, 2008).

O triticale é composto basicamente por três partes principais: gérmen, farelo (pericarpo) e endosperma (FIGURA 2.3). O gérmen está relacionado com o desenvolvimento do embrião representando a parte viva do grão, possui uma maior concentração de proteínas e lipídios, correspondendo em média a 3% do peso do grão. O pericarpo é subdividido em diferentes camadas que exercem como principal finalidade a proteção do grão, essa camada é composta em sua maioria por polissacarídeos não amiláceo e representam em média a 7,5% do peso do grão. E por fim, o endosperma é a parte mais interna do grão, o qual é dividido em endosperma amiláceo com aproximadamente 83% do peso do grão e uma camada com alta concentração de fibras, proteínas e minerais conhecida como aleurona, que corresponde em média a 6,5% do peso do grão. Enquanto o embrião está se desenvolvendo, as substâncias do endosperma são hidrolisadas e consumidas através da respiração do embrião (Baier et al. 1994; Lima; Viola; Kratz, 2001; León; Pérez; Ribotta, 2008).

FIGURA 2.3 – CORTE DA SESSÃO RADIAL DO TRIGO E DO TRITICALE E AS PRINCIPAIS PARTES QUE COMPÕEM OS GRÃOS.



FONTE: León; Pérez; Ribotta (2008).

FONTE: Dewettinck et al. (2008).

Os principais propósitos que levaram a intensificar a pesquisa com o tritcale nas últimas décadas foram a sua vigorosidade no cultivo, resistência em condições climáticas adversas, qualidade nutricional e o maior número de floretes (20 a 30) por espigas contendo de 3 a 5 grãos em cada. Além disso, as características morfológicas e químicas do trigo, grão que apresenta a maior visibilidade comercial em comparação com o centeio, são predominantes no tritcale (Schlegel, 1996; Brambatti et al. 2016). Essa semelhança estrutural e nutricional mais acentuada com o trigo é refletida devido às duas porções de genoma advindas do trigo (A e B) em comparação com uma do centeio (R), sendo esse genótipo o mais pesquisado, conhecidos como triticales modernos (McGoverin et al. 2011).

Em relação à composição nutricional do tritcale, o grão assemelha-se às demais cultivares de inverno, sendo o carboidrato o componente com maior representatividade (TABELA 2.1). Ressalta-se também, a importância da proteína presente no tritcale (13,0%), uma vez que esse macronutriente se apresenta como uma fração superior ao milho (10,4%), e o milho é considerado uma referência tradicional de energia na alimentação de aves e suínos (Lima; Viola; Kratz, 2001).

TABELA 2.1 – COMPOSIÇÃO CENTENSIMAL MÉDIA DOS GRÃOS DE TRITCALE E SEUS PARENTAIS *IN NATURA*.

Grãos	Triticale	Trigo	Centeio
Umidade (%)	10,5	11,6	10,9
Carboidratos (%)	72,1	72,9	69,8
Proteínas (%)	13,0	12,0	14,8
Lipídios (%)	2,1	1,7	2,5
Cinzas (%)	2,2	1,6	2,0

FONTE: National Nutrient Database for Standar Referenca, USAD (2018).

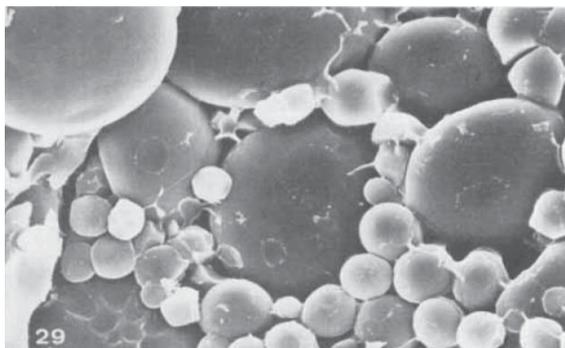
Os carboidratos são responsáveis por mais de 70% da matéria seca de tritcale, sendo que desse total, as concentrações de amido podem variar de 60 a 80%, enquanto a fração polissacarídeos não-amilacea varia em torno de 10 a 30%. As modificações genéticas do tritcale influenciam o conteúdo total de carboidratos do grão que conseqüentemente reflete principalmente na concentração de amido (Lima; Viola; Kratz, 2001; McGoverin et al. 2011; Zhu, 2018).

O amido é um polissacarídeo que se apresenta sob a forma de grânulos sendo sua caracterização e funcionalidade diversificada de acordo com a especificação estrutural do grânulo, proveniente da fonte botânica, localização geográfica e condições de crescimento (Slattery; Kavakli; Okita, 2000; Zhou et al. 2002). Segundo Frás et al. (2016), a concentração do amido de triticales de 9 genótipos variou de 60,8 a 67,7%; Makowska et al. (2014) obtiveram valores dentro dessa faixa (63 a 65,8%) para 5 genótipos de triticales poloneses. De acordo com Navarro-Contreras et al. (2013), a concentração de amido do triticales não apresentou diferença significativa em relação aos genótipos completos e substituídos. Em contrapartida, Cornejo-Ramírez et al. (2015) observaram que o triticales com o genótipo completo apresentou uma quantidade maior de amido (60,6%) em comparação com o triticales de genótipo substituído (52,2%), sendo essa diferença justificada pela genética de cada cultivar.

A estrutura do amido é composta por uma cadeia de dois polímeros de glicose (amilose e amilopectina). A amilose é uma macromolécula de formato linear constituída por unidades de glicose unidas principalmente por ligações glicosídicas α -1,4. Enquanto a amilopectina, apresenta uma estrutura altamente ramificada constituída de unidades de glicose unidas por ligações α -1,4 e α -1,6 (Tester e Karkalas, 2004; Denardin e Silva, 2009). Segundo Dennett et al. (2009), as concentrações de amilose do triticales variam de 12,8 a 35,1%, valores esses dentro da faixa observada por Makowska et al. (2014) para a concentração de amilose (19,0 a 23,8%) de diferentes cultivares de triticales.

Os grânulos de amido presente no triticales mostram-se com uma distribuição de tamanho bimodal (FIGURA 2.4), sendo identificados como grânulos de amido do tipo A e B. Os grânulos do tipo A apresentam tamanhos maiores e com formato de disco ou lenticular, com diâmetro entre 10 a 35 μ m. Enquanto os grânulos do tipo B mostram-se de tamanho menor e formato mais esférico, com o diâmetro de aproximadamente 2 μ m (Ao e Jane, 2007; Li et al. 2011).

FIGURA 2.4 – ILUSTRAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO BIMODAL DOS GRÂNULOS DE AMIDO PRESENTE NO ENDOSPERMA DO GRÃO TRITICALE.



FONTE: Heneen e Brismar (1987).

Os outros constituintes referentes aos carboidratos no triticale advêm dos polissacarídeos não-amiláceos, dos quais segundo Rakha, Åman e Andersson (2011) podem variar de 13 a 16%. No triticale, a composição dos polissacarídeos não-amiláceos é destacada pela presença arabinóxilano (6,8%), frutano (2,3%), celulose (2,1%) e lignina (1,6%), O arabinóxilano é o composto mais importante no triticale, devido ao seu caráter antinutricional quando utilizado como ração na alimentação animal, uma vez que em contato com a água o arabinóxilano acarreta na formação de géis, retardando a absorção de nutrientes e dificultando a digestão dos animais não ruminantes (Lima; Viola; Kratz, 2001; McGoverin et al. 2011).

A proteína é o segundo macronutriente de destaque no triticale, sua fração apresenta-se bem diversificada para diferentes genótipos. Manley et al. (2013) avaliaram a concentração de proteína de 131 genótipos de triticale e obtiveram valores de 7,5 a 16,2%, resultados similares com os encontrados por Frás et al. (2016) ao observarem 9 genótipos de triticale (11,8 a 15,2%). De acordo com Navarro-Contreras et al. (2013) os genótipos de triticale substituído e completos não apresentaram diferença significativa para a concentração de proteína.

No triticale, a macromolécula proteína tem maior representatividade de albumina (38 a 45,4%), seguido de globulina (19,7 a 30,2%). Além desses constituintes, o triticale apresenta a gliadina (11,4 a 26,1%) e glutenina (6,8 a 9,6%) que juntas formam o glúten (Navarro-Contreras et al. 2013; Zhu, 2018). O glúten juntamente com o amido são responsáveis pela coesão e viscoelasticidade da massa, e as baixas concentrações de glutenina do triticale ocasionam a produção de farinha com qualidade tecnológica inferior à farinha de trigo, uma vez que esse polímero (glutenina) é o responsável pela elasticidade estrutural do material (Cazatta et al. 2008; Zecevic et al. 2010).

O triticale moderno destaca-se com a presença de alguns aminoácidos, como a lisina, considerada um aminoácido essencial limitante em grãos cereais (Lima; Viola; Kratz, 2001; McGoverin et al. 2011). A lunasina é outro constituinte que apresenta importância nutricional, visto que se trata de um polipeptídeo bioativo constituído por 43 resíduos de aminoácidos, importante na redução de colesterol, prevenção de câncer e atividades anti-inflamatórias (Nakurte et al. 2012). Mesmo apresentando uma composição nutricional de grande destaque, o triticale denota de algumas desvantagens devido à presença de compostos antinutricionais, como os inibidores de proteases, tripsina e quimiotripsina, que reduzem a digestibilidade da proteína ao se ligarem às enzimas digestivas (Lima; Viola; Kratz, 2001; McGoverin et al. 2011).

O triticale possui uma fração lipídica representada por ácidos graxos saturados (0,318%), monoinsaturados (0,183%) e poli-insaturados (0,794%) (Zhu, 2018). De acordo com Frás et al. (2016), o conteúdo lipídico de 9 genótipos de triticale foi semelhante ao do trigo, com valores entre 1,2 e 1,6%. Dentro da fração lipídica do triticale encontram-se alquilresorcinóis que são lipídeos fenólicos, advindos de seus parentais. Os alquilresorcinóis possuem propriedades antioxidantes, antibacteriana, antifúngica, antitumoral e antimicrobiana, além de serem utilizados como biomarcadores da ingestão de alimentos integrais em humanos (Stasiuk e Kozubek, 2010).

Segundo Frás et al. (2016), a concentração de cinzas do triticale pode variar entre 1,7 a 2,0%, resultado semelhante ao observado por Manley et al. (2013), ao avaliarem 127 genótipos de triticale (1,49 a 2,31%). Uma substância de destaque no triticale é o ácido fítico (1,92 mg/g) concentração advinda do centeio, uma vez que o trigo apresenta valores na faixa de 0,26 mg/g. O ácido fítico é uma das formas de armazenamento de fósforo das plantas, e ao entrar em contato com a enzima fitase realiza a degradação, aumentando a biodisponibilidade de fósforo aos seres humanos. A concentração de fósforo (358,0 mg/g) no triticale apresenta-se como um dos minerais de maior influência (Mikulski e Klososki, 2015; Zhu, 2018). Outros minerais que se destacam no triticale são: potássio (332,0 mg/g), magnésio (130,0 mg/g), cálcio (37,0 mg/g), zinco (3,45 mg/g) e ferro (2,6 mg/g), minerais essenciais para a manutenção dos tecidos do corpo e funcionamento do organismo (USAD, 2018).

O triticale ainda conta com a presença de polifenóis que desempenham ação antioxidante, oferecendo proteção contra o desenvolvimento de algumas doenças (Zhu, 2018). Segundo Frás et al. (2016), as concentrações de fenólicos do triticale variaram de 1,3 a 1,6 mg/g, sendo equivalente aos valores encontrados para o trigo, demonstrando a importância nutricional e bioquímica dos diversos cultivares de triticale.

2.1.5. Aplicação e Utilização do Triticale

O triticale tem sido avaliado por diversas instituições de pesquisa, com o intuito de desenvolver novas combinações genéticas que atendam às necessidades para o consumo humano (produtos de panificação, macarrão, malte, água ardente, iogurtes, filmes biodegradáveis e biocombustíveis) e dos animais (grãos e forragem).

Na alimentação animal, o triticale apresenta potencial agrônômico para ocupar a área cultivada com outras culturas (ex.: milho e soja), promovendo a sua colheita no período de entressafra. O triticale é aplicado com duplo propósito, devido à eficácia de produzir boa quantidade de forragem para a transformação de feno, palha e silagem, bem como a capacidade de rebrotar produzindo alto rendimento de grãos (Ramos et al. 1996; Lima; Viola; Kratz, 2001). Um dos primeiros relatos sobre a utilização de triticale para alimentação animal foi constatado por Sell et al. (1962), citados por Bragg e Sharby (1970), que investigaram a potencialização do triticale na alimentação de aves. Desde então, diversos estudos com o triticale foram comparados a outros cereais (milho, trigo, sorgo, cevada e centeio) com o intuito de ser inserido na alimentação de diversos animais como fonte de energia (Brum et al. 2000; Oettler, 2005).

Devido à escassez e à variação do preço dos combustíveis fósseis, aliado à preocupação global com o meio ambiente, pesquisas com matérias orgânicas têm sido desenvolvidas, como meio alternativo para produção de combustíveis (McGoverin et al. 2011). Entre essas matérias orgânicas, destaca-se o triticale devido à alta concentração de amido, juntamente com um sistema enzimático auto-amilolítico, que ajuda a conversão dos carboidratos em açúcares fermentescíveis. Segundo Rosenberger et al. (2002) e Pejin et al. (2009), o triticale consegue degradar o amido sem a necessidade da adição de enzimas, o que auxilia na redução de custos, além de obter rendimentos maiores de bioetanol quando comparados com os seus parentais.

O desenvolvimento de filmes comestíveis e biodegradáveis é outro segmento em que o triticales tem sido explorado. A produção de filmes a partir do triticales tem sido impulsionada principalmente devido à sua composição nutricional rica em proteínas e carboidratos. Um resumo das principais pesquisas que foram aplicadas para produção de filmes nos últimos anos a partir do triticales pode ser observado no Quadro 2.1.

QUADRO 2.1 – AS PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TRITICALES NOS ÚLTIMOS ANOS APLICADAS NA ELABORAÇÃO DE FILMES.

(continua)

Origem	Produto desenvolvido	Objetivos	Principais Destaques	Autores
Farinha	Filme – usando a fração proteica com diferentes concentrações de glicerol.	Avaliar a solubilidade, a permeabilidade ao vapor de água e as propriedades mecânicas de filmes biodegradáveis.	A fração proteica presente no triticales apresenta potencial para a formação de filmes, podendo ser usada como componente para desenvolver novos filmes biodegradáveis.	Aguirre; Borneo; León, (2011).
Farinha	Filme – a partir da fração proteica, juntamente com a aplicação de dois agentes plastificantes (glicerol ou sorbitol).	Observar a influência dos agentes plastificantes e o efeito da concentração sobre os parâmetros mecânicos e de vapor de água dos filmes.	Os filmes plastificados com glicerol apresentaram maior capacidade de absorção de água em todas as concentrações e em todas as condições de umidade relativa quando comparado com sorbitol.	Aguirre; Borneo; León, (2013 ^a).
Farinha	Filme – utilizando proteínas do triticales, juntamente com a incorporação de óleo essencial de orégano (OEO).	Analisar o efeito da incorporação de OEO na atividade antimicrobiana, solubilidade, propriedades mecânicas e de barreira.	A adição de OEO não afetou a permeabilidade ao vapor de água dos filmes, mas aumentou a solubilidade em água e modificou as propriedades mecânicas. O OEO apresenta potencial para ser aplicado em embalagens.	Aguirre; Borneo; León, (2013 ^b).
Farinha	Filme – usando a composição total do cereal, com exceção do pericarpo.	Desenvolver filmes a partir da farinha de triticales investigando os efeitos do tempo de armazenamento.	Os filmes exibiram propriedades semelhantes a outros filmes desenvolvidos a partir de outros cereais. As propriedades funcionais dos filmes de triticales mantiveram-se adequados durante 45 dias de armazenamento.	Borneo; Alba; Aguirre, (2016).
Farinha	Filme – usando a composição total do cereal, com exceção do pericarpo.	Investigar as propriedades de filmes feitos com a farinha de triticales ativada com natamicina para embalagem de queijo.	Os filmes apresentaram capacidade de transportar e liberar a natamicina, inibindo a deterioração nos queijos. O filme fornece propriedades funcionais antimicrobianas.	Romero et al. (2016).

(Conclusão)

Farinha	Revestimento – obtido mediante a pulverização de uma solução (farinha de triticales com glicerol).	Revestir muffins com filmes comestíveis a partir da farinha de triticales, avaliando a capacidade deste revestimento em retardar o endurecimento e aumentar a vida útil.	O revestimento aplicado aos muffins foi eficaz, resultando em produtos frescos e macios. Os muffins não apresentaram alteração após dez dias de armazenamento.	Bartolozzo; Borneo; Aguirre, (2016).
---------	----------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	--------------------------------------

FONTE: O autor (2020).

As vantagens nutricionais e agronômicas advindas do triticales, juntamente com o crescente interesse dos consumidores em produtos elaborados a partir de cereais alternativos, classifica o triticales como um cereal importante para a alimentação humana (McGoverin et al. 2011). Um dos primeiros estudos envolvendo o triticales para a alimentação humana foi a utilização de frações da farinha de triticales em mistura com a farinha de trigo para a elaboração de produtos de panificação, como pães (Lorenz; Dilsaver; Lough, 1972) e bolos (Kissell e Lorenz, 1976).

Segundo Lorenz, Dilsaver e Lough (1972), a utilização de 100% da farinha de triticales foi considerada aceitável para a produção de pães. No entanto, Pape et al. (1980), Amaya, Peña e Varughese (1986) e Frás et al. (2016) relataram que os pães elaborados apenas com a farinha de triticales apresentaram volumes aquém dos níveis desejados, devido à menor concentração de glúten.

Para a elaboração de pães, uma das características mais importante é a dureza do cultivar, enquanto cultivares com a textura macia são recomendadas para a elaboração de bolos e biscoitos. A maioria dos cultivares de triticales são consideradas de textura macia devido à presença do genoma R advindo do centeio. Alternativamente, o triticales apresenta os melhores resultados para a elaboração pães quando misturados com o trigo (Háp e Pelikán, 1995; Sowa et al. 1995). Segundo Lorenz e Ross (1986), Peña e Amaya (1992) e Naeem et al. (2002), a utilização de 30 a 50% da farinha de triticales juntamente com a farinha de trigo tende a produzir pães com qualidade sensorial semelhante aos que utilizam 100% farinha de trigo.

A farinha de triticales foi avaliada por Lorenz, Dilsaver e Lough (1972) para a produção de macarrão. Os autores observaram que as propriedades de cozimento do macarrão de triticales foram inferiores às do macarrão de trigo. O estudo de Shin, Bae e Pack (1980) concluíram que cultivares de triticales apresentaram condições satisfatórias para a elaboração de macarrão, com exceção da coloração indesejável.

Esse resultado corrobora com o estudo de Martinez et al. (2012) que constataram que o parâmetro luminosidade (L) foi o mais afetado no macarrão de tritcale em comparação com o macarrão de trigo, em função da maior concentração de cinzas.

León, Rubiolo e Anon (1996) analisaram 10 cultivares de tritcale para elaboração de biscoitos, sendo que 4 foram consideradas adequadas. León (2007) relatou que a proporção mássica de 70:30 (tritcale:trigo) são as satisfatórias para obter biscoitos com a qualidade sensorial e física semelhantes aos obtidos apenas com farinha de trigo. Segundo Onwulata et al. (2000), a formulação contendo entre 20 a 40% de farelo de aveia juntamente com farinhas de trigo e tritcale foram extrusados e apresentaram resultados sensoriais semelhantes a “snacks” comerciais, além de evidenciar o conteúdo de fibras significativamente maior.

Segundo Serna-Saldivar et al. (2004), a produção de tortilha (produto alimentício comum no México) com até 50% da farinha de tritcale foi a concentração máxima que não apresentaram efeitos significativos sobre a textura, cor, sabor e aceitabilidade sensorial. Vaca-García et al. (2011) encontraram resultados condizentes com os de Serna-Saldivar et al. (2004) ao utilizar farinha de tritcale misturada com até 50% da farinha de milho para produção de tortilhas, no entanto os autores relatam que a adição da farinha de tritcale a 10% é considerada a relação sensorial mais aceita.

Mesmo que o tritcale venha sendo continuamente pesquisado, os resultados observados nessa última década se equiparam com as primeiras pesquisas envolvendo o grão, demonstrando a dificuldade de se usufruir de alimentos que contenham apenas o tritcale como cereal em sua composição. Um resumo das pesquisas que foram desenvolvidas para a produção de alimento humano nos últimos anos, a partir do tritcale pode ser observado no Quadro 2.2.

QUADRO 2.2 – AS PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TRITCALE NOS ÚLTIMOS ANOS APLICADAS À PRODUÇÃO DE ALIMENTOS PARA O CONSUMO HUMANO.

(continua)

Origem	Produto desenvolvido	Objetivos	Principais Destaques	Autores
Farinha	Pão – grão e farinha foram analisados, para posterior assamento.	Determinar as diferenças na composição química das variedades de tritcale entre grão, farinha e pão, para escolher a melhor cultivar.	A relação da composição química entre as amostras, farinha e pão foram similares. Do ponto de vista nutricional e tecnológico alguns cultivares foram estáveis possibilitando a produção de pão.	Frás et al. (2016).

(Conclusão)

Farinha	Pão – moagem para avaliação da concentração de amido, proteínas, análise farinográfica e teste de panificação.	Avaliar as propriedades funcionais das farinhas de triticales substituídos e completos.	A concentração de amilose é menor nos triticales substituídos. As farinhas de triticales apresentam baixa viscosidade. O teste de panificação revelou que o glúten dos cultivares é muito fraco.	Navarro-Contreas et al. (2013).
Farinha	Macarrão – mistura de ingredientes e corte em lâminas.	Caracterizar as farinhas de triticales para produção de macarrão fresco e avaliar a influência da cor.	O macarrão de triticales apresentou menor luminosidade (L), mas foi similar ao trigo nos parâmetros a* e b*. Os parâmetros L e a* foram afetadas pela concentração de cinzas e proteínas.	Martinez et al. (2012).
Farinha	Biscoito – realizado mediante a operação de moagem e cocção.	Quantificar a variação genética do triticales para classificar os cultivares para o mercado de moagem.	A massa do biscoito de triticales foi significativamente menor em função do volume, indicando que os processos de assamento devem ser alterados para lidar com a retenção de água geralmente baixa do triticales.	Pattison e Trethowan (2013).
Farinha	Snacks – grão moído, hidratado a 16% e a 20%, e submetido a extrusão a 135 °C e 175 °C.	Analisar as condições de extrusão nas propriedades macroscópicas e propriedades mecânicas de triticales.	As condições de extrusão afetaram as propriedades macroscópicas e mecânicas dos snacks de triticales. A umidade com 20% aumentou a dureza e reduziu o encolhimento dos snacks.	Makowska et al. (2017).
Farinha	Tortilhas – farinha de triticales + farinha de milho nixtamalizada e cocção.	Avaliar o efeito da substituição parcial da farinha de milho por farinha de triticales nas propriedades funcionais da massa e de tortilhas.	A farinha de Triticales reduziu significativamente a absorção de água da massa, o tempo de cozimento e o rendimento. A proporção indicada como substituto parcial da farinha de milho é de 10%.	Vaca-García et al. (2011).
Farelo	Iogurte – grãos triturados, liofilizados e incorporados em diferentes concentrações em iogurte.	Definir a concentração ótima de farelo de triticales a ser incorporado em iogurte e avaliar os efeitos prebióticos durante 28 dias de armazenamento.	Nenhuma sinérese de iogurte foi observada com o nível de adição de farelo inferior a 4%. A adição do farelo aumentou o número de bactérias sem afetar a contagem de bactérias viáveis no iogurte.	Agil e Hosseinian (2012).

FONTE: O autor (2020).

Os cultivares de triticales em sua maioria apresentarem altos níveis de atividade amilolítica mesmo na ausência de brotamento visível e baixos níveis de atividade proteolítica (Grujic e Pejin, 2007; Grujic; Pejin; Dencic, 2009; Munhuz-Insa; Gastl; Becker, 2016^b). Esse fato, aliado à baixa temperatura de gelatinização (59-65°C) faz com que o triticales seja capaz de degradar seu próprio amido com eficiência equivalente ao malte de cevada. Além disso, alguns cultivares de triticales contêm quantidades consideráveis de nitrogênio livre (utilizado para a síntese de proteínas e crescimento das leveduras durante o processo de fermentação na

produção de cervejas) e arabinoxilano (responsável pela viscosidade do mosto) semelhante ao malte de cevada. Com isso, presume-se que alguns cultivares de triticales apresentem potencial na elaboração de malte para a produção de bebidas, uma vez que não há a necessidade da adição de enzimas microbianas durante o processo fermentativo (Glatthar; Heinisch; Senn, 2002; Grujic e Pejin, 2007; Grujic; Pejin; Dencic, 2009).

No entanto, alguns estudos envolvendo o triticales aplicado na produção de produtos fermentescíveis, não utilizam o malte de triticales, mas apenas fontes de extrato não maltadas, conhecidos como adjuntos. Os adjuntos são comumente aplicados em operações cervejeiras com a finalidade de aumentar o rendimento e reduzir os custos de processo, uma vez que são considerados mais baratos, já que não passam pelo processo de malteação (Grujic; Pejin; Dencic, 2009).

Grujic, Pejin e Dencic (2009) avaliaram uma variedade de triticales como adjunto para a produção de cerveja e concluíram que o triticales pode ser empregado como substituto do malte em até 60%. Apesar do papel econômico da utilização do adjunto de cereais não maltados, a qualidade da cerveja é baseada na composição do mosto, e não em seu preço. Assim, a indústria cervejeira precisa garantir que o mosto preparado a partir de malte e adjuntos não reduza a qualidade do produto.

Os primeiros estudos envolvendo a produção de malte de triticales ocorreram por volta da década 70. Pomeranz, Burkhart e Moon (1970) observaram que o triticales apresentou maiores perdas de malte em relação à cevada. No entanto, o poder diastático (capacidade enzimática de converter o amido em açúcares) e as atividades de α , β -amilases do triticales superiores ao malte de cevada deram indícios do favorecimento do triticales para a produção de malte. Tombros e Briggs (1984) relataram sobre as condições de hidratação para o processo de germinação do triticales e constataram que o processo de hidratação de 17 e 24 horas apresentaram pouca influência na umidade do grão chegando a 40 e 43%, respectivamente. Complementarmente, Beirão Costa e Cabo Verde (1996) avaliaram a influência do tempo, temperatura e umidade relativa no processo de germinação e constataram que a melhor capacidade germinativa do triticales é a 17 °C com a umidade relativa de 22%, por 3 dias de confinamento.

Blanchfloer e Briggs (1991) avaliaram cultivares de triticale para o processo de maltagem, e observaram rendimentos do malte próximos a 90%, com processo de germinação ótimo após 4 dias de confinamento. Além disso, os autores aplicaram ácido giberélico e bromato de potássio que possibilitaram aumentar os níveis de nitrogênio solúvel, diminuir as perdas de maltagem e a viscosidade do mosto.

Segundo Grujic e Pejin (2007) e Grujic, Pejin e Dencic (2009), as variedades de triticale maltadas podem ser utilizadas como substituto da cevada em até 70%, uma vez que a sacarificação inferior a 10 minutos indica boa atividade de enzimas amilolíticas. Segundo os autores, os resultados obtidos na análise de malte do triticale confirmaram que todas as variedades avaliadas poderiam ser utilizadas como substituto do malte de cevada para a produção de cerveja.

Nos últimos anos, pesquisas foram avaliadas para utilizar o triticale como malte. Munhuz-Insa, Gastl e Becker (2016^{a,b}) confirmaram o potencial do triticale para o processo de maltagem e fermentação. Além da produção de cerveja, o triticale passou a ser estudo na produção de destilados (Biernacka e Wardencki, 2013). Um resumo das pesquisas que foram designadas a produção de malte e fermentação nos últimos anos a partir do triticale é apresentado no Quadro 2.3.

QUADRO 2.3 – AS PRINCIPAIS PESQUISAS RELACIONADAS AO TRITICALE NOS ÚLTIMOS ANOS APLICADAS À PRODUÇÃO DE MALTE E FERMENTAÇÃO.

(continua)

Origem	Produto desenvolvido	Objetivos	Principais Destaques	Autores
Grão	Malte – processo de hidratação (13, 15 e 17 °C) até atingir 47% de umidade. Germinação por 5, 6 e 7 dias de confinamento.	Definir a influência dos parâmetros do processo de maltagem no conteúdo de iniciadores e inibidores envolvidos na formação de sabores “sunstruck”.	A riboflavina, fenilalanina, aminoácidos contendo enxofre e o peptídeo glutationa foram descritos como iniciadores de sabor "sunstruck". O triptofano e os polifenóis como inibidores de sabor "sunstruck". Para os iniciadores, o triticale apresentou maior concentração de cisteína e glutationa.	Munoz-Insa, Gastl e Becker (2016 ^a).
Grão	Malte – obtido a partir da hidratação por 24 h até atingir 45% de umidade, por 5 dias de germinação a 15 °C.	Avaliar as proteínas do triticale durante o processo de maltagem de acordo com seu ponto isoelétrico e peso molecular (PM).	A maioria das proteínas foi caracterizada com um ponto isoelétrico entre 5,08 e 6,63. Há um padrão de albumina, globulina, gliadina e glutenina. Os aminoácidos aumentaram a sua concentração durante a maltagem, com exceção da asparagina.	Munoz-Insa, Gastl e Becker (2016 ^b).

(conclusão)

Grão	Destilado – concentrações similares de etanol nas amostras testadas.	Verificar o nariz eletrônico com base na cromatografia gasosa ultra-rápida para diferenciação entre diferentes destilados agrícolas.	O nariz eletrônico permitiu diferenciar os destilados de sua origem botânica. Os resultados podem ser usados para controle de qualidade e autenticação na indústria de alimentos.	Wisniewska et al. (2016).
Grão	Destilado – perfis voláteis de diferentes cereais, em cromatografia gasosa acoplado a espectrômetro de massa.	Determinar a composição volátil de bebidas destiladas e comparar os perfis voláteis dos destilados agrícolas obtidos.	Com base nos marcadores é possível distinguir os destilados puros a partir de triticales e discriminar os destilados derivados do trigo.	Biernacka e Wardencki (2013).

FONTE: O autor (2020).

Os triticales hexaploides carecem da maioria ou de todos os cromossomos do genoma D, advindos do trigo. O genoma D apresenta os locus *Glu-D1*, *Gli-D1*, *Glu-D3* e *Gli-D2*, que codificam as gluteninas e gliadinas. A ausência dessas subunidades inibe a formação de uma rede forte de glúten, afetando o grão em processos em que haja há necessidade de aquecimento (Martinek et al. 2008; McGoverin et al. 2011). Com isso, o processo de germinação dos grãos para produção de malte tem sido uma alternativa viável para a utilização do triticales em processos voltados para o consumo humano.

2.2. PRODUÇÃO E QUALIDADE DO MALTE

Segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (1978) (Anvisa), o malte é definido como o produto oriundo da germinação e posterior secagem do grão de cevada, podendo ser também obtido a partir de outros cereais (trigo, arroz, aveia, sorgo e triticales) quando acrescida a designação do nome do cereal de origem. A obtenção do malte está associada ao processo de malteação que consiste de forma simplificada em três etapas: hidratação, germinação e secagem dos grãos. As etapas que compreendem o processo de malteação são de fundamental importância, uma vez propiciam o ganho de umidade do cereal, para ativar as atividades metabólicas estimulando a germinação, que irá agir sobre a reserva de amido presente no endosperma do grão, modificando a sua composição química e estrutural através da ação das enzimas (Schmitt e Marinac, 2007; Lima, 2010).

Nas indústrias cervejeiras, a malteação está associada ao processamento da cevada, devido a esse cereal ser amplamente utilizado para tal finalidade. No entanto, o processo de malteação é sempre similar independente do gênero alimentício, podendo ser obtido a partir das demais fontes de cereais, como por exemplo, triticale (Grujic; Pejin; Dencic, 2009), sorgo (Hassani; Zarnkow; Becker, 2013), centeio (Hubner et al. 2010) e aveia (Klose et al. 2011), sempre tendo o malte de cevada como referência. A seleção do cereal para a produção de malte está relacionada à fatores como a boa absorção de água durante a hidratação (maceração), os altos rendimentos de germinação e a alta atividade das enzimas amilolíticas (poder diastático) (Evans, 2001).

Para a produção de malte, inicialmente os grãos são submetidos ao processo de hidratação (maceração), o qual consiste no acondicionamento dos grãos em água, até que o teor de umidade no grão atinja uma faixa de 40 a 46% (b.u), condição propícia para a germinação. Nesta etapa, há a solubilização de sais minerais do endosperma e o inchamento dos grânulos de amido, tendo como finalidade retirar os grãos do estágio de dormência ativando os fitormônios, para que as enzimas proteolíticas e amilolíticas sejam liberadas, favorecendo a degradação do amido e das proteínas presentes no cereal. O produto dessa hidrólise é conduzido até o embrião, sendo utilizado para o crescimento e a respiração dos grãos (Barreiro; Fernández; Sandoval, 2003; Gorzolkaa et al. 2012).

Após a hidratação, os grãos são submetidos à etapa de germinação que consiste em acondicionar os grãos por alguns dias em ambiente com temperatura e umidade relativa do ar controladas, para dar início ao desenvolvimento do embrião, a partir da quebra de dormência do gérmen ocasionada pela absorção de água. A germinação causa um aumento na taxa de respiração, estimulando a atividade das enzimas desenvolvendo o brotamento. Tal fato ocorre inicialmente a partir da ação de fitormônios (ácido giberélico), os quais são liberados e distribuídos por toda camada aleurona formando enzimas em diferentes períodos durante a germinação. A primeira enzima formada é a β -glicanase, seguida da α -amilase e das proteases. Em geral, as enzimas formadas durante a germinação têm o intuito produzir a máxima extração a partir da modificação do endosperma pela ação enzimática (Barreiro; Fernández; Sandoval, 2003; Gorzolkaa et al. 2012).

Por fim, os grãos germinados são submetidos à operação de secagem mediante a passagem de ar quente com a temperatura controlada, a fim de interromper a germinação, deixar a umidade adequada para o armazenamento, evitar danos às enzimas e ativar as reações de escurecimento do grão, como a reação de Maillard, que agrega ao malte características como sabor, aroma e cor. A retirada de água dos grãos consiste inicialmente numa pré-secagem do malte verde (grão germinado e úmido) com temperaturas em torno de 50 °C até atingir umidade próxima a 12%. Posteriormente, os grãos são expostos à secagem (torrefação) que define o tipo de malte a ser obtido. Para os maltes claros, a secagem deve ser realizada a 80 °C até a umidade de 4,5% e para os maltes escuros, a secagem deve ser preferencialmente realizada até 100 °C para atingir a umidade próxima a 2,0% (Barreiro; Fernández; Sandoval, 2003; Gorzolkaa et al. 2012).

Durante a secagem do malte, as enzimas podem ser desnaturadas quando expostas a altas temperaturas, reduzindo sua fração presente no malte, uma vez que a β -glicanase e a β -amilase são inativadas próximas a 80 °C e a α -amilase em temperaturas acima de 90 °C. Logo, em muitas situações, a secagem do malte é realizada a baixas temperaturas com alto fluxo do ar, para minimizar a perda enzimática. Por fim, o malte seco é resfriado na própria estufa a 35 °C por aproximadamente 40 min e as radículas do malte seco são retiradas, visto que ocasionam um amargor indesejável durante a produção de bebidas fermentadas (Zschoerper, 2009).

Existem diversos parâmetros que determinam a qualidade do malte, que podem ser observados através de análises de umidade, odor, concentração de extrato, concentração de proteínas e regularidade de germinação. As características do malte informam a procedência do processo de malteação, que impacta diretamente na sua qualidade final. Entre esses parâmetros, destaca-se o poder diastático, que está relacionado com a atividade enzimática de degradação do amido dos grãos. Em geral, a hidrólise do amido dos grãos em açúcar fermentescível ocorre a partir de duas enzimas principais: α e β -amilases, produzidas durante a etapa de germinação (Fennema et al. 2010).

A β -amilase (1,4- β -D-glican maltohidrolase) é sintetizada e acumulada durante o desenvolvimento do grão através do complexo de proteínas insolúveis associadas aos grãos de amido e na forma solúvel em soluções aquosas. A β -amilase atua como exoenzima e hidrolisa as ligações glicosídicas α -(1,4) do amido,

liberando a maltose, sendo ativada no endosperma (Qi et al. 2006; Fennema et al. 2010). A α -amilase (1,4- α -D-glicanohidrolase) é considerada uma endoenzimas de ação retentora responsável por reduzir rapidamente a massa molecular de amido que hidrolisam aleatoriamente as ligações glicosídicas α -(1,4) do amido, produzindo uma mistura de glicose, maltose e dextrinas. A velocidade da hidrólise é controlada pela estrutura dos grânulos de amido de cada cereal e ativada na camada aleurona (Georg-Kraemer; Mundstock; Cavali-Molina, 2001; Xiao; Storms; Tsang, 2006; Fennema et al. 2010).

O malte além da sua aplicação mais convencional, a indústria cervejeira, pode também ser utilizado na indústria de alimentos mediante a transformação de amidos para obter maltoses, glicoses, dextrinas e alimentos maltados aplicados na elaboração de farinhas e bebidas em geral. As indústrias farmacêuticas e químicas também usufruem do malte para a obtenção de álcool em uso farmacêutico, no desenvolvimento de produtos cosméticos e perfumaria. O malte pode também ser empregado em laboratórios de análises microbiológicas, como agente sacarificante para a obtenção de meios de cultura. Além disso, o malte fornece subprodutos como as radículas e o bagaço que podem ser incorporados em diversos alimentos, como biscoitos e bolachas (Lima, 2010).

2.3. HIDRATAÇÃO DE GRÃOS

A operação de hidratação é compreendida como um processo físico que viabiliza a aderência de um fluido na superfície do produto e conseqüentemente a migração do mesmo para o seu interior através das partes que compõem o grão. O ganho de umidade do material depende alguns de fatores, como por exemplo, a composição química do material, a permeabilidade do tegumento e o método de hidratação que está diretamente relacionado com as variáveis que compõem o processo. Esses fatores acarretam possíveis modificações bioquímicas e morfológicas que definem como será a qualidade do produto para as operações subsequentes (Maskan, 2002; Bello; Tolaba; Suarez, 2004; Braga et al. 2012; Botelho et al. 2013).

As modificações bioquímicas e morfológicas ocasionadas pela hidratação proporcionam melhorias na caracterização fisiológica dos grãos, como por exemplo: diminuição no tempo de cocção para a produção de enlatados, redução ou

eliminação de fatores antinutricionais, melhorias na palatabilidade e digestibilidade de alguns nutrientes, desnaturação de proteínas, facilitação na operação de moagem para a produção de farinha, aumento no rendimento da extração de determinados componentes de interesse e auxilia a capacidade germinativa para produção de malte (Gowen et al. 2007; Coutinho et al. 2010; Botelho et al. 2013; Montanuci; Jorge; Jorge, 2013; Oliveira et al. 2013; Miano e Augusto, 2018).

O transporte de água para o interior dos cereais e leguminosas ocorre principalmente pelo mecanismo de difusão, esse mecanismo necessita de uma força motriz, o qual é ocasionado pela diferença de concentração da água na superfície do material e no seu interior (Botelho et al. 2010). Além disso, os cereais e as leguminosas em sua grande maioria são materiais porosos, característica que contribui para uma alta taxa de transferência de umidade entre o fluido e o material por meio de forças capilares (Goneli et al. 2009). Logo, o processo de hidratação ocorre inicialmente com a migração da água com uma maior facilidade pelos poros, e com a saturação destes, o fluxo de água é mantido pela ação do mecanismo de difusão. Esses mecanismos de transferência de massa definem a capacidade de absorção de água pelo material, até o momento em que a concentração de água no grão não se altere (Bello; Tolaba; Suarez, 2004; Lisbôa et al. 2015).

Segundo Paquet-Durand et al. (2015), a difusão da água para o material está relacionada com a estrutura do produto, uma vez que na hidratação de cereais a absorção de água ocorre de forma mais intensa na camada externa do gérmen. Miano, Garcia e Augusto (2015) relatam que as leguminosas apresentam em sua estrutura o hilo que propicia uma via importante para a entrada de água. De acordo com Pineda-Gómez et al. (2012) e Sopade, Aijsegiri e Badau (1992), a composição química do material também é um fator importante na taxa de transferência de massa, uma vez que as ligações de hidrogênio da água-amido e alguns componentes como mucilagens, celulose e substâncias pécticas contribuem no processo de hidratação. Sopade, Aijsegiri e Badau (1992) evidenciam que a proteína é o macronutriente com maior influência na absorção de água, uma vez que estudos de hidratação envolvendo as leguminosas (produto com concentração de proteínas maior em comparação aos cereais) apresentaram maior taxa de transferência de umidade.

A hidratação comercial de cereais e leguminosas é um processo que ocorre geralmente com a água de hidratação a temperatura ambiente, tornando-o um processo relativamente demorado, o que pode gerar fatores inadequados, como a proliferação indesejável de microrganismos e a utilização de grandes volumes de água. Com isso, a operação de hidratação vem sendo estudada há décadas com o intuito de aprimorar o processo, sendo o aumento da temperatura da água de hidratação, a tecnologia mais aplicada (Miano e Augusto, 2018).

2.3.1. Processo de Hidratação Isotérmica

Diversos autores afirmam que a temperatura é considerada a variável de maior importância na operação de hidratação, devido a essa variável influenciar a velocidade de absorção de água, juntamente com os custos envolvidos no processo quando comparados com outros métodos de hidratação. Além disso, a temperatura pode ser utilizada para definir o tempo necessário para que o material alcance a umidade desejada. No entanto, a temperatura deve ser intensamente investigada, uma vez que a utilização de temperaturas muito elevadas podem causar o rompimento da casca, a degradação de compostos químicos e a maximização dos sólidos lixiviados, aumentando a energia gasta no processo (Maskan, 2001; Coutinho et al. 2010; Yildirim; Öner; Bayram, 2011; Montanuci; Jorge; Jorge, 2013; Oli et al. 2014).

A elevação da temperatura consiste em um processo no qual o sistema de hidratação opera em condições isotérmicas, ou seja, não há a variação da temperatura ao longo do tempo. Devido à importância do sistema isotérmico na hidratação de cereais e leguminosas, um resumo das principais pesquisas realizadas nos últimos anos é apresentado no Quadro 2.4.

QUADRO 2.4 – ESTUDOS RELACIONADOS A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA EM CEREAIS E LEGUMINOSAS NOS ÚLTIMOS ANOS.

(continua)

Cereal/ Leguminosa	Temperatura de hidratação (°C)	Tempo de hidratação (h)	Autores
Arroz	35, 45, 55 e 65	15	Balbinoti; Jorge; Jorge, (2018 ^{a,b})
	35,5, 45,5, 55,5 e 65,5	10	Nicolin et al. (2017)
	35, 45, 55 e 75	10	Botelho et al. (2010)

(conclusão)

Aveia	10, 20, 25 e 35	10	Anthero et al. (2019)
Cevada	30, 35 e 40	12	Borsato; et al. (2019)
	10, 15, 20, 25, 30 e 35	32	Montanuci; Jorge; Jorge, (2015, 2013)
	10, 15, 20 e 25	32	Montanuci et al. (2014)
	22	8	Cozzolino; Roumeliotis; Eglinton, (2014)
Ervilha	5, 10, 15, 20 e 25	96	Mercier et al. (2015)
Feijão bambara	25, 50, 70 e 100	24	Jideani e Mpotokwana, (2009)
Feijão Adzuki	25, 32,5, 40, 55 e 70	10	Oliveira et al. (2013)
Feijão Mungo	25, 35, 45 e 55	8,3	Sharanagat; Kansal; Kumar, (2018)
Feijão	10, 20, 30 e 40	2	Pramiu et al. (2017)*
Grão-de-bico	25, 35, 45, 55 e 65	6	Johnny et al. (2015)
	40, 50 e 60	2	Prasad et al. 2010
	10, 20 e 40	-	Pramiu et al. (2015)*
Grão de bico e Feijão	5, 25 e 45	24	Shafaei; Masoumi; Roshan, (2016)
Grão de Fava	20, 35, 50 e 65	16	Garvín et al. (2019)
Lentilha	25, 32,5, 40, 55, 70 e 80	3	Oroian (2017)
Milho	30	48	Uriarte-Aceves et al. (2020)
	40, 50, 60 e 67	10	Nicolin et al. (2017)
	40, 50, 60 e 67	30	Marques; Jorge; Jorge, (2014, 2016)
	40, 50, 60 e 70	12	Botelho et al. (2013)
Sorgo	30, 40, 50 e 60	12	Silva; Jorge; Jorge (2019)
	10, 20, 30, 40 e 50	10	Kashiri; Kashaninejad; Aghajani, (2010)
Soja	30, 40, 50 e 60	8	Borges; Jorge; Jorge, (2017)
	10, 20, 30, 40 e 50	-	Nicolin et al. (2015)
	10, 20, 30, 40 e 50	57,5	Coutinho et al. (2010)
	25, 35, 45, 55 e 65	7,5	Fracasso et al. (2014)
	25, 35, 45 e 65	2,8	Fracasso et al. (2015)
Sementes de cucurbitáceas	25, 35 e 45	10	Edith et al. (2016)
Tremoço	23, 30, 40, 50 e 60	6,5	Miano; Garcia; Augusto, (2015)
Trigo	30, 40, 50 e 60	10	Mattioda; Jorge; Jorge (2019 ^a)
	30, 50, 60 e 70	1	Vengaiah et al. (2012)

* As temperaturas utilizadas nesse estudo foram combinadas com diferentes pressões, mas o processo de hidratação ocorreu sempre a temperatura e pressão constantes.

FONTE: O autor (2020).

Em geral, os trabalhos que utilizaram o aumento da temperatura da água para hidratação de grãos afirmaram que a modificação dessa variável acarreta uma maior taxa de transferência de massa. Esse aumento na taxa da transferência de

massa propicia o ganho de umidade de forma exponencial, possibilitando a utilização da Equação de Arrhenius para descrever a influência da temperatura na hidratação, com o intuito de se obter a energia de ativação do processo. Segundo Oliveira et al. (2013), o aumento na transferência de massa a partir da elevação da temperatura está atribuído ao aumento na velocidade da reação e na redução da viscosidade da água que melhora o deslocamento do fluxo capilar e a dilatação dos poros.

A elevação da temperatura da água de hidratação para um mesmo material geralmente ocasiona no aumento da umidade de equilíbrio, conforme foi observado para o trigo (Maskan, 2001; Vengaiah et al. 2012; Mattioda; Jorge; Jorge, 2019^a), gergelim (Khazaei e Mohammadi, 2009), sorgo (Kashiri; Kashaninejad; Aghajani, 2010; Silva; Jorge; Jorge, 2019), soja (Fracasso et al. 2014 e 2015), feijão adzuki (Miano e Augusto, 2015), cevada (Montanuci; Jorge; Jorge, 2015), sementes de abobora (Edith et al. 2016), aveia (Anthero et al. 2019) e arroz (Balbinoti; Jorge; Jorge, 2018^a). Segundo esses autores, o aumento na umidade de equilíbrio com a elevação da temperatura está relacionado com a expansão dos poros e com o aumento da solubilidade dos componentes presentes no grão.

Em alguns casos, o uso de altas temperaturas de hidratação propiciam a redução da umidade de equilíbrio, conforme observado para o feijão vermelho (Abu-Ghannam e McKenna, 1997), feijão adzuki (Oliveira et al. 2013) e grão-de-bico (Prasad et al. 2010; Gowen et al. 2007; Johnny et al. 2015;). Segundo os autores, tal fato pode ser justificado devido à grande quantidade de sólidos lixiviados, danos na estrutura do material, bem como a rápida saturação do pericarpo diminuindo a força motriz do processo de transferência de massa.

E por fim, alguns cereais e leguminosos apresentam-se mais estáveis com a elevação da temperatura da água durante a hidratação, conforme observado para a soja (Coutinho et al. 2010; Borges; Jorge; Jorge, 2017), feijão Caupi (Kaptso et al. 2008), milho (Marques; Jorge; Jorge, 2016) e lentilha (Oroian, 2017). A variação da umidade de equilíbrio do produto vai depender da termosensibilidade do material, da variação da temperatura estudada e do tempo total de processo (Miano e Augusto, 2018). No geral, tanto para os cereais quanto para as leguminosas a temperatura da água de hidratação acima de 60 °C tendem a alterar drasticamente a composição química e morfológica do produto, uma vez que essa faixa de temperatura possibilita a gelatinização dos grânulos de amido e a desnaturação das proteínas.

Mesmo que o aumento da temperatura seja a tecnologia mais estudada para o processo de hidratação de grãos, outras tecnologias emergentes têm sido investigadas com o intuito de intensificar o ganho de umidade sem afetar as características do produto, possibilitando uma redução no tempo de hidratação e consequentemente um aumento na capacidade de processamento.

2.3.2. Intensificação do Processo – Hidratação Periódica

A intensificação de processos na hidratação de cereais e leguminosas tem sido avaliada a partir de diferentes tecnologias, com o intuito aumentar o transporte de massa e a quantidade de produção, sem afetar a qualidade do produto.

Entre as novas pesquisas relacionadas a intensificar o processo de hidratação, destaca-se a tecnologia de ultrassom, mediante ao uso de banhos ultrassônicos, recentemente aplicada na hidratação de grão-de-bico (Yildirim; Öner; Bayram 2010 e 2011; Ranjbari et al. 2013), milho (Miano; Ibarz; Augusto, 2017), sorgo (Patero e Augusto, 2015; Miano; Ibarz; Augusto, 2016), feijão (Ghafoor et al. 2014; Miano; Sabadoti; Augusto, 2018), feijão mungo (Miano et al. 2016), e a utilização do ultrassom para o processo de germinação (Miano et al. 2015) e produção de malte (Carvalho et al. 2018; Borsato et al. 2019) a partir de grãos de cevada. Essa técnica também foi avaliada como um pré-tratamento a partir de uma sonda ultrassônica para a hidratação de grãos de feijão (Ulloa et al. 2015; López López et al. 2017). Segundo os autores, a utilização de técnicas a partir de ultrassom melhora o fluxo de água para o interior do grão, devido à passagem da onda acústica pelo produto provocando uma compressão e uma expansão do meio, causando uma diferença de pressão.

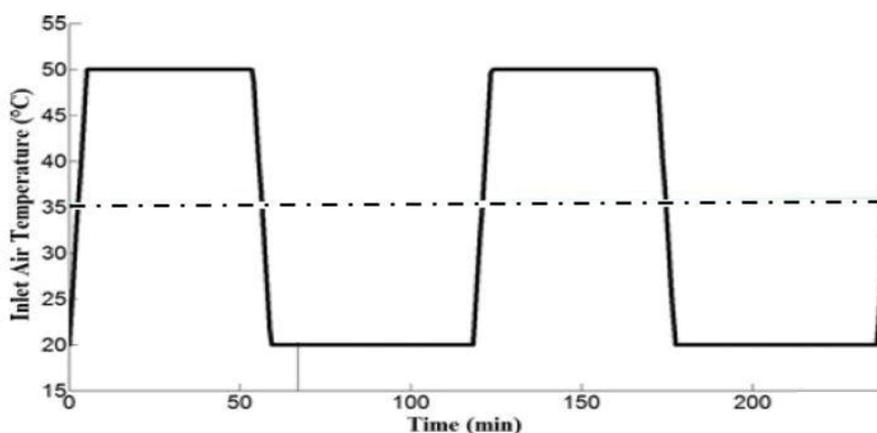
Outra tecnologia avaliada para melhorar a absorção da água pelos grãos é a alta pressão hidrostática. Para essa tecnologia, até o presente momento, apenas grão-de-bico (Ibarz et al. 2004), feijão branco (Ramaswamy et al. 2005) e feijão adzuki (Ueno et al. 2015) foram investigados. Os autores confirmaram que as faixas de pressão aplicadas de 33 MPa a 700 MPa proporcionaram um aumento na taxa de transferência de umidade quando comparado ao processo de hidratação isotérmico.

Além das tecnologias já citadas, a hidratação tem sido investigada a partir da modificação das variáveis de processo, como por exemplo, a temperatura e a pressão do sistema, mediante ao uso de frequência e amplitude especificadas. Em produtos alimentícios, a operação de secagem foi pioneira em relatar à importância

da modulação da variável de processo, a partir da modificação da temperatura do ar de secagem e da pressão do sistema. Segundo Defendi, Paraíso e Jorge (2016, 2017), a operação intermitente foi explorada como uma alternativa para reduzir custos, através do melhoramento da transferência de massa e energia, bem como a redução no tempo de secagem. Os autores relatam que como a taxa de secagem não é linear, ou seja, depende da temperatura do ar, a modulação da temperatura do ar de secagem tende a alcançar uma maior eficiência em comparação com o método convencional.

Os valores estipulados para a variável manipulada são baseados a partir da temperatura isotérmica aplicada na secagem convencional. Segundo Defendi, Paraíso e Jorge (2017), a amplitude do sistema é determinada pela variação experimental entre a alternância referente às temperaturas máximas e mínimas moduladas (20 e 50 °C – linha contínua) e a temperatura isotérmica (35 °C – linha tracejada) (FIGURA 2.5).

FIGURA 2.5 – MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DO AR DE SECAGEM A PARTIR DA CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

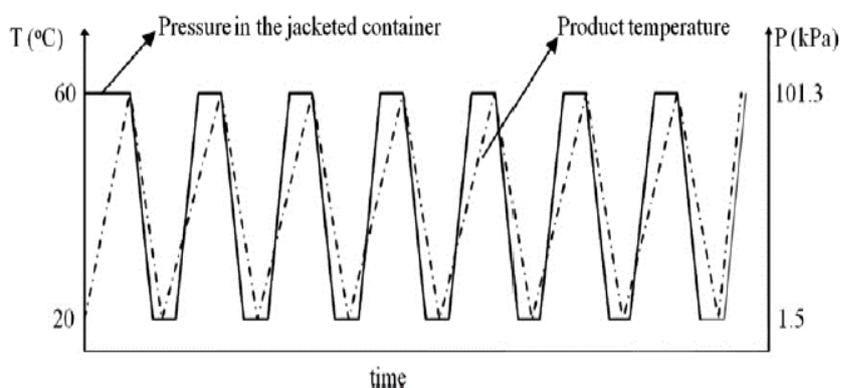


FONTE: Defendi; Paraíso; Jorge (2017).

Defendi et al. (2014) relatam ao avaliarem a secagem de arroz mediante a operação intermitente que as maiores amplitudes aplicadas na modulação da temperatura do ar impactam numa maior taxa de secagem em comparação com as menores amplitudes. Os autores também informam que a utilização de pequenos tempos na modulação da temperatura e baixa variação de amplitude, ocasionam no aumento do consumo energético, com a perda de umidade do grão semelhante ao processo de secagem convencional.

Em relação à pressão, a secagem convectiva multi-flash com a modulação da pressão do sistema foi avaliada para a desidratação de bananas e mangas, a partir de uma bomba de vácuo que reduzia a pressão para 1,5 kPa durante 5 min e posteriormente retornava a pressão atmosférica (101,3 kPa) (FIGURA 2.6) (Zotarelli; Porciuncula; Laurindo, 2012). Segundo Zotarelli, Porciuncula e Laurindo (2012) e Monteiro, Carciofi e Laurindo (2016), a aplicação da modulação da pressão para secagem de frutas acarretou produtos de ótima qualidade sensorial, além de conseguir menores tempos de secagem em comparação com os métodos por liofilização e secagem convectiva.

FIGURA 2.6 – MODULAÇÃO DA PRESSÃO DO SISTEMA NA OPERAÇÃO DE SECAGEM.



FONTE: Zotarelli; Porciuncula; Laurindo (2012).

Para o processo de hidratação, a partir da modulação de uma variável, as pesquisas apresentadas até o presente momento são praticamente inexistentes na literatura. A periodicidade das variáveis para a hidratação de grãos foi investigada mediante a modulação da pressão, temperatura e volume do tanque de hidratação.

A modulação da pressão do sistema apresentou um aumento na taxa de transferência de umidade ao ser investigado para manter a qualidade aromática do feijão (*Cannellini beans*) enlatado (Naviglio et al. 2013) e para o processo de hidratação do feijão Tepary (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) e feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.) (Zanella-Díaz et al. 2014). Segundo os autores, a utilização da pressão implicou na retirada dos gases oclusos presentes no interior dos poros, facilitando o processo de transferência de umidade para o interior do grão.

Munson-Mcgee (2014) utilizou a modulação do volume, através da aplicação de intervalos alternados de imersão em água e drenagem, para avaliar o processo de hidratação de grãos de sorgo. O autor constatou que a umidade no interior do

grão foi mais uniforme mediante a imersão intermitente quando comparado com a imersão convencional.

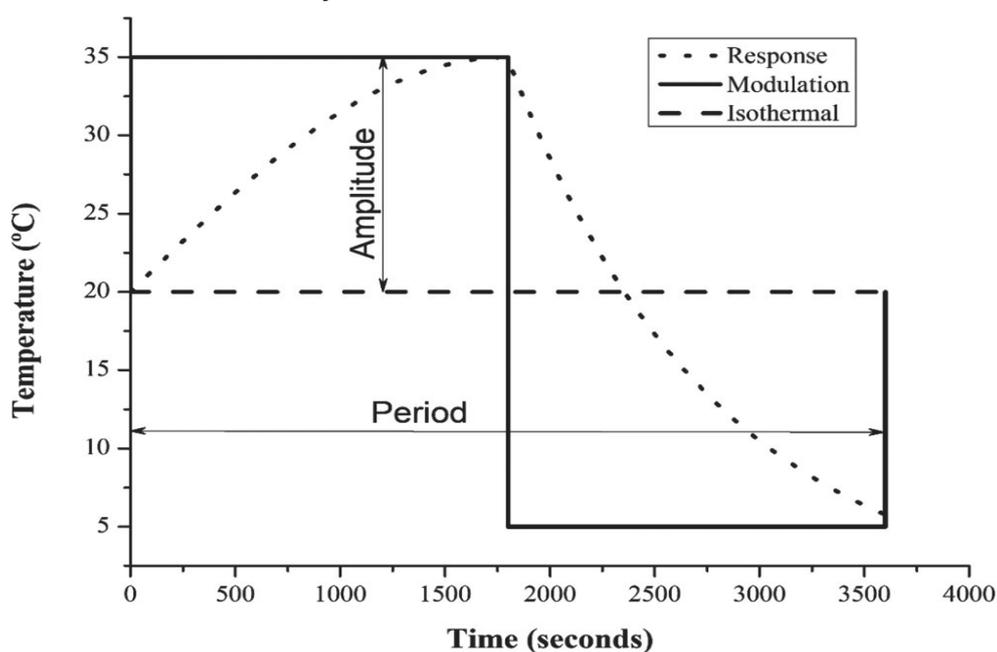
A modulação intermitente da temperatura para a hidratação de grãos foi investigada pela primeira vez por Igathinathane, Chattopadhyay e Pordesimo (2005), ao avaliarem a hidratação do arroz para o processo de parboilização. Segundo os autores, a utilização da hidratação intermitente, com a temperatura inicial da água a 80 °C seguido da diminuição para 70 °C resultou na redução no tempo de hidratação em aproximadamente 67% quando comparado com a hidratação isotérmica a 70 °C. Segundo os autores a redução no tempo de foi baseada na taxa de imersão aumentada. Oladele et al. (2019) obtiveram bom ajustes de modelos matemáticos a partir da modulação da temperatura da água de hidratação para grãos de aveia ao modularem a temperatura intermitentemente de 25 para 55 °C para grãos de aveia.

A modulação contínua de uma variável de processo pode ser também denominada de operação periódica, o qual diferentemente da operação intermitente, tem como uma de suas premissas operar com a medida da variável manipulada sempre em regime transiente (Silveston, 1998; Mattioda; Jorge; Jorge, 2018). A operação periódica advém de reatores catalíticos heterogêneos, no qual o catalisador necessita ser regenerado *in situ* operando periodicamente durante todo o tempo de processo, com o intuito de melhorar o desempenho dos reatores, associado ao ganho na seletividade ou ao maior rendimento do produto (Sterman e Ydstie, 1990; Silveston, 1998).

A operação periódica a partir da modulação da temperatura foi avaliada até o presente momento para os grãos de cevada (Chacón; Jorge; Jorge, 2019) e trigo (Mattioda; Jorge; Jorge, 2018 e 2019^b). Segundo Mattioda, Jorge e Jorge (2018), a operação periódica para a hidratação de grãos pode ser definida como a modulação contínua de no mínimo uma variável de processo, em um dado período e amplitude especificados, na qual o sistema deve operar sempre em regime transiente. Chacón, Jorge e Jorge (2019) apresentam um exemplo da modulação da temperatura da água de hidratação submetido a uma função degrau a partir da isotérmica de 20 °C (linha tracejada-isothermal), com uma amplitude (perturbação na forma de ondas quadráticas-modulation) de 15 °C e períodos de 1 hora. A resposta térmica do sistema foi observada por termopares tipo k (pontilhado-response) quando submetido a modulação da temperatura (FIGURA 2.7).

Chacón, Jorge e Jorge (2019) avaliaram o processo de hidratação periódica para grãos de cevada, mediante a uma amplitude de 15 °C e período de 30 min, a partir da isotérmica de 20 °C, dos quais conseguiram atingir uma umidade de 40% em menos de 4 horas de processo com a operação periódica resultando uma economia de aproximadamente 80% no tempo de hidratação.

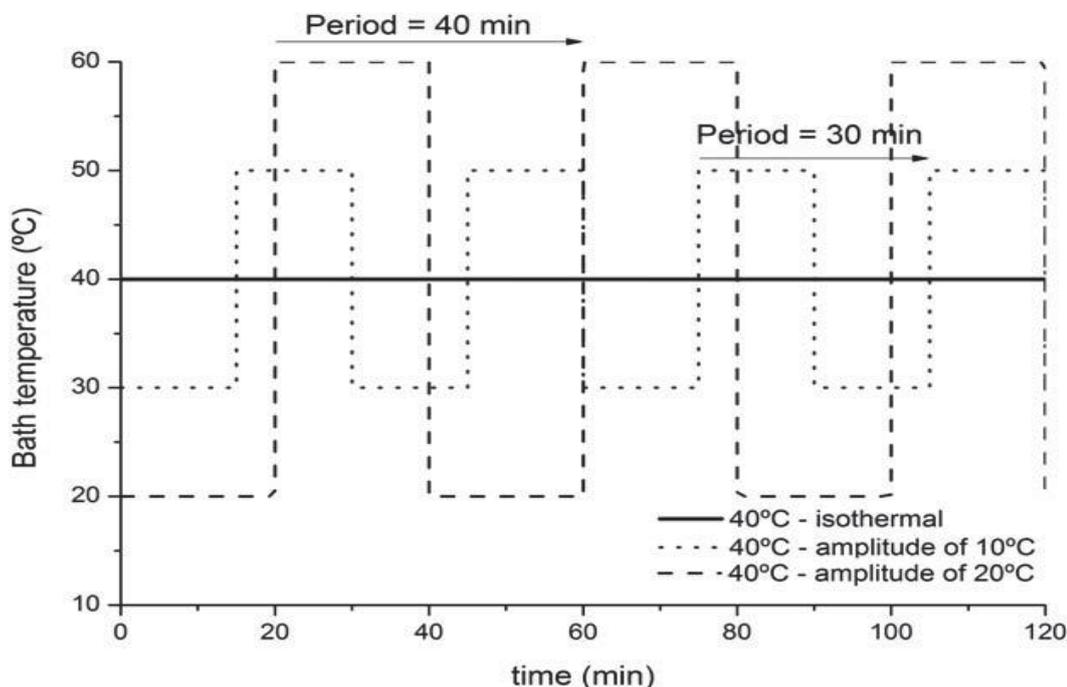
FIGURA 2.7 – ILUSTRAÇÃO DA MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA DE HIDRATAÇÃO PARA A OPERAÇÃO PERIÓDICA, A PARTIR DA ISOTÉRMICA.



FONTE: Chacón; Jorge; Jorge (2019).

Mattioda, Jorge e Jorge (2018 e 2019^b) compararam a cinética de hidratação e a difusividade da água em grãos de trigo, a partir da hidratação isotérmica e periódica. O primeiro estudo avaliou a hidratação periódica em torno da isotérmica de 40 °C utilizando duas combinações de período e amplitude (30 min com 10 °C e 40 min com 20 °C) (FIGURA 2.8). No segundo estudo, os autores compararam a hidratação periódica com amplitudes de 10 e 20 °C e período fixo de 30 min, a partir das isotérmicas operando a 22 °C, 30 °C e 40 °C. Segundo os autores, o processo de hidratação do trigo com a amplitude de 20 °C a partir das temperaturas isotérmicas de 30 °C e 40 °C possibilitam uma redução no tempo de hidratação de 40%.

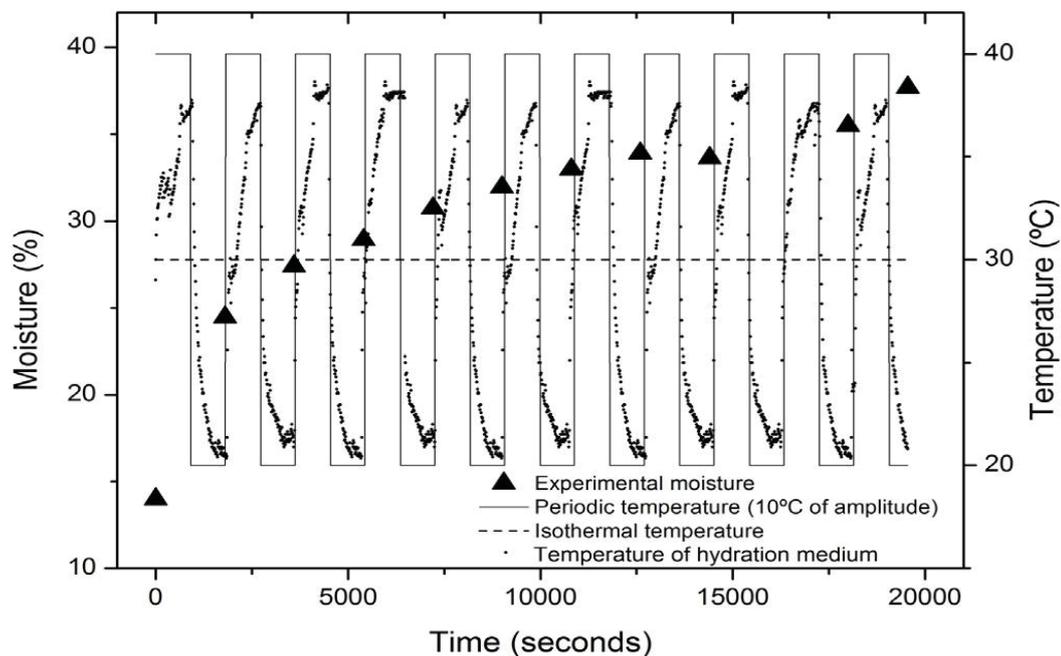
FIGURA 2.8 – MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA DE HIDRATAÇÃO COM DUAS COMBINAÇÕES DE AMPLITUDE E PERÍODO.



FONTE: Mattioda; Jorge; Jorge (2018).

A representação gráfica da operação periódica com a amplitude de 10 °C em torno da isotérmica de 30 °C, juntamente com o ganho de umidade do trigo e a temperatura média das amostras ao longo dos ciclos de hidratação foi representado por Mattioda, Jorge e Jorge, (2019^b) para o melhor entendimento do funcionamento da operação periódica (FIGURA 2.9). Segundo os autores, a eficiência da operação periódica está diretamente relacionada com as condições aplicadas no sistema, ou seja, dependem da combinação de período e amplitude, juntamente com as características morfológicas e físico-químicas de cada grão. Os autores ainda relatam que a maior transferência de massa para o interior do grão, a partir da utilização da variável manipulada está principalmente relacionada ao gradiente de concentração ser mais expressivo na operação periódica, que impacta no amolecimento do pericarpo mais rápido, diminuindo a resistência a absorção de água, juntamente com o gradiente de temperatura associado ao efeito Soret.

FIGURA 2.9 – REPRESENTAÇÃO GRÁFICA DA OPERAÇÃO PERIÓDICA COM O PERÍODO DE 30 MIN E AMPLITUDE DE 10 °C, EM TORNO DA ISOTÉRMICA DE 30 °C.



FONTE: Mattioda; Jorge; Jorge (2019^b).

Como pode ser visto, o processo de hidratação de cereais e leguminosas é basicamente avaliado em condição isotérmica, muito pouco ainda foi explorado mediante as tecnologias emergentes. Para operação periódica, a quantidade de trabalhos publicados é praticamente irrelevante, apenas estudos envolvendo grãos trigo e cevada foram investigados por essa tecnologia. Logo, há a necessidade de intensificar os estudos envolvendo a operação periódica, com o intuito de tentar entender os efeitos das variáveis moduladas, a partir dos períodos e amplitudes aplicados, nas características físico-químicas e morfológicas dos grãos.

2.4. CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO A PARTIR DE MODELOS MATEMÁTICOS

Para a otimização de processos e a obtenção de alimentos de qualidade, há a necessidade de compreender a composição físico-química e a estrutura dos cereais e leguminosas *in natura* que são submetidas ao processo de hidratação. Além disso, as condições de operação do sistema estão diretamente ligadas à quantidade de água absorvida pelo produto. Logo, a taxa de transferência de umidade para o grão torna-se dependente das características intrínsecas do material e extrínsecas do sistema (binômio tempo e temperatura). As condições empregadas na hidratação definem a qualidade fisiológica e sensorial do produto final (Fracasso et al. 2015; Marques; Jorge; Jorge, 2016; Balbinoti; Jorge; Jorge, 2018^{a,b}).

Os resultados das modificações químicas, físicas e morfológicas, bem como a taxa de transferência de umidade para o grão são extraídos com o auxílio de uma ferramenta matemática, a qual é capaz de interpretar e apresentar as melhores condições através de um perfil de comportamento ao longo da hidratação. Tal instrumento utilizado é baseado nos modelos matemáticos que podem ser definidos como uma representação para descrever um sistema real e a forma como ocorrem as modificações no mesmo, sendo caracterizados basicamente em modelos empíricos e modelos fenomenológicos (Coutinho et al. 2007; Omoto et al. 2009; Nicolin et al. 2017).

O ajuste dos modelos matemáticos permitem a identificação dos coeficientes presente em cada modelo, os quais são capazes de explicar a taxa de transferência de massa e a interpretação dos fenômenos que ocorrem no produto ao longo do evento de hidratação (Fracasso et al. 2015; Lisbôa et al. 2015; Nicolin et al. 2015; Pramiu et al. 2017; Oroian, 2017).

2.4.1. Modelo Empírico de Hidratação – Modelo de Peleg

Os modelos empíricos são geralmente baseados em fundamentos de correlações matemáticas simples, os quais descrevem o processo de hidratação a partir de observações dos dados experimentais. Para a escolha do melhor modelo, a adequabilidade do ajuste aos dados experimentais deve ser levada em consideração, por isso, os modelos empíricos têm sido amplamente aplicados no processo de hidratação de grãos e sementes (Turhan; Sayar; Gunasekaran, 2002; Kashiri; Kashaninejad; Aghajani, 2010; Yildirim; Öner; Bayram, 2010).

O modelo de Peleg é um modelo matemático empírico não exponencial de dois parâmetros, considerado segundo alguns autores, o mais utilizado para descrever a cinética de hidratação de grãos. Sua vasta aplicação está relacionada à sua simplicidade e por conseguir descrever adequadamente o processo para a maioria dos produtos avaliados (Maskan, 2002; Kashiri; Kashaninejad; Aghajani, 2010; Yildirim; Öner; Bayram, 2010; Oliveira et al. 2013). Esse modelo (EQUAÇÃO 2.1) foi desenvolvido por Michel Peleg no ano de 1988, na tentativa de simplificar a descrição de sorção de água nos alimentos, sendo introduzido para descrever a sorção de água em grãos de arroz e leite em pó, em diferentes condições de temperaturas e pressão, alcançando coeficientes de correlação na ordem de 0,95 a 0,99 (Peleg, 1988).

Desde então, o modelo de Peleg tem se ajustado satisfatoriamente aos dados de hidratação de diversos grãos, principalmente no sistema isotérmico, como por exemplo: trigo (Maskan, 2002; Mattioda; Jorge; Jorge, 2019^a), gergelim (Khazaei e Mohammadi, 2009), cevada (Montanuci; Jorge; Jorge, 2013, 2015; Borsato et al. 2019), grão-de-bico (Pramiu et al. 2015; Shafaei; Masoumi; Roshan, 2016), diferentes espécies de feijão (Oliveira et al. 2013; Mário e Augusto, 2015; Miano e Augusto, 2015; Shafaei; Masoumi; Roshan, 2016; Sharanagat; Kansal; Kumar, 2018), lentilha (Oroian, 2017), milho (Botelho et al. 2013; Marques; Jorge; Jorge, 2016; Uriarte-Aceves et al. 2020), soja (Fracasso et al. 2014, 2015; Borges; Jorge; Jorge, 2017), sorgo (Kashiri; Kashaninejad; Aghajani, 2010; Silva; Jorge; Jorge, 2019) e arroz (Balbinoti, Jorge e Jorge, 2018^b), entre outros.

Nos últimos anos, as tecnologias emergentes utilizadas para intensificar o processo de hidratação de grãos, também tem utilizado o modelo de Peleg para prever o comportamento de absorção de água. Entre as novas tecnologias destaca-se o ultrassom, o qual o ajuste do modelo de Peleg aos dados experimentais foi avaliado para grãos de feijão (Ghafoor et al. 2014; Ulloa et al. 2015; López López et al. 2017), grão-de-bico (Yildirim; Öner; Bayram, 2010; Ranjbari et al. 2013) sorgo (Patero e Augusto, 2015) e cevada (Carvalho et al. 2018). Há também o ajuste do modelo de Peleg aos dados para tecnologias de alta pressão e modulação da pressão, que avaliaram a cinética de hidratação do feijão (Naviglio et al. 2013; Zanella-Díaz et al. 2014). E por fim, o ajuste do modelo de Peleg aos dados obtidos para a operação periódica, a partir da modulação da temperatura que foi avaliado para os grãos de trigo (Mattioda; Jorge; Jorge, 2019^b), cevada (Chacón; Jorge; Jorge, 2019) e aveia (Oladele et al. 2019.)

O maior benefício da aplicação do modelo de Peleg está relacionado com a vantagem no ganho de tempo para predizer a cinética de sorção de água, já que um de seus parâmetros possibilita obter o teor de umidade de equilíbrio do material em uma dada condição. Além disso, o modelo de Peleg, mesmo que seja considerado empírico, possui parâmetros que apresentam alguma representatividade física para o processo de hidratação (Sopade; Aijsegiri; Badau, 1992; Peleg, 1988; Turhan; Sayar; Gunasekaran 2002; Gowen et al. 2007; Miano e Augusto, 2018).

$$U(t) = U_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 * t} \quad (2.1)$$

em que, $U(t)$ é a umidade em função do tempo (%_{b.u.}); U_0 é a umidade inicial (%_{b.u.}); t é o tempo de hidratação (min); k_1 é o parâmetro relacionado a taxa de absorção de transferência de massa (min %_{b.u.}⁻¹); e k_2 é o parâmetro relacionado à capacidade máxima de absorção (%_{b.u.}⁻¹).

De acordo com Gowen et al. (2007) e Shafaei, Masoumi e Roshan (2016), o modelo de Peleg (1988) avalia os dados experimentais através da relação entre o inverso da razão de umidade em relação ao tempo de processo, onde o k_1 é um parâmetro inversamente relacionado à taxa de absorção de água, e o k_2 inversamente relacionado à umidade de equilíbrio. Os parâmetros referentes ao modelo de Peleg podem ser obtidos mediante a linearização da Equação 2.1 ou com uma maior precisão a partir de uma regressão não linear.

2.4.2. Modelos Fenomenológicos de Hidratação

Os modelos fenomenológicos são baseados em princípios das leis da física, tais como as leis da difusão e convecção, levando em consideração estágios elementares da transferência de massa. Com isso, os modelos fenomenológicos em sua grande maioria manifestam maior dificuldade de resolução, visto que são constituídos de equações mais complexas. No entanto, os modelos fenomenológicos possuem uma faixa de validade de aplicação mais ampla que os modelos empíricos, podendo ser extrapolados em condições além das operacionais, permitindo simular o processo em condições não analisadas experimentalmente (Crank, 1975; Hsu, 1983; Omoto et al. 2009; Nicolin et al. 2015).

Entre os modelos fenomenológicos aplicados na hidratação de cereais e leguminosas podem ser citados os modelos de Difusão (Crank, 1975) e Omoto-Jorge (Omoto et al. 2009).

2.4.2.1. Modelo de Difusão

O modelo de difusão proposto por Crank (1975) é baseado na segunda lei de Fick, o qual relata que a taxa de difusão da água ocorre na direção do fluxo da superfície para o interior do material e deve ser proporcional ao gradiente de concentração de umidade entre essas duas regiões (Crank, 1975; Oli et al. 2014). Segundo Miano e Augusto (2018), o modelo de difusão é considerado o modelo fenomenológico mais aplicado na modelagem de cereais e leguminosas na

operação de hidratação, principalmente por conter em sua solução analítica apenas um parâmetro, a difusividade (D_{AB}).

A difusividade (D_{AB}) presente no modelo, representa a difusão do processo de hidratação em condições isotérmicas e isobáricas (Laurindo, 2016). No entanto, segundo Naviglio et al. (2013) e Mattioda, Jorge e Jorge (2018 e 2019^b), o ajuste do modelo de Difusão aos dados experimentais no processo de hidratação a partir da modulação contínua da variável temperatura e pressão apresentaram resultados satisfatórios no ajuste do modelo, ao hidratarem grãos de trigo (Mattioda; Jorge; Jorge, 2018 e 2019^b) e feijão (Naviglio et al. 2013), respectivamente. Segundo Mattioda, Jorge e Jorge (2018), o ajuste do modelo de forma não linear proporcionou valores do coeficiente de determinação de 0,98, com erro médio relativo menor que 3,04% e raiz quadrada média do erro menor que 0,12%.

Os estudos envolvendo o modelo de Difusão descrevem a difusividade, como um parâmetro efetivo, ou seja, um coeficiente de difusão aparente (D_{ef}), que considera todos os tipos de fenômenos de transferência de massa (Miano e Augusto, 2018). O coeficiente de difusão efetivo aparente possibilita a descrição da velocidade de transferência de massa a partir do ajuste do modelo aos dados experimentais. Até o presente momento o ajuste do modelo de Difusão foi avaliado principalmente em condição de hidratação isotérmica, como por exemplo: milho (Verma e Prasad, 1999), arroz (Thakur e Gupta, 2006; Bakalis et al. 2009; Balbinot; Jorge; Jorge, 2018^{a,b}), grão de bico (Prasad et al. 2010; Pramiu et al. 2015), cevada (Montanuci et al. 2014; Montanuci Jorge; Jorge, 2015), feijão (Sharanagat; Kansal; Kumar, 2018) e ervilhas (Mercier et al. 2015), lentilhas (Oroian, 2017) e sorgo (Silva; Jorge; Jorge, 2019), entre outros.

Além da condição de hidratação isotérmica, o modelo de difusão foi avaliado para tecnologias emergentes, como a utilização de ultrassom aplicado na hidratação de grão-de-bico (Yildirim; Öner; Bayram, 2011) e de feijão (Ghafoor et al. 2014); aplicação de alta pressão para a hidratação de feijão (Ueno et al. 2015); e a modulação de variáveis como o volume do leito, pressão e temperatura, das quais o modelo de difusão foi ajustado aos dados na hidratação de sorgo (Munso-Mcgee, 2014), feijão (Naviglio et al. 2013) e trigo (Mattioda; Jorge; Jorge, 2018 e 2019^b), respectivamente.

A equação da difusão está fundamentada para as geometrias regulares, como placas planas, cilindros e esferas, na forma de séries com diferentes termos. Logo, aplicando a lei de Fick para um sistema em que não há variação no volume ao longo de hidratação, um balanço de massa na superfície do material, considerando que a difusão ocorre em um corpo esférico e que o transporte de água é apenas no sentido unidimensional radial, é possível obter a solução propostas por Crank (1975) (EQUAÇÃO 2.2).

$$\frac{\partial C}{\partial t} = \left(\frac{\partial^2 C}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial C}{\partial r} \right) D_{ef} \quad (2.2)$$

em que, C (%_{b.u}) é a concentração e trata-se de uma função do tempo t (s) e da concentração radial r (m); D_{ef} (m² s⁻¹) é o coeficiente de difusão efetivo. Com uma distribuição inicial $f(r)$ e considerando $U = rC$, obtém-se a Equação 2.3

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial r^2} \right) \quad (2.3)$$

Assim, a solução analítica da Equação 2.3 possibilita obter um modelo capaz de descrever os dados experimentais de hidratação com base na razão de umidade (RU) para geometria esférica, presumindo que o coeficiente de difusão aparente é independente da concentração e a umidade inicial do grão deve ser homogênea em toda sua área (EQUAÇÃO 2.4) (Bello et al. 2004; Prasad et al. 2010; Mattioda et al. 2019b).

$$RU = \frac{U(t) - U_e}{U_0 - U_e} = \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{n^2 D_{ef} \pi^2}{rm^2}\right) t \quad (2.4)$$

em que, rm (m) é o raio médio da partícula; n é o número de termos que serão utilizados na série; U_0 (%_{b.u}) é a condição inicial de umidade; e U_{eq} (%_{b.u}) é a condição a qual considera a superfície do grão mantém a umidade de equilíbrio ao longo de todo o processo de hidratação; e $U(t)$ (%_{b.u}) é a condição de umidade em função do tempo.

2.4.2.2. Modelo de Omoto-Jorge

O modelo de Omoto-Jorge foi proposto por Omoto et al. (2009), ao avaliarem a cinética de hidratação e a modelagem matemática de sementes de ervilhas. Trata-se de um modelo fenomenológico que leva em consideração a variação da concentração de água no equilíbrio e a concentração de água em um determinado tempo. Mesmo que o modelo de Omoto-Jorge não tenha a mesma representatividade que o modelo de Difusão, em relação à aplicabilidade em artigos, os trabalhos de hidratação que ajustaram o modelo de Omoto-Jorge apresentaram coeficientes de determinação satisfatórios, como é o caso do grãos de arroz (Balbinoti; Jorge; Jorge 2018^a) e da soja (Borges; Jorge; Jorge, 2017), o qual exprimiram valores do coeficiente de determinação na faixa de 0,83 a 0,93 para o arroz e 0,98 a 0,99 para a soja.

Até o presente momento, o único trabalho encontrado na literatura que apresenta o ajuste do modelo de Omoto-Jorge para tecnologias emergentes foi o de Chacón, Jorge e Jorge (2019) que avaliaram o ajuste do modelo para grãos cevada, a partir da modulação da temperatura da água de hidratação. Ademais, o modelo de Omoto-Jorge foi aplicado exclusivamente para o processo de hidratação de grãos em condição isotérmica, como a soja (Fracasso et al. 2014, 2015; Nicolin et al. 2015; Borges; Jorge; Jorge, 2017), trigo (Mattioda; Jorge; Jorge, 2018), arroz (Balbinoti; Jorge; Jorge, 2018^a), sorgo (Silva; Jorge; Jorge, 2019) e cevada (Borsato et al. 2019).

O modelo de Omoto-Jorge, é obtido a partir de um balanço de massa de água contida no interior da partícula em regime transiente, considerando inicialmente como hipóteses simplificadoras que:

- a concentração da água é homogênea no interior da partícula;
- o volume do material deve-se manter constante ao longo de todo processo; e
- o sistema deve operar em coordenadas esféricas.

Com isso, obtém-se inicialmente a variação da massa de água no interior do grão (m_A) em função do tempo (t) (EQUAÇÃO 2.5).

$$\frac{dm_A}{dt} = N_A \cdot A_{partícula} \quad (2.5)$$

em que, $A_{partícula}$ (cm²) é a área superficial da partícula; e N_A (g m⁻² min⁻¹) é fluxo mássico de água.

Sabendo que N_A pode ser representado como o produto do coeficiente de transferência de massa pela diferença entre a concentração de água no equilíbrio e a concentração de água em um determinado tempo, obtém-se a Equação 2.6.

$$N_A = k_s (\rho_{Aeq} - \rho_A) \quad (2.6)$$

em que, k_s ($m \text{ s}^{-1}$) é o coeficiente de transferência de massa; ρ_{Aeq} ($g \text{ cm}^{-3}$) é a concentração de água no equilíbrio; e ρ_A ($g \text{ cm}^{-3}$) é a concentração de água na partícula em um determinado tempo.

Sabendo-se que a massa de água no interior da partícula é o produto de sua concentração (ρ_A) pelo seu volume, e substituindo a Equação 2.6 na variável do fluxo mássico presente na Equação 2.4, obtém-se a Equação 2.7.

$$\frac{d(\rho_A \cdot V)}{dt} = k_s (\rho_{Aeq} - \rho_A) \cdot A \quad (2.7)$$

Para o desenvolvimento analítico do modelo de Omoto-Jorge, o volume da partícula deve ser constante ao longo da hidratação, ou seja, $\frac{dV}{dt} = 0$ e deve-se considerar também o sistema unidimensional radial. Com isso, obtém-se a solução do modelo de Omoto-Jorge (EQUAÇÃO 2.8), a partir da inserção do volume e da área da esfera. Além disso, a concentração de água em função do tempo (ρ_A) deve ser igual a concentração de água inicial (ρ_{A0}), no instante $t=0$.

$$\rho_A(t) = -\exp\left(\frac{3k_s t}{rm}\right) (\rho_{Aeq} - \rho_{A0}) + \rho_{Aeq} \quad (2.8)$$

A Equação 2.8 representa a solução analítica do modelo de Omoto-Jorge, o qual tem o parâmetro do coeficiente de transferência de massa (k_s), podendo ser obtido mediante ao ajuste do modelo aos dados experimentais por uma regressão não linear ou a partir da linearização do modelo.

2.5. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Por meio do exposto na revisão bibliográfica observa-se que após alguns anos de pesquisa conseguiu-se produzir os primeiros híbridos férteis de triticales. No entanto, a falta de incentivo para a produção do triticales destinou-o quase em toda sua totalidade à alimentação animal. A revisão da literatura também demonstrou que os aspectos positivos dos cultivares modernos (triticales hexaploides), intensificaram os estudos relacionados à produção de farinha de triticales para a elaboração de produtos de panificação. Todavia, até o presente momento, não foram encontrados estudos que demonstrem cultivares com aceitabilidade para o desenvolvimento e comercialização de um produto contendo 100% triticales.

A qualidade nutricional do triticales e os altos índices de germinação, tornam esse cereal altamente promissor para a produção de malte. O processo de malteação é constituído das etapas de hidratação, germinação e secagem, porém são escassos os trabalhos na literatura que avaliam as variáveis de hidratação (temperatura e tempo) nas respostas germinação e umidade para os grãos de triticales. A maioria dos trabalhos envolvendo a germinação do triticales levam em consideração apenas a umidade final, baseando-se nas condições de processo para a produção do malte de cevada. Com isso, há a necessidade de estudar a influência da temperatura e do tempo durante o processo de hidratação, bem como a umidade final atingida pelos grãos, para que seja possível estabelecer uma condição ótima de hidratação do triticales para a germinação.

A revisão da literatura apresenta a operação de hidratação nas mais diversas matrizes de cereais e leguminosas, demonstrando a importância do estudo cinético e da modelagem matemática, na otimização de processos e qualidade dos produtos. Entretanto, não foram encontrados na literatura estudos referentes à cinética de hidratação do triticales, sendo necessário analisar a absorção de água desse cereal durante a hidratação e a comparação de diferentes modelos que possam descrevê-lo.

Além disso, constata-se que a maioria dos estudos de hidratação é avaliado em condição isotérmica. No entanto, tecnologias emergentes de intensificação de processo têm sido avaliadas, com o intuito de reduzir os custos das indústrias de alimentos mantendo a qualidade do produto. Uma das formas de intensificar o processo de hidratação é mediante a modulação da temperatura do sistema, com uma amplitude e período especificados, processo esse conhecido como operação periódica. Diante disso, além dos estudos cinéticos em condição isotérmica e periódica que são inexistentes até o presente momento para os grãos de triticales, as modificações morfológicas que podem ocorrer com a matéria-prima durante a hidratação devem ser avaliadas, já que não foram encontrados estudos na literatura que envolvam tais fatores.

Apesar de atualmente, o triticales não ser considerado uma grande *commodity*, o grão apresenta diversos cultivares de alto rendimento, o que se torna formidável disseminar a utilidade e a importância desse cereal. Além disso, a hidratação e a germinação possibilitam agregar valor ao produto que juntamente com a operação de secagem formam o processo de malteação, processos considerados primordiais para a obtenção de um malte de qualidade, possibilitando incentivar a aplicação desse cereal maltado na elaboração de alimentos e bebidas.

3. MATERIAL E MÉTODOS

Nesta seção são apresentados os materiais e equipamentos utilizados na parte experimental deste trabalho, bem como a metodologia adotada para o desenvolvimento de cada análise proposta. Os experimentos foram realizados nos laboratórios da Universidade Federal do Paraná (UFPR), vinculados ao campus do Centro Politécnico, mais especificamente no Laboratório de Engenharia de Processos em Sistemas Particulados (LEPSP) (Ensaio de hidratação e análises físicas) e no Laboratório de Química Analítica Aplicada (LQAA) (Extração do amido) do Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos; utilizou-se parceria com o Centro de Microscopia Eletrônica (CME) (Imagens via MEV) e Central Analítica da UFPR (Análises termogravimétricas); Laboratório de Engenharia Química da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA) (Massa específica real); Laboratório de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG) (Caracterização físico-química) e Laboratório Central da Cooperativa Agrária de Guarapuava (Qualidade do malte).

3.1. MATÉRIA-PRIMA E SÍNTESE ORGANIZACIONAL DOS EXPERIMENTOS

Para a realização das análises foram utilizados dois cultivares de triticales (*x Triticosecale* Wittmack), IPR 111 e IPR AIMORÉ (FIGURA 3.1), oriundos do cultivo da safra de 2017, produzidos no Estado do Paraná. O campo amostral foi compreendido em um único lote de 15 kg para cada cultivar, doados pelo Instituto Agrônomo do Paraná (Iapar) localizado na cidade de Londrina.

FIGURA 3.1 – AMOSTRAS DE TRITICALE: CULTIVARES IPR 111 (A) E IPR AIMORÉ (B).

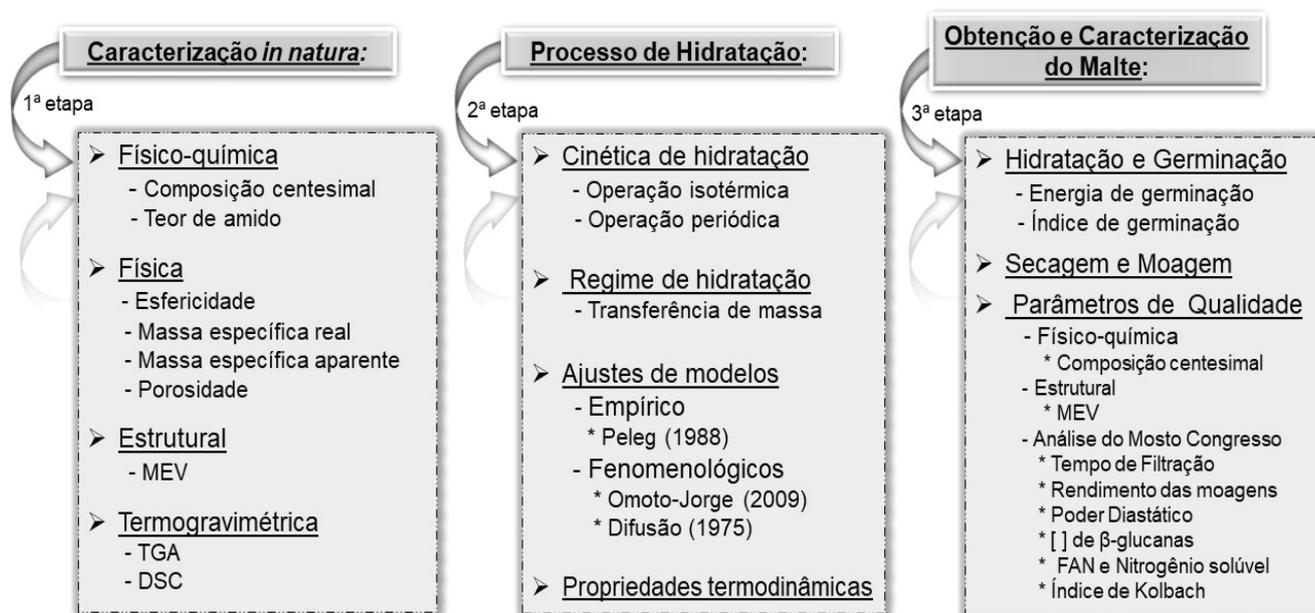


FONTE: O autor (2020).

A matéria-prima recebida foi previamente selecionada de maneira manual, a fim de obter grãos uniformes e garantir a eliminação de amostras quebradas e defeituosas. Após a seleção, os cultivares foram armazenados em embalagens PET de 10 L hermeticamente fechadas, em local seco e na ausência de luz, sob temperatura ambiente.

Para a melhor compreensão das etapas e dos procedimentos adotados durante a parte experimental, foi elaborado um diagrama organizacional (FIGURA 3.2), que demonstra de forma sequencial e resumida as principais etapas desenvolvidas no presente trabalho.

FIGURA 3.2 – DIAGRAMA SEQUENCIAL DAS PRINCIPAIS ETAPAS DESENVOLVIDAS NO ESTUDO.



FONTE: O autor (2020).

3.2. CARACTERIZAÇÃO DAS AMOSTRAS *IN NATURA*

Os cultivares IPR 111 e IPR Aimoré foram analisados quanto a sua composição centesimal (umidade, cinzas, lipídios, proteínas, fibra bruta e carboidratos) e quantidade de amido, para a caracterização físico-química. Para a caracterização física foram determinadas a esfericidade, massa específica real, massa específica aparente e porosidade do leite. A caracterização morfológica e as propriedades termogravimétricas dos cultivares também foram investigadas.

3.2.1. Análise Físico-Química dos Cultivares

O teor de umidade dos grãos foi determinado a partir do método gravimétrico estático recomendado pela Association of Official Analytical Chemists (AOAC, n° 925.09, 2002), o qual constituiu-se em submeter as amostras em estufa (FANEM LTDA/modelo 002/2/Brasil) a 105 °C por 24 h. Também foram realizadas análises referentes à concentração de cinzas (método de carbonização e incineração do grão em mufla a 550 °C), ao conteúdo de proteínas (método de Kjeldahl utilizando fator de conversão do nitrogênio em proteína de 6,25), à concentração de lipídios (método Soxhlet utilizando éter de petróleo como solvente de extração) e ao conteúdo de fibra bruta (método de saquetas em determinador de fibras), as quais seguiram a metodologia recomendada pelo Instituto Adolf Lutz (IAL, 2008). A concentração de carboidratos foi estimada pela diferença entre 100% do somatório dos valores obtidos nas análises de umidade, cinzas, proteínas e lipídeos.

A quantificação de amido foi determinada de acordo com o método n° 66470 da International Organization for Standardization (ISO, 1987), o qual se baseia no método enzimático a partir das enzimas termamyl e amiloglucosidase.

3.2.2. Análise Física dos Cultivares

A forma dos grãos de triticale, considerados esferoides prolatos foram caracterizados mediante a esfericidade (ϕ) obtido a partir da aferição de 90 grãos em comprimentos longitudinais, transversais e circunferenciais dos cultivares, com o auxílio de um paquímetro digital (SUPER TOOL/ modelo MK-DC-6/Brasil), com precisão de $\pm 0,01$ mm.

O resultado da esfericidade (ϕ) foi obtido seguindo a expressão proposta por Mohsenin (1986), conforme a Equação 3.1.

$$\phi (\%) = \frac{\sqrt[3]{a b c}}{a} \cdot 100 \quad (3.1)$$

em que, a , b e c (mm) são as metades dos valores dos comprimentos longitudinais, transversais e circunferenciais das amostras, respectivamente.

A massa específica real (ρ_{real_gas}) dos grãos *in natura* foi determinada por picnometria gasosa, o qual consistiu na utilização de aproximadamente 25 g de amostra, acondicionadas em cápsulas de alumínio e inseridas no equipamento ultrafoam1000e (QUANTACHROME INSTRUMENTS/modelo UPY-30F/EUA). Para a realização da análise foi aferido um fluxo de purga durante três minutos, para retirada do ar presente no interior dos grãos, obtendo o volume ($V_{semporos}$) e a massa específica real (ρ_{real_gas}) dos cultivares. O gás hélio com índice de pureza de 6,0 foi utilizado como gás inerte e o equipamento foi ajustado para realizar 6 medidas sucessivas com uma pressão de operação de 18 psi e temperatura de 21,6 °C. Os resultados da massa específica real determinados pelo equipamento foram advindos da Equação 3.2.

$$\rho_{real_gas} = \frac{m_{sólido}}{V_{semporos}} \quad (3.2)$$

A massa específica aparente ($\rho_{aparente}$) dos grãos foi obtida seguindo a metodologia com modificações proposta por Araújo et al. (2014), ao avaliarem as propriedades físicas de amendoins. Para tal, utilizou-se uma proveta (GLOBAL GLASS CIENTÍFICA/Brasil) de 50 ml \pm 0,05 ml, o qual foi preenchida com uma massa de grãos ($m_{sólido}$) determinada com o auxílio de uma de uma balança analítica (SHIMADZU/modelo AY220/Japan) até um volume especificado ($V_{comporos}$), permitindo obter a massa específica aparente dos cultivares, pela Equação 3.3.

$$\rho_{aparente} = \frac{m_{sólido}}{V_{comporos}} \quad (3.3)$$

em que, $m_{sólido}$ (kg) é a massa dos grãos; e $V_{comporos}$ (m³) é o volume demarcado pela proveta em decorrência do preenchido com os grãos.

Por fim, a porosidade intergranular (ε) foi obtida mediante a relação entre a massa específica aparente ($\rho_{aparente}$) e a massa específica real (ρ_{real_gas}) dos grãos, por meio da Equação 3.4.

$$\varepsilon = 1 - \left(\frac{\rho_{aparente}}{\rho_{real_gas}} \right) \quad (3.4)$$

3.2.3. Análise Estrutural dos Cultivares

A morfologia estrutural do grão e dos grânulos de amido de triticale foram observadas via Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) (TESCAN/modelo Vega3 LMU/República Tcheca), mediante a aplicação de uma tensão de aceleração de voltagem de 7 kV e um nível na magnitude de ampliação variando de 40 a 500 x para a estrutura do grão e de 300 a 3,00 kx para observar a morfologia dos grânulos de amido.

Os grãos *in natura* foram cortados no sentido transversal e radial, com o auxílio de uma lâmina de bisturi (WILKINSON LAMINA/Brasil) e posicionados com a parte externa ao corte (*casca*) sob *stubs* de cobre contendo fita dupla face para a fixação dos grãos. O aparato experimental contendo as amostras foi submetido em evaporador de ouro para receber uma cobertura metalizada mediante a técnica sputtering (BAL-TEC/modelo SCD 050/EUA) até a obtenção de um revestimento superficial de 10 nm para a produção das imagens.

Para avaliar a morfologia dos grânulos de amido foi realizada uma extração dos grãos *in natura* seguindo a metodologia adaptada de Bultossa, Hallb e Taylorc (2002). Para tal, os grãos (100 g) foram triturados em moedor de facas (MARCONI/modelo MA 630/01/Brasil) e suspensos em água destilada na proporção 1:3 (grão:água). A suspensão foi homogeneizada e decantada por 1 h. O sobrenadante foi descartado e o restante foi centrifugado (EXCELSATM II CENTRIFUGE/modelo 206 BL/Brasil) a 3000 rpm por 10 min. O sobrenadante foi novamente descartado e os compostos indesejáveis (fina camada de coloração marrom) sobrepostos ao amido foram removidos. Posteriormente, o amido foi distribuído em placas de petri e submetidos a secagem em estufa (LABSTORE/modelo 400-2ND/Brasil) a 40 °C por 24 h. Por fim, realizou-se o peneiramento (peneira da série Tyler de 100 mesh) e armazenamento do amido em recipientes de vidro hermeticamente fechados, de forma a mantê-los secos até a realização das imagens.

3.2.4. Análises Térmicas do Amido dos Cultivares

As análises térmicas foram caracterizadas a partir da extração dos grânulos de amido de triticale *in natura*. A termogravimetria (TGA) permitiu avaliar a degradação térmica, a partir da redução da massa em função do aumento da temperatura. O procedimento foi baseado na metodologia descrita por Brito e Tavares (2013), realizado a partir de uma balança termogravimétrica (NETZSCH/modelo TG-209/Alemanha), com a temperatura do estudo variando de 30 a 600 °C, sob a razão de aquecimento de 10 °C min⁻¹. Para a realização do experimento, o equipamento foi tarado com o suporte de cerâmica (PERKINELMER/modelo N5200040/Brasil) e 10 mg do amido foi adicionado ao suporte. Durante a análise foi empregado o gás Nitrogênio (White Martins; 5.0) com uma vazão de 20 mL min⁻¹, a fim de tornar a atmosfera inerte. Através dos dados computados pelo equipamento foi possível gerar, a curva de TGA e sua respectiva derivada (DTG), a fim de quantificar a perda mássica sob efeito da temperatura, correspondente à área do pico da curva DTG.

A Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) baseou-se na metodologia descrita por Liu et al. (2005), dos quais os grânulos de amido foram suspensos em água destilada, na proporção de 1:4 (amido:água). Desta suspensão foram retiradas 10 mg e acondicionadas em cápsulas de alumínio de 50 µL hermeticamente fechadas ao ciclo de temperatura variando de 25 a 100 °C, com uma razão de aquecimento de 10 °C min⁻¹. Para observar o evento de gelatinização, o equipamento (NETZSCH/modelo 204-F1/Alemanha) foi calibrado com o elemento químico índio (99,99% de pureza e ponto de fusão 156,6°C) e o suporte sem massa foi utilizado como referência. Foi aplicado ao sistema um gás de purga Nitrogênio (White Martins; 5.0) sob vazão de 20 mL min⁻¹, com o intuito de manter o meio inerte. O evento da gelatinização dos cultivares foi identificado mediante ao registro das temperaturas de início (T_{ig}), pico (T_{pg}) e final (T_{fg}), obtidos pela curva endotérmica gerada a partir do analyzer Pyris.

3.3. PROCESSO DE HIDRATAÇÃO POR IMERSÃO

Os ensaios de hidratação foram realizados em sistemas operando em condições isotérmica e periódica. Todos os experimentos de hidratação com o triticales foram conduzidos por 900 min e realizados em triplicata, com aproximadamente 400 g de amostra por cultivar, para cada ensaio proposto.

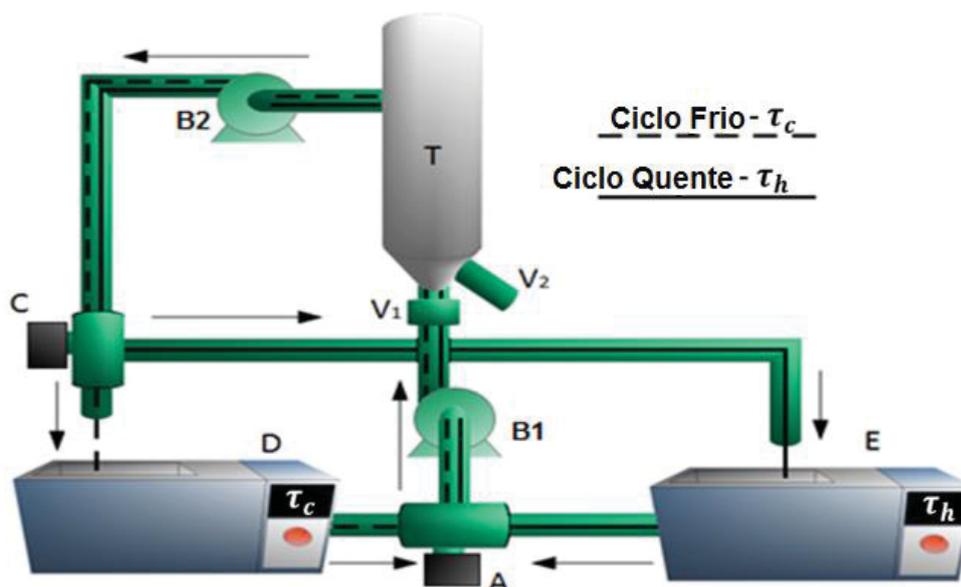
3.3.1. Dispositivos Experimentais de Hidratação

- Hidratação Isotérmica: os ensaios de hidratação isotérmica foram baseados na metodologia adaptada proposta por Montanuci, Jorge e Jorge (2013) ao hidratar grãos de cevada. Para tal, os cultivares foram acondicionados em béqueres de vidro (1000 mL) contendo água destilada. A proporção mássica utilizada no estudo foi de 1:2 (grão:água). Os béqueres contendo as amostras e a água foram inseridos em um banho termostático (SOLAB/SL-155/22/Brasil), nas temperaturas de 20, 30, 40 e $50 \pm 0,2$ °C. Essas temperaturas foram utilizadas com o objetivo de trabalhar em condições abaixo da temperatura de gelatinização do amido do triticales.

- Hidratação Periódica: os ensaios de hidratação periódica foram realizados em um sistema experimental constituído por dois banhos (SOLAB/modelo 152/30/Brasil – [D] e SOLAB/modelo SL 155/22/Brasil – [E]) com capacidade de 5 L cada, duas bombas centrífugas [B1] e [B2] com vazão máxima de 5 L min^{-1} , duas válvulas solenoides de duas vias [A] e [C], um tanque de hidratação [T] com volume útil de 3 L, uma válvula tipo esfera [V₁] instalada na saída da bomba [B1] para regular a vazão de entrada da água no tanque e uma saída para a coleta das amostras [V₂] (FIGURA 3.3).

O tempo de modulação para a temperatura da água de hidratação foi automatizado e controlado mediante uma placa Arduino UNO programada com código livre, possibilitando o acionamento das bombas centrífugas [B1] e [B2] e das válvulas solenoides [A] e [C] de forma periódica.

FIGURA 3.3 – INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL UTILIZADA NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.



A e C – válvulas solenoides; B1 e B2 – bombas centrífugas; D – banho de refrigeração; E – banho de aquecimento; V₁ – válvula tipo esfera; e V₂ – coletor de amostras.

FONTE: O autor (2020).

O aparato experimental utilizado na operação periódica pode iniciar o processo de hidratação tanto pelo ciclo frio (linha tracejada), quanto pelo ciclo quente (linha contínua) (FIGURA 3.3). O enchimento do tanque de hidratação [T] ocorre de forma ascendente a partir do acionamento da válvula solenoide [A] e da bomba centrífuga [B1]. Para o início da operação com o ciclo frio ocorre o acionamento da bomba [B1] e das válvulas solenoides [A] e [C], de modo a se manterem abertas na posição 1, e fechadas na posição 2. No ciclo quente, o temporizador aciona a bomba centrífuga [B1] e as válvulas solenoides [A] e [C] mantendo-as abertas na posição 2 e fechadas na posição 1, completando assim um período (τ). Este processo se repete na forma de ondas quadráticas (períodos iguais) até completar o tempo desejado de hidratação.

O esgotamento da água contida no tanque de hidratação [T] ocorre de forma similar ao preenchimento, mas no sentido descendente, a partir do acionamento das válvulas solenoides [A] e [C], juntamente com as bombas centrífugas [B1] e [B2]. Durante o esgotamento da água contida no tanque [T] para o banho termostático [D] ou [E] (troca de ciclo), as amostras ficam 60 segundos sem contato com a água de hidratação. Esse tempo de descarga é chamado de período morto, e deve ser realizada para que a água presente em cada banho termostático não entre em contato.

A medição da temperatura das amostras contidas no interior do tanque de hidratação [T] foi obtida a partir de termopares do tipo K, configurados mediante uma placa ICP-COM, com o monitoramento da temperatura a cada 10 s.

Segundo Chacón, Jorge e Jorge (2019), a operação periódica mediante a modulação da temperatura da água de hidratação é um método intermitente com a temperatura variando ao longo do tempo, a partir de uma temperatura isotérmica (T_i) com uma amplitude (A) fixa. Com isso, as temperaturas de operação do ciclo frio (τ_c) e do ciclo quente (τ_h) são determinadas a partir das Equações 3.5 e 3.6.

$$T_1 = T_i - A \quad (3.5)$$

$$T_2 = T_i + A \quad (3.6)$$

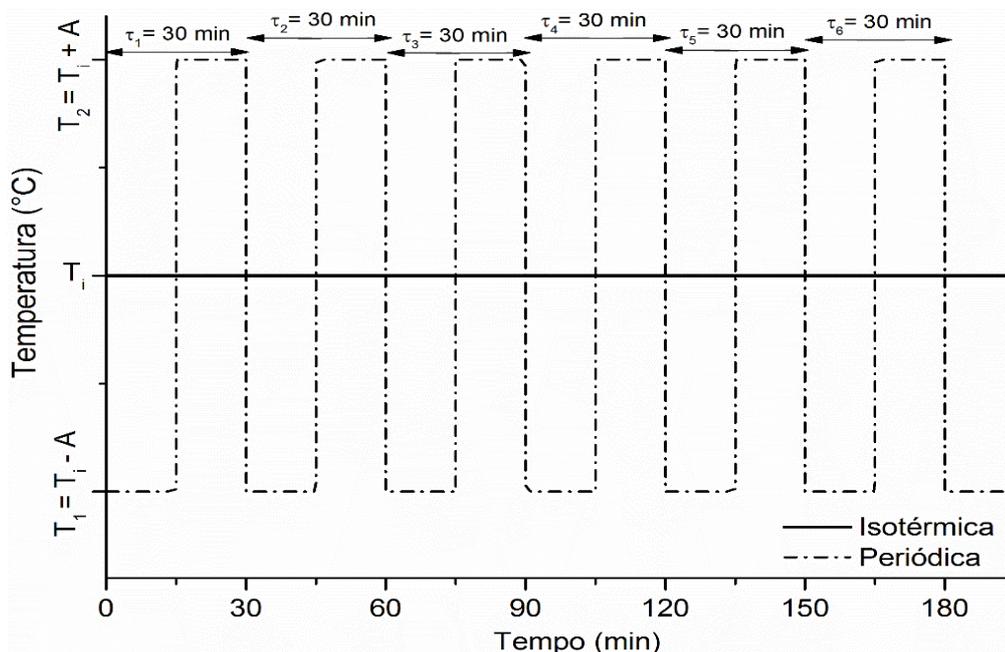
em que, T_1 (°C) é a temperatura de operação do ciclo frio; e T_2 (°C) é a temperatura de operação do ciclo quente.

O período (τ) de operação do sistema é obtido a partir da soma dos semiperíodos ($\tau = \tau_h + \tau_c$) referente a cada ciclo. Além disso, todos os experimentos foram conduzidos com um *split* (S) de 0,5, ou seja, os semiperíodos (ciclo quente e frio) utilizados apresentaram-se com o mesmo tempo de duração, conforme a Equação 3.7.

$$S = \frac{\tau_h}{\tau} \text{ ou } S = \frac{\tau_c}{\tau} \quad (3.7)$$

Com o intuito de comparar a eficiência do processo de hidratação periódica em relação a hidratação isotérmica para os cultivares de triticales, a operação periódica foi realizada mediante a modulação da temperatura, com uma amplitude fixa mantendo-se a 10 °C em torno de cada temperatura utilizada nos ensaios de hidratação isotérmica (20, 30, 40 e 50 ± 0,2 °C). Além disso, para cada experimento realizado em hidratação periódica foi estipulado semiperíodos de 15 min para cada ciclo (τ_c e τ_h), totalizando um período (τ) de 30 min (FIGURA 3.4).

FIGURA 3.4 – REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DA MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.



Legenda: A = amplitude (°C); T_i = temperatura isotérmica (°C); T_1 = temperatura de operação do ciclo frio (°C); T_2 = temperatura de operação do ciclo quente (°C); e τ = período (min).

FONTE: O autor (2020).

3.3.2. Procedimento Experimental para a Hidratação

Em ambos os processos de hidratação (operação isotérmica e periódica) aproximadamente 400 g de grãos foram submetidos para à absorção de água. Para cada ensaio, aproximadamente 20 g de triticales foram coletadas em tempos pré-determinados para avaliar o teor de umidade, a variação do volume, a estrutura e a germinação dos grãos (TABELA 3.1).

TABELA 3.1 – TEMPO DE COLETA DOS GRÃOS DE TRITICALE DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO POR ANÁLISE.

Análises	Tempo de coleta das amostras (min)
Umidade e volume	0, 20, 40, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300, 360, 420, 480, 540, 600, 660, 720, 780, 840 e 900
Morfologia e germinação	300, 660 e 900

FONTE: O autor (2020).

O teor de umidade dos grãos foi determinado pela metodologia da Association of Official Analytical Chemists (AOAC, n° 925.09, 2002), conforme descrito na seção 3.2.1. A variação do volume foi obtida mediante a coleta de 40

grãos conforme descrito por Borges, Jorge e Jorge, (2017) com modificações. Para tal, os grãos de triticale foram pesados e transferidos para uma proveta graduada (GLOBAL GLASS CIENTÍFICA/Brasil) de 10 ml \pm 0,05 ml contendo 5 mL de água destilada para então estimar o volume pela quantidade de água deslocada.

A estrutura morfológica dos grânulos de amido foi analisada mediante a imagens obtidas via MEV, conforme descrito na seção 3.2.3. O processo germinativo foi realizado por confinamento controlado conforme a metodologia de Beleti; Duarte; Georg-Kraemer (2012) e Chacón, Jorge e Jorge (2019), descrita na seção 3.4.

O tempo de hidratação estabelecido em 900 min foi definido a partir de estudos preliminares que demonstraram a pouca absorção de umidade dos grãos após 15 h de processo. Ademais, esse tempo de hidratação foi o suficiente para que os grãos atingissem a umidade mínima necessária para a germinação. A amostragem ao longo do estudo foi realizada de forma aleatória e o excesso de água superficial presente nas amostras foi removido com o auxílio de papel toalha.

3.3.3. Regime de Hidratação

A fim de verificar o mecanismo de entrada da água nos grãos foi realizado um estudo nas mesmas condições operacionais da hidratação isotérmica, utilizando o corante o azul de metileno ($C_{16}H_{18}N_3SCl$ e massa molar = 319,85 g mol⁻¹) na proporção de 1 g 100 mL⁻¹. Esse corante foi escolhido por simular o comportamento característico da água sem reagir com o grão, além de apresentar boa resposta visual.

O procedimento consistiu na inserção do corante azul de metileno em béquer de vidro (1000 mL) contendo água destilada e acondicionado em banho termostático (SOLAB/SL-155/22/Brasil) operando a 35 °C. Posteriormente, os grãos foram adicionados a solução, na proporção mássica 1:2 (grão:solução), conforme o procedimento descrito por Miano, García e Augusto (2015), ao avaliarem o regime de hidratação da semente de tremoço (*Andean Lupin*), com modificações. As amostras foram removidas da solução (água destilada + azul de metileno) em tempos pré-determinados (TABELA 3.1) até completar 10 h de processo. A cada alíquota de amostra retirada da solução, os grãos eram secos com papel toalha e cortados transversalmente com o auxílio de uma lâmina de bisturi (WILKINSON LÂMINA/Brasil) para a captação das imagens, realizadas mediante o uso de câmera fotográfica (CANON/EOS Rebel T5i/Brasil) de 18 MP, com altura fixada.

3.3.4. Modelagem Matemática dos Processos de Hidratação

Visando conhecer a cinética de hidratação dos cultivares IPR 111 e IPR Aimoré, modelo empírico e modelos fenomenológicos foram ajustados aos dados experimentais. O ajuste dos modelos permitiu a identificação dos parâmetros que ajudam na interpretação dos fenômenos que ocorrem no processo de hidratação.

Entre as diversas equações empíricas, o presente trabalho empregou o modelo desenvolvido por Peleg (1988) (EQUAÇÃO 2.1), conforme apresentado na seção 2.4.1. Em relação às equações fenomenológicas, o trabalho empregou o modelo de Difusão (EQUAÇÃO 2.4) proposto por Crank (1975), conforme visto na seção 2.4.2.1, e o modelo de Omoto-Jorge (EQUAÇÃO 2.8) proposto por Omoto et al. (2009), conforme descrito na seção 2.4.2.2. Para a solução analítica do modelo de Difusão a série da Equação 2.4 foi truncada no sétimo termo, com o intuito de reduzir o erro do parâmetro, visto que a partir do sétimo termo não foi percebido diferença significativa no valor do parâmetro do modelo e no intervalo de confiança.

A solução analítica do modelo de Omoto-Jorge foi adaptada às condições de hidratação do triticale, conforme sugerido por Balbinoti, Jorge e Jorge (2018^a) que considera o volume constante como uma hipótese do modelo.

A dependência dos parâmetros dos modelos com a temperatura da água de hidratação pode ser descrita pela Equação de Arrhenius (EQUAÇÃO 3.8), possibilitando obter a energia de ativação e os modelos generalizados (Sánchez et al. 1992; Jideani e Mpotokana, 2009; Oroian, 2017; Balbinoti; Jorge; Jorge, 2018^a).

$$k = A_0 \cdot \exp^{-E_a/RT} \quad (3.8)$$

em que, E_a (J mol⁻¹) é a energia de ativação; R (8,314 J mol⁻¹ K⁻¹) é a constante universal dos gases, T (K) é a temperatura absoluta; e A_0 (m² s⁻¹) é o coeficiente pré-exponencial, também denominado de fator de frequência, da Equação de Arrhenius.

3.3.5. Qualidade do Ajuste dos Modelos

A qualidade do ajuste dos modelos matemáticos foi averiguada mediante a magnitude do coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P) (EQUAÇÃO 3.9) e raiz quadrada média do erro ($RMSE$) (EQUAÇÃO 3.10).

$$P(\%) = \frac{100}{nn} \sum_{i=1}^n \frac{|X_{eExp} - X_{ePre}|}{X_{eExp}} \quad (3.9)$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\frac{\sum(X_{eExp} - X_{ePre})^2}{nn}} \quad (3.10)$$

em que, X_{eExp} é o valor observado experimentalmente; X_{ePre} é o valor predito pela equação do modelo; e nn é o número de observações experimentais.

3.3.6. Propriedades Termodinâmicas do Processo

As propriedades termodinâmicas possibilitam prever a espontaneidade e a energia (fornecida ou liberada) do processo, associada as forças de ligação e a afinidade entre as moléculas de água e a matriz. A partir da energia de ativação (E_a) obtida pela dependência do parâmetro do modelo com a temperatura foi possível determinar a entalpia ΔH (kJ mol^{-1}) (EQUAÇÃO 3.11), a entropia ΔS ($\text{kJ mol}^{-1} \text{K}^{-1}$) (EQUAÇÃO 3.12) e a energia livre de Gibbs ΔG (kJ mol^{-1}) (EQUAÇÃO 3.13), conforme foram propostas por Sánchez et al. (1992); Jideani e Mpotokana (2009); Borges, Jorge e Jorge (2017), Oroian (2017) e Balbinoti, Jorge e Jorge, (2018^a).

$$\Delta H = E_a - RT \quad (3.11)$$

$$\Delta S = R \left(\ln A - \ln \left(\frac{k_b}{h_p} \right) - \ln T \right) \quad (3.12)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (3.13)$$

em que, h_p ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$) é a constante de Planck; T (K) é a temperatura absoluta; e k_b ($1.38 \times 10^{-23} \text{ J K}^{-1}$) é a constante de Boltzmann.

3.4. ANÁLISE DE GERMINAÇÃO DO TRITICALE

Para averiguar a influência da temperatura e do tempo (Fases) de hidratação na germinação do triticale, os cultivares submetidos às diferentes condições experimentais de hidratação foram avaliados. O procedimento consistiu na utilização de placas de Petri de 90 mm de diâmetro (sem tampa), onde foram acondicionados em seu interior duas camadas de papel filtro Whatman N°1 embebidos em água destilada. Posteriormente, 100 grãos foram distribuídos ao longo da área total da placa. As amostras em triplicata foram submetidas em confinamento controlado (FULL GAUGE/modelo MT530-super/Brasil) operando na temperatura de 19 °C e a

umidade relativa do ar de 80%, na ausência de luz incidente durante 3 dias (Palmer, 1989; Beirão Costa e Cabo Verde, 1996; Beleti; Duarte; Georg-Kraemer, 2012; Chacón, Jorge e Jorge, 2019).

Os resultados encontrados na germinação foram decorrentes da contagem das plântulas, realizada a partir dos grãos confinados que apresentavam o desenvolvimento da radícula e do acrósporo, as que constavam o desenvolvimento de ambas as partes eram contabilizadas como germinadas e retiradas das placas de Petri com o auxílio de uma pinça. As contagens das plântulas ocorreram em 24 h, 48 h e 72 h, após o confinamento. Os grãos germinados nos tempos relacionados permitiram obter os resultados referentes à energia de germinação (EG) e ao índice de germinação (IG).

A energia de germinação (EG) foi obtida a partir da contagem das plântulas germinadas nos tempos de 24 h, 48 h e 72 h após o início do confinamento. Os resultados da energia de germinação foram obtidos, a partir da Equação 3.14.

$$EG (\%) = n_{24} + n_{48} + n_{72} \quad (3.14)$$

O índice de germinação (IG) foi alcançado a partir dos resultados obtidos na energia de germinação (EG), conforme a metodologia do European Brewery Convention (EBC, 2005), com os resultados expressos pela Equação 3.15.

$$IG = \frac{10 EG}{(n_{24} + 2n_{48} + 3n_{72})} \quad (3.15)$$

em que, n_{24} , n_{48} e n_{72} representam o número de plântulas germinadas nos tempos especificados.

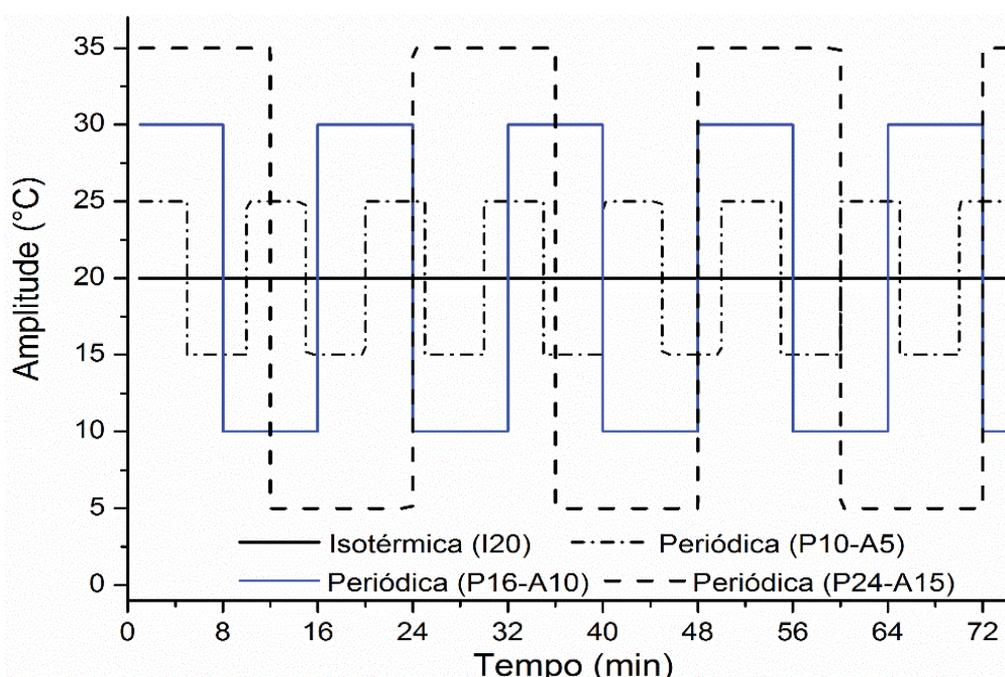
Os grãos germinados foram submetidos à secagem convectiva com o aumento da temperatura em 4 rampas de aquecimento, conforme a metodologia adotada pelo Laboratório Central da Cooperativa Agrária, adaptada. Para tal, os grãos de tritcale germinados foram acondicionados em bandejas de aço inox em camada delgada (1 cm de altura) e submetidos em estufa (LABSTORE/modelo 400-2ND/Brasil) com circulação de ar forçado (1 m s^{-1}) com aquecimento a $50 \text{ }^\circ\text{C}$ por 18 h (1ª rampa de aquecimento). Posteriormente, a temperatura foi elevada para $60 \text{ }^\circ\text{C}$ (2ª rampa de aquecimento) e $70 \text{ }^\circ\text{C}$ (3ª rampa de aquecimento) ocorrendo a secagem por mais 1 h em cada rampa de temperatura. Por fim, a temperatura foi elevada para $80 \text{ }^\circ\text{C}$ por mais 2 h (4ª rampa de aquecimento), totalizando 22 h de secagem, para a obtenção do malte de tritcale.

3.5. AVALIAÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO DA OPERAÇÃO PERIÓDICA

Devido às respostas positivas para umidade e germinação obtidas na operação periódica durante a hidratação do triticale, as variáveis manipuladas foram novamente investigadas, a partir de testes preliminares que definiram novas amplitudes, fixadas em 5, 10 e 15 °C com semiperíodos de 5, 8 e 12 min, respectivamente (FIGURA 3.5), realizadas em função da isotérmica à 20 °C.

Os grãos de triticale foram submetidos à hidratação periódica em três diferentes níveis de amplitude e período: hidratação periódica a 20 °C com período de 10 min e amplitude de 5 °C (P10-A5), hidratação periódica a 20 °C com período de 16 min e amplitude de 10 °C (P16-A10) e hidratação periódica a 20 °C com período de 24 min e amplitude de 15 °C (P24-A15) (FIGURA 3.5). As combinações foram estabelecidas com o intuito de se trabalhar com a temperatura das amostras operando apenas em regime transiente, bem como encontrar a melhor combinação das variáveis manipuladas (período e amplitude) no ganho de umidade sem afetar a germinação.

FIGURA 3.5 – REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DAS DIFERENTES COMBINAÇÕES DE PERÍODO E AMPLITUDE ESTIPULADAS PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.



Legenda: I20 = Hidratação isotérmica à 20 °C; P10-A5 = Período de 10 minutos e amplitude de 5 °C; P16-A10 = Período de 16 minutos e amplitude de 10 °C; P24-A15 = Período de 24 minutos e amplitude de 15 °C.

FONTE: O autor (2020).

O procedimento experimental foi baseado na metodologia descrita na seção 3.3.2, referente aos ensaios de hidratação periódica. No entanto, o tempo total de hidratação foi reduzido para 660 min, visto que as análises de germinação do tritcale realizadas em condições periódicas com período de 30 min e amplitude de 10 °C (P30-A10) não apresentaram diferença significativa entre a Fases II (660 min) e a Fase III (900 min). Além disso, o IPR 111 foi o cultivar utilizado nessa etapa do estudo, devido os resultados mais satisfatórios frente a germinação.

Os dados experimentais obtidos a partir das três combinações de período e amplitude (P10-A5, P16-A10 e P24-A15) (FIGURA 3.5) possibilitaram o ajuste do modelo (seção 3.3.4) e a avaliação da qualidade do ajuste do modelo (seção 3.3.5). Além disso, a análise de germinação para as três combinações de período e amplitude foi investigada conforme a metodologia descrita na seção 3.4.

3.6. PARÂMETROS DE QUALIDADE DO MALTE DE TRITICALE

Para a realização das análises dos parâmetros de qualidade, o cultivar IPR 111 foi submetido à etapa de malteação (hidratação, germinação e secagem dos grãos). Após a secagem, as radículas foram retiradas manualmente com o auxílio de uma peneira da série Tyler (mesh 10) e os grãos foram armazenadas em recipientes de vidro hermeticamente fechados à temperatura ambiente até o momento da realização das análises.

O malte seco foi caracterizado físico-quimicamente, morfológicamente e foi produzido o mosto congresso que permitiu avaliar os parâmetros de qualidade de acordo com os métodos da Middle European Brewery Commission (MEBAK) e da European Brewing Convention (EBC).

3.6.1. Caracterização dos Grãos de Triticale Maltados

A caracterização físico-química do malte de tritcale foi determinada a partir do teor de umidade, proteínas, lipídeos, cinzas e carboidratos. O teor de umidade seguiu a metodologia da AOAC (AOAC, n° 925.09, 2002) descrita na seção 3.2.1 e comparado com o método gravimétrico da EBC (A-EBC 4.2, 2000). Para a metodologia da EBC, o malte foi submetido em moinhos de disco (BUHLER MIAG DISC MILL/modelo DLFU 23050/Suíça) e 5 g de amostra foram acondicionadas em

cápsulas de alumínio e secas em estufa (FANEM LTDA/modelo 002/2/Brasil) à 105 °C por 3 h.

O conteúdo de proteínas foi avaliado seguindo a metodologia do IAL (2008) descrita na seção 3.2.1 e comparado com o método analítico da EBC (A–EBC 4.3.2, 2000). O procedimento da EBC consistiu na inserção de aproximadamente 0,2 g de malte em um determinador de nitrogênio (LECO/modelo FP528/EUA). Para o cálculo da concentração proteica fez-se o uso do fator de 6,25 para conversão dos resultados de nitrogênio total em proteína.

A concentração lipídica e de cinzas do malte foram avaliadas seguindo a metodologia do IAL (2008), conforme descrita na seção 3.2.1. A concentração de carboidratos foi estimada pela diferença entre 100% do somatório dos valores referentes as análises de umidade, cinzas, proteínas e lipídeos.

A avaliação morfológica da estrutura do triticales maltado foi realizada a partir de imagens obtidas via MEV, mediante a um nível de magnitude de ampliação variando de 30 a 1000 x, seguindo a metodologia descrita na seção 3.2.3.

A friabilidade do malte foi determinada seguindo a metodologia descrita pela EBC (A–EBC 4.15, 1997). O procedimento consistiu na utilização de aproximadamente 50 g de malte, os quais foram acondicionados ao friabilímetro (PMC TRONIC/modelo Pfeuffer GmbH Kitzingen/Brasil). A amostra foi prensada contra uma peneira de tambor rotativo presente no interior do equipamento por 8 min. A fração de grãos maltados retido na peneira permitiram obter os valores de friabilidade.

O malte de triticales foi observado visualmente quanto a presença de sementes estranhas e classificado segundo a sua qualidade seguindo a metodologia descrita pela EBC (A–EBC 4.22, 2005). Para tal, 100 g de matéria-prima foram acondicionadas em uma máquina classificadora (TECNOMA/modelo MTS 1060/Brasil) contendo um conjunto de peneiras (diâmetros de 2,8 e 2,5 mm), por 5 min em agitação. As frações retidas nas peneiras foram pesadas e classificadas.

3.6.2. Análise do Mosto Congresso

O mosto congresso foi elaborado seguindo a metodologia descrita pela EBC (A–EBC 4.5.1, 2004) e sua obtenção permitiu obter os resultados referentes ao tempo de filtração, rendimento das moagens, poder diastático, concentração de β -glucanas, concentração de aminoácidos livres (FAN), nitrogênio solúvel e índice de Kolbach.

Para a elaboração do mosto congresso aproximadamente 55 g do malte de tritcale foi submetido à moagem mediante o uso de moinho de disco (BUHLER MIAG DISC MILL/modelo DLFU 23050/Suíça), possibilitando obter a farinha em duas granulometrias diferentes, moagem fina (0,2 mm) e moagem grossa (0,7 mm). Posteriormente, foram adicionados 200 mL de água destilada a cada tipo de farinha e inseridas em um banho mosturador (FLUXO TECNOLOGIA/FT2072/Brasil), com agitação a 100 rpm por aproximadamente 1 h. A cada mistura foram adicionadas 100 mL de água à 70 °C para a extração dos açúcares. E por fim, a solução foi resfriada e foi adicionada água até a massa final atingir 400 g, sendo filtrada para obter o tempo de filtração e o mosto congresso.

Os extratos de rendimento referentes às moagens finas e grossas foram obtidos injetando 20 mL do mosto em um densímetro (ANTON PAAR, modelo DMA 4500/Áustria). Com o grau de platô e a densidade fornecida pelo equipamento foi possível calcular os valores referentes ao rendimento de extração da moagem fina (EQUAÇÃO 3.16) e da moagem grossa (EQUAÇÃO 3.17).

$$R_{mf} = \frac{(P_{mf} * (U_{malte} + 800) * 100)}{(100 - P_{mf}) * (100 - U_{malte})} \quad (3.16)$$

$$R_{mg} = \frac{(P_{mg} * (U_{malte} + 800) * 100)}{(100 - P_{mg}) * (100 - U_{malte})} \quad (3.17)$$

em que, R_{mf} (%) e R_{mg} (%) são os rendimentos da moagem fina e grossa, respectivamente; U_{malte} (%) é a umidade do malte; e P_{mf} (°P) e P_{mg} (°P) são os valores de platô para a moagem fina ($P_{mf} = P_f + S$) e para a moagem grossa ($P_{mg} = P_g + S$), os quais P_g e P_f (°P) tratam-se da leitura do grau de platô no sacarômetro; e S (°P) é a constante do sacarômetro. O valor numérico 800 representa a quantidade de água destilada (mL) que foi adicionada ao mosto não filtrado, para 100 g de malte.

O poder diastático foi avaliado a partir da moagem fina (granulometria 0,2 mm) mosturada no próprio banho (FLUXO TECNOLOGIA/FT2072/Brasil), mediante a titulometria, seguindo a metodologia da EBC (A–EBC 4.12, 2000). Para tal, as enzimas (α e β -amilase) foram extraídas com uma solução tampão a 40 °C e adicionadas a uma solução de amido para a realização da hidrólise.

A concentração de β -glucanas solúveis foi determinada através do peso molecular (1,3-1,4) β -D glucana presente no malte, por espectrofotometria (HELETT PACKARD/ modelo 8453/EUA) a um comprimento de onda de 510 nm, após a adição do reagente gluca test solution enzytec, seguindo a metodologia da EBC (A–EBC 4.16.3, 2005).

A concentração de aminoácido livres (FAN) foi determinada a partir do método analítico, conforme a metodologia descrita pela EBC (A–EBC-8.10, 2000). Para tal, utilizou-se 2 mL do mosto juntamente com 1 mL do reagente Nihindrina (coloração). A solução foi submetida a tratamento térmico por 15 min para posterior resfriamento. Por fim, 5 mL da solução foram submetidos em espectrofotômetro (HELETT PACKARD/ modelo 8453/EUA) a um comprimento de onda de 570 nm.

O nitrogênio solúvel foi determinado por espectrometria (HELETT PACKARD/ modelo 8453/EUA) com leitura a 215 nm, seguindo a metodologia descrita pela EBC (A–EBC 4.9.2, 1997). A relação entre a quantidade de nitrogênio solúvel (proteína solúvel) e o nitrogênio total (proteína total) permitiu caracterizar o malte de triticales em relação ao Índice de Kolbach.

O mosto também foi avaliado em função do pH mediante o método potenciométrico (A–EBC 8.17; 2000) utilizando um medidor de pH (METTLER TOLEDO/modelo UB 10 MpH-03B/RASIL). A viscosidade foi obtida mediante o uso de um viscosímetro termostático de queda de bola Höppler (QUANTOTEC/ modelo Visco Ball/Espanha), mediante a determinação do tempo de queda da esfera embebida no mosto (MEBAK 3.1.4.4.1, 2011). A cor e a turbidez do mosto após fervura (cor de cocção) foram determinadas por espectrofotometria (HELETT PACKARD/ modelo 8453/EUA) a um comprimento de onda de 430 nm (A–EBC 4.7.1, 2000).

3.7. ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A caracterização físico-química e física dos cultivares *in natura*, bem como a umidade final dos grãos obtida nos processos de hidratação (isotérmica e periódica) foram avaliadas a partir de teste estatístico ao nível de 95% de confiança a partir da análise de variância (ANOVA) com fator único e teste de Tukey, com o auxílio do *software* Statistica 7.0.

O ajuste dos modelos de Peleg, Difusão e Omoto-Jorge aos dados experimentais foram obtidos de forma não linear empregando o método de minimização de erro referente ao algoritmo de Levenberg-Marquardt, com o auxílio do *software* Origin 8.6.

A resposta dos ensaios experimentais de hidratação para a germinação (energia de germinação e índice de germinação) foram conduzidas utilizando um *software* R de análise estatística, avaliando as quatro variáveis do estudo (processo, fases, temperatura e cultivar) em 48 configurações diferentes, considerando o nível de 5% de significância a partir da análise de variância (ANOVA).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesta seção serão apresentados os resultados das caracterizações físico-químicas, físicas, morfológicas e termogravimétricas dos cultivares *in natura*, bem como a identificação das fases, a umidade e o volume das amostras relativos aos ensaios de hidratação. Apresenta-se também a cinética de hidratação do tritcale e o ajuste dos modelos com os seus respectivos parâmetros frente aos dados experimentais, bem como as propriedades termodinâmicas do processo. Ademais, observa-se a influência do binômio tempo-temperatura no ganho de umidade e na germinação dos grãos, e a caracterização do malte de tritcale frente a sua composição físico-química, morfológica e parâmetros de qualidade.

4.1. CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DOS CULTIVARES

A composição físico-química das macromoléculas permite entender e conciliar seus principais constituintes com o processo de absorção de água, possibilitando identificar as possíveis aplicações dos cereais no processamento de alimentos. Com isso, as composições bromatológicas dos grãos de tritcale *in natura*, referentes aos cultivares IPR 111 e IPR Aimoré foram comparados com a composição centesimal dos grãos de tritcale fornecidos pela USAD (2018) e EPM-Unifesp (2018) (TABELA 4.1).

TABELA 4.1 – COMPOSIÇÃO CENTENSIMAL *IN NATURA* DOS CULTIVARES AVALIADOS E OS VALORES DE REFERÊNCIA, EXPRESSOS EM BASE ÚMIDA.

Constituintes	Cultivar avaliado		Literatura consultada	
	IPR 111	IPR aimoré	USAD (2018)	EPM-Unifesp (2018)
Umidade (%)	12,83 ± 0,46 ^a	12,33 ± 0,23 ^a	10,50	10,51
Lipídeos (%)	1,25 ± 0,01 ^b	1,35 ± 0,01 ^a	2,10	2,09
Proteínas (%)	12,98 ± 0,12 ^a	12,67 ± 0,07 ^b	13,0	13,05
Cinzas (%)	1,71 ± 0,01 ^a	1,55 ± 0,02 ^b	2,20	2,23
Carboidratos Totais (%)	71,23 ± 0,56 ^b	72,10 ± 0,04 ^a	72,11	72,13
- Fibra bruta (%)	3,03 ± 0,07 ^a	3,30 ± 0,07 ^a	-	-
- Amido (%)	52,29 ± 0,68 ^a	52,28 ± 0,21 ^a	-	-
- Outros (%)	15,92 ± 0,04 ^b	16,52 ± 0,11 ^a	-	-

Média ± desvio padrão com letras minúsculas iguais na mesma linha não apresentam diferença significativa entre os cultivares pelo teste de Tukey (p≤0,05).

Frente aos resultados encontrados para a caracterização físico-química, observa-se que os cultivares não apresentaram diferença significativa, segundo o teste de Tukey para os teores de umidade, amido e fibra bruta. No entanto, há diferença ao nível de 95% de confiança para as concentrações de proteínas e cinzas, sendo esses valores mais elevados para o cultivar IPR 111, enquanto o cultivar IPR Aimoré apresentou maior resultado para lipídeos e carboidratos (fração não-amilacea). Em comparação aos resultados apresentados por USAD (2018) e EPM-Unifesp (2018), os cultivares estão de acordo para cada constituinte da composição centesimal (TABELA 4.1). Além disso, os cultivares avaliados tiveram valores muito próximos a seus parentais (trigo ou centeio) (TABELA 2.1). Segundo Lima, Viola e Kratz (2001), McGoverin et al. (2011) e Zhu (2018), a diferença encontrada entre os cultivares para a composição centesimal pode ser justificada devido à grande variedade de cultivares de triticales hexaploide, uma vez que as condições ambientais, como clima, composição do solo (nitrogênio, carbono e oxigênio) e as condições de cultivo variam de acordo com cada região, proporcionando diferenças na composição físico-química dos grãos.

Por meio dos resultados obtidos na composição centesimal, constata-se que o carboidrato é o componente com maior influência no triticales. Sendo que para esse constituinte, o amido representa mais de 72%. Os valores de amido dos cultivares avaliados no presente estudo estão de acordo com os encontrados por Cornejo-Ramírez et al. (2015) (52,2%) e abaixo dos observados por Frás et al. (2016) que variaram de 60,8 a 67,7% para diferentes cultivares de triticales.

A proteína é outro constituinte de destaque, os resultados encontrados no presente estudo estão de acordo aos observados por Manley et al. (2013) que avaliaram a concentração de proteína em 131 genótipos de triticales variando entre 7,5 a 16,2%. Segundo Navarro-Contreras et al. (2013) e Zhu (2018), o triticales apresenta em sua composição as proteínas gliadina e glutenina que podem variar de 11,4 a 26,1% e 6,8 a 9,6%, respectivamente. A mistura dessas proteínas juntamente com o amido é responsável pela coesão e viscoelasticidade da massa, quando se utiliza a farinha dos cereais. As baixas concentrações de glutenina apresentadas pelos cultivares de triticales dificultam a utilização desse grão para a produção de alimentos que dependam da elasticidade do material, como por exemplo, a elaboração de pães.

A quantidade de água absorvida pelo grão está diretamente associada à fração proteica e ao amido presentes no triticale, uma vez que 1 g de proteína tem capacidade de absorver em média 2,0 g de água e 1 g de amido absorve aproximadamente 0,4 g de água (Bloksma e Bushuk, 1988). A quantidade de água que o grão de triticale pode absorver está relacionada com os grupos hidrofílicos apresentados por esses constituintes e ajudam a definir uma possível aplicação do grão para a sua utilização na produção de alimentos.

4.2. CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS CULTIVARES

A caracterização física dos grãos é imprescindível em diversos aspectos, pois fornece informações essenciais sobre a quantidade de grãos a serem semeados, bem como o dimensionamento e a regulagem de equipamentos utilizados em etapas de colheita e beneficiamento, possibilitando reduzir as perdas do produto por injúrias mecânicas. Com o intuito de analisar uma possível diferença entre os cultivares (IPR 111 e IPR Aimoré), a caracterização física dos grãos de triticale *in natura* foram averiguadas a partir da esfericidade, massa específica real, massa específica aparente e porosidade intergranular (TABELA 4.2).

TABELA 4.2 – CARACTERIZAÇÃO FÍSICA DOS CULTIVARES DE TRITICALE *IN NATURA*.

Propriedades	Triticale	
	IPR 111	IPR aimoré
Eixo ortogonal longitudinal (mm)	7,44 ± 0,07 ^a	7,18 ± 0,03 ^b
Eixo ortogonal radial maior (mm)	3,03 ± 0,07 ^a	2,86 ± 0,02 ^b
Eixo ortogonal radial menor (mm)	2,85 ± 0,05 ^a	2,69 ± 0,02 ^b
Esfericidade (%)	54,12 ± 0,39 ^a	53,01 ± 0,17 ^b
Massa específica aparente (kg m⁻³)	806,45 ± 33,34 ^a	829,17 ± 61,08 ^a
Massa específica real (kg m⁻³) (gás)	1454,30 ± 1,57 ^a	1455,00 ^a ± 1,21 ^a
Porosidade intergranular (%)	44,05 ± 2,25 ^a	43,01 ± 3,87 ^a

Média ± desvio padrão com letras minúsculas iguais na mesma linha não apresentam diferença significativa entre os cultivares, pelo teste de Tukey (p≤0,05).

Frente aos resultados encontrados para a caracterização física, observa-se que os cultivares apresentaram diferença significativa para todas as dimensões referentes aos eixos ortogonais, caracterizando diferença para a esfericidade (TABELA 4.2). Os valores encontrados no presente estudo são semelhantes aos obtidos por Wiwart, Mos e Wójowicz (2006) ao avaliaram grãos de triticale, visto que os autores encontraram dimensões de 8,52 mm para o eixo longitudinal e 2,60 mm

para o eixo radial menor. Corrêa et al. (2006) encontraram para o grão de trigo dimensões de 6,76 mm, 3,44 mm e 3,10 mm para os eixos ortogonais longitudinais, radial maior e radial menor, respectivamente. Os resultados alcançados por Corrêa et al. (2006) possibilitaram obter a esfericidade (61,58%) do grão de trigo, demonstrando que essa partícula apresenta dimensões que a caracterizam com formato mais arredondado que os cultivares de triticales.

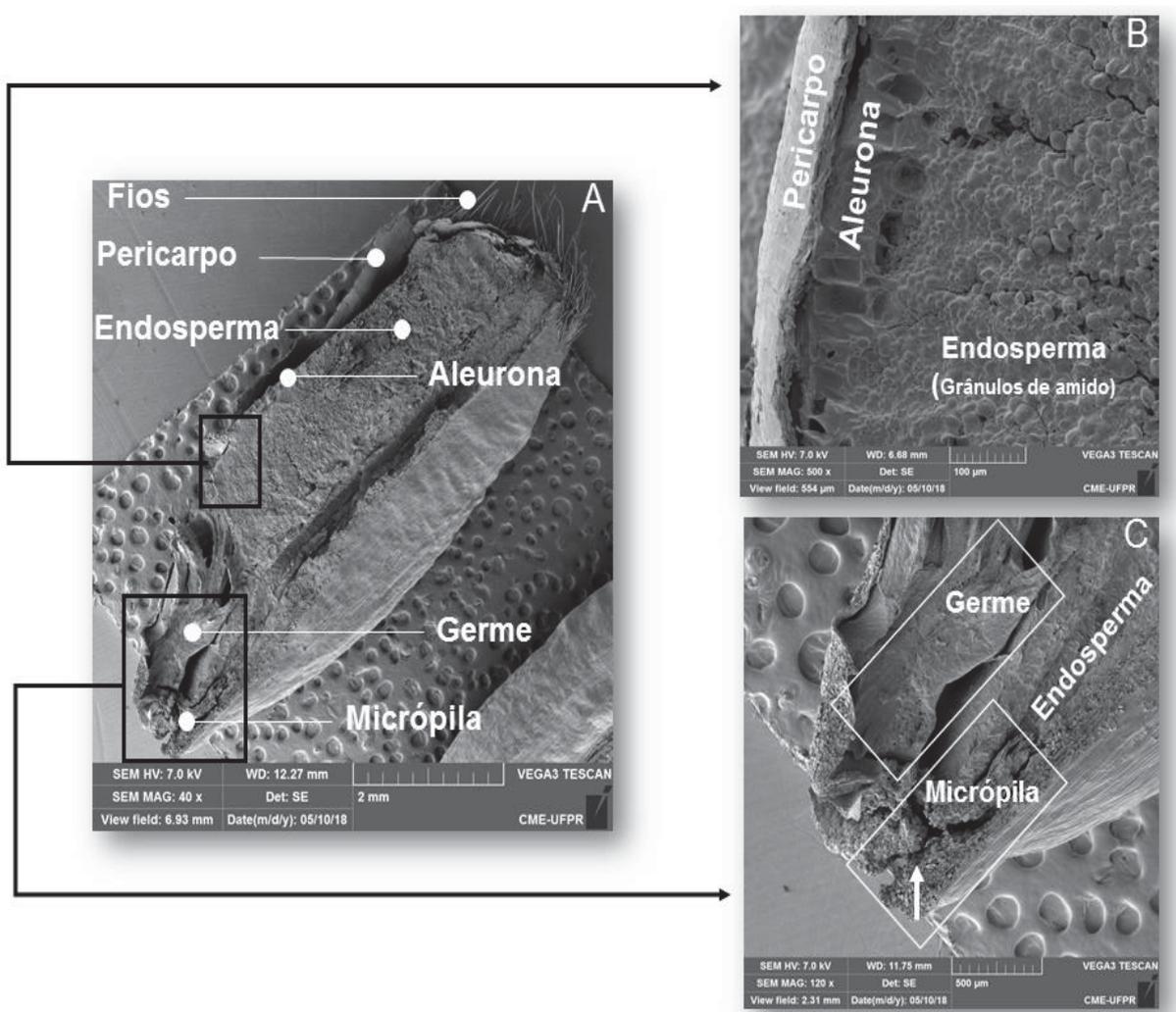
Para a massa específica aparente, real e a porosidade intergranular, o teste de Tukey não apresentou diferença ao nível de 95% de confiança (TABELA 4.2). A massa específica aparente do triticales apresentou valores maiores em comparação ao trigo, uma vez que Corrêa et al. (2006) e Ormond et al. (2013) encontraram valores entre 760,0 a 794,4 kg m⁻³. Para a massa específica real, o valor encontrado para o triticales foi menor em comparação ao trigo, já que Corrêa et al. (2006) apresentaram valores próximo a 1500 kg m⁻³. A relação entre a massa específica real e a massa específica aparente, possibilitou obter a porosidade intergranular (44,05% para IPR 111 e 43,01% para IPR Aimoré) dos grãos de triticales, o qual representa a porcentagem do volume total ocupada pelo ar em meio uma massa de grãos (Araújo et al. 2014). Os valores da porosidade intergranular obtidos pelo triticales foram superiores quando comparados ao trigo, uma vez que Ormond et al. (2013) encontraram valores na faixa de 38%. Esses resultados constatarem que o triticales possui maior volume total ocupado de ar, o que facilitar a passagem da água entre os grãos possibilitando um aumento na velocidade de hidratação quando comparado ao grão de trigo.

Dentro da caracterização física das partículas, a massa específica aparente é considerada a mais importante, já que essa propriedade auxilia no dimensionamento de silos, secadores, depósitos e sistemas de transportes, podendo ainda ser utilizado para determinar danos causados por pragas nos produtos armazenados. A massa específica real é considerada um complemento para entender como o produto irá se comportar mediante algum procedimento, como por exemplo, operações de secagem ou hidratação. A porosidade intergranular relaciona-se com o dimensionamento de silos e unidades de transportadores, além de estar inserida nos estudos da transferência de calor e de massa, nos processos hidrodinâmicos (Mata e Duarte, 2002; Araújo et al. 2014).

4.3. MORFOLOGIA DO GRÃO E DOS GRÂNULOS DE AMIDO *IN NATURA* DO TRITICALE

Para compreender as principais regiões que compõem o grão de triticale e entender como possivelmente ocorre a migração de água para o interior do grão, a estrutura morfológica dos cultivares foram observadas a partir de imagens obtidas via MEV (FIGURA 4.1). Para a elaboração das imagens foi realizado um corte transversal (A) evidenciando as principais partes que compõem o triticale; (B) um aumento no corte transversal que expõe a camada externa (pericarpo), a camada não-amilacea do endosperma (aleurona) e a região amilacea (endosperma); e (C) um aumento no corte transversal que evidencia o germe e a micrópila (FIGURA 4.1).

FIGURA 4.1 – ESTRUTURA DO GRÃO DE TRITICALE MEDIANTE UM (A) CORTE TRANSVERSAL (AUMENTO DE 40x) EVIDENCIANDO AS SUAS PRINCIPAIS PARTES, COM ÊNFASE PARA O (B) PERICARPO E A ALEURONA (AUMENTO DE 500x) E (C) A MICRÓPILA E O GERME (AUMENTO DE 120x).



FONTE: O autor (2020).

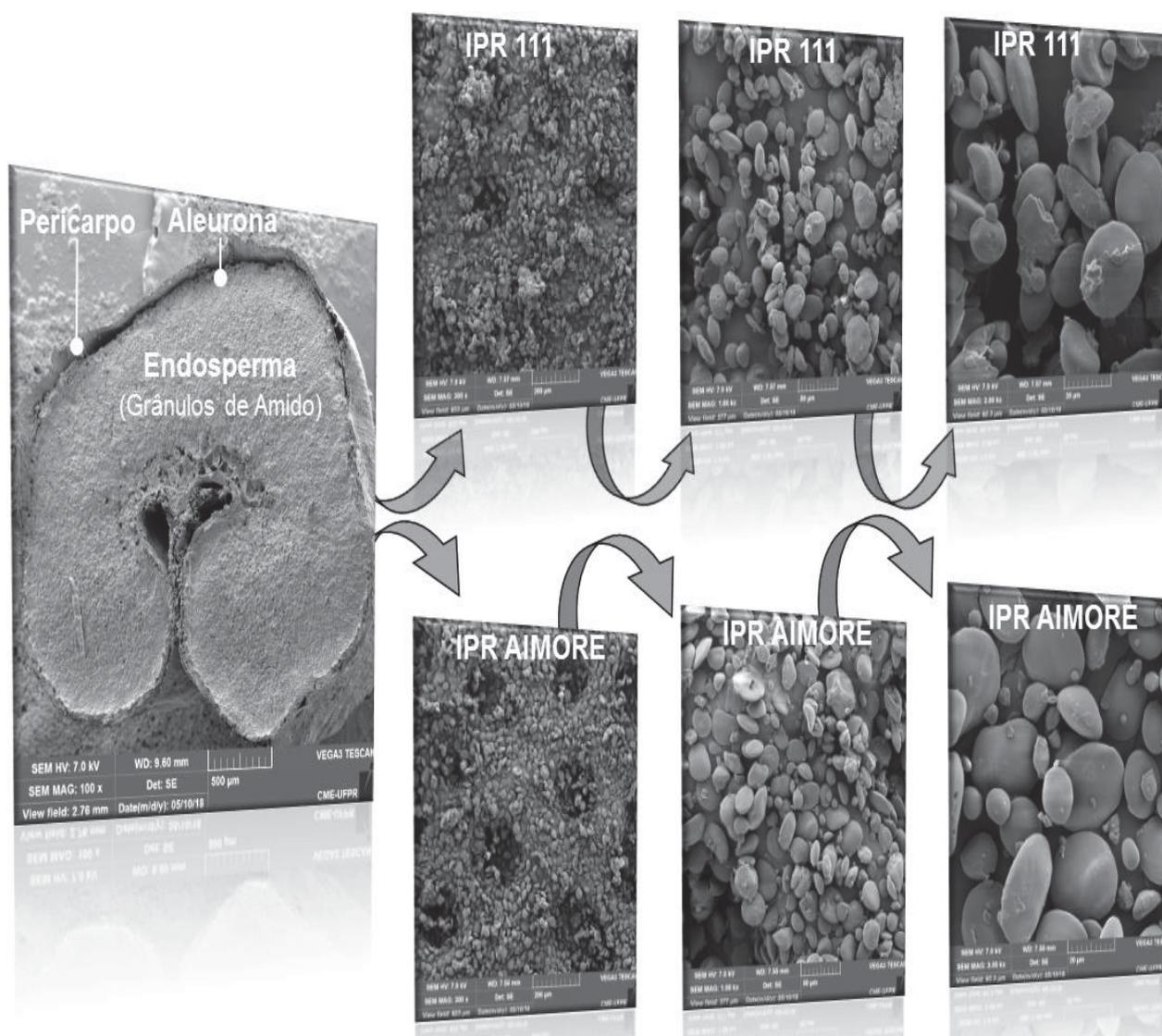
A estrutura morfológica do triticales apresenta-se como um intermédio entre as duas espécies que a deram origem, sendo composta basicamente por três regiões principais: pericarpo (camada mais externa do grão – a casca), endosperma e germe que juntos constituem a semente (camada interna) (Baier et al. 1994; Lima; Viola; Kratz, 2001; León; Pérez; Ribotta, 2008).

O pericarpo é subdividido em diferentes camadas que exercem como a principal finalidade a proteção do grão, essa camada é composta em sua maioria por polissacarídeos não-amiláceos que representam em média 7,5% do peso do grão (FIGURA 4.1 (B)). O endosperma é essencialmente composto por amido, o qual é representado em aproximadamente 83% do peso do grão; o endosperma ainda apresenta uma camada com alta concentração de fibras, proteínas e minerais, conhecida como camada aleurona que representa em média 6,5% do peso do grão (FIGURA 4.1 (B)). O germe fica aderido ao endosperma e a sua função é receber suprimentos necessários para o desenvolvimento embrionário, esse constituinte possui maior concentração de proteínas e lipídeos, representando em média 3% do peso do grão (FIGURA 4.1 (C)) (Baier et al. 1994; Lima; Viola; Kratz, 2001; León; Pérez; Ribotta, 2008).

Na estrutura do grão de triticales é possível visualizar uma pequena abertura que liga o pericarpo ao germe. Essa cavidade é conhecida como micrópila (FIGURA 4.1 (C)), o qual é responsável para que o germe seja o primeiro constituinte interno do grão a receber nutrientes necessário para que ocorra o desenvolvimento embrionário (Rathjen; Strounina; Mares, 2009; Mattioda; Jorge; Jorge, 2018).

A estrutura morfológica dos grânulos de amido presentes nos cultivares de triticales foi observada por imagens obtidas via MEV, com aumento progressivo de 300x, 1000x e 3000x, a qual expõe a veracidade e eficácia da extração de amido para ambos os cultivares (FIGURA 4.2).

FIGURA 4.2 – ESTRUTURA DO GRÃO DE TRITICALE MADIANTE UM CORTE ORTOGONAL RADIAL (AUMENTO DE 100x) E OS GRÂNULOS DE AMIDO EXTRAÍDOS DOS CULTIVARES, COM AMPLIAÇÃO SEQUENCIAL DE 300x, 1000x e 3000x.



FONTE: O autor (2020).

Visualmente observa-se que não há diferença morfológica entre o amido presente no endosperma dos cultivares (FIGURA 4.2). Os grânulos de amido presente no triticale mostram-se com uma distribuição do tamanho da partícula bimodal, com grânulos lenticulares e esféricos, característicos dos cereais da tribo Triticeae (trigo, cevada, centeio e triticale) (Shannon e Garwood, 1984; Heneen e Brismar, 1987). Os grânulos de amido presentes nessas espécies são identificados como do tipo A e B. Os grânulos do tipo A apresentam-se com tamanhos maiores e no formato de disco ou lenticular, com o diâmetro de aproximadamente 10-35 μm ; enquanto os grânulos de amido do tipo B mostram-se de tamanho menor e formato mais esférico, com o diâmetro de 1-10 μm (Ao e Jane, 2007; Li et al. 2011).

Em geral, os grânulos de amido do tipo A apresentam-se em menor quantidade numérica que os grânulos do tipo B. No entanto, o tipo A representa a maior quantidade percentual de amido presente no grão. Os dois tipos de grânulos diferem em suas estruturas e apresentam diferentes proporções de amilose e amilopectina (Ao e Jane, 2007). Os grânulos do tipo B apresentam maior conteúdo lipídico em sua estrutura e as proteínas se associam preferencialmente aos grânulos de amido do tipo A, uma vez que não foram encontradas associações representativas de proteínas nos grânulos menores (tipo B) (Baga et al. 2000; Peng et al. 2000; Ao e Jane, 2007). Esse fato sugere que os grânulos do tipo A tendem a ter maior influência no processo de hidratação, devido ao seu maior percentual na porção amilacea do grão e pela proteína ser considerada a macromolécula de maior afinidade com a água, quando comparada com os outros macronutrientes (Sopade; Aijsegiri; Badau, 1992).

4.4. CARACTERIZAÇÃO TÉRMICA DO AMIDO DOS CULTIVARES *IN NATURA*

A caracterização térmica foi avaliada a partir da extração dos grânulos de amido dos cultivares *in natura*, com o intuito de entender a decomposição e a transição do evento endotérmico do tritcale a partir da influência do calor. Esse estudo proporciona subsídio para identificar a integridade do amido em meio às diversas condições experimentais de hidratação.

FIGURA 4.3 – EFEITO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO AMIDO EXTRAÍDO DO CULTIVAR IPR 111.

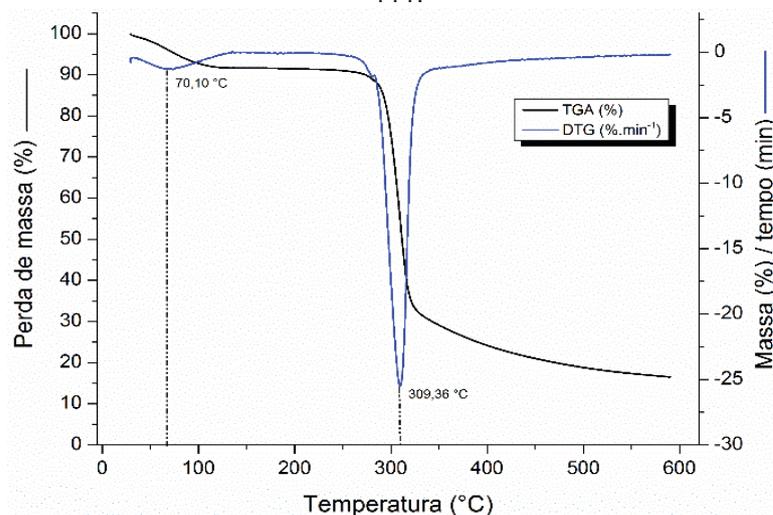
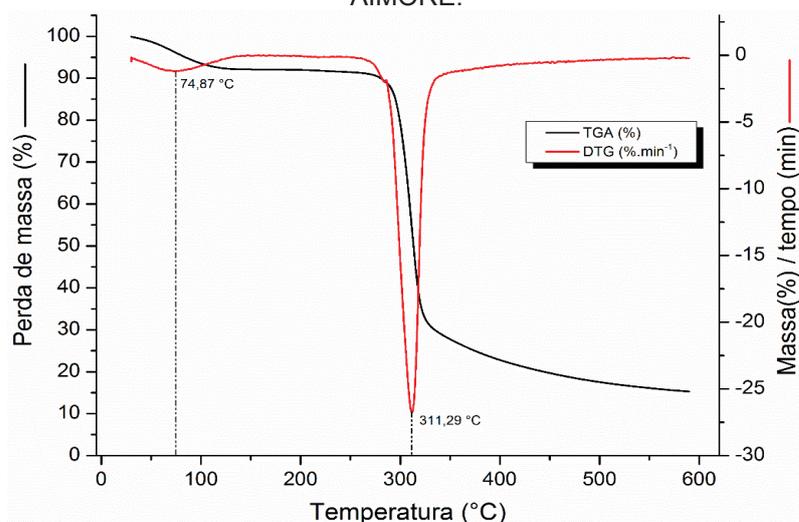


FIGURA 4.4 – EFEITO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO AMIDO EXTRAÍDO DO CULTIVAR IPR AIMORÉ.



Ambos os cultivares (IPR 111 e IPR Aimoré) tiveram comportamento térmico semelhantes em função da degradação (FIGURAS 4.3 e 4.4). Por meio da derivada (DTG) foi possível avaliar a decomposição das amostras diante da programação da temperatura empregada no sistema.

Ao longo do evento de degradação térmica foram observadas duas etapas de perda de massa, indicando a instabilidade das amostras com o aumento da temperatura. A primeira instabilidade sucedeu-se entre 55 a 100 °C, com o pico de degradação em 70,10 °C para o IPR 111 e em 74,87 °C para o IPR Aimoré. O primeiro evento térmico pode estar atribuído ao processo de gelatinização do amido e desnaturação das proteínas, juntamente com a desidratação de água livre (FIGURAS 4.3 e 4.4) das amostras. A diferença de temperatura para o pico de degradação observada entre os cultivares pode ser associado ao complexo amilose-lipídico estar mais presente no cultivar IPR Aimoré, possibilitando que a temperatura de degradação térmica desse cultivar seja maior.

O segundo evento térmico ocorre em temperaturas de 309,36 °C e 311,29 °C para os cultivares IPR 111 e IPR Aimoré, respectivamente, o qual pode estar associado à questão não oxidativa, devido à carbonização de produtos voláteis a partir da oxidação de matéria orgânica, que evolui até a completa oxidação do material. Os valores observados por Lima et al. (2012) ao avaliar a decomposição do amido de milho (308,5 °C) e da farinha de trigo (303,7 °C), são próximos aos encontrados para os cultivares de triticale. Os valores observados nos dois eventos de perda de massa evidenciam que as características físico-químicas e estruturais dos cultivares de triticale são semelhantes.

Por meio da técnica de DSC foram obtidas as condições referentes aos processos endotérmicos dos cultivares, para observar as temperaturas correspondentes ao evento de gelatinização do amido. A temperatura de pico, ou seja, a temperatura em que ocorre o evento de gelatinização foi de 59,11 °C para o IPR 111 e de 59,63 °C para o IPR Aimoré (TABELA 4.3).

TABELA 4.3 – PROPRIEDADES DE GELATINIZAÇÃO DO AMIDO DOS CULTIVARES.

Cultivar	T _{ig} (°C)	T _{pg} (°C)	T _{fg} (°C)	ΔT (°C)	ΔH _g (J g ⁻¹)
IPR 111	55,85	59,11	62,49	6,64	1,53
IPR aimoré	57,08	59,63	62,49	5,41	1,13
Diferença	1,23	0,52	0,0	1,23	0,40

Legenda: T_{ig} = temperatura inicial, T_{pg} = temperatura de pico, T_{fg} = temperatura final, ΔH = variação de entalpia.

Para que o evento de gelatinização aconteça há a necessidade da amostra absorver energia na forma de calor, envolvendo trocas de calor entre o sistema e o meio ambiente, sendo que essa absorção de calor é observada através da entalpia de gelatinização. Entre os cultivares, o IPR 111 (1,53 J g⁻¹) teve uma variação da entalpia de gelatinização um pouco maior em comparação ao IPR Aimoré (1,13 J g⁻¹), sugerindo que os grânulos de amido do cultivar IPR Aimoré tem em sua estrutura uma maior proporção de amilopectina de cadeia curta tornando-as mais instáveis, possibilitando que uma menor quantidade de energia seja requerida para fundi-las durante o evento de gelatinização (Chung; Liu; Hoover, 2009).

A temperatura do evento de gelatinização vai de encontro com os observados por Makowska et al. (2014) que obtiveram valores entre 52,7 °C e 56,7 °C ao avaliaram 5 genótipos de triticale poloneses. A diferença no valor das propriedades térmicas para um mesmo cereal pode ser justificada devido às diferentes metodologias utilizadas na extração do amido, análises de DSC (taxa de aquecimento) e a proporção amido:água, bem como os fatores ambientais e genéticos de cada cultivar (Zhu, 2014). Ao e Jane (2007) avaliaram a gelatinização do amido de triticale obtendo diferentes resultados de gelatinização para a estrutura bimodal. Segundo esses autores, a temperatura de gelatinização do amido de triticale foi de 64,2 °C, enquanto os grânulos do tipo A foi de 63,5 °C e os grânulos do tipo B foi de 64,1 °C.

4.5. ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA

Com o intuito de conhecer a cinética de hidratação, bem como a possibilidade de intensificar o processo de absorção de água pelos grãos, os cultivares de triticale foram avaliados mediante aos processos de hidratação isotérmica e periódica.

4.5.1. Cinética de Hidratação e Identificação das Fases

Através dos ensaios experimentais foram identificadas as fases e a cinética de hidratação dos cultivares IPR 111 e IPR Aimoré. Os experimentos foram conduzidos por 15 h (900 min), utilizando-se temperaturas de 20, 30, 40 e 50 °C para o processo isotérmico (FIGURAS 4.5 e 4.6) e a partir da operação periódica mediante a modulação da temperatura com período de 30 min e amplitude de 10 °C (P30-A10), para cada ensaio proposto em condição isotérmica (FIGURAS 4.7 e 4.8).

FIGURA 4.5 – COMPORTAMENTO CINÉTICO E IDENTIFICAÇÃO DAS FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

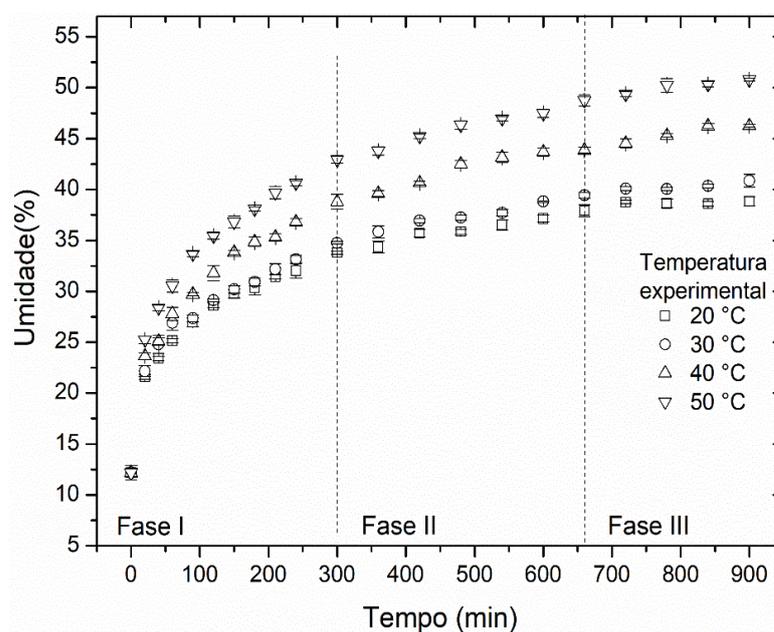


FIGURA 4.6 – COMPORTAMENTO CINÉTICO E IDENTIFICAÇÃO DAS FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

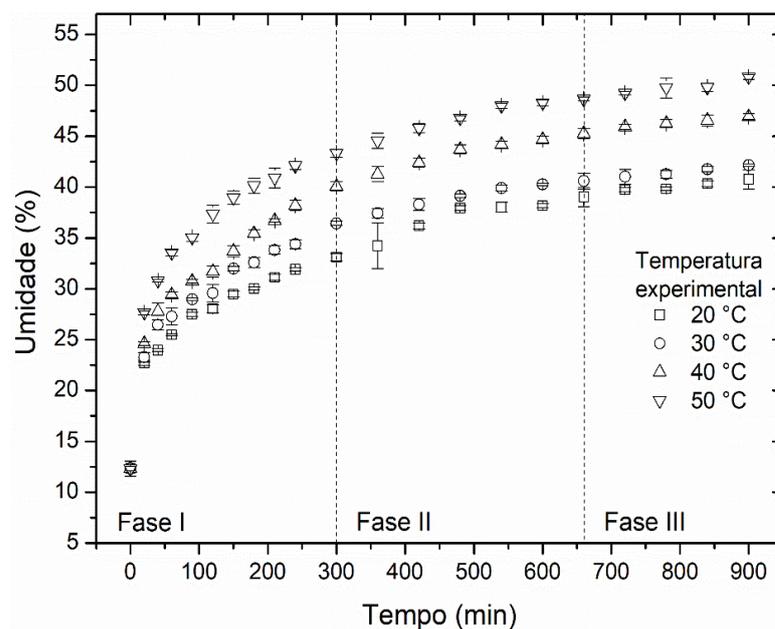


FIGURA 4.7 – COMPORTAMENTO CINÉTICO E IDENTIFICAÇÃO DAS FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.

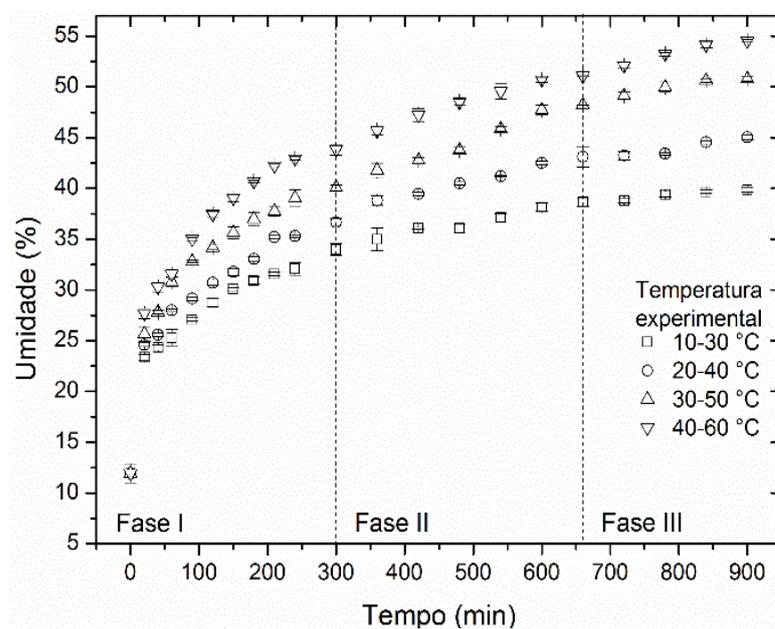
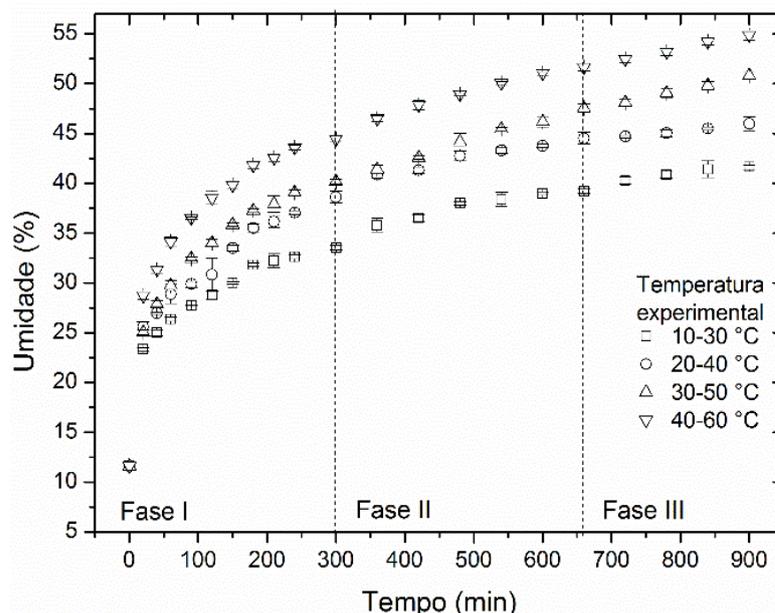


FIGURA 4.8 – COMPORTAMENTO CINÉTICO E IDENTIFICAÇÃO DAS FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.



O comportamento cinético das curvas de hidratação é baseado em alguns mecanismos de transporte de água, como por exemplo: a difusão e a capilaridade. Esses mecanismos de absorção de água possibilitam definir a cinética de hidratação, conforme a velocidade da migração de água para o grão. Com base nos estudos de Borges, Jorge e Jorge (2017) e Mattioda, Jorge e Jorge (2018, 2019^{a,b}), que avaliaram a cinética de hidratação e identificação das fases dos grãos de soja e trigo, respectivamente, foi possível distinguir o comportamento cinético de hidratação dos cultivares de triticale em três fases (Fase I, Fase II e Fase III).

A Fase I foi compreendida entre 0-300 min, devido ao rápido ganho de umidade de ambos os cultivares de triticale em todas as condições experimentais. A diferença do gradiente de umidade existente entre o grão e o meio de hidratação é alto, o que pode ter desencadeado essa rápida absorção de água nas primeiras horas de hidratação. Além disso, a difusão e a capilaridade são igualmente favorecidas pela presença de fissuras e poros no grão, o que facilita a ação difusiva e capilar na superfície do pericarpo, auxiliando a mobilidade da água para as camadas mais internas, como o germe e o endosperma (Bello; Tolaba; Suarez, 2004; Borges; Jorge; Jorge, 2017; Mattioda; Jorge; Jorge, 2018). Na Fase I, o ganho de umidade médio para todas as condições experimentais avaliadas em relação a umidade final atingida foi de 79,40% (IPR 111) e 78,66% (IPR Aimoré) para a hidratação isotérmica e de 75,28% (IPR 111) e 75,11% (IPR Aimoré) para operação periódica.

A Fase II foi definida entre 300-660 min, visto que os grãos de triticale reduziram a velocidade de absorção de água para todas as condições experimentais avaliadas nesse período. Tal fato, pode ter sido ocasionado devido à superfície do sólido apresentar-se parcialmente saturada de água, o que pode ter promovido uma redução na força motriz pela diferença de concentração atribuída ao mecanismo de difusão. Na Fase II, o ganho de umidade médio para todas as condições experimentais avaliadas em um mesmo processo de hidratação em relação a umidade final atingida foi de 15,43% (IPR 111) e 15,90% (IPR Aimoré) para a isotérmica e de 18,56% (IPR 111) e 17,84% (IPR Aimoré) para a periódica.

E por fim, a Fase III foi determinada entre 660-900 min, visto que nessa fase o ganho de umidade dos cultivares foi quase imperceptível para todas as condições experimentais. Tal fato, pode ser justificado pelo preenchimento dos espaços vazios no grão pelas moléculas de água e também devido à saturação de ligações químicas entre os constituintes do grão com a água (Cavariani et al. 2009; Botelho et al. 2010; Marques; Jorge; Jorge, 2014; Borges; Jorge; Jorge, 2017; Mattioda; Jorge; Jorge, 2018). Na Fase III, o ganho de umidade médio em relação a umidade final foi de 5,17% (IPR 111) e 5,44% (IPR Aimoré) para a hidratação isotérmica e de 6,16% (IPR 111) e 7,05% (IPR Aimoré) para a hidratação periódica.

Juntamente com a identificação das fases de hidratação, o efeito da variação da temperatura no ganho de umidade dos cultivares foi igualmente avaliado. Apesar da umidade no início do processo aumentar rapidamente, após moderadamente e tender ao equilíbrio para todas as condições térmicas, a capacidade de hidratação do grão foi maior com o aumento da temperatura do sistema. Esse comportamento cinético também foi observado para diferentes cereais e leguminosas, como por exemplo, trigo (Maskan, 2001; Mattioda; Jorge; Jorge, 2018 e 2019^a), gergelim (Khazaei e Mohammadi, 2009), sorgo (Kashiri; Kashaninejad; Aghajani, 2010), soja (Fracasso et al. 2014, 2015), feijão adzuki (Miano e Augusto, 2015), cevada (Montanuci; Jorge; Jorge, 2015; Borsato et al. 2019), sementes de abóbora (Edith et al. 2016) e arroz (Balbinoti; Jorge; Jorge, 2018^a). Segundo os autores, esse fato pode estar atribuído à intensidade das vibrações das moléculas da água, que quanto mais aquecidas proporcionam maior mobilidade no grão, favorecendo o rompimento das ligações moleculares presentes no alimento, que conseqüentemente acarretaram na expansão dos poros dos grãos permitindo maior quantidade de ligação com as moléculas de água.

A quantidade de água absorvida pelos cultivares nas diferentes condições experimentais foi comparada entre os processos de hidratação isotérmica e periódica, com o intuito de avaliar a porcentagem do ganho de água em cada fase e a umidade final atingida (TABELA 4.4).

TABELA 4.4 – QUANTIDADE DE ÁGUA ABSORVIDA NOS DIFERENTES PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO PARA CADA FASES E UMIDADE FINAL OBTIDA PARA OS CULTIVARES AVALIADOS.

Cultivar	Operação	Temperatura (°C)	Fase I (% _{ob.u})	Fase II (% _{ob.u})	Fase III (% _{ob.u})	Umidade Final (% _{ob.u})
IPR 111	Isotérmica	20 °C	21,63	4,14	0,91	38,85 ^a
		30 °C	22,59	4,67	1,43	40,86 ^b
		40 °C	26,63	5,06	2,02	46,25 ^f
		50 °C	30,76	5,82	2,39	50,78 ^g
	Periódica	10-30 °C	22,06	4,66	1,18	39,84 ^b
		20-40 °C	24,72	6,47	1,89	45,03 ^e
		30-50 °C	28,14	7,25	2,57	50,80 ^g
		40-60 °C	31,89	8,15	3,43	54,52 ^h
IPR aimoré	Isotérmica	20 °C	20,77	5,93	1,72	40,75 ^b
		30 °C	24,11	4,15	1,55	42,14 ^d
		40 °C	27,74	5,20	1,66	46,92 ^f
		50 °C	31,00	5,32	2,19	50,82 ^g
	Periódica	10-30 °C	21,93	5,66	2,44	41,63 ^{c,d}
		20-40 °C	27,02	5,88	1,48	45,99 ^{e,f}
		30-50 °C	28,59	7,36	3,27	50,83 ^g
		40-60 °C	32,85	7,21	3,22	54,88 ^h

Média com as letras minúsculas iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa entre os cultivares e processo de hidratação para a umidade final, pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

A utilização do sistema periódico possibilitou obter os maiores ganhos de umidade para cada fase de hidratação quando comparado com a sua respectiva isotérmica (TABELA 4.4), com exceção da condição isotérmica de 20 °C na Fase II e 30 °C na Fase III para o cultivar IPR Aimoré. Segundo Mattioda, Jorge e Jorge (2018), o ganho mais acentuado para o processo de hidratação periódica pode estar associado aos maiores gradientes térmicos atingidos por essa operação que ocasionam maior intensidade de vibração das moléculas de água, e consequentemente maior mobilidade da água para o interior do grão.

Em relação à umidade final, para o mesmo processo de hidratação e mesma temperatura, o cultivar IPR Aimoré teve maiores ganhos umidades em comparação ao IPR 111. No entanto, o teste de Tukey constatou diferença estatística em relação aos cultivares apenas nos dois menores níveis de temperatura (isotérmica de 20 e 30 °C e periódica de 10-30 e 20-40 °C) (TABELA 4.4).

A diferença no ganho de umidade no processo isotérmico para o cultivar IPR Aimoré em relação ao IPR 111 foi de 4,89%, 3,31%, 1,45% e 0,10% para as temperaturas de 20 °C, 30 °C, 40 °C e 50 °C, respectivamente. Para a condição periódica a diferença nos ganhos de umidade da IPR Aimoré foi 4,49%, 2,13%, 0,06% e 0,66% para os ensaios de hidratação mediante a modulação da temperatura de 10-30 °C, 20-40 °C, 30-50 °C e 40-60 °C, respectivamente (TABELA 4.4).

Em relação à intensificação do processo de hidratação observa-se que para todos os ensaios em condição periódica, a modulação da temperatura proporcionou atingir as maiores umidades em relação a sua isotérmica (TABELA 4.4). Além disso, o teste Tukey ressaltou a importância da aplicação da operação periódica para o ganho de umidade, já que todas as hidratações realizadas com a modulação da temperatura apresentam diferença significativa para a umidade final (TABELA 4.4).

Para o cultivar IPR 111, a diferença no ganho de umidade da operação periódica em relação a isotérmica foi de 2,48%, 9,26%, 8,96% e 6,86% para as temperaturas de 10-30 °C, 20-40 °C, 30-50 °C e 40-60 °C, respectivamente. O cultivar IPR Aimoré obteve comportamento análogo ao IPR 111, com ganhos de 2,11%, 8,37%, 7,69% e 7,40% para a operação periódica nas temperaturas de 10-30 °C, 20-40 °C, 30-50 °C e 40-60 °C, respectivamente (TABELA 4.4). Esse fato constata a importância da operação periódica para a intensificação do processo de hidratação, visto que em todas as condições experimentais, a operação periódica resultou numa redução no tempo de hidratação para atingir a umidade equivalente à sua isotérmica.

4.5.2. Variação do Volume dos Cultivares

A variação do volume foi avaliada ao longo dos processos de hidratação isotérmica e periódica (FIGURAS 4.9, 4.10, 4.11 e 4.12) e tiveram um comportamento análogo às curvas obtidas para o ganho de umidade para ambos os cultivares, ou seja, maior variação do volume nas primeiras horas de hidratação,

para posterior estabilidade. A expansão volumétrica do triticale também foi influenciada pelo aumento da temperatura aplicada no processo. Segundo Steffe e Singh (1980) e Coutinho et al. (2007), a alteração do volume para grãos ao longo do processo de hidratação é proporcional à quantidade de umidade absorvida, logo quanto maior a temperatura aplicada na hidratação, maior será o ganho de água pelo grão, o que conseqüentemente resultará na maior variação do volume.

FIGURA 4.9 – VARIÇÃO DO VOLUME DO CULTIVAR IPR 111 DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA.

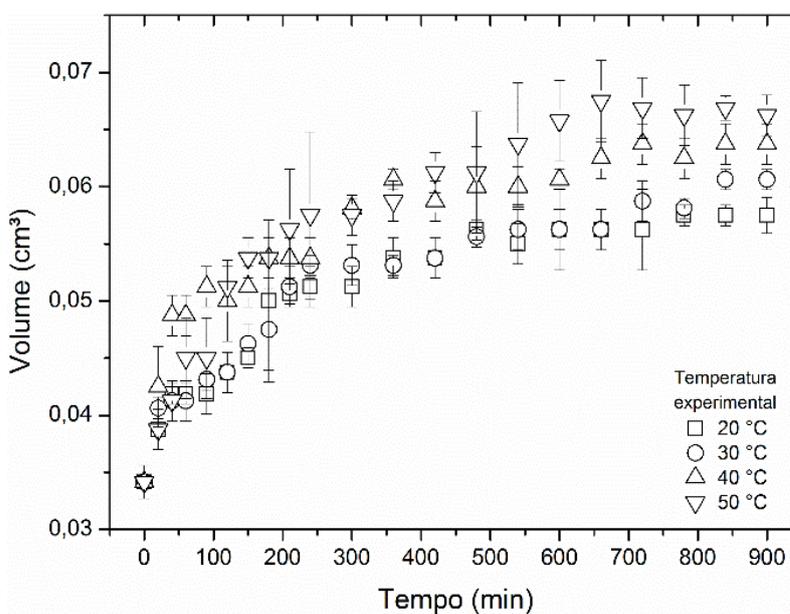


FIGURA 4.10 – VARIÇÃO DO VOLUME DO CULTIVAR IPR AIMORÉ DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA.

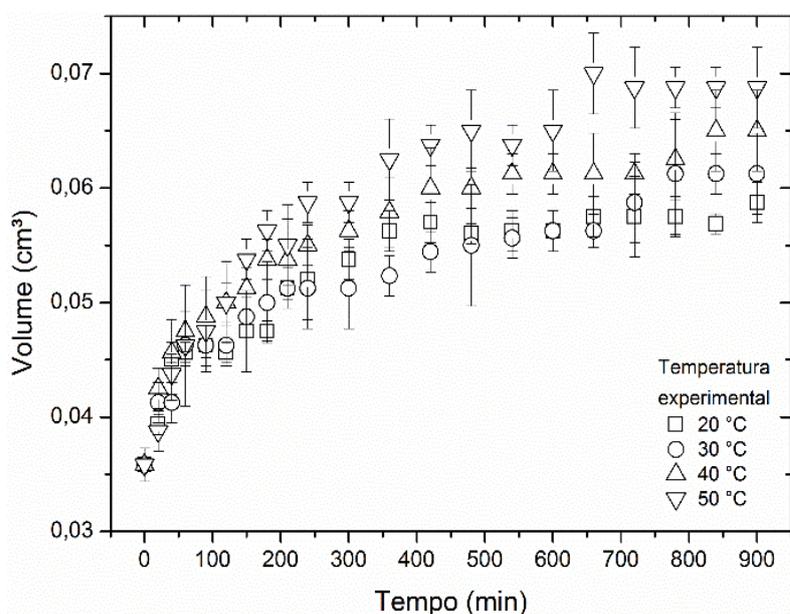


FIGURA 4.11 – VARIAÇÃO DO VOLUME DO CULTIVAR IPR 111 DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.

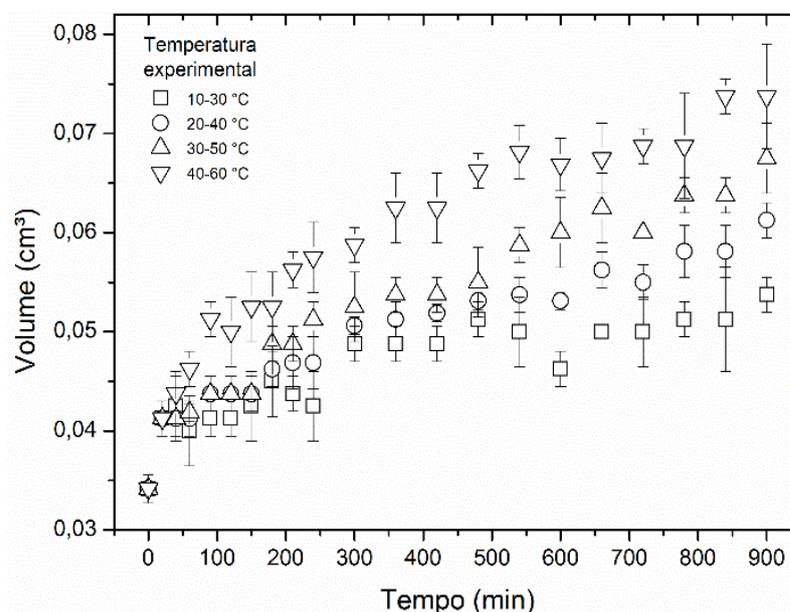
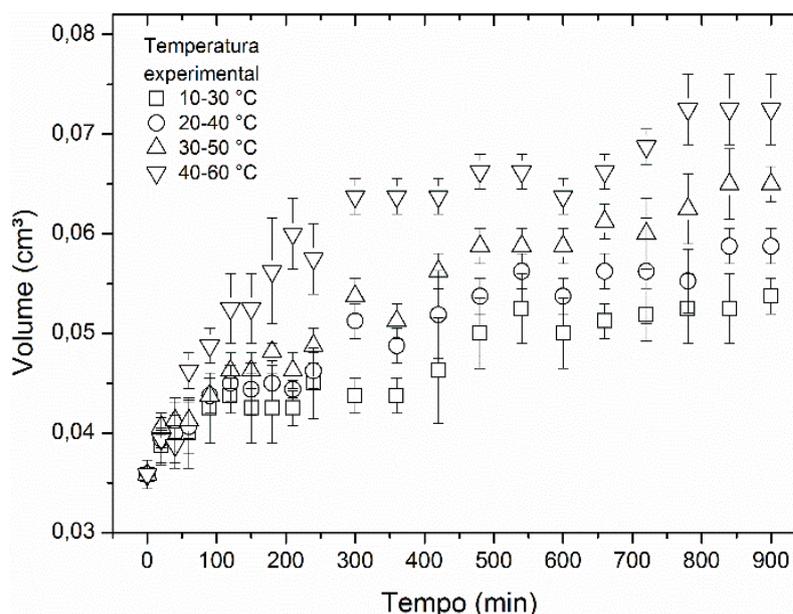


FIGURA 4.12 – VARIAÇÃO DO VOLUME DO CULTIVAR IPR AIMORÉ DURANTE O PROCESSO DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.



A média do volume *in natura* dos cultivares IPR 111 e IPR Aimoré foi de 0,036 cm³. Durante as hidratações isotérmicas ensaiadas por 900 min, o volume dos cultivares foram praticamente análogos. O IPR 111 variou 0,058 cm³, 0,061 cm³, 0,064 cm³ e 0,066 cm³, enquanto o IPR Aimoré variou 0,059 cm³, 0,063 cm³, 0,065 cm³ e 0,068 cm³ para as temperaturas de 20 °C, 30 °C, 40 °C e 50 °C, respectivamente. O processo de hidratação periódica também teve um comportamento semelhante para os dois cultivares. O IPR 111 variou 0,054 cm³,

0,059 cm³, 0,065 cm³ e 0,074 cm³ e a IPR Aimoré variou 0,054 cm³, 0,061 cm³, 0,067 cm³ e 0,074 cm³, para as temperaturas moduladas em 10-30 °C, 20-40 °C, 30-50 °C e 40-60 °C, respectivamente.

A variação volumétrica foi de 13% para o IPR 111 e 15% para o IPR Aimoré nas temperaturas de 20 a 50 °C, enquanto para a operação periódica a variação do volume foi de 37% para os dois cultivares a partir das temperaturas moduladas em 10-30 °C a 40-60 °C. A partir dos volumes finais observa-se que a hidratação periódica foi análoga a sua isotérmica, com exceção da modulação da temperatura em nível mais alto (40-60 °C) que obteve uma variação de 0,074 cm³ na periódica e a média de 0,067 cm³ na isotérmica (50 °C).

A maior variação do volume para a temperatura modulada em 40-60 °C na operação periódica, pode ser explicada através das alterações morfológicas que os cultivares sofreram devido à desestabilização da estrutura do amido, visto que a técnica de DSC demonstrou que a gelatinização dos grânulos de amido do triticale ocorre em temperaturas próximas a 60 °C. A gelatinização do amido proporciona o rompimento das ligações de hidrogênio fazendo com que as moléculas de água se associem aos grupos hidroxilos liberados pelo amido, proporcionando maior expansão e conseqüentemente a deformação dos grânulos (Maskan, 2001; Ahromrit et al. 2007; Bello; Tolaba; Suarez, 2007).

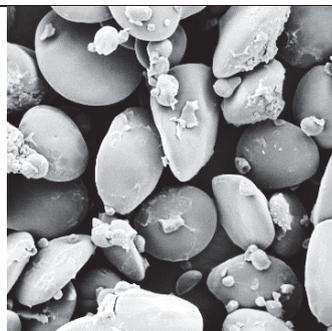
4.5.3. Avaliação Morfológica dos Grânulos de Amido ao Longo das Fases de Hidratação

A morfologia dos grânulos de amido do triticale foi avaliada nos processos isotérmico e periódico ao final das Fases I (5 h), II (11 h) e III (15 h) e comparados com os grânulos de amido dos cultivares *in natura*. As imagens foram obtidas via MEV, mediante ao aumento de 3000x, com o intuito de observar as possíveis modificações morfológicas nos grânulos amido extraído dos cultivares (FIGURAS 4.13 e 4.14).

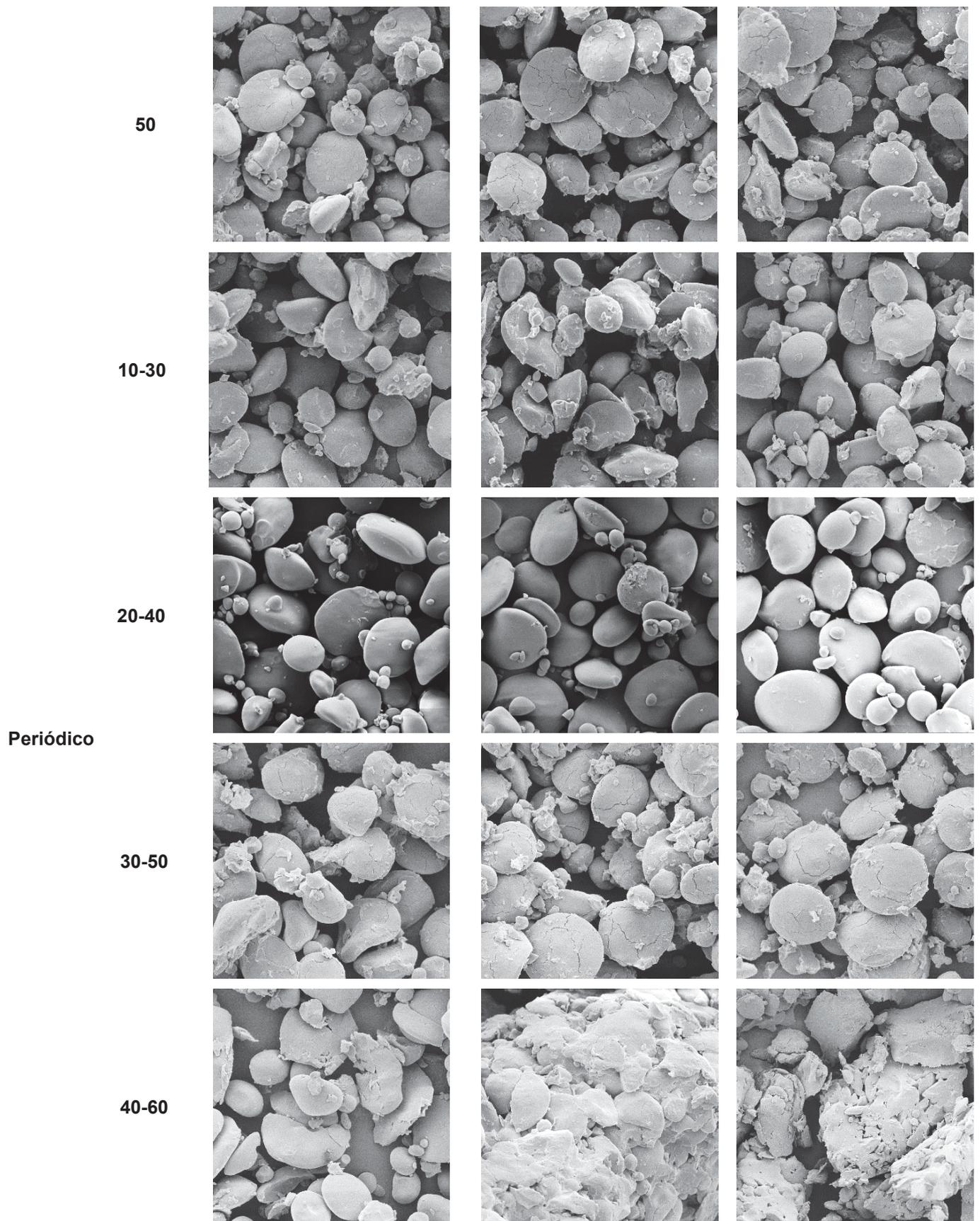
Os grânulos *in natura* apresentaram uma distribuição bimodal, com tamanhos e formas diferentes, o que dificulta o dimensionamento para comparação destes com os amidos submetidos a hidratação. Deste modo, as modificações estruturais foram observadas mediante a alteração no formato dos grânulos ao absorverem a água, bem como as características dos grânulos submetidos ao aquecimento.

FIGURA 4.13 – ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO AMIDO DO CULTIVAR IPR 111, EXTRAÍDO NAS DIFERENTES FASES E PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO, COM O AUMENTO DE IMAGEM EM 3000x.

Cultivar IPR 111 *IN NATURA*



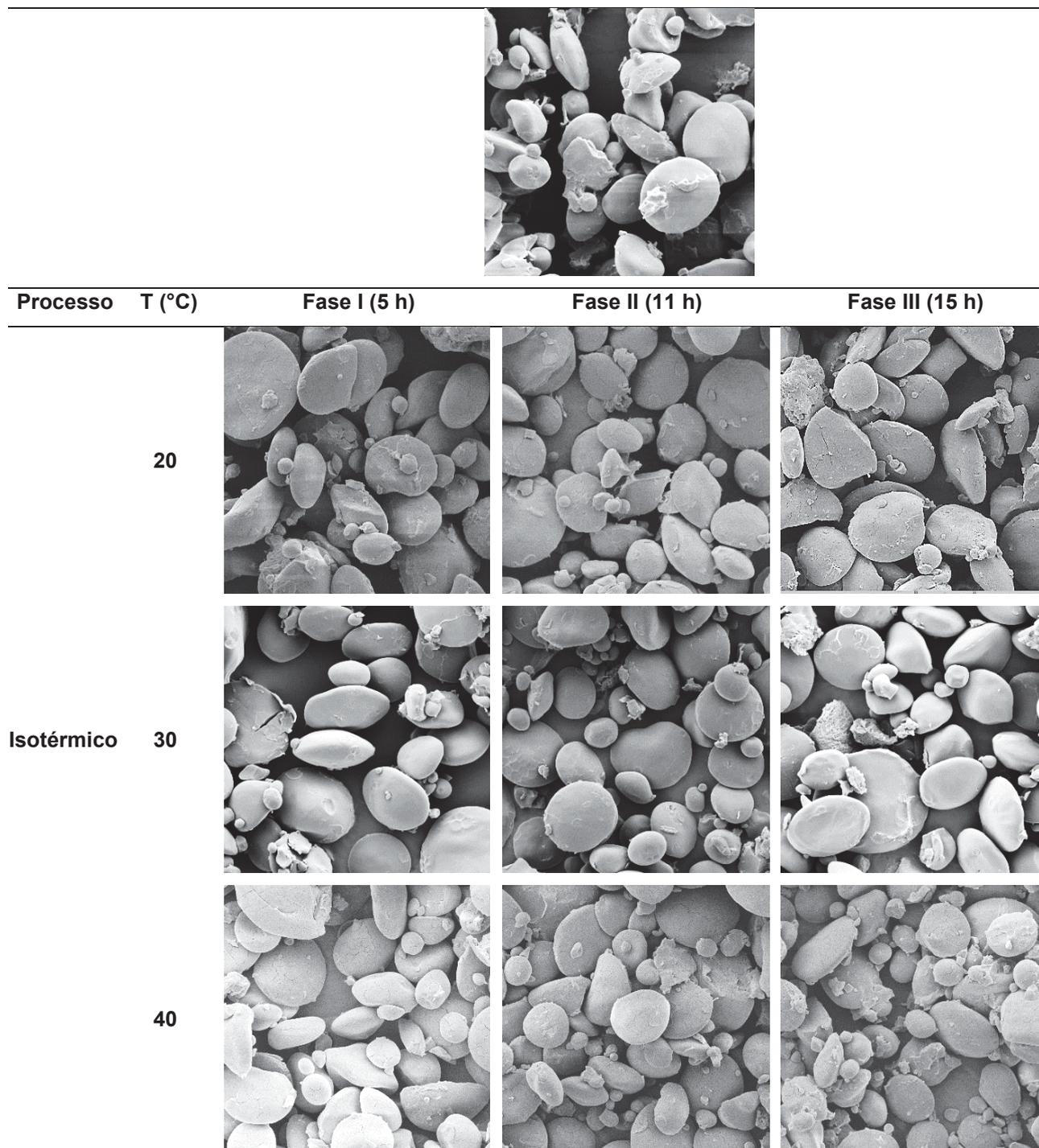
Processo	T (°C)	Fase I (5 h)	Fase II (11 h)	Fase III (15 h)
Isotérmico	20			
	30			
	40			

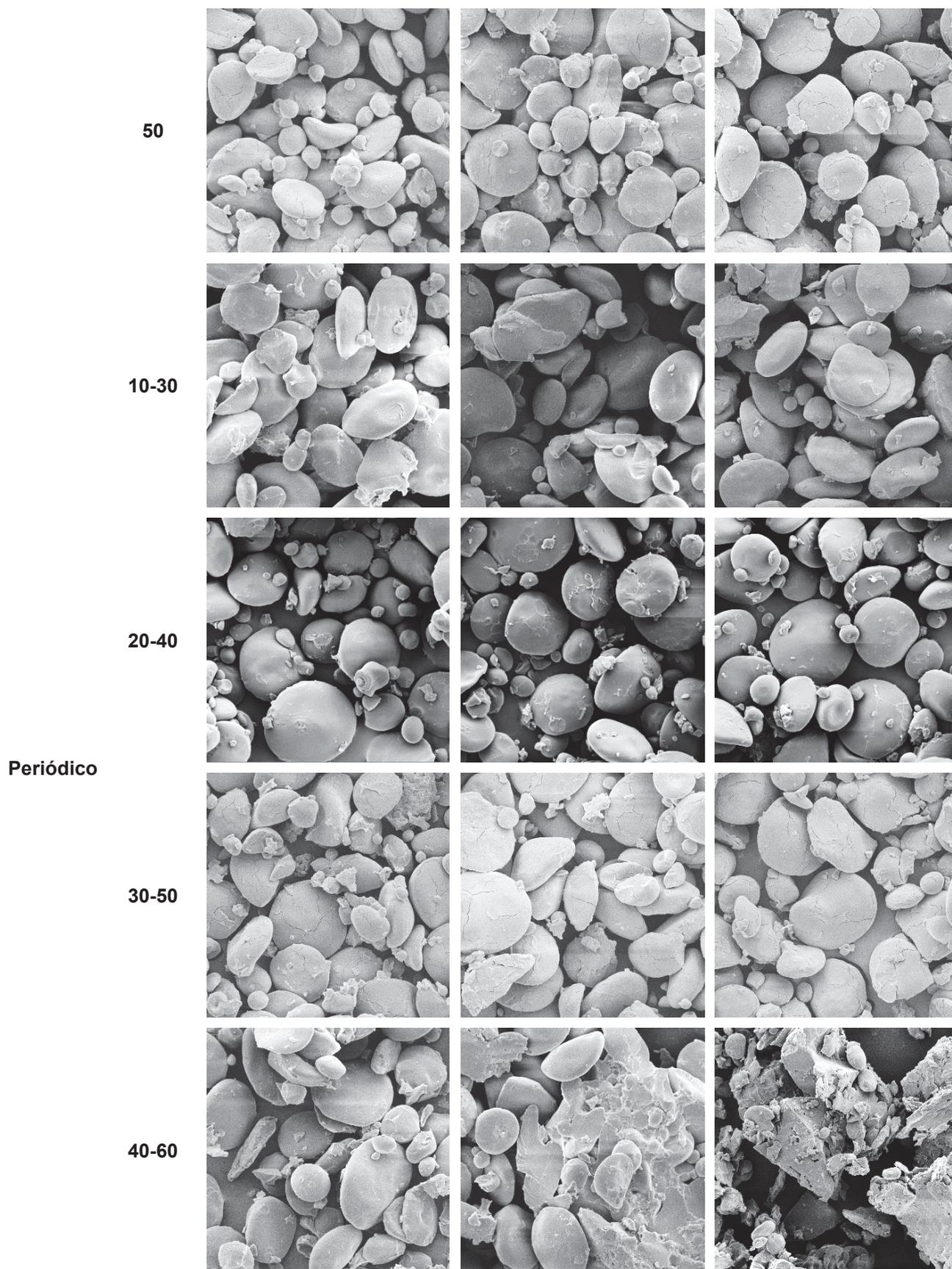


FONTE: O autor (2020).

FIGURA 4.14 – ESTRUTURA MORFOLÓGICA DO AMIDO DO CULTIVAR IPR AIMORÉ, EXTRAÍDO NAS DIFERENTES FASES E PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO, COM O AUMENTO DE IMAGEM EM 3000x.

Cultivar IPR Aimoré *IN NATURA*





FONTE: O autor (2020).

Com o aumento da temperatura da água de hidratação, os grânulos de amido apresentam alterações com a presença de fissuras (rachaduras) em sua superfície. Essa constatação foi mais evidente para as temperaturas de 50 °C (isotérmico) e 30-50 °C (periódico) (FIGURAS 4.13 e 4.14), sugerindo que há tendência inicial da deformação do amido devido à expansão dos grânulos em sua estrutura.

Para as Fases II e III, referente ao processo periódico na temperatura de 40-60 °C, observa-se a formação de um aglomerado sem forma definida (FIGURAS 4.13 e 4.14), caracterizando a desintegração dos grânulos de amido, fato que condiz com as análises térmicas que resultaram em temperaturas do pico de gelatinização do amido de 59,11 °C para o IPR 111 e 59,63 °C para o IPR Aimoré (TABELA 4.3). O processo de gelatinização resulta na perda estrutural do grânulo de amido com modificações irreversíveis em suas propriedades, conforme observado pelas imagens na condição periódica de 40-60 °C.

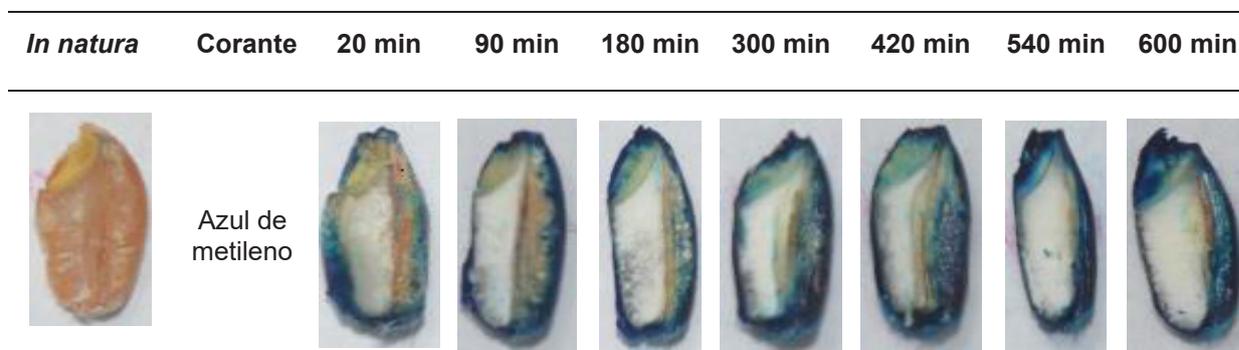
As imagens obtidas via MEV, juntamente com as análises térmicas (TGA e DSC), ajudam a definir as condições de hidratação que os grãos devem ser submetidos para o desenvolvimento de um determinado produto. Essas análises mostram-se importantes para avaliar o processo de hidratação no processamento de grãos industrializados, permitindo conhecer melhor as características dos grãos.

A utilização de temperaturas acima da gelatinização de amido possibilita melhorar a digestibilidade de nutrientes, auxiliar na migração de minerais para o interior dos grãos e ajudar na eliminação de fatores antinutricionais (Sharma et al. 2011; Miano e Augusto, 2018). Enquanto as temperaturas abaixo da gelatinização do amido proporcionam a utilização de grãos principalmente para o consumo de grãos germinados minimamente processados, produção de malte, além de facilitar à operação de moagem e a extração de componentes de interesse (Miano e Augusto, 2018; Chacón; Jorge; Jorge, 2019).

4.5.4. Avaliação do Transporte de Água ao Longo do Regime de Hidratação

Com o intuito de avaliar os mecanismos de transporte de massa, os grãos foram submetidos às mesmas condições experimentais de hidratação isotérmica operando a 35 °C com a presença de uma molécula traçadora na água de hidratação. O regime de hidratação foi avaliado a partir de uma solução com o corante azul de metileno. Esse sistema de hidratação contendo a solução permitiu identificar, a partir da pigmentação no grão, o mecanismo de transporte de água para o seu interior (FIGURA 4.15).

FIGURA 4.15 – MONITORAMENTO DO MECANISMO DE TRANSPORTE DE ÁGUA PARA O GRÃO AO LONGO DA HIDRATAÇÃO, MEDIANTE AO EMPREGO DE UM AGENTE TRAÇADOR.



FONTE: O autor (2020).

A partir do estudo com as molécula traçadora, observa-se que após 90 min de hidratação a solução aquosa conseguem romper a barreira do pericarpo e entrar sutilmente através da fissura presente no grão (FIGURA 4.15), essa abertura também é conhecida como micrópila (FIGURA 4.1C) e liga o pericarpo ao gérmen. Esta constatação possibilita observar uma coloração mais efetiva do traçador na região do germe após 300 min de hidratação. De acordo com Billiris et al. (2012), além da micrópila facilitar a passagem de água, ela possibilita que os tecidos embrionários se hidratem de forma mais rápida em relação ao endosperma. Possivelmente, o tempo e a temperatura utilizada no presente estudo podem não ter sido efetivo para que houvesse a pigmentação dos traçadores no endosperma, uma vez que o tritcale é constituído por mais de 50% de amido, e esse constituinte apresenta-se na camada mais interna do grão e com menor afinidade com a água.

Segundo Miano, Garcia e Augusto (2015), a hidratação vai depender das variáveis de processo (tempo e temperatura) e da estrutura (morfológica e físico-química) do grão. Esses autores avaliaram os mecanismos de entrada de água na semente de tremoço e verificaram que a transferência de umidade ocorre por

capilaridade e difusão através dos espaços intercelulares, sendo hilo o principal meio de entrada de água na leguminosa. Mattioda, Jorge e Jorge (2018) corroboram com o presente estudo, uma vez que avaliaram a entrada da molécula traçadora (azul de metileno) no trigo e confirmaram a micrópila como a região de maior permeabilidade à água.

4.6. AJUSTE DOS MODELOS EMPÍRICO E FENOMENOLÓGICOS AOS DADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS NA HIDRATAÇÃO DO TRITICALE

Para avaliar a cinética de hidratação dos cultivares de triticale, o modelo empírico de Peleg (EQUAÇÃO 2.1) e fenomenológicos de Difusão (EQUAÇÃO 2.4) e Omoto-Jorge (EQUAÇÃO 2.8) foram ajustados aos dados experimentais nas diferentes condições de hidratação. Além disso, foi avaliada a qualidade do ajuste de cada modelo, bem como a influência dos seus respectivos parâmetros.

4.6.1. Ajuste do Modelo de Peleg

Diante dos dados experimentais obtidos ao longo da hidratação isotérmica e periódica foi ajustado o modelo empírico de Peleg (FIGURAS 4.16, 4.17, 4.18 e 4.19).

FIGURA 4.16 – AJUSTE DO MODELO DE PELEG PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

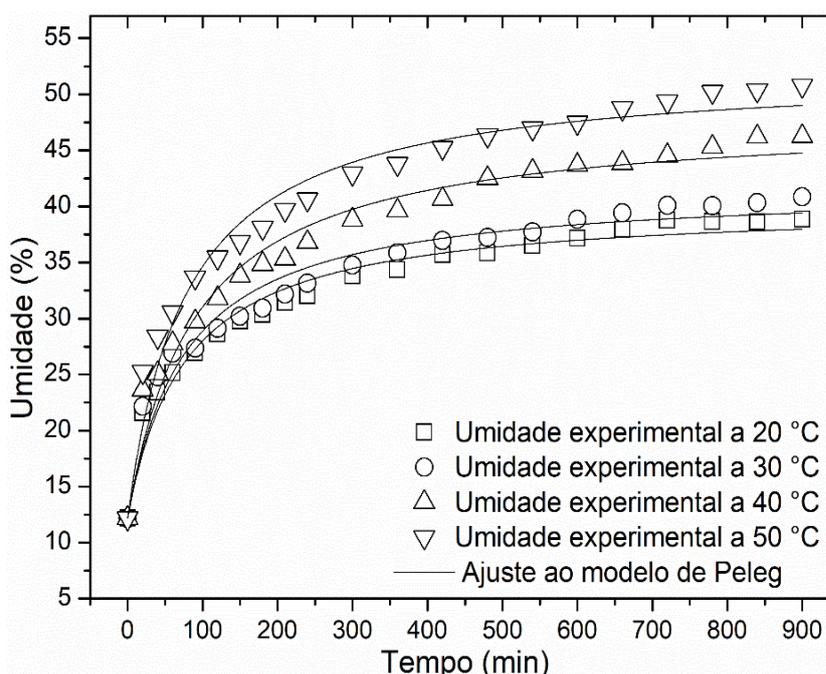


FIGURA 4.17 – AJUSTE DO MODELO DE PELEG PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

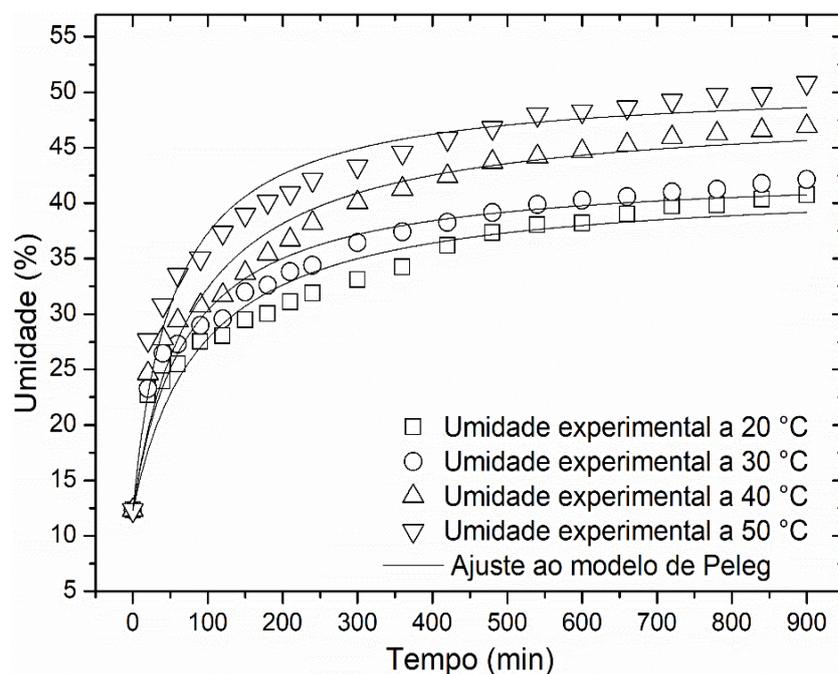


FIGURA 4.18 – AJUSTE DO MODELO DE PELEG PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.

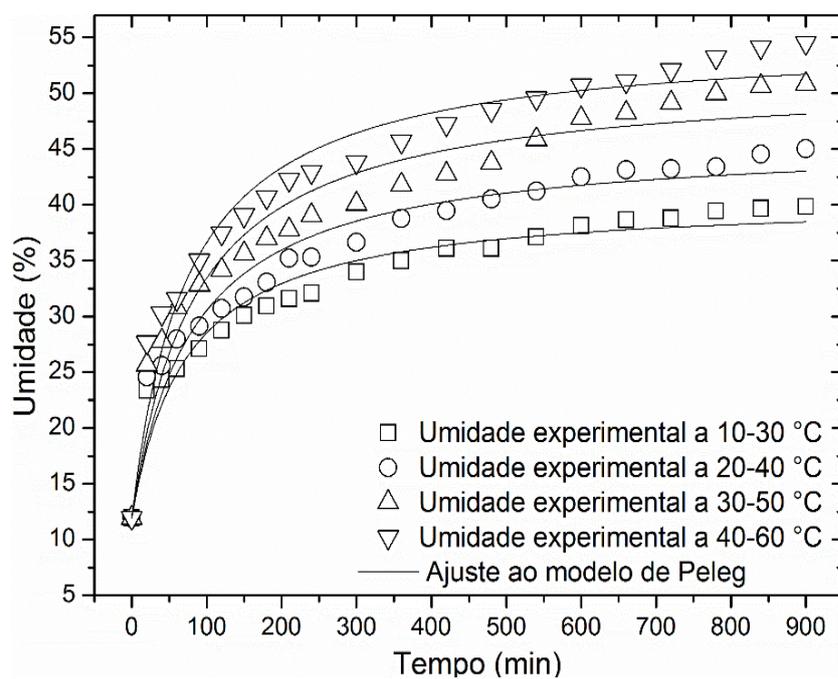
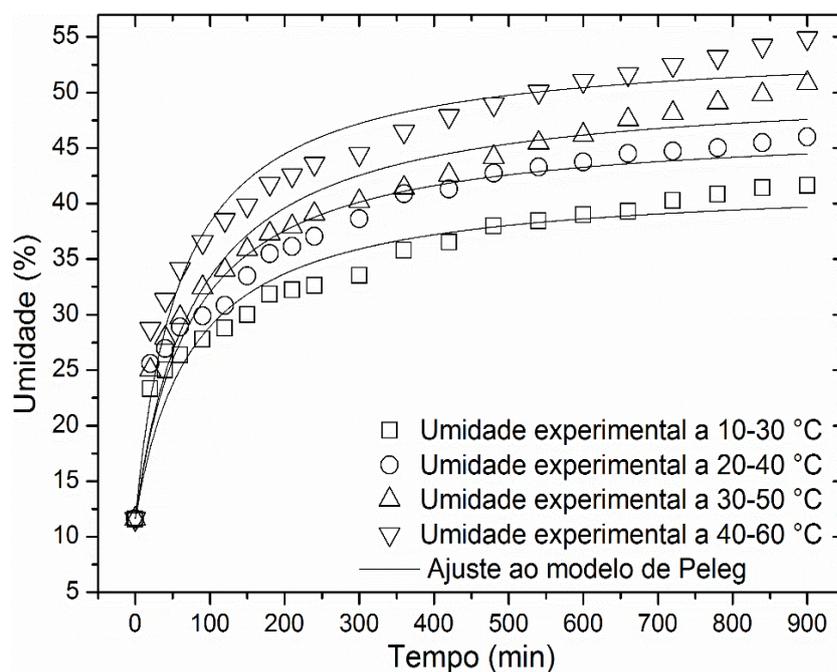


FIGURA 4.19 – AJUSTE DO MODELO DE PELEG PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.



O ajuste do modelo de Peleg aos dados experimentais teve um comportamento satisfatório perante a etapa de absorção de água para os dois cultivares de triticales. Mediante a avaliação do modelo de Peleg foi possível obter os parâmetros (k_1 e k_2) que confirmam a importância dessas constantes para a qualidade de predição do modelo, visto que os erros de k_1 e k_2 resultaram em valores inferiores aos seus respectivos parâmetros (TABELA 4.5).

TABELA 4.5 – PARÂMETROS E ERROS OBTIDOS PARA O MODELO DE PELEG NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE HIDRATAÇÃO.

Operação	Temperatura (°C)	Cultivar IPR 111				Cultivar IPR Aimoré			
		k_1 (min $^{-1}$)	Erro k_1	k_2 (% $^{-1}$) ($\times 10^{-2}$)	Erro k_2 ($\times 10^{-2}$)	k_1 (min $^{-1}$)	Erro k_1	k_2 (% $^{-1}$) ($\times 10^{-2}$)	Erro k_2 ($\times 10^{-2}$)
Isotérmica	20 °C	2,95	0,24	3,57	0,08	3,09	0,37	3,37	0,12
	30 °C	2,61	0,27	3,38	0,09	2,29	0,24	3,30	0,08
	40 °C	2,51	0,22	2,79	0,07	2,24	0,23	2,75	0,07
	50 °C	1,95	0,17	2,50	0,05	1,61	0,14	2,60	0,05
Periódica	10-30 °C	2,55	0,30	3,49	0,11	2,49	0,31	3,29	0,11
	20-40 °C	2,43	0,28	2,95	0,09	2,09	0,24	2,79	0,08
	30-50 °C	2,12	0,26	2,53	0,08	2,04	0,23	2,55	0,08
	40-60 °C	1,73	0,18	2,32	0,06	1,41	0,16	2,34	0,06

O modelo de Peleg além de possibilitar a descrição dos processos hidrotérmicos dos grãos, também promove a compreensão do processo de hidratação através dos seus parâmetros (k_1 e k_2), visto que os parâmetros do modelo são considerados sensíveis à variação da temperatura (Maskan, 2002; Botelho et al. 2010; Mattioda; Jorge; Jorge, 2019^{a,b}).

O parâmetro k_1 do modelo de Peleg por ser considerado inversamente proporcional ao ganho de umidade teve uma redução em seu valor com o aumento da temperatura para ambos os cultivares. Com isso, o aumento da temperatura de hidratação promoveu uma maior absorção de umidade pelo grão (TABELA 4.5) (Peleg, 1988; Turhan; Sayar; Gunasekaran, 2002). Esse comportamento também foi observado em estudos de hidratação para os grãos de milho (Botelho et al. 2013; Marques; Jorge; Jorge, 2016), soja (Fracasso et al. 2015; Borges; Jorge; Jorge, 2017), feijão e grão-de bico (Shafei; Mosoumi; Roshan, 2016), lentilha (Oroian, 2017), cevada (Borsato et al. 2019) e trigo (Mattioda; Jorge; Jorge, 2019^a).

Segundo os valores do parâmetro k_1 , a aplicação da operação periódica teve as maiores taxas de absorção de água para os grãos de triticale quando comparado com as suas respectivas isotérmicas (TABELA 4.5). Para o cultivar IPR 111, o parâmetro k_1 teve um aumento na taxa de absorção de água de 15,74%, 7,41%, 18,32% e 13,04% para o processo periódico nas condições de 10-30 °C, 20-40 °C, 30-50 °C e 40-60 °C, respectivamente. Igualmente, o cultivar IPR Aimoré também constatou maior taxa de absorção de água para a operação periódica, para esse cultivar, o k_1 foi 24,20% (10-30 °C), 9,67% (20-40 °C), 9,71% (30-50 °C) e 14,30% (40-60 °C) mais eficiente quando comparado às suas isotérmicas.

O estudo da modelagem matemática a partir do ajuste do modelo de Peleg, para a operação periódica foi avaliada para grãos de cevada (Chacón; Jorge; Jorge, 2019) e trigo (Mattioda; Jorge; Jorge, 2019^b). Para os grãos de cevada, segundo os autores, o parâmetro k_1 obtido para a operação periódica não teve diferença significativa em relação a sua isotérmica. No entanto, a periódica com amplitude 7,5 °C e período de 30 min ($k_1=0,89 \text{ h}^{-1}$) em torno da isotérmica a 20 °C ($k_1=1,42 \text{ h}^{-1}$) teve a maior taxa de absorção de água, segundo o parâmetro do modelo k_1 . Na intensificação do processo de hidratação para grãos de trigo, segundo os autores, todas as modulações de temperatura (amplitudes 10 °C e 17 °C com período de 22 min, amplitudes de 10 °C e 20 °C com períodos de 30 min e

40 min, em relação as isotérmicas de 22 °C, 30 °C e 40 °C, respectivamente) apresentaram maiores taxas de absorção de água, segundo o parâmetro k_1 .

O parâmetro k_2 por ser considerado inversamente proporcional a umidade final obtida pelo grão, permitiu observar que a elevação da temperatura possibilitou atingir as maiores umidades ao final do processo de hidratação para os dois cultivares (TABELA 4.5). Esse comportamento também foi observado para o estudo isotérmico de grão-de-bico e feijão (Shafei; Mosoumi; Roshan, 2016) e trigo (Maskan, 2002; Mattioda; Jorge; Jorge, 2019^a). Além disso, constatou-se que a utilização da modulação contínua da temperatura possibilitou atingir valores maiores para a umidade final em relação a sua isotérmica. Para o cultivar IPR 111, segundo o parâmetro k_2 o aumento na umidade final foi de 2,30%, 14,50%, 10,28% e 7,76% para o processo periódico nas condições de 10-30 °C, 20-40 °C, 30-50 °C e 40-60 °C, respectivamente. Igualmente, o cultivar IPR Aimoré também teve maior umidade final para a operação periódica, o qual k_2 foi 2,43% (10-30 °C), 18,30% (20-40 °C), 7,84% (30-50 °C) e 11,11% (40-60 °C) maior quando comparado com as umidades finais obtidas nas hidratações isotérmicas.

Segundo Chacón, Jorge e Jorge (2019), com base no parâmetro k_2 obtido utilizando o ajuste do modelo de Peleg, a hidratação periódica para grãos de cevada, mediante amplitude de 15 °C e período de 30 min, a partir da isotérmica a 20 °C, conseguiu atingir uma umidade de 40% em menos de 4 horas de processo resultando em uma economia maior que 80% no tempo de hidratação. Esse fato, constatado pelo parâmetro k_2 oportuniza entender que a utilização da operação periódica assegura reduzir o tempo de hidratação dos grãos para alcançar uma determinada umidade equivalente ao processo isotérmico.

4.6.2. Ajuste do Modelo de Difusão

Diante dos dados experimentais obtidos ao longo da hidratação isotérmica e periódica, para os cultivares de triticale (IPR 111 e IPR Aimoré) foi ajustado o modelo fenomenológico de Difusão (FIGURAS 4.20, 4.21, 4.22 e 4.23).

FIGURA 4.20 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

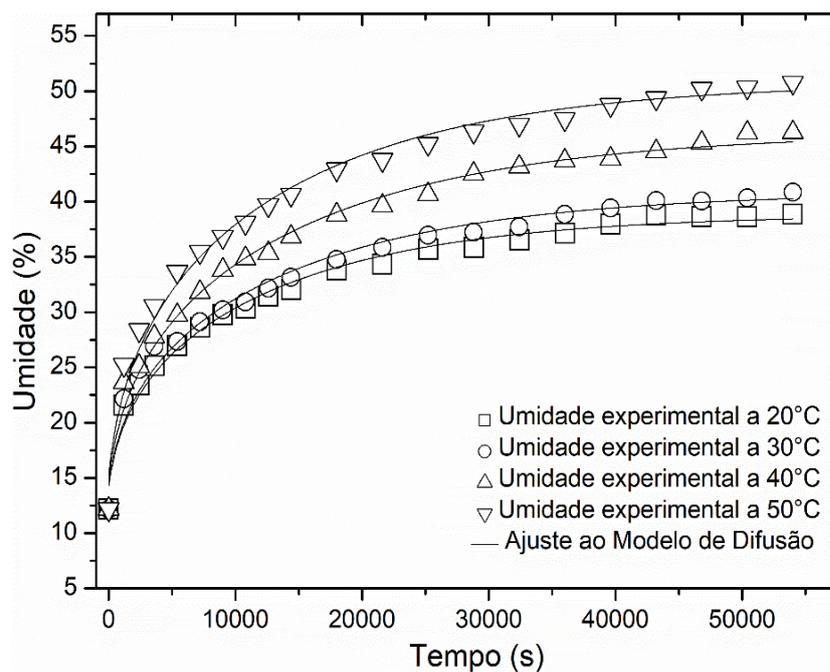


FIGURA 4.21 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

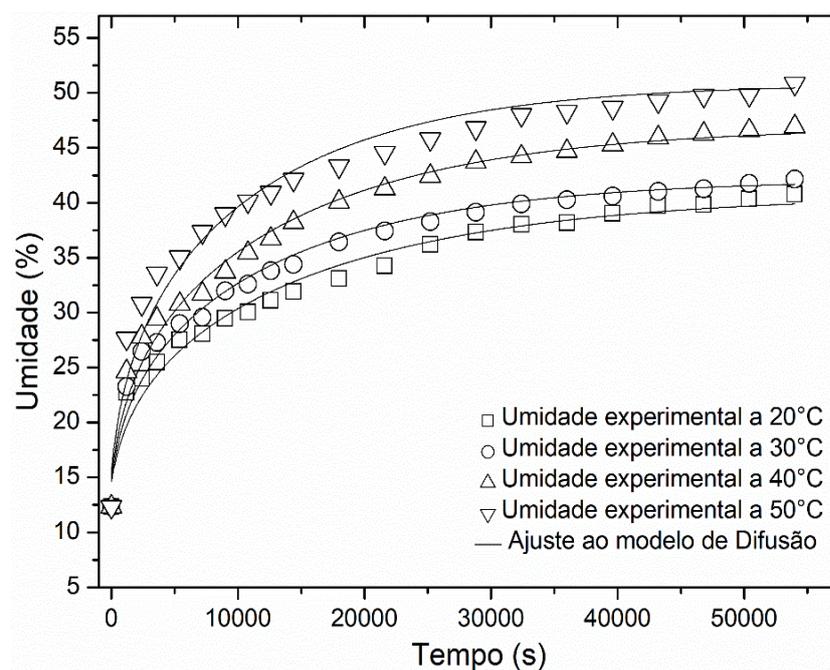


FIGURA 4.22 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.

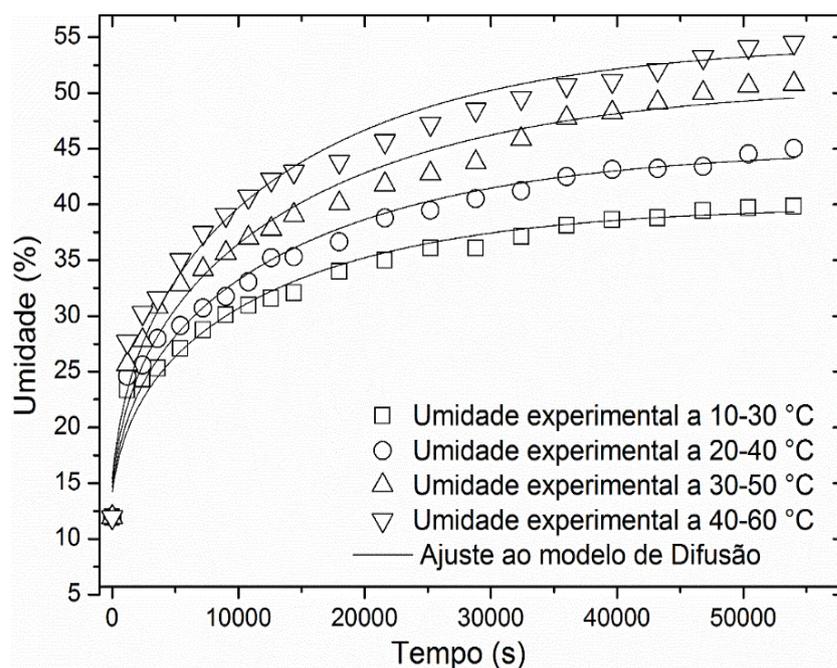
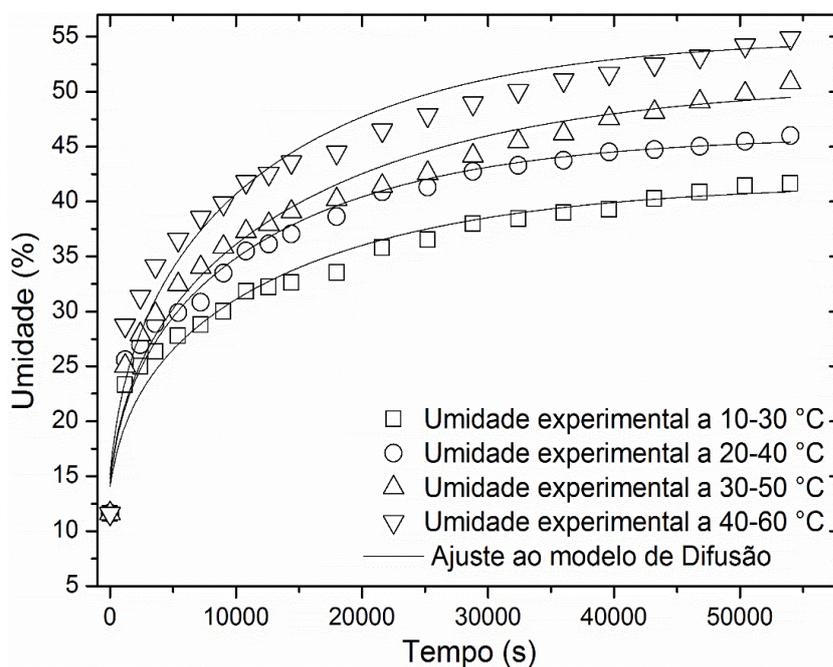


FIGURA 4.23 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.



O ajuste do modelo de Difusão aos dados experimentais teve um comportamento satisfatório perante a etapa de absorção da água para os cultivares de triticale, tanto no processo isotérmico quanto no periódico. Mediante a avaliação do modelo de Difusão foi possível obter o parâmetro único do modelo (D_{ef}), para cada ensaio explorado. Além disso, o modelo de Difusão confirma a importância do parâmetro de difusividade efetiva predito, visto que o erro do parâmetro teve valores inferiores ao seu respectivo parâmetro (TABELA 4.6).

TABELA 4.6 – PARÂMETROS E ERROS OBTIDOS PARA O MODELO DE DIFUSÃO NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE HIDRATAÇÃO.

Operação	Temperatura (°C)	Cultivar IPR 111		Cultivar IPR Aimoré	
		Def (10 ⁻¹¹ m ² s ⁻¹)	Erro (10 ⁻¹¹ m ² s ⁻¹)	Def (10 ⁻¹¹ m ² s ⁻¹)	Erro (10 ⁻¹¹ m ² s ⁻¹)
Isotérmica	20 °C	2,76	0,11	2,39	0,12
	30 °C	2,88	0,13	2,93	0,14
	40 °C	2,98	0,10	3,06	0,13
	50 °C	3,22	0,12	3,28	0,19
Periódica	10-30 °C	2,92	0,15	2,80	0,16
	20-40 °C	3,02	0,15	3,14	0,16
	30-50 °C	3,12	0,17	3,21	0,15
	40-60 °C	3,41	0,17	3,80	0,23

O modelo de Difusão além de descrever os processos hidrotérmicos, permite a compreensão do mecanismo de transferência de massa, visto que o seu parâmetro tem significado físico do processo. Segundo Miano e Augusto (2018), o parâmetro da difusividade presente no modelo proposto por Crank (1975) trata-se de um coeficiente de difusão geral (D_{ef}), que considera todos os tipos de fenômenos de transferência de massa que englobam a operação de hidratação.

O coeficiente de difusividade efetiva (D_{ef}) apresentou um aumento com a elevação da temperatura de hidratação (TABELA 4.6). Além disso, a intensificação do processo a partir da operação periódica permitiu obter maiores valores para a taxa de difusividade efetiva em comparação com as suas respectivas isotérmicas. A sensibilidade do parâmetro da difusividade em função do aumento da temperatura, também foi comumente observado em estudos de hidratação isotérmica considerando a geometria esférica para diferentes grãos, como grãos de bico (Prasad et al. 2010), trigo (Kashaninejad e Kashiri, 2008; Mattioda et al. 2018 e 2019^b); cevada (Montanuci et al. 2015; Chacón et al. 2019), lentilhas (Oroian, 2017), feijão mungo (Sharanagat et al. 2018), sorgo (Silva et al. 2019) e aveia (Anthero et al. 2019).

O estudo da modelagem matemática a partir do ajuste do modelo de Difusão para a operação periódica foi avaliado para grãos de trigo (Mattioda; Jorge; Jorge, 2018) e cevada (Chacón; Jorge; Jorge, 2019). Para a hidratação em grãos de trigo, os autores afirmaram que a D_{ef} na hidratação periódica só foi satisfatória com aplicação de uma amplitude de 20 °C e período de 40 min. Segundo os autores, a

amplitude de 10 °C e o período de 30 min tiveram resultados para a D_{ef} semelhantes à sua isotérmica (Mattioda; Jorge; Jorge, 2018). Para o estudo de hidratação periódica em grãos de cevada, os valores de D_{ef} foram maiores quando comparados a hidratação isotérmica, contudo não apresentaram diferença estatística significativa entre os parâmetros (Chacón; Jorge; Jorge, 2019).

Com o intuito de avaliar a intensificação da hidratação do triticale, um comparativo entre os processos isotérmico e periódico foi levado em consideração a partir do parâmetro da D_{ef} . Para o cultivar IPR 111, os valores obtidos para D_{ef} tiveram aumento de 5,21%, 4,60%, 4,55%, 5,71% com a aplicação da operação periódica mediante a modulação da temperatura de 10-30 °C, 20-40 °C, 30-50 °C e 40-60 °C, respectivamente. O cultivar IPR Aimoré também teve valores de D_{ef} maiores para o processo periódico em comparação as suas respectivas isotérmicas. Para esse cultivar, a difusividade efetiva da água foi de 14,64% (10-30 °C), 6,60% (20-40 °C), 4,58% (30-50 °C) e 13,90% (40-60 °C) maior.

4.6.3. Ajuste do Modelo de Omoto-Jorge

Diante dos dados experimentais obtidos ao longo da hidratação isotérmica e periódica dos cultivares IPR 111 e IPR Aimoré, o modelo fenomenológico de Omoto-Jorge foi ajustado (FIGURAS 4.24, 4.25, 4.26 e 4.27).

FIGURA 4.24 – AJUSTE DO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

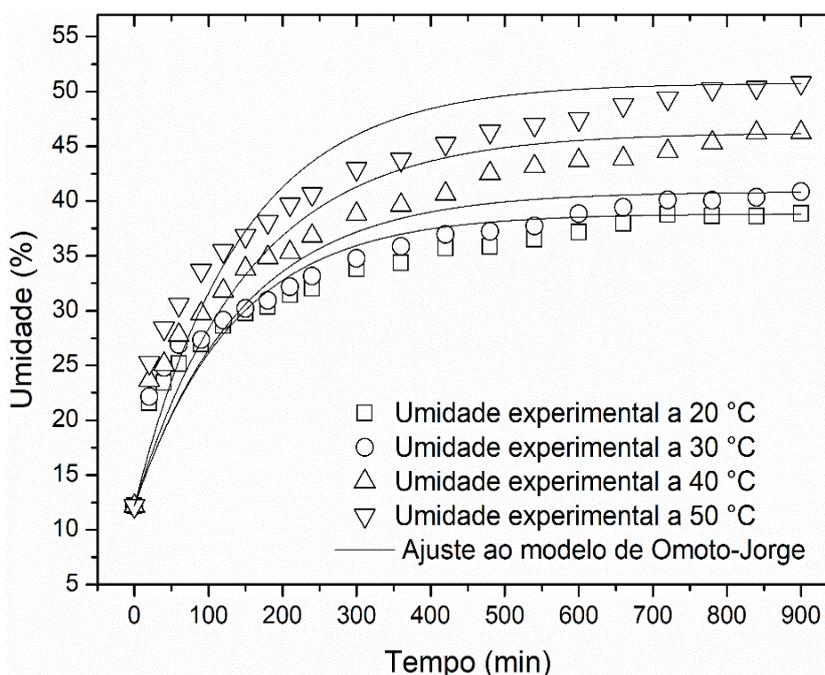


FIGURA 4.25 – AJUSTE DO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

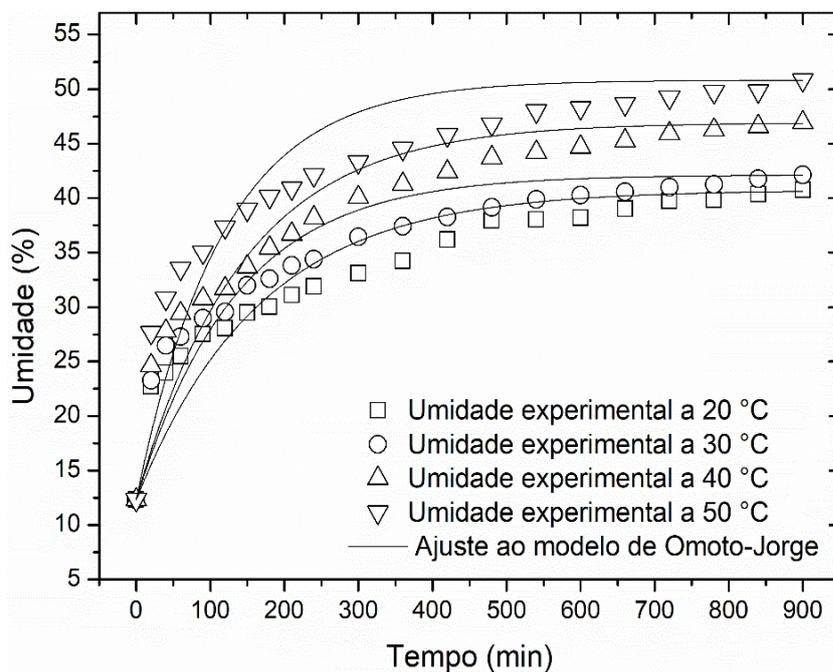


FIGURA 4.26 – AJUSTE DO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA O IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.

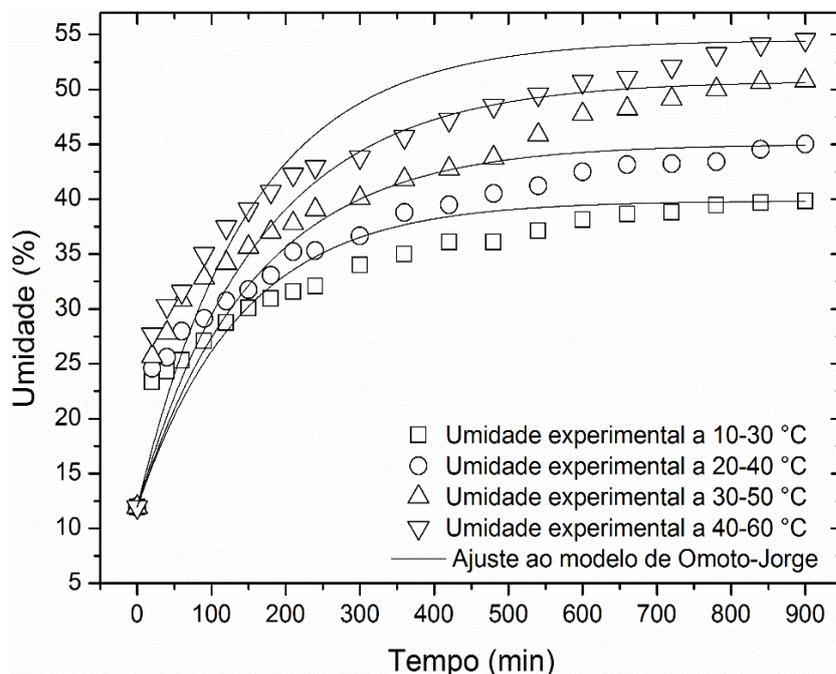
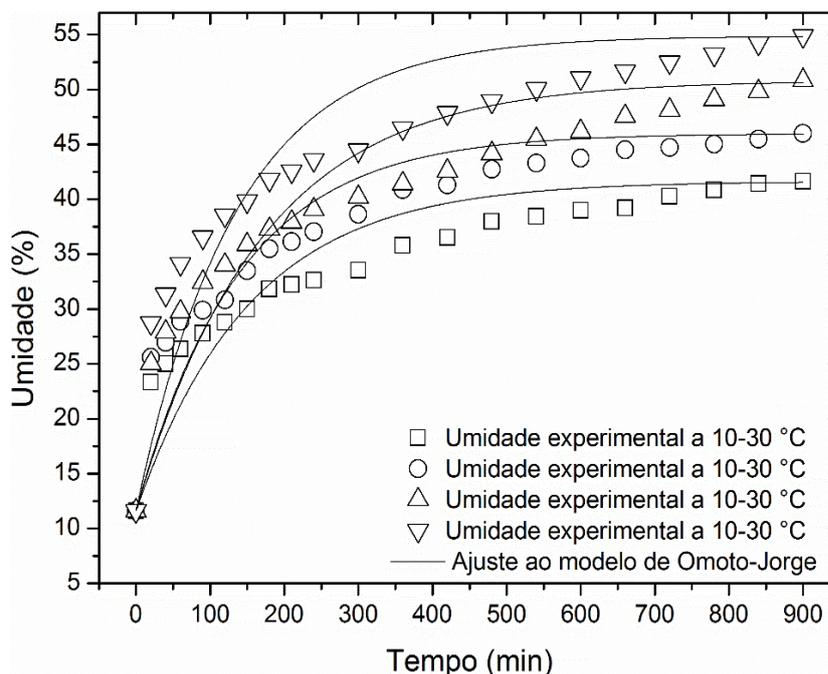


FIGURA 4.27 – AJUSTE DO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA O IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.



Mediante ao ajuste do modelo de Omoto-Jorge aos dados experimentais foi possível obter o parâmetro convectivo de transferência de massa (k_s), para cada condição experimental avaliada. O coeficiente convectivo de transferência de massa pode ser considerado predito na hidratação dos cultivares de triticale visto que o erro referente ao k_s teve valor inferior ao seu respectivo parâmetro (TABELA 4.7).

TABELA 4.7 – PARÂMETROS E ERROS OBTIDOS PARA O MODELO DE OMOTO-JORGE NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE HIDRATAÇÃO.

Operação	Temperatura (°C)	Cultivar IPR 111		Cultivar IPR Aimoré	
		k_s ($10^{-6}m^2 s^{-1}$)	Erro ($10^{-6}m^2 s^{-1}$)	k_s ($10^{-6}m^2 s^{-1}$)	Erro ($10^{-6}m^2 s^{-1}$)
Isotérmica	20 °C	4,02	0,35	4,07	0,38
	30 °C	4,33	0,41	4,45	0,42
	40 °C	4,50	0,37	4,71	0,42
	50 °C	5,33	0,47	5,83	0,62
Periódica	10-30 °C	4,06	0,40	4,40	0,43
	20-40 °C	4,39	0,42	4,86	0,47
	30-50 °C	4,79	0,40	5,16	0,52
	40-60 °C	5,36	0,53	5,90	0,65

O modelo fenomenológico de Omoto-Jorge avalia a cinética de hidratação mediante ao parâmetro do transporte convectivo de massa (k_s) presente no modelo, permitindo compreender a transferência de umidade durante o processo de hidratação. Conforme observado para grãos de ervilha (Omoto et al. 2009), arroz (Balbinoti; Jorge; Jorge, 2018^a), soja (Borges; Jorge; Jorge, 2017) e trigo (Mattioda; Jorge; Jorge 2019^a), o aumento da temperatura da hidratação proporcionou a elevação dos valores do parâmetro k_s de ambos os cultivares. Além disso, a operação periódica permitiu elevar o valor do parâmetro k_s quando comparado com as suas respectivas isotérmicas.

Até o presente momento Chácon, Jorge e Jorge (2019), ao hidratarem grãos de cevada foram os únicos pesquisadores que avaliaram o ajuste do modelo de Omoto-Jorge mediante a operação periódica. Segundo os autores, o parâmetro k_s obtido para a operação periódica com a utilização de período de 30 min e amplitude de 15 °C ($k_s = 0,55 \text{ cm h}^{-1}$) apresentou um aumento de 31% no transporte convectivo de massa para o interior do grãos ao ser comparado com o k_s obtido pela hidratação isotérmica a 20 °C ($k_s = 0,42 \text{ cm h}^{-1}$).

Para o cultivar IPR 111, o k_s teve um aumento na taxa de transferência de massa de 0,99%, 0,76%, 6,42% e 0,62% com a utilização da operação periódico nas temperaturas moduladas em 10-30 °C, 20-40 °C, 30-50 °C e 40-60 °C, respectivamente. O cultivar IPR Aimoré também teve valores de k_s maior no processo periódico em comparação ao isotérmico, para esse cultivar, a taxa convectiva de transferência de massa foi de 7,93% (10-30 °C), 9,31% (20-40 °C), 8,67% (30-50 °C) e 1,14% (40-60 °C) maior para a operação periódica.

4.6.4. Análise da Qualidade do Ajuste dos Modelos

Mediante ao ajuste dos modelos matemáticos (Peleg, Difusão e Omoto-Jorge) perante a cinética de hidratação dos grãos de triticale foi possível discutir os parâmetros de qualidade estatística dos dados preditos pelo modelo em relação aos dados experimentais. A qualidade dos modelos foi avaliada mediante aos níveis de ajuste observados estatisticamente pelo coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P) (EQUAÇÃO 3.9) e raiz quadrada média do erro ($RMSE$) (EQUAÇÃO 3.10) (TABELA 4.8).

Segundo Madamba, Driscoll e Buckle (1996), uma boa representação do fenômeno a ser estudado deve ter um coeficiente de determinação acima de 0,92. No entanto, os próprios autores relatam que apenas a utilização do coeficiente de determinação (R^2) como o único critério de avaliação para a seleção dos modelos matemáticos, não constitui uma boa representatividade dos fenômenos. Logo, para o refino do estudo foi levado em consideração o erro médio relativo (P) abaixo de 10% (Madamba, 2003; Mohapatra e Rao, 2005; Shafaei; Masoumi; Roshan, 2016) e a raiz quadrada média do erro ($RMSE$) abaixo de 5% (Resio; Aguerre; Suárez, 2003).

A qualidade estatística dos modelos avaliados teve um bom ajuste para ambos os cultivares de triticale, tanto na hidratação isotérmica quanto na hidratação periódica. Os modelos avaliados demonstraram ser preditos para os parâmetros P e $RMSE$, uma vez que para todas as condições experimentais propostas, as respostas ficaram abaixo de 10% para erro médio relativo e abaixo de 5% para raiz quadrada média do erro (TABELA 4.8). No entanto, para o coeficiente de determinação apenas o modelo empírico de Peleg e fenomenológico de Difusão foram considerados satisfatórios, visto que o modelo de Omoto-Jorge teve R^2 para todas as condições hidrotérmicas abaixo de 0,90 (TABELA 4.8), sugerindo que esse modelo estatisticamente segundo R^2 não apresenta uma representatividade satisfatória para o processo de hidratação dos cultivares de triticale nas condições hidrotérmicas avaliadas.

TABELA 4.8 – PARÂMETROS DE QUALIDADE OBTIDOS PARA OS MODELOS DE PELEG, DIFUSÃO E OMOTO-JORGE NOS DIFERENTES PROCESSOS DE HIDRATAÇÃO.

Modelo de Peleg							
Operação	Temperatura (°C)	Cultivar IPR 111			Cultivar IPR Aimoré		
		P (%)	RMSE (%)	R ² (-)	P (%)	RMSE (%)	R ² (-)
Isotérmica	20 °C	2,88	1,32	0,969	4,58	2,10	0,939
	30 °C	4,01	1,84	0,956	3,72	1,71	0,957
	40 °C	3,90	1,79	0,968	3,92	1,80	0,956
	50 °C	3,81	1,75	0,969	3,70	1,70	0,963
Periódica	10-30 °C	3,92	1,80	0,944	4,61	2,11	0,933
	20-40 °C	4,48	2,05	0,942	4,37	2,00	0,944
	30-50 °C	5,41	2,48	0,936	4,65	2,13	0,947
	40-60 °C	4,55	2,09	0,953	4,41	2,04	0,948
Modelo de Difusão							
Operação	Temperatura (°C)	Cultivar IPR 111			Cultivar IPR Aimoré		
		P (%)	RMSE (%)	R ² (-)	P (%)	RMSE (%)	R ² (-)
Isotérmica	20 °C	2,22	1,02	0,986	3,54	1,62	0,975
	30 °C	2,86	1,32	0,980	3,22	1,47	0,979
	40 °C	2,62	1,20	0,988	2,89	1,32	0,983
	50 °C	2,81	1,29	0,986	4,09	1,88	0,968
Periódica	10-30 °C	3,52	1,61	0,972	3,91	1,79	0,966
	20-40 °C	3,60	1,65	0,974	3,52	1,61	0,974
	30-50 °C	4,68	2,14	0,969	4,60	2,10	0,972
	40-60 °C	4,36	1,99	0,974	5,24	2,40	0,960
Modelo de Omoto-Jorge							
Operação	Temperatura (°C)	Cultivar IPR 111			Cultivar IPR Aimoré		
		P (%)	RMSE (%)	R ² (-)	P (%)	RMSE (%)	R ² (-)
Isotérmica	20 °C	5,98	2,74	0,892	7,04	3,23	0,853
	30 °C	7,11	3,26	0,861	6,66	3,05	0,861
	40 °C	7,28	3,33	0,895	6,58	3,02	0,881
	50 °C	8,59	3,94	0,882	7,84	3,59	0,840
Periódica	10-30 °C	6,83	3,13	0,844	7,78	3,57	0,817
	20-40 °C	7,65	3,50	0,843	7,12	3,26	0,856
	30-50 °C	8,79	4,21	0,823	8,60	3,90	0,827
	40-60 °C	9,62	4,41	0,837	9,62	4,41	0,797

Visto que o modelo fenomenológico de Difusão teve os melhores resultados frente a qualidade estatística para os parâmetros avaliados (R^2 , P e $RMSE$), associado ao fato de que contém apenas um parâmetro (difusividade efetiva) em sua equação, esse modelo foi escolhido para ser generalizado.

4.7. AVALIAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO

Os modelos generalizados têm como intuito fornecer informações sobre a umidade dos grãos durante o processo de hidratação em função do tempo e da temperatura, sem há necessidade da realização de novos experimentos, desde que os modelos generalizados sejam aplicados dentro da faixa de temperatura avaliada.

Os valores encontrados para o parâmetro do modelo de Difusão (D_{ef}) tiveram uma dependência da temperatura de hidratação (TABELA 4.6). Com isso, a Equação de Arrhenius (EQUAÇÃO 3.8) foi utilizada para descrever o efeito da temperatura de hidratação nos coeficientes de Difusão do triticales (EQUAÇÕES 4.1, 4.2, 4.3 e 4.4) com coeficiente de determinação acima de 0,96 (TABELA 4.9).

TABELA 4.9 – DEPENDÊNCIA DO PARÂMETRO DO MODELO DE DIFUSÃO (D_{ef}) COM A TEMPERATURA DE HIDRATAÇÃO, POR MEIO DA EQUAÇÃO DE ARRHENIUS.

Cultivar	Operação	Parâmetro	Equação	R^2
IPR	Isotérmica	D_{ef}	$D_{ef} = 9,88.10^{-5} \exp\left(-\frac{35,83}{RT}\right)$ (4.1)	0,994
111	Periódica		$D_{ef} = 5,48.10^{-5} \exp\left(-\frac{36,63}{RT}\right)$ (4.2)	0,972
IPR	Isotérmica		$D_{ef} = 8,50.10^{-4} \exp\left(-\frac{46,41}{RT}\right)$ (4.3)	0,958
Aimoré	Periódica		$D_{ef} = 3,21.10^{-4} \exp\left(-\frac{41,36}{RT}\right)$ (4.4)	0,962

As equações obtidas da dependência da D_{ef} com a temperatura de hidratação (TABELA 4.9) foram substituídas no parâmetro D_{ef} presente na solução analítica do modelo de Difusão (EQUAÇÃO 2.4). Além disso, considerou-se a umidade de equilíbrio uma função linear da temperatura igual a $U_{eq} = 0,412T + 82,69$ (operação isotérmica) e $U_{eq} = 0,498T + 105,88$ (operação periódica) para o cultivar IPR 111, e $U_{eq} = 0,350T + 62,80$ (operação isotérmica) e $U_{eq} = 0,446T + 90,00$ (operação periódica) para o cultivar IPR Aimoré.

Com a aplicação dessas premissas foi estabelecido os modelos generalizados de Difusão para o cultivar IPR 111 referentes aos processos isotérmico (EQUAÇÃO 4.5) e periódico (EQUAÇÃO 4.6), e para o cultivar IPR Aimoré nos processos isotérmico (EQUAÇÃO 4.7) e periódico (EQUAÇÃO 4.8).

$$U(t, T) = (0,412T + 82,69) + (U_o - (0,412T - 82,69)) \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{9,88 \cdot 10^{-5} \exp\left(-\frac{35,83}{RT}\right) n^2 \pi^2 t}{rm^2}\right) \quad (4.5)$$

$$U(t, T) = (0,498T + 105,88) + (U_o - (0,498T - 105,88)) \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{5,48 \cdot 10^{-5} \exp\left(-\frac{36,63}{RT}\right) n^2 \pi^2 t}{rm^2}\right) \quad (4.6)$$

$$U(t, T) = (0,350T + 62,80) + (U_o - (0,350T - 62,80)) \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{8,50 \cdot 10^{-4} \exp\left(-\frac{46,41}{RT}\right) n^2 \pi^2 t}{rm^2}\right) \quad (4.7)$$

$$U(t, T) = (0,446T + 90,00) + (U_o - (0,446T - 90,00)) \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(\frac{3,21 \cdot 10^{-4} \exp\left(-\frac{41,36}{RT}\right) n^2 \pi^2 t}{rm^2}\right) \quad (4.8)$$

A energia de ativação (E_a) envolvida nos processos de hidratação resultou em 35,83 kJ mol⁻¹ e 36,63 kJ mol⁻¹ para o IPR 111 em condição isotérmica e periódica, respectivamente, e 46,41 kJ mol⁻¹ para a isotérmica e 41,36 kJ mol⁻¹ para a periódica referente ao cultivar IPR Aimoré. Estudos com o grão de milho (convencional e transgênico) (Marques; Jorge; Jorge, 2016) e cevada (Montanuci; Jorge; Jorge, 2013) também tiveram diferença para a energia de ativação em grãos de mesma espécie.

Os valores da energia de ativação para os processos de hidratação isotérmica e periódica foram menores que os observados para a hidratação da cevada (51,67 kJ mol⁻¹) (Montanuci et al. 2015), superior aos valores obtidos para a hidratação do grão de bico (22,6 kJ mol⁻¹) (Prasad et al. 2010), arroz (14,85 kJ mol⁻¹) (Balbinoti et al. 2018^a), aveia (17,9 kJ mol⁻¹) (Anthero et al. 2019) e próximos aos observados para o trigo (34,2 kJ mol⁻¹) (Kashaninejad e Kashiri, 2008), semente de bambara (33,02 kJ mol⁻¹) (Jideani e Mpotokana, 2009). A variação dos valores da energia de ativação está diretamente associada as características intrínsecas dos cereais e extrínsecas do sistema de hidratação (Montanuci; Jorge; Jorge, 2013; Mattioda; Jorge; Jorge, 2019^b).

Mattioda, Jorge e Jorge (2019^b) avaliaram o processo de hidratação isotérmica (temperaturas de 22, 30 e 40 °C) e periódica (amplitude de 10 °C em torno de cada temperatura isotérmica) para o trigo, e obtiveram valores para a energia de ativação de 8,50 kJ mol⁻¹ no processo isotérmico e 18,2 kJ mol⁻¹ no processo periódico, a partir da dependência do parâmetro D_{ef} com a temperatura. A energia de ativação encontrada em ambos os cultivares de triticale foi superior aos obtidos para o trigo, sugerindo que nas condições experimentais de hidratação

aplicadas no triticale, esse cereal necessita de mais energia de ativação para iniciar o processo de hidratação pelo mecanismo de difusão.

Os modelos de Difusão generalizados (EQUAÇÕES 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8) foram ajustados aos dados experimentais para avaliar sua predição (FIGURAS 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31).

FIGURA 4.28 – PREVISÃO DO AJUSTE DO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

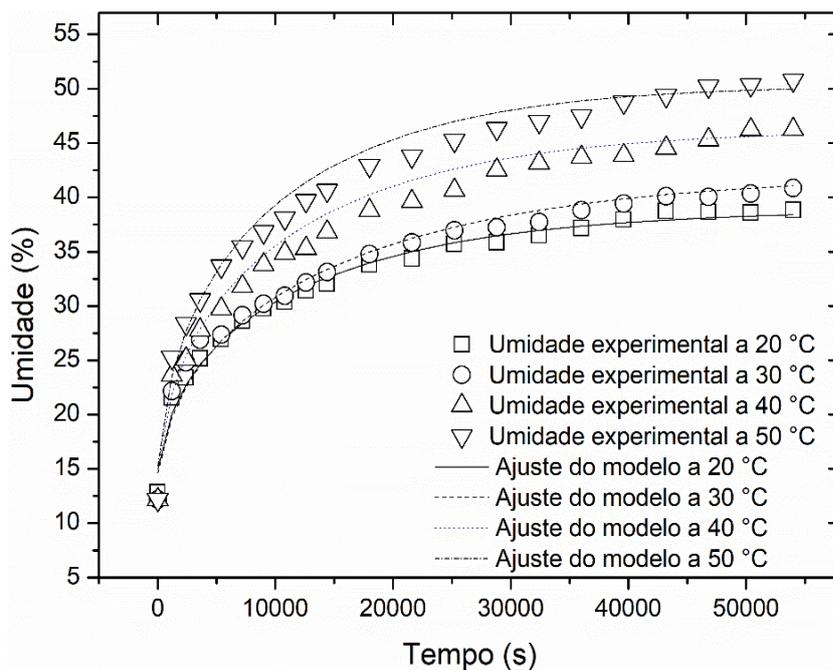


FIGURA 4.29 – PREVISÃO DO AJUSTE DO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

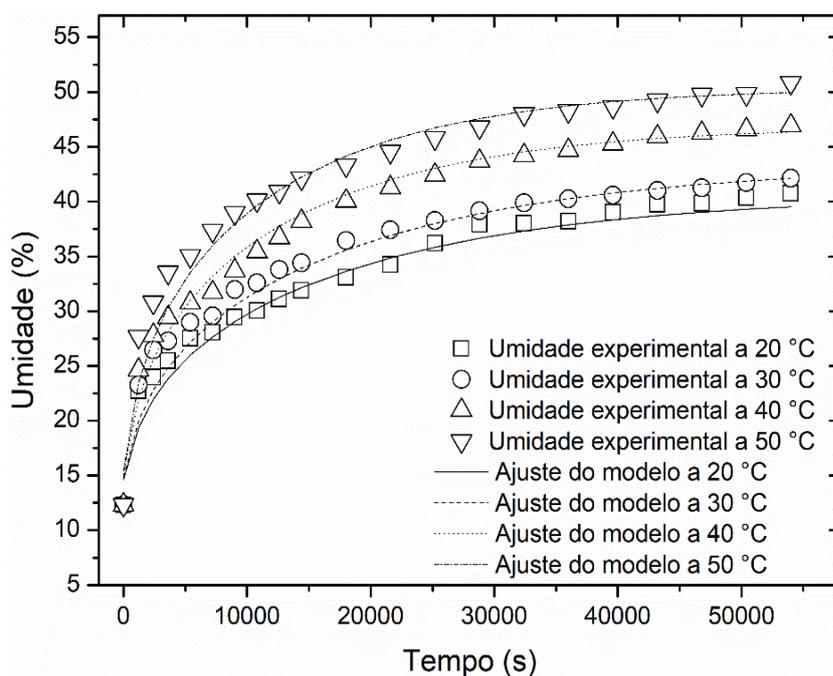


FIGURA 4.30 – PREVISÃO DO AJUSTE DO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.

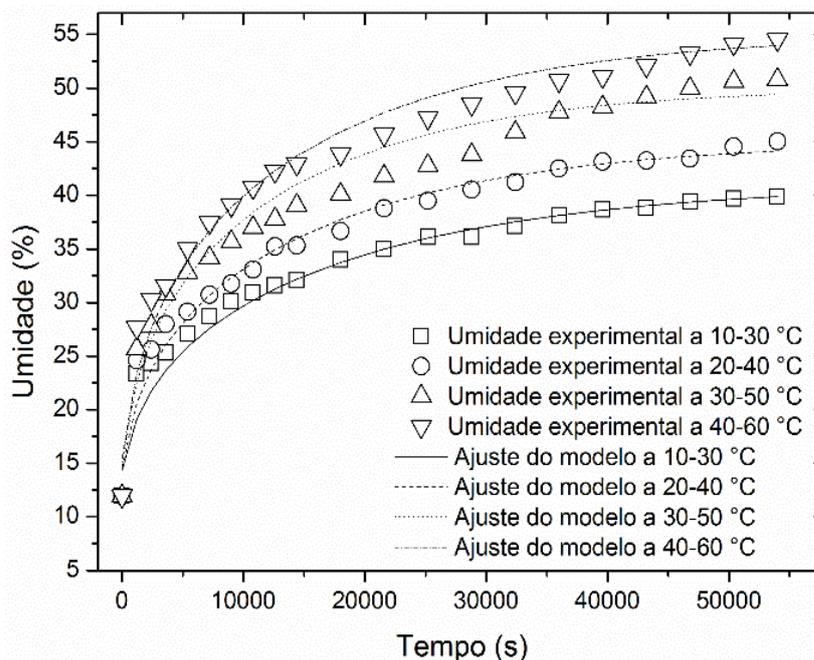
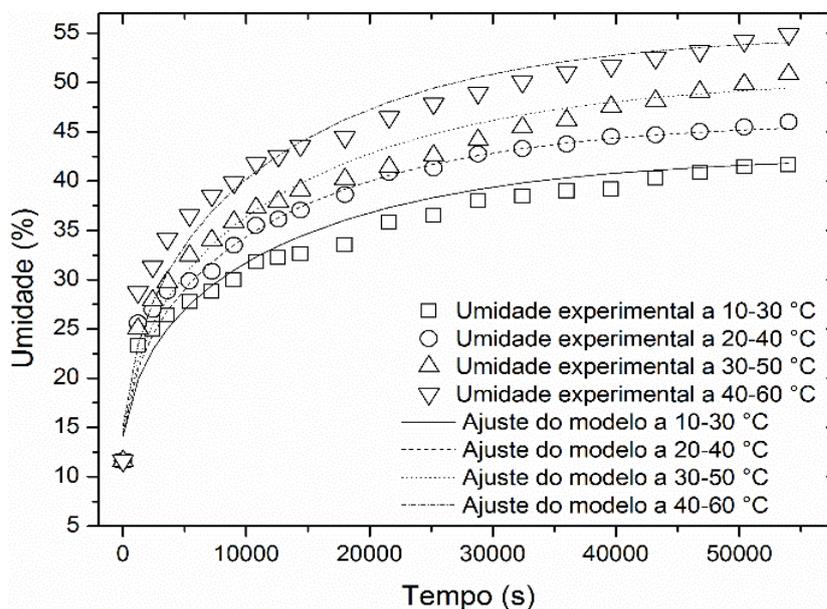


FIGURA 4.31 – PREVISÃO DO AJUSTE DO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.



O ajuste dos modelos de Difusão generalizados obtidos para os cultivares de triticale permitiram prever a umidade experimental para qualquer tempo durante o processo de hidratação tanto em condição isotérmica quanto em condição periódica, dentro da faixa das temperaturas investigadas, proporcionando um desvio máximo de 9% para o cultivar IPR 111 e 12% para o IPR Aimoré no processo de hidratação isotérmica, e um desvio máximo de 15% para ambos os cultivares no processo de hidratação periódica (FIGURAS 4.32, 4.33, 4.34 e 4.35).

FIGURA 4.32 – RELAÇÃO DOS VALORES DE UMIDADE EXPERIMENTAL COM OS PREVISTOS PELO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

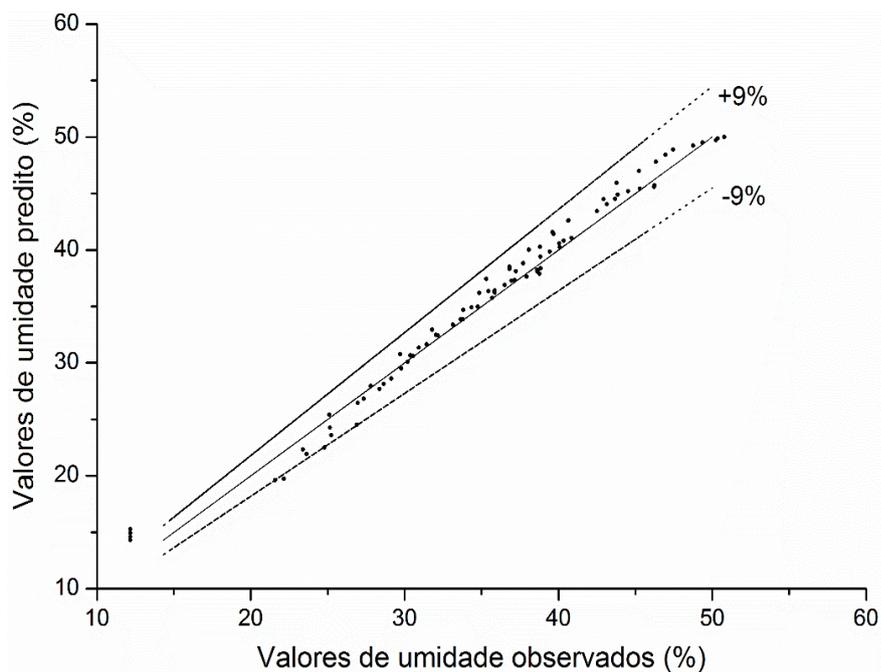


FIGURA 4.33 – RELAÇÃO DOS VALORES DE UMIDADE EXPERIMENTAL COM OS PREVISTOS PELO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA.

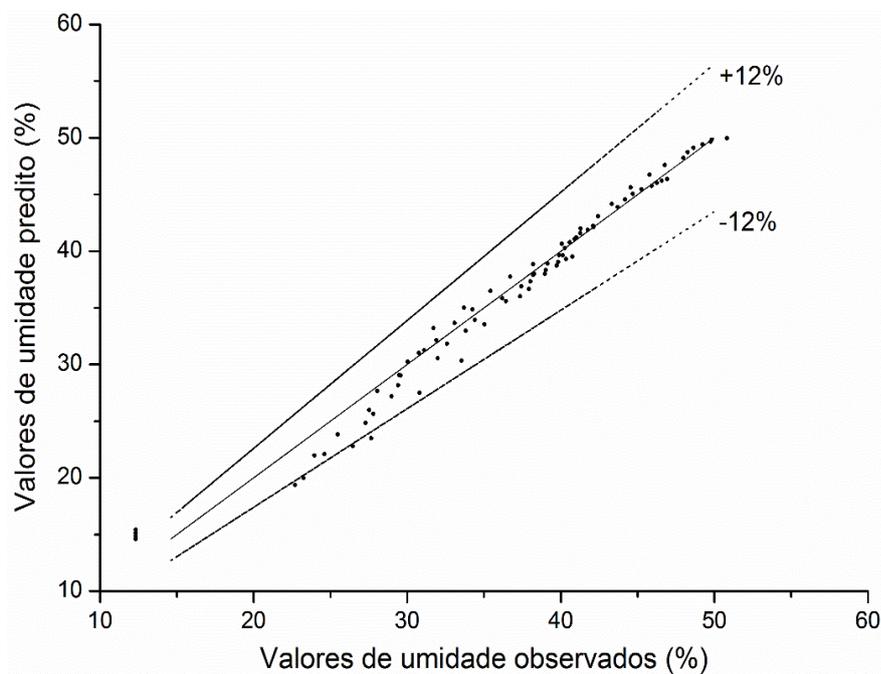


FIGURA 4.34 – RELAÇÃO DOS VALORES DE UMIDADE EXPERIMENTAL COM OS PREVISTOS PELO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.

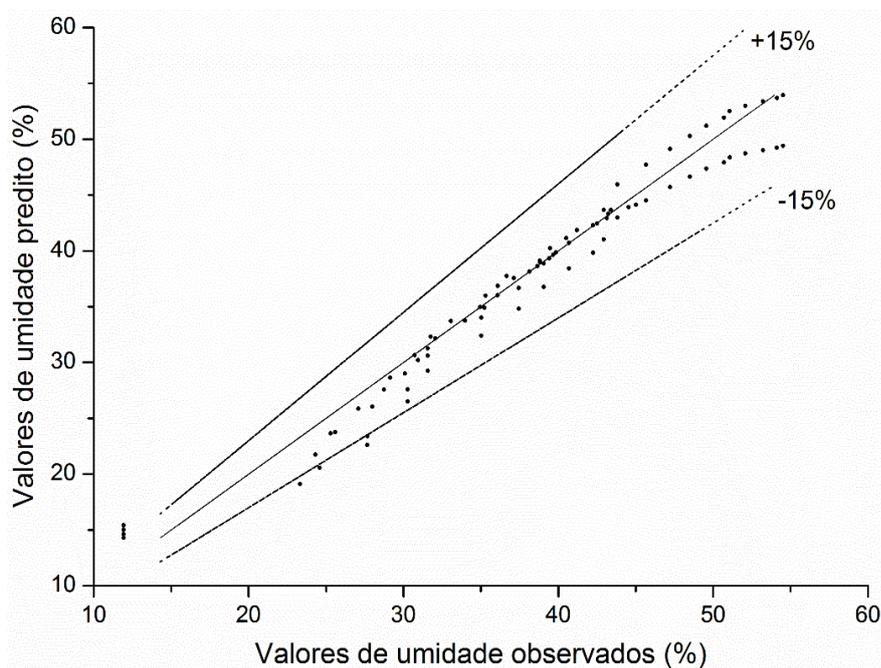
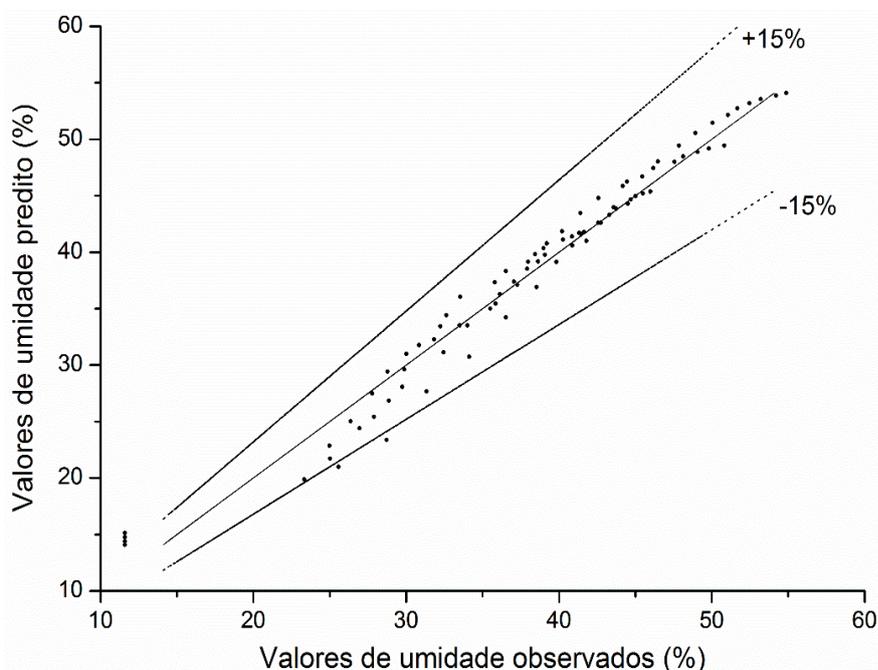


FIGURA 4.35 – RELAÇÃO DOS VALORES DE UMIDADE EXPERIMENTAL COM OS PREVISTOS PELO MODELO GENERALIZADO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR AIMORÉ EM CONDIÇÃO PERIÓDICA.



Ao comparar os modelos generalizados de Difusão em relação aos processos e cultivares, observa-se que o ajuste do modelo generalizado aos dados experimentais foi satisfatório (FIGURAS 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31). Esse fato pressuponha que os modelos generalizados de Difusão podem ser aplicados na

hidratação do triticale, como uma estimativa de tempo e temperatura de processo. Segundo Laurindo (2016), a difusividade representa a difusão do processo de hidratação em condições isotérmicas e isobáricas, o que pode ter desencadeado os maiores desvios no processo de hidratação periódica (15%) quando comparado ao processo isotérmico (média 10,5%). Mediante a avaliação dos ajustes dos modelos generalizados de Difusão (FIGURAS 4.28, 4.29, 4.30 e 4.31) foi possível discutir os parâmetros de qualidade estatística. A predição do modelo foi avaliada através dos níveis de ajuste observados estatisticamente pelo erro médio relativo (P) e raiz quadrada média do erro ($RMSE$) (TABELA 4.10).

TABELA 4.10 – PARÂMETROS DE QUALIDADE DO AJUSTE DOS MODELOS GENERALIZADO DE DIFUSÃO NAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE HIDRATAÇÃO.

Operação	Temperatura (°C)	IPR 111		IPR Aimoré	
		P (%)	$RMSE$ (%)	P (%)	$RMSE$ (%)
Isotérmica	20 °C	3,36	1,54	3,84	1,76
	30 °C				
	40 °C				
	50 °C				
Periódica	10-30 °C	4,14	1,85	4,54	2,07
	20-40 °C				
	30-50 °C				
	40-60 °C				

Tanto para os processos (isotérmico e periódico) quanto para os cultivares (IPR 111 e IPR Aimoré) o valor do P ficou compreendido entre 3,36 e 4,54% e o $RMSE$ entre 1,54 e 2,07%, sendo os melhores resultados referentes a qualidade do ajuste do modelo de Difusão generalizado obtidos para a hidratação isotérmica (TABELA 4.10). No entanto, todos os valores ficaram abaixo do sugerido por Resio, Aguerre e Suárez, (2003), Mohapatra e Rao, (2005) e Shafaei, Masoumi e Roshan, (2016) que relatam que o erro médio relativo e a raiz quadrada média do erro devem ficar abaixo de 10% e 5%, respectivamente, o que demonstra uma representatividade satisfatória do fenômeno de hidratação para o modelo generalizado de Difusão nas condições avaliadas.

4.8. PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS DO PROCESSO

A dependência do parâmetro da difusividade efetiva (D_{ef}) com a temperatura de hidratação permitiu obter a energia de ativação (E_a) dos processos isotérmico e periódico para os cultivares. Com os valores da E_a foi possível obter o conhecimento sobre as propriedades termodinâmicas do triticales, tais como: entalpia (ΔH) (EQUAÇÃO 3.11), entropia (ΔS) (EQUAÇÃO 3.12) e energia livre de Gibbs (ΔG) (EQUAÇÃO 3.13) (TABELA 4.11). Os dados referentes às propriedades termodinâmicas fornecem informações sobre a espontaneidade da reação e a energia absorvida ou liberada pelo processo (Oulahna et al. 2012).

TABELA 4.11 – ENERGIA DE ATIVAÇÃO E OS PARÂMETROS TERMODINÂMICOS DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA PARA OS CULTIVARES DE TRITICALE.

Cultivar	Operação	Temperatura (°C)	E_a^* (kJ mol ⁻¹)	ΔH (kJ mol ⁻¹)	ΔS (kJ mol ⁻¹ K ⁻¹)	ΔG (kJ mol ⁻¹)
IPR 111	Isotérmica	20 °C	35,83 ± 4,30	34,19	-0,322	128,65
		30 °C		34,11	-0,323	131,88
		40 °C		34,02	-0,323	135,10
		50 °C		33,94	-0,323	138,33
	Periódica	10-30 °C	36,63 ± 2,07	32,94	-0,326	128,60
		20-40 °C		32,88	-0,326	131,86
		30-50 °C		32,78	-0,327	135,13
		40-60 °C		32,69	-0,327	138,40
IPR Aimoré	Isotérmica	20 °C	46,41 ± 7,51	43,97	-0,292	129,67
		30 °C		43,89	-0,293	132,60
		40 °C		43,80	-0,293	135,52
		50 °C		43,72	-0,293	138,45
	Periódica	10-30 °C	41,36 ± 6,40	39,93	-0,303	128,92
		20-40 °C		39,84	-0,304	131,95
		30-50 °C		39,76	-0,304	134,98
		40-60 °C		39,68	-0,304	138,03

*Média ± desvio padrão.

Considerando que a energia de ativação está relacionada com a quantidade de energia mínima necessária para que as moléculas se reorganizem para dar início ao processo, observa-se que a diferença entre as operações (isotérmica e periódica) para um mesmo cultivar é pequena. No entanto, há uma diferença entre os cultivares, sendo que os valores mais baixos para o IPR 111 estabelecem uma

vantagem econômica considerável ao ser hidratado, uma vez que o cultivar IPR 111, segundo o valor da E_a , necessita de menos energia para que o processo ocorra.

A Entalpia (ΔH) está associada à E_a , e pode ser definida como o calor liberado ou absorvido durante a hidratação, sob pressão constante. Essa propriedade trata-se de uma grandeza física que mede a máxima energia das ligações, forças intermoleculares entre o solvente e a superfície do material e entre o solvente e as moléculas absorvidas em um processo termodinâmico na forma de calor (Oulahna et al. 2012; Montanuci; Jorge; Jorge, 2013). A entalpia na hidratação isotérmica e periódica do cultivar IPR 111 resultou nos valores médios de 34,05 e 32,83 kJ mol⁻¹, respectivamente. Enquanto o cultivar IPR Aimoré teve valores médios de 43,85 e 39,80 kJ mol⁻¹ para os processos isotérmicos e periódicos, respectivamente.

Os valores da entalpia indicam que a hidratação dos grãos de triticale está associada a transformações endotérmicas, ou seja, os grãos ganham calor durante a hidratação a fim de absorver a umidade e aumentar o volume, fenômeno também observado nos grãos de trigo (23,1 kJ mol⁻¹) (Mattioda et al. 2019^a). Em relação aos processos observa-se que a operação periódica necessita de menos energia na forma de calor para iniciar a hidratação, devido a maior rapidez na formação do complexo ativado (grão seco e água) para a obtenção do grão hidratado, sendo que essa rapidez na formação do complexo ativado constata-se mais expressivo para o cultivar IPR 111.

A variação da entropia (ΔS) permite avaliar o grau de desordem das moléculas de água no sistema, por meio da aleatoriedade do movimento das moléculas de água e o grau de interação destas com o grão (Mcminn e Magee, 2003; Oulahna et al. 2012). A entropia das operações isotérmica e periódica do IPR 111 resultou em valores médios de -0,323 e -0,327 kJ mol⁻¹ K⁻¹, respectivamente. O cultivar IPR Aimoré teve valores médios de -0,293 e -0,304 kJ mol⁻¹ K⁻¹, para os processos isotérmico e periódico, respectivamente. A baixa variação dos valores médios encontrados demonstra que a entropia do processo ocorre sem um aumento significativo na desordem, fenômeno também observado em sementes de bambara (-0,89 kJ mol⁻¹ K⁻¹) (Jideani e Mpotokana, 2009), arroz (-0,41 kJ mol⁻¹ K⁻¹) (Balbinoti et al. 2018^a), aveia (-0,20 kJ mol⁻¹ K⁻¹) (Anthero et al. 2019) e (-0,17 kJ mol⁻¹ K⁻¹) trigo (Mattioda et al. 2019^a).

Considerando que a entropia está relacionada com a espontaneidade de algum processo físico ou químico, para que os grãos absorvam maior quantidade de água, há a necessidade da ação de um agente externo, como por exemplo, o aumento da temperatura. O efeito térmico faz com que as moléculas de água se liguem as partículas do grão durante a absorção que ao saturar-se, perde-se o movimento rotacional das moléculas de água, reduzindo assim a entropia (desordem) conforme os grãos vão atingindo a umidade de equilíbrio (Aviara; Ajibola; Oni, 2004).

A energia livre de Gibbs (ΔG) trata-se de uma grandeza relacionada as mudanças ocorridas nas propriedades termodinâmicas de entalpia e entropia, referente a espontaneidade da reação. A ΔG das operações isotérmica e periódica teve o valor médio de $133,49 \text{ kJ mol}^{-1}$, para o cultivar IPR 111. Enquanto o cultivar IPR Aimoré logrou o valor médio de $134,06 \text{ kJ mol}^{-1}$ para a operação isotérmica e $133,47 \text{ kJ mol}^{-1}$ para a operação periódica.

Como a energia livre de Gibbs trata-se do trabalho máximo (força motriz do processo) realizado durante a hidratação, o qual depende da quantidade de calor absorvido (entalpia) e da aleatoriedade do sistema (entropia), o processo de hidratação do triticales pode ser considerado não é espontâneo (Jideani e Mpotokwana, 2009; Oulahna et al. 2012; Shafaei; Masoumi; Roshan, 2016). Esse fenômeno também observado em estudos envolvendo sementes de bambara ($68,49 \text{ kJ mol}^{-1}$) (Jideani e Mpotokana, 2009), arroz ($113,5 \text{ kJ mol}^{-1}$) (Balbinoti et al. 2018^a), aveia ($41,08 \text{ kJ mol}^{-1}$) (Anthero et al. 2019) e trigo ($77,72 \text{ kJ mol}^{-1}$) (Mattioda et al. 2019^a).

4.9. INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA E DO TEMPO DE HIDRATAÇÃO NA GERMINAÇÃO DOS CULTIVARES

Com o intuito de avaliar as melhores condições de hidratação para o processo de germinação e conseqüentemente produção de malte de triticales, os cultivares foram observados a partir de dois indicadores: a energia de germinação (EG) (EQUAÇÃO 3.14) (TABELA 4.12) e o índice de germinação (IG) (EQUAÇÃO 3.15) (TABELA 4.13).

TABELA 4.12 – VALORES PARA A ENERGIA DE GERMINAÇÃO NAS TRÊS FASES DE HIDRATAÇÃO DOS CULTIVARES, EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA.

Operação	Temperatura °C	IPR 111			IPR Aimoré		
		EG (%)* Fase I	EG (%)* Fase II	EG (%)* Fase III	EG (%)* Fase I	EG (%)* Fase II	EG (%)* Fase III
Isotérmica	20	91,3 ± 1,5	99,3 ± 1,7	97,0 ± 1,7	89,0 ± 3,6	94,3 ± 0,6	96,0 ± 1,0
	30	92,0 ± 3,0	98,7 ± 1,5	96,3 ± 2,1	85,7 ± 4,95	93,3 ± 0,6	92,7 ± 3,2
	40	91,3 ± 1,2	90,3 ± 3,5	89,3 ± 3,1	92,3 ± 1,15	91,7 ± 4,7	77,7 ± 1,2
	50	0	0	0	0	0	0
Periódica	10-30	95,7 ± 2,0	99,7 ± 0,6	98,7 ± 1,5	91,0 ± 2,0	94,3 ± 0,6	97,7 ± 0,6
	20-40	90,3 ± 3,6	86,3 ± 2,1	86,7 ± 3,1	88,3 ± 0,6	77,7 ± 1,2	83,0 ± 5,2
	30-50	47,7 ± 4,7	0	0	8,7 ± 1,5	0	0
	40-60	0	0	0	0	0	0

*Média ± desvio padrão.

TABELA 4.13 – VALORES PARA O ÍNDICE DE GERMINAÇÃO NAS TRÊS FASES DE HIDRATAÇÃO DOS CULTIVARES, EM CONDIÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA.

Operação	Temperatura °C	IPR 111			IPR Aimoré		
		IG (%)* Fase I	IG (%)* Fase II	IG (%)* Fase III	IG (%)* Fase I	IG (%)* Fase II	IG (%)* Fase III
Isotérmica	20	7,03 ± 0,1	8,55 ± 0,4	8,64 ± 0,1	6,94 ± 0,2	8,16 ± 0,2	8,11 ± 0,1
	30	6,85 ± 0,3	8,09 ± 0,3	8,23 ± 0,2	6,78 ± 0,2	7,74 ± 0,2	7,58 ± 0,1
	40	8,00 ± 0,3	7,93 ± 0,2	6,36 ± 0,2	6,37 ± 0,2	6,96 ± 0,2	5,13 ± 0,1
	50	0	0	0	0	0	0
Periódica	10-30	7,59 ± 0,2	9,05 ± 0,4	9,0 ± 0,1	7,14 ± 0,3	8,71 ± 0,22	8,83 ± 0,1
	20-40	5,94 ± 0,4	5,71 ± 0,1	5,46 ± 0,1	5,55 ± 0,1	5,16 ± 0,1	5,06 ± 0,1
	30-50	3,65 ± 0,1	0	0	3,33 ± 0,1	0	0
	40-60	0	0	0	0	0	0

*Média ± desvio padrão.

A partir dos resultados da energia de germinação (EG) (TABELA 4.12) e do índice de germinação (IG) (TABELA 4.13) ficou evidente que a temperatura de hidratação influenciou diretamente no processo germinativo dos cultivares. Mesmo que as altas temperaturas tenham as melhores taxas de absorção de água (FIGURAS 4.5, 4.6, 4.7 e 4.8), essas condições térmicas não são aconselhadas para o processo de germinação dos cultivares de triticale, visto que as hidratações isotérmica a 50 °C e as periódicas de 30-50 °C e 40-60 °C não expressaram valores de germinação mínima suficiente para a produção de malte. Os níveis de temperatura mais altos (50 °C e 40-60 °C) não apresentaram o desenvolvimento do embrião em nenhuma das fases de hidratação (Fases I, II e III).

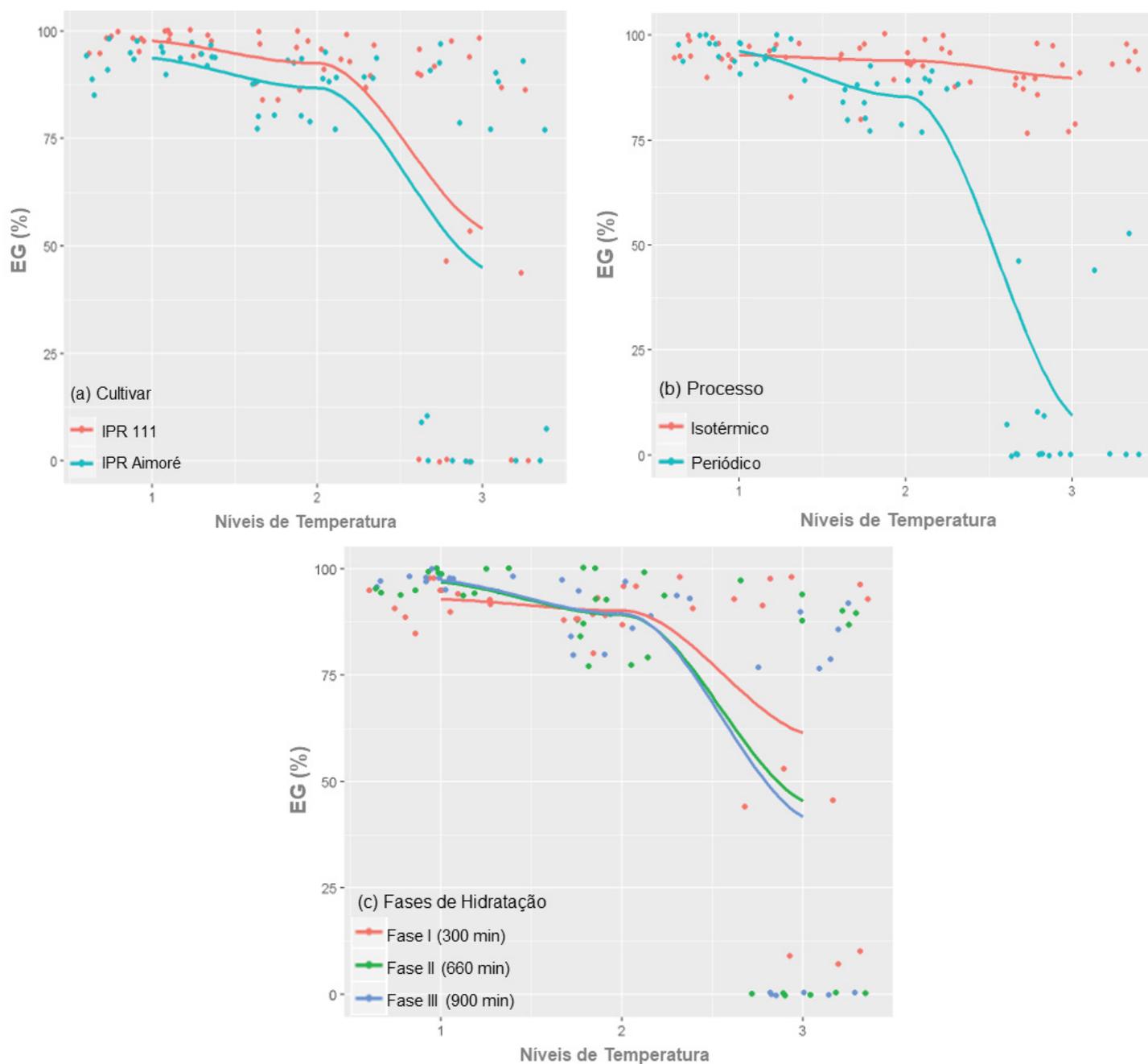
A difusão da água para o interior do grão quando hidratado tende a ser maior com o aumento da temperatura. No entanto, a elevação muito acentuada da temperatura de hidratação pode comprometer a integridade física e química do grão afetando de forma negativa na germinação. As altas condições térmicas ocasionam o ganho de água demasiado e o inchamento dos grânulos de amido de forma acelerada, propiciando o rompimento do pericarpo que modifica os aspectos morfológicos e bioquímicos do grão, oportunizando o não desenvolvimento do embrião (Chavan e Kadan, 1989; Khazaei e Mohammadi, 2009). O inchamento dos grânulos de amido com a presença de rachaduras superficiais, bem como a gelatinização do amido de triticales foram observados no presente estudo a partir das imagens obtidas via MEV, nas condições experimentais com as temperaturas de hidratação mais elevadas (FIGURAS 4.13 e 4.14).

A germinação está relacionada com o tempo e a velocidade de desenvolvimento do embrião, através de uma sequência ordenada de atividades metabólicas, inicializadas a partir do processo de hidratação. Logo, os valores obtidos na EG e no IG demonstram que as condições de hidratação mais apropriadas para a germinação dos cultivares são as temperaturas de hidratação de 20 °C, 30 °C e 40 °C na operação isotérmica e com a modulação da temperatura de hidratação em 10-30 °C e 20-40 °C na operação periódica, para as três fases avaliadas (TABELAS 4.12 e 4.13).

No presente estudo, muitas combinações entre as variáveis (temperatura, fase, cultivar e processo) tiveram as condições mínimas de germinação exigida pela indústria cervejeira ($\leq 95\%$ de germinação) para a produção de malte. Além disso, estudos envolvendo a germinação do triticales levam em consideração as condições ótimas de tempo, umidade e temperatura de outros cereais, como por exemplo as condições da cevada. Logo, com o intuito de observar o comportamento dos dados coletados para encontrar a melhor condição de hidratação para a germinação do triticales, as condições hidrotérmicas foram avaliadas mediante uma análise exploratória. No entanto, as temperaturas com os níveis mais altos, 50 °C (isotérmica) e 40-60 °C (periódica) foram removidos do estudo exploratório, visto que nestas condições não houve o desenvolvimento do embrião (TABELAS 4.12 e 4.13).

Para tal, foi realizado um levantamento do efeito das variáveis (cultivares, processos, fases e temperaturas), na reposta energia de germinação (EG) (FIGURA 4.36 (a), (b) e (c)).

FIGURA 4.36 – ANÁLISE DO EFEITO DAS TEMPERATURAS DE HIDRATAÇÃO SOBRE: (a) CULTIVARES, (b) PROCESSOS, E (c) FASES, NA ENERGIA DE GERMINAÇÃO.



Legenda: 1 = menor nível de temperatura (20 °C isotérmica e 10-30 °C periódica); 2 = nível intermediário de temperatura (30 °C isotérmica e 20-40 °C periódica); 3 = maior nível de temperatura (40 °C isotérmica e 30-50 °C periódica).

O eixo das ordenadas (FIGURA 4.36 (a), (b) e (c)) representa os valores obtidos para a energia de germinação (EG). A parte inferior, no eixo das abcissas, representa os níveis das temperaturas utilizadas em cada processo (isotérmico e periódico), sendo o nível 1 a temperatura de 20 °C na hidratação isotérmica e a 10-30 °C na hidratação periódica, o nível 2 representa 30 °C na condição isotérmica

e 20-40 °C na condição periódica, o nível 3 expõe 40 °C na isotérmica e 30-50 °C na periódica.

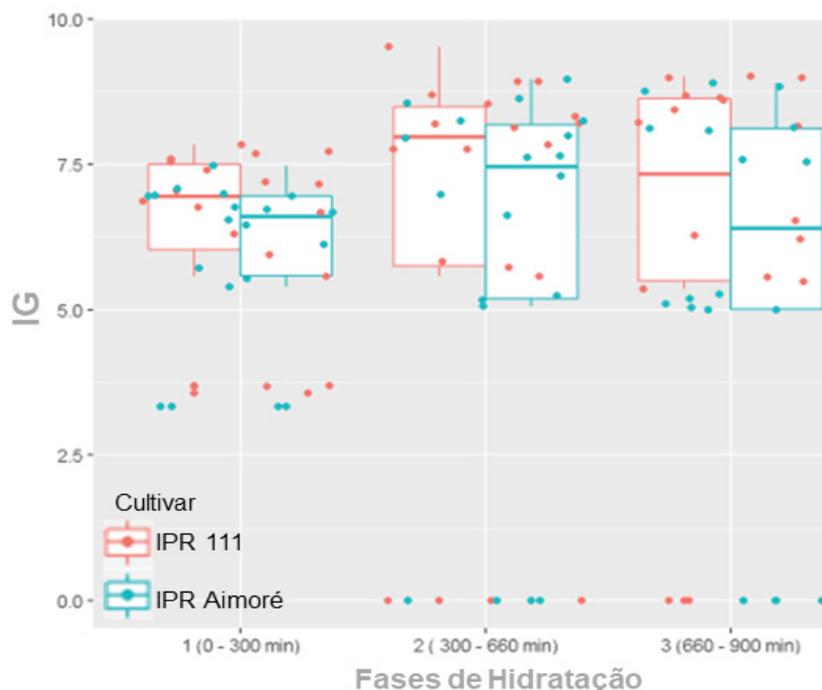
As linhas de tendência (FIGURA 4.36 (a), (b) e (c)) demonstram que o efeito dos cultivares sobre a temperatura foi constante, ou seja, para todas as temperaturas avaliadas o comportamento foi equivalente. No entanto, a análise de variância considerou significativas as interações de segunda ordem entre processos-temperatura e fases-temperatura para a EG, sendo que o efeito da temperatura varia de acordo com a fase e o processo de hidratação em que os grãos se encontram (FIGURA 4.36 (a), (b) e (c)).

A análise gráfica demonstrou que os cultivares tem comportamento semelhantes para o mesmo nível de temperatura, havendo uma redução na EG com o aumento da temperatura (FIGURA 4.36 (a)). O aumento da temperatura demonstra um efeito negativo mais acentuado para o processo periódico com a utilização do maior nível da temperatura (30-50 °C), uma vez que o processo isotérmico gerou valores relativamente constantes segundo a linha de tendência (FIGURA 4.36 (b)). No caso das fases de hidratação, a temperatura mais baixa (nível 1) tiveram os valores mais altos para EG, sendo que as Fases II e III apresentaram o melhor desempenho de germinação em comparação com a Fase I (FIGURA 4.36 (c)).

O teste t de Student rejeitou a hipótese de igualdade entre as médias das Fases I-II e Fases I-III para o nível 1 de temperatura. Para as Fases II-III, o teste t de Student não rejeitou a hipótese de igualdade, ou seja, as médias gerais nas Fases II e III foram consideradas sem diferença significativa para o nível 1 de temperatura. Com isso, considerando os efeitos observados, os melhores resultados médios para a EG foram relacionados a qualquer cultivar (IPR 111 e IPR Aimoré) nas Fases II ou III, com a temperatura da água de hidratação no menor nível (20 °C (isotérmico) ou 10-30 °C (periódico)).

Para o IG, a análise de variância demonstrou serem significativas as interações de terceira ordem entre: cultivar-processo-temperatura e fase-processo-temperatura. A partir da resposta IG, os cultivares demonstraram comportamento análogo para os processos de hidratação, sendo o IPR 111, o cultivar que apresentou os resultados de germinação mais apropriados, em qualquer processo, para as Fases II ou III (FIGURA 4.37).

FIGURA 4.37 – EFEITO DOS CULTIVARES SOBRE AS DIFERENTES FASES DE HIDRATAÇÃO PARA O ÍNDICE DE GERMINAÇÃO.



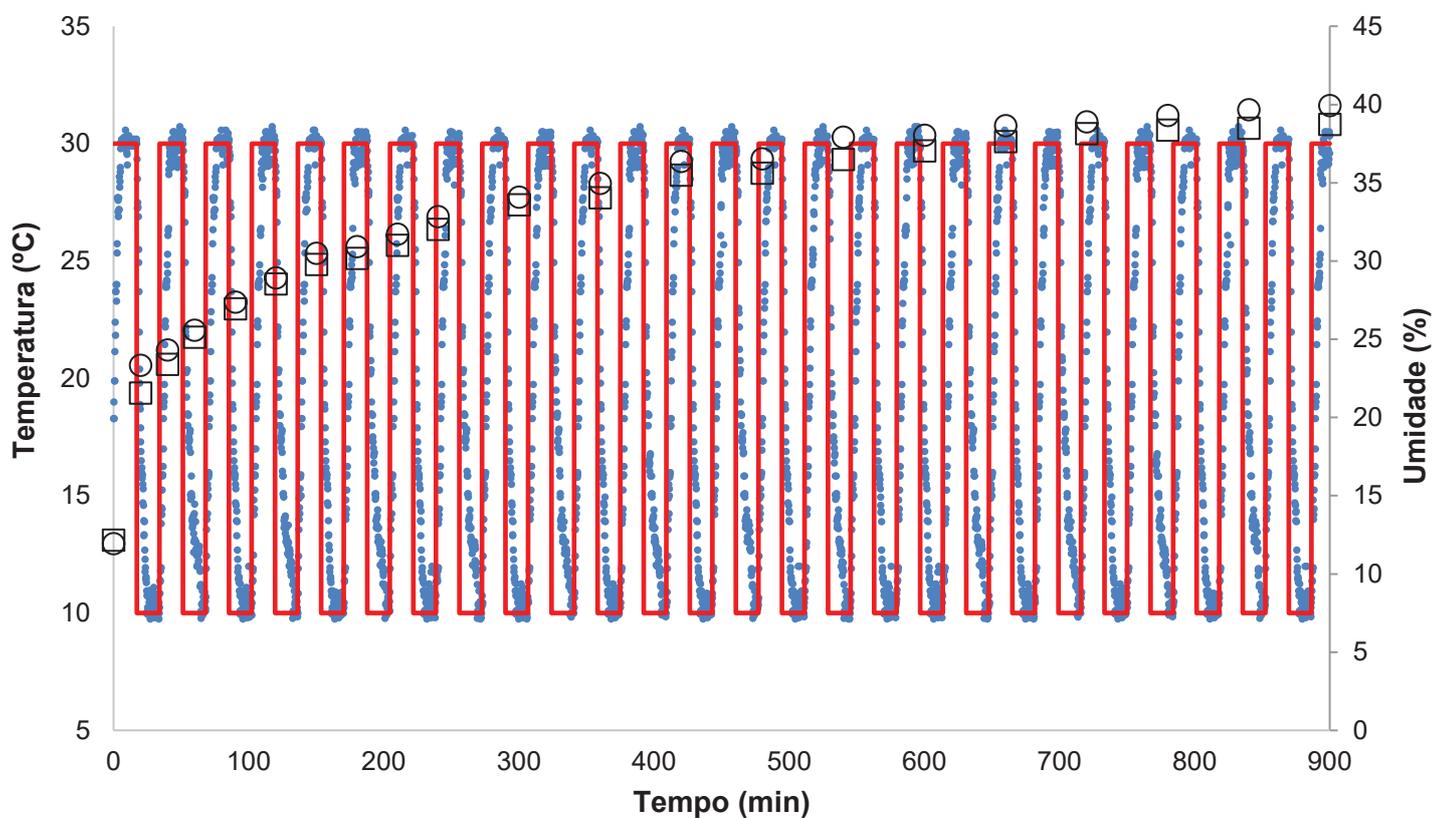
A partir da avaliação conduzida com o software R e considerando o nível de significância de 5%, uma vez que para a produção de malte cervejeiro o processo de germinação das plântulas deve ser no mínimo de 95%, as variáveis com as melhores tendências nas respostas EG e IG foram: o cultivar IPR 111, hidratados tanto na operação isotérmica quanto na periódica, no nível 1 de temperatura (20 °C ou 10-30 °C), na Fase II (660 min) ou na Fase III (900 min).

4.10. AVALIAÇÃO DA MELHOR CONDIÇÃO DA OPERAÇÃO PERIÓDICA

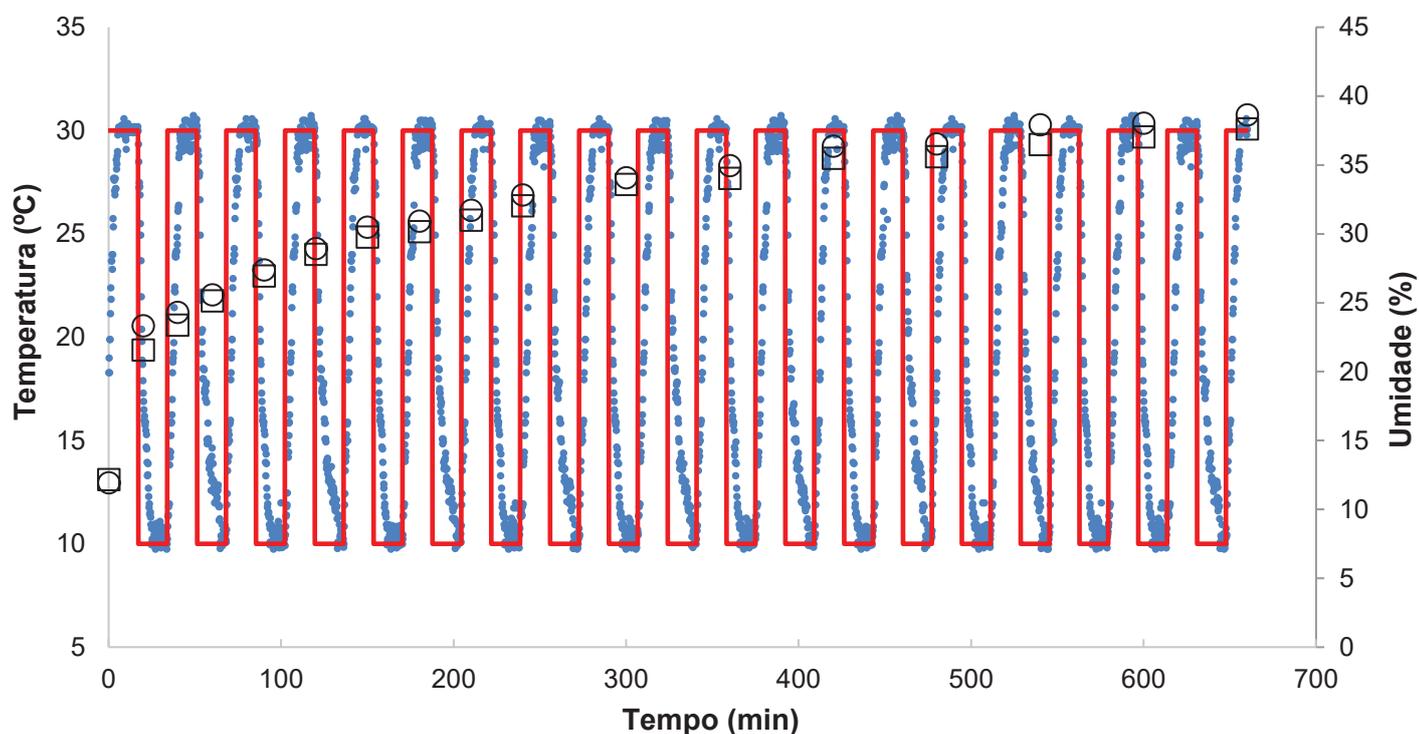
A influência da hidratação na germinação dos cultivares de triticale constataram que é possível reduzir o tempo hidratação para um mesmo processo (isotérmico (20 °C) ou periódico (10-30 °C)) em 240 min, uma vez que não houve diferença significativa nos resultados referentes a germinação do triticale (EG e IG) para as Fases II (660 min) e III (900 min). Essa constatação é de suma importância, já que não há estudos que disponibilizem uma condição ideal de temperatura e tempo adequados para a germinação do triticale durante a hidratação.

A redução no tempo de hidratação de 900 min para 660 min (FIGURA 4.38 (a) e (b)) para a germinação do triticale acarreta uma economia de aproximadamente 27% no tempo total de hidratação, e conseqüentemente no consumo energético requerido.

FIGURA 4.38 – MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DE HIDRATAÇÃO DOS GRÃOS E COMPARAÇÃO DO GANHO DE UMIDADE ENTRE OS PROCESSOS ISOTÉRMICO (20 °C) E PERIÓDICO (10-30 °C) PARA O CULTIVAR IPR 111: (a) 900 MIN E (b) 660 MIN.



(a) • Tamostra (°C) — Tbanhos (°C) □ Uexp I20 (%) ○ Uexp P30-A10 (%)



(b) • Tamostra (°C) — Tbanhos (°C) □ Uexp I20 (%) ○ Uexp P30-A10 (%)

A facilidade de germinação do triticale com umidade abaixo de 38% verificada em 660 min de hidratação (FIGURA 4.38 (b)) ressalta a importância desse cereal para a produção de malte, visto que o grão de cevada durante a etapa de hidratação necessita de umidades compreendidas entre 42 e 48% para obter a sua máxima germinação (Briggs, 1998; Beleti; Duarte; Georg-Kraemer, 2012). Segundo Montanuci, Jorge e Jorge (2015), a cevada necessitou no mínimo 14 h de hidratação à 20 °C para obter uma germinação adequada, enquanto para o triticale foram necessários 11 h de hidratação. Chacón, Jorge e Jorge (2019) obtiveram valores de EG próximo a 90% ao hidratar grãos de cevada à 20 °C por 12 h, para o triticale foram necessários apenas 5 h de hidratação para atingir resultados na faixa de 90% de EG (TABELA 4.12). Os resultados encontrados na germinação do triticale demonstram a importância desse cereal para a otimização de processo na produção de grãos germinados, visto sua facilidade de germinação em menores tempos de hidratação.

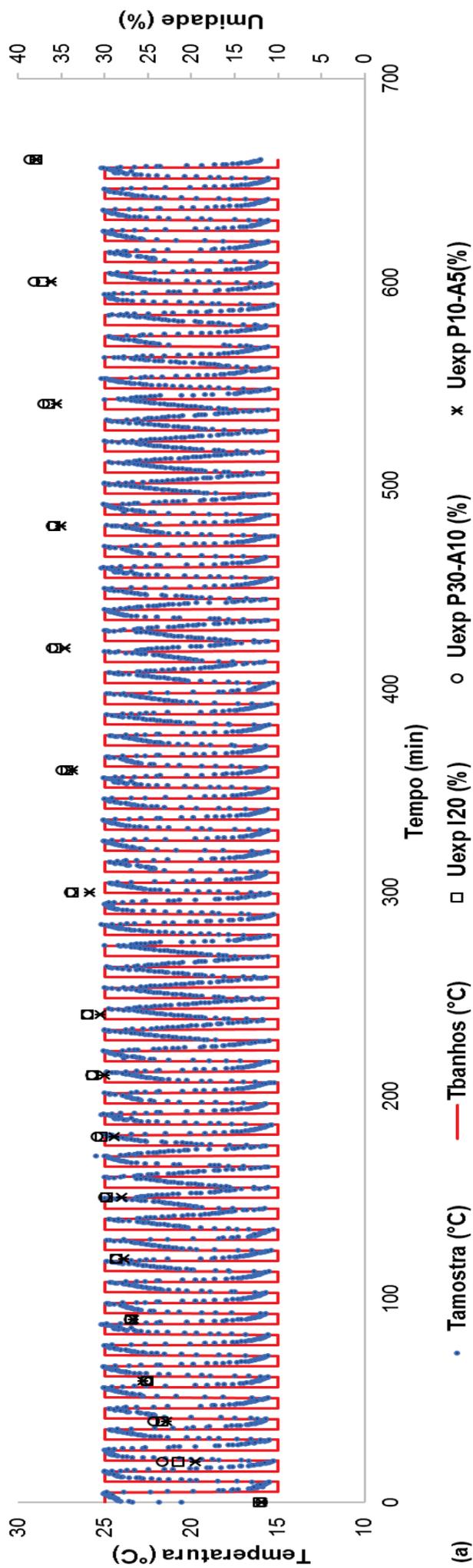
Na hidratação isotérmica à 20 °C, o grão hidratado atingiu a umidade de 37,94% em 660 min, enquanto a hidratação periódica (10-30 °C) precisou de 540 min para atingir a umidade equivalente. A utilização da operação periódica (P30-A10) teve um aumento na taxa de hidratação do triticale, possibilitando uma economia no tempo de hidratação acima de 18% para atingir a umidade observada na isotérmica à 20 °C (FIGURA 4.38 (b)).

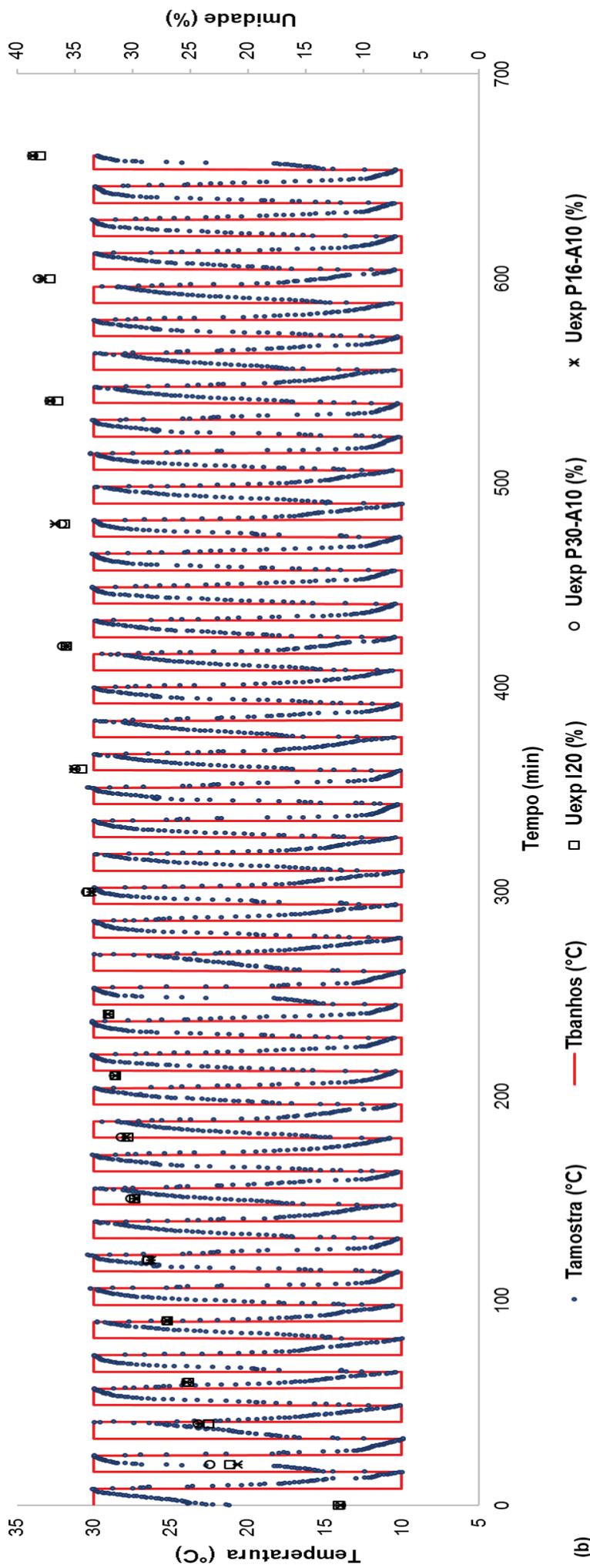
Segundo Mattioda, Jorge e Jorge (2018), a hidratação periódica tem como uma de suas premissas a modulação contínua da temperatura em um dado período e amplitude, o qual a medida da variável manipulada deve estar sempre em regime transiente. Como no estudo de hidratação periódica do triticale, a amplitude de 10 °C e período de 30 min proporcionaram que boa parte do semiperíodo operasse em regime permanente (FIGURA 4.38 (a) e (b)), foi realizado um estudo a partir da combinação de diferentes períodos e amplitudes com o intuito de avaliar a intensificação do processo de hidratação periódica com o sistema operando apenas em regime transiente.

A partir de testes preliminares realizados no sistema experimental de hidratação periódica (FIGURA 3.3) foi possível obter a cinética de hidratação do triticale a partir de três diferentes combinações de período e amplitude: (i) período de 10 min e amplitude de 5 °C (P10-A5) (FIGURA 4.39 (a)); (ii) período de 16 min e amplitude de 10 °C (P16-A10) (FIGURA 4.39 (b)); e (iii) período de 24 min e amplitude de 15 °C (P24-A15) (FIGURA 4.39 (c)).

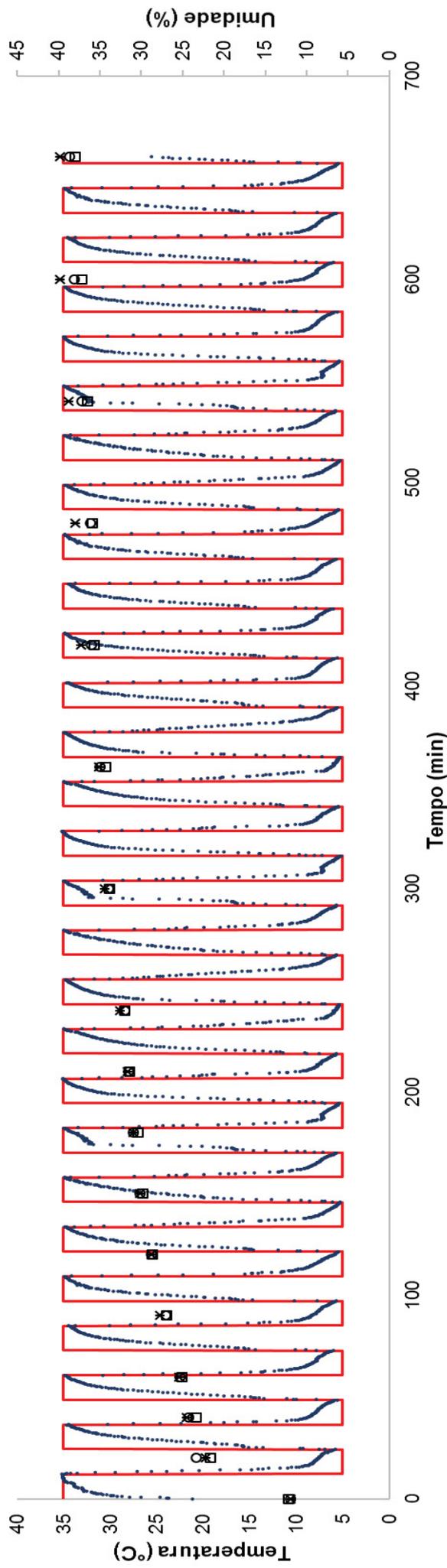
As combinações com os diferentes períodos e amplitudes (P10-A5, P16-A10 e P24-A15) foram estabelecidas com o intuito de avaliar alguma possível alteração no ganho de umidade, na taxa de difusão da água para o interior do grão e no processo de germinação do tritcale em comparação com os experimentos realizados na hidratação isotérmica à 20 °C (I20) e na hidratação periódica com período de 30 min e amplitude de 10 °C (P30-A10), transcorrido 660 min de processo.

FIGURA 4.39 – MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DE HIDRATAÇÃO DOS GRÃOS E COMPARAÇÃO DO GANHO DE UMIDADE EM DIFERENTES COMBINAÇÕES DE PERÍODO E AMPLITUDE, PARA O CULTIVAR IPR 111: (a) PERÍODO 10 MIN E AMPLITUDE 5 °C, (b) PERÍODO 16 MIN E AMPLITUDE 10 °C E (c) PERÍODO 24 MIN E AMPLITUDE 15 °C.





(b)



(c)

Graficamente observa-se que a utilização da combinação de diferentes períodos e amplitudes (P10-A5, P16-A10 e P24-A15) não teve uma diferença muito acentuada para a variação de umidade dos grãos de triticale após 660 min de hidratação, quando comparado com a isotérmica (I20) e a periódica (P30-A10) (FIGURA 4.39 (a), (b) e (c)). Com isso, as umidades finais, bem como os resultados de germinação obtidas em cada condição experimental foram avaliados segundo o teste Tukey ao nível de 95% de confiança (TABELA 4.14).

TABELA 4.14 – COMPARAÇÃO DA UMIDADE FINAL E DA GERMINAÇÃO DO IPR 111 PARA AS DIFERENTES CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO AVALIADAS.

Condição experimental	Umidade final (%)	Energia de germinação (%)
I20	37,94 ± 0,58 ^a	99,33 ± 1,70 ^a
P30-A10	38,66 ± 0,42 ^a	99,67 ± 0,58 ^a
P10-A5	37,42 ± 0,41 ^a	96,33 ± 3,21 ^a
P16-A10	38,64 ± 0,24 ^a	98,67 ± 1,15 ^a
P24-A15	39,88 ± 0,11 ^b	99,67 ± 0,58 ^a

Média ± desvio padrão com letras minúsculas iguais na mesma coluna não apresentam diferença significativa entre as respostas (umidade e germinação), pelo teste de Tukey ($p \leq 0,05$).

Legenda: I20 = isotérmica à 20 °C; P30-A10 = período de 10 min e amplitude de 10 °C; P10-A5 = período de 10 min e amplitude de 5 °C; P16-A10 = período de 16 min e amplitude de 10 °C; P24-A15 = período de 24 min e amplitude de 15 °C.

A quantidade de água absorvida nas diferentes condições experimentais de hidratação possibilitou observar que apenas o ensaio de hidratação com o maior período e amplitude (P24-A15) apresentou diferença estatística em relação a umidade final atingida (TABELA 4.14). Para a energia de germinação (EG) não houve diferença significativa nas condições experimentais avaliadas, ou seja, todos os ensaios tiveram valores de germinação acima de 95%, após três dias de confinamento (TABELA 4.14).

Em relação à intensificação do processo de hidratação observa-se que a modulação da temperatura foi a variável mais representativa para o ganho de umidade, visto que na menor amplitude utilizada (P10-A5), o valor de umidade alcançado (37,42%) foi muito semelhante a isotérmica à 20 °C (37,94%) (FIGURA 4.39 (a)). Enquanto a maior amplitude (P24-A15) foi a única condição experimental estatisticamente diferente para a umidade final (39,88%) (FIGURA 4.39 (c)).

As condições experimentais com a mesma amplitude ($A = 10$ °C) e diferentes períodos ($P = 30$ min e $P = 16$ min) (FIGURA 4.39 (b)) foram analisadas para verificar uma possível diferença no ganho de umidade ao se operar com a hidratação em regime permanente ou regime transiente. Para tal evidência, foi constatado que não há diferença em relação ao ganho de umidade ao hidratar os grãos de triticale operando em regime permanente (P30-A10) ou transiente (P16-A10), uma vez que o ganho de umidade ao longo do tempo e a umidade final (38,6%) foram semelhantes.

Mesmo que as periódicas (P30-A10 e P16-A10) com a mesma amplitude não apresentem diferenças significativas perante ao teste Tukey quando comparadas com a isotérmica à 20 °C (I20), observa-se que o grão hidratado nas condições periódicas atingiram a umidade referente a isotérmica (37,94%) em menor tempo de hidratação, 540 min (FIGURA 4.39 (b)), proporcionando uma redução no tempo de hidratação em aproximadamente 18%.

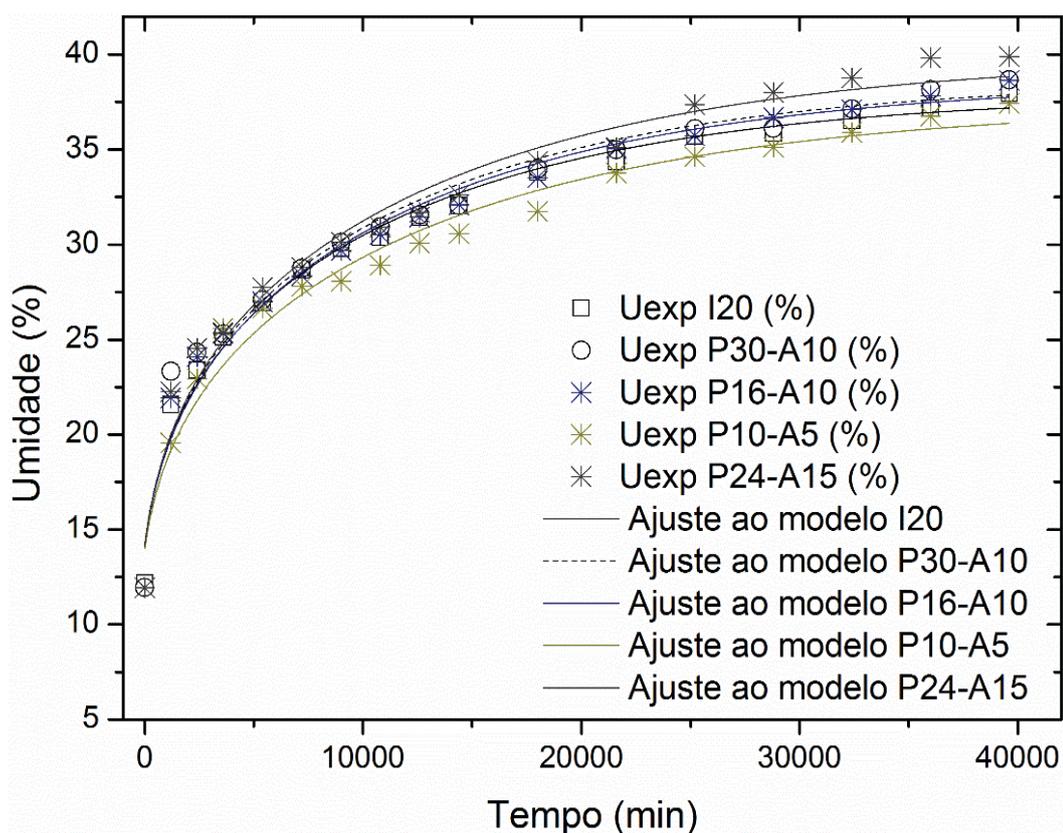
Os resultados obtidos ao hidratar grãos de triticale com a utilização da menor da amplitude (P10-A5) vai de encontro com o relatado por Defendi et al. (2014) e Mattioda, Jorge e Jorge (2018), que avaliaram a secagem de arroz e a hidratação do trigo, respectivamente. Ambos os estudos constataram que as maiores amplitudes utilizadas na modulação da temperatura apresentam maior taxa de secagem/hidratação quando comparados com as amplitudes menores. Segundo esses autores, a utilização de curtos períodos e baixa modulação da amplitude ocasionam o aumento do consumo energético e a taxa de umidade ao longo do tempo tornou-se similar ao processo isotérmico, fatos que corroboram com o presente estudo.

Ademais, segundo Silveston (1998), o período é utilizado para auxiliar o desempenho do ganho de umidade fazendo com que o sistema opere apenas em regime transiente, enquanto a modulação da temperatura (amplitude) possibilita acelerar o ganho de umidade, devido ao aumento da carga térmica imposta ao sistema. Logo, a utilização de baixas amplitudes faz com que o semiperíodo seja curto, visto que o sistema deve operar em regime transiente, sendo a carga térmica aplicada insuficiente para favorecer o ganho de umidade superior que a sua isotérmica.

A partir das diferentes combinações testadas na hidratação periódica foi possível constatar, assim como apresentado por Defendi, Paraíso e Jorge (2016) e Mattioda, Jorge e Jorge (2018), que a aplicação da combinação de maior período e amplitude (P24-A15) resultaram numa maior eficiência do processo. Considerando a hidratação à 20 °C (I20), o grão hidratado na condição periódica combinada com a maior amplitude (P24-A15) atingiu a umidade de 37,94% em 480 min (FIGURA 4.39 (c)), possibilitando uma redução de 27,27% no tempo requerido para atingir a umidade equivalente a operação isotérmica à 20 °C.

Diante dos dados experimentais obtidos ao longo da hidratação isotérmica à 20 °C (I20) e das diferentes combinações de período e amplitude advindos da hidratação periódica (P30-A10, P16-A10, P10-A5 e P24-A15) foi ajustado o modelo fenomenológico de difusão (FIGURA 4.40), com o intuito de avaliar a difusão da água para o interior do grão.

FIGURA 4.40 – AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA O CULTIVAR IPR 111 NOS PROCESSOS ISOTÉRMICO (I20) E PERIÓDICO (P30-A10, P16-A10, P10-A5 E P24-A15), POR 660 MIN.



Além da cinética de hidratação, o parâmetro do modelo de Difusão (D_{ef}) foi utilizado para comparar a possibilidade das diferentes combinações de período e amplitude, em intensificar o processo de hidratação do triticale, uma vez que o D_{ef} está relacionado com a velocidade/quantidade de água difundida através de uma área unitária em função do tempo.

Considerando as condições experimentais avaliadas os valores da D_{ef} variaram de 2,926 a 3,304 $10^{-11} \text{m}^2 \text{s}^{-1}$, com os parâmetros de qualidade de ajuste do modelo acima de 0,969 para o R^2 , abaixo de 3,83% e 1,58% para o P e $RMSE$, respectivamente (TABELA 4.15). Os valores encontrados para a qualidade de ajuste do modelo de Difusão podem ser considerados aceitáveis, visto que ao descrever o processo de hidratação do triticale em ambas as condições, os valores de P foram

menores que de 10% e os da *RMSE* abaixo de 5% (Mohapatra e Rao, 2005; Borges; Jorge; Jorge, 2017; Mattioda; Jorge; Jorge, 2018 e 2019^a).

TABELA 4.15 – PARÂMETRO, ERRO E QUALIDADE DE AJUSTE DO MODELO DE DIFUSÃO PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA (20 °C) E PARA AS DIFERENTES COMBINAÇÕES DE PERÍODO E AMPLITUDE NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA (P30-A10, P16-A10, P10-A5 E P24-A15).

Condição	<i>Def</i> ($10^{-11}m^2 s^{-1}$)	<i>Erro</i> ($10^{-11}m^2 s^{-1}$)	<i>P</i> (%)	<i>RMSE</i> (%)	<i>R</i> ²
I20	2,956	0,12	2,94	1,21	0,986
P30-A10	3,244	0,19	3,46	1,43	0,969
P10-A5	2,926	0,15	3,25	1,34	0,978
P16-A10	3,122	0,15	2,87	1,18	0,980
P24-A15	3,304	0,18	3,83	1,58	0,975

Legenda: I20 = isotérmica à 20 °C; P30-A10 = período de 10 min e amplitude de 10 °C; P10-A5 = período de 10 min e amplitude de 5 °C; P16-A10 = período de 16 min e amplitude de 10 °C; P24-A15 = período de 24 min e amplitude de 15 °C.

As informações obtidas pelo D_{ef} estão de acordo com o comportamento observado nas curvas cinéticas (FIGURA 4.40), uma vez que o aumento da amplitude ocasionou uma maior influência do parâmetro da difusividade efetiva aparente, enquanto que a menor amplitude teve uma leve redução no valor da difusividade quando comparada com a isotérmica à 20 °C (TABELA 4.15). Como o transporte de massa a partir dos mecanismos de difusão trata-se de um processo térmico sensível à temperatura, o aumento da amplitude/temperatura proporciona obter os maiores valores para a difusividade (D_{ef}), já que o aumento da temperatura promove a redução da viscosidade da água e conseqüentemente o aumento na taxa de difusão, devido a diminuição da resistência interna do material (Miano e Augusto, 2018; Mattioda; Jorge; Jorge, 2018; Balbinoti; Jorge ;Jorge, 2018^{a,b}).

A condição experimental com a menor amplitude (P10-A5) teve valor da difusividade ($2,926 m^2.s^{-1}$) muito semelhante a isotérmica à 20 °C (I20) ($2,956 m^2.s^{-1}$), não sendo aconselhado a utilização de baixas amplitudes para a intensificação do processo de hidratação em grãos de triticale. As condições térmicas que tiverem a sua amplitude fixa em 10 °C variando apenas o período apresentaram um aumento na difusividade efetiva. Para o processo de hidratação operando com P30-A10 e P16-A10, o aumento da D_{ef} foi de 8,88% e 5,23%, respectivamente, quando comparado a hidratação isotérmica à 20 °C (I20). Na condição experimental com a maior amplitude (P24-A15), o aumento da D_{ef} foi de 10,53% em relação a isotérmica à 20 °C.

Os resultados obtidos para a D_{ef} confirmam que a utilização da modulação da temperatura com amplitudes acima de 10 °C (P30-A10, P16-A10 e P24-A15) favorecem o aumento da umidade do grão quando comparado com a isotérmica à 20 °C (I20), sendo essas condições as mais indicadas para serem aplicadas na intensificação do processo de hidratação do cultivar IPR 111 para germinação.

Segundo Balbinoti, Jorge e Jorge (2018^a), a transferência de água para o interior dos grãos ocorre principalmente pelo gradiente de concentração, a partir dos mecanismos de capilaridade e difusão. No entanto, o aumento da absorção de água em algumas condições específicas, a partir da modulação da temperatura pode ser atribuído também ao gradiente de temperatura. Esse aumento na transferência de água a partir da diferença do gradiente de temperatura aplicado na operação periódica é conhecido como efeito Soret (Mattioda; Jorge; Jorge, 2018 e 2019^b). O efeito Soret pode estar relacionado com a estrutura química dos grãos, visto que o gradiente de temperatura aplicado na operação periódica tende a diminuir a resistência à entrada de água no grão, devido ao amolecimento do pericarpo, proporcionando um aumento na taxa de transferência de massa, dependendo da amplitude estipulada (Mattioda; Jorge; Jorge, 2018; Miano e Augusto 2018).

O aumento da taxa de hidratação com a aplicação da modulação da temperatura, corrobora com o previsto por Silveston e Hugins (2013), os quais relatam que em processos que utilizam a operação periódica há uma relação exponencial da velocidade em função da temperatura. No entanto, a utilização da baixa amplitude durante o processo de hidratação periódica do triticales não influenciou de forma efetiva na mobilidade das moléculas de água, sendo praticamente equivalente à operação isotérmica.

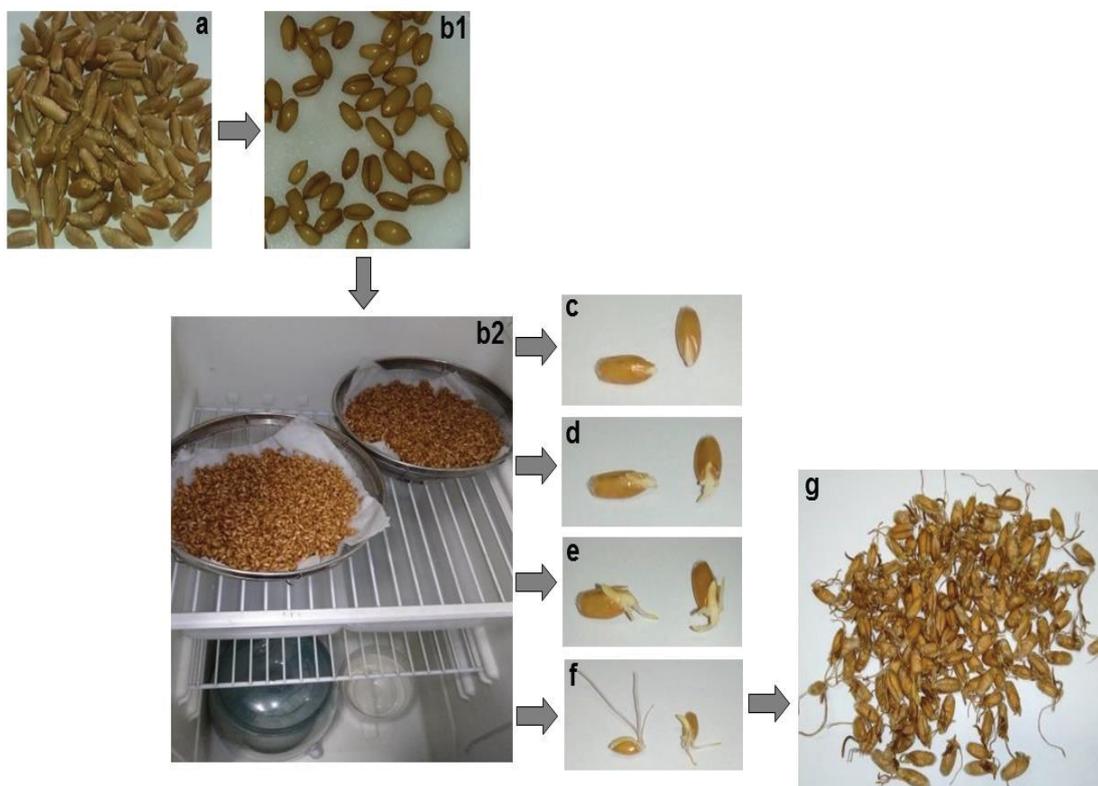
Além disso, o fato da água ser periodicamente retirada do tanque, durante as mudanças dos ciclos da água, onde os grãos estão armazenados no sistema de hidratação periódica, permite o fornecimento de oxigênio, não havendo a necessidade da retirada da água dos tanques ou a injeção de ar comprimido na água, prática usualmente realizada pelas indústrias nos métodos tradicionais de malteação. Essa retirada de água ou injeção de ar é necessária para que não ocorra a hidratação dos grãos em condições anaeróbias, visto que nestas condições o grão pode fermentar produzindo gás carbônico e etanol, afetando o processo de germinação (Briggs, 1998; Kunza, 1999).

4.11. CARACTERIZAÇÃO DO MALTE DE TRITICALE

A elaboração do malte de triticale foi desenvolvida a partir do processo de malteação dos grãos (hidratação, germinação e secagem) (FIGURA 4.41). Para tal, os grãos *in natura* (FIGURA 4.41 (a)) foram hidratados (FIGURA 4.41 (b1)) para aumentar o teor de umidade e posteriormente, foram confinados em um ambiente controlado para observar o fenômeno da germinação (FIGURA 4.41 (b2)), com o intuito de produzir enzimas com a mínima perda de extrato. O processo de germinação foi observado a partir das contagens dos grãos realizadas a partir do crescimento das radículas e acrósporo, após confinamento (FIGURA 4.41 (c)) e no 1° dia (FIGURA 4.41 (d)), 2° dia (FIGURA 4.41 (e)) e 3° dia (FIGURA 4.41 (f)) de confinamento.

Por fim, os grãos germinados foram acondicionados em estufa com o intuito de cessar o processo de germinação e inativar uma possível proliferação de microrganismos a partir da diminuição do conteúdo de umidade, permitindo obter um produto estável do ponto de vista da sua conservação (FIGURA 4.41 (g)).

FIGURA 4.41 – ETAPAS DO PROCESSO DE MALTEÇÃO DO TRITICALE.



Legenda: a = Grãos de triticale *in natura*; b1 = Grãos de triticale após etapa de hidratação; b2 = Acondicionamento dos grãos na germinadora; c = após confinamento; d = 24 h; e = 48 h; f = 72 h; g = Malte de triticale seco.

FONTE: O autor (2020).

A partir da retirada das radículas e acrósporo com o auxílio de uma peneira foi obtido o malte de triticales, possibilitando avaliar as características físico-química e morfológica do grão maltado, bem como os parâmetros de qualidade do malte.

4.11.1. Caracterização Físico-química dos Grãos de Triticales Maltados

A composição centesimal do malte de triticales foi avaliada e comparada com a composição centesimal do grão *in natura*, com o intuito de observar alguma possível modificação na composição físico-química das macromoléculas (TABELA 4.16).

TABELA 4.16 – COMPARAÇÃO DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DO CULTIVAR IPR 111 *IN NATURA* E MALTADO, EXPRESSOS EM BASE ÚMIDA.

Constituintes	Condição do cultivar IPR 111	
	<i>In natura</i>	Maltado
Umidade - AOAC (2002) (%)*	12,83 ± 0,46	6,14 ± 0,21
Umidade - EBC (2000) (%)	-	6,93 ± 0,06
Lipídeos (%)*	1,25 ± 0,01	2,96 ± 0,01
Proteínas - IAL (2008) (%)*	12,98 ± 0,12	13,01 ± 0,02
Proteínas - EBC (2004) (%)	-	13,53 ± 0,06
Cinzas (%)*	1,71 ± 0,01	1,91 ± 0,01
Carboidratos Totais (%)	71,23 ± 0,56	75,98 ± 1,80

*Valores utilizados para obter os resultados de carboidratos por diferença.

Frente aos resultados obtidos observa-se uma redução no teor de umidade em função da submissão do malte verde ao processo de secagem, passando de 12,83% no grão *in natura* para 6,14% no malte seco. Com a transformação do amido em açúcar fermentescível e das proteínas em aminoácidos, esses constituintes geralmente devem apresentar uma leve redução no grão maltado, elevando a concentração de aminoácidos e açúcares livres (Senai, 2014). Os resultados comparativos realizados por diferentes métodos (AOAC e EBC) para o grão maltado foram semelhantes tanto para a umidade quanto para as proteínas (TABELA 4.16).

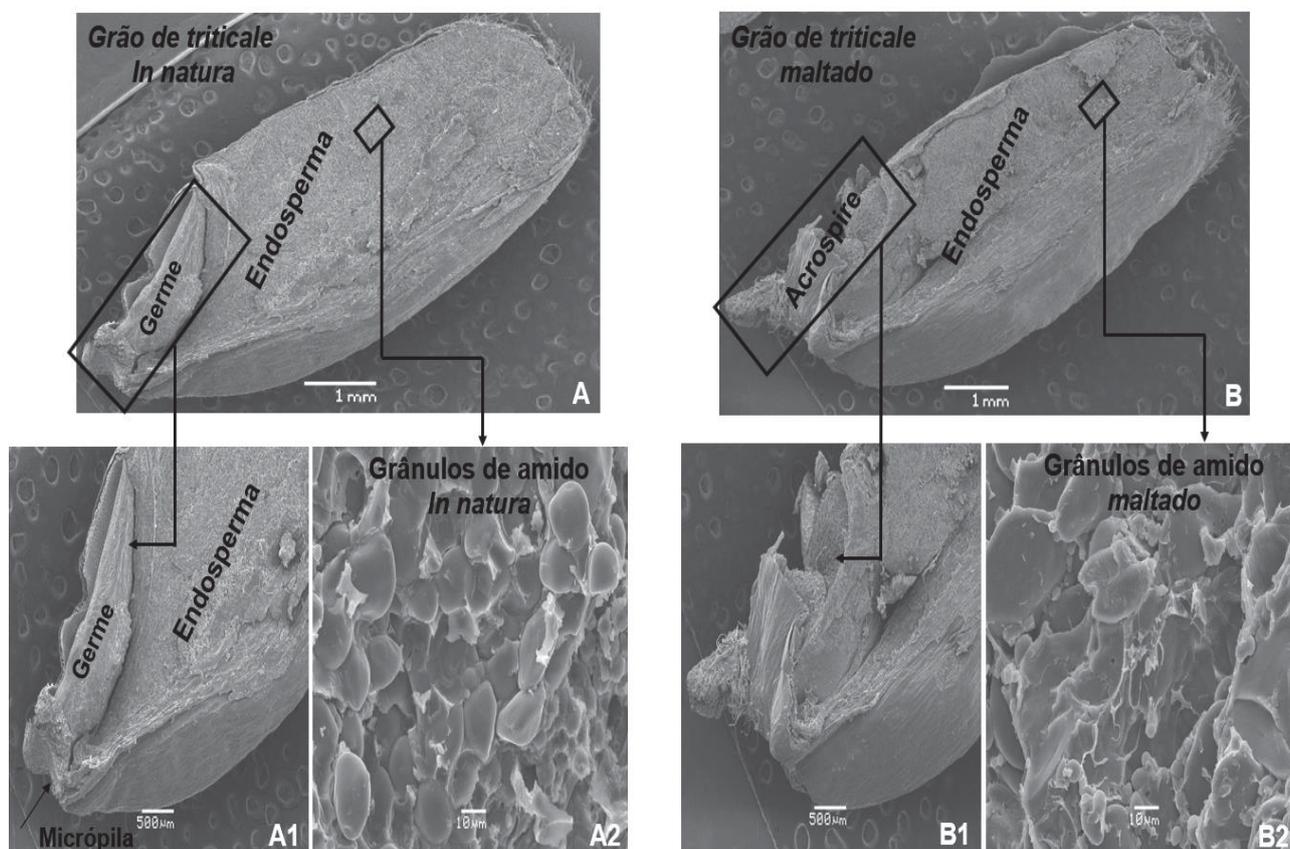
Os macros constituintes de maior importância na produção do malte são o amido e as proteínas, uma vez que o processo de maltagem é um mecanismo de conversão desses constituintes presentes no grão, em aminoácidos e carboidratos fermentescíveis que serão utilizados no processo de fermentação pelas leveduras e para a produção de outros componentes que irão contribuir com características sensoriais do malte.

Para a produção de cerveja, na qual ocorre a maior aplicabilidade do malte produzido, existem alguns limites que são conhecidos como características de controle, as quais toda a produção de malte deve seguir para que o malte seja considerado de boa qualidade. A umidade do malte deve ficar abaixo de 5% enquanto as proteínas do malte devem estar entre 9% a 12% (Aastrup e Erdal, 1980; Tschope e Nohel, 1999; Tschope, 2001; Zschoerper, 2009). Os resultados para a umidade e proteínas obtidos no malte de triticale apresentaram valores um pouco acima do estabelecido para o malte cervejeiro, esses resultados podem interferir na perda de aroma e no rendimento do malte, além de ocasionar certa instabilidade na formação de espuma.

4.11.2. Caracterização Morfológica dos Grãos de Triticale Maltados

Para avaliar a estrutura morfológica do grão maltado, o cultivar IPR 111 foi submetido à análise de imagem via MEV e comparado com a estrutura do grão de triticale *in natura* (FIGURA 4.42).

FIGURA 4.42 – COMPARATIVO ENTRE A ESTRUTURA DO GRÃO DE TRITICALE *IN NATURA* (A) E DO GRÃO MALTADO (B) (AUMENTO DE 30x): ÊNFASE PARA A REGIÃO DO GERME (A1 e B1) (AUMENTO DE 60x) E O ENDOSPERMA (A2 e B2) (AUMENTO DE 1000x).



FONTE: O autor (2020).

As análises morfológicas evidenciam a semelhança entre os grãos *in natura* e maltado (FIGURA 4.42 (A) e (B)). No entanto, o processo de malteação promove mudanças nos grãos através das enzimas proteolíticas e amilolíticas que hidrolisam as moléculas de proteínas e amidos, respectivamente resultando em alterações na estrutura do grão (FIGURA 4.42 (A2) e (B2)) (Schmitt e Marinac, 2007; Chung; Cho; Lim, 2014).

A malteação possibilita, a partir da hidratação, o ganho de umidade do grão para dar início as suas atividades bioquímicas, possibilitando a ativação e a produção de enzimas que irão agir nas substâncias de reserva do grão, transformando-as em compostos de menor massa molecular, o que implica na retomada do sistema biológico com o desenvolvimento do embrião (Beckert et al. 2000; Boulton e Quain, 2006). Após a hidratação o metabolismo do embrião localizado no germe (FIGURA 4.42 (A1)) é acelerado, com a migração dos nutrientes contidos no endosperma e na camada aleurona, dos quais são metabolizados promovendo o desenvolvimento do acrósporo e das raízes primárias e secundárias (FIGURAS 4.41 (e, d, e, f) e 4.42 (B1)). No entanto, esse processo deve ser interrompido para encerrar a atividade enzimática e o crescimento do embrião, sem desprender muita energia, uma vez que o desprendimento de energia pode acarretar em perdas de rendimento e em baixa qualidade do extrato do malte, visto que o processo de germinação para a produção de malte não está associado à geração de uma nova planta, mas a aproveitar as transformações naturais do grão em favor da tecnologia (Tschope, 1999; Zschoerper, 2009; Gorzolka et al. 2012).

4.11.3. Caracterização do Parâmetro de qualidade dos Grãos de Triticale Maltados

A qualidade do malte é avaliada por diferentes métodos que possibilitam retirar informações de como ocorreu o processo de maltagem e a influência da qualidade do produto para a industrialização. Com isso, as análises de qualidade do malte foram avaliadas tanto para o malte (friabilidade, classificação de peneiras, presença de substâncias estranhas e grãos quebrados), quanto para o mosto congresso (tempo de filtração do mosto, extrato de moagem, poder diastático, concentração de β -glucanos, teor de amino nitrogênio livre, nitrogênio solúvel, índice de Kopalch, pH, viscosidade, cor e turbidez do mosto) (TABELA 4.17).

TABELA 4.17 – ANÁLISE DA QUALIDADE DO MALTE E DO MOSTO CONGRESSO DE TRITICALE.

Característica de controle	Limites específicos de controle*		Resultado do malte de triticale
	Limite inferior	Limite superior	
Friabilidade (%)	>75	-	53,20 ± 2,36
Classificação de peneiras (%)	>85		96,80 ± 0,40
Substâncias estranhas (%)		0,5	0
Substâncias quebradas (%)		2	0
Extrato moagem fina (%)	>80,5	-	85,33 ± 0,15
Extrato moagem grossa (%)	>80,5	-	84,60 ± 0,79
Diferença de extrato (%)	<2,0		0,70 ± 0,70
β-glucanas (mg L ⁻¹)	<250	-	41,00 ± 1,00
Nitrogênio Solúvel (mg 100g ⁻¹)	550	850	1508 ± 36,59
Cor do mosto (EBC)	3,5	4,0	10,23 ± 0,06
Turbidez do mosto - cocção (EBC)	6	8	16,20 ± 0,26
FAN (mg 100g ⁻¹)	120	180	640,76 ± 1,15
Índice de Kolbach (%)	35	50	69,67 ± 1,53
Poder diastático (WK)	200	350	433,00 ± 1,73
α-Amilase (-)	160	-	73,78 ± 2,63
pH do mosto (-)	5,2	6,2	5,88 ± 0,01
Viscosidade do mosto (mPa s)	1,4	1,7	1,97 ± 0,02
Tempo de filtração (min)	<60	-	57,00 ± 1,00

*Limites específicos máximos e mínimos estabelecidos para o malte de cevada na produção de malte tipo pilsen (Tschope, 1999; Brissart et al. 2000; Zschoerper, 2009).

Frente aos resultados obtidos para o grão de triticale maltado observa-se que a friabilidade teve valores inferiores ao mínimo estabelecido para o malte de cevada (TABELA 4.17). A friabilidade indica a desagregação e modificação do malte durante o processo de malteação. O baixo valor de friabilidade pode estar relacionado com a alta concentração de proteínas presente no malte de triticale, provavelmente advindos do cromossomo doado pelo centeio. Essa análise para o malte de triticale constata que não houve uma transformação ideal das proteínas em aminoácidos durante a etapa de malteação, visto que os valores aceitáveis para a friabilidade do malte devem ser superiores a 75% (Briggs, 1998; Senai, 2014).

Os resultados da classificação do malte mediante o uso de peneiras constataam que o triticales pode ser considerado de primeira qualidade, visto que 96,80% do malte ficou retido nas duas primeiras peneiras (TABELA 4.17). Esse resultado juntamente com a ausência de matérias estranhas ou grãos quebrados, classificam o cultivar IPR 111 como um triticales do tipo Premium para essa análise, de acordo com os limites máximos e mínimos estabelecidos para o malte de cevada (Kunze, 1999). Segundo Tschope (1999), a análise de classificação de peneiras relata que quanto mais elevado esse resultado, maior a possibilidade de se obter um alto rendimento do extrato, fato que corrobora com o presente estudo, visto que o triticales teve um alto rendimento tanto no extrato de moagem fina (85,33%) quanto no extrato de moagem grossa (84,60%) (TABELA 4.17). Para o cultivar IPR 111, ambos os extratos de moagem (fina-grossa) ficaram acima do limite mínimo estabelecido para o malte de cevada, que deve ser superior a 80,5% (TABELA 4.17) (Tschope, 1999).

O extrato de moagem está relacionado com o potencial do malte em fornecer açúcares fermentescíveis e compostos nitrogenados. A diferença entre o extrato de moagem fina e grossa obtido no malte de triticales (0,70%) demonstra uma possível modificação do grão (endosperma) durante a etapa de malteação, visto que o limite máximo entre essa relação deve ser 2% (TABELA 4.17) (Zschoerper, 2009).

Os valores obtidos de β -glucanas para o malte de triticales ($41,00 \text{ mg L}^{-1}$) ficaram bem abaixo do limite inferior estabelecido (TABELA 4.17). As β -glucanas fornecem uma ideia da modificação do grão, ou seja, o quanto as enzimas conseguem penetrar as paredes celulares do endosperma para ter acesso às reservas de amido (Zschoerper, 2009; Senai, 2014). A concentração de β -glucanas advinda do malte de triticales demonstram uma boa degradação desse composto durante a etapa de malteação, o que pode ter sido desencadeado pela temperatura constante de 19°C utilizada durante o processo de germinação, visto as temperaturas mais altas aplicadas na etapa de germinação auxiliam a degradação das β -glucanas.

O elevado valor da cor do mosto obtido para o malte de triticales (10,23 EBC) pode estar associado à temperatura das rampas de secagem aplicadas no presente estudo, juntamente com a elevada concentração de nitrogênio solúvel (1508 mg 100g⁻¹) presente no malte de triticales (TABELA 4.17) (Briggs, 1998; Senai, 2014). A quantidade de nitrogênio solúvel representa a solubilização durante a etapa de produção do mosto congresso. Os altos valores encontrados para o nitrogênio solúvel e para as proteínas do malte de triticales provavelmente são advindos do cromossomo doado pelo centeio. Esses valores podem acarretar problemas de estabilidade, baixo rendimento, aumento na intensidade de cor (10,23 EBC) e na turbidez do mosto congresso (16,20 EBC), fatos que corroboram com os resultados encontrados no presente estudo (TABELA 4.17) (Zschoerper, 2009; Senai, 2014). A temperatura de secagem permite desenvolver uma coloração mais acentuada ao malte em função da formação das melanoidinas, como resultado das reações de Maillard que ocorrem entre os produtos de degradação enzimática do amido e proteínas (Palmer, 1989).

O teor de amino nitrogênio livre (FAN) pode ser definido como a parcela nitrogenada de baixo peso molecular, composta por polipeptídios e aminoácidos responsáveis pelo crescimento das leveduras durante a etapa da fermentação da cerveja. Os altos valores obtidos para o teor de FAN no malte de triticales (640,76 mg 100g⁻¹) (TABELA 4.17) estão relacionados com os altos valores de nitrogênio solúvel (1508 mg 100 g⁻¹) (Briggs, 1998).

O índice de Kolbach representa o percentual de nitrogênio total presente no malte que foi dissolvido no mosto congresso, ou seja, quanto as proteínas do malte foram hidrolisadas pelas enzimas proteolíticas (Kunze, 1999; Zschoerper, 2009). Os resultados acima do limite de controle estabelecido para o malte de cevada para o índice de Kolbach (69,67%) (TABELA 4.17) demonstram que parte das enzimas proteolíticas não foram dissolvidas no mosto congresso. Esse fato pode ter sido desencadeado devido à utilização constante da temperatura de 19 °C na câmara germinadora, visto que para os grãos que têm facilidade de germinação, as temperaturas na faixa de 20 °C são consideradas altas e proporcionam a formação das enzimas de forma mais acelerada; porém como as enzimas são formadas em tempos diferentes, essa velocidade pode ter afetado o desenvolvimento das proteolíticas, que são as enzimas que se formam por último. (Bamforth, 1993; Kunze, 1999).

O poder diastático está relacionado com a conversão das enzimas α -amilase e β -amilase. O valor acima do limite máximo de controle obtido para o malte de triticales para o poder diastático (433,00 WK) (TABELA 4.17) pode estar diretamente relacionado com o cromossoma mãe advindo do trigo e o teor de umidade do malte seco (6,14%) (TABELA 4.16) obtido após a operação de secagem, visto que essas premissas facilitam o processo de conversão das enzimas amilolíticas. O alto valor do poder diastático tem como consequência influências no grau de fermentação durante a fabricação de cervejas (Zschoerper, 2009).

As α -Amilases não se encontram presentes no grão de triticales *in natura*, mas passam a ser formadas durante o processo de malteação. Trata-se de uma endoenzima que atua no interior da molécula formando dextrinas e alguns açúcares fermentescíveis, implicando na gelatinização e na hidrólise do amido (Sebrai, 2014). O valor encontrado abaixo do limite mínimo para as α -Amilases (73,78) pode estar relacionado com a etapa de secagem, visto que nessa operação a temperatura chegou a 80 °C, e as α -amilases têm sua atividade enzimática reduzida de forma significativa em temperaturas acima de 75 °C (Briggs, 1998).

O resultado dentro do limite especificado para o pH (5,88) no malte de triticales demonstra que as atividades enzimáticas amilolíticas ocorreram de forma adequada (TABELA 4.17). Esse resultado dentro da faixa de 5,2 a 6,2 deve auxiliar o processo de fermentação do mosto congresso, ajudando a diminuir a viscosidade, característica esta que apresentou valor um pouco acima do limite especificado (1,97 mPa s), bem como facilitar o tempo de filtração do mosto (57 min), tempo este que ficou dentro do limite máximo especificado (TABELA 4.17).

A partir dos resultados encontrados para a qualidade do malte de triticales em comparação com o malte de cevada, observa-se que algumas análises ficaram fora dos limites de controle inferior e superior, principalmente no que diz respeito às conversões das proteínas em aminoácidos. No entanto, esses resultados demonstram que o malte de triticales não é indicado para a produção de malte tipo pilsen, visto que o grão e o malte de cevada são considerados a matéria-prima padrão para avaliação dos demais grãos utilizados na fabricação de malte cervejeiro.

Existem alguns maltes, designados de maltes especiais, que possuem colorações mais intensas, e a atividade enzimática que podem ser parcialmente ou totalmente destruída, a partir da utilização das altas temperaturas durante a etapa de secagem. Segundo Palmer (2006) e Zschoerper (2009), os altos valores de umidade (6,93%), coloração da cocção do malte (16,93 EBC), valor proteico (13,53%) e nitrogênio solúvel ($1508 \text{ mg } 100\text{g}^{-1}$) obtidos no presente estudo para o malte de triticales são resultados que se aproximam das características de maltes especiais designados para a produção de cervejas escuras.

Além disso, o malte de triticales pode ser aplicado na formulação de diversos alimentos tais como: biscoitos, bolos, sorvetes, cereais matinais, pães, macarrão, produtos de confeitaria, entre outros. O malte pode ser aplicado em produtos alimentícios como fonte de enzimas, adoçante ou através de benefício nutricional (vitaminas e aminoácidos). No entanto, na questão alimentícia a principal aplicação do malte é fornecer cor e sabor aos alimentos, visto que o malte se apresenta como uma alternativa ao caramelo, incentivando a sua aplicação com o apelo ao consumidor de alimentos mais saudáveis (Bamforth, 1993).

5. CONCLUSÕES

Nesta seção, abordam-se as principais conclusões obtidas no presente estudo em relação aos objetivos que foram propostos. A partir da elaboração desse trabalho acredita-se que foi possível contribuir com a pesquisa dentro da área de beneficiamento e processamento de grãos, incentivando as instituições de pesquisa, universidades e indústrias no desenvolvimento de novos produtos a partir de cereais e leguminosas de menor expressão no cenário mundial.

Os cultivares de triticales apresentaram a proteína (12,83%) e o amido (72%) como os principais macronutrientes presentes no cereal. A relação entre a massa específica aparente e a real permitiram obter a porosidade intergranular dos cultivares com valores de 44,05% para o IPR 111 e 43,01% para o IPR Aimoré. As análises termogravimétricas demonstraram que a temperatura de gelatinização do amido dos cultivares de triticales foi em torno de 60 °C, o qual foi concretizada mediante as alterações morfológicas do amido observadas via MEV. Estas constatações permitem conhecer melhor as características do triticales, tornando-se informações importantes para uma possível inserção desse cereal no desenvolvimento de novos produtos.

O comportamento cinético de hidratação do triticales foi distinguido em três fases distintas. A Fase I, caracterizada pelo rápido ganho de água das amostras, seguido da Fase II com o ganho de umidade mais moderado, e a Fase III com um ganho de umidade quase imperceptível. A partir do regime de transferência de massa com o uso de um traçador, foi observado que a principal entrada de água no triticales é através da micropila; no entanto, é a elevação da temperatura que promove a maior capacidade de absorção de água e a variação de volume nos grãos.

A partir do ajuste dos modelos matemáticos de Peleg, Difusão e Omoto-Jorge aos dados experimentais de hidratação constatou-se que a elevação da temperatura aumenta a taxa de transferência de água para o grão, a qual é intensificado com a utilização da operação periódica. O modelo de Difusão foi o que melhor representou a qualidade de ajuste, segundo o coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P) e raiz quadrada média do erro ($RMSE$).

Com base no estudo da influência da temperatura no coeficiente de Difusão aparente (D_{ef}), foi possível obter a energia de ativação (E_a) que gerou os modelos generalizados de Difusão com desvio médio máximo de 10,5% para o processo isotérmico e 15% para o processo periódico em ambos os cultivares. O modelo cinético generalizado permite ser utilizado para a modelagem, simulação e controle de qualidade do processo industrial no desenvolvimento de novos produtos, sem a necessidade da realização de experimentos adicionais. Também por meio da energia de ativação (E_a) foi obtido as propriedades termodinâmicas como a entalpia (ΔH), a entropia (ΔS) e a energia livre de Gibbs (ΔG) revelando que a hidratação dos cultivares de triticales se trata de um processo não espontâneo e endotérmico.

O cultivar IPR 111, hidratado tanto no processo isotérmico à 20 °C quanto no periódico à 10-30 °C, nas Fases II (660 min) ou III (900 min) foram as melhores condições propostas pela energia de germinação (EG) e índice de germinação (IG). Por meio da Fase II (660 min) foi possível obter uma economia de aproximadamente 27% no tempo de hidratação. Além disso, a aplicação da operação periódica (P30-A10) precisou de 540 min para atingir a umidade equivalente a hidratação isotérmica à 20 °C (37,94%), representando uma economia de aproximadamente 18% no tempo de hidratação.

A utilização de diferentes combinações de período e amplitude (P10-A5, P16-A10 e P24-A15) na operação periódica não afetaram a germinação do cultivar IPR 111. No entanto, para o ganho de umidade as diferentes combinações utilizadas na operação periódica foi influente, visto que para a menor amplitude (P10-A5) a umidade alcançada (37,42%) foi inferior a isotérmica à 20 °C (37,94%), na condição de amplitudes iguais ($A = 10$ °C) e períodos diferentes ($P = 30$ min e $P = 16$ min) o ganho de umidade (38,6%) foi análogo entre os processos periódicos proporcionando atingir umidade final maior que a isotérmica à 20 °C (37,94%). E por fim, a utilização da maior amplitude (P24-A15) o ganho de umidade final (39,88%) foi a única condição experimental estatisticamente diferente em relação às demais, possibilitando uma redução de 27,27% no tempo de hidratação em comparação a isotérmica à 20 °C. Com isso, as condições da operação periódica mais indicadas para intensificar o processo de hidratação do triticales sem afetar a germinação são as combinações com amplitudes acima de 10 °C (P30-A10, P16-A10, P24-A15).

A qualidade do malte de triticale o define como um cereal com características de maltes especiais, mais designados para a produção de cervejas escuras. Além disso, o malte de triticale pode ser incorporado na formulação de diversos alimentos agregando doçura, composição nutricional e coloração com o apelo de comercialização de alimentos mais saudáveis.

A partir desse estudo permite-se observar que a operação periódica se trata de uma tecnologia inovadora que pode auxiliar as indústrias já instaladas a intensificar a hidratação ajudando na redução do tempo de processo e consequentemente aumentando a capacidade de processamento. Para o processo de malteação, a operação periódica pode auxiliar na economia do volume de água e redução do impacto ambiental, visto que a água contida nos banhos termostáticos é enviada aos tanques de hidratação de forma periódica sem ser descartada ao meio ambiente durante todo o processo de hidratação. Contudo, estudos futuros devem ser realizados para contribuir de forma efetiva na compreensão do impacto energético, econômico e ambiental nessa proposta de projeto.

REFERÊNCIAS

- AASTRUP, S.; ERDAL, K. Quantitative Determination of endosperm Modification and its Relationship to the content of 1,3:1,4- β -Glucans during Malting of Barley. **Carlsberg Research Communication**, n.5, p.369-379, 1980.
- ABU-GHANNAM N, McKENNA B. Hydration kinetics of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal Food Science**, v.62, p.520-523, 1997.
- AGIL, R.; HOSSEINIAN, F. Dual functionality of triticale as a novel dietary source of prebiotics with antioxidant activity in fermented dairy products. **Plant Foods for Human Nutrition**, v.67, n.1, p.88-93, March 2012.
- AGUIRRE, A.; BORNEO, R.; LEÓN, A. E. Properties of triticale flour protein-based films. **LWT – Food Science and Technology**, v.44, n.9, p.1853-1858, November 2011.
- AGUIRRE, A.; BORNEO, R.; LEÓN, A. E. Antimicrobial, mechanical and barrier properties of triticale protein films incorporated with oregano essential oil. **Food Bioscience I**, p.2-9, December 2013a.
- AGUIRRE, A.; BORNEO, R.; LEÓN, A. E. Properties of triticale protein films and their relation to plasticizing–antiplasticizing effects of glycerol and sorbitol. **Industrial Crops and Products**, v.50, p.297-303, October 2013b.
- AHROMRIT, A.; LEDWARD, D. A.; NIRANJAN, K. Kinetics of high pressure facilitated starch gelatinisation in thai glutinous rice. **Journal of Food Engineering**, v.79, p.834-841, 2007.
- AMAYA, A.; PEÑA, R. J.; VARUGHESE, G. influence of grain hardness on the milling and baking properties of recently developed Triticales. **Proceedings of the 1^o International Triticale Symposium**, Australia, p.511-524, 1986.
- AMMAR, K.; MERGOUM, M.; RAJARAM, S. (Ed)The History and Evolution of Triticale, **Triticale Improvement and Production**, in. Mergoun, M.; Gomez-Macpherson, H. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Roma, 2004, p.1-10.
- AO, Z.; JANE, J. Characterization and modeling of the A- and B- granule starches of wheat, triticale, and barley. **Carbohydrate Polymers**, v.67, n.1, p.46-55, January 2007.
- AOAC. Association of Official Analytical Chemists. **Official Methods of Analysis of Association of Official Analytical Chemist Internacional.Food Composition; Additives; Natural Contaminants** 17th Edition, Maryland, USA, 2002.
- ARAÚJO, W. D.; GONELI, A. L. D.; SOUZA, C. M. A. DE.; GONÇALVES, A. A.; VILHASANTI, H. C. B. Physical properties of peanut kernels during drying. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.279-286, 2014.
- AVIARA, N. A.; AJIBOLA, O. O.; ONI, S. A. Sorption equilibrium and thermodynamic characteristics of soya bean. **Biosystems Engineering**, v.87, n. 2, p. 179-190, 2004.
- BAGA, M.; NAIR, R. B.; REPELLIN, A.; SCOLES, G. J.; CHIBBAR, R. N. Isolation of a cDNA encoding a granule-bound 152-kilodalton starch-branching enzyme in wheat. **Plant Physiology**, v.124, p.253-264, 2000.

BAIER, A. C. **Triticale**. Embrapa-CNPT (Documento, 6), Passo Fundo/RS, 1986.

BAIER, A. C.; NEDEL, J. L.; REIS, E. M.; WIETHÖLTER, S. **Triticale: Cultivo e Aproveitamento**. Embrapa-CNPT (Documento, 19), Passo Fundo/RS, 1994.

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.

BALBINOTI, T. C. V.; JORGE, L. M. de M.; JORGE, R. M. M. Mathematical modeling and thermodynamic properties of rice parboiling. **Journal of Food Process Engineering**, v.41, n.5, March 2018a.

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

BAMFORTH, C. W. **Malting technology and the uses of malt** "in MACGREGOR, A. W. Barley chemistry and technology, Minnesota, USA: American Association Os Cereal Chemist, Inc., 1993, 486p.

BARREIRO, J. A.; FERNÁNDEZ, S.; SANDOVAL, A. J. Water sorption characteristics of six rowbarley malt (*Hordeum vulgare*). **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v.36, p.37-42, 2003.

BARTOLOZZO, J.; BORNEO, R.; AGUIRRE, A. Effect of triticale-based edible coating on muffin quality maintenance during storage. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v.10, n.1, p.88-95, March 2016.

BASSOL, M. C.; RIEDE, C. R.; CAMPOS, L. A. C.; FOLONI, J. S. S.; NASCIMENTO JUNIOR, A do. **Cultivares de Trigo e Triticale Embrapa e Iapar**. Embrapa Soja, Londrina/PR, p.19-37, 2014.

BECKERT, O. P.; MIGUEL, M. H.; MARCOS FILHO, J. Absorção de água e potencial fisiológico em sementes de soja de diferentes tamanhos. **Scientia Agricola**, v.57, p.671-675, 2000.

BEIRÃO, M. L.; CABO VERDE, M. J. Triticale malting - an evaluation of characteristics and production. Kluwer academic publishers. **Triticale: today and tomorrow**, p.763-769, 1996.

BELETI, M. A.; DUARTE, F.; GEORG-KRAEMER, J. E. Temperature on the development activity of (1-3, 1-4)- β -glucanases enzyme and degradation of β -glucanos during malting. **Ciência Rural**, v.42, n.3, Santa Maria, March 2012.

BELLO, M. O.; TOLABA, M. P.; SUAREZ, C. Water absorption and starch gelatinization in whole rice grain during soaking. **Food Science and Technology**, v.40, n.2, p.313-318, March 2007.

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, December 2004.

BEWLEY J. D.; BLACK M. 1978. Imbibition, germination, and growth. In: M Black, editor. *Physiology and biochemistry of seeds in relation to germination: 1 Development, germination, and growth*. Berlin, Heidelberg: Springer. 106-31. https://doi.org/10.1007/978-3-642-66668-1_4.

BIERNACKA, P.; WARDENCKI, W. Volatile composition of raw spirits of different botanical origin. **Journal of the Institute of Brewing**, v.118, n.4, p.393-400, March 2013.

BILLIRIS, M. A.; SIEBENMORGEN, T. J.; MEULLENET, J.; MAUROMOUSTAKOS, A. Rice degree of milling effects on hydration, texture, sensory and energy characteristics. Part 1. Cooking using excess water. **Journal of Food Engineering**, v.113, n.4, p.559-568, 2012.

BLANCHFLOER, A. J.; BRIGGS, D. D. Micromalting triticales: Comparative malting characteristics. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.56, n.2, p.117-124, 1991.

BLOKSMA, A.; BUSHUK, W. **Rhology and chemistry of dough**. In: Pomeranz Y Wheat, Chemistry and technology (3rded), AACC, St Paul, MN, USA, p.1-16, 1988.

BORGES, C. W. W.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Kinetic modeling and thermodynamic properties of soybean cultivar (BRS257) during hydration process. **Journal of Food Process Engineering**, v.40, n.6, June 2017.

BORNEO, R.; ALBA, N.; AGUIRRE A. New films based on triticales flour: Properties and effects of storage time. **Journal of Cereal Science**, v.68, p.82-87, March 2016.

BORSATO, V. M.; JORGE, L. M. de M.; MATHIAS, A. L.; JORGE, R. M. M. Thermodynamic properties of barley hydration process and its thermostability. **Journal of Food Process Engineering**, v.42, n.2, April 2019

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, Jul-Set 2010.

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

BOULTON, C.; QUAIN, D. **Breing yeast & fermentation**. London: Blackwell Publishing 2006, 644p.

BRAGA, N. da S.; MORAIS, C. S. B.; ROSSETTO, C. A. V. Hidratação controlada de sementes de pinhão manso. **Revista Ciência Agronômica**, v.43, n.3, p.589-597, Jul-Set 2012.

BRAGG, D. B.; SHARBY, T. F. Nutritive value of triticales for broiler chick diets. **Research Notes Poultry Science**, v.49, p.1022-1026, 1970.

BRAMBATTI, A.; BRAMMER, S. P.; WIETHÖLTER, P.; NASCIMENTO JUNIOR, A. do. Genetic Stability in Triticales Estimated by Pollen Viability. **Arquivos do Instituto Biológico**, São Paulo, v.83, p.1-7, 2016.

BRASIL- Agência Nacional de Vigilância Sanitária, 1978. **Resolução – CNNPA nº 12**, de 1978. Disponível em <http://www.anvisa.gov.br/anvisa/legis/resol/12_78.pdf> Acesso em: 12 de fevereiro de 2019.

BRIGGS, D. E. *Malts and Malting*. Blackie Academic & Professional, New York. Chua, K.J., Mujumdar, A.S., Chou, S.K., 2003. Intermittent drying of bioproducts – **an overview**. **Bioresource Technology**, v.90, n.3, p.285-295 e 699-741, 1998.

BRISSART, R., BRAUNINGER, U., HAYDON, S., MORAND, R., PALMER, G., SAUVAGE, R., SEWARD, B. **Malting Technology: Manual of Good Practice**. EBC Technology and Engineering Forum. Nurembergue. 2000, 224p.

BRITO, L. M.; TAVARES, M. I. B. Desenvolvimento de nanocompósitos à base de amido de batata. **Polímeros**, v.23, n.6, p.771-777, 2013.

BRUM, P. A. R. de.; ZANOTTO, D. L.; GUIDONI, A. L.; ROSA, P. S.; LIMA, G. J. M. M de.; VIOLA, E. S. Triticale em dietas para frangos de corte. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.2, p.229-239, fevereiro 2000.

BULTOSSA, G.; HALL, A. N.; TAYLOR, J. R. N. Physico-chemical Characterization of Grain Tef Research Paper. **Starch/Stärke**, v.54, p.461-68, 2002.

CARVALHO, F. I. F.; NASCIMENTO JUNIOR, A. do; PIANA, C. F. B. Triticale. In: BARBIERI, R. L.; STUMPF, E. R. T. **Origem e Evolução de Plantas Cultivadas**. Embrapa Clima temperado (Informação tecnológica), Brasília/DF, p.853-890, 2008.

CARVALHO, G. R. de.; POLACHINI, T. C.; DARROS-BARBOSA, R.; BOM, J.; TELIS-ROMERO, J. Effect of intermittent high-intensity sonication and temperature on barley steeping for malt production. **Journal of Cereal Science**, v.82, p.138-145, July 2018.

CAVARIANI, C.; TOLEDO, M. Z.; RODELLA, R. A.; NETO, J. de B. F.; NAKAGAWA, J. Velocidade de hidratação em função de características do tegumento de sementes de soja de diferentes cultivares e localidades. **Revista Brasileira de Sementes**, v.31, n.1, p.30-39, 2009.

CAZATTA, D. A.; FORNASIERI FILHO, D.; ARF, ORIVALDO.; GERMANI, R. A qualidade industrial de cultivares de trigo e triticale submetidos à adubação nitrogenada no sistema de plantio direto. **Bragantia**, v.67, n.3, p.741-750, 2008.

CHACÓN, D. A.; JORGE, L. M. M. de.; JORGE, R. M. M. The impact of periodic operation on barley hydration. **Journal of Food Process Engineering**, v.43, n.2, 2019.

CHAVAN, J. K.; KADAM, S. S. Nutritional improvement of cereals by sprouting. **Critical Reviews in Food Science and Technology**, v.28, n.5, p.401-437, 1989.

CHUNG, H. J.; CHO, A.; LIM, S. T. Utilization of germinated and heat-moisture treated brown rices in sugar-snap cookies. **LWT - Food Science and Technology**, v.57, p.260-266, 2014.

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.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos, Safra 2019/20**, v.7, p.1-104, 2020.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira Grãos, Safra 2017/18**, v.5, p.1-120, 2017.

CORNEJO-RAMÍREZ, Y. I.; CINCO-MOROYOQUI, F. J.; RAMÍREZ-REYES, F.; ROSAS-BURGOS, E. C.; OSUNA-AMARILLAS, P. S.; WONG-CORRAL, F. J.; BORBOA-FLORES, J.; COSTA-GASTÉLUM, A. G. Physicochemical characterization of starch from hexaploid triticale (X Triticosecale Wittmack) genotypes. **CyTA-Journal of Food**, v.13, n.3, p.420-426, January 2015.

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

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

COUTINHO, M. R.; CONCEIÇÃO, W. A. dos S.; PARAÍSO, P. R.; ANDRADE, C. M. G.; OMOTO, E. S.; JORGE, R. M. M. J.; FILHO, R. M. Aplicação do modelo de Hsu à hidratação de grãos de soja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.30, n.1, p.19-29, Março 2010.

COZZOLINO, D.; ROUMELIOTIS, S.; EGLINTON, J. K. The role of total lipids and fatty acids profile on the water uptake of barley grain during steeping. **Food Chemistry**, v.151, p.231-235, 2014.

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

DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Optimization Study of Soybean Intermittent Drying in Fixed Bed. **Journal Drying Technology**, v.35, n.1, p.125-137, 2017.

DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. The Air Temperature Modulation Impact on the Drying of Soybeans in Fixed Bed. **Drying Technology**, v.34, n.5, p.516-529, 2016.

DEFENDI, R. O.; SILVA, R. O. da; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. M. Modelagem, simulação e análise da secagem de arroz em operação periódica, p. 12297-12304 In: **Anais do XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química - COBEQ 2014 [Blucher Chemical Engineering Proceedings, v.1, n.2]**, São Paulo: Blucher, 2014.

DENARDIN, C. C.; SILVA, L. P. da. Starch granules structure and its regards with physicochemical properties. **Ciência Rural online**, v.39, n.3, p.945-954, mai-jun 2009.

DENNETT, A. L.; SCHOFIELD, P. R.; ROAKE, J. E.; HOWES, N. K.; CHIN, J. Starch swelling power and amylose content of triticale and *Triticum timopheevii* germplasm. **Journal of Cereal Science**, v.49, n.3, p.393-397, May 2009.

DEWETTINCK, K.; VAN BOCKSTAELE, F.; KUHNE, B.; DE WALLE, D.V.; COUTENS, T. M. GELLYNCK, X. Nutritional value of bread: Influence of processing, food interaction and consumer perception. **Journal of Cereal Science**, v.48, n.2, p.243-257, September 2008.

EBC. EUROPEAN BREWERY CONVENTION. **Analytica-EBC**. Nürnberg: Verlag Hans Carl Getränke-Fachverlag, 2005.

EBC. EUROPEAN BREWERY CONVENTION. **Analytica-EBC**. 5th ed Zurique: Brauerei- und Getränke – Rundschau. 2000.

EBC. EUROPEAN BREWERY CONVENTION. **Analytica-EBC**. 5th ed Zurique: Brauerei- und Getränke – Rundschau. 1997.

EDITH, D. M. J.; DIMITRY, M. Y.; RICHARD, N.M.; LEOPOLD, T. N.; NICOLAS, N. Y. Physico-chemical characteristics and rehydration kinetics of five species of cucurbitaceae seeds. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v.11, n.2, p.736-745, June 2016.

EPM-Unifesp, Escola Paulista de Medicina – Universidade Federal de São Paulo. **Relatório básico: Triticale**, Departamento de informática em saúde. Disponível em: <<https://tabnut.dis.epm.br/alimento/20069/triticale>> Acesso em: 12 de setembro de 2018.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Crops**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC/visualize>>. Acesso em: 24 de agosto de 2020.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Crops**. Disponível em: <<http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC>>. Acesso em: 25 de abril de 2018.

FENNEMA, O. R.; SRINIVASAN, D.; PARKIN, K. L. **Química de Alimentos de Fennema**, 4ªed, Porto Alegre, editora Artmed, 2010, 900p.

FERREIRA, T.; RASBAND, W. (2012). **ImageJ User Guide IJ 1.46r**. <<http://rsb.info.nih.gov/ij/docs/guide/user-guide.pdf>>. Acesso em: 22 de abril de 2019.

FRACASSO, A. F.; FRIZON, C. N. T.; JORGE, L. M. de M.; JORGE, R. M. M. Hydration kinetics of transgenic soybeans. **Acta Scientiarum Technology**, v.37, n.1, p.141-147, 2015.

FRACASSO, A. F.; PERUSSELLO, C. A.; HAMINIUK, C. W. I.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Hydration kinetics of soybeans: Transgenic and conventional cultivars. **Journal of Cereal Science**, v.60, n.3, p.584-588, 2014.

FRÁS, A.; GOŁĘBIEWSKA, K.; GOŁĘBIEWSKI, D.; MAŃKOWSKI, D. R.; BOROS, D.; SZECÓWKA, P. Variability in the Chemical Composition of Triticale Grain, Flour and Bread. **Journal of Cereal Science**, v.71, p.66-72, June 2016.

FRITZ, J. Mittleeuropäische Brautechnisch Analysen Kommission - **MEBAK Raw Materials**. 1a ed ed. Freising- Weihenstephan: [s.n.], 2011.

GARVÍN, A.; AUGUSTO, P. E. D.; IBARAZ, R.; IBARZ, A. Kinetic and thermodynamic compensation study of the hydration of faba beans (*Vicia faba* L.). **Food Research International**, v.119, p.390-397, May 2019.

GEORG-KRAEMER, J. E.; MUNDSTOCK, E. C.; CAVALI-MOLINA, S. Developmental expression of amylases during barley malting. **Journal of Cereal Science**, v.33, n.3, p.279-288, May 2001.

GHAFOOR, 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, January 2014.

GLATTHAR, J.; HEINISCH, J.; SENN T. A study on the suitability of un malted triticale as a brewing adjunct **Journal of the American Society of Brewing Chemists**, v.60, n.4, p.181-187, June 2002.

GONELI, A. L. D.; CORRÊA, P. C.; AFONSO JÚNIOR, P. C.; OLIVEIRA, G. H. H. Cinética de secagem dos grãos de café descascados em camada delgada. **Revista Brasileira de Armazenamento**, n.11, p.64-73, 2009.

GORZOLKAA, K.; LISSEL, M.; KESSLERB, N.; LOCH-AHRINGC, S.; NIEHAUSA, K. Metabolite fingerprinting of barley whole seeds, endosperms, and embryos during industrial malting. **Journal of Biotechnology**, v.159, n.3 p.177-187, March 2012.

GOWEN, A.; GHANNAM, A. N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J. Modelling the water absorption process in chickpeas (*Cicer arietinum* L.) - The effect of blanching pretreatment on water intake and texture kinetics. **Journal of Food Engineering**, v.78, p.810-819, 2007.

GRUJIC, O. S.; PEJIN, J. D. The application of triticale malt as the substitute for barley malt in wort production. **Acta Periodical Technological**, v.38, p.117-126, January 2007.

GRUJIC, O. S.; PEJIN, J. D.; DENCIC, S. S. The influence of technological parameters on malt quality produced from different triticale varieties. **Zbornik Matice srpske za prirodne nauke**, v.116, p.297-303, January 2009.

HÁP, I.; PELIKÁN, M. Technologická jakost vybraných odrud triticale. **Rostlinná Vyroba**, v.41, p.351-356, 1995.

HASSANI, A.; ZARNKOW, M.; BECKER, T. Influence of malting conditions on sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) as a raw material for fermented beverages. **Food Science and Technology International**, v.20, n.6, p.453-463, June 2013.

HENEEN, W. K.; BRISMAR, K. Scanning electron microscopy of mature grains of rye, wheat and triticale with emphasis on grain shrivelling. **Hereditas**, v.107, n.2, p.147-162, December 1987.

HSU, K. H. Effect of Temperature on water diffusion in soybean. **Journal of Food Science**, v.48, p.1364-1365, 1983.

HUBNER, F.; SHEHL, B. D.; GEBRUERS, K.; COURTIN, C. M.; DELCOUR, J. A.; ARENDT, E. K. Influence of germination time and temperature on the properties of rye malt and rye malt based worts. **Journal of Cereal Science**, v.52, n.1, p.72-79, July 2010.

HUBNER, O. **Triticale**. Análise da conjuntura agropecuária safra 2007/08. Secretaria da Agricultura e do Abastecimento do Estado do Paraná Departamento de Economia Rural, 2008.

IBARZ, A.; GONZÁLEZ, C.; BARBOSA-CÁNOVAS, G. V. Kinetic models for water adsorption and cooking time in chickpea soaked and treated by high pressure. **Journal of Food Engineering** v.63, n.4, p.467-472, August 2004.

IGATHINATHANE, C.; CHATTOPADHYAY, P. K.; PORDESIMO, L. O. Combination soaking procedure for rough rice parboiling. **American Society of Agricultural Engineers**, v.48, n.2, p.665-671, 2005.

INSTITUTO ADOLF LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4ª ed., 1ª Edição digital, São Paulo, 2008.

ISO. International Organization for Standardization. **Determination de la teneur en amylose**. Norme ISO 66470. Switzerland, 1987, 3p.

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

JOHNNY, S.; RAZAVI, S. M.; KHODAEI, D. Hydration kinetics and physical properties of split chickpea as affected by soaking temperature and time. **Journal Food Science and Technology**, v.12, n.52, p.8377-8382, June 2015.

KAPTSO, K. G.; NJINTANG, Y. N.; KOMNEK, A. E.; HOUNHOUGAN, J.; SCHER, J.; MBOFUNG, C. M. F. 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, May 2008.

KASHIRI, M.; KASHANINEJAD, M.; AGHAJANI, N. Modeling water absorption of sorghum during soaking. **Latim American Applied Research**, v.40, p.383-388, June 2010.

KASHANINEJAD, M.; KASHIRI, M. Hydration kinetics and changes in some physical properties of wheat kernels. **Iranian Food Science & Technology Research Journal**, 3, 47-60, 2008.

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, April 2009.

KISSELL, L. T.; LORENZ, K. Performance of triticale flours in tests for soft wheat quality. **Cereal chemistry**, v.53, p.233-241, 1976.

KLOSE, C.; MAUCH, A.; WUNDERLICH, S.; THIELE, F.; ZARNKOW, M.; JACOB, F.; ARENDT, E. K. Brewing with 100% oat malt. **Journal of the Institute of Brewing**, v.117, n.3, p.411-421, 2011.

KUNZE, W. **Technology brewing and malting**. 2ª ed. Berlin: 1999, 726p.

LAURINDO J. B. Fundamentos de transferência de massa. In: Tadani, C.C.; Telis, V. R.N.; Meirelles, A.J.; Pessoa Filho, P. editores. Operações unitárias na Indústria de alimentos. Rio de Janeiro: LTC. 2016, 484p.

LEÓN, A. E. Utilización de harinas de triticale para elaborar galletitas dulces. **Molinería y Panadería**, v.1167, p.50-55, 2007.

LEÓN, A. E.; PÉREZ, G. T.; RIBOTTA, P. D. Triticale Flours: Composition, Properties and Utilization. **Food – Global Science Boks**, v.2, n.1, p.17-24, March 2008.

LEÓN, A. E.; RUBIOLO, A.; ANON, M. C. Use of triticale flours in cookies: quality factors. **Cereal Chemistry**, v.73, n.6, p.779-784, 1996.

LI, C.-Y.; LI, W.-H.; LEE, B.; LAROCHE, A.; CAO, L.-P.; LU, Z.-X. Morphological characterization of triticale starch granules during endosperm development and seed germination. **Canadian Journal of Plant Science**, v.91, n.1, p.57-67, January 2011.

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

LIMA, G. J. M. M. de.; VIOLA, E. S.; KRATZ, L. R. **Triticale na Alimentação Animal**. Embrapa suínos e aves (Circular técnica 28), Concórdia/SC, 2001.

LIMA, U. D. A. **Matérias-primas dos alimentos**. In: LIMA, U. D. A. (Ed.). São Paulo: [s.n.]. p. 91-104, 2010.

LISBÔA, J. F.; SILVA, J. N.; CAVALCANTI, M. T.; SILVA, E. M. C. A.; GONÇALVES, M. C. Análise da hidratação de grãos de alpiste. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.19, n.3, p.218-223, 2015.

LIU, H.; XIE, F.; CHEN, L.; YU, L.; DEAN, K.; BATEMAN, S. Thermal behavior of high amylose cornstarch studied by DSC. **International Journal of Food Engineering**, Berkeley, v.1, n.1, p.1-6, 2005.

LÓPEZ LÓPEZ, L. R.; ULLOA, J. A.; ULLOA, P. R.; RAMÍREZ RAMÍREZ, J. C.; CARRILLO, Y. S.; RAMOS, A. Q. Modelling of hydration of bean (*Phaseolus vulgaris*): effect of the low-frequency ultrasound. **Italian Journal of Food Science**, v.29, n.2, p.288-301, 2017.

LORENZ, K.; DILSAVER, W.; LOUGH, J. Evaluation of triticale in the manufacture of moodier. **Journal Food. Science**, v.37, n.5, p.764-767, 1972.

LORENZ, K.; ROSS, M. Baking properties of NZ grown triticales. **Food Technology**, v.8, p.35-39, May 1986.

MADAMBA, P. S. Thin layer drying models for osmotically pré-dried young coconut. **Drying technology**, v.21, n.9, p.1759-1780, 2003.

MADAMBA, P. S.; DRISCOLL, R. H.; BUCKLE, K. A. The thin layer drying characteristics of garlic slices. **Journal of Food Engineering**, v.29, n.11, p.75-98, 1996.

MAKOWSKA, A.; BARANOSKA, H. M.; MICHNIEWICZ, J.; CHUDY, S.; KOWALCZEWSKI, P. L. Triticale extrudates – Changes of macrostructure, mechanical properties and molecular water dynamics during hydration. **Journal of Cereal Science**, v.74, p.250-255, March 2017.

MAKOWSKA, A.; SZWENGIEL, A.; KUBIAK, P.; TOMASZEWSKA-GRAS, J. Characteristics and structure of starch isolated from triticale. **Starch/Stärke**, v.66, n.9-10, p.895-902, September 2014.

MANLEY, M.; McGOVERIN, C. M.; SNYDERS, F.; MULLER, N.; BOTES, W. C.; FOX, G. P. Prediction of triticale grain quality properties, based on both chemical and indirectly measured reference methods, using near-infrared spectroscopy. **Cereal Chemistry**, v.90, n.6, p.540-545, November 2013.

MARCINIAK, A.; OBUCHOWSKI, W.; MAKOWSKA, A. Technological and nutritional aspects of utilization triticale for extruded food production. **Food Science and Technology**, v.11, p.3-7, 2008.

MÁRIO, A. C.; AUGUSTO, P. E. D. From the sigmoidal to the downward concave shape behavior during the hydration of grains: Effect of the initial moisture content on Adzuki beans (*Vigna angularis*). **Food and Bioproducts Processing**, v.96, p.43-51, October 2015.

MARQUES, B. C.; JORGE, L. M. de M.; JORGE, R. M. M. Chemical properties and water absorption kinetics of transgenic corn grain (2B587 Hx) and its conventional isolate (2B587). **Journal of Cereal Science**, v.71, p.93-98, 2016.

MARQUES, B. C.; JORGE, L. M. de M.; JORGE, R. M. M. Hydration kinetics, physicochemical composition, and textural changes of transgenic corn kernels of Flint, semi-flint, and dent varieties. **Food Science and Technology**, v.34, n.1, p.88-93, 2014.

MARTINEK, P.; VINTEROVA, M.; BUREGOVA I.; VYHNANEK, T. Agronomic and quality characteristics of triticale (*x Triticosecale* Wittmack) with HMW glutenin subunits 5 + 10. **Journal Cereal Science**, v.47, n.1, p.68-78, January 2008.

MARTINEZ, C. S.; RIBOTTA, P. D.; LEON, A. E.; AÑON, M. C. Colour assessment on bread heat and triticale fresh pasta. **International Journal of Food Properties**, v.15, n.5 p.1054-1068, September 2012.

MASKAN, M. Effect of maturation and processing on water uptake characteristics of wheat. **Journal of Food Engineering**, v.47, n.1, p 51-57, January 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, May 2002.

MATA, M. E. R. M. C.; DUARTE, M. E. M. Porosidade intergranular de produtos agrícolas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.4, n.1, p.79-93, 2002.

MATTIODA, F.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Evaluation of water diffusivity in wheat hydration (*Triticum* spp): Isothermal and periodic operation. **Journal of Food Process Engineering**, v.41, n.2, March 2018.

MATTIODA, F.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Mathematical modeling of wheat hydration: Process and starch properties. **Journal of Food Process Engineering**, v.42, n.1, February 2019^a.

MATTIODA, F.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Wheat hydration process intensification by periodic operation. **Journal of Food Engineering**, v.246, p.153-159, April 2019^b.

McGOVERIN, C. M.; SNYDERS, F.; MULLER, N.; BOTES, W.; FOX, G.; MANLEY, M. A Review of Triticale Uses and the Effect of Growth Environment on Grain Quality. **Journal Science Food Agriculture**, v.91, n.7, p.1155-1165, May 2011.

McMINN, W. A. M.; MAGEE, T. R. A. Thermodynamic properties of moisture sorption of potato. **Journal of Food Engineering**, v. 60, p.157-165, 2003.

MERCIER, S.; VILLENEUVE, S.; MONDOR, M.; MORESOLI, C.; MARCOS, B. Modeling of the water absorption during the steeping of yellow peas. **Food and Bioproducts Processing**, v.94, p.20-28, April 2015.

MIANO, A. C.; AUGUSTO, P. E. D. From the sigmoidal to the downward concave shape behavior during the hydration of grains: effect of the initial moisture content on Adzuki beans (*Vigna angularis*). **Food and Bioproducts Processing**, v.96, p.43-51, October 2015.

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

MIANO, A. C.; FORTI, V. A.; ABUD, H. F.; GOMES-JUNIOR, F. G.; CICERO, S. M.; AUGUSTO, P.E.D. Effect of ultrasound technology on barley seed germination and vigour. **Seed Science and Technology**, v.43, n.2, p.297-302, August 2015.

MIANO, A. C.; GARCÍA, J. A.; AUGUSTO, P. E. D. Correlation between morphology, hydration kinetics and mathematical models on Andean lupin (*Lupinus mutabilis* Sweet) grains. **LWT – Food Science and Technology**, v.61, n.2, p.290-298, May 2015.

MIANO, A. C.; IBARZ, A.; AUGUSTO, P. E. D. Mechanisms for improving mass transfer in food with ultrasound technology: describing the phenomena in two model cases. **Ultrasonics Sonochemistry**, v.29, p.413-419, March 2016.

MIANO, A. C.; IBARZ, A.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound technology enhances the hydration of corn kernels without affecting their starch properties. **Journal of Food Engineering**, v.197, p.34-43, March 2017.

MIANO, A. C.; PEREIRA, J. DA C.; CASTANHA N.; JÚNIOR, M. D. DA M.; AUGUSTO, P. E. D. Enhancing mung bean hydration using the ultrasound technology: description of mechanisms and impact on its germination and main components. **Scientific Reports Rep-Uk**, 6:38996, p.1-14, December 2016.

MIANO, A. C.; SABADOTI, V.; D.; AUGUSTO, P. E. D. Enhancing the hydration process of common beans by ultrasound and high temperatures: Impact on cooking and thermodynamic properties. **Journal of Food Engineering**, v.225, p.53-61, May 2018.

MIKULSKI, D.; KŁOSOWSKI, G. Phytic acid concentration in selected raw materials and analysis of its hydrolysis rate with the use of microbial phytases during the mashing process. **Journal of the Institute of Brewing**, v.121, n.2, p.213-218, March 2015.

MOHAPATRA, D.; RAO, P. S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, v. 66, p. 513-518, 2005.

MOHSENIN, N. N. **Physical properties of plant and animal materials**. New York: Gordon and Breach, 1986. 841p.

MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. de 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.363-572, March 2015.

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

MONTANUCI, F. D.; PERSUSSELLO, C. A.; JORGE, L. M. de M.; JORGE, R. M. M. Experimental analysis and finite element simulation of the hydration process of barley grains. **Journal of Food Engineering**, v.131, p.44-49, 2014.

MONTEIRO, R. L.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. A microwave multi-flash drying process for producing crispy bananas. **Journal of Food Engineering**, v.178, p.1-11, 2016.

MORI, C. de.; NASCIMENTO JUNIOR, A. do.; MIRANDA, M. Z. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura de triticale no mundo e no Brasil**. Embrapa Trigo (Documentos on line 150), Passo Fundo/RS, 2014.

MUNOZ-INSA, A.; GASTL, M.; BECKER, T. Influence of Malting on the Protein Composition of Triticale (X Triticosecale Wittmack) 'Trigold'. **Cereal Chemistry**, v.93, n.1, p.10-19, June 2016a.

MUNOZ-INSA, A.; GASTL, M.; BECKER, T. Variation of sunstruck flavor-related substances in malted barley, triticale and spelt. **European Food Research and Technology**, v.242, p.11-23, August 2016b.

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

NAEEM, H. A.; DARVEY, N. L.; GRASS, P. W.; MACRITCHIE, F. Mixing properties, baking potential, and functionality changes in storage proteins during development of triticale-wheat flour blends. **Cereal Chemistry**, v.79, p.332-339, 2002.

NAKURTE, I.; KLAVINS, K.; KIRHNERE, I.; NAMNIECE, J.; ADLERE, L.; MATVEJEVS, J.; KRONBERGA, A.; KOKARE, A.; STRAZDINA, V.; LEGZDINA, L.; MUCENIECE, R. Discovery of lunasin peptide in triticale (X Triticosecale Wittmack). **Journal of Cereal Science**, v.56, n.2, p.510-514, September 2012.

NASCIMENTO JUNIOR, A.; SCHEEREN, P. L.; SILVA, M.; CAIERÃO, E.; EICHELBERGER, L.; LIMA, M. I. P. M.; BRAMMER, S. P.; ALBUQUERQUE, A. C. S. BRS Minotauro - Triticale cultivar. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, Londrina, v.8, n.2, p.174-176, 2008.

NAVARRO-CONTRERAS, A. L.; CHAIRES-GONZÁLEZ, C. F.; ROSAS-BURGOS, E. C.; BORBOA-FLORES, J.; WONG-CORRAL, F. J.; CORTEZ-ROCHA, M. O.; CINCO-MOROYOQUI, F. J. Comparison of protein and starch content of substituted and complete triticales (X Triticosecale Wittmack): Contribution to functional properties. **International Journal of Food Properties**, v.17, n.2, p.421-432, October 2013.

NAVIGLIO, D.; FORMATO, A.; PUCILLO, G. P.; GALLO, M. A cyclically pressurised soaking process for the hydration and aromatisation of cannellini beans. **Journal of Food Engineering**, v.116, p.765-774, 2013.

NICOLIN, D. J., MARQUES, B. C., BALBINOTI, T. C. V., JORGE, R. M. M., JORGE, L. M. D. M. Modeling rice and corn hydration kinetic by Nicolin-Jorge model. **Journal of Food Process Engineering**, v.40, n.6, 2017.

NICOLIN, D. J.; NETO, R. M.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, R. M. M.; JORGE, L. M. M. Analytical solution and experimental validation of a model for hydration of soybeans with variable mass transfer coefficient. **Journal of Food Engineering**, v.149, p.17-23, 2015.

NIEDZIELA, A.; BEDNAREK, P.T.; LABUDDA, M.; MAŃKOWSKI, D.R.; ANIOŁ, A. Genetic Mapping of a 7R AI Tolerance QTL in Triticale (*x Triticosecale* Wittmack). **Journal Applied Genetics**, v.55, n.1, p.1-14, November 2014.

OETTLER G. The Fortune of a Botanical Curiosity – Triticale: Past, Present and Future. **The Journal of Agricultural Science**, v.143, n.5, p.329-346, October 2005.

OLADELE, S. O.; AGBETOYE, L. A. S.; OSUNDAHUNSI, O. F.; AUGUSTO, P. E. D. Oat hydration kinetics at different temperatures: Evaluation, model, and validation. **Journal of Food Process Engineering**, v.42, n.6, May 2019.

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, March 2014.

OLIVEIRA, A. L.; COLNAGHI, B. G.; SILVA, E. Z. D.; GOUVEA, I. R.; VIEIRA, R. L.; AUGUSTO, P. E. D. 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, October 2013.

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

ONWULATA, C. I.; KONSTANCE, R. P.; STRANGE, E. D.; SMITH, P.W.; HOLSINGER, V. H. High-fiber snacks extruded from triticale and wheat formulations. **Cereal Foods World**, v.45, n.10, p.470-473, October 2000.

ORMOND, A. T. S.; NUNES, J. A. S.; CANEPPELE, C.; SILVA, S. L. S. da.; PEREIRA, M. T. J. Análise das características físicas de sementes de trigo. **Enciclopédia Bioesfera**, v.9, n.17, p.108-114, dezembro 2013.

OROIAN, M. The temperature hydration kinetics of *Lens culinaris*. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.16, p.250-256, August 2017.

OULAHNA, D.; HEBRARD, A.; CUQ, B.; ABECASSIS, J.; FAGES, J. Agglomeration of durum wheat semolina: Thermodynamic approaches for hydration properties measurements. **Journal of Food Engineering**, v. 109, p. 619-626, 2012.

OWENS, G. Cereal processing technology. In: EVANS, E. J. **Cereal production methods**. CRC Press. 2001.

PALMER, G. H. **Barley and malt**. In: Priest, F.G., Stewart, G.G. (ed.) - Handbook of Brewing. CRC Press, p.139-160, 2006.

PALMER, G. H. **Cereal Science and Technology**. Aberdeen University Press, p. 61-242, 1989.

PAPE, G.; MAZZARI, M. R.; CHAVES, J. B. P. R CAMPOS, J. E. Estudo comparativo das qualidades tecnológicas de dezoito cultivares de tritcale. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE CIENCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS**. 4° Rio de Janeiro, 1980, 82p.

PAQUET-DURAND, O.; ZETTEL, V.; KOHLUS, R.; HITZMANN, B. Optimal design of experiments and measurements of the water sorption process of wheat grains using a modified Peleg model. **Journal of Food Engineering**, v.165 p.166-171, June 2015.

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

PATTISON, A. L.; TRETOWAN, R. M. Characteristics of modern tritcale quality: Commercially significant flour traits and cookie quality **Crop and Pasture Science**, v.64, n.9, p.874-880, November 2013.

PEJIN, D.; MOJOVIC, L.J.; VUCUROVIC, V.; PEJIN, J.; DENCIC, S.; RAKIN, M. Fermentation of wheat and tritcale hydrolysates: a comparative study. **Fuel**, v.88, n.9, p.1625-1628, September 2009.

PELEG M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal Food Science**, v.53, p.1216-1217, 1988.

PEÑA, R. J.; AMAYA, A. Milling and breadmaking properties of wheat-tritcale grain blends. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v.60, p.483-487, 1992.

PENG, M.; GAO, M.; BAGHA, M.; HUCL, P.; CHIBBAR, R. N. Starch-branching enzymes preferentially associated with A-type starch granules in wheat endosperm. **Plant Physiology**, v.124, p.265-272, 2000.

PINEDA-GÓMEZ, P.; ROSALES-RIVERA, A.; RODRÍGUEZ-GARCÍA, M. E. Modeling calcium and water intake in threshed corn grain during thermo-alkaline treatment. **Journal of Food Engineering**, v.113, n.3, p.434-441, December 2012.

POMERANZ, Y.; BURKHART, B. A.; MOON, L. C. Tritcale in malting and brewing. in proc. **Annual meeting, American Society Brewing Chemists**, p.40-46, 1970.

PRAMIU, P. V.; RIZZI, R. L.; ANTUNES, F. C. A.; DENES F. M.; COELHO, S. R. M. Solutions and parameterizations of common bean (*Phaseolus vulgaris*) rehydration models at different temperatures and pressures. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.42, n.2, June 2017.

PRAMIU, P. V.; RIZZI, R. L.; PRADO, N. V. do.; COELHO, S. R. M; Bassinello, P. Z. Numerical modeling of chickpea (*Cicer arietinum*) hydration: The effects of temperature and low pressure. **Journal of Food Engineering**, v.165, p.112-123, November 2015.

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, March 2010.

QI. J. C.; ZHANG. G.P.; ZHOU. M. X. Protein and hordein content in barley seeds as affected by nitrogen level and their relationship to beta-amylase activity. **Journal of Cereal Science**, v.43, n.1, p.102-107, January 2006.

RAKHA, A.; ÅMAN, P.; ANDERSSON, R. Dietary fiber in triticale grain: Variation in content, composition, and molecular weight distribution of extractable components. **Journal of Cereal Science**, v.54, n.3, p.324-331, November 2011.

RAMASWAMY, R.; BALASUBRAMANIAM, V. M.; SASTRY, S. K. Effect of high pressure and irradiation treatments on hydration characteristics of navy beans. **International Journal of Food Engineering**, v.1, n.4. <https://doi.org/10.2202/1556-3758.1024>, 2005.

RAMOS, J. M.; GARCÍA DEL MORAL, L. F.; BOUJENNA, A.; SERRA, J.; INSA, J. A.; ROYO, C. Grain yield, biomass and leaf area of triticale in response to sowing date and cutting stage in three contrasting Mediterranean environments. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v.126, n.3, p.253-258, May 1996.

RANJBARI, A.; KASHANINEJAD, M.; AALAMI, M.; KHOMEIRI, M.; GHAREKHANI, M. Effect of ultrasonic pre-treatment on water absorption characteristics of chickpeas (*Cicer arietinum*). **Latin American Applied Research**, v.43, p.153-159 2013.

RATHJEN, J.R.; STROUNINA, E. V.; MARES, D. J. Water movement into dormant and non-dormant wheat (*Triticum aestivum* L.) grains. **Journal of Experimental Botany**, v.60, n.6, p.1619-1631, 2009.

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, p.391-396, 2003.

ROMERO, V.; BORNEO, R.; PASSALACQUA, N.; AGUIRRE, A. Biodegradable films obtained from triticale (x *Triticosecale* Wittmack) flour activated with natamycin for cheese packaging. **Food Packaging and Shelf Life**, v.10, p.54-59, September 2016.

ROSENBERGER A.; KAUL H P.; SENN T.; AUFHAMMER W. Costs of bioethanol production from winter cereals: the effect of growing conditions and crop production intensity levels. **Industrial Crops and Products**, v.15, n.2, p.91-102, March 2002.

SÁNCHEZ, L.; PEIRÓ, J. M.; CASTILLO, M.; PÉREZ, M. D.; ENA, J. M.; CALVO, M. Kinetic parameters for denaturation of bovine milk lactoferrin. **Journal of Food Science**, v.57, n.4, p.873-879, 1992.

SCHLEGEL, R. Triticale – Today and Tomorrow. In: Guedes-Pinto, H.; Darvey, N.; Carnide, V.P.; (Ed) *Triticale: Today and Tomorrow*. **Developments in Plant Breeding**. Germany: Springer, 1996. p.21-31.

SCHMITT, M. R.; MARINAC, L. Beta-amylase degradation by serine endoproteinas from green barley malt. **Journal of Cereal Science**, v.47, n.3, p.480-488, May 2007.

SENAI, Serviço Nacional de Aprendizagem Industrial. **Tecnologia Cervejeira**. Cap. 2.: Processo de Fabricação da Cerveja – RJ, p.48-94, 2014

SERNA-SALDIVAR, S.O.; GUAJARDO-FLORES, S.; VIESCA-RIOS, R. Potential of triticale as a substitute for wheat in flour tortilla production. **Cereal Chemistry**, v.81, n.2, p.220-225, March/April 2004.

SHAFAEI, S. M.; MASOUMI, A. A.; ROSHAN, H. Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg model. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v.15, n.2; p.135-144, June 2016.

SHANNON, J. C.; GARWOOD, D. L. Genetics and physiology of starch development. In: WHISTLER, R. L.; BEMILLER, J. N.; PASCHALL, J. F. (Eds). **Starch Chemistry and Technology**. Academic P ed. San Diego: 1984, p.25-86.

SHARANAGAT, V. S.; KANSAL, V.; KUMAR, K. Modeling the effect of temperature on the hydration kinetic whole moong grain. **Journal of the Saudi Society of Agriculture Sciences**, v.17, n.3, p.268-274, July 2018.

SHARMA. P.; GUJRAL. H. S.; ROSELL. C. M. R. Effects of roasting on barley b-glucan. thermal. textural and pasting properties. **Journal of Cereal Science**, v.53, p.25-30, 2011.

SHIN, H. K.; BAE, S. H.; PACK, M. Y. Nutritional quality and food making performance of some triticale lines grown in Korea. **Korean Journal Food Science and Technology**, v.12, p.59-65, 1980.

SILVA, D. A. R. O. da.; JORGE, L. M. de M.; JORGE, R. M. M. Kinetics study and modelling of sorghum grain hydration. **Revista Ciência Agronômica**, v.50, n.1, Jan-Mar 2019.

SILVESTON, P. L. **Composition modulation of catalytic reactors**. University of Waterloo, 1 ed. Cap.1, Canada, 1998.

SILVESTON, P. L.; HUDGINS, R. R. **Periodic operation of reactors**. Elsevier, 775p. 2013.

SLATTERY, C. J.; KAVAKLI, I. H.; OKITA, T. W. Engineering starch for increased quantity and quality. **Trends in Plant Science**, v.5, n.7, p.291-298, July 2000.

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.

SOWA, W.; CYGANKIEWICZ, A.; GIELO, S.; KRYSIAK, H. High gluten content and good baking quality of new triticale strains. **Hodowla Roslin Aklimatyzacja i Nasiennictwo**, v.39, p.81-84, 1995.

STASIUK. M.; KOZUBEK, A. Biological activity of phenolic lipids **Cellular and Molecular Life Sciences**, v.67, p.841-860, 2010.

STEFFE, J. R.; SINGH, R. P. Note of volumetric reduction of short grain rice during drying. **Cereal Chemistry**, v.57, p.148-150, 1980.

STERMAN, L. E.; YDSTIE, B. E. The steady-state process with periodic perturbations. **Chemical Engineering Science**, v.45, n.3, p.721-736, 1990

TESTER, R. F.; KARKALAS, J. Q. X. Starch – composition, fine structure and architecture. **Journal Cereal Science**, v.39, n.2, p.151-165, March 2004.

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.

TOMBROS, B. S.; BRIGGS, D. E. Micromalting Triticale. **Journal of the Institute of Brewing**, v.90, n.4, July/August 1984.

TSCHOPE, E. C. **Microcervejarias e cervejas: A história, a arte e a tecnologia**. São Paulo: Editora Aden 2001, 223p.

TSCHOPE, E. C.; NOHEL. **A malteação da cevada**. Vassouras: Senai-RJ, 1999.

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

UENO, S.; SHIGEMATSU, T.; KARO, M.; HAYASHI, M.; FUJII T. Effects of high hydrostatic pressure on water absorption of adzuki beans. **Foods**, v.4, n.2, p.148-158, June 2015.

ULLOA, J. A.; ENRÍQUEZ LÓPEZ, K. V.; CONTRERAS MORALES, Y.B.; ULLOA, R.; Ramírez Ramírez, J. C.; Ulloa Rangel, B.E. Effect of ultrasound treatment on the hydration kinetics and cooking times of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). **Cyta-Journal of Food**, p.1-9, 2015.

URIARTE-ACEVES, P. M., RANGEL-PERAZA, J. G., SOPADE, P. A. Kinetics of water absorption and relation with physical, chemical, and wet-milling properties of commercial yellow maize (*Zea mays* L.) hybrids. *Journal of Food Process Engineering*, 2020. e14509. <https://doi.org/10.1111/jfpp.14509> .

USAD. National Nutrient Database for Standard Reference. **Basic Report 20069, Triticale**. Disponível em: <<https://ndb.nal.usda.gov/ndb/foods/show/20069?fgcd=&manu=&format=&count=&max=25&offset=&sort=default&order=asc&qlookup=triticale&ds=&qt=&qp=&qd=&qn=&qf=&ing=>> Acesso em: 28 de maio de 2018.

VACA-GARCÍA, V. M.; MARTÍNEZ-RUEDA, C. G.; MARIEZCURRENA-BERASAIN, M. D.; DOMINGUEZ-LOPEZ, A. Functional properties of tortillas with triticale flour as a partial substitute of nixtamalized corn flour. **LWT–Food Science and Technology**, v.44, n.6, p.1383-1387, July 2011.

VARUGHESE, G.; BARKER, T.; SAARI, E. **Triticale**. México: CIMMYT, p.32, 1987.

VENGAIAH, P. C.; RAIGAR, R. K.; SRIVASTAV, P. P.; MAJUMDAR, G. C. Hydration characteristics of wheat grain. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v.14, n.1, 2012.

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.

WISNIEWSKA, P.; SLIWNSKA, M.; DYMERSKI, T.; WARDENCKI, W.; NAMIESNIK, J. Differentiation between spirits according to their botanical origin. **Food Analytical Methods**, v.9, n.4, p.1029-1035, April 2016.

WIWART, M.; MOS, M.; WÓJOWICZ, T. Studies on the imbibition of triticale kernels with a different degree of sprouting, using digital shape analysis. **Plant Soil Environ**, v.52, n.7, p.328-334, 2006

WROBEL, R.; JONES, B. L. Electrophoretic study of substrate and pH dependence on endoproteolytic enzymes in green malt. **Journal of the Institute of Brewing**, v.98, p.471-478, 1992.

XIAO, Z.; STORMS, R.; TSANG, A. A quantitative starch-iodine method for measuring alpha-amylase and glucoamylase activities. **Analytical Biochemistry**, v.351, n.1, p.146-148, April 2006.

YILDIRIM, A.; ONER, M. D.; BAYRAM, M. Effect of soaking and ultrasound treatments on texture of chickpea. **Journal Food Science and Technology**, v.50, n;3; p.455-465, June 2013.

YILDIRIM, A.; ONER, 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, p.134-142, 2011.

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.

ZANELLA-DÍAZ, E.; MÚJICA-PAZ, H.; SOTO-CABALLERO, M. C.; WELTI-CHANES J.; VALDEZ-FRAGOSO A. Quick hydration of tepary (*Phaseolus acutifolius* A. Gray) and pinto beans (*Phaseolus vulgaris* L.) driven by pressure gradients **LWT – Food Science and Technology**, v.59, n.2, part 1, p.800-805, December 2014.

ZANOTO, M.; BRAMMER, S. P.; NASCIMENTO JUNIOR, A. do.; SCAGLIUSI, S. M. A viabilidade polínica como Seleção Assistida no Programa de Melhoramento Genético de Triticale. **Ciência e Agrotecnologia**, v.33, p.2078-2082, 2009.

ZECEVIC, V.; KNEZEVIC, D.; BOSKOVIC, J.; MILENKOVIC, S. Effect of nitrogen and ecological factors on quality of winter triticale cultivars. **Genetical**, v.42, n.3, p.465-474, January 2010.

ZHOU, Z.; ROBARDS, K.; HELLIWELL, S.; BLANCHARD, C. Composition and functional properties of rice. **International Journal of Food Science and Technology**, v.37, n.8, p.849-868, December 2002.

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.

ZHU, F. Triticale: Nutritional Composition and Food Uses. **Food Chemistry**, v.241, n.15, p.468-479, February 2018.

ZOTARELLI, M. F.; PORCIUNCULA, B. D. A.; LAURINDO, J. B. A convective multi-flash drying process for producing dehydrated crispy fruits. **Journal of Food Engineering**, v.108, p. 523-531, 2012.

ZSCHOERPER, O. P. **Apostila curso cervejeiro e malteador – AMBEV**. Porto Alegre: Ambev, 2009, 71p.