

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

KATLYN THAIS NALEPA VITURINO

ESTUDO DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO E FORTIFICAÇÃO DO FEIJÃO
CARIOCA BRS FC310 PARA PRODUÇÃO DE MALTES E BEBIDAS

CURITIBA

2023

KATLYN THAIS NALEPA VITURINO

ESTUDO DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO E FORTIFICAÇÃO DO FEIJÃO
CARIOCA BRS FC310 PARA PRODUÇÃO DE MALTES E BEBIDAS

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Química – PPGEQ, Setor de Tecnologia da Universidade Federal do Paraná como requisito parcial obtenção do grau de Mestre em Engenharia Química.

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Regina Maria Matos Jorge
Co-Orientador: Prof Dr Luiz Mário de Matos Jorge
Co-Orientador: Prof Dr Alexandre Ferreira Santos

CURITIBA

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA CIÊNCIA E TECNOLOGIA

Viturino, Katlyn Thais Nalepa

Estudo da cinética de hidratação e fortificação do feijão carioca brs FC310 para produção de maltes e bebidas. / Katlyn Thais Nalepa Viturino. – Curitiba, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química.

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

Coorientador: Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge

Coorientador: Prof. Dr. Alexandre Ferreira Santos

1. Germinação. 2. Grãos (Fortificação). 3. Modelagem Matemática. I. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. II. Jorge, Regina Maria Matos. III. Jorge, Luiz Mário de Matos. IV. Santos, Alexandre Ferreira. V. Título.

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 QUÍMICA
- 40001016056P9

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA QUÍMICA da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **KATLYN THÁIS NALEPA VITURINO** intitulada: **ESTUDO DA CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO E FORTIFICAÇÃO DO FEIJÃO CARIOCA BRS FC310 PARA PRODUÇÃO DE MALTES E BEBIDAS**, sob orientação da Profa. Dra. REGINA MARIA MATOS JORGE, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestra 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, 29 de Novembro de 2023.

Assinatura Eletrônica

29/11/2023 17:00:32.0

REGINA MARIA MATOS JORGE

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

29/11/2023 16:57:15.0

FERNANDO AUGUSTO PEDERSEN VOLL

Avaliador Interno (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

01/12/2023 16:15:26.0

ALVARO LUIZ MATHIAS

Avaliador Externo (PPGMAUI)

Dedico este trabalho aos meus pais, Ivone e Felix, aos meus irmãos Alexandre, Vitória e Maira e ao meu esposo Rodolfo, por todo suporte e incentivo.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço ao Senhor Deus, por todas as bênçãos que têm me proporcionado, pelo seu amor e força necessários para trilhar este caminho e por me guiar sempre.

Agradeço aos meus pais, Ivone Pedroso e Felix Nalepa pelos valores, ensinamentos, carinho e suporte dedicados a mim durante toda minha vida. Aos meus irmãos Alexandre J. Ventura, Vitória S. Ventura e Maira Luiza do qual não consigo expressar em palavras a importância de vocês em minha vida. Vocês são a razão de tudo. Obrigada por sempre permanecerem ao meu lado.

Ao meu marido, Rodolfo Viturino N. da Silva, quero dedicar uma gratidão especial. Você foi a pessoa mais fundamental nessa caminhada, trilhando esse sonho comigo diariamente. Agradeço por seu amor, companheirismo inabalável e paciência infinita.

À minha querida amiga, Estefany de Andrade, meu braço direito e minha maior fonte de inspiração para encarar a vida com leveza e jamais desistir dos meus sonhos, meu profundo agradecimento.

À minha orientadora Dr^a Regina Maria Matos Jorge e co-orientadores Dr. Luiz Mário de Matos Jorge e Dr. Alexandre Ferreira Santos expesso minha gratidão pela oportunidade, confiança e parceria ao longo do desenvolvimento deste projeto.

Agradeço aos professores e aos membros da banca avaliadora por suas valiosas contribuições na discussão e enriquecimento deste trabalho.

Gratifico aos colegas e amigos de laboratório, em especial ao grupo de pesquisa do Laboratório de Engenharia de Processos em Sistemas Particulados – LEPSP, pela amizade e convivência neste período.

Agradeço à EMBRAPA pela doação das amostras e a Central Analítica, ao Centro de Microscopia Eletrônica (CME), ao Laboratório de Química Analítica Aplicada (LQAA) e ao Laboratório de Pesquisa e Pós-Graduação em Alimentação e Nutrição (PPGAN) por concederem seu tempo, conhecimento e estrutura.

À UFPR e à Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal do Paraná (UFPR) pela realização desta pesquisa.

E por fim, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES, pela bolsa de estudo concedida.

Minha sincera gratidão!

Estou entre aqueles que pensam que a ciência tem uma grande beleza.

Marie Curie

RESUMO

O Feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) é umas das principais leguminosas cultivada e consumida no mundo, sendo o Brasil atualmente o segundo maior produtor, com o estado do Paraná líder em produção. Entre as classes de feijões, o feijão carioca se destaca por ser o único consumido em todo território nacional. A cultivar BRS FC310, é uma cultivar de feijão carioca que possui alta resistência a doenças no cultivo e fornece a população minerais como ferro, cálcio, zinco, entre outros, além do seu alto valor proteico. Comumente, leguminosas como o feijão carioca são hidratadas a fim de facilitar seu processamento e reduzir antinutrientes. Diante disso, o presente trabalho tem como objetivo intensificar o processo de hidratação e fortificação da cultivar BRS FC310 através da operação periódica, mediante modulação da temperatura da água, com o intuito de verificar se a cinética de hidratação é intensificada e possíveis alterações nos compostos bioativos presentes nos grãos hidratados e germinados, visando a produção de maltes e bebidas. Para isso, os grãos foram hidratados em operação isotérmica, a 10, 20, 30, 40, 50 e 60 °C, e posteriormente em operação periódica a 20, 30 e 40°C, aplicando uma amplitude de 10 °C e período de 5 minutos. Para entender a dinâmica do processo de hidratação foram empregados os modelos de Peleg, Page, Miano-Ibarz-Augusto, Omoto-Jorge, Nicolin-jorge e Difusão. 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 Miano-Ibarz-Augusto apresentou os melhores resultados de qualidade do ajuste (R^2 , P e RMSE). As propriedades termodinâmicas indicam um processo energeticamente não espontâneo e endotérmico. As germinações foram realizadas a partir das sementes hidratadas isotermicamente e periodicamente, com e sem adição de sulfato de ferro, obtendo-se uma porcentagem de germinação de até 82,0%. Verificou-se que o teor de compostos fenólicos, flavonoides e taninos e a capacidade antioxidante (quantificada pelos métodos DPPH, ABTS e FRAP) diminuíram ao hidratar os grãos, apresentando redução mais drástica em temperaturas mais elevadas. Considerando que a utilização da operação periódica não causou uma diferença expressiva no potencial antioxidante da cultivar, esta metodologia (nas condições de temperatura avaliadas) é fortemente recomendada, tendo em vista seu efeito intensificador sobre a cinética de hidratação, com redução do tempo de processamento e, conseqüentemente, do consumo de água e dos gastos energéticos.

Palavras-chave: Germinação, Fortificação de grãos, Intensificação de processos, Modelagem matemática, Modulação da temperatura.

ABSTRACT

Beans (*Phaseolus vulgaris* L.) are one of the main legumes cultivated and consumed in the world. Brazil is currently the second largest producer, with the state of Paraná leading in production. Among the classes of beans, carioca beans stand out for being the only ones consumed throughout the country. The BRS FC310 cultivar is a carioca bean cultivar that has high resistance to diseases in cultivation and provides the population with minerals such as iron, calcium, zinc, among others, in addition to its high protein value. Commonly, legumes such as carioca beans are hydrated in order to facilitate their processing and reduce antinutrients. Therefore, the present work aims to intensify the hydration and fortification process of the BRS FC310 cultivar through periodic operation, by modulating the water temperature, with the aim of verifying whether the hydration kinetics is intensified and possible changes in the bioactive compounds. present in hydrated and germinated grains, aimed at the production of malts and beverages. For this, the grains were hydrated in isothermal operation, at 10, 20, 30, 40, 50 and 60 °C, and later in periodic operation at 20, 30 and 40 °C, applying an amplitude of 10 °C and period of 5 minutes. To understand the dynamics of the hydration process, the Peleg, Page, Miano-Ibarz-Augusto, Omoto-Jorge, Nicolin-jorge and Diffusion models were used. By adjusting the models to the data, it was found that the increase in temperature provides an increase in the water transfer rate in the grain, and the hydration process is intensified with the use of periodic operation. The Miano-Ibarz-Augusto model presented the best results for goodness of fit (R^2 , P and RMSE). Thermodynamic properties indicate an energetically non-spontaneous and endothermic process. Germinations were carried out from isothermally and periodically hydrated seeds, with and without the addition of iron sulfate, obtaining a germination percentage of up to 82.0%. It was found that the content of phenolic compounds, flavonoids and tannins and the antioxidant capacity (quantified by the DPPH, ABTS and FRAP methods) decreased when hydrating the grains, showing a more drastic reduction at higher temperatures. Considering that the use of periodic operation did not cause a significant difference in the antioxidant potential of the cultivar, this methodology (under the evaluated temperature conditions) is strongly recommended, given its intensifying effect on the hydration kinetics, with a reduction in processing time and, consequently, water consumption and energy costs.

Keywords: Germination, Grain fortification, Process intensification, Mathematical modeling, Temperature modulation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1- PERCENTUAL DOS PRINCIPAIS PRODUTORES DE FEIJÃO EM ESCALA GLOBAL.....	20
FIGURA 2- (A) ESTRUTURA EXTERNA E (B) INTERNA DA SEMENTE DE FEIJÃO	23
FIGURA 3- RELAÇÕES À DOENÇAS DA CULTIVAR BRS FC310	29
FIGURA 4- CULTIVAR BRS FC310	32
FIGURA 5- ESPECTRO DE AMIDO OBTIDO POR ESPECTROSCOPIA RAMAN. .	33
FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS OBTIDAS POR ANÁLISE DE (a) DSC, COM I) MUDANÇA DE LINHA DE BASE SEM PICO, II E III) PICOS ENDOTÉRMICOS E IV) PICO EXOTÉRMICO; E (b) TGA, COM A DTG, DO FARELO DE MILHO DESENGORDURADO	36
FIGURA 7 – PROCESSO DE MALTEAÇÃO.....	40
FIGURA 8- REPRESENTAÇÃO DA OPERAÇÃO PERIÓDICA APLICADA AO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO, SOB MODULAÇÃO DA TEMPERATURA.	49
FIGURA 9- EXEMPLIFICAÇÃO ESQUEMÁTICA DO REGIME DE HIDRATAÇÃO DE PARÂMETROS (A) CONCENTRADOS E (B) DISTRIBUÍDOS.	54
FIGURA 10 – AMOSTRA FEIJÃO CARIOCA CULTIVAR BRS FC310.....	60
FIGURA 11- DIAGRAMA COM AS ANÁLISES REALIZADAS NO TRABALHO.	61
FIGURA 12- DIMENSÕES BRS FC310	62
FIGURA 13- REPRESENTAÇÃO ILUSTRATIVA DA MODULAÇÃO DA TEMPERATURA DA ÁGUA NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.	66
FIGURA 14- ESTRUTURA DO GRÃO DE FEIJÃO CARIOCA: (A) GRÃO INTEIRO SECCIONADO LONGITUDINALMENTE; (B) FRAÇÃO DO TEGUMENTO; (C) FRAÇÃO DO COTILÉDONE; (D) REGIÃO DA MICRÓPILA E HILO.....	79
FIGURA 15- EFEITO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO AMIDO EXTRAÍDO DA CULTIVAR BRS FC310.	80
FIGURA 16- CURVAS CINÉTICAS EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DO FEIJÃO CARIOCA BRS FC310.....	83

FIGURA 17- CURVAS CINÉTICAS EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DO FEIJÃO CARIOCA BRS FC310.	83
FIGURA 18- CONTRIBUIÇÃO DA FASE I, II E III NOS ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310 NAS TEMPERATURAS DE 10°C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, E 60 °C....	86
FIGURA 19- CONTRIBUIÇÃO DA FASE I, II E III NOS ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310 NAS TEMPERATURAS DE , 20 °C, 30 °C E 40 °C.	87
FIGURA 20- IMAGENS OBTIDAS VIA MEV DOS GRÂNULOS DE AMIDO EXTRAÍDOS DOS GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA <i>IN NATURA</i> E HIDRATADOS EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA.....	89
FIGURA 21- COTILÉDONE DA CULTIVAR BRS FC310 <i>IN NATURA</i> (A) E HIDRATADO A 60°C EM: (B) 2H; (C) 7.5 H; (D) 12 H.	92
FIGURA 22 - AVANÇO DO TRAÇADOR AZUL DE METILENO NOS GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA AO LONGO DA HIDRATAÇÃO A 60 °C.	93
FIGURA 23- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE PELEG PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310..	95
FIGURA 24- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE PELEG PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310. ...	95
FIGURA 25- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE PAGE PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310..	98
FIGURA 26- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE PAGE PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310. ...	98
FIGURA 27- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.	100
FIGURA 28- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.	100
FIGURA 29- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.	102

FIGURA 30- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.	102
FIGURA 31 - CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE NICOLIN-JORGE PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.	104
FIGURA 32- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE NICOLIN-JORGE PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.	105
FIGURA 33- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE DIFUSÃO PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.	106
FIGURA 34- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE DIFUSÃO PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.	107
FIGURA 35- INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS PARÂMETROS MEQ (A), P (B), KA (C) E KB (D) DO MODELO MIANO – IBARZ – AUGUSTO NO PROCESSO ISOTÉRMICO (10-60°C).....	112
FIGURA 36- INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS PARÂMETROS MEQ (A), P (B), KA (C) E KB (D) DO MODELO MIANO – IBARZ – AUGUSTO NO PROCESSO PERIÓDICO (20-40°C).	112
FIGURA 37 – CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO GENERALIZADO DE MIANO–IBARZ–AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA.....	114
FIGURA 38– CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO GENERALIZADO DE MIANO–IBARZ–AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO PERIÓDICA.	114
FIGURA 39- RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE UMIDADE OBSERVADOS EXPERIMENTALMENTE E OS PREDITOS PELO MODELO GENERALIZADO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA.....	115
FIGURA 40- RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE UMIDADE OBSERVADOS EXPERIMENTALMENTE E OS PREDITOS PELO MODELO	

GENERALIZADO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO PERIÓDICA.	116
FIGURA 41 - ESPECTRO RAMAN DO FEIJÃO CARIOCA IN NATURA, HIDRATADO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIODICA, COM E SEM FORTIFICAÇÃO À 20°C.	120

LISTA DE TABELAS

TABELA 1- DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA EXTERNA DA SEMENTE DO FEIJÃO	23
TABELA 2- DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA DA SEMENTE DO FEIJÃO	24
TABELA 3- VARIEDADES DE FEIJÃO CARIOCA DA EMBRAPA.	25
TABELA 4- VALORES NUTRICIONAIS FEIJÃO CARIOCA, SECO POR PORÇÃO DE 100G.	31
TABELA 5- CARACTERÍSTICAS DOS GRÃOS DA CULTIVAR BRS FC310 COMPARADA À TESTEMUNHAS BRS NOTÁVEL.....	32
TABELA 6- ESTUDOS DA LITERATURA QUE UTILIZAM AS TÉCNICAS DSC E TGA.....	37
TABELA 7- ESTUDOS SOBRE OS EFEITOS POSITIVOS DA GERMINAÇÃO NOS COMPOSTOS BIOATIVOS DE DIFERENTES SEMENTES E GRÃO.	44
TABELA 8 – ESTUDOS CINÉTICOS DE HIDRATAÇÃO.	47
TABELA 9- ESTUDOS COM MODULAÇÃO DE VARIÁVEIS	50
TABELA 10- ESTUDOS QUE UTILIZAM MODELOS MATEMÁTICOS NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.	51
TABELA 11- COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CULTIVAR BRS FC310.....	76
TABELA 12 – COMPRIMENTO, LARGURA E ESPESSURA MÉDIOS DA CULTIVAR BRS FC310.	78
TABELA 13- PROPRIEDADES DO EVENTO DE GELATINIZAÇÃO DO AMIDO EXTRAÍDO DOS GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA <i>IN NATURA</i> , OBTIDAS VIA DSC.	81
TABELA 14- TEORES DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO E GANHO TOTAL DE UMIDADE DOS ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO.....	85
TABELA 15 - VALORES DOS PARÂMETROS “K ₁ ” E “K ₂ ” DO MODELO DE PELEG.	96
TABELA 16- VALORES DOS PARÂMETROS “KP” E “N” DO MODELO DE PAGE.	99
TABELA 17- VALORES DOS PARÂMETROS “ka” E “kb” DO MODELO DE MIANO- IBARZ-AUGUSTO.....	101
TABELA 18-VALORES DOS PARÂMETRO “KS” DO MODELO DE OMOTO-JORGE.	103

TABELA 19- VALORES DOS PARÂMETROS “A” E “B” DO MODELO DE NICOLIN-JORGE.....	105
TABELA 20- VALORES DOS PARÂMETROS “DEF” DO MODELO DE DIFUSÃO.	107
TABELA 21- PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DOS MODELOS DE PALEG, PAGE, MIANO-IBARZ-AUGUSTO.	109
TABELA 22- PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DOS MODELOS DE OMOTO-JORGE, NICOLIN-JORGE E DIFUSÃO...	110
TABELA 23-DEPENDÊNCIA DOS PARÂMETROS " p " " Meq " " Ka " e " Kb " COM A TEMPERATURA DE HIDRATAÇÃO.....	111
TABELA 24- PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DO MODELO GENERALIZADO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO.	117
TABELA 25- PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS REFERENTES À HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA.....	118
TABELA 26- NÁLISE DE Fe NO FEIJÃO CARIOCA HIDRATADO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA EM SOLUÇÃO DE SULFATO DE FERRO NA FASE I (2), FASE II (7,5H) E FASE III (12H).	122
TABELA 27- PORCENTAGEM DOS GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA GERMINADOS A CADA CONTAGEM (EG) E ÍNDICE DE VELOCIDADE DE GERMINAÇÃO (IVG)	124
TABELA 28- EVOLUÇÃO DA GERMINAÇÃO AO LONGO DE 72H DA CULTIVAR BRS FC310.....	125
TABELA 29– CAPACIDADE ANTIOXIDANTE QUANTIFICADA PELOS MÉTODOS DPPH, ABTS E FRAP REFERENTE AOS TRATAMENTOS REALIZADOS COM A CULTIVAR BRS FC310.....	127
TABELA 30 – CONTEÚDO DE COMPOSTOS FENÓLICOS, FLAVONOIDES E TANINOS RESULTANTES DOS TRATAMENTOS REALIZADOS COM AS CULTIVAR BRS FC310.	129

LISTA DE ABREVIATURAS OU SIGLAS

ANVISA-	Agência Nacional de Vigilância Sanitária
Conab-	Companhia Nacional de Abastecimento
Cr-	Cromo
Cu-	Cobre
DPPH-	Método de sequestro do radical 2,2-difenil-1-picril-hidrazila
DSC-	Calorimetria Exploratória Diferencial
EMBRAPA -	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
EPAGRI -	Empresa de Pesquisa Agropecuária de Santa Catarina
EPAMIG -	Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
FAO STAT -	Food and Agriculture Organization of the United Nations
Fe-	Ferro
FF-	Fortificados/Funcionais
IAC-	Instituto Agrônômico de Campinas
IAPAR-	Instituto Agrônômico do Paraná
MAPA-	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
Mn-	Magnésio
OH-	Grupo hidroxila
PNDS-	Pesquisa Nacional de Demografia e Saúde
RS•-	Radicais Derivados de Tióis
TEAC-	Capacidade Antioxidante Equivalente de Trolox
TGA-	Técnica Termogravimétrica
UFLA -	Universidade Federal de Lavras
UFPR-	Universidade Federal Do Paraná
UFV -	Universidade Federal de Viçosa
USDA-	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔG	Varição da energia livre de Gibbs	(kJ.mol ⁻¹)
ΔH	Varição da entalpia	(kJ.mol ⁻¹)
ΔS	Varição da entropia	(kJ.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
A	Amplitude	(°C)
a	Parâmetro do modelo de Nicolin-Jorge	(cm.h ⁻¹)
b	Parâmetro do modelo de Nicolin-Jorge	(cm ⁴ .g ⁻¹ .h ⁻¹)
Def	Coefficiente de difusão efetivo	(m ² .s ⁻¹)
k1	Parâmetro do modelo de Peleg	(h.% ⁻¹)
K1	constante do modelo de nicolin-jorge	(cm ⁴ .g ⁻¹ .h ⁻¹)
k2	Parâmetro do modelo de Peleg	(% ⁻¹)
K2	constante do modelo de nicolin-jorge	(h ⁻¹)
kp	Parâmetro do modelo de Page	(h ⁻¹)
Ks	Coefficiente de transferência de massa	(cm.h ⁻¹)
n	Número de termos	(-)
N	Parâmetro do modelo de Page	(-)
NA	Fluxo mássico de água	(g.cm ⁻² .h ⁻¹)
p	Parâmetro modelo de Miano- Ibarz- Augusto	(-)
R	Constante universal dos gases	(J.mol ⁻¹ .K ⁻¹)
r	Raio do grão	m ou cm
R ²	Coefficiente de determinação	(-)
T	Temperatura	(°C)
t	Tempo	(h)
Tref	Temperatura de referência	(K)
U	Concentração de umidade	(%)
U(t)	Umidade em função do tempo	(%)
U(t,T)	Umidade em função do tempo e da temperatura	(%)
U0	Umidade inicial	(%)
Ueq	Umidade de equilíbrio	(%)
V	Volume do grão	(cm ³)
ρ_A	Concentração média de água no grão	(g.cm ⁻³)
ρ_{A0}	Concentração inicial de água no grão	(g.cm ⁻³)
ρ_{eq}	Concentração de água no grão no equilíbrio	(g.cm ⁻³)

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	16
1.1 OBJETIVOS	18
1.1.1 Objetivo geral	18
1.1.2 Objetivos específicos.....	18
2 REVISÃO DA LITERATURA	20
2.1 FEIJÃO	20
2.1.1 Feijão Carioca	21
2.1.2 Classificação e Morfologia.....	22
2.1.3 Novas cultivares	24
2.1.4 Cultivar BRS FC310	28
2.1.5 Qualidade comercial, culinária e nutricional dos grãos	30
2.2 AMIDO.....	32
2.2.1 Gelatinização e retrogradação	34
2.2.2 Avaliação da Degradação térmica pela Técnica Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC).....	35
2.3 BEBIDAS VEGETAIS	37
2.3.1 Maltes.....	39
2.3.2 Chás.....	40
2.4 COMPOSTOS BIOATIVOS.....	41
2.4.1.1 Efeito da germinação nos compostos bioativos.....	42
2.5 PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.....	45
2.5.1 Processo de fortificação na hidratação	47
2.6 OPERAÇÃO PERIÓDICA	49
2.7 MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO	50
2.7.1 Modelos empíricos	51
2.7.1.1 Modelo de Peleg.....	52
2.7.1.2 Modelo de Page.....	52
2.7.2 Modelo semi- empírico	53
2.7.2.1 Modelo de Miano – Ibarz – Augusto	53
2.7.3 Modelos fenomenológicos.....	53
2.7.3.1 Modelo de Difusão.....	54
2.7.3.2 Modelo de Omoto – Jorge	55

2.7.4 Modelo de Nicolin – Jorge	56
2.8 CONSIDERAÇÕES GERAIS	57
3 MATERIAL E MÉTODOS	60
3.1 MATÉRIA-PRIMA	60
3.2 ANÁLISES QUÍMICAS	61
3.2.1 Composição Química	61
3.3 ANÁLISES MORFOLÓGICAS.....	62
3.3.1 Dimensões	62
3.3.2 Avaliação da Estrutura dos Grãos (MEV).....	62
3.4 EXTRAÇÃO DO AMIDO.....	62
3.4.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)	64
3.4.2 Degradação térmica pela Técnica Termogravimétrica (TGA)	64
3.5 ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO	64
3.5.1 Hidratação em Operação Isotérmica	64
3.5.2 Hidratação em Operação Periódica	65
3.6 AVALIAÇÃO DO REGIME DE HIDRATAÇÃO	66
3.7 MODELAGEM MATEMÁTICA.....	66
3.7.1 Solução Matemática e Qualidade de Ajuste dos Modelos.....	67
3.8 PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS	68
3.9 FORTIFICAÇÃO NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO	69
3.9.1 Identificação das alterações químicas.....	69
3.9.2 Comportamento de absorção de ferro no feijão carioca BRS FC310.....	69
3.10 OBTENÇÃO DO MALTE	70
3.10.1 Maceração.....	70
3.10.2 Germinação.....	70
3.10.2.1 Avaliação da Energia de germinação	70
3.10.2.2 Cálculo do índice de germinação.....	70
3.10.2.3 Secagem, Moagem e Armazenamento	71
3.11 OBTENÇÃO DA BEBIDA TIPO CHÁ	71
3.11.1 Processo de torra	71
3.11.2 Processo de extração.....	71
3.12 DETERMINAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS PRESENTES NO MALTE E BEBIDA TIPO CHÁ	71
3.12.1 Extrato.....	71

3.12.1.1	Avaliação de atividade antioxidante.....	72
3.12.1.2	Quantificação dos Compostos Fenólicos.....	74
3.12.1.3	Quantificação dos Flavonoides.....	74
3.12.1.4	Quantificação dos Taninos Condensados	74
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	76
4.1	COMPOSIÇÃO QUÍMICA	76
4.2	CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E TÉRMICA GRÃO <i>IN NATURA</i>	77
4.2.1	Dimensões	77
4.2.2	Avaliação Morfológica dos Grãos via MEV.....	78
4.2.3	Análise do Evento de Gelatinização do Amido por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e TGA	80
4.3	CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO	82
4.3.1	Cinética de Hidratação e Identificação das Fases.....	82
4.4	ANÁLISE MORFOLÓGICA DO AMIDO VIA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV).....	88
4.5	DETERMINAÇÃO DO REGIME DE HIDRATAÇÃO.....	93
4.6	APLICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS À CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO	
	94	
4.6.1	Modelos empíricos	94
4.6.1.1	Modelo de Peleg.....	94
4.6.1.2	Modelo de Page.....	97
4.6.2	Modelo semi – empírico	99
4.6.2.1	Miano- Ibarz- Augusto	99
4.6.3	Modelos fenomenológico.....	101
4.6.3.1	Modelo de Omoto-Jorge	101
4.6.3.2	Modelo de Nicolin-Jorge	104
4.6.3.3	Modelo de Difusão.....	106
4.6.4	Solução Matemática e Qualidade de Ajuste dos Modelos.....	108
4.7	AVALIAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO	111
4.8	PROPIEDADES TERMODINÂMICAS.....	117
4.9	FORTIFICAÇÃO NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.....	119
4.9.1	Identificação de alterações químicas	119
4.9.2	Comportamento de absorção de ferro no feijão na cultivar BRS FC310	121
4.10	OBTENÇÃO DO MALTE E BEBIDA TIPO CHÁ.....	123

4.10.1 Germinação.....	123
4.11 DETERMINAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS	126
4.11.1 Capacidade Antioxidante pelos Métodos DPPH, ABTS e FRAP.....	126
4.11.2 Compostos Fenólicos, Flavonoides e Taninos Condensados	128
5 CONCLUSÃO	132
5.1 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS	135
REFERÊNCIAS.....	136

1 INTRODUÇÃO

A cinética de hidratação do feijão carioca é um tópico de grande relevância em estudos relacionados à qualidade e processamento desse importante grão leguminoso. A hidratação desse tipo de feijão pode ser realizada em diferentes condições, incluindo operações isotérmicas e periódicas, que desempenham um papel fundamental na absorção de água e nas mudanças morfológicas que ocorrem durante o processo (CHACÓN ALVAREZ; JORGE; JORGE, 2020; MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019; MIANO; AUGUSTO, 2018). A compreensão da cinética de hidratação é crucial para otimizar os processos de produção e melhorar a qualidade nutricional e tecnológica dos produtos finais.

Além disso, a germinação do feijão carioca é um processo de grande interesse, pois pode melhorar o perfil nutricional dos grãos e promover a formação de compostos bioativos. A germinação pode ocorrer após a hidratação e envolve mudanças metabólicas significativas (FORTI et al., 2009). Compreender os fatores que afetam a germinação e seu impacto nas propriedades dos grãos é essencial para explorar seu potencial nutricional.

Outro aspecto relevante é a fortificação com sulfato de ferro em feijão carioca, que se insere em uma abordagem de enriquecimento nutricional. A adição de ferro tem o potencial de aumentar o teor desse mineral nas sementes, tornando o feijão carioca uma fonte mais significativa de ferro na dieta (MIANO et al., 2018). Essa estratégia pode contribuir para combater a deficiência de ferro, uma das principais deficiências nutricionais no mundo.

O malte de feijão carioca e a bebida tipo chá derivada desse processo são produtos inovadores que podem agregar valor à indústria de alimentos. Esses produtos resultam da germinação controlada dos grãos de feijão carioca, seguida de secagem e processamento. O malte é uma matéria-prima versátil que pode ser usada na produção de diversos alimentos, enquanto a bebida tipo chá representa uma alternativa saudável para os consumidores.

Por fim, o contexto das bebidas funcionais merece destaque, uma vez que a busca por alimentos que ofereçam benefícios à saúde está em constante crescimento. As bebidas funcionais, incluindo aquelas derivadas do feijão carioca, podem fornecer compostos bioativos, como antioxidantes, que têm o potencial de promover a saúde e prevenir doenças (SANCHO; PASTORE 2016). Portanto, a

pesquisa relacionada a bebidas funcionais à base de feijão carioca é um campo promissor.

Dentro deste cenário, o objetivo desta pesquisa é a obtenção de malte de feijão carioca e da bebida tipo chá, utilizando a germinação de grãos de feijão carioca fortificado por meio de processos de hidratação isotérmica e periódica. Esses resultados têm o potencial de desempenhar um papel de relevância na criação de produtos alimentícios mais ricos em nutrientes e funcionais, atendendo às crescentes demandas dos consumidores por alimentos saudáveis e inovadores.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a cinética de hidratação e fortificação com sulfato de ferro do feijão carioca BRS FC310, a partir da modulação da temperatura da água, e qual efeito desta operação periódica nos compostos bioativos dos grãos hidratados e germinados, a fim de produzir maltes e bebidas.

1.1.2 Objetivos específicos

- Investigar a cinética de hidratação do feijão carioca em operação isotérmica e periódica, avaliando como a temperatura e o tempo afetam o ganho de umidade e as propriedades química, físicas e morfológicas dos grãos.
- Identificar o melhor período e amplitude para a hidratação dos grãos em operação periódica;
- Analisar a cinética de absorção Fe no feijão carioca mediante a hidratação isotérmica e periódica e identificar as alterações químicas, utilizando a espectroscopia Raman;
- Identificar a temperatura que favorece a germinação dos grãos hidratados isotermicamente (com e sem adição de Fe), para que sejam hidratados em operação periódica (na mesma temperatura média) e germinados;
- Avaliar o processo de germinação do feijão carioca, incluindo os efeitos da hidratação prévia na germinação, o crescimento da radícula e a viabilidade germinativa.
- Investigar o mecanismo de transferência de massa mediante uso de um pigmento traçador, que se comporte de forma análoga à molécula de água durante a hidratação;
- Desenvolver Malte e uma bebida tipo chá à base de feijão carioca germinado fortificado e avaliar o perfil de compostos bioativos em comparativo com os demais tratamentos.
- Ajustar modelos matemáticos aos dados cinéticos experimentais obtidos nos ensaios de hidratação realizados, avaliando a qualidade do ajuste;
- Obter as propriedades termodinâmicas da hidratação em operação isotérmica e periódica;

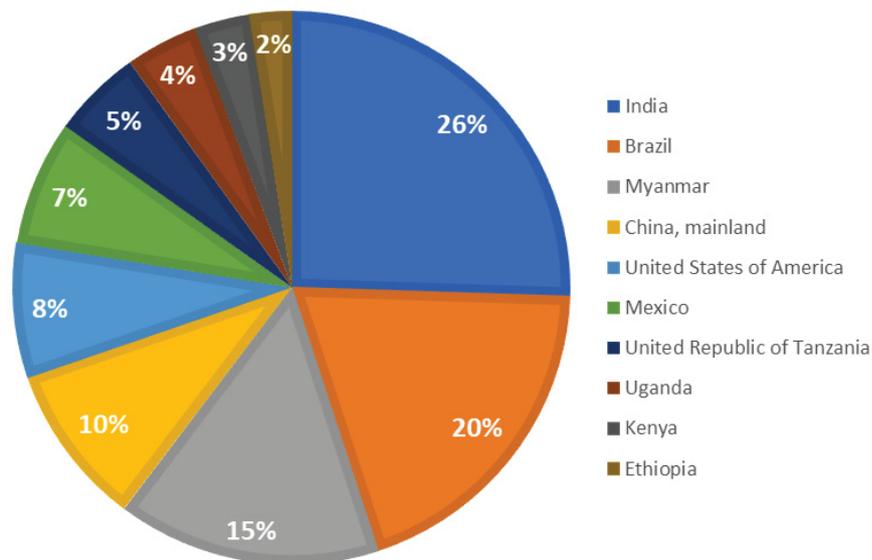
- Avaliar o evento térmico de gelatinização em amostras de amido extraídas dos grãos *in natura*, através da técnica de DSC;
- Avaliar a existência de variações na estrutura morfológica de amostras de amido extraídas dos grãos *in natura* e ao longo do processo de hidratação, via análise de imagens MEV.

2 REVISÃO DA LITERATURA

2.1 FEIJÃO

O feijão comum (*Phaseolus vulgaris L.*) é uma das leguminosas mais importantes cultivadas e consumidas no mundo. Segundo dados da FAOSTAT (Food and Agriculture Organization of the United Nations), a produção global de leguminosas em 2020 foi de 27,5 milhões de toneladas, sendo o Brasil o segundo maior produtor com 3 milhões de toneladas, e a Índia o maior produtor com 3,8 milhões de toneladas (FAOSTAT, 2022). A (FIGURA 1) exibe a distribuição percentual dos principais produtores de feijão em escala global.

FIGURA 1- PERCENTUAL DOS PRINCIPAIS PRODUTORES DE FEIJÃO EM ESCALA GLOBAL.



FONTE: Faostat, 2022 (Adaptado).

No Brasil, o país possui três estações de cultivo distintas, a das águas (primeira safra), a seca (segunda safra) e o inverno seco ou irrigado (terceira safra) (SANTOS et al., 2018), de forma que, em qualquer mês, sempre haverá produção em algum ponto do país, o que contribui para o abastecimento interno e reduz a oscilação dos preços. Os maiores produtores são Paraná, Minas Gerais, Mato Grosso, Goiás e Bahia (COÊLHO, 2021). Dados recentes indicam que o Estado do Paraná é o maior produtor nacional de feijão (CASTANHO, 2021; PASCHOALINO et al., 2017). A Conab (Companhia Nacional de Abastecimento) faz o acompanhamento constante da safra de grãos no Brasil, monitorando as condições

de desenvolvimento das principais culturas do país, e prevê para a safra 2022/23 que a produção brasileira de grãos de feijão deve atingir 2,96 milhões de toneladas (CONAB - SAFRAS, 2022)

O feijão carioca e o preto são os dois principais feijões comuns produzidos e consumidos no Brasil. O feijão preto é cultivado principalmente em estados do sul, como Paraná e Rio Grande do Sul, enquanto o feijão carioca é encontrado em partes do sul, sudeste e nordeste do país (RAWAL VIKAS; KALAMVREZOS NAVARRO DORIAN, 2019).

No Brasil, onde as preferências do consumidor por cada grão comercial variam por região e estado, o feijão carioca é o único tipo consumido nacionalmente (TORGA et al. 2013), respondendo por cerca de 60% da produção total dos grãos, e se caracteriza por sua maior resistência à seca e facilidade de adaptação ao clima em todas as regiões do país (CONAB - SAFRAS, 2022; SILVA et al., 2014).

2.1.1 Feijão Carioca

Em meados da década de 1970, foi descoberto em Palmital - São Paulo-Brasil, um novo tipo de grão com maior capacidade de produção e coloração creme com listras marrons, denominado Carioquinha. O nome Carioquinha surgiu como resultado de proprietários de fazendas associarem a cor do grão à raça de porcos, que também possui listras no corpo (CARBONELL et al., 2014). Assim, após identificação por pesquisadores do IAC - (Instituto Agrônomo de Campinas), variedades relacionadas foram testadas e a cultivar Carioquinha foi introduzida em 1971 (ALMEIDA et al., 1971), resultando em uma mudança brusca no cenário empresarial brasileiro. Os grãos cariocas são os mais cultivados desde 1975 (SILVA et al., 2014), demonstrando a importância do processamento e obtenção de produtos a partir do grão no Brasil.

No Brasil, as principais instituições de pesquisa de melhoramento e geradoras de cultivares de feijoeiro são empresas que pertencem ao setor público, como a Embrapa Arroz e Feijão, o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC), o Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais (EPAMIG), as Universidades Federais de Lavras (UFLA) e de Viçosa (UFV), a Empresa de Pesquisa Agropecuária de Santa Catarina (EPAGRI), além da empresa de capital privado FT-Pesquisa e Sementes (SILVA, 2018).

Diversas variedades de feijão têm sido recomendadas no país desde o início das pesquisas de melhoramento genético. Em 1970, o Instituto Agrônomo de Campinas (IAC) recomendou a primeira variedade de feijão carioca, conhecida como Carioca ou Cariquinha, estabilizando o mercado brasileiro devido à ampla aceitação do feijão pelo consumidor em termos de sabor e cozimento rápido. Este fato estimula as empresas de embalagem a investir em máquinas e processos para vender grãos de maior qualidade (CARBONELL et al., 2014). Em 1994, a variedade Pérola foi recomendada pela Embrapa Arroz e Feijão. Seus grãos seguem um padrão de coloração creme com listras marrons (RAMALHO et al., 2004), mas são maiores que outros grãos do mercado, o que agrada consumidores e empresas (CARBONELL et al., 2014). Como resultado, tornou-se uma das variedades mais cultivadas no Brasil.

O melhoramento genético busca desenvolver variedades com características agrônomicas desejáveis: alta produtividade, adaptação às áreas de cultivo, resistência aos principais patógenos e plantas mais eretas (LIMA et al., 2015). Além disso, boas propriedades técnicas, como maior capacidade de hidratação dos grãos e menor tempo de cozimento, também são propriedades que merecem a atenção a melhorias.

2.1.2 Classificação e Morfologia

A cor do tegumento do grão de feijão apresenta ampla variação de cor. O tegumento pode ser de cor uniforme ou ter mais de uma cor, distribuídas em forma de estrias, pontuações ou manchas. Pode ser de cor brilhante, opaca ou apresentar nuances. As diferenças, das características externas apresentadas pelos grãos são usadas para classificar os grãos em tipos comerciais: carioca, preto, mulatinho, roxo, entre outros (COSTA, 2021)

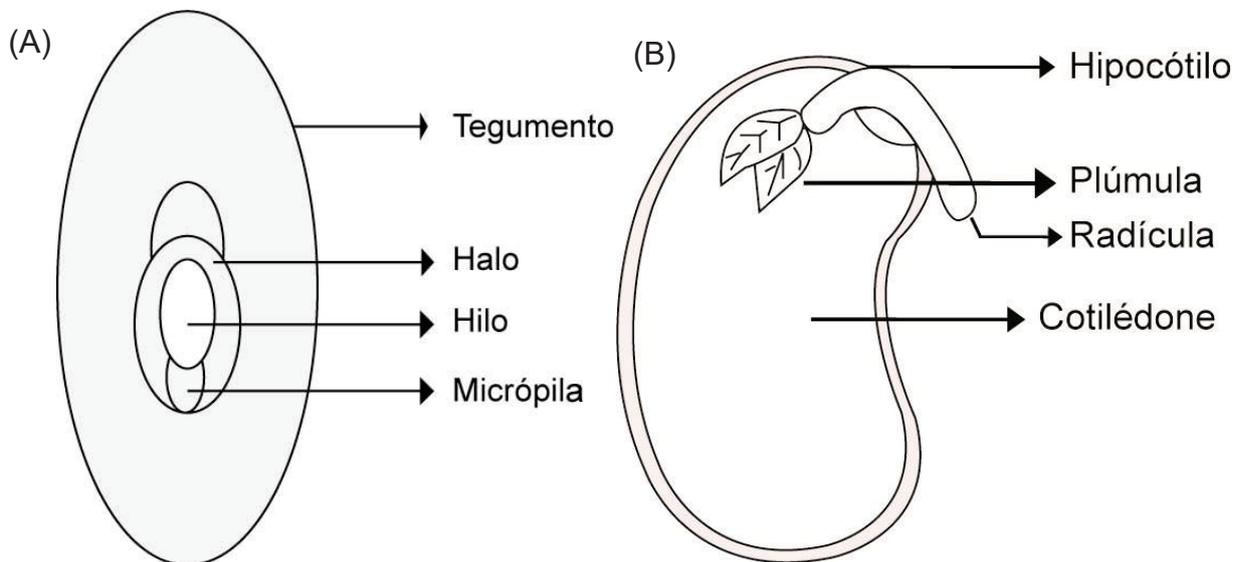
Com esse fato, a legislação brasileira, por meio da Portaria Normativa nº12, de 2008, classifica o feijão comum como do Grupo I que inclui grãos comuns proveniente da espécie *Phaseolus vulgaris* L. Pela cor do tegumento, o feijão pode ser dividido em quatro classes:

- I. branco: produto que contém, no mínimo, 97,00% (noventa e sete por cento) de grãos de coloração branca;

- II. preto: produto que contém, no mínimo, 97,00% (noventa e sete por cento) de grãos de coloração preta;
- III. cores: produto que contém, no mínimo, 97,00% (noventa e sete por cento) de grãos da classe cores, admitindo-se até 10,00% (dez por cento) de outras cultivares da classe cores, que apresentem contraste na cor ou no tamanho;
- IV. misturado: produto que não atende às especificações de nenhuma das classes anteriores.

As (FIGURAS 2a e 2b) apresentam as partes externa e interna da semente de feijão, e suas respectivas composições (TABELA 1 e 2).

FIGURA 2- (A) ESTRUTURA EXTERNA E (B) INTERNA DA SEMENTE DE FEIJÃO



FONTE: Costa, 2021.

TABELA 1- DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA EXTERNA DA SEMENTE DO FEIJÃO

Estrutura externa	Descrição
Tegumento	É a camada externa da semente onde está localizado o pigmento responsável pela cor do grão.
Hilo	Cicatriz deixada pelo funículo que conecta a semente com a placenta.
Halo	Estrutura que circula o hilo da semente.
Micrópila	Abertura próxima ao hilo através da qual se realiza a absorção da água.

FONTE: Adaptado Costa, 2021.

TABELA 2- DESCRIÇÃO DA ESTRUTURA INTERNA DA SEMENTE DO FEIJÃO

Estrutura Interna	Descrição
Hipocótilo	Zona de transição entre a plúmula e a radícula. Na germinação, expande-se levando os cotilédones até a superfície.
Plúmula	Pequena gema de onde vêm os caules e folhas da planta. É constituída por um meristema apical e duas folhas mais ou menos desenvolvidas, primárias ou simples.
Radícula	Raiz do embrião que origina o sistema radicular.
Cotilédone	Folha seminal ou embrionária que contém as reservas necessárias à germinação e ao desenvolvimento inicial da planta.

FONTE: Adaptado Costa, 2021.

2.1.3 Novas cultivares

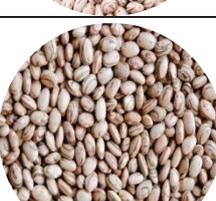
Características como estrutura ereta da planta e precocidade tornaram-se altamente exigidas e valorizadas pelos produtores. A boa arquitetura de planta permite a colheita mecânica com baixas perdas e incidência de doenças devido à melhor aeração na lavoura, e melhor qualidade comercial dos grãos, em consequência da menor umidade nas vagens na colheita. Embora esta característica tenha progredido, é necessário obter cultivares ainda mais eretas do que as disponíveis atualmente. Além de evitar pragas e períodos de escassez hídricas, a precocidade permite rápido retorno do capital investido, economia de água e energia nos sistemas de irrigação, maior flexibilidade na gestão do sistema produtivo e utilização de janelas curtas de plantio (MELO et al., 2021a)

Atualmente, a Embrapa possui 23 variedades cariocas, apresentadas na (TABELA 3), juntamente com suas principais características.

TABELA 3- VARIEDADES DE FEIJÃO CARIOCA DA EMBRAPA.

<p>Cultivar Aporé (1992)</p>	<p>Porte da planta: semiereto Ciclo: 84 dias Massa de 100 grãos: 20,9 g Produção média: 2.000 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar Pérola (1994)</p>	<p>Porte da planta: semiereto Ciclo: 85–95 dias Massa de 100 grãos: 27 g</p>	
<p>Cultivar Princesa (1994)</p>	<p>Porte da planta: semiereto Ciclo: 75–80 dias Massa de 100 grãos: 23 g Produção média: 2.000 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar Rudá ou Carioca A 285 (1995)</p>	<p>Porte da planta: semiereto Ciclo: 90 dias Massa de 100 grãos: 19,4 g Produção média: 2.159 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRSMG Talismã (2002)</p>	<p>Porte da planta: prostrado Ciclo: 75–85 dias Massa de 100 grãos: 26,5 g</p>	
<p>Cultivar BRS Requite (2003)</p>	<p>Porte da planta: prostrado Ciclo: 85–95 dias Massa de 100 grãos: 24 g</p>	
<p>Cultivar BRS Pontal (2003)</p>	<p>Porte da planta: prostrado Ciclo: 85–95 dias Massa de 100 grãos: 26,1 g Produção média: 2.747 Kg/ha em MG.</p>	

<p>Cultivar BRS Horizonte (2004)</p>	<p>Porte: ereto Ciclo: 80–85 dias Massa de 100 grãos: 27,7 g Produção média: 2.362 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRSMG Pioneiro (2005)</p>	<p>Porte da planta: semiereto Ciclo: 80–85 dias Massa de 100 grãos: 20 g Produção média: 1.106 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRS9435 Cometa (2005)</p>	<p>Porte de planta: ereto Ciclo: 75–80 dias Massa de 100 grãos: 25 g Produção média: 2.086 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRSMG Majestoso (2006)</p>	<p>Porte da planta: semiereto Ciclo: 85–90 dias Massa de 100 grãos: 27 g</p>	
<p>Cultivar BRS Estilo (2009)</p>	<p>Porte da planta: ereto Ciclo: 85–95 dias Massa de 100 grãos: 26 g Produção média: 2.134 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRS Ametista (2012)</p>	<p>Porte da planta: semiereto Ciclo: 90–95 dias Massa de 100 grãos: 30 g Produção média: 2.145 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRS 10408 Notável (2012)</p>	<p>Porte da planta: ereto Ciclo: 75–85 dias Massa de 100 grãos: 26 g Produção média: 2.261 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRSMG Madrepérola (2012)</p>	<p>Porte da planta: prostrado Ciclo: 75–84 dias Massa de 100 grãos: 25 g</p>	

<p>Cultivar BRS Sublime (2013)</p>	<p>Porte da planta: ereto Ciclo: 85–90 dias Massa de 100 grãos: 26 g Produção média: 2.116 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRSMG Uai (2015)</p>	<p>Porte da planta: ereto Ciclo: 75–80 dias Massa de 100 grãos: 24,2 g</p>	
<p>Cultivar BRS FC402 (2017)</p>	<p>Porte da planta: semireto Ciclo: 85–95 dias Massa de 100 grãos: 26 g Produção média: 2.462 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRS FC104 (2018)</p>	<p>Porte da planta: semiprostrado Ciclo: <65 dias Massa de 100 grãos: 25 g Produção média: 2.176 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRS FC401 RMD (2019)</p>	<p>Porte da planta: semiprostrado Ciclo: 85–95 dias Massa de 100 grãos: 25,7 g Produção média: 2.000 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRS FC409 (2019)</p>	<p>Porte da planta: ereto Ciclo: 85–90 dias Massa de 100 grãos: 25 g Produção média: 2.048 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRS FC406 (2019)</p>	<p>Porte da planta: semiereto Ciclo: 85–95 dias Massa de 100 grãos: 28 g Produção média: 2.464 Kg/ha</p>	
<p>Cultivar BRS FC310 (2019)</p>	<p>Porte da planta: ereto Ciclo: 75–84 dias Massa de 100 grãos: 24 g Produção média: 2.113 Kg/ha</p>	

FONTE: Adaptado Melo et al., 2021b

Neste momento, a Embrapa possui apenas uma cultivar de grão carioca de ciclo superprecoce em seu portfólio, BRS FC104, este fato representa vantagem competitiva para o agricultor. Porém, em termos de doença, no entanto, a cultivar apresenta reação moderada à ferrugem, à antracnose e ao crestamento bacteriano-comum. Vantagem apresentada pela cultivar BRS FC310 que possui resistência genética a várias doenças de importância econômica para a cultura do feijão no Brasil, devendo contribuir para a redução do uso de defensivos agrícolas e, conseqüentemente, do impacto para o meio ambiente e para a saúde humana, diminuindo os custos de produção e concorrendo de forma importante para o aumento da sustentabilidade na produção agrícola (MELO et al., 2021a, 2021b).

2.1.4 Cultivar BRS FC310

A BRS FC310 é uma cultivar de feijão carioca que apresenta ciclo semiprecoce (75 a 84 dias, da emergência à maturação fisiológica) direcionada para a safra e safrinha da Região Centro-sul do Brasil. As plantas são arbustivas, com hábito de crescimento indeterminado tipo II, arquitetura ereta e boa tolerância ao acamamento, adaptando-se à colheita mecânica, inclusive a direta. As flores são brancas e as vagens, nas maturações fisiológica e de colheita, são amareladas (MELO et al., 2021a, 2021b).

BRS FC310, sob inoculação artificial, é resistente ao vírus do mosaico comum e aos patótipos 73, 89, 91 e 453 de *Colletotrichum lindemuthianum*, agente causal da antracnose. Entretanto, é suscetível ao patótipo 65. Nos ensaios de campo mostrou-se moderadamente resistente à antracnose, à ferrugem, ao crestamento-bacteriano-comum e à murcha de *Curtobacterium*; moderadamente suscetível à murcha de *Fusarium* e à mancha-angular; e suscetível apenas ao vírus do mosaico dourado, doença para a qual só existe resistência em germoplasmas geneticamente modificados (MELO et al., 2021a, 2021b).

Na (TABELA 4), é apresentado as características agronômicas e de reação às doenças da cultivar BRS FC310 comparada à testemunha BRS notável.

TABELA 4- CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS E DE REAÇÃO ÀS DOENÇAS DA CULTIVAR BRS FC310 COMPARADA À TESTEMUNHA BRS NOTÁVEL.

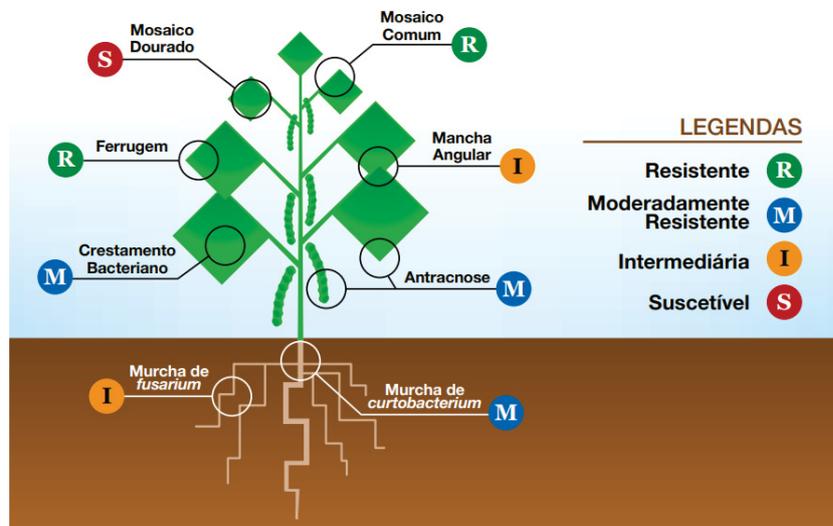
Cultivar	Ciclo	ARQ	AN	CBC	FE	MA	VMCF	VMDF	FOP	CUR
BRS FC310	SP	Ereta	MR	MR	MR	MS	R	S	MS	MR
BRS Notável	SP	Ereta	MR	MR	MR	S	R	S	MR	MR

FONTE: Adaptado Melo et al., 2021a

ARQ: Arquitetura de planta; AN: Antracnose; CBC: Crestamento-bacteriano-comum; FE: Ferrugem; MA: Mancha-angular; VMCF: Vírus do mosaico comum do feijoeiro; VMDF: Vírus do mosaico dourado do feijoeiro; FOP: Murcha de Fusarium; CUR: Murcha de Curtobacterium; SP: Ciclo semiprecoce; R: Resistente (nota 1); MR: Moderadamente resistente (notas 2 e 3); MS: Moderadamente suscetível (notas 4 a 6); S: Suscetível (notas 7 a 9).

Consequentemente, a cultivar BRS FC310 apresenta o mais amplo espectro de resistência às doenças relativamente a todas as cultivares de feijão já desenvolvidas pela Embrapa, como ilustra a (FIGURA 3):

FIGURA 3- RELAÇÕES À DOENÇAS DA CULTIVAR BRS FC310



FONTE: Melo et al., 2021a.

A variedade BRS FC310 originou-se de um cruzamento entre as linhagens GX 9792-251-2 e ESAL 693, e foi realizado em 2002 na Embrapa Arroz e Feijão, em Santo Antônio de Goiás - Goiás, Brasil. E desde então estudos de avaliação vêm sendo realizados. A BRS FC310 foi registrada no Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA) em 2019 e protegida no ano seguinte de acordo com a certificação 20200160 (MELO et al., 2021b, 2021a).

Entre os 92 ensaios executados, 69 (75%) foram colhidos e atingiram os padrões de qualidade experimental necessários para o processo de registro de cultivares quanto aos dados de produtividade. Nos ensaios a cultivar BRS FC310 apresentou produtividade média de 2.113 kg ha⁻¹, com 99,9% de desempenho relativo médio. Considerando cada uma das regiões, Na região I (RS, SC, PR, MS e SP) o desempenho relativo foi de 101,6% (106,5% na época das águas), na Região II (ES, RJ, GO, MT, TO, BA, MA e DF) 98,5% (109,9% na época da seca) e na Região III (SE, AL, PE, CE, RN e PB) 101,9%.O potencial produtivo da BRS FC310, obtido a partir da média dos cinco ensaios em que esta cultivar apresentou as maiores produtividades, foi de 3.493 kg.ha⁻¹. Essa estimativa mostra que a cultivar possui alto potencial genético e que se o ambiente for favorável e as condições de cultivo forem boas, altas produtividades podem ser alcançadas (MELO et al., 2021a, 2021b).

2.1.5 Qualidade comercial, culinária e nutricional dos grãos

O feijão (*Phaseolus vulgaris* L.) está presente na dieta da população brasileira, proporcionando proteína, carboidratos, fibras, vitaminas e minerais. Se destacando por ser a principal fonte de proteína consumida pela população brasileira (GOMES et al., 2006). Sua importância reside em fornecer de 10% a 20% de uma gama de necessidades de nutrientes em adultos, além de representar uma fonte proteica de menor custo em relação à proteína de origem animal (MARQUEZI 2013).

O grão é rico em fibras solúveis e com isto tem sido relacionado à redução dos níveis de colesterol e de açúcar no sangue em seres humanos, e à prevenção do câncer de cólon (NALEPA et al., 2013). Todavia, o feijão apresenta algumas características indesejáveis que limitam sua aceitabilidade ou seu valor nutricional, tais como o fenômeno “hard to cook”, a presença de fatores antinutricionais, como fitatos e polifenóis (taninos) e deficiência em alguns aminoácidos, como metionina e cisteína (RAMÍREZ-CÁRDENASI et al., 2008).

A composição centesimal do feijão depende de vários fatores. Os macronutrientes variam de acordo com as condições de plantio, incluindo solo, adubação e irrigação, armazenamento, conforme variedade genética e espécie. De modo geral, o feijão possui cerca de 20% de proteína, e alto teor de aminoácidos essenciais, como a lisina; além disto, tem cerca de 60% de carboidratos, sendo o

amido o principal representante (TACO, 2011; BONETT et al., 2007; SILVA et al., 2009; PROLLA et al., 2010; BOYE; ZARE; PLETCH, 2010).

Segundo o Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), o feijão carioca seco possui a seguinte composição centesimal (TABELA 4) em uma porção de 100 gramas.

TABELA 4- VALORES NUTRICIONAIS FEIJÃO CARIOCA, SECO POR PORÇÃO DE 100G.

Feijão Carioca, seco	Quantidade média	Unidade
Proteína	25,2	g
Lipídios totais	1,44	g
Carboidratos:		
Fibras totais	4,5	g
Amido	36	g
Minerais:		
Cálcio	194	mg
Ferro	5,87	mg
Magnésio	179	mg
Fósforo	535	mg
Potássio	1390	mg
Zinco	3,36	mg
Cobre	1,04	mg
Manganês	1,93	mg
Exofre	257	mg
Níquel	177	µg
Molibdênio	962	µg
Cobalto	39	µg
Boro	1160	µg

FONTE: FoodData Central, 2019.

Comparativamente, na característica qualidade comercial dos grãos, a cultivar BRS FC310 possui bom rendimento de peneira (83%) e a massa média de cem grãos é de 24 g. Os grãos são do tipo carioca (creme com rajadas marrons), de forma elíptica achatada e sem brilho (MELO et al., 2021a)., como ilustra a (FIGURA 4).

FIGURA 4- CULTIVAR BRS FC310



FONTE: MELO et al., 2021a.

O tempo médio de cocção da cultivar BRS FC310 é de 37 minutos, inferior ao da testemunha e o teor médio de proteína nos grãos da BRS FC310 é de 24,4% (TABELA 5). A cultivar mostrou ainda teor de ferro (Fe) de 67,9 mg kg⁻¹ e de zinco (Zn) de 34,7 mg kg⁻¹ nos grãos, significando 9,9% superior à média da testemunha para o ferro e 10,9% superior para o Zn (TABELA 5), indicando potencial para a utilização como feijão biofortificado (MELO et al., 2021a, 2021b).

TABELA 5- CARACTERÍSTICAS DOS GRÃOS DA CULTIVAR BRS FC310 COMPARADA À TESTEMUNHAS BRS NOTÁVEL

Cultivar	Tempo de cocção (min)	Teor de proteína (%)	Teor de Ferro (mg/kg)	Teor de Zinco (mg/kg)	Massa de 100 grãos (g)	Rendimento de peneira (%)
BRS FC310	37	24,4	67,9	34,7	24	83
BRS Notável	43	24	61,2	30,9	24	85

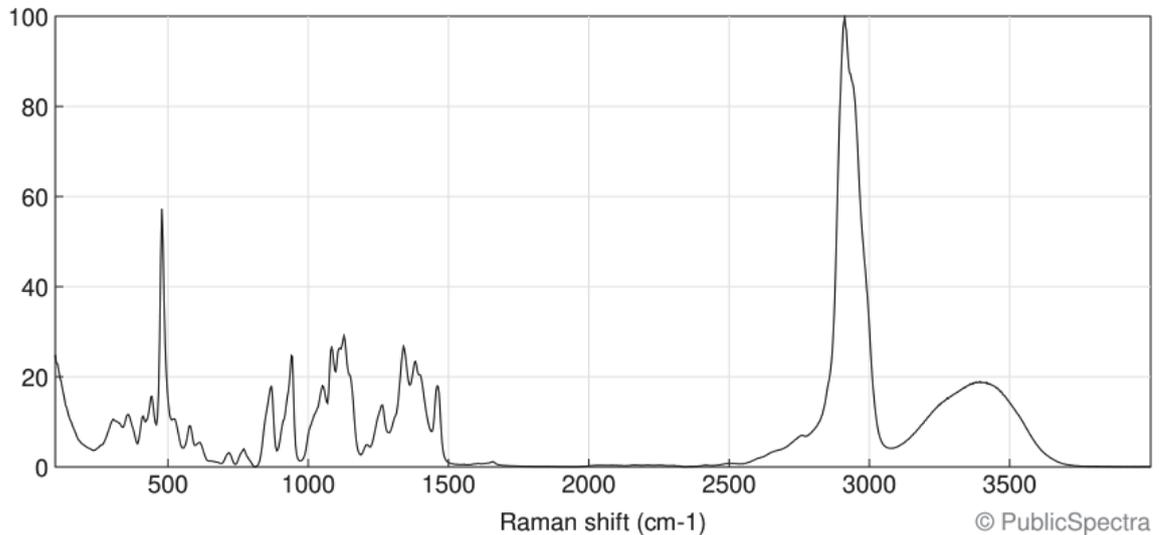
FONTE: Melo et al., 2021a.

2.2 AMIDO

O amido é um biopolímero de estrutura altamente complexa, constituído por ligações glicosídicas que conectam unidades de glicose. Suas características funcionais o tornam um recurso extremamente valioso nas indústrias de papel, têxtil e, sobretudo, na indústria alimentícia. A relação entre amilose e amilopectina desempenha um papel fundamental na determinação das diversas propriedades funcionais dos diferentes tipos de amido, variando conforme a fonte botânica Almeida et al. (2010 e Biliaderis (1991 e Dupuy (2002). Diversos métodos de análise

estrutural estão disponíveis para a identificação de amidos modificados, sendo a (FIGURA 5) um exemplo representativo do espectro do amido obtido por espectroscopia Raman.

FIGURA 5- ESPECTRO DE AMIDO OBTIDO POR ESPECTROSCOPIA RAMAN.



FONTE:PublicSpectra, 2023.

O amido organiza-se em grânulos semicristalinos compactos e microscópicos, com tamanho variável entre 1 a 100 μm . O estudo de Demiate et al., (2016) demonstrou que o feijão carioca apresenta grânulos não perfeitamente esféricos, mas em formato ovalado, com diâmetro médio de 27,3 μm .

Nas plantas o amido está presente em vários tipos de tecidos e órgãos, como folhas, raízes, brotos, frutos, grãos e caules, como fonte de reserva energética (AVÉROUS; HALLEY 2014a). Em feijões secos, o principal componente dos cotilédones do grão é o amido. Esse polissacarídeo atua como reserva energética nas plantas, encontra-se na forma de grânulos semicristalinos e define a maior parte das propriedades estruturais e funcionais dos alimentos que o contém na formulação. Geralmente, os grânulos de amido de feijão se caracterizam pelo limitado poder de inchamento e solubilidade em água, alta temperatura de gelatinização, rápida retrogradação, resistência ao cisalhamento e alto teor de amido resistente, devido ao elevado teor de amilose em comparação com amidos provenientes de outras fontes (HOOVER et al., 2010; CHIBBAR; AMBIGAIPALAN; HOOVER, 2010; AMBIGAIPALAN et al., 2011).

2.2.1 Gelatinização e retrogradação

Quando aquecido em presença de água, o amido passa por um processo irreversível de transição ordem-desordem molecular, chamado gelatinização, que provoca várias mudanças nos grânulos, como intumescimento, absorção de água, perda da cristalinidade e lixiviação da amilose (ANDRABI et al., 2016; BERTOFT, 2004; ŠÁRKA; DVOŘÁČEK, 2017).

Durante a gelatinização, a água se difunde pelo interior do grânulo sendo absorvida pela região amorfa que passa por um intumescimento, gerando estresse nas moléculas de amilopectina presentes na região cristalina. Esse estresse causa dissociação nas duplas hélices com a perda da estrutura cristalina, levando a perda da integridade do grânulo. A gelatinização inicia no hilo e rapidamente se espalha por toda a molécula. Ocorre inicialmente na região amorfa, favorecida pelas fracas ligações de hidrogênio dessa área (DONALD, 2004; MASON, 2009). A mudança da forma semicristalina para a forma amorfa aumenta a digestibilidade do amido, pois o torna mais acessível à ação enzimática (MA et al., 2017; TESTER; KARKALAS; QI, 2004).

A temperatura de transição e entalpia de gelatinização são características para cada tipo de amido. Além do teor de amilose, a diferença na estrutura da amilopectina influencia as propriedades do amido (WONG; JANE 1997; WONG et al., 2003). Grandes proporções de cadeias laterais longas contribuem para uma alta estabilidade do grânulo, que necessita de maior temperatura para que ocorra a gelatinização (DU et al., 2014).

O intumescimento dos grânulos de amido e a lixiviação da amilose durante o processo de gelatinização levam à formação de uma rede tridimensional, e aumento da viscosidade de pasta (SARKER et al., 2013). A pasta de amido formada caracteriza-se como uma massa viscosa que apresenta uma fase contínua de amilose e/ou amilopectina solubilizada e uma fase descontínua de grânulos de amido remanescentes (AMBIGAIPALAN et al., 2011b).

Após a gelatinização e resfriamento da pasta de amido ocorre um processo de interação molecular denominado retrogradação, no qual as moléculas de amilose se associam a outras unidades de glicose e formam duplas hélices, enquanto a amilopectina se recristaliza pela associação das suas cadeias laterais curtas (HOOVER, 2000; SHRESTHA; HALLEY, 2014; SINGH et al., 2003).

As características estruturais do grânulo, como razão amilose:amilopectina, tamanho e distribuição das cadeias laterais da amilopectina e arranjo das moléculas, exercem influência nas propriedades de gelatinização e retrogradação, principais responsáveis pelo uso industrial dos amidos (SMITH, 2001).

Os amidos nativos mais comumente utilizados na alimentação humana são derivados de grãos (trigo, milho, arroz, cevada) e raízes/tubérculos (batata e mandioca) (PERIS-TORTAJADA, 2004). Recentemente outras fontes de amido têm sido estudadas e apresentam potencial de aplicação, como as frutas imaturas (banana e manga) e as leguminosas (ervilha, feijão, grão de bico) (AVÉROUS; HALLEY, 2014b; HOOVER et al., 2010; IZIDORO et al., 2011; OVANDO-MARTÍNEZ et al., 2011; WANI et al., 2016).

Du et al., 2014 estudaram o amido de quatro variedades de feijão e encontraram valores de amilose entre 32 e 45%, e temperatura de pico de gelatinização entre 71,7 e 73,6 °C.

Por ser um evento térmico, a gelatinização pode ser avaliada através do monitorando das temperaturas inicial, média e final deste evento por técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC), para analisar a estabilidade das amostras. Também é viável a compreensão do que ocorre nas propriedades do grão, pela degradação mássica com a temperatura, por Técnica Termogravimétrica (TGA). Estas técnicas possibilitam a identificação e explanação dos possíveis eventos que ocorrem ao longo da hidratação, sendo efetivas para acompanhar uma propriedade física específica e otimizar as condições de processos para melhoramento da qualidade do produto final (SIMONI, 2017).

2.2.2 Avaliação da Degradação térmica pela Técnica Termogravimétrica (TGA) e Calorimetria Exploratória Diferencia (DSC)

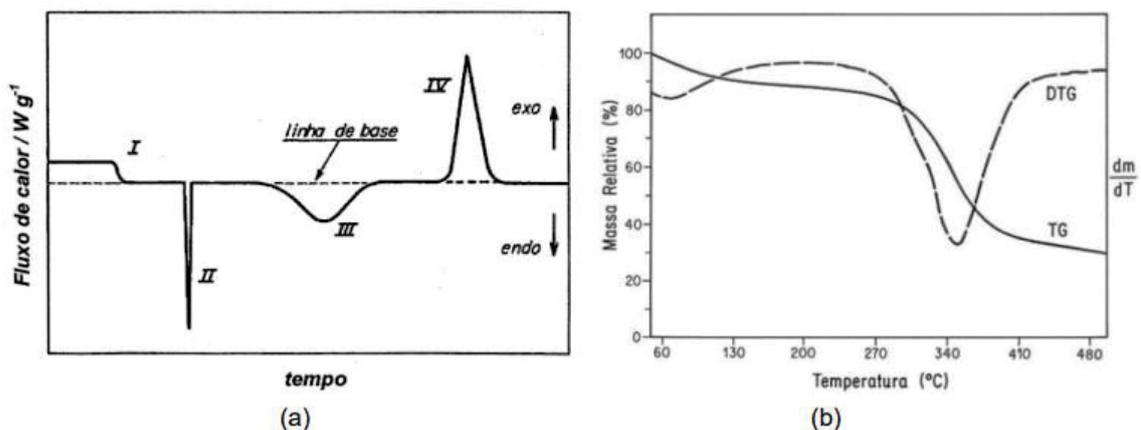
A técnica de DSC monitora a variação de energia fornecida para uma dada substância de interesse em relação a um material de referência termicamente inerte quando submetidos à programação controlada de temperatura. São registradas curvas de DSC onde a entalpia é calculada pela área dos picos, com medidas realizadas em calorímetros sem a perda de energia para o ambiente (BERNAL et al., 2002; IONASHIRO, 2004; WENDLANDT, 1986).

Os efeitos da energia envolvida estão relacionados a processos endotérmicos, observados na desidratação, transição de fase, gelatinização, reduções e reações de decomposição; e processos exotérmicos, que ocorrem ao longo de cristalizações, oxidações e algumas reações de decomposição. Os picos são avaliados pelo desvio da linha de base. Também podem ser estudados processos que envolvem variação de entropia, mais comumente aplicado quando há transição vítrea de polímeros (IONASHIRO, 2004).

Já a análise por termogravimetria possui aplicação em diversas áreas, as quais inclui o estudo da decomposição térmica de substâncias orgânicas e inorgânicas, minerais, petróleo, carvão, polímeros, alimentos, materiais explosivos, entre outros (IONASHIRO, 2004). Nesta técnica é acompanhado a perda ou ganho mássico da amostra em função da programação de temperatura controlada (DENARI; CAVALHEIRO, 2012).

Nas (FIGURAS 6a e 6b) são exemplificadas as curvas obtidas por meio das análises de DSC e TGA, respectivamente. A forma das curvas pode ser influenciada pela amostra analisada e por fatores instrumentais.

FIGURA 6 - REPRESENTAÇÃO DAS CURVAS OBTIDAS POR ANÁLISE DE (a) DSC, COM I) MUDANÇA DE LINHA DE BASE SEM PICO, II E III) PICOS ENDOTÉRMICOS E IV) PICO EXOTÉRMICO; E (b) TGA, COM A DTG, DO FARELO DE MILHO DESENGORDURADO



FONTE: Adaptado de Bernal et al., 2002 e Mothé; Damico; Machado, 2005.

Na (TABELA 6) são descritos estudos que utilizaram as técnicas de DSC e TGA em alimentos.

TABELA 6- ESTUDOS DA LITERATURA QUE UTILIZAM AS TÉCNICAS DSC E TGA

Análise Térmica	Autor(es)	Estudo
DSC	MATTIODA, 2018	Intensificação do processo de hidratação e fortificação do trigo mediante operação periódica
	SILVA, 2016	Modelagem matemática da hidratação de grãos de sorgo
	LOS, 2019	Estudo do amido, proteína e compostos fenólicos do feijão carioca
	DZAZIO; SCUDLAREK; SOWEK, 2022	Caracterização de compósitos de polipropileno com casca de soja
TGA	SIMONI, 2017	Hidratação de grão-de-bico (<i>cicer arietinum l.</i>): estudo cinético e influência na qualidade tecnológica do grão
	VERRUCK et al., 2018	Uso de análise termogravimétrica como uma abordagem inovadora para caracterização de microcápsula probiótica

FONTE: Autora, 2022.

2.3 BEBIDAS VEGETAIS

O mercado de bebidas vegetais é um setor em crescimento contínuo, impulsionado pelo aumento da adoção de dietas vegetarianas, veganas e por restrições alimentares, como alergias à proteína do leite de vaca e intolerância à lactose. Este público, seja por escolha pessoal ou necessidade, busca alternativas baseadas em plantas para substituir o leite de origem animal (ANGELINO et al., 2020).

Dentre as opções disponíveis no mercado, destacam-se bebidas à base de arroz, aveia, quinoa, amêndoas e extrato de soja. No entanto, além da soja, poucas leguminosas são exploradas na produção dessas bebidas. O feijão, uma das

leguminosas mais cultivadas globalmente, apresenta um teor de proteína significativo, variando de 20% a 30%, dependendo dos tratos culturais e da cultivar (SILVA et al., 2009). Além de sua riqueza em proteínas, o feijão é uma fonte de carboidratos, vitaminas do complexo B, minerais como ferro, cálcio, magnésio, fósforo e zinco, fibras e compostos fenólicos com propriedades antioxidantes (SILVA et al., 2009).

A anemia por deficiência de ferro é um problema nutricional significativo, afetando principalmente crianças, mulheres em idade fértil e gestantes. No Brasil, estudos mostram que cerca de 20,9% das crianças menores de 5 anos apresentam anemia, o que equivale a aproximadamente 3 milhões de crianças no país (BRASIL, 2022). A anemia tem sérias consequências para a saúde, incluindo aumento da mortalidade em mulheres e crianças, impactos na aprendizagem e redução da produtividade (BRASIL, 2022).

Diante desse contexto, bebidas fortificadas e funcionais à base de feijão surgem como uma potencial solução para atender a esse público e contribuir para o combate da anemia por deficiência de ferro, uma vez que o feijão é uma das leguminosas com maior teor desse mineral.

Apesar de ainda não serem amplamente populares, os produtos funcionais estão ganhando destaque em vários países, refletindo uma crescente demanda por alimentos e bebidas que ofereçam benefícios adicionais à saúde. Globalmente, em 2020, alimentos e bebidas fortificados e funcionais representaram um mercado avaliado em US\$ 67,9 bilhões, com perspectivas de crescimento contínuo. As bebidas funcionais, em particular, tiveram um crescimento significativo, superando os produtos alimentícios fortificados e funcionais de 2016 a 2020 (CANADÁ, 2022; EUROMONITOR INTERNATIONAL, 2021).

O aumento do interesse do consumidor em soluções nutricionais e energéticas adicionais, juntamente com mudanças nos estilos de vida, tem impulsionado o setor de alimentos funcionais nos últimos anos. Consumidores conscientes da importância de uma dieta saudável e equilibrada buscam cada vez mais produtos que atendam a essas necessidades (CANADÁ, 2016; 2017; 2022).

Nesse contexto, o desenvolvimento de bebidas fortificadas e funcionais à base de feijão carioca emerge como uma área de pesquisa promissora, com potencial para fornecer alternativas nutritivas e funcionais, além de contribuir para a promoção da saúde e o combate à anemia por deficiência de ferro.

2.3.1 Maltes

A maltagem é um processo muito bem estabelecido usado para produzir substratos de cereais para bebidas fermentadas. Cereais maltados também podem ser usados para formular produtos nutritivos, incluindo alimentos para bebês e gestantes. No entanto, apesar do custo atrativo e do valor nutricional das sementes de leguminosas, alimentos maltados à base desse tipo de material não são comuns (TRUGO et al., 1999).

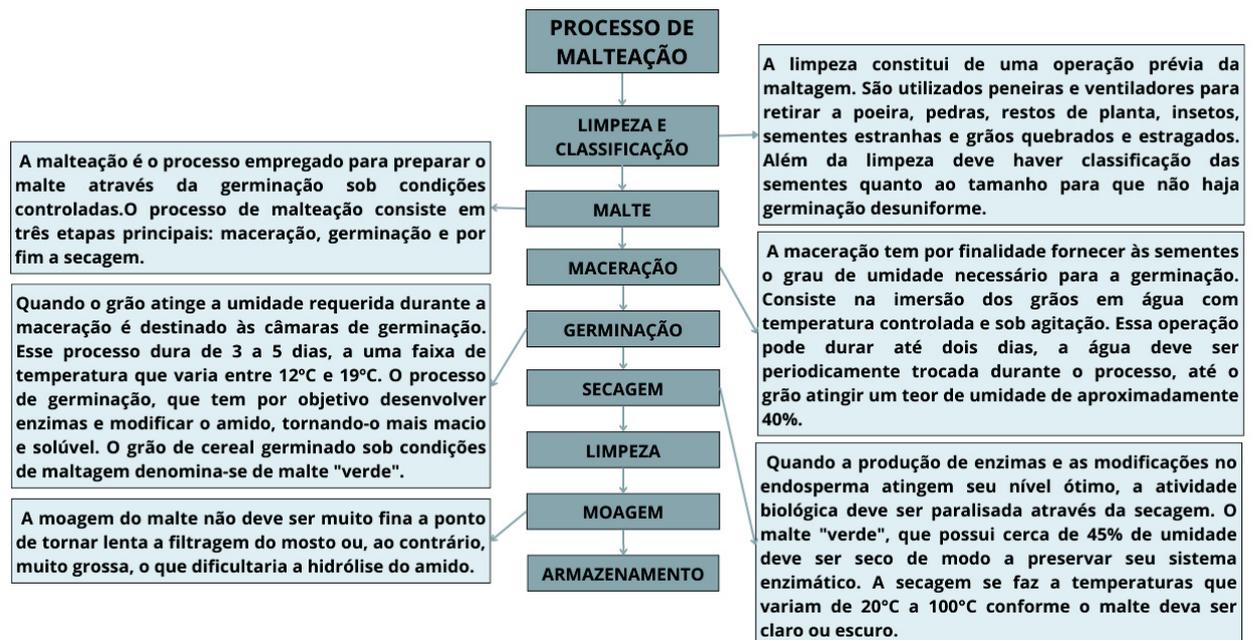
O processo de germinação que ocorre durante a maltagem promove muitas alterações químicas e bioquímicas na semente que podem aumentar o valor nutricional do produto final e também diminuir a quantidade de alguns compostos indesejáveis como α -galactosídeos, inibidores de tripsina, lectinas e fitatos (BAU et al., 1997; FERNÁNDEZ et al., 2021; MARERO et al., 1988).

Uma vez que os efeitos da germinação na composição química das sementes são dependentes das espécies vegetais, variedades de sementes ou cultivares e também das condições de germinação, é relevante conhecer melhor as modificações envolvidas durante a maltagem das diferentes sementes com potencial para serem utilizadas isoladamente ou em combinação para produção de fórmulas alimentares com características nutritivas e econômicas atrativas (TRUGO et al., 1999).

Trugo et al., 1999 estudaram a influência da maltagem por 24 e 48h em grãos de feijão preto e os resultados indicaram que a maltagem de curta duração pode ser útil para melhorar as características nutricionais. Tendo um aumento na quantidade de proteínas, cálcio e ferro.

A (FIGURA 7) descreve as principais etapas do processo para obtenção do malte e suas finalidades.

FIGURA 7 – PROCESSO DE MALTEAÇÃO.



FONTE: Adaptado de Piccini; Moresco; Munhos, 2002.

2.3.2 Chás

As bebidas de ervas medicinais são conhecidas desde a antiguidade e amplamente consumidas em todo o mundo. As infusões são preparadas pela adição de água aquecida ou fervente sobre partes da planta, enquanto as decocções envolvem a fervura da erva. O método de preparo das infusões e decocções de ervas (bebidas popularmente chamadas de chás no Brasil) favorece a extração dos compostos fenólicos das plantas, tornando as bebidas excelentes fontes destes antioxidantes naturais. O consumo de infusões e decocções de ervas medicinais é, além de um aspecto cultural, uma alternativa eficiente, de fácil acesso e baixo custo para diversos fins terapêuticos (FIGUEIRINHA et al., 2008; MAGALHÃES; SANTOS, 2021; MORAIS et al., 2009; SANTOS; MAGALHÃES, 2020).

Os chás têm recebido muita atenção por se tratarem de bebidas funcionais e por seus efeitos benéficos à saúde, associados aos seus compostos bioativos, como compostos fenólicos, aos quais são atribuídas diversas propriedades funcionais, com destaque a atividade antioxidante. O conteúdo fenólico e a capacidade antioxidante dos chás dependem principalmente da espécie da planta da qual foi preparada a bebida, pois o perfil fenólico varia de acordo com a espécie, e do processo de preparo da bebida, por infusão ou decocção, que é responsável pela

extração dos compostos bioativos da planta (FOTAKIS et al., 2016; ZIELINSKI et al., 2014).

O chá é uma das bebidas mais consumidas em todo o mundo, a segunda depois da água, cuja popularidade e disseminação pelas diversas culturas se deve, além do aroma atraente e sabor específico, às suas propriedades medicinais e potencialmente promotoras da saúde (BRAIBANTE et al., 2014; RODRIGUES, 2015; SCHMITZ et al., 2005).

As gestantes são uma das populações que têm apresentado alta frequência do uso de plantas medicinais (SÁNCHEZ-YACTAYO et al., 2020). Durante a gravidez, as ervas são frequentemente usadas como chás ou infusões TERZIOGLU BEBITOGLU (2020). Muitos estudos mostram que dentre os chás consumidos, entre eles podem existir chás com ações abortivas. Dessa forma, a bebida tipo chá de feijão carioca, contribuiria com a minimização da deficiência de ferro, sendo no momento a causa mais frequentes em gestante, podendo chegar em 59% esse índice, constituindo a principal causa de anemia na gestação que tem como principais consequências partos prematuros e recém-nascidos de baixo peso.

Além do grupo das gestantes, que necessitam de uma atenção especial à deficiência de ferro. Outros grupos como crianças, idosos e mulheres apresentam índices de deficiência de ferro e pode estar se beneficiando com a bebida tipo chá. Entretanto, pode ser consumido por qualquer indivíduo, que busca se beneficiar pelos efeitos positivos apresentado, deste que não apresente alergias a composição da bebida e não ultrapasse a quantidade de ferro recomendada por dia.

2.4 COMPOSTOS BIOATIVOS

Certos componentes presentes em alimentos de origem vegetal, conhecidos como compostos bioativos, têm sido alvo de crescente interesse devido aos seus potenciais benefícios para a saúde humana. Entre esses compostos bioativos, destacam-se os flavonoides, compostos fenólicos e taninos, que desempenham papéis importantes na promoção da saúde e na prevenção de doenças.

Os flavonoides, uma classe diversificada de compostos bioativos encontrados em frutas, vegetais e chás, têm sido amplamente estudados por suas propriedades antioxidantes e anti-inflamatórias. Eles são conhecidos por sua capacidade de neutralizar os radicais livres, substâncias altamente reativas que podem causar

danos às células e ao DNA. Além disso, os flavonoides têm sido associados à redução do risco de doenças crônicas, como doenças cardiovasculares e câncer (MANACH et al., 2004).

Os compostos fenólicos são outra classe de compostos bioativos amplamente distribuídos em alimentos de origem vegetal. Eles incluem os flavonoides mencionados anteriormente e uma variedade de outros compostos, como ácido gálico e ácido elágico. Os compostos fenólicos também demonstraram atividade antioxidante e anti-inflamatória, e estudos epidemiológicos sugerem uma ligação entre o consumo desses compostos e a redução do risco de doenças crônicas (SCALBERT et al., 2005).

Os taninos, um subgrupo de compostos fenólicos, são conhecidos por suas propriedades adstringentes e podem ser encontrados em alimentos como chás, vinho tinto, frutas e nozes. Eles têm a capacidade de se ligar a proteínas e minerais, afetando a biodisponibilidade de certos nutrientes. Além disso, os taninos também exibem atividade antioxidante e podem contribuir para a proteção contra danos oxidativos (SMERIGLIO et al., 2017).

Em resumo, os flavonoides, compostos fenólicos e taninos são exemplos de compostos bioativos encontrados em alimentos vegetais que desempenham um papel importante na promoção da saúde e na prevenção de doenças. Seus efeitos antioxidantes e anti-inflamatórios têm sido amplamente investigados, e o consumo regular de alimentos ricos nesses compostos pode fazer parte de uma dieta saudável e equilibrada.

2.4.1.1 Efeito da germinação nos compostos bioativos

A germinação é um processo biológico natural em que as sementes saem de seu estágio de latência, uma vez que as condições necessárias para o crescimento e desenvolvimento, tais como umidade, temperatura e nutrientes, dentre outros fatores, são ofertados. Tem sido identificada como uma tecnologia barata e eficaz para melhorar a qualidade das leguminosas, aumentando sua digestibilidade e a disponibilidade de aminoácidos (CHANG; HARROLD, 1988, SANGRONIS; MACHADO, 2007).

O processo de germinação começa com a absorção de água pela semente e termina com o crescimento do eixo embrionário, no qual ocorre a produção do

embrião através do tegumento que caracteriza o alimento germinado. A sequência de eventos fisiológicos é influenciada por diferentes fatores internos, incluindo inibidores e promotores da germinação, enzimas hidrolíticas que liberam nutrientes do embrião (germe) e endosperma do grão; e fatores externos como luz, temperatura, água, gases e substrato (meio de crescimento) (DZIKI; GAWLIK-DZIKI, 2019). Esses fatores externos são condições ideais e são padronizados para que os resultados dos testes de germinação possam ser reproduzidos e comparados, dentro dos limites tolerados pelas Regras para Análise de Sementes (RAS) (BRASIL, 2009).

Durante o processo de germinação os carboidratos, proteínas, lipídeos, vitaminas, minerais e compostos bioativos apresentam modificações induzidas por enzimas e a qualidade nutricional é melhorada, o que pode indicar possíveis efeitos benéficos para a saúde no consumo regular de grãos germinados, fazendo parte dos alimentos funcionais, que, segundo a Agência Nacional de Vigilância Sanitária (ANVISA), na resolução 18, de 04/04/1999, definiu “Alimentos funcionais são quaisquer alimentos ou ingredientes que, além das funções nutricionais básicas, quando consumidos como parte da dieta usual, produzem efeitos metabólicos e / ou fisiológicos e / ou benéficos para a saúde e devem ser seguros para consumo sem supervisão médica ” (FERNÁNDEZ et al., 2021).

A germinação é detectada visualmente pelo rompimento do grão com o surgimento da radícula. Assim, o embrião gera uma pressão para a saída da mesma. O alongamento celular na radícula do embrião é provavelmente induzido pelo afrouxamento da parede celular através das proteínas modificadoras de parede celular, como as expansinas, que estão sob o controle da giberelina. Neste período há aumento no consumo de oxigênio. Essa taxa decai em seguida até que a radícula penetre na membrana, quando ocorre novamente aumento expressivo do consumo desse gás (DE CASTRO, 2020).

Dados de pesquisas abordados na literatura demonstram o potencial efeito positivo na composição e qualidade nutricional dos grãos germinados. A (TABELA 7) apresenta alguns estudos publicados nos últimos 5 anos mostrando brevemente os efeitos positivos da germinação nos compostos bioativos de diferentes sementes e grão.

TABELA 7- ESTUDOS SOBRE OS EFEITOS POSITIVOS DA GERMINAÇÃO NOS COMPOSTOS BIOATIVOS DE DIFERENTES SEMENTES E GRÃO.

Autor(es) e Grãos germinados	Determinações	Mudanças observadas
HAYTA; İŞÇIMEN (2017) Grão de bico	Conteúdo de fenólicos totais; DPPH; ABTS (TEAC).	Germinação aumentou 2 vezes o teor de compostos fenólicos totais; 4 vezes o valor de DPPH e 2 vezes o valor de TEAC.
KAUR; SINGH (2017) Cultivares de Arroz	Conteúdo de fenólicos totais; flavonoides totais; taninos totais; DPPH.	Três, das dez variedades de arroz estudadas apresentaram nível maior de compostos bioativos e AA após 48 horas de germinação.
MAMILLA; MISHRA(2017) Grão de bico Feijão mungu Lentilhas Feijão roxo	Compostos fenólicos totais (TPC); flavonoides totais. Quantificação de ácidos fenólicos por HPLC e DPPH	O teor de polifenóis totais variou de 0,45 a 62 g/kg para grãos não germinados e de 0,68 a 2,45 g/kg e 0,65 a 2,53 g/kg durante a germinação a 30 °C e 40 °C, respectivamente.
SALEH et al., (2019) Favas Grão de bico Lentilha Feijão	Conteúdo de fenólicos totais; flavonoides totais; DPPH.	Fenólicos totais, flavonoides totais, e AA das leguminosas aumentaram proporcionalmente ao tempo de germinação (6 dias máximos).
SRITONGTAE et al.,(2017) Feijão-arroz	Fenólicos totais; composição de flavonoides e ácidos fenólicos por HPLC-MS; DPPH e FRAP	Germinação por 24 horas aumentou o conteúdo total de fenólicos e atividade antioxidante aproximadamente 2 vezes.
WANG et al.,(2016) Linhaça	Conteúdo de fenólicos totais (TPC); conteúdo de flavonoides; ORAC; análises atividade antioxidante	Germinação por 10 dias aumentou 55 vezes o conteúdo de flavonoides e 6 vezes o conteúdo de TPC. . Os valores de ORAC aumentaram 7 vezes.

FONTE: AUTORA, 2022.

Os compostos fenólicos podem estar presentes nas células em suas formas livres e solúveis, esterificadas e insolúveis (NAYAK et al., 2015) e, de maneira geral, a germinação resulta em mudanças no nível de fenólicos totais da semente germinada, atuando diferentemente em suas frações (CEVALLOS-CASALS; CISNEROS-ZEVALLOS, 2010). A maioria dos compostos fenólicos é sintetizada no espaço intracelular, especialmente no retículo endoplasmático e é armazenada no vacúolo celular como fração solúvel (AGATI et al., 2012). Já os compostos insolúveis estão normalmente ligados nos componentes estruturais da parede celular como celulose, hemicelulose, lignina, proteínas estruturais e carboidratos por meio de ligações covalentes e, devido a funções potencialmente fisiológicas, esta fração vem sendo explorada nos últimos anos (CHEN et al., 2016).

Além disso, nos períodos iniciais de germinação, os carboidratos, proteínas e lipídios são degradados e acompanhados consequentemente de um aumento de açúcares simples e aminoácidos livres (NELSON et al., 2013) e as frações de fenólicos insolúveis ligadas à parede celular também são liberadas. Por outro lado, com a formação de novas estruturas devido ao crescimento da planta durante a germinação, os compostos fenólicos solúveis podem se ligar à carboidratos e proteínas para a formação de novas paredes celulares, diminuindo sua quantidade na fração solúvel (GAN et al., 2017). Assim, a síntese e transporte de fenólicos para uso na parede celular ocorrem ao mesmo tempo (YEO; SHAHIDI, 2015) o que faz com que a taxa de liberação e conjugação varie de acordo com a semente que está germinando (GAN et al., 2017). Trata-se, portanto, de um processo complexo, contínuo e peculiar de cada semente, e, com grande potencial de estudo. De fato, a literatura mostra diferentes pesquisas com o objetivo de entender e explicar as transformações de compostos bioativos que ocorrem durante a germinação.

2.5 PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

A hidratação é uma operação física que viabiliza a aderência da água na superfície do grão e penetração através da micrópila, hilo e da casca, direcionando-se para os cotilédones até atingir o centro, o que justifica as possíveis mudanças bioquímicas e morfológicas responsáveis pela obtenção de características desejáveis no produto final. Assim, em condições viáveis, pode proporcionar melhorias na caracterização fisiológica, no cozimento, redução de fatores

antinutricionais, digestibilidade e no rendimento da extração de determinados componentes de interesse, além de melhorar a aparência de cereais e leguminosas que normalmente passam por esta etapa inicial de hidratação (BOTELHO et al., 2013; GOWEN et al., 2007; MASKAN, 2002).

O processo de hidratação pode ser utilizado na indústria com algumas finalidades, como por exemplo, cozimento das leguminosas para gelatinização do amido e geleificação das proteínas; obtenção do malte para fabricação das cervejas e aplicação em produtos de panificação; processo de parbolização do arroz, além de facilitar a remoção da película do grão para posterior processamento (DERYCKE et al., 2005 ; KHAZAEI; MOHAMMADI ,2009 ; MONTANUCI et al., 2014; YILDIRIM et al., 2011). Desse modo, é importante conhecer a cinética de absorção de água, como irá influenciar as variáveis do processo e como se podem prever as condições de hidratação ou maceração dos grãos. Esses dados quantitativos sobre a hidratação são importantes na otimização dos processos industriais (MASKAN, 2002).

Segundo Geankoplis (1983) a velocidade de hidratação aumenta com o aumento da temperatura. O processo geral de hidratação se inicia com a transferência de água para a superfície do sólido, em seguida a água penetra e se difunde no sólido, ocorrendo a liberação de sólidos solúveis são transferidos para a solução.

Várias pesquisas já demonstraram que o aumento da temperatura do meio de imersão é uma excelente forma de acelerar a absorção de água de diversas sementes, encurtando o tempo de imersão (ABU-GHANNAM; MCKENNA, 1997a; HSU, 1983; HUNG et al., 1993; KON, 1979; MASKAN, 2002; QUAST; SEYHANGÜRTAS et al., 2001; SIL, 1977; SOPADE; OBEKPA, 1990; TANG et al., 1994). O teor de umidade dos grãos durante a hidratação pode ser relacionado diretamente a duas variáveis: o tempo e a temperatura. Conforme o tempo de hidratação aumenta, a quantidade de água absorvida aumenta (CHOPRA e PRASAD, 1994; SOPADE; OBEKPA, 1990; WANG et al., 1979).

Além da influência da temperatura, os grãos apresentam estruturas porosas, como a micrópila e o hilo, que faz com que a água penetre rapidamente nos estágios iniciais da hidratação, por capilaridade. Posteriormente, a difusão passa a ser o mecanismo de transferência de massa predominante, mantendo o fluxo no sentido das bordas dos cotilédones até o núcleo do grão (BORGES; JORGE; JORGE, 2017;

CHACÓN ALVAREZ; JORGE; JORGE, 2020; MATTIODA, 2018; MIANO; AUGUSTO, 2018; MIANO; GARCÍA; AUGUSTO, 2015; OLADELE et al., 2018).

Curvas cinéticas de hidratação, que evidenciam a dinâmica de aumento de umidade dos grãos ao longo do tempo têm sido muito utilizadas para caracterização de cereais e leguminosas (TABELA 8).

TABELA 8 – ESTUDOS CINÉTICOS DE HIDRATAÇÃO.

Autores	Grão
Nicolin et al., 2017	Arroz e Milho
Chacón Alvarez; Jorge; Jorge, 2020	Cevada
Montanuci et al., 2014	Cevada
Oliveira et al., 2013	Feijão azuki
Miano et al., 2018	Feijão carioca
López et al., 2017	Feijão carioca
Cecchin, 2016	Feijão preto
Abu-Ghannam; Mckenna, 1997a	Feijão vermelho
Khazaei; Mohammadi, 2009	Gergelim
Simoni, 2017	Grão de bico
Borges; Jorge; Jorge, 2017	Soja
Silva, 2016	Sorgo
Mattioda, 2018	Trigo
Maskan, 2002	Trigo
Oliveira; Matos Jorge; Jorge, 2020	Triticale

Fonte: AUTORA, 2022.

Além dos estudos que utilizam água aquecida para tornar a hidratação dos grãos mais rápida, alguns destes estudos abordam outras técnicas de intensificação, como o uso de ultrassom (GHAFOOR et al., 2014; LÓPEZ et al., 2017; MIANO; GARCÍA; AUGUSTO, 2015; PATERO; AUGUSTO, 2015; ULLOA et al., 2015), a aplicação de gradientes de pressão (BELLO et al., 2008; NAVIGLIO et al., 2013; PRAMIU et al., 2018; RAMASWAMY et al., 2005; ZANELLA-DÍAZ et al., 2014), a aplicação de irradiação (CASTANHA et al., 2019 e RAMASWAMY et al., 2005), a aplicação de micro-ondas (PANDA; SHRIVASTAVA ,2019), e a modulação da temperatura (CECCHIN, 2016; CHACÓN ALVAREZ et al., 2020; MATTIODA ,2018; OLADELE et al., 2018; OLIVEIRA et al., 2020).

2.5.1 Processo de fortificação na hidratação

Um alimento enriquecido, ou fortificado, decorre da adição de um ou mais nutrientes, visando reforçar o respetivo valor nutricional, repondo quantitativamente os nutrientes destruídos durante o processamento do alimento, ou suplementando-

os com nutrientes, para obter um teor superior ao conteúdo considerado normal de forma a prevenir ou corrigir eventuais deficiências nutricionais apresentadas pela população em geral ou de grupos específicos (BARROSO, 2014; BRASIL, 2008; VELLOZO; FISBERG, 2010).

Paralelamente aos aspectos nutricionais, muitas empresas têm encontrado na fortificação de alimentos uma condição importante na diferenciação de seus produtos junto aos consumidores (CANAUD, 2007).

A atenção a públicos-alvo específicos tais como crianças, adolescentes, idosos, gestantes e outros leva à adequação de um produto, antes de natureza geral, às necessidades nutricionais específicas destes grupos e a correção do balanço nutricional do alimento para atender a estas necessidades. Cada grupo específico pode apresentar diferentes deficiências nutricionais que podem ser evitadas com os alimentos fortificados. Entre as mais importantes estão as de cálcio, ferro, zinco e magnésio (CANAUD, 2007; BRASIL, 2008; VELLOZO; FISBERG, 2010).

54% da população (chegando a 80% em crianças de até quatro anos) possui deficiência de ferro, isso acontece por várias razões, entre elas o baixo teor de minerais essenciais em alimentos básicos e a baixa absorção desses minerais na dieta. Tendo como consequência anemia, déficit de aprendizagem, diminuição da capacidade de trabalho e déficit irreversível de quociente de inteligência em crianças até quatro anos (CANAUD, 2007).

Na alimentação o ferro encontra-se em duas formas – heme e não heme. Basicamente o ferro heme é derivado das hemácias e das células musculares, portanto encontrado em alimentos de origem animal e o ferro não heme é encontrado de forma abundante nos alimentos de origem vegetal. O feijão carioca possui uma quantidade de 5,1 mg/100g de ferro, porém após o seu cozimento esse valor é reduzido. O estudo de Junior et al., 2014, verificou que o feijão carioca apresentou 92 mg/kg de teor de ferro in natura, e após o cozimento por 40 minutos, observou-se que houve uma redução de 57% do teor de ferro.

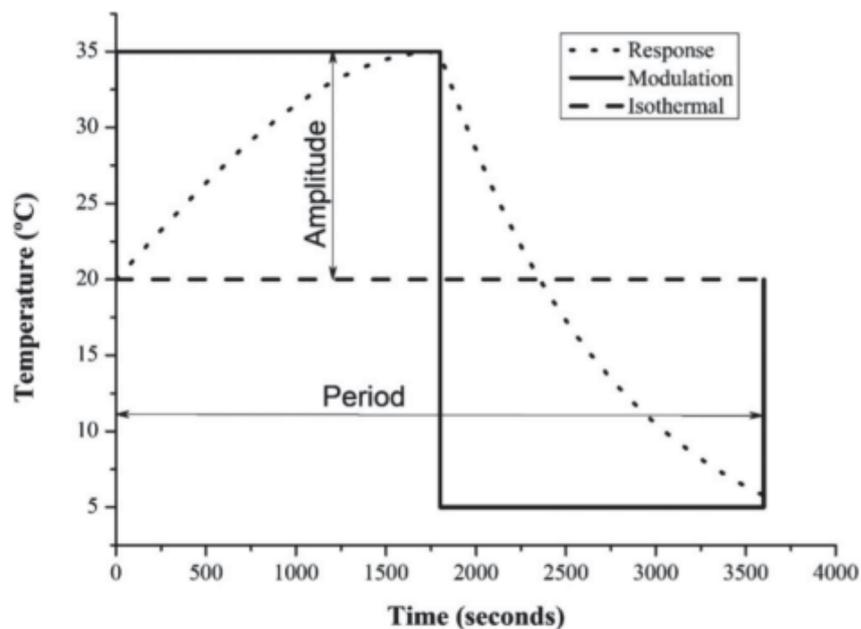
Miano et al., (2018), estudaram a incorporação de ferro em grãos de feijão durante a hidratação com e sem o uso de ultrassom. Em ambos os trabalhos, os autores observaram um aumento notável no conteúdo desses minerais nos grãos.

Dessa forma, pesquisas devem ser estudadas para a incorporação de alimentos fortificados, a fim de reduzir carências nutricionais.

2.6 OPERAÇÃO PERIÓDICA

A operação periódica é uma técnica que consiste na modulação contínua das condições de operação, como temperatura, em um dado período e amplitude Defendi et al., (2016) e tem como finalidade melhorar o desempenho do processo (SILVESTON; HUDGINS, 2012). Período (P) e amplitude (A) são duas variáveis na operação periódica, sendo que o período é o tempo entre as repetições de uma mudança a partir da condição inicial e amplitude é a alteração no valor de uma condição inicial de sua média (FIGURA 8) (SILVESTON; HUDGINS, 2012). Quando a variável modulada permanece em regime transiente, classifica-se como uma operação periódica MATTIODA (2018).

FIGURA 8- REPRESENTAÇÃO DA OPERAÇÃO PERIÓDICA APLICADA AO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO, SOB MODULAÇÃO DA TEMPERATURA.



FONTE: CHACÓN ALVAREZ; JORGE; JORGE, 2020.

Outros estudos utilizando variáveis moduláveis são encontrados na literatura, como apresentado na (TABELA 9).

TABELA 9- ESTUDOS COM MODULAÇÃO DE VARIÁVEIS

Autor(es)	Processo	Variável modulada
Cecchin, 2016	Hidratação de feijão preto	Temperatura da água
Defendi, Paraíso e Jorge (2014)	Secagem de arroz	Temperatura do ar
Defendi; Paraíso; Jorge, 2016	Secagem de soja	Temperatura do ar
Defendi; Paraíso; Jorge, 2017	Secagem de soja	Temperatura e velocidade do ar
Mattioda, 2018	Hidratação de trigo	Temperatura da água
Oladele et al., 2018	Hidratação de aveia	Temperatura da água
Oliveira; Matos Jorge; Jorge, 2020	Hidratação de tritcale	Temperatura da água

FONTE: AUTORA, 2022.

O propósito desta operação é verificar a possibilidade de redução nos gastos energéticos e de melhoria na qualidade do produto, através da intensificação do transporte de massa e energia Defendi et al., (2016) e MATTIODA (2018) e Mattioda et al., (2019). Estudos mostram reduções de 50%, 66,7% e até 82,9% no tempo de hidratação de tritcale Oliveira et al., (2020), trigo MATTIODA (2018) e cevada Chacón Alvarez et al., (2020), respectivamente, utilizando modulações da temperatura.

Levando em consideração que é uma metodologia emergente, embora eficaz, com poucos trabalhos registrados na literatura, a operação periódica em processos de hidratação necessita ser mais investigada, devendo ampliar sua aplicação para outros tipos de grãos ainda não avaliados, a fim de entender melhor a influência das variáveis moduladas sob o processo.

2.7 MODELOS MATEMÁTICOS APLICADOS À CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO

Modelos matemáticos aplicados à cinética de hidratação são ferramentas importantes para monitorar, simular, dimensionar e otimizar o processamento industrial de grãos. Os modelos matemáticos desenvolvidos para descrever o comportamento dinâmico da absorção de água podem ser empíricos, semi-empíricos e fenomenológicos (COUTINHO et al., 2007; NICOLIN et al., 2011; OMOTO et al., 2009).

A (TABELA 10) apresenta estudos utilizando os modelos de Peleg, Page, Miano – Ibarz – Augusto, Difusão, Omoto-jorge e Nicolin-Jorge. Que serão abordados posteriormente.

TABELA 10- ESTUDOS QUE UTILIZAM MODELOS MATEMÁTICOS NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.

Autor(es)	Grão estudado	Modelo
Nicolin et al., 2017	Arroz e milho	Nicolin–Jorge
Oladele et al., 2019	Aveia	Peleg e Miano – Ibarz – Augusto
Chacón Alvarez; Jorge; Jorge, 2020	Cevada	Peleg e Omoto-Jorge
Montanuci et al., 2014	Cevada	Peleg e Difusão
Abu-Ghannam; Mckenna, 1997b	Feijão vermelho	Peleg
Sopade; Obekpa, 1990	Feijão-caupi e amendoim	Peleg
Simoni, 2017	Grão de bico	Peleg, Page, Difusão, Omoto-Jorge, Nicolin-Jorge
Hung et al., 1993	Grão de bico e ervilha	Peleg
Silva, 2016	Sorgo	Peleg, Page, Difusão, Omoto-Jorge
Mattioda, 2018	Trigo	Peleg, Omoto-Jorge e Difusão

FONTE: AUTORA, 2022.

2.7.1 Modelos empíricos

Os modelos empíricos apresentam correlações matemáticas mais simples, obtidas por meio de dados experimentais. São largamente aplicados devido à sua simplicidade e por fornecerem bons ajustes, apesar de não tomarem por base as leis da física. Levando em consideração a complexidade das leis de transferência de massa, que envolvem várias funções e parâmetros, Peleg propôs em 1988 um modelo empírico com dois parâmetros e não-exponencial. Este modelo se tornou muito conhecido por ser de fácil interpretação e tem sido o modelo empírico mais utilizado nos últimos anos em estudos de hidratação de grãos por gerar ajustes bastante satisfatórios (FRACASSO, 2011 e MASKAN, 2002).

Outros modelos empíricos também têm sido aplicados para descrever o processo de hidratação, como o modelo de Page, desenvolvido em 1949, e o modelo cinético de Primeira Ordem. O modelo de Page foi originalmente obtido a partir do processo de secagem, mas tem sido aplicado em estudos de hidratação gerando uma boa qualidade de ajuste.

2.7.1.1 Modelo de Peleg

Peleg, (1988) propôs um modelo empírico (EQUAÇÃO (1)) e ajustou-o aos dados na literatura sobre a absorção de água de leite em pó e arroz, obtendo coeficiente de correlações da ordem de 0,95 a 0,99. Por sua simplicidade, o modelo de Peleg é o modelo empírico mais utilizado nos últimos anos para simular comportamento de diferentes grãos e alimentos durante a hidratação. Embora não seja derivado de qualquer lei física ou teoria da difusão, sua aplicação tem sido utilizada em vários processos de hidratação para grãos e leguminosas (MASKAN, 2002).

Segundo Ferraz (2008), o modelo de Peleg avalia os dados através da relação entre o inverso da razão da umidade em relação ao tempo.

$$U(t) = U_0 + \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (1)$$

Onde: $U(t)$ é a umidade instantânea de tempo t (%); U_0 a umidade inicial (%); t o tempo (h); k_1 a taxa constante (h^{-1}), inversamente relacionada à taxa inicial de absorção de água; e k_2 a constante de capacidade ($\%^{-1}$), inversamente relacionada à constante de equilíbrio Gowen et al., (2007 e Sharanagat et al., (2018).

Os parâmetros do modelo de Peleg podem ser obtidos a partir da equação em sua forma linearizada (EQUAÇÃO (2)), através de uma regressão linear.

$$\frac{t}{U(t) - U_0} = k_1 + k_2 t \quad (2)$$

2.7.1.2 Modelo de Page

Em 1949, para descrever a secagem de grãos de milho, Glen E. Page desenvolveu uma equação (EQUAÇÃO (3)) matematicamente idêntica à função de distribuição Weibull, comumente utilizado para hidratação de grãos Cunha et al., (1998 e Khazaei; Mohammadi (2009).

$$U(t) = U_{eq} + (U_0 - U_{eq}) \exp(-k_p t^N) \quad (3)$$

Onde: $U(t)$ é a umidade no instante de tempo t (%); U_0 a umidade inicial (%); U_{eq} a umidade de equilíbrio (%); N um parâmetro adimensional e k_p (h^{-1}) o parâmetro relacionado à taxa de absorção do processo.

Os parâmetros do modelo de Page podem ser obtidos a partir da equação em sua forma linearizada (EQUAÇÃO (4)), através de uma regressão linear.

$$\ln\left(-\ln\left(\frac{U_t - U_{eq}}{U_0 - U_{eq}}\right)\right) = N \ln(t) + \ln(k_p) \quad (4)$$

2.7.2 Modelo semi-empírico

Um modelo é semi-empírico quando possui equações empíricas e teóricas combinadas para a descrição do fenômeno.

2.7.2.1 Modelo de Miano – Ibarz – Augusto

Este modelo foi desenvolvido por Miano; Ibarz; Augusto, (2017) para descrever a hidratação do milho. Utilizando um processo com dois mecanismos simultâneos de influxo de água. A (EQUAÇÃO (5)) demonstra este modelo.

$$M_t = M_o + (M_\infty - M_o) \cdot [p(1 - e^{-k_a t}) + (1 - p)(1 - e^{-k_b t})] \quad (5)$$

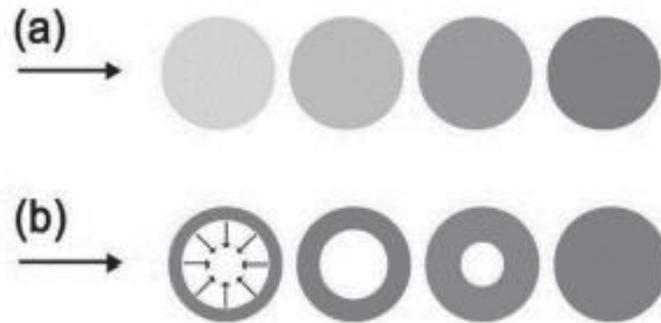
onde M_t é o teor de umidade do grão (% db) em cada tempo, t (min); M_o é o teor de umidade inicial do grão (% db); M_∞ é o teor de umidade de equilíbrio do grão (% db); p é a fração de água absorvida pelo grão no processo rápido ou curto; e k_a e k_b são parâmetros globais de transferência de massa na primeira e segunda fases do processo, respectivamente (min^{-1}) (OLADELE et al., 2019).

2.7.3 Modelos fenomenológicos

Os modelos fenomenológicos são menos simples e, diferentemente dos empíricos, têm fundamentação teórica e parâmetros com significado físico Omoto et al., (2009), apresentando vantagens no que diz respeito ao detalhamento das tendências do processo (HSU, 1983; NICOLIN et al., 2011). São exemplos de modelos fenomenológicos os modelos de parâmetros concentrados, que assumem que o grão absorve a água de maneira uniforme por todo seu volume, apresentando

umidade constante para um dado instante de tempo, e os modelos de parâmetros distribuídos, que assumem a absorção gradual de água no sentido das partes periféricas do grão para o núcleo, com diferentes teores de umidades ao longo de seu raio (FIGURA 9) (COUTINHO et al., 2007; FRACASSO 2011; SIMONI 2017).

FIGURA 9- EXEMPLIFICAÇÃO ESQUEMÁTICA DO REGIME DE HIDRATAÇÃO DE PARÂMETROS (A) CONCENTRADOS E (B) DISTRIBUÍDOS.



FONTE: SIMONI, 2017.

O modelo de de Omoto et al., (2009), Nicolin et al., (2015) e o modelo de Difusão Crank, (1975) são exemplos de modelos de parâmetros concentrados e de parâmetros distribuídos.

2.7.3.1 Modelo de Difusão

A difusão da água em uma partícula esférica pode ser expressa pela aplicação da lei de Fick para um sistema em que não há alteração do tamanho ao longo do processo. Crank (1975) foi quem estudou a difusão, onde é estimado pelo modelo o coeficiente de difusividade efetivo (D_{ef}) com a aplicação de um balanço de massa na superfície do grão, sendo considerado o transporte de água na direção radial (EQUAÇÃO (6)). Onde a concentração é uma função do tempo t (s) e da coordenada radial a_r (m).

$$\frac{\partial U}{\partial t} = D_{ef} \left(\frac{\partial^2 U}{\partial a_r^2} + \frac{2}{a_r} \frac{\partial U}{\partial a_r} \right) \quad (6)$$

Pressupondo que o coeficiente de difusão (D_{ef}) é independente da concentração e que a umidade inicial da partícula deve ser homogênea em toda área do grão, em que as condições de contorno são:

$$U = 0, a_r = 0, t > 0;$$

$$U = r U_0, a_r = r, t > 0;$$

$$U = a_r f(a_r), t = 0, 0 < a_r < r.$$

Então a solução do modelo de difusão é obtida e expressa como (EQUAÇÃO (7)):

$$U(t) = U_{eq} + (U_0 - U_{eq}) \frac{6}{\pi^2} \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp\left(-\frac{D_{eff} n^2 \pi^2 t}{r^2}\right) \quad (7)$$

Onde: r é o raio do grão (m); n o número de termos; U_0 a condição inicial de umidade (%); U_{eq} a condição de contorno (%), a qual considera que a superfície do grão mantém a umidade de equilíbrio ao longo da hidratação; e $U(t)$ é a umidade (%) no instante de tempo t .

2.7.3.2 Modelo de Omoto – Jorge

Omoto et al., (2009) desenvolveram um modelo de parâmetros concentrados com volume constante para hidratação de grãos de ervilha a partir das etapas elementares de transferência de massa por convecção. A representação do modelo foi de modo satisfatório com um desvio máximo de 5% a partir dos ajustes individuais. A forma generalizada representou as principais tendências da hidratação com desvio máximo um pouco superior, de 7%, em relação a todos os dados experimentais, o que possibilitou a utilização deste para estimar os tempos necessários de hidratação para se atingir a umidade desejada à uma dada temperatura, nas condições de operação.

No modelo é considerado um balanço de massa em regime transiente com volume constante e concentração de água uniforme no interior do grão. A (EQUAÇÃO (8)) representa a variação da massa de água no grão (m_A) com o tempo (t).

$$\frac{dm_A}{dt} = N_A \cdot A \quad (8)$$

Onde: N_A é o fluxo mássico de água ($\text{g} \cdot \text{min}^{-1} \cdot \text{cm}^{-2}$) e A é a área superficial do grão (cm^2).

Ao considerar a variação da massa de água no grão (m_A) como o produto de sua concentração (ρ_A) pelo volume do grão (V), e o fluxo mássico (N_A) como o produto do coeficiente de transferência de massa K_s ($\text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$) e a área (A) pela

diferença entre a concentração média de água no grão (ρ_A) e a concentração de água no grão no equilíbrio (ρ_{eq}), obtém-se a (EQUAÇÃO (9)):

$$\frac{d(\rho_A.V)}{dt} = K_s(\rho_{eq} - \rho_A) \cdot A \quad (9)$$

Neste modelo foi proposta uma geometria esférica do grão com raio r e volume constante com $\rho_A = \rho_{A0}$ no instante $t=0$, obtendo a (EQUAÇÃO (10)) que, com um rearranjo (EQUAÇÃO (11)), é utilizada para obtenção do parâmetro K_s .

$$\frac{d(\rho_A)}{dt} = \frac{3K_s}{r} (\rho_{eq} - \rho_A) \quad (10)$$

$$\rho_A(t) = -e^{-\frac{3K_s t}{r}} (\rho_{eq} - \rho_{A0}) + \rho_{eq} \quad (11)$$

2.7.4 Modelo de Nicolin – Jorge

O desenvolvimento desse modelo foi baseado na hidratação de soja, considerando um balanço de massa global e sistema de parâmetros concentrados à volume constante com configuração esférica. De acordo com Nicolin et al., (2015) o equilíbrio revela que o fluxo de água no grão ocorre por convecção natural até atingir a superfície e por difusão quando no interior, interferindo na diminuição do coeficiente de transferência de massa (K_s), sendo esta função da concentração de água nos grãos (ρ_A).

O modelo proposto foi comparado com o de Omoto et al., (2009), porém, este considerou o coeficiente de massa, K_s , constante, o que facilita a obtenção da função analítica para o modelo proposto.

Com o fluxo convectivo (N_A) dado por $N_A = K_s (\rho_{eq} - \rho_A)$ tem-se a diferencial representada pela (EQUAÇÃO (12)). No modelo foi desconsiderado a distribuição espacial de umidade no interior do grão, ou seja, foi descrito o conteúdo médio de umidade do grão como um todo, como uma função do tempo.

$$V \frac{d\rho_A}{dt} = K_s(\rho_{eq} - \rho_A) \cdot A \quad (12)$$

Ao substituir as equações de volume ($V = (4/3)\pi r^3$) e área ($A = 4\pi r^2$) da esfera na (EQUAÇÃO (12)) é possível obter a equação diferencial para a hidratação de grãos esféricos (EQUAÇÃO (13)), onde “C” significa “constante”.

$$\frac{d\rho_A}{dt} = \frac{3K_s^C}{r} (\rho_{eq} - \rho_A) \quad (13)$$

No início da hidratação ($t=0$) é considerada a condição $\rho_A = \rho_{A0}$, onde os grãos apresentam umidade constante (ρ_{A0}). Assim, a solução analítica pode ser apresentada pela (EQUAÇÃO (14)).

$$\rho_A(t) = \rho_{eq} - (\rho_{eq} - \rho_{A0}) e^{\frac{3K_s^C}{r}t} \quad (14)$$

O modelo demonstra que quando o sistema se aproxima do estado estacionário o coeficiente de transferência de massa K_s tende a zero, portanto, com a finalidade de considerar a vinculação entre K_s e ρ_A foi estabelecido uma dependência linear entre ambas as variáveis estabelecidas (EQUAÇÃO (15)), a qual foi inserida na (EQUAÇÃO (12)), com “L” se referindo ao termo “linear”.

$$K_s^L = a' + b\rho_A \quad (15)$$

Com as condições iniciais, referente a umidade uniformemente distribuída no grão, e a (EQUAÇÃO (15)), obtém-se a equação diferencial resultante (EQUAÇÃO (16)), que ao separar as variáveis para integração possibilita a apresentação da solução analítica do modelo, como representada na (EQUAÇÃO (17)).

$$\frac{d\rho_A}{dt} = \frac{3}{r} (a + b\rho_A) (\rho_{eq} - \rho_A) \quad (16)$$

$$\rho_A(t) = \frac{-a + \rho_{eq}K_1 \exp(K_2t)}{b + K_1 \exp(K_2t)} \quad (17)$$

Sendo $K_1 = (a + b\rho_{A0}/\rho_{eq} - \rho_{A0})$ e $K_2 = 3(a + b\rho_{eq})/r$

O parâmetro K_s^C deve ser ajustado pelo modelo de Omoto-Jorge e os parâmetros a e b pelo modelo proposto por Nicolin-Jorge.

2.8 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Conforme exposto na revisão de literatura, pode-se dizer que o feijão carioca é uma leguminosa com diversas propriedades nutricionais e é uma importante fonte de proteínas e nutrientes para a prevenção de doenças cardiovasculares, diabetes, câncer de intestino, anemia, etc. Diante da atual busca por ingredientes alimentares

sem componentes de origem animal e dietas mais saudáveis, leguminosas como o feijão carioca tornaram-se essenciais para atender às necessidades proteicas dessa população, além de fornecer altas quantidades de compostos bioativos. Além disso, o feijão carioca é economicamente acessível para todas as classes sociais, beneficiando as classes de baixa renda por ser uma fonte proteica mais barata que as carnes.

Tanto no ambiente residencial como na indústria, a hidratação de leguminosas é uma etapa primordial para reduzir a quantidade de antinutrientes presentes nos grãos e para seu processamento, facilitando etapas subseqüentes como a cocção, germinação, extração de constituintes etc. Dada a importância das alterações físico-químicas que a hidratação pode proporcionar, o conhecimento da cinética da hidratação dos grãos é de suma importância para a otimização do processamento e obtenção de produtos de qualidade de forma econômica.

Neste contexto, a modelagem matemática da cinética de hidratação é uma ferramenta muito importante a ser empregada para descrever o processo, informando o tempo necessário para atingir um teor específico de umidade. Além disso, tem-se buscado cada vez mais avaliar técnicas que possam reduzir o tempo de hidratação, como a modulação de uma determinada variável do processo. No presente trabalho será abordada a hidratação com modulação da temperatura, visto que ainda são escassos na literatura os trabalhos envolvendo esta metodologia, que pode proporcionar a intensificação do processo e redução dos custos energéticos envolvidos. Para a modelagem matemática da cinética de hidratação, serão avaliados os modelos empíricos de Peleg e de Page, modelo semi-empíricos de Miano-Ibarz-Augusto e os modelos fenomenológicos de Omoto – Jorge, Difusão e de Nicolin-Jorge, a fim de concluir qual modelo descreve o processo com maior precisão.

Levando em consideração a importância de manter a qualidade nutricional dos grãos uma vez que está sendo investigada uma metodologia alternativa para a hidratação, serão traçados o perfil de compostos fenólicos, flavonoides e taninos bem como a capacidade antioxidante dos grãos após hidratação em diferentes condições de temperatura. Para complementar o estudo, também será investigado utilizar essa leguminosa em malte e bebidas, pois esse produto contribuiria em valor

nutricional para públicos como crianças, gestantes e idosos, visto a necessidade de uma suplementação em ferro. Além de agregar em estudos com envolvendo fortificação em bebidas com base de leguminosas. Visto que há poucos trabalhos sobre esse assunto no momento.

Aliado ao conhecimento cinético da hidratação, também atuam a favor da melhoria do processamento industrial o entendimento da estrutura e composição química dos grãos, bem como os eventos que podem ocorrer quando submetidos ao aquecimento, por exemplo. Neste estudo será investigado via DSC o evento de gelatinização do amido, um dos principais constituintes do feijão carioca bem como as alterações morfológicas que os grânulos sofrem com o processo de hidratação, por intermédio de microscopia. A gelatinização é de extrema importância para digestibilidade e amaciamento dos grãos, conferindo maior palatabilidade ao alimento.

Com os objetivos pretendidos no presente trabalho, será possível a aquisição de informações sobre variedades de feijão carioca que são bastante cultivadas no Brasil e que são objetos de vários estudos. Isso pode auxiliar na divulgação da importância desta leguminosa e promover seu consumo de diferentes formas.

3 MATERIAL E MÉTODOS

As análises do presente trabalho foram realizadas no Laboratório de Engenharia de Processos de Sistemas Particulados (LEPSP), na Central Analítica e no Centro de Microscopia Eletrônica (CME), no Laboratório de Química Analítica Aplicada (LQAA) e no Laboratório de Pesquisa e Pós-Graduação em Alimentação e Nutrição (PPGAN) situados na Universidade Federal do Paraná (UFPR) no Campus Politécnico (Curitiba – PR)

3.1 MATÉRIA-PRIMA

Para as análises foi utilizada a cultivar de feijão carioca BRS FC310 (FIGURA 10), proveniente do cultivo da safra de 2022 em Ponta Grossa no Paraná. E cedidas pela Embrapa Arroz e Feijão de Ponta Grossa – PR, contabilizando cerca de 20 kg.

FIGURA 10 – AMOSTRA FEIJÃO CARIOCA CULTIVAR BRS FC310

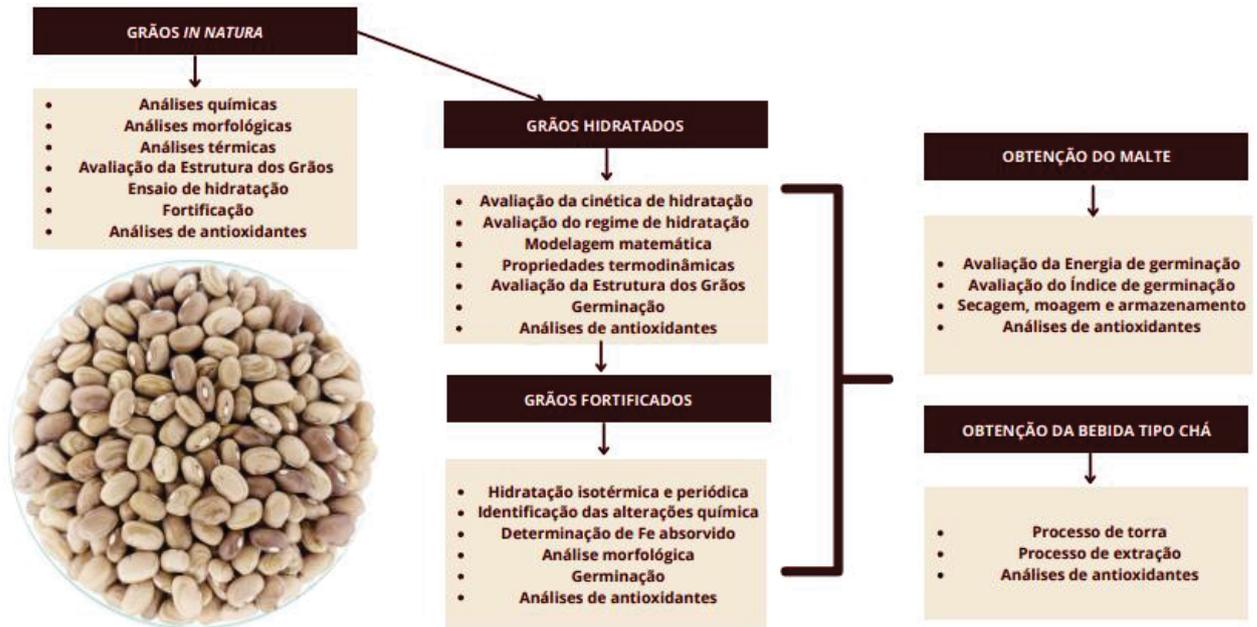


FONTE: AUTORA, 2023.

Primeiramente foi realizada a separação e seleção manual dos grãos de modo a uniformizar a amostragem, eliminando impurezas e grãos defeituosos, dos

quais compreendem os grãos quebrados e estragados. O armazenamento dos grãos foi realizado em garrafas PET de 5 litros, mantidas fechadas em temperatura ambiente, na ausência de luz. Na (FIGURA 11) está esquematizado resumidamente como foram divididas as análises.

FIGURA 11- DIAGRAMA COM AS ANÁLISES REALIZADAS NO TRABALHO.



3.2 ANÁLISES QUÍMICAS

Com os grãos *in natura* foram realizadas análises bromatológicas e determinados os teores de umidade, cinzas, fibras (solúveis, insolúveis e totais), proteínas, lipídios, carboidratos e amido (resistente, não resistente e total).

3.2.1 Composição Química

A composição centesimal foi determinada em triplicata de acordo com as metodologias do Instituto Adolfo Lutz (IAL, 2008).

- Teor de Umidade :Foi estimado a partir da secagem de aproximadamente 5 g de amostra em estufa a 105 °C por 12h.
- Teor de Cinzas: Determinado utilizando método gravimétrico pela perda de massa a partir de aquecimento a 550 °C por 5 horas, para se garantir massa constante.
- Teor de Lipídios: Obtido a partir de extração direta com éter dietil em sistema Soxhlet.

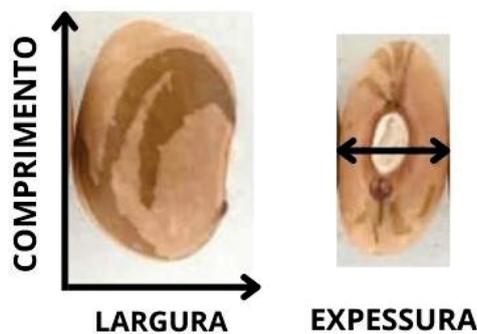
- Teor de proteína total: O teor de nitrogênio da amostra foi determinado segundo método de Kjeldahl, usando 6,25 como fator de conversão do nitrogênio presente em proteína bruta.

3.3 ANÁLISES MORFOLÓGICAS

3.3.1 Dimensões

Com auxílio de um paquímetro, 100 grãos da cultivar BRS FC310 *in natura* foram medidos com relação ao seu comprimento, largura e espessura, como mostra a (FIGURA 12). Com o resultado, foram expressas as dimensões médias.

FIGURA 12- DIMENSÕES BRS FC310



FONTE: AUTORA, 2023.

3.3.2 Avaliação da Estrutura dos Grãos (MEV)

A avaliação das estruturas que compõem os grãos (tegumento, hilo, radícula e cotilédones) foi realizada por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), utilizando o equipamento TESCAN, modelo VEGA3 LMU, mediante aplicação de diferença de potencial de 15 Kv. Os grãos *in natura* e hidratados foram cortados longitudinalmente, posicionados em stubs utilizando fita dupla face com base de cobre e metalizados com ouro.

3.4 EXTRAÇÃO DO AMIDO

A extração do amido foi realizada a partir dos grãos de feijão carioca BRS FC310 *in natura* e hidratados a 50 °C em operação isotérmica e periódica,

recolhidos em instantes de tempo pré-determinados, durante os ensaios de hidratação. Foi utilizado 100g de grãos por extração. O procedimento foi baseado na metodologia abordada por Marquezi et al., (2016) e Rupollo et al., (2011), com modificações.

Inicialmente, os grãos foram imersos em solução de hidróxido de sódio (NaOH) a 0,2% na proporção (1:5 massa/volume) para separar a proteína aderida aos grânulos de amido e evitar o crescimento microbiano, já que o processo de extração foi realizado somente no dia seguinte (24 h após a imersão). Neste período, os béqueres contendo a solução de NaOH com os grãos foram armazenados em geladeira a 4 °C.

Após as 24 h, a água de maceração foi drenada, os grãos foram lavados com água destilada até estarem bem límpidos e em seguida triturados com água destilada na proporção de (1:5 massa/volume) em liquidificador doméstico por 3 minutos. A mistura foi peneirada em peneira de 60 mesh, para remoção de partículas mais grosseiras (frações mal trituradas e cascas) e o filtrado peneirado em 150 mesh para reter partículas menores e obter um líquido mais homogêneo, que foi posteriormente decantado em béquer por no mínimo 3 h sob refrigeração (4 °C). Após este tempo, o sobrenadante foi descartado e o amido (produto de fundo) submetido a centrifugação a 5.000 rpm por 5 minutos (EXCELSATM II CENTRIFUGE, modelo 206 BL). O sobrenadante foi descartado novamente e os compostos indesejáveis sobrepostos sob o amido no tubo Falcon, que se dispõem em uma camada marrom, foram removidos. O amido foi então ressuspenso em água e centrifugado, procedimento este repetido por uma terceira vez a fim de obter-se um amido isento de partículas indesejáveis. O amido obtido foi disposto em placa de Petri e seco em estufa com circulação de ar a 40 °C por 24 horas (LABSTORE, modelo 400-2ND).

Posteriormente, para que os grânulos fossem padronizados, o amido foi peneirado gentilmente em peneira de 250 mesh, sendo em seguida armazenado em ziplock dentro de dessecador, de forma a manter os grânulos secos até a realização das análises. O amido extraído dos grãos *in natura* foi avaliado em análise térmica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e Degradação térmica pela Técnica Termogravimétrica (TGA), enquanto o amido extraído dos grãos hidratados (bem como dos grãos *in natura*) foi avaliado quanto à sua morfologia por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV).

3.4.1 Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC)

O evento de gelatinização do amido da amostra foi avaliado utilizando a Calorimetria Exploratória Diferencial. Para tal, o amido extraído da cultivar BRS FC310, *in natura* foi suspenso em água destilada na proporção de 1:4 (amido/água) e cerca de 10 mg da solução foi acondicionada em um cadinho de alumínio com capacidade de 50 μL , o qual foi hermeticamente fechado e disposto no calorímetro (Perkin-Elmer, modelo DSC 8500). Utilizou-se uma taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ entre 25 e 100°C , empregando nitrogênio como gás de purga a uma vazão de 20 mL/min. Um cadinho vazio foi utilizado como referência. A partir dos dados registrados pelo equipamento foi gerada a curva endotérmica correspondente ao evento de gelatinização. As temperaturas de início (T_i), pico (T_p) e fim (T_f) do evento de gelatinização foram identificadas e a variação de entalpia (ΔH) quantificada pela área do pico (PINEDA-GÓMEZ et. al, 2011).

3.4.2 Degradação térmica pela Técnica Termogravimétrica (TGA)

Para avaliar a variação mássica do amido dos grãos *in natura* em função da temperatura foi utilizada balança termogravimétrica da Perkin Elmer – TGA 4000 (Ultra micro balança - AD 6), com variação de temperatura de 30 a 600°C e taxa de aquecimento de $10^{\circ}\text{C}/\text{min}$. Foi empregada atmosfera de nitrogênio a uma vazão de 50 mL/min. O equipamento foi previamente tarado com cadinho de cerâmica vazia (N5200040 – Perkin Elmer). Para análise pesou-se cerca de 10 mg da amostra (BRITO; TAVARES, 2013; ELOMAA et al., 2004).

3.5 ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO

Os ensaios de hidratação foram realizados utilizando a proporção de 1:3 (amostra/água) com duração de 12 horas.

3.5.1 Hidratação em Operação Isotérmica

Os ensaios de hidratação isotérmica foram conduzidos a 10°C e 20°C , utilizando o banho ultratermostático modelo SOLAB 155/22/Brasil, e a 30, 40, 50 e 60°C utilizando o banho ultratermostático modelo SOLAB/152/30/Brasil. Para tanto, os grãos foram imersos em béqueres contendo água, dispostos dentro dos banhos,

para estes ensaios a massa inicial de grãos utilizada foi equivalente a 550g. Considerando cada condição de temperatura, os ensaios foram realizados ao menos duas vezes (para cada cultivar): uma para determinação da umidade e obtenção da cinética de hidratação, bem como da variação de volume dos grãos ao longo do ensaio; e outra para submeter os grãos aos testes de germinação e avaliação de antioxidantes.

Em um dos ensaios a 60°C, foram coletados alguns grãos em instantes de tempo pré-estabelecidos, de modo a analisá-los via MEV da mesma forma que foram analisados os grãos *in natura* (Seção 3.3.2), a fim de avaliar como as estruturas do grão respondem à condição de maior estresse térmico.

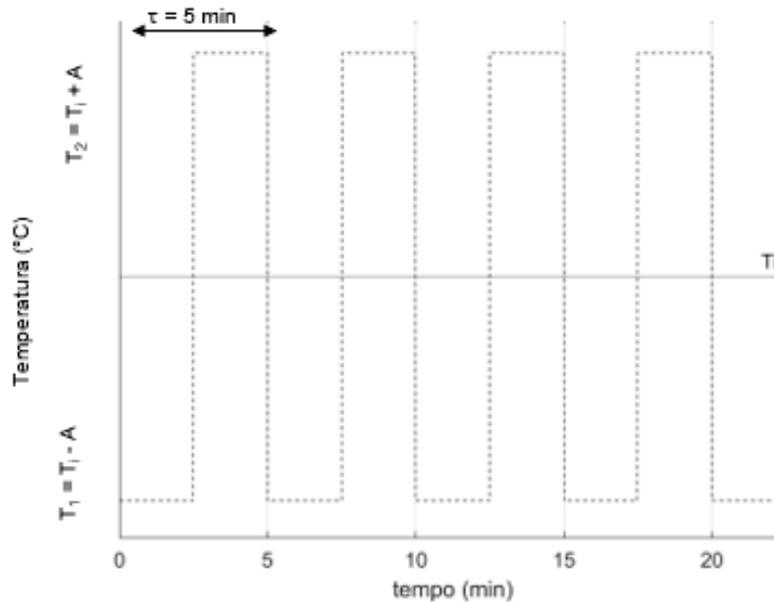
O ensaio a 60 °C foi repetido uma terceira vez, utilizando uma massa inicial de grãos equivalente a 100 g e incorporando o corante azul de metileno na água para avaliação do regime de hidratação. O ensaio a 50 °C também foi repetido com cada cultivar uma terceira vez, porém utilizando 500 g de grãos a fim de extrair amido para posterior análise morfológica.

3.5.2 Hidratação em Operação Periódica

Com o intuito de comparar a eficiência do processo de hidratação periódica em relação a hidratação isotérmica para a cultivares BRS FC310, 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°C). Além disso, para cada experimento realizado em hidratação periódica foi estipulado semiperíodos de 2,5 min para cada ciclo, totalizando um período de 5 min (FIGURA 13).

A massa inicial de grãos foi a mesma utilizada nos ensaios de hidratação isotérmica (550 g).

FIGURA 13- 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: Autora, 2023.

3.6 AVALIAÇÃO DO REGIME DE HIDRATAÇÃO

A fim de identificar o mecanismo de entrada de água nos grãos foi incorporado o corante azul de metileno (0,15 g/100 mL) na água de hidratação conforme a metodologia abordada por Miano, García e Augusto (2015), com modificações. O ensaio foi realizado a 60 °C em processo isotérmico, e a amostra foi retirada nos mesmos intervalos de tempo estabelecidos para determinação da umidade (Seção 3.5), sendo seca superficialmente com papel toalha para retirar o excesso de umidade. Os grãos foram cortados longitudinalmente na altura do hilo, de modo a expor sua estrutura interna. Foram registradas imagens por meio de fotografia digital, para acompanhar o caminho da água com o traçador no interior do grão.

3.7 MODELAGEM MATEMÁTICA

Os modelos matemáticos que foram empregados para descrever a cinética de hidratação da cultivar BRS FC310 no presente trabalho foram os modelos

empíricos de Peleg e de Page, semi empírico de Miano- Ibarz- Augusto e os modelos fenomenológicos de Omoto – Jorge e Nicolin-Jorge e Difusão (truncado no 7º termo) descritos na seção 2.7. O modelo de Difusão foi utilizado para descrever a difusividade do ferro no processo de fortificação.

3.7.1 Solução Matemática e Qualidade de Ajuste dos Modelos

A solução para os modelos avaliados foram obtidos através do software Python 3.8.10, utilizando função `curve_fit` da biblioteca `scipy.optimize` versão: 1.7.0. que possibilitou a obtenção dos parâmetros k_1 e k_2 referentes ao modelo de Peleg, dos parâmetros k_p e N referentes ao modelo de Page, K_a e K_b referente ao modelo de Miano – Ibarz – Augusto, do parâmetro Def referente ao modelo de Difusão, dos parâmetros a e b referentes ao modelo de Nicolon- Jorge e K_s^C do modelo de Omoto-Jorge.

A qualidade de ajuste dos modelos matemáticos aos dados cinéticos experimentais foi avaliada considerando parâmetros estatísticos de qualidade. Foram avaliados o coeficiente de determinação (R^2), o erro médio relativo (P) (EQUAÇÃO (18)), e a raiz quadrada média do erro (RMSE) (EQUAÇÃO (19)).

$$P(\%) = \frac{100}{n} \sum \frac{|E - \hat{E}|}{E} \quad (18)$$

$$RMSE (\%) = \sqrt{\sum \frac{(E - \hat{E})^2}{n}} \quad (19)$$

Onde: n é o número de dados observados; E é o valor experimental; e \hat{E} o valor obtido pelo modelo.

Um coeficiente de determinação maior que 0,92 pode ser um indicativo de uma boa representação do fenômeno estudado. Todavia, este parâmetro por si só não garante a boa representatividade (MADAMBA; DRISCOLL; BUCKLE, 1996). Neste sentido, o erro médio relativo (P), quando menor que 10%, e a raiz quadrada média do erro (RMSE), quando menor que 5%, podem corroborar a boa representatividade do modelo (MADAMBA, 2003; MOHAPATRA E RAO, 2005; RESIO; AGUERRE; SUÁREZ, 2003; SHAFAEI; MASOUMI; ROSHAN, 2016).

3.8 PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS

Segundo Montanuci, Jorge e Jorge (2013), Borges, Jorge e Jorge (2017), Balbinoti, Jorge e Jorge (2018) e Jideani e Mpotokwana (2009), os parâmetros dos modelos matemáticos podem ser associados a um coeficiente difusivo. Desta forma, a equação de Arrhenius (EQUAÇÃO (20)) pode ser utilizada para descrever a influência da temperatura sobre estes parâmetros (representados por “k” na equação). A partir da equação linearizada é possível, então, obter a energia de ativação requerida pelo processo de hidratação para o modelo que se ajusta melhor aos dados experimentais, via regressão linear.

$$k(T) = A_0 \exp \frac{-E_a}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \quad (20)$$

Em que: k é referente a um coeficiente difusivo, relacionado com a velocidade de ganho de água durante a hidratação; A_0 é um parâmetro de referência de hidratação, a uma temperatura de referência ($m^2 \cdot s^{-1}$); E_a é a energia de ativação para o processo de hidratação ($kJ \cdot mol^{-1}$); R é a constante universal dos gases ($8,314 J \cdot mol \cdot K^{-1}$); T é a temperatura de hidratação para um dado ensaio (K) e T_{ref} é a temperatura de referência, tida como a média das temperaturas avaliadas (313,15 K).

A obtenção da energia de ativação (E_a) e do parâmetro A_0 possibilitou a generalização do modelo que apresentou melhor qualidade de ajuste bem como a obtenção das propriedades termodinâmicas do processo: a entalpia (ΔH) ($kJ \cdot mol^{-1}$), a entropia (ΔS) ($kJ \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) e a energia livre de Gibbs (ΔG) ($kJ \cdot mol^{-1}$), através das EQUAÇÕES (21), (22) e (23), respectivamente.

$$\Delta H = -E_a - RT \quad (21)$$

$$\Delta S = R \left(\ln A_0 - \ln \frac{k_b}{h_p} - \ln T \right) \quad (22)$$

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S \quad (23)$$

Em que: k_b é a constante de Boltzmann ($1,38 \cdot 10^{-23} J \cdot K^{-1}$) e h_p é a constante de Planck ($6,626 \cdot 10^{-34} J \cdot s$).

3.9 FORTIFICAÇÃO NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

A fortificação dos grãos de feijão carioca BRS FC310 com ferro foi realizada nas hidratações isotérmica e periódica a 20°C, seguindo os mesmos procedimentos descritos anteriormente. A única diferença é que, desta vez, os grãos foram imersos em solução aquosa sulfato ferroso (0,271% p/v). Foi empregada a mesma concentração da solução adotada por Miano, (2018). O sulfato de ferroso é solúvel em água, portanto foi escolhido para fortificar os grãos. A cada amostragem, os grãos foram enxaguados com água destilada (3 vezes) para retirada da solução de Fe da superfície do grão.

3.9.1 Identificação das alterações químicas

Os grãos de feijão carioca BRS FC310 hidratados e fortificados, na condição isotérmica e periódica, foram analisados por Espectroscopia Raman (Witec/Alpha 300R/Alemanha), equipado com laser verde de 532 nm (15 mW laser power), com o objetivo de identificar as alterações químicas. Foi estabelecido tempo de integração de 3 segundos com 10 acumulações e sinal entre 400 a 3800 cm^{-1} . Previamente, os grãos foram cortados no sentido transversal. Os grãos *in natura* também foram analisados por Raman.

3.9.2 Comportamento de absorção de ferro no feijão carioca BRS FC310

A análise química dos grãos foi realizada por meio do EDS (Espectroscopia de Energia Dispersiva), acoplado ao MEV, com tempo de análise de 120 segundos e tensão de 7 kV. A análise por EDS permite identificar a composição de uma amostra, de maneira qualitativa, em pontos específicos da imagem. Neste estudo, o principal objetivo do EDS é verificar a distribuição do Fe no grão hidratado, cortado longitudinalmente, e analisar o comportamento da absorção do mineral no grão.

Para a análise de EDS, as amostras foram hidratadas com solução de sulfato de ferro, em tempos pré-determinados.

3.10 OBTENÇÃO DO MALTE

3.10.1 Maceração

Os grãos foram submetidos a um processo isotérmico e periódico de hidratação durante 12 horas a uma temperatura de 20°C, tanto com quanto sem a adição de um fortificante.

3.10.2 Germinação

3.10.2.1 Avaliação da Energia de germinação

Os ensaios foram realizados em triplicata, pelo método do EBC (1998). Cem grãos foram selecionados e germinados em placas de petri de 90 mm com duas camadas de papel filtro molhada com 4 mL de água. A amostra foi colocada em ambiente com temperatura controlada a 25°C e na ausência de luz durante 72 horas. Os grãos germinados foram contados nos tempos de 24h, 48h e 72h. A contagem total no tempo de 72 horas estima a energia de germinação do grão, conforme a (EQUAÇÃO (24)).

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

Onde $N_{24, n_{48}, n_{72}}$ representa o números de grãos germinados no tempo de 24h, 48h e 72h.

3.10.2.2 Cálculo do índice de germinação

O índice de germinação foi calculado a partir dos resultados da energia de germinação, pelo método do EBC (1998) apresentado na (EQUAÇÃO (25)).

$$IG = 10 * \frac{(n_{24}, n_{48}, n_{72})}{(n_{24}, 2n_{48}, 3n_{72})} \quad (25)$$

Onde $N_{24, n_{48}, n_{72}}$ representa o números de grãos germinados no tempo de 24h, 48h e 72h.

3.10.2.3 Secagem, Moagem e Armazenamento

Após os três dias de germinação as amostras foram secas em estufa a 60°C até atingir 7±12% de umidade, em seguida foram moídas e peneiradas com peneiras granulométricas de 0,72 e 0,425mm, as amostras retidas a 0,425 mm foram armazenadas em embalagem de polietileno, fechadas a vácuo e armazenadas sobre refrigeração, até a realização das análises.

3.11 OBTENÇÃO DA BEBIDA TIPO CHÁ

3.11.1 Processo de torra

Após a secagem dos grãos na etapa 3.8.2.3, o mesmo passou pelo processo de torra. As amostras foram torradas na temperatura de 200°C durante 5 minutos. Após o processo de torra as amostras foram retiradas e espalhadas em uma superfície plana e deixadas esfriar à temperatura ambiente.

Após o processo de torra os grãos foram moídos em peneiras granulométricas de 0,72 e 0,425mm as amostras retidas a 0,425 mm foram armazenadas em embalagem de polietileno, fechadas a vácuo e armazenadas sobre refrigeração, até a realização das análises.

3.11.2 Processo de extração

Produziu-se bebidas de feijão carioca de todas as amostras torradas realizando-se infusão na temperatura de 80°C durante 60 minutos, para verificar a quantidade de compostos solúveis extraída do pó e a composição físico-química das bebidas. As bebidas foram preparadas na proporção de 1:90 (pó/água) como se fosse um chá.

3.12 DETERMINAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS PRESENTES NO MALTE E BEBIDA TIPO CHÁ

3.12.1 Extrato

Com as amostras trituradas e armazenadas provenientes da moagem dos grãos fortificados fez-se a preparação de extratos para possibilitar a quantificação

dos compostos fenólicos, flavonoides, taninos e da atividade antioxidante pelos métodos DPPH e ABTS (todos em triplicata). O procedimento de extração foi baseado na metodologia abordada por Cezar (2011), com modificações. Para tanto, com os grãos triturados e na ausência de luz, foram acrescentados metanol e água à farinha fina, na proporção de 0,3 g de farinha para 1 mL de metanol:água (2:1 v/v). A mistura foi posta em agitação magnética (FISATOM, modelo 752A, Brasil) com peixinho durante 25 minutos e em seguida centrifugada a 3600 rpm por 15 min. O sobrenadante foi armazenado sob refrigeração em vidros âmbar com tampa lacrada até a realização das análises. A umidade das farinhas utilizadas para obtenção dos extratos foi determinada através de secagem em estufa a 105 °C por 4h.

3.12.1.1 Avaliação de atividade antioxidante

As análises de atividade antioxidante foram realizadas pelos métodos DPPH, ABTS e FRAP.

- DPPH:

O método 2,2-difenil-1-picrilhidrazil (DPPH) proposto por Brand-Williams, Cuvelier e Berset (1995), foi aplicado para determinação da capacidade antioxidante dos extratos, com modificações. A solução de DPPH foi preparada a partir da diluição de 4,72 mg de DPPH em 200 mL de metanol.

Na ausência de luz, adicionou-se 50 µL do extrato e 1,95 mL de solução de DPPH em tubos de ensaio. Os tubos foram agitados em vórtex (PHOENIX, modelo AP-56, Brasil) e armazenados no escuro por 30 min. Posteriormente, realizou-se a leitura das amostras em espectrofotômetro (Q898DPT, Quimis, São Paulo) a 517 nm. A atividade antioxidante foi calculada por meio da curva padrão de Trolox (0 – 1000 µmol/L) e os resultados foram expressos em µM TEAC/100 g (µmol Trolox/100 g de amostra seca).

- ABTS:

A determinação da capacidade antioxidante pelo método ABTS foi realizada conforme metodologia adaptada de Re et al., (1999). A solução salina ABTS (7mM) foi preparada diluindo 0,0392 g de ABTS em 10 mL de tampão de acetato de sódio

(20 mM/L; pH 4,5). O persulfato de potássio foi pesado (0,378 g) e diluído em 10 mL da mesma solução tampão de acetato de sódio. Aos 10 mL de solução ABTS foi adicionado 176 µL da solução de persulfato de potássio, mantendo a mistura no escuro à temperatura ambiente por 16 h para permitir a geração completa do radical. Após esse período, foi utilizado tampão de acetato de sódio (80 mM) para ajustar a absorvância do reagente ABTS.

Na ausência de luz, foram adicionados em tubos de ensaio 3 mL de reagente ABTS em 30 µL da amostra e, após agitação em vórtex (PHOENIX, modelo AP-56, Brasil) manteve-se os tubos no escuro por 30 min. Uma curva padrão de Trolox foi preparada (0 – 2500 µmol/L) e a leitura foi feita em espectrofotômetro (Q898DPT, Quimis, São Paulo) a 734 nm. Os resultados foram expressos em µM TEAC/100 g (µmol Trolox/100 g de amostra seca).

- FRAP:

O ensaio FRAP foi realizado seguindo o protocolo de Benzie e Strain (1996), com algumas adaptações. As soluções de estoque foram preparadas da seguinte forma: uma solução de tampão acetato 300 mM foi feita utilizando 3,1 gramas de acetato de sódio trihidratado ($C_2H_3NaO_2 \cdot 3H_2O$) e 16 mL de ácido acético glacial ($C_2H_4O_2$), ajustando o pH para 3,6. Em seguida, foi preparada uma solução de TPTZ 10 mM (2, 4, 6-tripiridil-s-triazina) em HCl 40 mM e outra solução de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$ 20 mM.

A solução de trabalho foi preparada misturando 25 mL da solução de tampão acetato, 2,5 mL da solução de TPTZ e 2,5 mL da solução de $FeCl_3 \cdot 6H_2O$. Essa mistura foi aquecida a 37°C antes de ser utilizada nos experimentos. Em seguida, 150 mL dos extratos de frutas foram misturados com 2850 mL da solução FRAP e deixados reagir no escuro por 30 minutos.

As leituras foram feitas para medir o produto colorido, conhecido como complexo tripiridil-triazina ferroso, a uma absorvância de 593 nm. Uma curva padrão foi construída e se mostrou linear na faixa de concentração de Trolox de 25 a 800 mM. Os resultados foram expressos em mM TE/g de massa fresca. Se os valores de FRAP medidos estivessem fora da faixa linear da curva padrão, diluições adicionais foram feitas.

3.12.1.2 Quantificação dos Compostos Fenólicos

Os compostos fenólicos totais foram quantificados através do método de FolinCiocalteu (SINGLETON; ROSSI, 1965) com adaptações. Na ausência de luz, foram acrescentados em tubos de ensaio 20 µL de cada extrato, 1,68 mL de água destilada e 100 µL do reagente Folin-Ciocalteu (2N). A mistura foi agitada com auxílio de vórtex (PHOENIX, modelo AP-56, Brasil) e foram aguardados 3 minutos. Após o tempo de espera, foram adicionados 200 µL de carbonato de sódio (Na₂CO₃) a 20% e os tubos foram agitados novamente e mantidos no escuro por 1 h. Uma curva padrão de ácido gálico (0,05 – 1 mg/mL) foi preparada e as leituras foram feitas a 760 nm em espectrofotômetro (Q898DPT, Quimis, São Paulo), sendo os resultados expressos em mg equivalente de ácido gálico (GAE)/100 g de amostra seca.

3.12.1.3 Quantificação dos Flavonoides

O conteúdo de flavonoides totais foi determinado de acordo com o método proposto por Arriola et al., (2014). Em tubos de ensaio foram adicionados 500 µL dos extratos, seguidos da adição de 150 µL de NaNO₂ 5%. Após 5 minutos, foram acrescentados 150 µL de AlCl₃ 10%, e passados 6 minutos foi feita a adição de 1000 µL de NaOH 1 M. Em seguida as amostras foram homogeneizadas em vórtex (PHOENIX, modelo AP-56, Brasil). A leitura das amostras foi feita em espectrofotômetro (Q898DPT, Quimis, São Paulo) a 425 nm, sendo os resultados expressos por intermédio da curva padrão de catequina preparada previamente (0 – 250 mg/L), em mg equivalente de catequina (CE)/100 g da amostra.

3.12.1.4 Quantificação dos Taninos Condensados

Para a determinação de taninos condensados (PORTER, 1986) foram adicionados na ausência de luz 0,5 mL de cada amostra em tubos de ensaio e em seguida acrescentados 3 mL de butanol-HCL (95:5 v/v) e 0,1 mL de reagente férrico (preparado a partir de 2 g de sulfato de ferro e amônio diluídos em 100 mL de solução de HCl 2M). Após as adições, as misturas foram homogeneizadas em vórtex (PHOENIX, modelo AP-56, Brasil). Os tubos foram fechados e mantidos em repouso em banho-maria a 95 °C por 40 minutos. Após o resfriamento até a temperatura

ambiente, foram feitas as leituras a 550 nm em espectrofotômetro (Q898DPT, Quimis, São Paulo). O conteúdo de taninos condensados foi calculado segundo a (EQUAÇÃO (26)) e reportados como equivalente de leucocianidina (LE):

$$\%TC = \frac{A_{550.78,26}F}{\%M.S} \quad (26)$$

Em que: %TC é a porcentagem de taninos condensados equivalente de leucocianidina, em relação a porcentagem de matéria seca da amostra (%M.S); A₅₅₀ é a absorvância da amostra a 550 nm; e F é o fator de diluição na medição espectrofotométrica.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nesta seção serão apresentados os resultados das caracterizações físico-químicas, físicas, morfológicas e termogravimétricas da cultivar *in natura*, bem como a identificação das fases, e a umidade das amostras relativos aos ensaios de hidratação. Apresenta-se também a cinética de hidratação do feijão carioca e o ajuste dos modelos com os seus respectivos parâmetros frente aos dados experimentais, bem como as propriedades termodinâmicas do processo. Além disto, observa-se a influência do binômio tempo-temperatura no ganho de umidade e na germinação dos grãos, e a caracterização do malte, e bebida tipo chá do feijão carioca frente a seus compostos bioativos.

4.1 COMPOSIÇÃO QUÍMICA

A análise físico-química das macromoléculas oferece uma compreensão mais profunda dos seus principais componentes e como eles interagem no processo de absorção de água, o que, por sua vez, ajuda a identificar potenciais usos das leguminosas no processamento de alimentos. Nesse contexto, as médias das composições bromatológicas da cultivar BRS FC310 *in natura* são apresentadas na (TABELA 11), considerando base úmida.

TABELA 11- COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA CULTIVAR BRS FC310.

Análises	Teores médios (%)
Umidade	12,62 ± 0.10
Cinzas	3,08 ± 0.06
Proteína	22,35 ± 0.16
Lipídios	1,44 ± 0.12
Carboidratos	60,51 ± 0.11

A análise da composição centesimal média do feijão carioca cru, conforme a Tabela Brasileira de Composição de Alimentos (TBCA, 2023), revela os seguintes teores: 12% de umidade, 22,1% de proteína, 1,87% de lipídeos, 3,67% de cinzas e 60,4% de carboidratos. Com base nos dados obtidos, verifica-se que todos os resultados estão em conformidade.

Através da análise da composição química, destaca-se que o carboidrato é o componente de maior relevância no feijão carioca, representando 60,51%. Resultados similares foram encontrados por Ronko et al., (2021) que avaliou sete amostras de feijão carioca e obteve valores de carboidratos variando entre 58,12% e

68,27%. Santos et al., (2019) obteve um teor de 67,66% de carboidratos no feijão carioca comercial, enquanto Santos et al., (2023) observou um valor de 66,94% no feijão carioca da cultivar Pérola.

A proteína é outro componente significativo, e os resultados deste estudo se aproximam dos apresentados por Melo et al., (2021a), que identificou um teor médio de proteína nos grãos da BRS FC310 de 24,4%. Valores semelhantes também foram relatados por Santos et al., (2019) e Santos et al., (2023), que registraram teores de proteína de 22,57% e 22,56%, respectivamente.

Os teores de cinzas assemelham-se aos apresentados por Santos et al., (2019) de 3,32%. No estudo de Ramírez-Cárdenas et al., (2008b), o teor de cinzas em feijões crus variou de 3,36 a 4,22 g.100 g⁻¹.

Quanto ao conteúdo de lipídios, está dentro da faixa de valores relatada por Chezini (2017), que encontrou valores variando entre 1,16 e 1,37 em sete cultivares de feijão carioca.

No que diz respeito à umidade, valores semelhantes foram identificados por Sarmiento et al., (2015), que registraram uma média de 12,9%. Da mesma forma, Alvares (2020) encontrou um teor de umidade de 12,27% em feijão carioca comercializado em Várzea Grande-MT.

Essas variações nos níveis de nutrientes podem ser atribuídas a diversas práticas de cultivo, ao armazenamento dos grãos (que tem um impacto particularmente significativo no teor de umidade) e a possíveis erros experimentais durante a execução dos métodos quantitativos para a determinação da composição química.

4.2 CARACTERIZAÇÃO MORFOLÓGICA E TÉRMICA GRÃO *IN NATURA*

4.2.1 Dimensões

A avaliação das características físicas dos grãos desempenha um papel crucial em várias fases do beneficiamento, incluindo o dimensionamento de equipamentos e sistemas para colheita, manuseio, transporte, secagem e armazenamento (DI LANARO et al., 2011). Com esse intuito, a cultivar BRS FC310 foi dimensionada em relação ao comprimento, largura e espessura dos grãos, sendo os valores médios expressos em milímetro na (TABELA 12).

TABELA 12 – COMPRIMENTO, LARGURA E ESPESSURA MÉDIOS DA CULTIVAR BRS FC310.

Cultivar	Comprimento (mm)	Largura (mm)	Espessura (mm)
BRS FC310	10, 2 ± 0.58	6,7 ± 0.35	4,7 ± 0.33

FONTE: Autora, 2022.

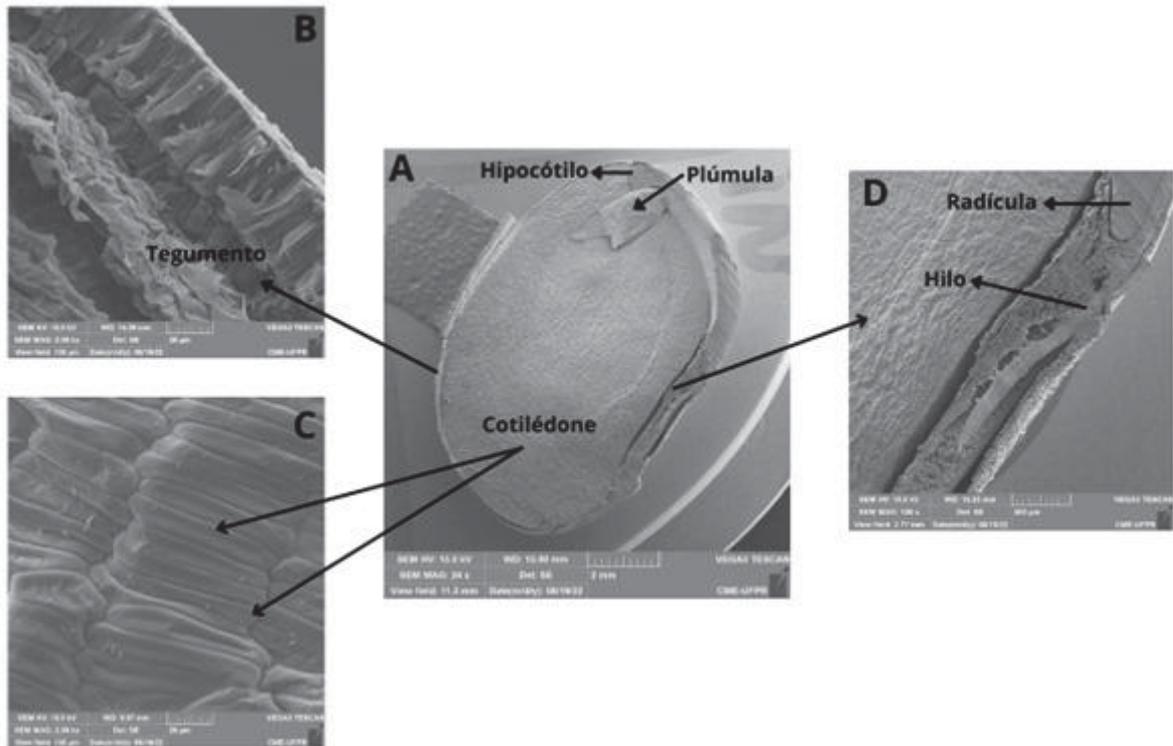
Os dados de comprimento, largura e espessura encontrados foram respectivamente, 10.2 ± 0.58 mm, 6.7 ± 0.35 mm e 4.7 ± 0.33 mm.

Gonçalves et al., (2010), obtiveram dados de comprimento, largura e espessura respectivamente de 10,36mm, 6,88mm e 5,08mm, ligeiramente maiores que os resultados apresentados na (TABELA 12). Silva (2014) também apresentou resultados ligeiramente maiores com dados de comprimento, largura e espessura respectivamente de 10,75mm 6,69mm e 4,73mm. Embora sejam valores muito semelhantes ao considerar o intervalo de confiança dos desvios padrão.

4.2.2 Avaliação Morfológica dos Grãos via MEV

Para compreender as principais regiões que compõem o grão de feijão carioca e entender como possivelmente ocorre a migração de água para o interior do grão, a estrutura morfológica da cultivar foi observada a partir de imagens obtidas via MEV (FIGURA 14). Para a elaboração das imagens foi realizado um corte longitudinalmente em relação ao hilo (A) evidenciando as principais partes que compõem o grão; (B) uma fração do perímetro do tegumento; (C) uma fração do cotilédone; e (D) a região do hilo, onde vê-se também a radícula.

FIGURA 14- ESTRUTURA DO GRÃO DE FEIJÃO CARIOCA: (A) GRÃO INTEIRO SECCIONADO LONGITUDINALMENTE; (B) FRAÇÃO DO TEGUMENTO; (C) FRAÇÃO DO COTILÉDONE; (D) REGIÃO DA MICRÓPILA E HILO.



Nota: Ampliação de imagem de (a) 24x, (b) 2000x, (c) 2000x e (d) 100x.

Na estrutura do grão de feijão carioca é possível visualizar uma pequena abertura (FIGURA 14D). Essa cavidade é conhecida como hilo. O hilo, juntamente com a micrópila, constitui-se como a região de maior permeabilidade do grão, uma vez que são estruturas porosas que facilitam a absorção de água pelo mecanismo de capilaridade. Quando estas estruturas saturam, a absorção passa a ser mais lenta, acontecendo preferencialmente por difusão até atingir um estado de equilíbrio (OLIVEIRA, 2019; SIMONI, 2017).

A radícula (FIGURA 14D), por sua vez, é o primeiro órgão a ser desenvolvido quando há a germinação da semente. Dela deriva o hipocótilo e em sua terminação encontra-se a plúmula, que originará as primeiras folhas da planta. O cotilédone (FIGURA 15C) contém a maior parte das substâncias de reserva, que oferece o aporte nutricional para que a planta possa se desenvolver (COSTA, 2005).

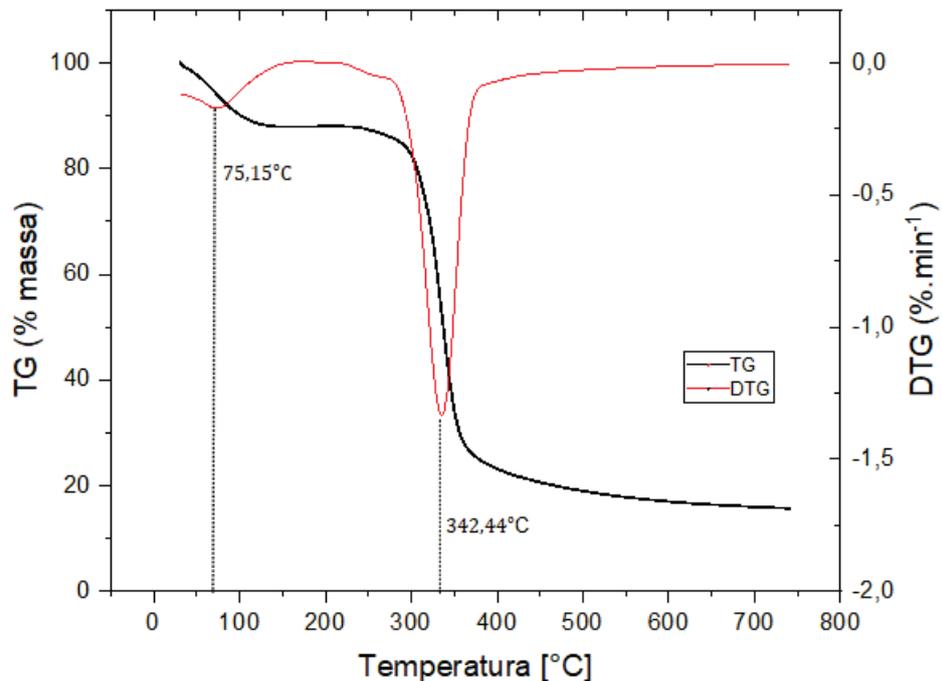
O tegumento (FIGURA 14B), segundo Guillon e Champ (2002), é a estrutura que auxilia no controle da absorção de água e que preserva a integridade do grão, protegendo o embrião. Em leguminosas, encontra-se boa parcela de fibras no

tegumento, além de altos teores de celulose e baixos teores de hemicelulose e pectina (BARRUETO-GONZALEZ, 2008).

4.2.3 Análise do Evento de Gelatinização do Amido por Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) e TGA

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 feijão carioca 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 15- EFEITO DA DEGRADAÇÃO TÉRMICA DO AMIDO EXTRAÍDO DA CULTIVAR BRS FC310.



Por meio da derivada (DTG) foi possível avaliar a decomposição da amostra diante da programação da temperatura empregada no sistema. Ao longo do evento de degradação térmica foi observada duas etapas de perda de massa, indicando a instabilidade das amostras com o aumento da temperatura. A primeira instabilidade sucedeu-se entre 50 a 100 °C, com o pico de degradação em 75,15°C. O primeiro evento térmico pode estar atribuído ao processo de gelatinização do amido e desnaturação das proteínas, juntamente com a desidratação de água livre (FIGURA 15). O segundo evento térmico ocorre em 342,44°C, 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 resultados de Figueroa et al., (2015) utilizando grãos de feijão carioca, mostram que a primeira instabilidade foi entre 30-140°C enquanto a segunda foi de 257-391°C. Entre o primeiro e o segundo estágio, o autor observou um período de estabilidade, que se apresentou estável até 257°C. No estudo, foi observado uma perda de massa de 8,91% para a amostra de feijão carioca.

Utilizando a técnica de DSC, foram adquiridas as informações relativas aos processos endotérmicos da cultivar, permitindo a observação das temperaturas associadas ao evento de gelatinização do amido. A temperatura de pico, isto é, a temperatura em que ocorre o evento de gelatinização, foi de 69°C.

Na (TABELA 13) constam as temperaturas iniciais (Ti), de pico (Tp) e finais (Tf) do evento de gelatinização, bem como as variações de entalpia correspondentes (ΔH).

TABELA 13- PROPRIEDADES DO EVENTO DE GELATINIZAÇÃO DO AMIDO EXTRAÍDO DOS GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA *IN NATURA*, OBTIDAS VIA DSC.

Cultivar	Ti (°C)	Tp (°C)	Tf (°C)	ΔT (°C)	ΔH (J/g)
BRS FC310	58	69	80	22	1,1

Por meio da análise por DSC, é possível examinar o fluxo de calor necessário para a gelatinização dos grânulos de amido, o que se manifesta por picos endotérmicos em uma faixa característica para cada fonte botânica (IONASHIRO, 2014; LEVER et al., 2014). Além disso, essa técnica permite avaliar a energia envolvida no processo e as temperaturas associadas a ele. O processo de gelatinização iniciou-se a 58°C, atingindo o pico de gelatinização a 69°C e concluindo o evento a 80°C. Vários fatores influenciam a temperatura de gelatinização, incluindo a organização molecular da amilopectina, a formação de complexos lipídicos, o grau de cristalinidade e a proporção de regiões cristalinas no interior do grânulo (APRIANITA, 2014; BEDIN, 2014). Observou-se uma variação de entalpia de gelatinização de 1,1 (J/g). Essa variação pode ser explicada pela proporção de amilose e amilopectina, bem como pela capacidade de difusão e absorção de água (HOOVER et al., 2010; AMBIGAIPALAN et al., 2011).

No estudo realizado por Ronko et al., (2021), que envolveu sete cultivares de feijão carioca, foi observado que o processo de gelatinização teve início a temperaturas próximas de 66°C, com picos de gelatinização ocorrendo em torno de

74°C e o término do evento em temperaturas de até 82°C. Além disso, foram registradas variações de entalpia entre 7,8 e 10,2 (J/g⁻¹).

No estudo conduzido por Carvalho (2022) para o feijão carioca, as temperaturas iniciais (Ti), de pico (Tp) e finais (Tf) do evento, juntamente com a correspondente variação de entalpia (ΔH), foram consistentes a 62,6°C, 74,6°C, 80,3°C e 13,82 J.g⁻¹, respectivamente.

Rupollo (2011) conduziu um estudo sobre os parâmetros relacionados à gelatinização do amido isolado de grãos de feijão carioca que foram armazenados por 360 dias em diferentes condições: em ambiente hermético a 5°C, em atmosfera modificada por nitrogênio a 15°C e em atmosfera convencional a 25°C. Os valores de variação de entalpia (ΔH) obtidos foram de 1,73; 2,87 e 3,49, respectivamente, para cada uma dessas condições.

Segundo Chung, Liu e Hoover (2009), temperaturas de gelatinização mais elevadas estão relacionadas a uma maior quantidade de amilopectina, enquanto menores valores de ΔH relacionam-se à maior proporção de amilopectinas de cadeias curtas.

4.3 CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO

Com o intuito de conhecer a cinética de hidratação, bem como a possibilidade de intensificar o processo de absorção de água pelos grãos, a cultivar BRS FC310 foi avaliada mediante aos processos de cinética de hidratação isotérmica e periódica.

4.3.1 Cinética de Hidratação e Identificação das Fases

Através dos ensaios experimentais foram identificadas as fases e a cinética de hidratação. Os experimentos foram conduzidos por 12h (720 min), utilizando-se temperaturas de 10, 20, 30, 40, 50 e 60°C para o processo isotérmico (FIGURA 17) e a partir da operação periódica mediante a modulação da temperatura com período de 5 min e amplitude de 10 °C, nas temperaturas de 20, 30 e 40°C (FIGURA 16).

FIGURA 16- CURVAS CINÉTICAS EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DO FEIJÃO CARIOCA BRS FC310.

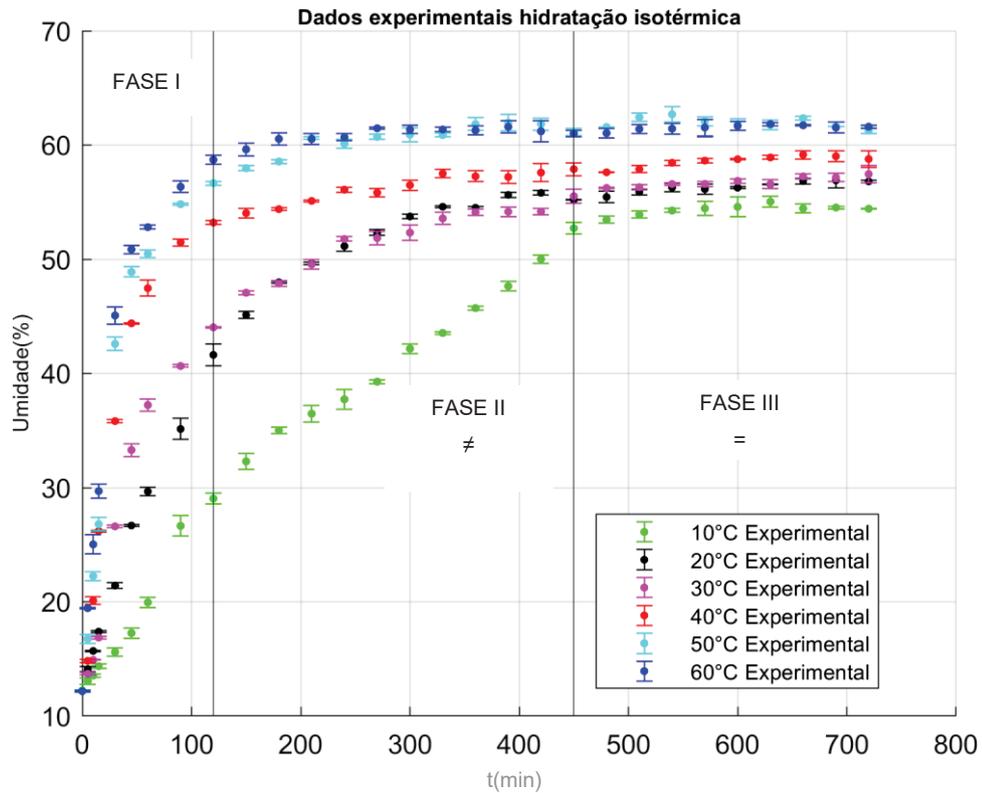
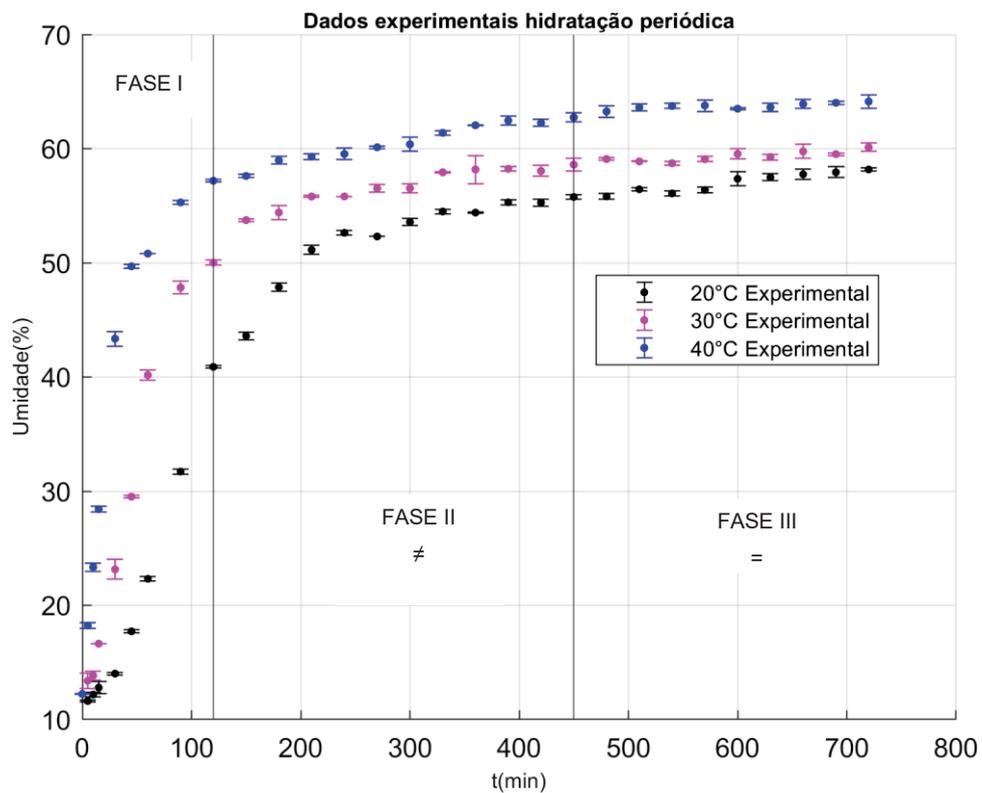


FIGURA 17- CURVAS CINÉTICAS EXPERIMENTAIS DE HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DO FEIJÃO CARIOCA BRS FC310.



A cinética de hidratação fornece informações sobre como a água é absorvida, a velocidade do processo e a capacidade de retenção de água do grão, que podem ser descritas matematicamente. Segundo Miano 2015, a cinética de hidratação tem dois comportamentos diferentes: forma côncava para baixo e forma sigmoideal. O primeiro é o comportamento mais comum em que o grão apresenta uma rápida absorção de água no início do processo. A taxa de hidratação é reduzida até que não haja mais água retida pelo grão (teor de umidade de equilíbrio). Por outro lado, o segundo comportamento apresenta uma lenta absorção de água no início do processo devido à impermeabilidade do tegumento do grão. Após certo tempo, devido a mudanças na permeabilidade, a taxa de hidratação é aumentada, e o grão absorve água até atingir o equilíbrio.

O perfil côncavo para baixo obtido indica possivelmente que o tegumento da cultivar estudada não é impermeável, o que permite que a água permeie o grão por capilaridade, através do hilo, e por difusão (na direção radial, no sentido da casca para o centro do grão) ao mesmo tempo. Caso fosse impermeável, a água penetraria inicialmente somente pelo mecanismo de capilaridade, até umedecer a casca internamente e torná-la penetrável, possibilitando a difusão. Neste caso, o perfil obtido seria o sigmoideal (MIANO; AUGUSTO, 2018).

Com o perfil da curva estabelecido, foi possível identificar três fases do processo de hidratação. A Fase I (0 – 2h) é caracterizada por uma taxa acelerada no ganho de umidade, tendo como força motriz de difusão da água a elevada diferença de concentração de umidade entre os grãos e o meio de hidratação. A Fase II (2 – 7.5h) inicia quando se percebe um decaimento na taxa de hidratação, ocasionado pela parcial saturação das camadas mais externas dos grãos com água e, portanto, um menor gradiente de umidade que impulsiona a difusão de água para o seu interior. A Fase III (7.5 - 12h) é atingida quando o grão passa a ganhar (ou mesmo perder) umidade de forma quase imperceptível. Nesta fase, o processo de hidratação atinge uma condição de equilíbrio, o que quer dizer que o grão está saturado de água e a formação das ligações entre os constituintes do grão e as moléculas de água passam a ocorrer na mesma velocidade em que são quebradas (BALBINOTI; JORGE; JORGE, 2018; OLIVEIRA; JORGE; JORGE, 2020).

Junto com a identificação das fases de hidratação, também foi avaliado o efeito da temperatura no aumento da umidade da cultivar. Apesar do teor de umidade aumentar rapidamente no início do processo, depois moderadamente e

então tender ao equilíbrio sob todas as condições térmicas, a capacidade de hidratação dos grãos é maior com o aumento da temperatura do sistema. Tal comportamento também foi observado, por exemplo, no trigo (MATTIODA; JORGE; JORGE, 2018), sorgo (KASHIRI; KASHANINEJAD; AGHAJANI, 2010), soja (FRACASSO et al., 2014, 2015), feijão azuki (MIANO E AUGUSTO, 2015), cevada (MONTANUCI; JORGE; JORGE, 2015; BORSATO et al., 2019), e arroz (BALBINOTI; JORGE; JORGE, 2018). De acordo com os autores, essa observação pode ser associada à intensidade das vibrações das moléculas de água. Quanto mais aquecidas estão, maior é a mobilidade dentro do grão, o que facilita a quebra das ligações moleculares presentes no alimento. Esse processo, por sua vez, leva à expansão dos poros dos grãos, permitindo uma maior interação com as moléculas de água.

A (TABELA 14) apresenta os teores de umidade de equilíbrio atingidos em cada ensaio de hidratação, bem como o ganho total de umidade, dado pela diferença entre a umidade de equilíbrio e a umidade dos grãos *in natura*.

TABELA 14- TEORES DE UMIDADE DE EQUILÍBRIO E GANHO TOTAL DE UMIDADE DOS ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO.

Operação	U₀ (%b.u)	T (°C)	U_f (%b.u)	Ganho (U_f-U₀) (%b.u)
Isotérmica	12.23 ± 0.04	10	54.42 ± 0.04	42.20 ± 0.08
		20	56.57 ± 0.13	44.58 ± 0.17
		30	57.46 ± 0.20	45.23 ± 0.24
		40	58.78 ± 0.45	46.55 ± 0.49
		50	61.27 ± 0.24	49.04 ± 0.28
		60	61.60 ± 0.15	49.37 ± 0.19
Periódica	12.17 ± 0.03	20	58.17 ± 0.15	46.00 ± 0.18
		30	60.12 ± 0.37	47.95 ± 0.40
		40	64.13 ± 0.13	51.95 ± 0.16

Nota-se que houve uma diferença mínima nos teores de umidade de equilíbrio entre as temperaturas próximas. No entanto, é evidente que existe uma variação na quantidade de água absorvida quando se considera uma faixa de temperatura mais ampla. Essa diferença chega a 7,18 ± 0,19 (%) entre a temperatura mais baixa e a mais alta na condição isotérmica, e a 5,96 ± 0,28 (%) na condição periódica.

Na (FIGURA 18 e 19) é apresentado os gráficos de pizza referentes à contribuição da Fase I, II e III nos ganhos totais de umidade das operações isotérmica e com modulação da temperatura para ambas as cultivares.

FIGURA 18- CONTRIBUIÇÃO DA FASE I, II E III NOS ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310 NAS TEMPERATURAS DE 10 °C, 20 °C, 30 °C, 40 °C, 50 °C, E 60 °C.

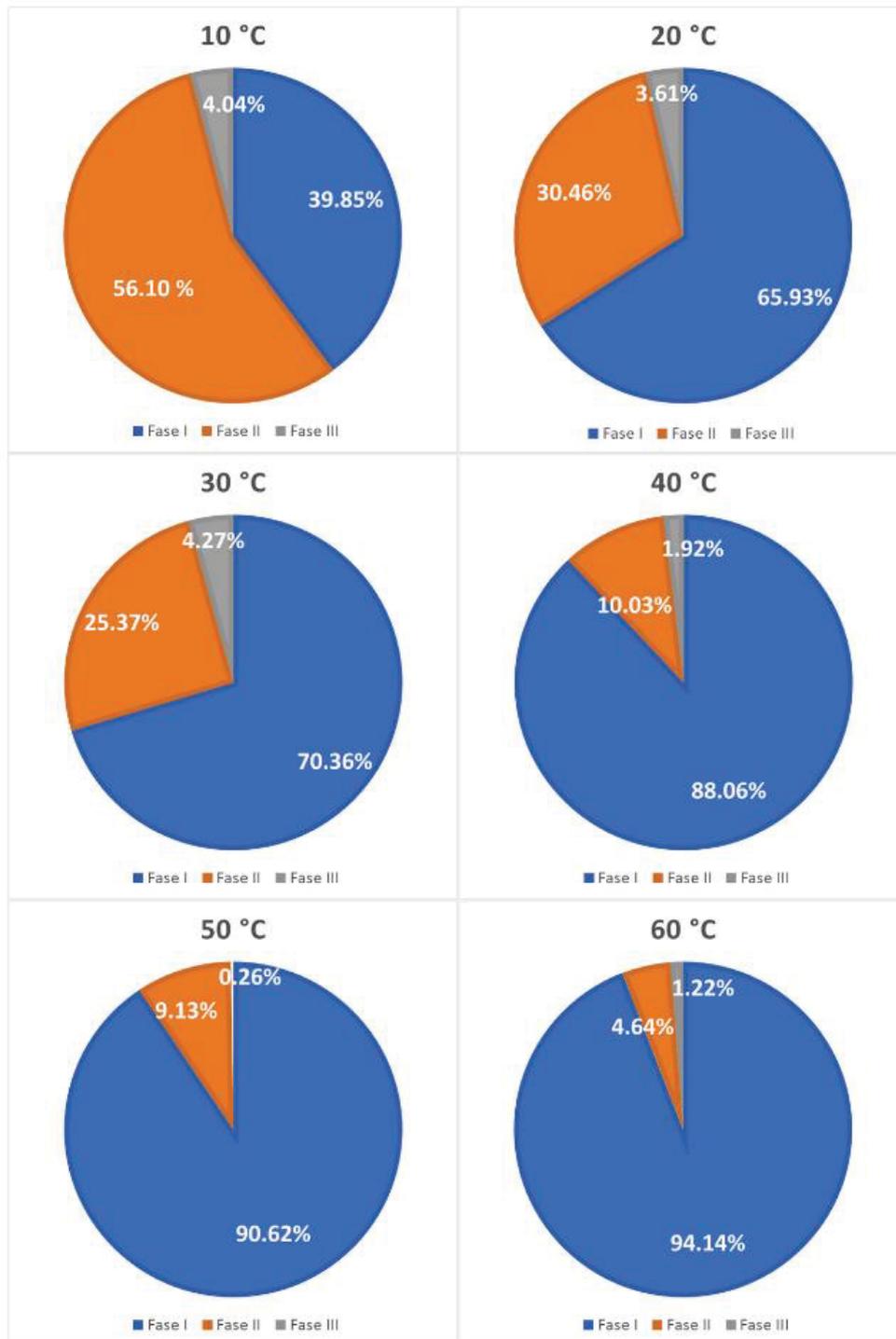
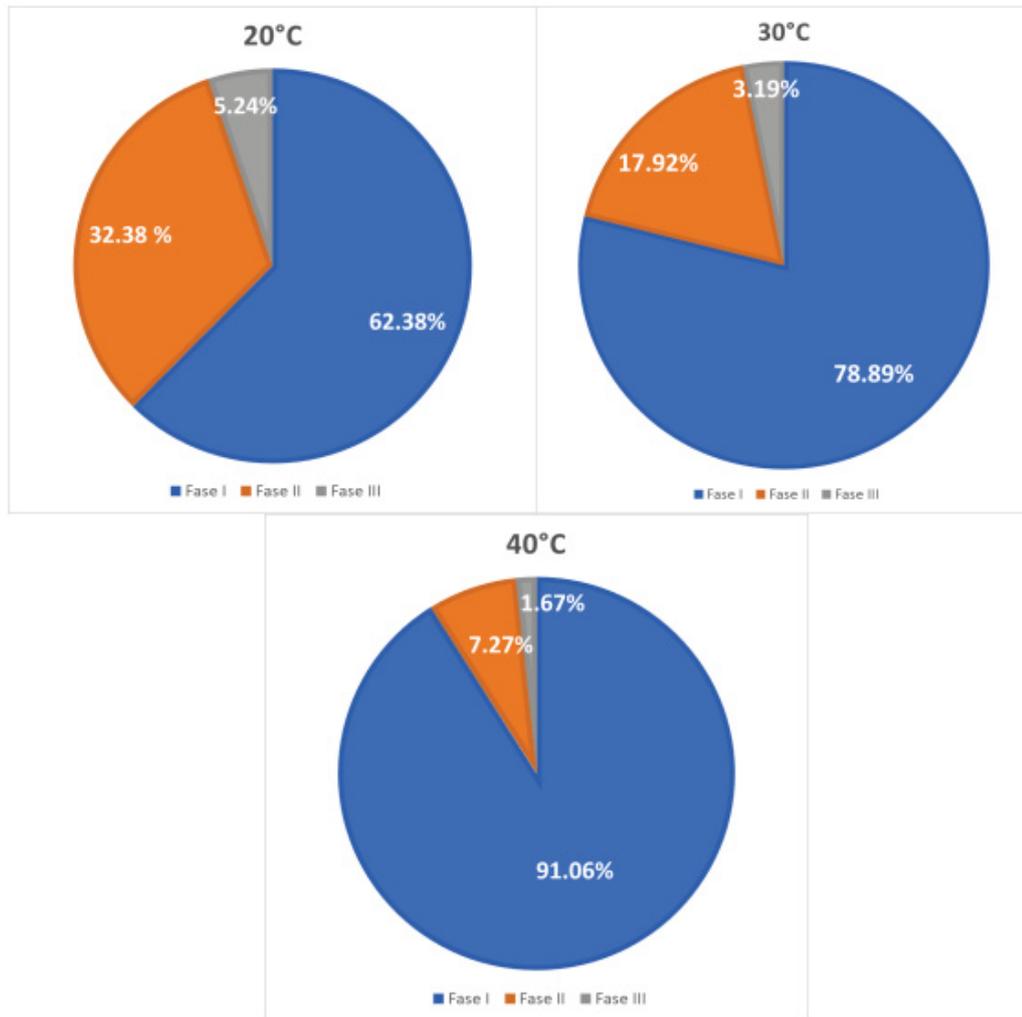


FIGURA 19- CONTRIBUIÇÃO DA FASE I, II E III NOS ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310 NAS TEMPERATURAS DE , 20 °C, 30 °C E 40 °C.



A partir dos gráficos, é visível que o uso de temperaturas mais elevadas amplia a velocidade inicial de ganho de umidade. Isso se reflete na Fase I, que apresenta um aumento percentual notável em relação ao aumento da temperatura. Essa observação está em concordância com a pesquisa de Kashaninejad e Kashiri (2008), que sustentam que a elevação da temperatura de hidratação está diretamente associada a uma maior taxa de absorção de água. De fato, é possível notar um aumento de 54,29% na taxa de absorção na temperatura mais alta em operação isotérmica e um aumento de 28,68% em operação periódica, quando comparados aos mesmos intervalos de tempo e à temperatura mais baixa. Essa mesma tendência foi observada nos estudos anteriores (BORGES, JORGE, JORGE, 2017, FRACASSO et al., 2015, MIANO e AUGUSTO, 2015, MATTIODA; JORGE;

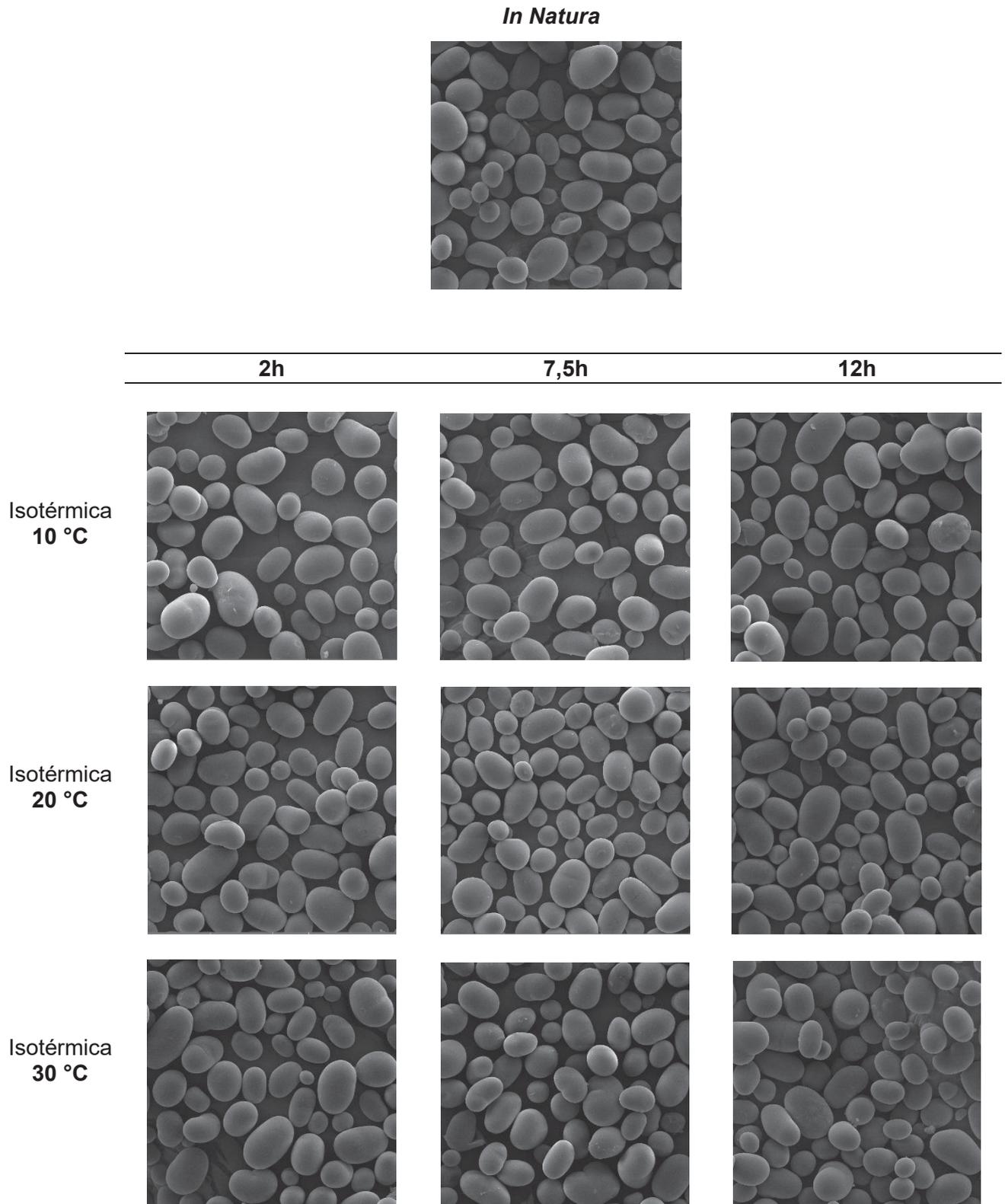
JORGE, 2019, MONTANUCI, JORGE, JORGE, 2015, OLIVEIRA; JORGE; JORGE, 2020).

Também é evidente que a hidratação em operação periódica, em comparação com a hidratação isotérmica, intensifica o processo de absorção de água dos grãos, com uma contribuição mais significativa da Fase I no processo, exceto na temperatura de 20°C. Isso pode ser explicado pelo uso de temperaturas mais baixas, considerando que a diferença de valores entre 10°C e 20°C na fase I em operação isotérmica é de 26,08%. No entanto, é importante notar que, de acordo com a (TABELA 14), o sistema periódico demonstra os maiores ganhos de umidade para cada fase de hidratação quando comparado com sua respectiva isotérmica. De acordo com Mattioda, Jorge e Jorge (2018), esse aumento mais acentuado na hidratação periódica pode ser atribuído aos gradientes térmicos mais elevados alcançados por esse processo, resultando em uma maior vibração das moléculas de água e, conseqüentemente, uma maior mobilidade da água para o interior do grão.

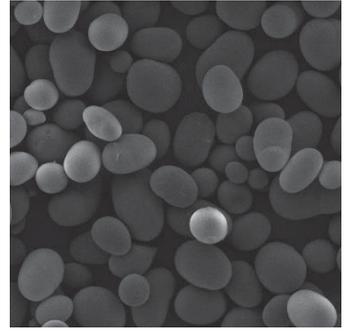
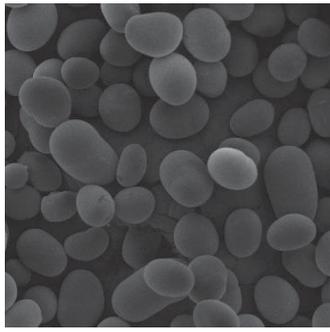
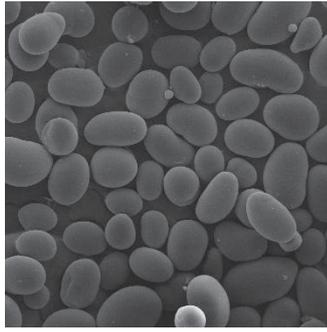
4.4 ANÁLISE MORFOLÓGICA DO AMIDO VIA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV)

A morfologia dos grânulos de amido do feijão carioca foi examinada nos processos isotérmico e periódico ao término das Fases I (2 horas), II (7.5 horas) e III (12 horas) e comparada com a morfologia dos grânulos de amido dos cultivares *in natura*. As imagens foram capturadas por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV), utilizando um aumento de 2000x, com o propósito de identificar eventuais alterações na forma dos grânulos de amido extraídos da cultivar (FIGURA 20).

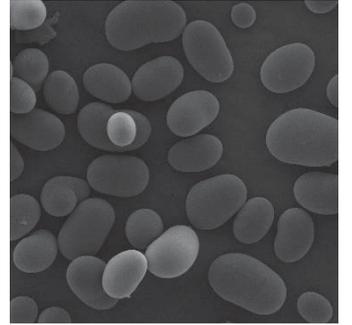
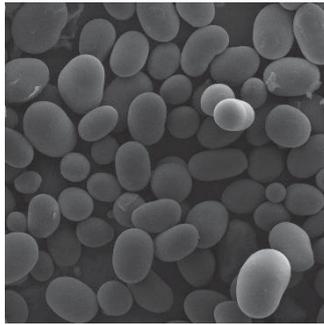
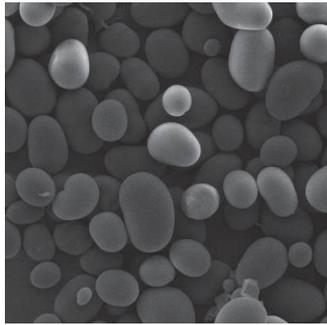
FIGURA 20- IMAGENS OBTIDAS VIA MEV DOS GRÂNULOS DE AMIDO EXTRAÍDOS DOS GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA *IN NATURA* E HIDRATADOS EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA.



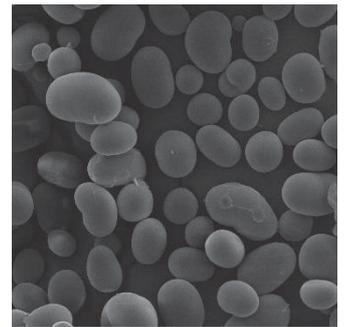
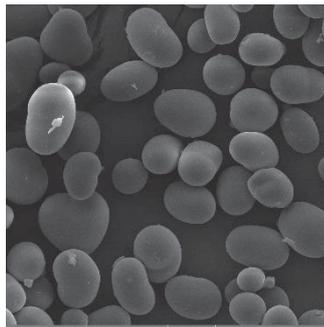
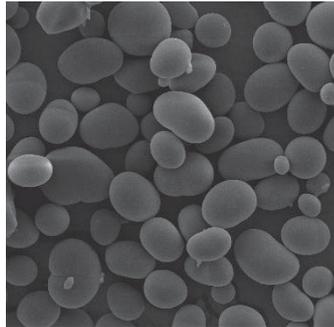
Isotérmica
40 °C



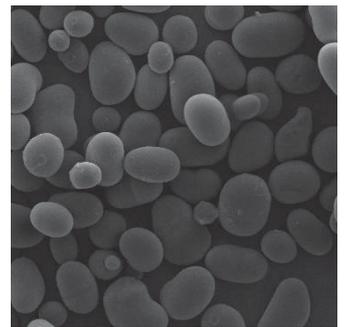
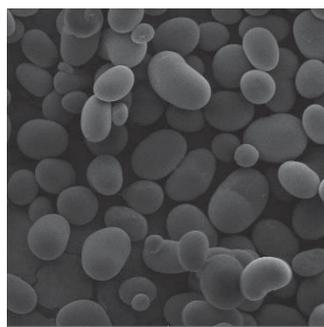
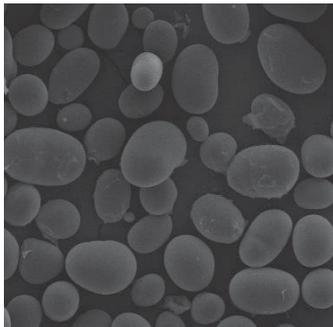
Isotérmica
50 °C



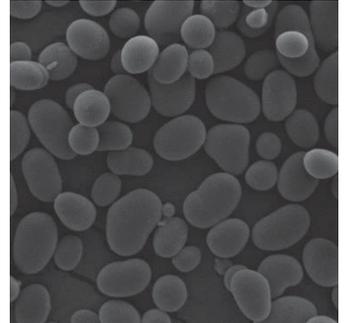
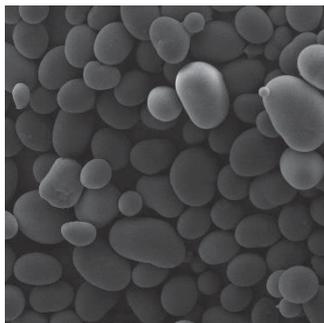
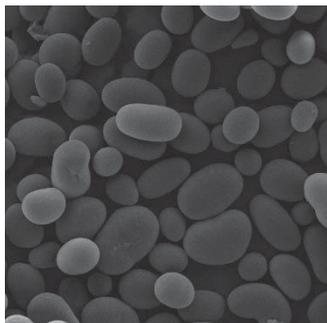
Periódica
20°C



Periódica
30°C



Periódica
40°C



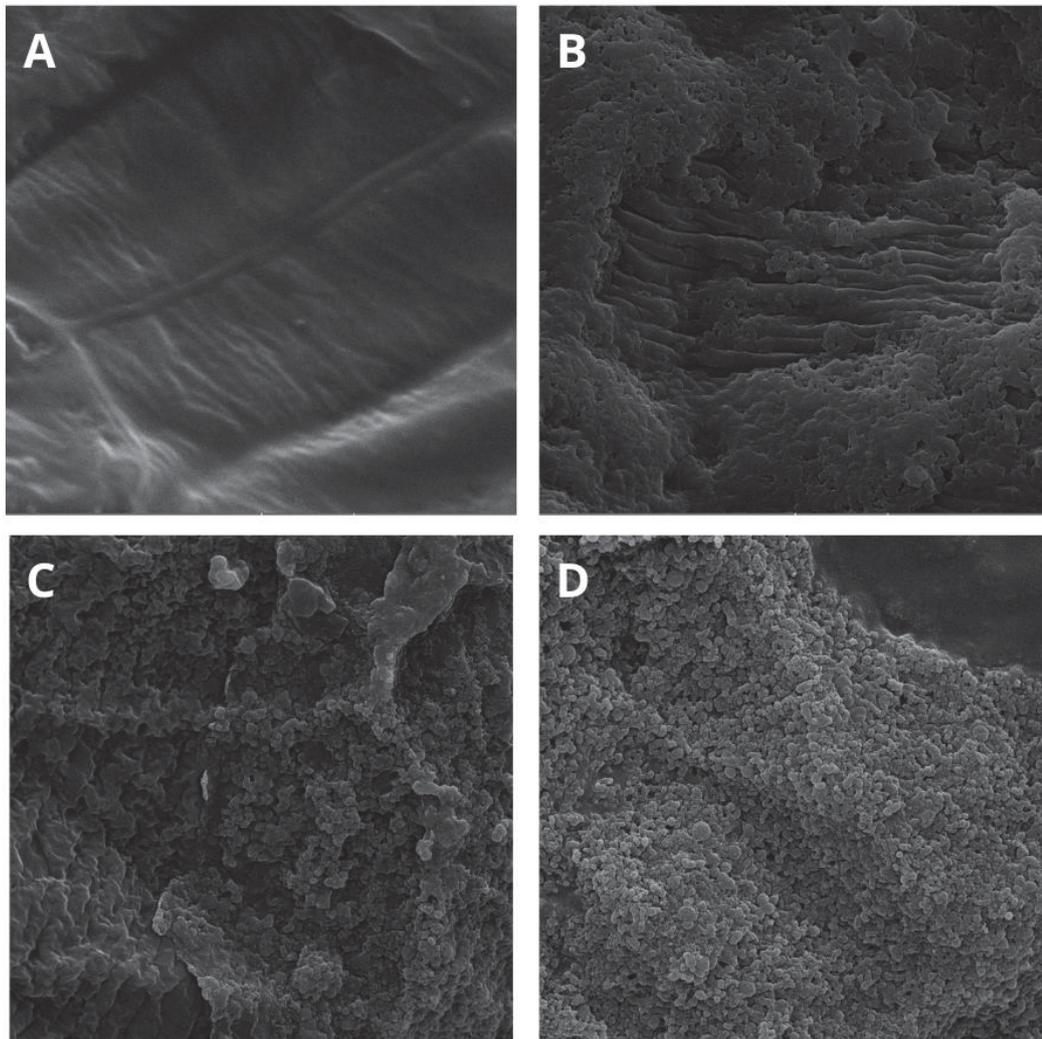
É perceptível que a maioria dos grânulos de amido possui uma morfologia predominantemente esférica (para os grânulos menores) e elíptica (para os grânulos maiores), caracterizados por uma superfície lisa. Adicionalmente, para ambas as cultivares, não foram observadas quaisquer modificações na morfologia em ambas as modalidades de hidratação (isotérmica e periódica) em nenhum dos momentos avaliados.

Imagens semelhantes foram obtidas nos estudos conduzidos por Los (2019), Demiate et al., (2016) e Vanier et al., (2019) ao examinar o amido extraído de feijão Carioca. No presente estudo, não foram realizados testes em temperaturas suficientemente elevadas para desencadear a gelatinização (que começa no pico em 58°C, conforme indicado pelas curvas obtidas por meio da técnica de DSC). Portanto, era esperado que os grânulos de amido mantivessem sua morfologia inalterada.

Além disso, não foi possível discernir quaisquer alterações morfológicas entre os grânulos de amido extraídos dos grãos *in natura* e aqueles que foram submetidos à hidratação. Em geral, quando o amido absorve umidade, seus grânulos podem expandir ou apresentar fissuras em sua superfície, como relatado em estudos anteriores (OLIVEIRA, 2017; SIMONI, 2017). Contudo, tais eventos não puderam ser identificados neste estudo.

Para examinar possíveis alterações na morfologia causadas pelo processo de hidratação, a cultivar BRS FC310 foi analisada por meio de microscopia eletrônica de varredura (MEV) sob a condição de maior estresse térmico, ou seja, a hidratação isotérmica a 60°C. Foram coletadas amostras ao término de cada fase (2 h, 7,5 h e 12 h). Notavelmente, a estrutura que apresentou uma clara modificação foi o cotilédone dos grãos, como pode ser observado na (FIGURA 21).

FIGURA 21- COTILÉDONE DA CULTIVAR BRS FC310 *IN NATURA* (A) E HIDRATADO A 60°C EM: (B) 2H; (C) 7.5 H; (D) 12 H.



Nota: Ampliação de imagem de 10kx.

Os cotilédones dos grãos *in natura* exibem naturalmente uma superfície estriada com ondulações, conforme ilustrado na (FIGURA 21a). Conforme o grão é submetido à hidratação em condições de estresse térmico (60 °C), observa-se o surgimento de estruturas granulares de formato aproximadamente esférico, que aumentam tanto em quantidade quanto em extensão à medida que o processo de hidratação avança, como evidenciado nas FIGURAS 21b, 21c e 21d.

Essas estruturas granulares provavelmente correspondem ao amido, que gradualmente é exposto à medida que as proteínas passam pelo processo de desnaturação. Além disso, é plausível que essas estruturas granulares se expandam à medida que absorvem água durante o processo, um fenômeno relatado em estudos anteriores (MIRANDA et al., 2019). Portanto, a análise dos grânulos de

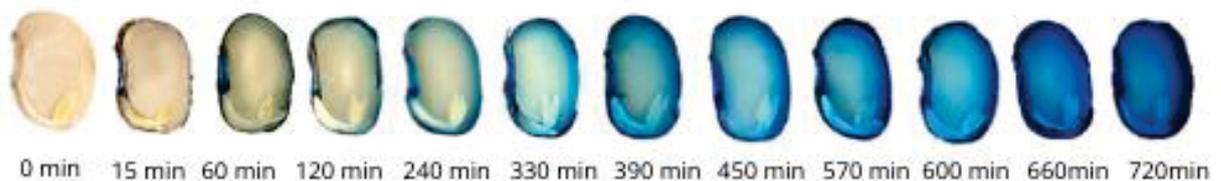
amido submetidos à hidratação é de grande utilidade para avaliar essas potenciais mudanças morfológicas, incluindo o inchaço e a solubilização por gelatinização.

A aplicação de temperaturas superiores àquelas que induzem a gelatinização do amido apresenta vantagens, como a melhora na digestibilidade dos nutrientes, a promoção da migração de minerais para o interior dos grãos e a redução de fatores antinutricionais (SHARMA et al., 2011; MIANO; AUGUSTO, 2018). Enquanto isso, o uso de temperaturas inferiores àquelas que provocam a gelatinização do amido permite a utilização dos grãos em contextos como grãos germinados minimamente processados, produção de malte, além de facilitar a operação de moagem e a extração de componentes de interesse (MIANO; AUGUSTO, 2018; CHACÓN; JORGE; JORGE, 2019).

4.5 DETERMINAÇÃO 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 60 °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 22).

FIGURA 22 - AVANÇO DO TRAÇADOR AZUL DE METILENO NOS GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA AO LONGO DA HIDRATAÇÃO A 60 °C.



Mediante análise da imagem, pode-se concluir que a cultivar BRS FC310, apresenta uma migração com parâmetros distribuídos. Observa-se que a região mais externa dos cotilédones dos grãos vai ficando cada vez mais escura e o grão vai adquirindo, ao longo do tempo, coloração com intensidade variada no sentido das bordas para o centro, até atingir uma coloração praticamente homogênea ao final do experimento.

Segundo Miano e Augusto (2018), os grãos que apresentam perfis cinéticos de hidratação côncavos para baixo, como os observados neste estudo, têm uma casca permeável, o que possibilita a migração de água tanto pelo hilo quanto pela casca dos grãos de maneira simultânea. Portanto, o aumento na coloração é gradual, começando pelas bordas e avançando em direção ao centro do grão.

4.6 APLICAÇÃO DOS MODELOS MATEMÁTICOS À CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO

Para avaliar a cinética de hidratação do feijão carioca, o modelo empírico de Peleg e Page, o modelo semi-empírico de Miano-Ibarz-Augusto e os modelos fenomenológicos de Difusão, Omoto-Jorge e Nicolin-Jorge 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 Modelos empíricos

4.6.1.1 Modelo de Peleg

As (FIGURAS 23 e 24) apresentam as curvas experimentais e as preditas pelo modelo de Peleg para as hidratações em operação isotérmica e periódica, com os respectivos parâmetros do modelo reportados na (TABELA 15).

FIGURA 23- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE PELEG PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.

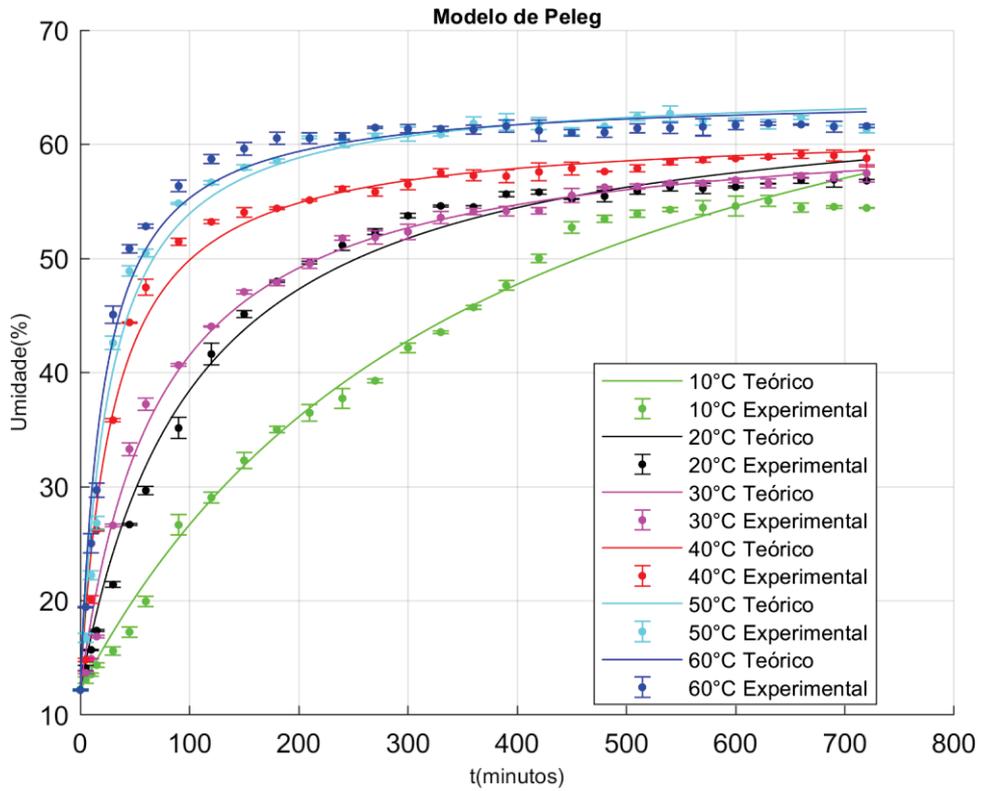
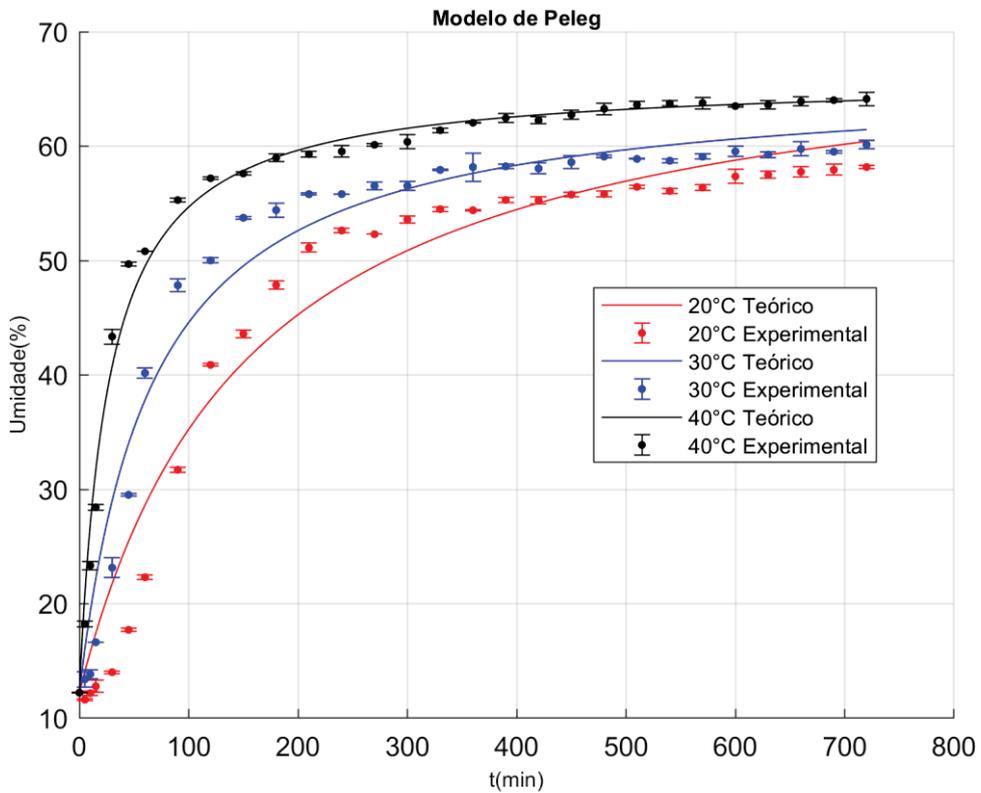


FIGURA 24- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE PELEG PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.



A aplicação do modelo de Peleg aos dados experimentais apresentou um desempenho satisfatório na fase de absorção de água. Através da análise do modelo, foi possível determinar os parâmetros (k_1 e k_2), os quais confirmam a relevância dessas constantes para a precisão do modelo de previsão conforme indicado na (TABELA 15).

TABELA 15 - VALORES DOS PARÂMETROS “K₁” E “K₂” DO MODELO DE PELEG.

Operação	Temperatura (°C)	k1 (h.% ⁻¹)	k2 (% ⁻¹)
Isotérmica	10	5,4512	0,0145
	20	1,9245	0,0188
	30	1,4108	0,0200
	40	0,6221	0,0203
	50	0,5031	0,0189
	60	0,4020	0,0192
Periódica	20	1,7347	0,0171
	30	1,2296	0,0186
	40	0,4929	0,0186

O modelo de Peleg não apenas permite descrever os processos hidrotermais dos grãos, mas também facilita a compreensão do processo de hidratação por meio de seus parâmetros (k_1 e k_2). Visto que esses parâmetros do modelo são sensíveis à variação de temperatura (MASKAN, 2002; BOTELHO et al., 2010; MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019).

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. Com isso, o aumento da temperatura de hidratação promoveu uma maior absorção de umidade pelo grão (TABELA 15) (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, 2019A).

De acordo com os valores do parâmetro k_1 , observa-se que a aplicação da operação periódica resultou em taxas de absorção de água mais elevadas em comparação com as operações isotérmicas correspondentes conforme apresentado na (TABELA 15). No caso do processo periódico, o parâmetro k_1 indicou um

aumento na taxa de absorção de água de 10,94% a 20°C, 14,73% a 30°C e 26,21% a 40°C, demonstrando uma maior eficiência em relação às operações isotérmicas correspondentes.

O parâmetro k_2 é considerado inversamente proporcional à umidade final alcançada pelos grãos. Nesse estudo, o parâmetro k_2 não segue uma tendência decrescente esperada, em vez disso, em várias condições, ele exibe uma tendência oposta, ou seja, crescente, e em algumas condições seus valores não diferem significativamente.

O mesmo comportamento foi observado por Chezin (2017) em seu estudo com feijão preto, no qual ele notou um aumento no valor de k_2 à medida que a temperatura aumentava, tanto para a hidratação isotérmica quanto para a periódica. Por outro lado, no estudo de Carvalho (2022) com feijão carioca, foi observado que, com o aumento da temperatura de hidratação nas condições isotérmicas, os parâmetros k_1 e k_2 apresentavam uma tendência decrescente em seus valores.

Conforme explicado por Miano e Augusto (2018), quando temperaturas elevadas são utilizadas no processo de hidratação, o comportamento do parâmetro k_2 pode variar, aumentando, diminuindo ou permanecendo constante, dependendo da termossensibilidade dos grãos e das temperaturas específicas avaliadas.

4.6.1.2 Modelo de Page

As (FIGURAS 25 e 26) apresentam as curvas experimentais e as preditas pelo modelo de Page para as hidratações em operação isotérmica e periódica, com os respectivos parâmetros do modelo reportados na (TABELA 16).

FIGURA 25- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE PAGE PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.

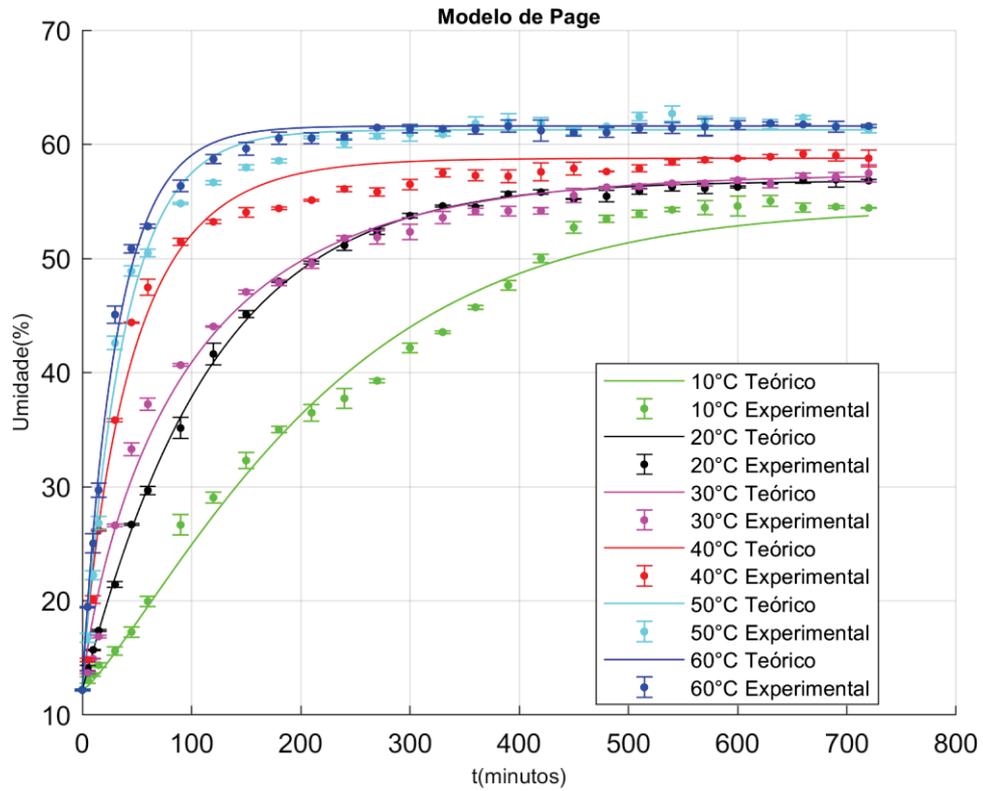


FIGURA 26- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE PAGE PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.

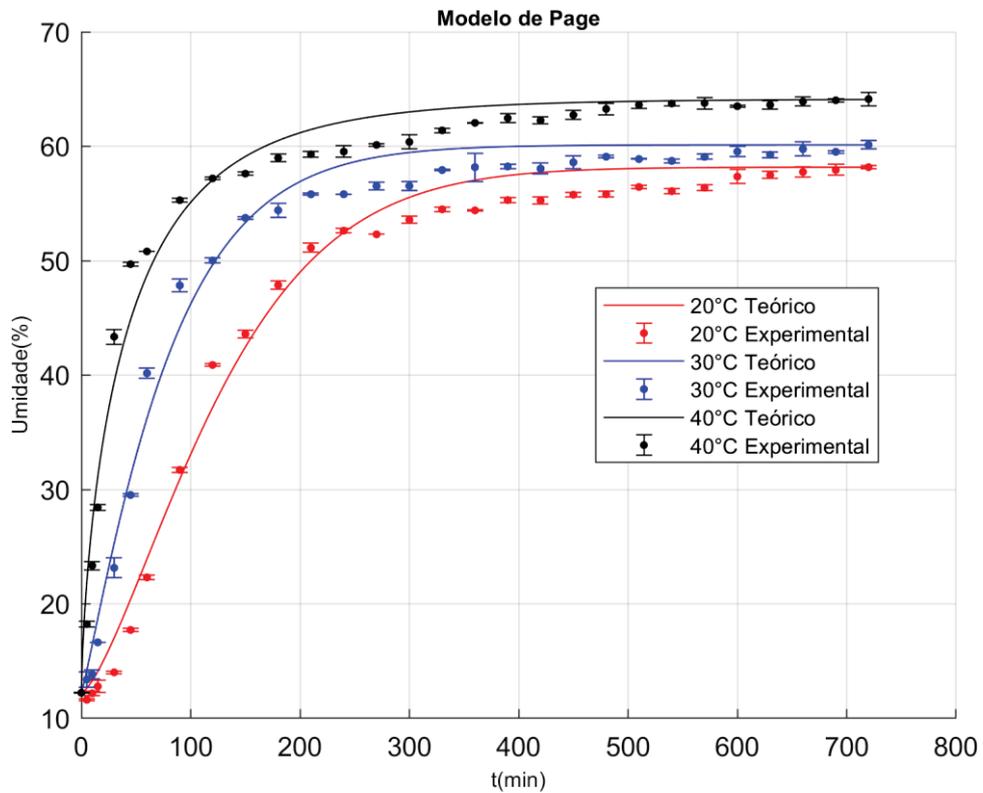


TABELA 16- VALORES DOS PARÂMETROS “KP” E “N” DO MODELO DE PAGE.

Operação	Temperatura (°C)	kp (h-1)	N
Isotérmica	10	0,0012	1,2377
	20	0,0076	1,0243
	30	0,0231	0,8188
	40	0,0343	0,8763
	50	0,0294	0,9700
	60	0,0369	0,9516
Periódica	20	0,0009	1,4131
	30	0,0069	1,1274
	40	0,0654	0,7135

Diferentemente do parâmetro k_1 do modelo de Peleg, o parâmetro k_p do modelo de Page está diretamente associado à taxa de absorção de água do processo, o que resulta em uma tendência crescente em seus valores à medida que a temperatura aumenta conforme (TABELA 16). O parâmetro adimensional N , por sua vez, apresentou uma tendência decrescente.

Carvalho (2022), Kashaninejad et al., (2007) e Kashiri, Garmakhany e Dehghani (2012) obtiveram a mesma tendência para ambos os parâmetros, enquanto Silva (2016) obteve a mesma tendência apenas para o parâmetro k_p , sendo que o parâmetro N não apresentou variação proporcional a mudança da temperatura.

Os valores do parâmetro k_p obtidos neste estudo indicam que a operação periódica apresentou um k_p maior, resultando em uma taxa de absorção de água superior à operação isotérmica somente a 40°C, que foi a temperatura mais alta entre as duas operações.

4.6.2 Modelo semi – empírico

4.6.2.1 Miano- Ibarz- Augusto

As (FIGURAS 27 e 28) apresentam as curvas experimentais e as preditas pelo modelo de Miano-Ibarz-Augusto para as hidratações em operação isotérmica e periódica, com os respectivos parâmetros do modelo reportados na (TABELA 17).

FIGURA 27- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.

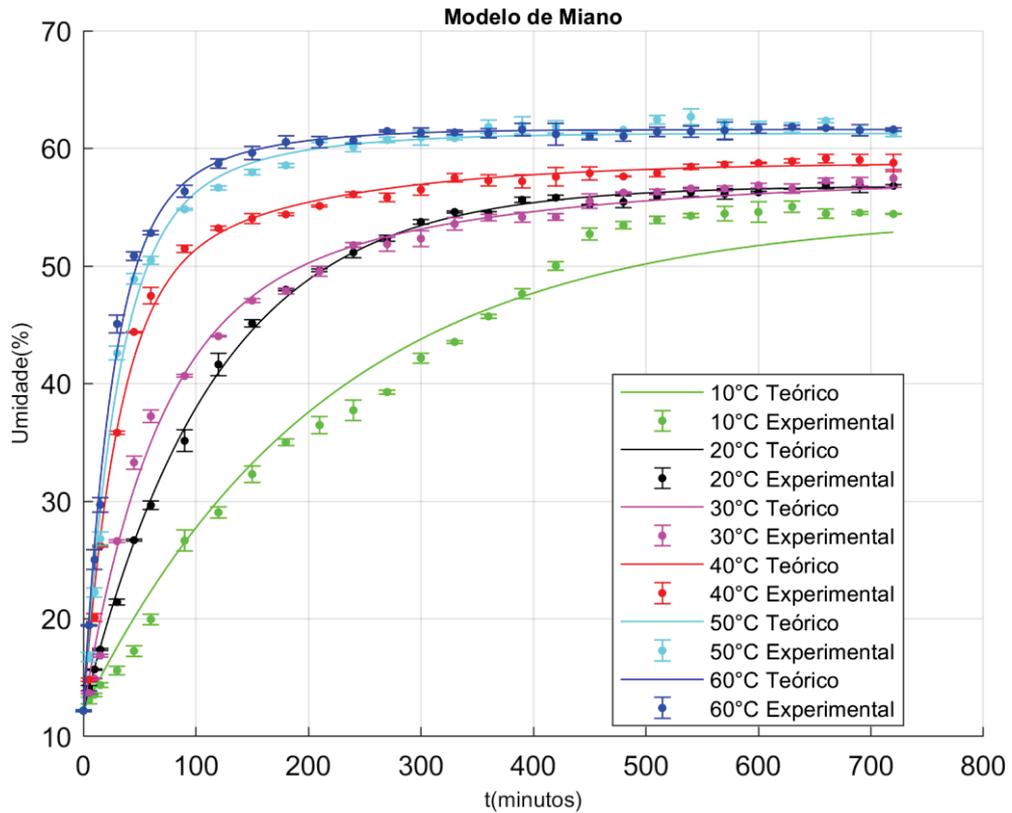


FIGURA 28- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.

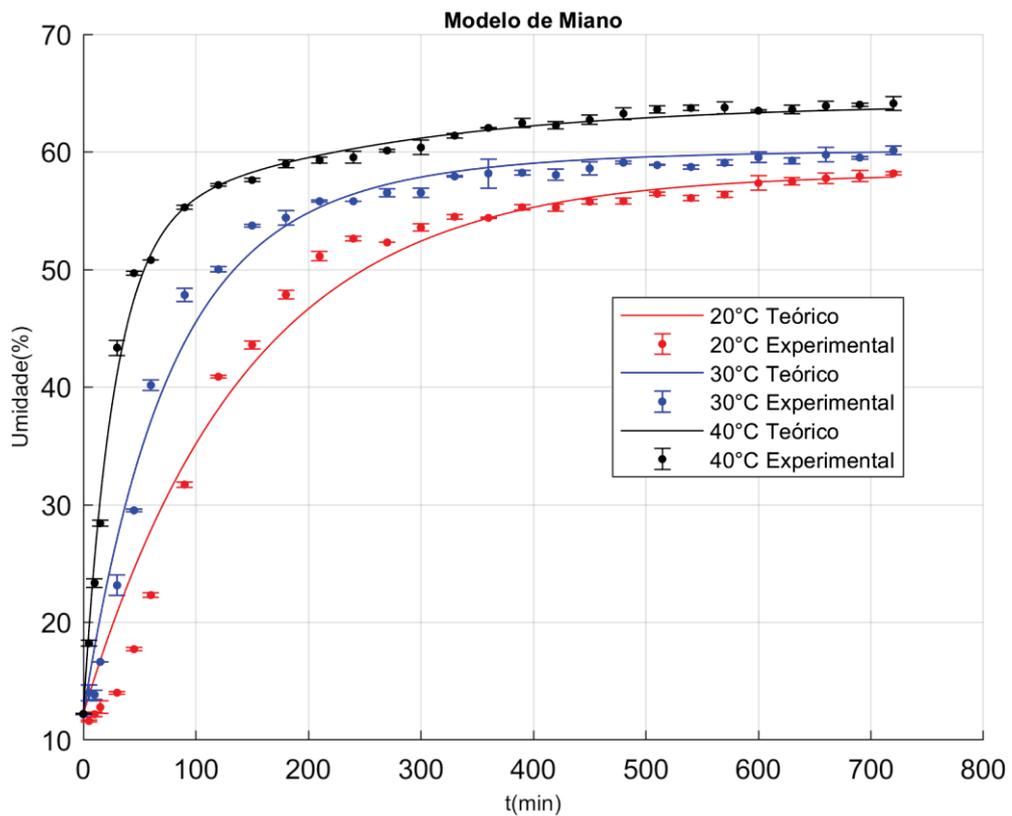


TABELA 17- VALORES DOS PARÂMETROS “ka” E “kb” DO MODELO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO.

Operação	Temperatura (°C)	ka	kb
Isotérmica	10	0,0046	0,0046
	20	0,0086	0,0086
	30	0,0038	0,0161
	40	0,0059	0,0323
	50	0,0103	0,0345
	60	0,0120	0,0406
Periódica	20	0,0069	0,0069
	30	0,0062	0,0147
	40	0,0044	0,0374

Os valores dos parâmetros “ka” e “kb” revelam que, em temperaturas mais baixas, ambos têm os mesmos valores. À medida que a temperatura aumenta, observa-se que o parâmetro “kb” se torna maior. Além disso, nota-se que, com o aumento da temperatura, os valores de “ka” também aumentam (com exceção de 30°C na operação isotérmica). Vale destacar que o parâmetro “ka” está diretamente relacionado com a taxa de absorção rápida/curta, como evidenciado nas (FIGURAS 18 e 19), que mostram um percentual maior de absorção na fase I à medida que a temperatura aumenta.

O comportamento de aumento do parâmetro “ka” e “kb” com o aumento da temperatura foi observado nos estudos de Oladele (2017) e Nascimento (2022).

4.6.3 Modelos fenomenológico

4.6.3.1 Modelo de Omoto-Jorge

As (FIGURAS 29 e 30) apresentam as curvas experimentais e as preditas pelo modelo de Omoto-Jorge para as hidratações em operação isotérmica e periódica, com os respectivos parâmetros do modelo reportados na (TABELA 18).

FIGURA 29- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.

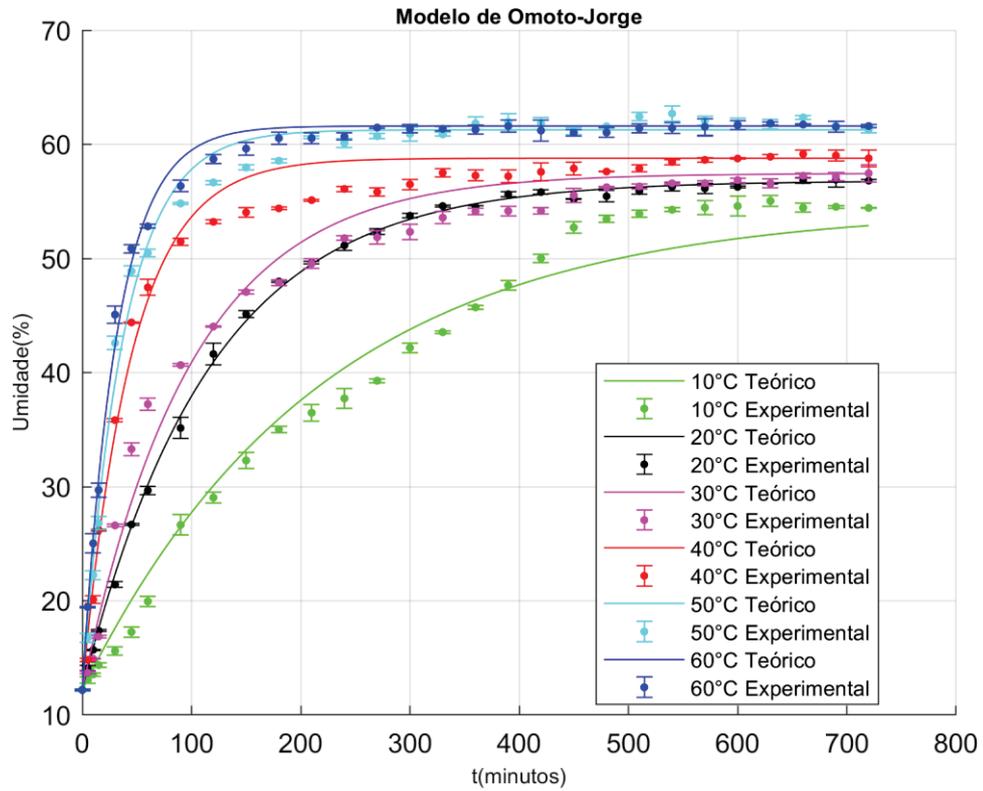
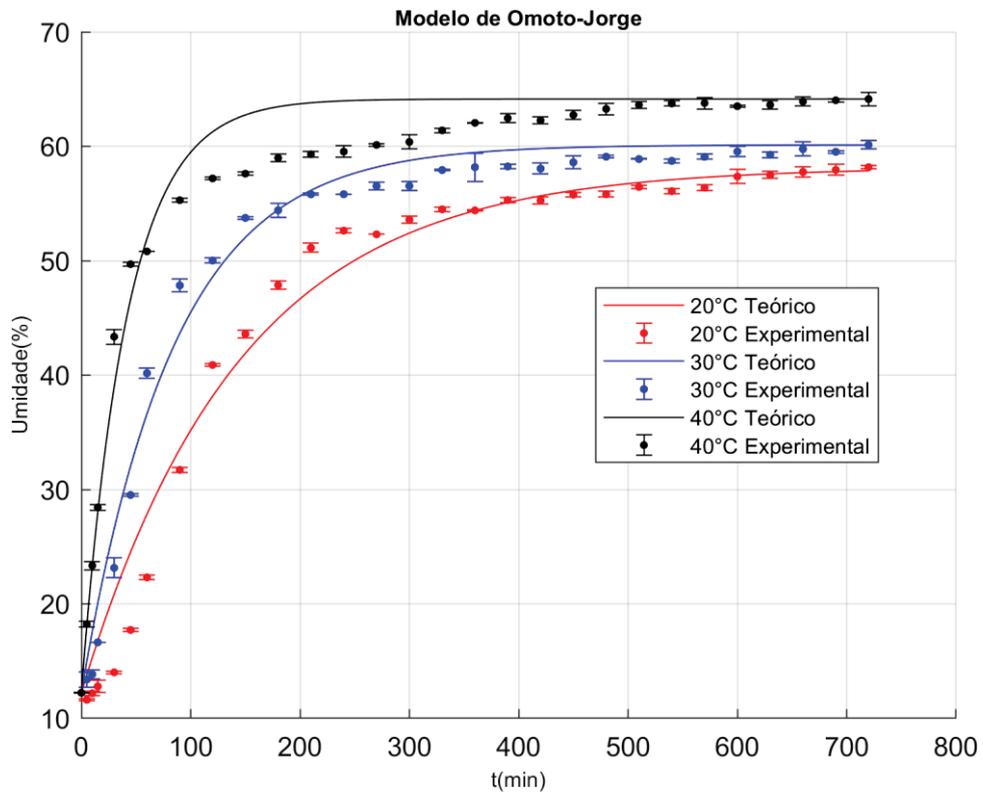


FIGURA 30- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE OMOTO-JORGE PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.



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. (TABELA 18).

TABELA 18-VALORES DOS PARÂMETRO “ K_S ” DO MODELO DE OMOTO-JORGE.

Operação	Temperatura (°C)	K_s ($10^{-5}m^2 s^{-1}$)
Isotérmica	10	1,4492
	20	2,7141
	30	3,1715
	40	6,9573
	50	8,3612
	60	9,9234
Periódica	20	2,7828
	30	3,7380
	40	7,6093

O modelo fenomenológico de Omoto-Jorge é utilizado para analisar a cinética de hidratação por meio do parâmetro de transporte convectivo de massa (K_s) presente no modelo, o que possibilita compreender a transferência de umidade durante o processo de hidratação. Conforme observado em estudos anteriores com grãos de ervilha (OMOTO et al., 2009), triticale (OLIVEIRA, 2020), soja (BORGES; JORGE; JORGE, 2017) e trigo (MATTIODA; JORGE; JORGE 2019a), o aumento da temperatura de hidratação resultou em valores mais elevados para o parâmetro K_s em ambos os cultivares. Além disso, a operação periódica demonstrou a capacidade de aumentar o valor do parâmetro K_s em comparação com as operações isotérmicas correspondentes.

Ceccin (2020) obteve valores de 3,63 a 8,65 ($10^{-3} .cm.min^{-1}$) para a taxa de transferência de massa (K_s) em hidratações variando de 30 a 60°C na cultivar Esplendor (Feijão preto). Para a mesma cultivar, em operação periódica nas mesmas condições, os valores variaram de 6,47 a 7,94 ($10^{-3} .cm.min^{-1}$). Em seu estudo com triticale, Oliveira (2020) encontrou valores de 4,02 a 5,33 ($10^{-6}m^2 s^{-1}$) em operação isotérmica nas temperaturas de hidratação de 20 a 50°C. Nas mesmas condições de temperatura, em operação periódica, os valores variaram de 4,06 a 5,36 ($10^{-6}m^2 s^{-1}$).

4.6.3.2 Modelo de Nicolin-Jorge

As (FIGURAS 31 e 32) apresentam as curvas experimentais e as previstas pelo modelo de Nicolin-Jorge para as hidratações em operação isotérmica e periódica, com os respectivos parâmetros do modelo reportados na (TABELA 19).

FIGURA 31 - CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE NICOLIN-JORGE PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.

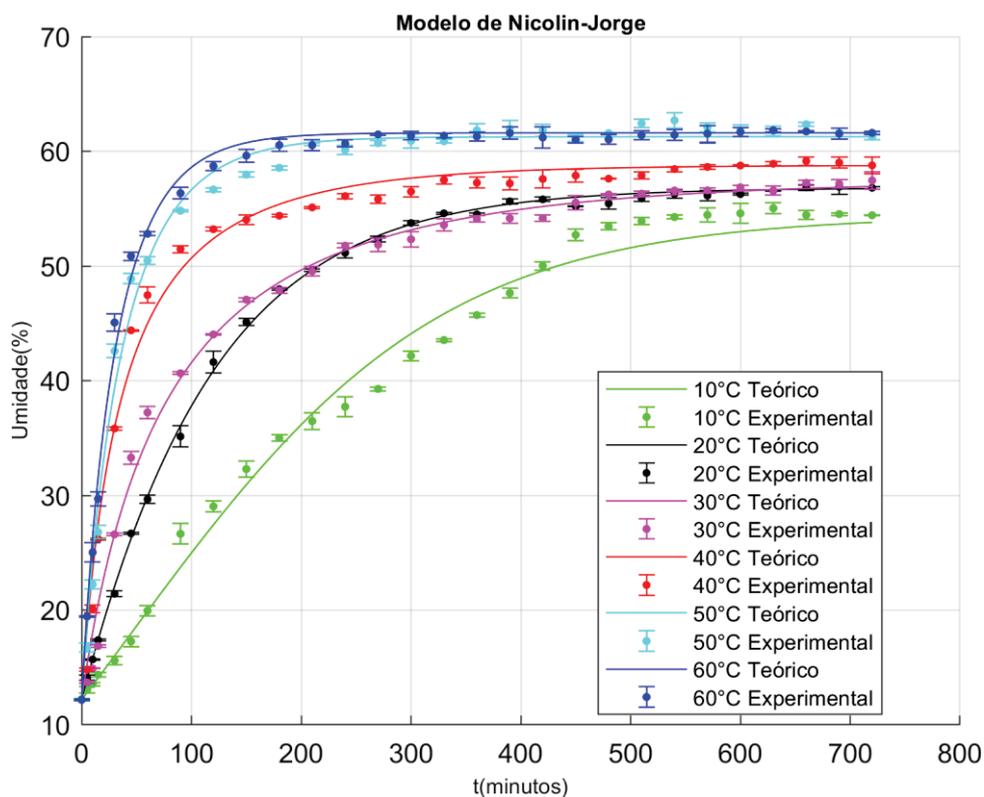


FIGURA 32- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE NICOLIN-JORGE PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.

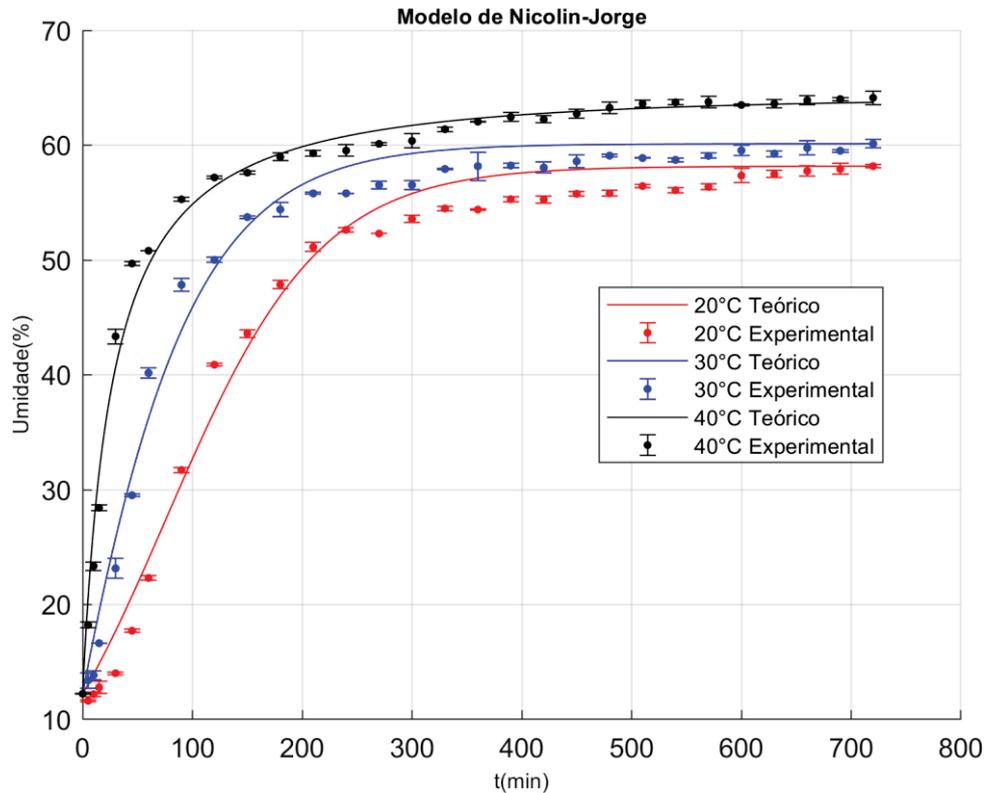


TABELA 19- VALORES DOS PARÂMETROS "A" E "B" DO MODELO DE NICOLIN-JORGE.

Operação	Temperatura (°C)	$a \times 10^{-3}$ ($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$)	$b \times 10^{-6}$ ($\text{cm}^4 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$)
Isotérmica	10	0,0058	0,3009
	20	0,0253	0,0605
	30	0,0542	-0,6887
	40	0,1148	-1,5088
	50	0,1032	-0,6562
	60	0,1200	-0,6861
Periódica	20	0,0244	0,7355
	30	0,0598	0,2637
	40	0,4764	-2,1069

Neste estudo, observou-se que o parâmetro "a" do modelo de Nicolin-Jorge apresentou uma tendência de aumento, enquanto o parâmetro "b" exibiu uma tendência de diminuição à medida que a temperatura aumentou (TABELA 19). Ambos os parâmetros seguiram um padrão parabólico em relação ao aumento da temperatura. Esse padrão de comportamento foi semelhante ao encontrado em outros estudos, como o de Nicolin et al., (2017), que aplicaram o modelo de Nicolin-Jorge para ajustar a cinética de hidratação de arroz e milho, bem como nos estudos

de Nicolin et al., (2015) para a cinética de hidratação de soja e Carvalho (2022) para a cinética de hidratação do feijão-caupi.

Com base nos valores do parâmetro "a", notou-se que as operações periódicas a 20°C e 30°C não apresentaram diferenças significativas em comparação com as correspondentes operações isotérmicas. No entanto, uma vez que a equação linear de Ks leva em consideração os valores de concentração mássica de água ao longo da hidratação (p_a), fica evidente que a operação periódica é capaz de intensificar o processo em praticamente a mesma proporção observada nas curvas cinéticas experimentais.

4.6.3.3 Modelo de Difusão

As (FIGURAS 33 e 34) apresentam as curvas experimentais e as previstas pelo modelo de Difusão para as hidratações em operação isotérmica e periódica, com os respectivos parâmetros do modelo reportados na (TABELA 20).

FIGURA 33- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE DIFUSÃO PARA A HIDRATAÇÃO ISOTÉRMICA DA CULTIVAR BRS FC310.

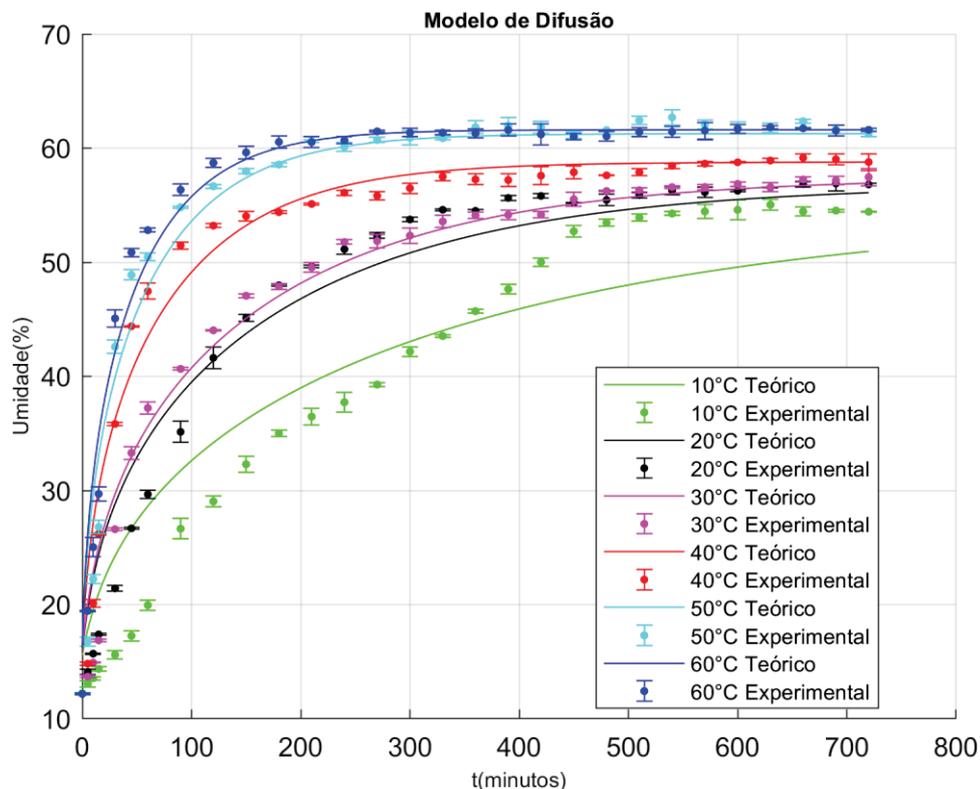
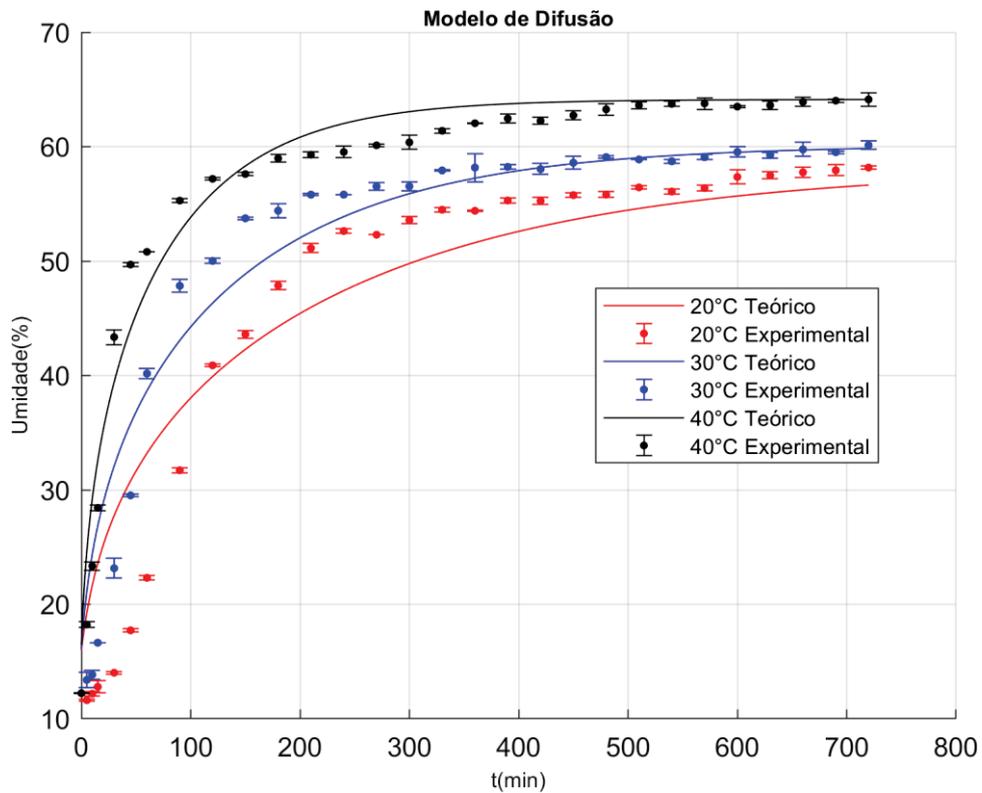


FIGURA 34- CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO DE DIFUSÃO PARA A HIDRATAÇÃO PERIÓDICA DA CULTIVAR BRS FC310.



Mediante a avaliação do modelo foi possível obter os parâmetros (Def) que confirmam a importância dessas constantes para a qualidade de predição do modelo (TABELA 20).

TABELA 20- VALORES DOS PARÂMETROS “DEF” DO MODELO DE DIFUSÃO.

Operação	Temperatura	Def ($10^{-6}m^2 s^{-1}$)
Isotérmica	10	0,0252
	20	0,0457
	30	0,0496
	40	0,0986
	50	0,1236
	60	0,1485
Periódica	20	0,0466
	30	0,0583
	40	0,1023

Os valores do coeficiente de difusão efetivo (Def) seguiram uma tendência crescente à medida que a temperatura de hidratação aumentou, o que era esperado, uma vez que esse coeficiente engloba todos os fenômenos de transferência de massa no processo de hidratação, que ocorrem com maior intensidade em temperaturas mais elevadas. Essa mesma tendência foi observada em estudos de

hidratação de diversos alimentos, como grão de bico (PRASAD; VAIRAGAR; BERA, 2010), quinoa (RAMOS et al., 2016), triticale (OLIVEIRA, 2020), trigo (MATTIODA; JORGE; JORGE, 2018; MATTIODA; JORGE; JORGE, 2019b), soja (BORGES; JORGE; JORGE, 2019) e cevada (CHACÓN ALVAREZ; JORGE; JORGE, 2020).

De acordo com os valores obtidos para o coeficiente (D_{ef}), a operação periódica aponta para uma taxa de aumento de 1,93%, 14,92% e 3,61% para as operações de 20 °C, 30 °C e 40 °C respectivamente, em comparação à operação isotérmica. No estudo conduzido por Mattioda, Jorge e Jorge (2018), que analisou a cinética de hidratação do trigo utilizando o modelo de Difusão, foi observado que apenas o processo periódico de 20-60 °C apresentou um coeficiente de difusão mais elevado em comparação com o processo isotérmico a 40°C. Por outro lado, no estudo de Chacón Alvarez, Jorge e Jorge (2020), não houve diferença significativa nos valores de (D_{ef}) obtidos entre as operações isotérmicas realizadas a 15, 20 e 30 °C e as operações periódicas, nas quais a amplitude de temperatura era de 7,5 °C e o período de 16 minutos. Segundo esses autores, amplitudes de temperatura mais baixas e períodos curtos para o ciclo de hidratação podem não ser suficientes para provocar uma diferença substancial na taxa de difusão.

4.6.4 Solução Matemática e Qualidade de Ajuste dos Modelos

Mediante ao ajuste dos modelos matemáticos (Peleg, Page, Miano-Ibarz-Augusto, Difusão, OmotoJorge e Nicolin-Jorge) perante as cinéticas de hidratação dos grãos de feijão carioca foi possível discutir os parâmetros de qualidade estatística dos dados preditos pelo modelo em relação aos dados experimentais. Na (TABELA 21) estão apresentados os parâmetros estatísticos dos modelos empíricos e semi-empírico e na (TABELA 22) dos modelos fenomenológicos. A qualidade dos modelos foi avaliada mediante aos níveis de ajuste observados estatisticamente pelo coeficiente de determinação (R^2), erro médio relativo (P) e raiz quadrada média do erro (RMSE) (TABELA 21 e 22).

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).

TABELA 21- PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DOS MODELOS DE PALEG, PAGE, MIANO-IBARZ-AUGUSTO.

Modelo de Peleg				
Operação	Temperatura	R²	RMSE	P
Isotérmica	10	0,9911	1,4531	3,2897
	20	0,9908	1,4645	3,5386
	30	0,9930	1,2164	2,9912
	40	0,9871	1,5631	3,2425
	50	0,9849	1,7862	3,5160
	60	0,9844	1,7270	3,2496
Periódica	20	0,9615	3,4016	9,8463
	30	0,9724	2,7010	6,9128
	40	0,9902	1,4388	2,5183
Modelo de Page				
Operação	Temperatura	R²	RMSE	P
Isotérmica	10	0,9893	1,5945	3,5440
	20	0,9993	0,4106	0,8078
	30	0,9898	1,4732	3,6715
	40	0,9859	1,6329	3,2796
	50	0,9910	1,3780	2,4711
	60	0,9954	0,9364	1,3959
Periódica	20	0,9896	1,7669	4,6937
	30	0,9874	1,8256	4,0550
	40	0,9802	2,0449	3,7487
Modelo de Miano-Ibarz-Augusto				
Operação	Temperatura	R²	RMSE	P
Isotérmica	10	0,9803	2,1682	5,0157
	20	0,9992	0,4365	0,8716
	30	0,9942	1,1072	2,7852
	40	0,9950	0,9721	2,0424
	50	0,9934	1,1774	2,2416
	60	0,9972	0,7314	1,0835
Periódica	20	0,9863	2,4669	5,1892
	30	0,9884	1,8951	4,8058
	40	0,9960	0,9196	1,6122

TABELA 22- PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DOS MODELOS DE OMOTO-JORGE, NICOLIN-JORGE E DIFUSÃO.

Modelo de Omoto-Jorge				
Operação	Temperatura	R²	RMSE	P
Isotérmica	10	0,9803	2,1682	5,0157
	20	0,9992	0,4365	0,8716
	30	0,9816	1,9790	4,0716
	40	0,9844	1,7209	3,1280
	50	0,9909	1,3847	2,3888
	60	0,9952	0,9618	1,2727
Periódica	20	0,9763	2,6669	8,1893
	30	0,9860	1,9261	4,8189
	40	0,9685	2,5791	3,4004
Modelo de Nicolin-Jorge				
Operação	Temperatura	R²	RMSE	P
Isotérmica	10	0,9873	1,3821	3,2578
	20	0,9993	0,4131	0,7793
	30	0,9935	1,1796	2,9059
	40	0,9896	1,4010	2,9376
	50	0,9916	1,3321	2,4811
	60	0,9957	0,9022	1,3849
Periódica	20	0,9875	1,9395	5,5518
	30	0,9864	1,8948	5,5433
	40	0,9903	1,4282	2,5610
Modelo de Difusão				
Operação	Temperatura	R²	RMSE	P
Isotérmica	10	0,8950	5,0040	17,1096
	20	0,9523	3,3348	10,1757
	30	0,9659	2,6926	7,7278
	40	0,9620	2,6839	6,4974
	50	0,9628	2,8032	6,3126
	60	0,9702	2,3869	4,8969
Periódica	20	0,8920	5,6958	20,3653
	30	0,9342	4,1702	11,9005
	40	0,9649	2,7245	6,1783

Os modelos analisados mostraram um ajuste estatístico de alta qualidade, exibindo uma excelente concordância. Ficou evidente que esses modelos são adequados para os parâmetros (P) e (RMSE), uma vez que, em todas as condições experimentais propostas (com exceção do modelo de Difusão), as discrepâncias foram menores que 10% para o erro médio relativo e abaixo de 5% para a raiz quadrada média do erro. Além disso, os coeficientes de determinação dos modelos ultrapassaram 0,89.

O modelo fenomenológico de Miano-Ibarz-Augusto se destacou devido aos seus resultados superiores em termos de parâmetros avaliados, como o coeficiente de determinação (R^2), significância estatística (P), e erro quadrático médio (RMSE). Além disso, sua simplicidade de entendimento e aplicação tornaram-no a escolha para ser generalizado.

4.7 AVALIAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO

Os modelos generalizados permitem obter informações sobre a cinética de hidratação das cultivares, considerando a influência da temperatura, sem a necessidade de conduzir novos testes, desde que esses modelos sejam aplicados dentro da faixa de temperatura avaliada.

O modelo Miano-Ibarz-Augusto demonstrou uma representação satisfatória do ganho de umidade do feijão carioca durante os ensaios de hidratação. Dada a promissora aplicabilidade desse modelo e a consideração de sua extensão para outras condições operacionais ao longo de uma ampla faixa de temperatura e tempo, generalizou-se o modelo na faixa de 10-60°C em operação isotérmica e 20-40°C em operação periódica. Essa generalização torna o modelo uma ferramenta útil para aplicações práticas de previsão, permitindo estimar o ganho de umidade do feijão em processos de hidratação. Os efeitos da temperatura nas operações isotérmicas e periódicas sobre os parâmetros do modelo foram analisados por meio de funções matemáticas lineares (FIGURAS 35 e 36) e (TABELA 23).

TABELA 23-DEPENDÊNCIA DOS PARÂMETROS " p ", " M_{eq} ", " K_a " e " K_b " COM A TEMPERATURA DE HIDRATAÇÃO.

Parâmetro	Operação	Equação	
p	Isotérmica	$p = -0,0038 * T + 0,4090$	(27)
	Periódica	$p = -0,0042 * T + 0,3787$	(28)
M_{eq}	Isotérmica	$M_{eq} = 0,1446 * T + 53,332$	(29)
	Periódica	$M_{eq} = 0,2977 * T + 51,879$	(30)
K_a	Isotérmica	$K_a = 0,0002 * T + 0,0012$	(31)
	Periódica	$K_a = -0,0001 * T + 0,0096$	(32)
K_b	Isotérmica	$K_b = 0,0008 * T - 0,0046$	(33)
	Periódica	$K_b = 0,0015T - 0,0261$	(34)

FIGURA 35- INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS PARÂMETROS MEQ (A), P (B), KA (C) E KB (D) DO MODELO MIANO – IBARZ – AUGUSTO NO PROCESSO ISOTÉRMICO (10-60°C).

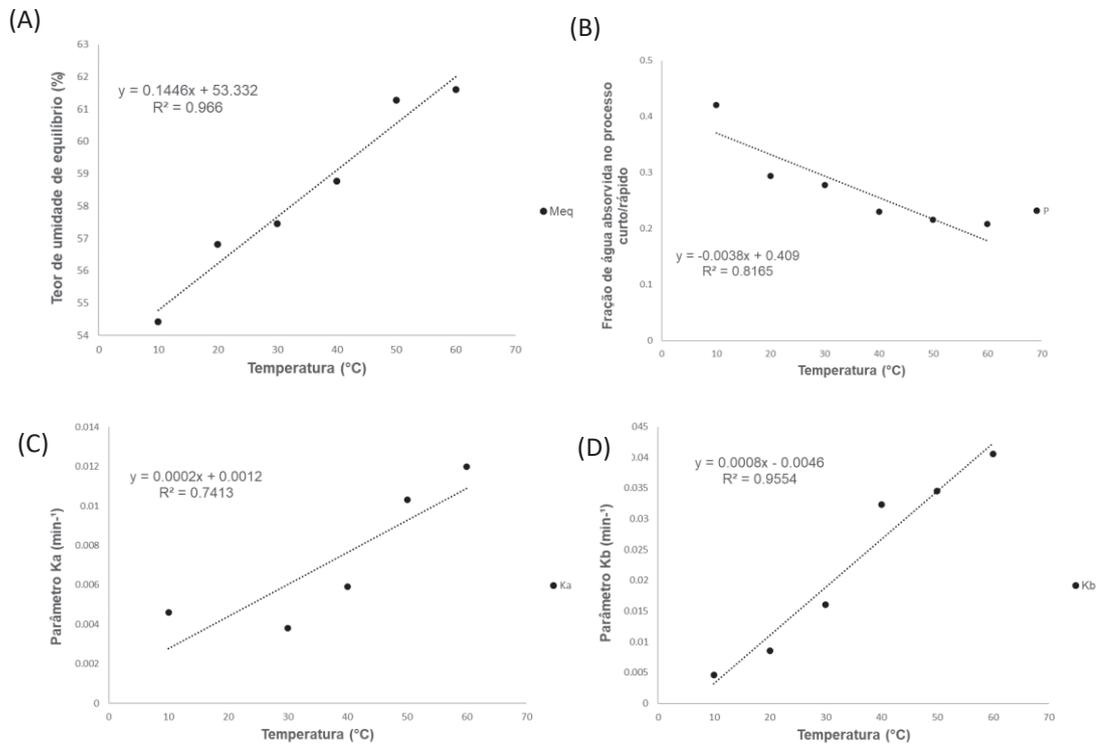
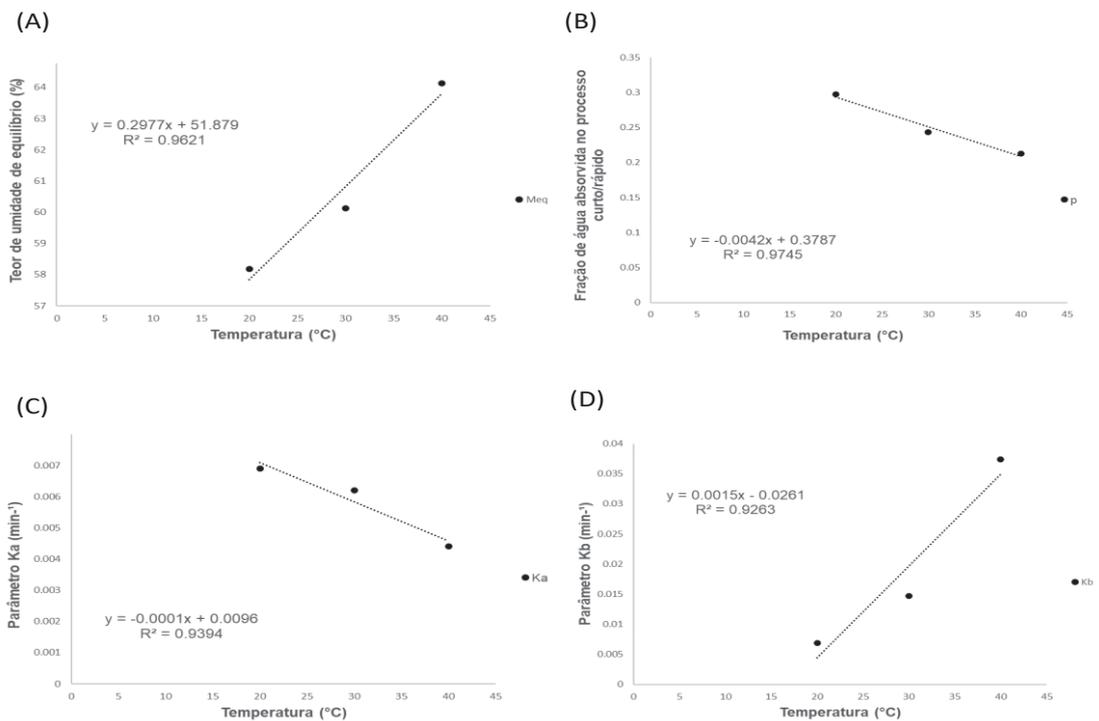


FIGURA 36- INFLUÊNCIA DA TEMPERATURA NOS PARÂMETROS MEQ (A), P (B), KA (C) E KB (D) DO MODELO MIANO – IBARZ – AUGUSTO NO PROCESSO PERIÓDICO (20-40°C).



As equações obtidas da dependência dos parâmetros " p " " M_{eq} " " K_a " e " K_b " com a temperatura de hidratação (TABELA 23) foram substituídas na solução analítica do modelo original (EQUAÇÃO (5))

Com a aplicação dessas premissas foi estabelecido os modelos generalizados de Miano–Ibarz–Augusto para o cultivar BRS FC310 referentes aos processos isotérmico (EQUAÇÃO (35)) e periódico (EQUAÇÃO (36)).

$$M(T, t) = M_0 + (0,1446 * T + 53,332 - M_0) * [(-0,0038 * T + 0,4090) * (1 - e^{-(0,0002*T+0,0012)*t}) + (1 - (-0,0038 * T + 0,4090)) * (1 - e^{-(0,0008*T-0,0046)*t})]$$

(35)

$$M(T, t) = M_0 + (0,2977 * T + 51,879 - M_0) * [(-0,0042 * T + 0,3787) * (1 - e^{-(0,0001*T+0,0096)*t}) + (1 - (-0,0042 * T + 0,3787)) * (1 - e^{-(0,0015T-0,0261)*t})]$$

(36)

As equações do modelo generalizado de Miano–Ibarz–Augusto (EQUAÇÕES 34 e 35) foram ajustadas aos dados cinéticos experimentais de hidratação para avaliar a sua qualidade de predição (FIGURAS 37 e 38)

FIGURA 37 – CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO GENERALIZADO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA.

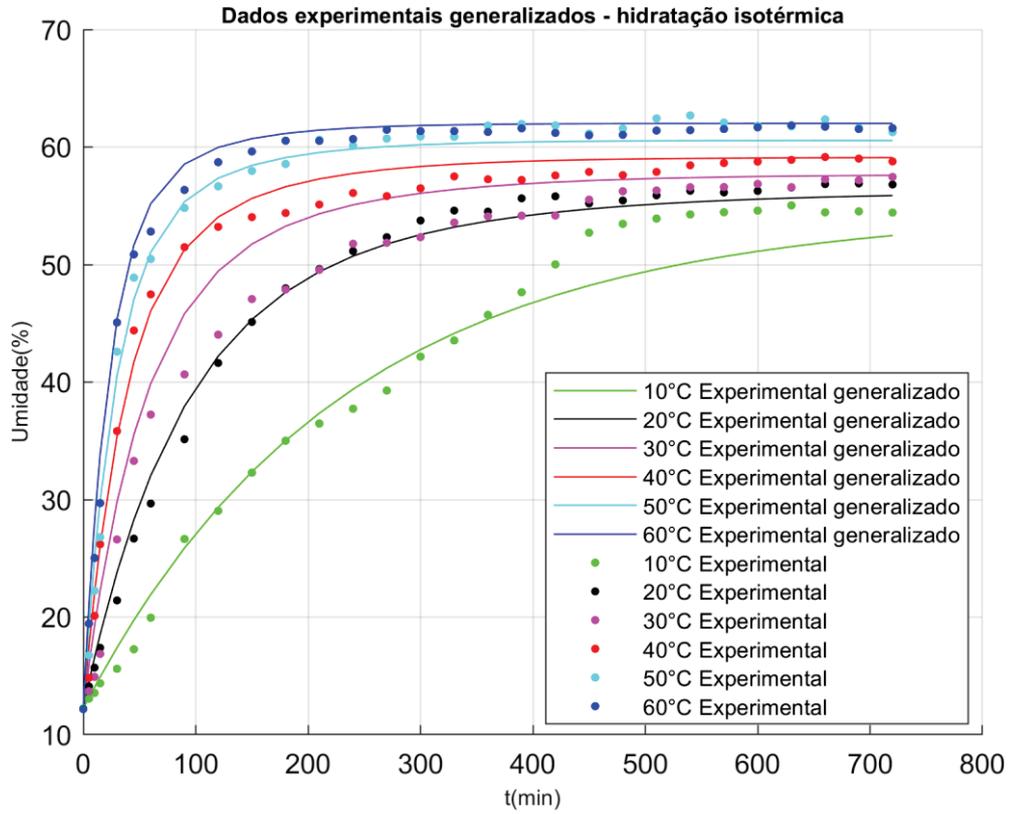
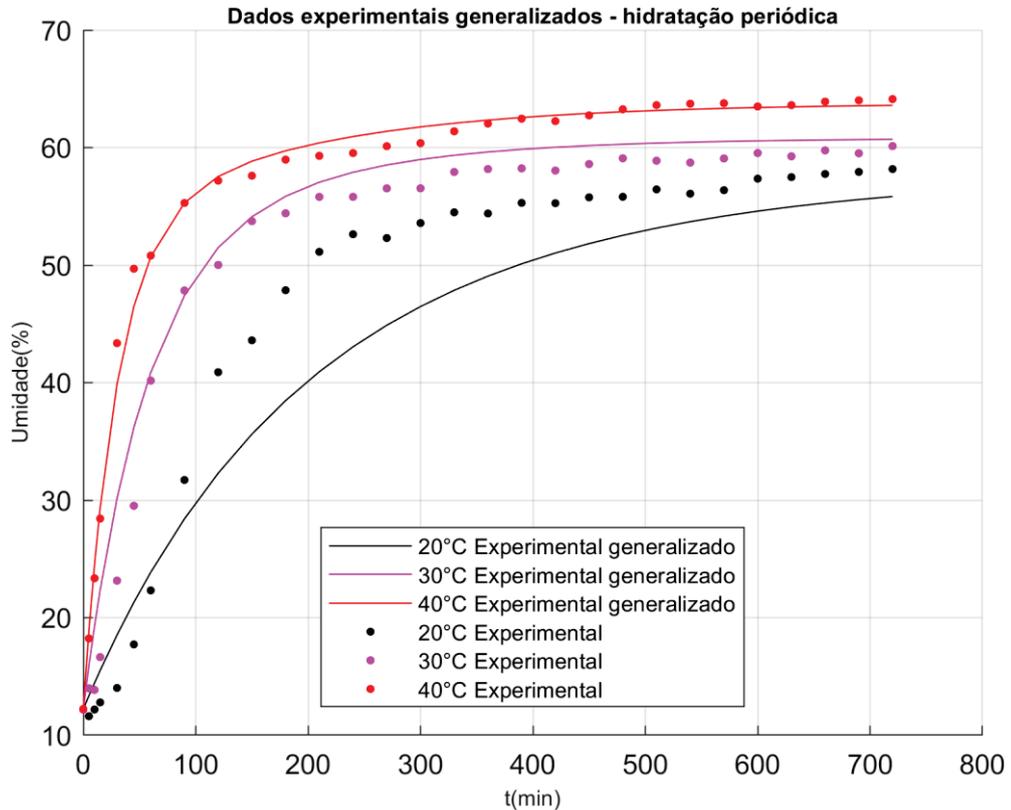


FIGURA 38– CURVAS EXPERIMENTAIS E PREDITAS PELO MODELO GENERALIZADO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO PERIÓDICA.



Os modelos generalizados de Miano-Ibarz-Augusto ajustados permitiram a previsão da umidade experimental em qualquer momento durante o processo de hidratação, tanto em operação isotérmica quanto periódica, dentro da faixa de temperaturas investigadas. Os valores previstos apresentaram desvios máximos em relação aos valores observados experimentalmente de 15% para a hidratação em operação isotérmica e 17% para a hidratação periódica, como mostrado nas (FIGURAS 39 e 40).

FIGURA 39- RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE UMIDADE OBSERVADOS EXPERIMENTALMENTE E OS PREDITOS PELO MODELO GENERALIZADO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA.

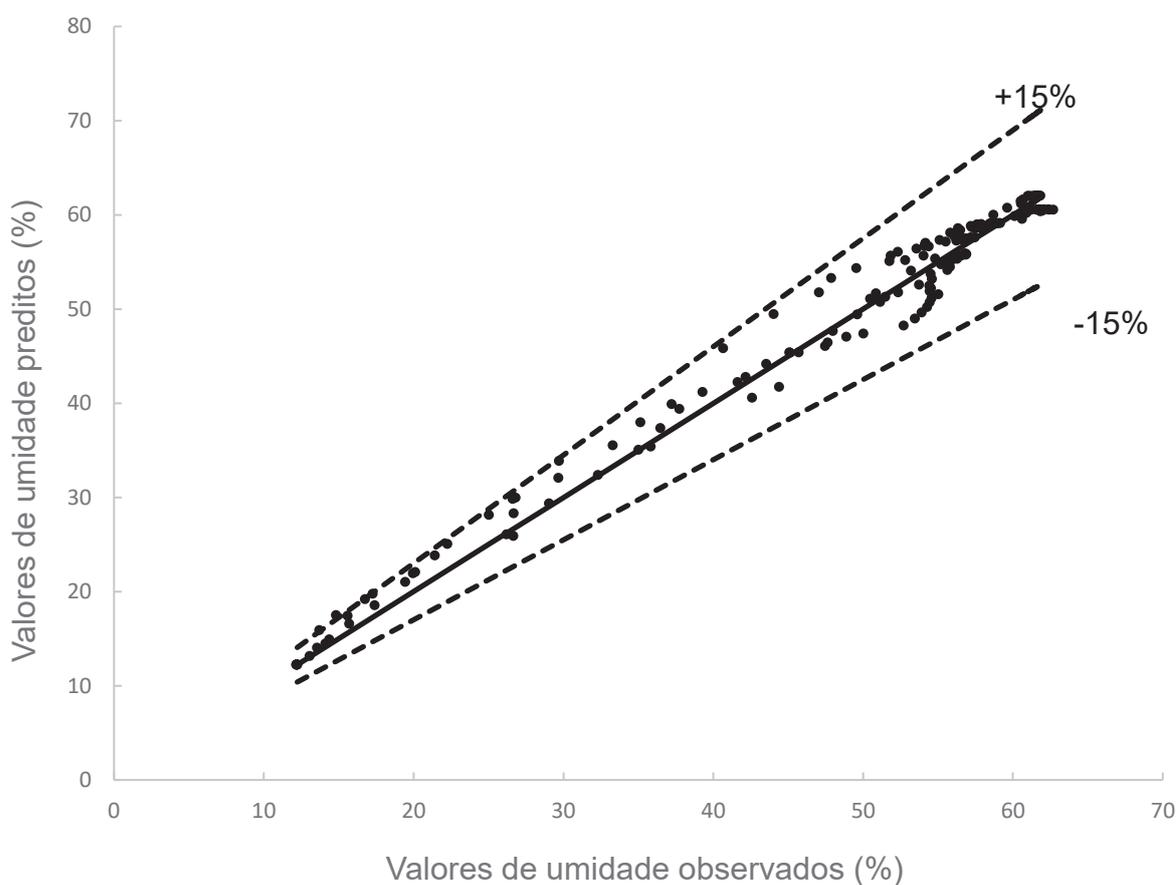
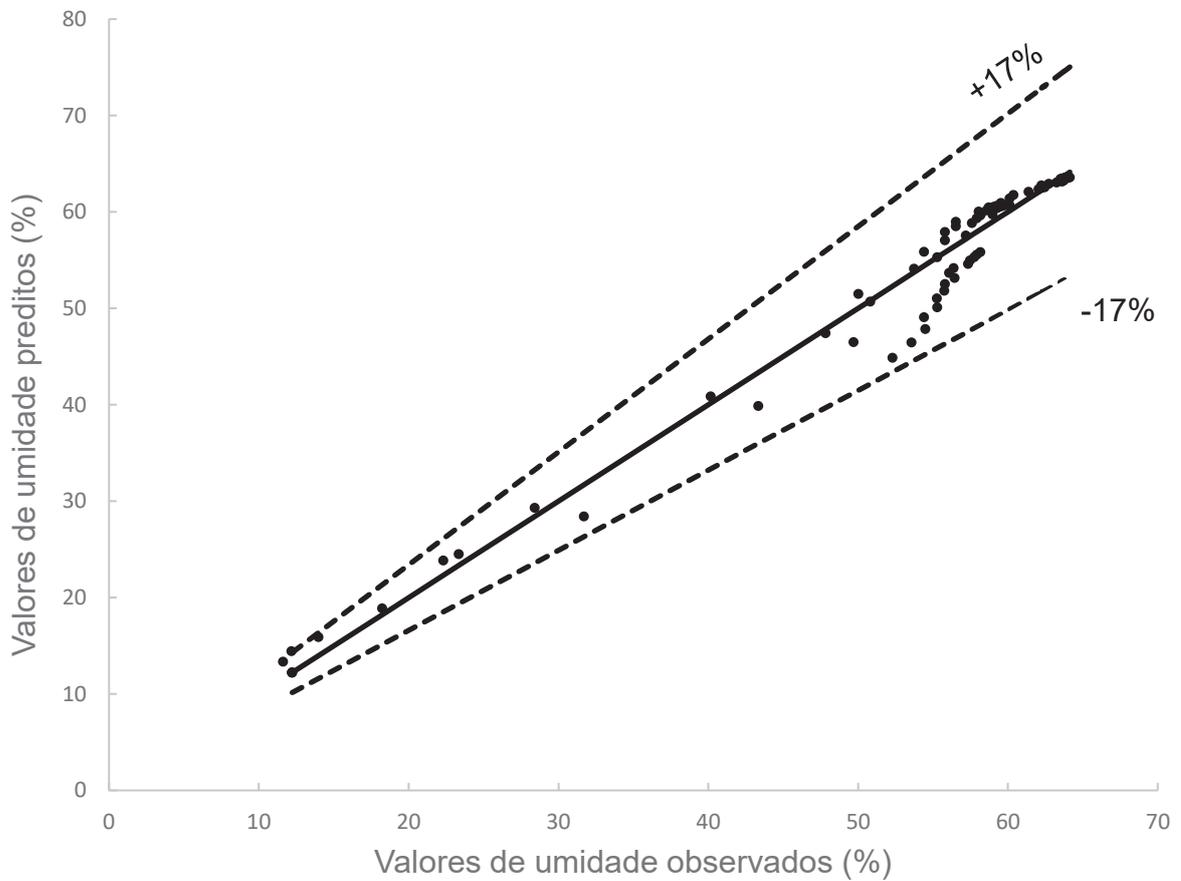


FIGURA 40- RELAÇÃO ENTRE OS VALORES DE UMIDADE OBSERVADOS EXPERIMENTALMENTE E OS PREDITOS PELO MODELO GENERALIZADO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO PARA A HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO PERIÓDICA.



Ao comparar os modos de hidratação, observa-se que para ambos os casos o modelo generalizado de Miano-Ibarz-Augusto desempenhou um ajuste satisfatório, com desvios menores que 17% em relação aos dados experimentais.

A predição do modelo foi avaliada através dos parâmetros estatísticos que ditam a qualidade do ajuste – o coeficiente de determinação (R^2), o erro médio relativo (P) e a raiz quadrada média do erro (RMSE) (TABELA 24).

TABELA 24- PARÂMETROS ESTATÍSTICOS DE QUALIDADE DO AJUSTE DO MODELO GENERALIZADO DE MIANO-IBARZ-AUGUSTO.

Modelo de Miano-Ibarz-Augusto				
Operação	Temperatura	R²	RMSE	P
Isotérmica	10	0,9767	2,3573	4,6762
	20	0,9940	1,1794	2,7194
	30	0,9544	3,1124	7,3707
	40	0,9897	1,3985	2,7808
	50	0,9900	1,4591	2,9963
	60	0,9909	1,3192	2,3112
Periódica	20	0,8764	6,0952	15,9691
	30	0,9883	1,6889	3,4955
	40	0,9968	0,8035	1,2807

Ao analisar todas as condições de hidratação para ambas as cultivares, constata-se que os valores de R² ficaram acima de 0,8764 e os valores de P e RMSE ficaram compreendidos entre 1,2807 e 15,9691 e entre 0,8035 e 6,0952 respectivamente. Observa-se que temperaturas mais baixas não proporcionaram um ajuste satisfatório ao modelo generalizado. Isso pode ser atribuído ao fato de que, nessas condições, os parâmetros ka e kb apresentaram valores muito próximos e baixos, indicando que tanto a taxa de absorção rápida/curta quanto a absorção lenta/longa foram baixas nessas temperaturas. Isso também é perceptível na temperatura de 30°C, onde o valor de ka foi 24,43% menor que o valor de kb, o que não favoreceu a taxa de absorção rápida. No entanto, o modelo generalizado de Miano-Ibarz-Augusto mostrou-se eficaz para temperaturas acima de 40°C. Portanto, o modelo semi-empírico proposto foi capaz de descrever com sucesso o processo de hidratação dos grãos de feijão carioca, levando em consideração sua morfologia, e apresentou um bom ajuste, o que é altamente desejável.

4.8 PROPIEDADES TERMODINÂMICAS

Compreender as propriedades termodinâmicas da interação entre sólido e líquido é crucial para analisar o processo de hidratação. Essas propriedades, como entalpia (ΔH), entropia (ΔS) e energia livre de Gibbs (ΔG), foram calculadas com base na energia de ativação (E_a) (TABELA 25) e oferecem informações sobre se a reação ocorre espontaneamente, a quantidade de energia necessária ou liberada durante o processo (OULAHNA et al., 2012).

E_a representa a quantidade de energia necessária para as moléculas se reorganizarem e para o processo ocorrer (KORETSKY, 2007). A E_a utilizada para determinar as propriedades termodinâmicas foi obtida a partir do modelo generalizado de Peleg, devido a sua simplicidade e seu parâmetro K_1 , ser uma função da temperatura de hidratação e estar associado a um coeficiente difusivo.

TABELA 25- PROPRIEDADES TERMODINÂMICAS REFERENTES À HIDRATAÇÃO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA.

Operação	Temperatura (°C)	E_a (kJ.mol ⁻¹)	ΔH (kJ.mol ⁻¹)	ΔS (kJ.mol ⁻¹)	ΔG (kJ.mol ⁻¹)
Isotérmica	10	40,4600	23,9457	-0,4022	111,5142
	20		24,7771	-0,3756	107,6328
	30		25,6085	-0,3758	111,3903
	40		26,4399	-0,3761	115,1506
	50		27,2713	-0,3764	118,9135
	60		28,1027	-0,3766	122,6790
Periódica	20	47,7614	23,8949	-0,4022	115,5422
	30		24,7263	-0,4025	119,5651
	40		25,5577	-0,4028	123,5880

O valor da energia de ativação obtido para a hidratação do feijão carioca em operação isotérmica (40,4600 kJ/mol) e em operação periódica (47,7614 kJ/mol) está em proximidade com os valores encontrados por Cecchin (2017) para a cultivar Esplendor (feijão preto), que foram de 39,52 kJ/mol em operação isotérmica e 44,93 kJ/mol em operação periódica. Valores semelhantes também foram relatados por Jideani e Mpotokwana (2009) para o feijão bambara, variando entre 33,02 e 39,60 kJ/mol. Além disso, Miano (2018) encontrou valores de 54,145 kJ/mol para feijões brancos. Isso mostra que a energia necessária para que o processo de hidratação ocorra pode variar consideravelmente entre diferentes variedades de feijão, bem como entre as cultivares de uma mesma variedade. Essas variações podem ser atribuídas tanto à composição química quanto à morfologia dos grãos, que são características intrínsecas de cada variedade e cultivar.

A entalpia (ΔH), a entropia (ΔS) e a energia livre de Gibbs (ΔG) fornecem informações sobre a variação de energia, o grau de desordem e a espontaneidade de uma reação, respectivamente (OULAHNA et al., 2012). Neste estudo, foram obtidos valores positivos para a entalpia e a energia livre, e valores negativos para a entropia. Padrões semelhantes foram observados em outros estudos, como os de Shafaei, Nourmohamadi-Moghadami e Kamgar (2019), com cevada; Shafaei,

Nourmohamadi-Moghadami e Kamgar (2018) e Mattioda, Jorge e Jorge (2019a), com trigo; e Miano, Sabadoti e Augusto (2018), com feijão branco.

Os valores positivos de entalpia indicam que o processo é endotérmico, ou seja, requer o fornecimento de energia para que as transformações moleculares associadas à hidratação dos grãos ocorram (SHAFAEI; NOURMOHAMADI-MOGHADAMI; KAMGAR, 2018; SHAFAEI; NOURMOHAMADI-MOGHADAMI; KAMGAR, 2019). Já os valores negativos de entropia sugerem maior organização das moléculas, indicando um sistema menos aleatório (JIDEANI; MPOTOKWANA, 2009). Por fim, os valores positivos de energia livre de Gibbs indicam que o processo de hidratação não ocorre de forma espontânea.

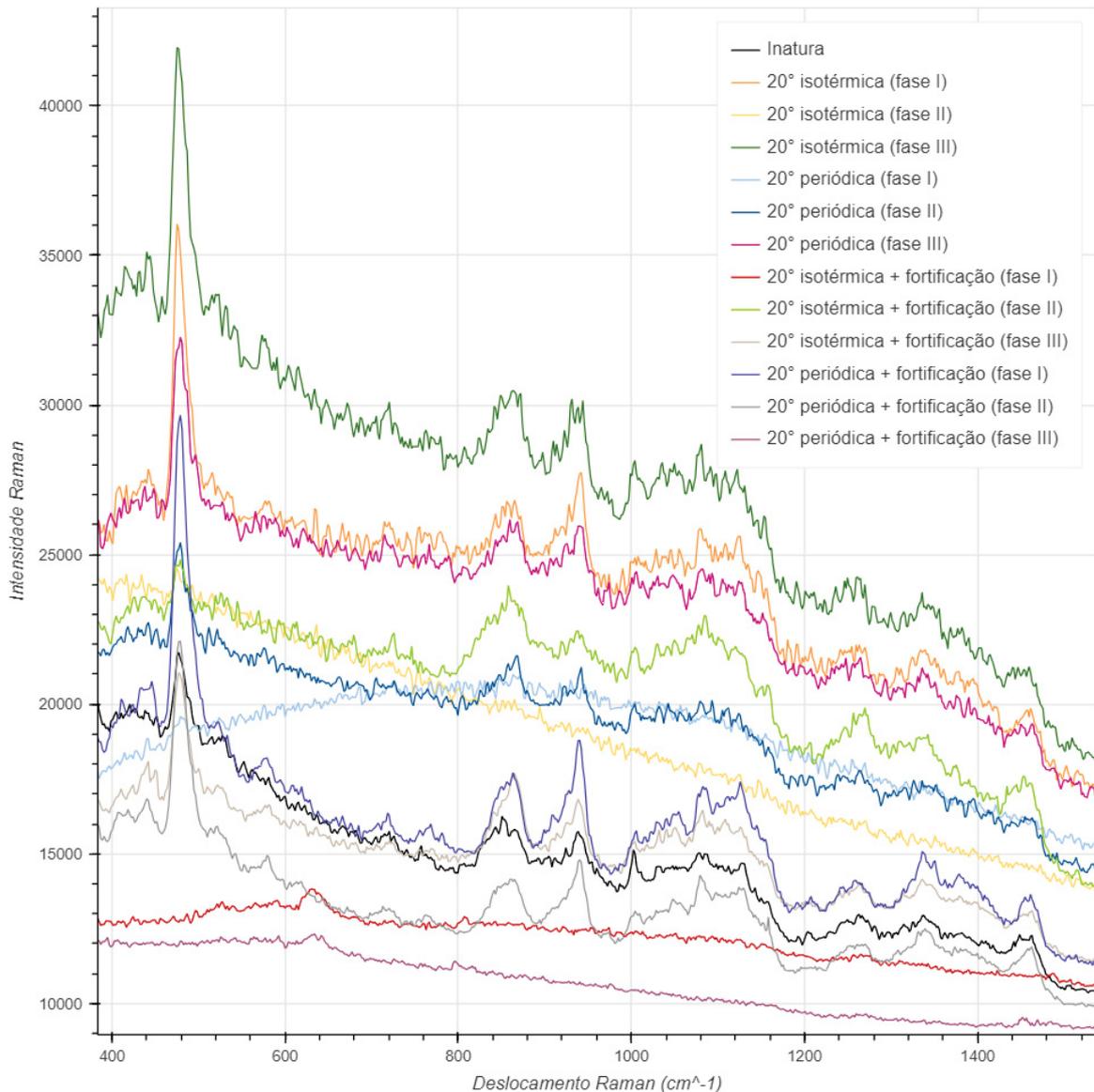
Miranda (2016) obteve valores de entalpia entre 23,12 e 23,29, valores de entropia de -0,34 e valores de energia livre de Gibbs entre 131,62 e 138,55 para a cultivar IPR Tangará (Feijão carioca), ao realizar experimentos nas temperaturas de 40 a 60°C, resultados que se assemelham aos obtidos neste estudo.

4.9 FORTIFICAÇÃO NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

4.9.1 Identificação de alterações químicas

Para determinar possíveis mudanças químicas ocorridas durante os processos de hidratação e fortificação, os grãos de feijão carioca submetidos à hidratação em condições isotérmicas e periódicas, com e sem a adição de sulfato de ferro, foram analisados utilizando Espectroscopia Raman (FIGURA 41).

FIGURA 41 - ESPECTRO RAMAN DO FEIJÃO CARIOCA IN NATURA, HIDRATADO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA, COM E SEM FORTIFICAÇÃO À 20°C.



Conforme ilustrado na (FIGURA 4), os espectros Raman obtidos para o feijão carioca nas diferentes operações apresentaram comportamento semelhante aos espectros do amido. Isso está de acordo com os estudos de Los (2019), que relatou teores de amido resistente entre 82,96% e 88,64% em feijões cariocas. Ronko (2021) também identificou teores de amido variando de 92,20% a 97,35% em sete cultivares de feijão carioca. As bandas mais intensas e características do amido foram observadas em 480 e 950 cm^{-1} , associadas às vibrações do anel de glucopiranosose no amido (KIZIL et al., 2002; KWEK et al., 2018).

No estudo realizado por Sharma (2006), foram identificados picos correspondentes a sulfatos de ferro na faixa de 976 a 1018 cm^{-1} . Neste estudo,

esses picos foram observados em todas as condições, com exceção das seguintes: 20°C isotérmica (Fase II), 20°C periódica (Fase I), 20°C isotérmica + fortificação (Fase I) e 20°C periódica + fortificação (Fase III). Nestas condições, ocorreram erros de leitura e os picos correspondentes não foram identificados nos espectros.

Os grupos químicos identificados ao longo do deslocamento Raman (cm^{-1}) para o feijão carioca *in natura* foram os mesmos observados nas amostras hidratadas e fortificadas nas condições isotérmicas e periódicas (Figura 39). Isso significa que tanto as cinéticas de hidratação quanto a fortificação não foram capazes de provocar alterações na composição química no interior dos grãos de feijão carioca. A não detecção de alterações químicas através do espectro Raman foi importante neste estudo, pois confirmou que o ferro não formou novas ligações na estrutura dos grãos.

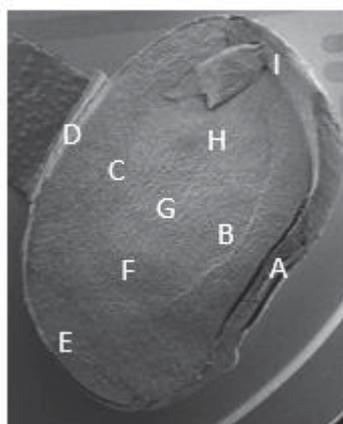
4.9.2 Comportamento de absorção de ferro no feijão na cultivar BRS FC310

Através das análises de EDS, realizadas em conjunto com a MEV, foi possível observar o comportamento da absorção de ferro no feijão carioca (Tabela 26) nas três fases da cinética de hidratação, tanto nas hidratações isotérmicas quanto nas periódicas, com e sem a adição do fortificante. Entretanto, na ausência do fortificante, o EDS não conseguiu detectar a presença de ferro nos grãos hidratados em condições isotérmicas e periódicas. Isso não implica necessariamente que o ferro não estava presente nos grãos, apenas indica que a técnica de EDS não conseguiu detectar quantidades muito pequenas desse mineral. É importante mencionar que, de acordo com Melo (2021a), a cultivar BRS FC310 contém uma quantidade de ferro de aproximadamente 0,00679 mg/100g.

Após 2 horas de hidratação (Fase I), já se observa a presença de ferro em quantidades detectáveis, com 7 pontos identificados nas condições isotérmicas e 6 pontos nas condições periódicas. Notavelmente, a distribuição de ferro nas condições segue um padrão decrescente da casca em direção ao ponto mais próximo do centro (ponto G), como ilustrado na FIGURA 22. Isso é coerente com a determinação de que a cultivar BRS FC310 exibe um perfil de migração distribuído. Além disso, isso confirma a afirmação de Miano e Augusto (2018), que mencionam que os grãos com perfis cinéticos de hidratação côncavos para baixo possuem uma casca permeável, permitindo a migração de água tanto pelo hilo quanto pela casca

dos grãos de maneira simultânea. Portanto, a intensificação gradual na coloração começa pelas bordas e avança em direção ao centro do grão. Isso é evidenciado pelo fato de que os pontos E, D e I, representando a casca, frequentemente apresentam valores mais altos de ferro do que o ponto A, que corresponde à região próxima ao hilo.

TABELA 26- NÁLISE DE Fe NO FEIJÃO CARIOCA HIDRATADO EM OPERAÇÃO ISOTÉRMICA E PERIÓDICA EM SOLUÇÃO DE SULFATO DE FERRO NA FASE I (2), FASE II (7,5H) E FASE III (12H).



Tratamento	Ferro (Wt %)									
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	
20 °C Isotérmica + Fortificação Fase I (2h)	-	0,4	0,3	0,4	0,9	0,5	0,2	-	0,4	
20 °C Isotérmica + Fortificação Fase II (7,5h)	-	2,9	1,2	1,6	0,7	3,1	-	1,3	0,1	
20 °C Isotérmica + Fortificação Fase III (12h)	-	-	1,4	1,4	1,0	1,5	1,5	2,9	2,8	
20 °C Periódica + Fortificação Fase I (2h)	1,2	0,3	0,5	-	-	2,0	1,8	1,3	-	
20 °C Periódica + Fortificação Fase II (7,5h)	-	-	0,6	1,1	-	0,5	0,7	1,3	3,2	
20 °C Periódica + Fortificação Fase III (12h)	3,4	2,1	1,3	3,8	2,2	-	0,8	1,7	3,9	

Miano e Augusto (2018) realizaram um estudo em que submergiram os grãos em uma solução de sulfato ferroso por um período de 8,5 horas, e observaram um aumento significativo, aproximadamente 15 vezes, no teor de ferro nos grãos.

Além disso, notaram que o ferro penetrou nos grãos seguindo um comportamento semelhante ao da absorção de água, sugerindo uma via de entrada semelhante à da água. Eles também realizaram um experimento em que cobriram o hilo e mediram o teor de ferro no cotilédone após um certo período do processo, o que demonstrou que o ferro pode penetrar pelo tegumento. Isso confirmou que o ferro entra principalmente pelo hilo, principalmente por capilaridade, e pelo tegumento, principalmente por difusão, assim como ocorre com a absorção de água.

Além disso, os pesquisadores observaram que o ferro ficou retido tanto no tegumento quanto no cotilédone (ambas as estruturas foram lavadas com água pelo menos três vezes antes da análise, garantindo que o ferro não estivesse apenas na superfície). Concluindo que o ferro foi retido em maior quantidade no tegumento do que no cotilédone, possivelmente devido à presença de moléculas quelantes.

É importante destacar que as quantidades de ferro incorporadas neste estudo não foram consideradas tóxicas para o consumo humano, conforme avaliado de acordo com os padrões de segurança estabelecidos por Ellenham e Barceloux (1988).

4.10 OBTENÇÃO DO MALTE E BEBIDA TIPO CHÁ

4.10.1 Germinação

Os testes de germinação foram realizados utilizando grãos que passaram pelo processo de hidratação, tanto em condições isotérmicas quanto periódicas, e incluíram também grãos fortificados, todos submetidos a uma temperatura de 20°C (menor temperatura entre ambas condições de hidratação) por um período de 12 horas. A cada fase do processo, foram retirados 100 grãos para determinar qual condição operacional favorecia a germinação dos grãos. As observações do crescimento das radículas da cultivar BRS FC310 foram registradas ao longo de três dias, com avaliações a cada intervalo de 24 horas desde o início do teste. A (TABELA 27) apresenta a porcentagem de grãos germinados a cada dia e o índice de velocidade de germinação, enquanto a (TABELA 28) exhibe imagens ilustrativas desse crescimento ao longo do período de observação.

TABELA 27- PORCENTAGEM DOS GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA GERMINADOS A CADA CONTAGEM (EG) E ÍNDICE DE VELOCIDADE DE GERMINAÇÃO (IVG)

Operação	Tratamento (°C)	EG (%)			IVG	
		Tempo (h)				
		24	48	72		
Isotérmica	20 °C	Fase I (2h)	13,3 ± 0,7	50,0 ± 1,4	82,0 ± de	4,0 ± 0,0
		Fase II (7,5h)	28,0 ± 4,0	69,5 ± 6,3	76,3 ± 5,6	4,4 ± 0,1
		Fase III (12h)	4,0 ± 0,0	45,5 ± 0,7	61,0 ± 3,5	4,0 ± 0,0
	20 °C + Fortificação	Fase I (2h)	3,5 ± 0,7	50,1 ± 5,6	77,0 ± 2,1	3,9 ± 0,0
		Fase II (7,5h)	0,0 ± 0,0	40,5 ± 4,2	51,3 ± 2,1	3,9 ± 0,0
		Fase III (12h)	5,3 ± 0,7	62,3 ± 2,8	77,0 ± 3,5	4,0 ± 0,0
Periódica	20 °C	Fase I (2h)	5,7 ± 0,7	63,3 ± 2,1	81,0 ± 3,5	4,0 ± 0,0
		Fase II (7,5h)	15,7 ± 4,1	59,0 ± 3,7	67,5 ± 3,4	4,2 ± 0,3
		Fase III (12h)	0,0 ± 0,0	20,5 ± 2,8	31,0 ± 3,5	3,8 ± 0,2
	20 °C + Fortificação	Fase I (2h)	1,0 ± 0,7	22,3 ± 1,4	71,0 ± 0,7	3,6 ± 0,1
		Fase II (7,5h)	0,0 ± 0,0	13,0 ± 3,5	22,5 ± 4,2	3,8 ± 0,0
		Fase III (12h)	0,0 ± 0,0	17,3 ± 2,1	41,0 ± 3,5	3,7 ± 0,1

Analisando as porcentagens de grãos germinados a cada dia, observa-se que a maioria dos grãos germina na Fase I (2 horas), havendo uma redução na taxa de germinação na Fase II e uma diminuição ainda menor na Fase III. De acordo com Braccini et al., (1997), a água desempenha um papel crucial no processo de germinação, uma vez que a absorção de água, por embebição, marca o início desse processo. As sementes precisam atingir um nível adequado de umidade para que ocorra a reativação dos processos metabólicos que levam à germinação. No entanto, é importante ressaltar que o excesso de água pode ter efeitos negativos na germinação, pois pode impedir a penetração do oxigênio e reduzir a atividade metabólica como resultado. Além disso, o excesso de umidade pode propiciar o desenvolvimento de fungos nos grãos, o que pode levar à diminuição da viabilidade germinativa, como observado por Yap (1981).

É possível observar que as melhores condições de germinação foram observadas nas operações isotérmica e periódica na fase I, enquanto as condições com sulfato ferroso apresentaram os resultados mais desfavoráveis. No estudo de Miano e Augusto (2018), foi observado que o processo de germinação foi prejudicado tanto pelo ultrassom quanto pela incorporação de ferro. A presença de ferro teve uma forte toxicidade para o embrião do grão, reduzindo a capacidade e a taxa (velocidade) de germinação. Além disso, a tecnologia de ultrassom também reduziu a capacidade e a taxa de germinação, mas em menor grau do que a presença de ferro.

TABELA 28- EVOLUÇÃO DA GERMINAÇÃO AO LONGO DE 72H DA CULTIVAR BRS FC310.

TRATAMENTO	24h	48h	72h
20 °C Isotérmica Fase I (2h)			
20 °C Isotérmica Fase II (7,5h)			
20 °C Isotérmica Fase III (12h)			
20 °C Isotérmica + Fortificação Fase I (2h)			
20 °C Isotérmica + Fortificação Fase II (7,5h)			
20 °C Isotérmica + Fortificação Fase III (12h)			
20 °C Periódica Fase I (2h)			
20 °C Periódica Fase II (7,5h)			
20 °C Periódica Fase III (12h)			
20 °C Periódica + Fortificação Fase I (2h)			
20 °C Periódica + Fortificação Fase II (7,5h)			
20 °C Periódica + Fortificação Fase III (12h)			

Apesar da condição periódica apresentar valores percentuais menores de germinação em comparação à condição isotérmica, ainda assim, demonstra resultados satisfatórios de até 77% para a condição isotérmica e 71% para a condição periódica. No estudo desenvolvido por Forti, Cicero e Pinto (2009), envolvendo a germinação de diferentes cultivares de feijão comum durante nove dias, sem prévia hidratação, obtiveram uma porcentagem de germinação na faixa de 71,5 a 95,5%. Carvalho (2022) por sua vez, obteve uma porcentagem de germinação de 22% a 20°C e 85% a 30°C para a cultivar BRS Guariba de feijão-caupi em hidratação isotérmica.

4.11 DETERMINAÇÃO DE COMPOSTOS BIOATIVOS

Os grãos de feijão carioca, tanto *in natura* quanto após a hidratação em condições isotérmicas (10, 20, 30, 40, 50 e 60°C) e periódicas (com temperaturas médias de 10-30°C, 20-40°C e 30-50°C, com uma amplitude de 10°C e período de 5 minutos), com ou sem adição de sulfato ferroso, bem como os grãos germinados após hidratação isotérmica e periódica a uma temperatura média de 20°C, com ou sem adição de sulfato de ferro, juntamente com o malte e a bebida tipo chá resultantes da germinação das condições isotérmicas e periódicas, com ou sem adição de fortificante, foram submetidos à análise de teor de compostos fenólicos, flavonoides, taninos condensados e capacidade antioxidante usando os métodos DPPH, ABTS e FRAP.

4.11.1 Capacidade Antioxidante pelos Métodos DPPH, ABTS e FRAP.

Através dos métodos DPPH, ABTS e FRAP foi quantificada a capacidade antioxidante da cultivar BRS FC310 *in natura* e submetidas a diferentes tipos de tratamento (TABELA 29).

TABELA 29– CAPACIDADE ANTIOXIDANTE QUANTIFICADA PELOS MÉTODOS DPPH, ABTS E FRAP REFERENTE AOS TRATAMENTOS REALIZADOS COM A CULTIVAR BRS FC310.

Tratamento (°C)	DPPH (µmol TEAC/100g)	ABTS (µmol TEAC/ 100 g)	FRAP (µmol TEAC/ 100 g)
<i>In natura</i>	258,86 ± 12.89 ^a	885,59 ± 1.09 ^b	241,70 ± 2.98 ^a
I10	198,69 ± 16.03 ^{cde}	837,80 ± 6.99 ^c	175,85 ± 11.17 ^b
I20	180,03 ± 17.68 ^{ef}	740,41 ± 4.19 ^e	155,16 ± 13.13 ^c
I30	177,72 ± 0.14 ^{gh}	725,53 ± 2.73 ^f	130,21 ± 11.34 ^{de}
I40	166,17 ± 13.67 ^h	660,66 ± 1.76 ^h	118,85 ± 9.58 ^e
I50	155,09 ± 13.3 ⁱ	473,94 ± 1.15 ^j	73,43 ± 7.87 ^{ghi}
I60	148,55 ± 12.70 ^{ij}	345,44 ± 5.10 ^o	61,73 ± 9.78 ^{hij}
P20	182,58 ± 17.09 ^f	737,03 ± 5.52 ^e	147,56 ± 11.49 ^{cd}
P30	173,13 ± 13.52 ^h	624,76 ± 3.13 ⁱ	86,35 ± 8.95 ^{fg}
P40	143,68 ± 21.05 ^j	168,69 ± 8.19 ^w	37,47 ± 0.12 ^m
IF20	203,68 ± 0.16 ^c	526,01 ± 3.80 ^k	98,90 ± 1.49 ^f
PF20	190,81 ± 25.78 ^{def}	386,92 ± 1.65 ⁿ	62,85 ± 6.89 ^{hijk}
IG20	197,72 ± 12.72 ^{cd}	613,94 ± 3.68 ^j	147,14 ± 6.12 ^{cd}
PG20	205,07 ± 16.75 ^c	693,97 ± 1.25 ^g	219,33 ± 9.85 ^a
IGF20	236,79 ± 15.70 ^b	825,62 ± 5.77 ^d	159,80 ± 10.89 ^{bc}
PGF20	259,77 ± 13.38 ^a	914,00 ± 6.90 ^a	177,12 ± 6.91 ^b
MI20	126,51 ± 2.54 ^k	200,27 ± 3.94 ^u	60,83 ± 1.87 ^{ijk}
MP20	263,39 ± 6.02 ^a	440,49 ± 6.28 ^m	78,60 ± 4.58 ^{gh}
MIF20	107,92 ± 10.74 ^m	188,90 ± 9.08 ^v	50,91 ± 0.97 ^{klm}
MPF20	106,34 ± 3.64 ^m	166,99 ± 4.32 ^w	47,55 ± 4.18 ^{klm}
CI20	181,46 ± 2.45 ^{fg}	291,16 ± 7.75 ^p	48,30 ± 3.29 ^{klm}
CP20	165,17 ± 3.70 ^h	275,74 ± 5.83 ^q	40,64 ± 4.29 ^{lm}
CIF20	114,36 ± 2.48 ^{lm}	263,03 ± 6.90 ^r	34,62 ± 2.07 ^m
CPF20	122,14 ± 5.37 ^{kl}	221,37 ± 0.78 ^t	57,07 ± 2.36 ^{ijkl}

Médias com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p0,05). “I” – Tratamento Isotérmico; “P” – Tratamento periódico; “G” – Germinação; “F” – Fortificação; “M” –Malte; “C” – Bebida tipo Chá. “TEAC” – Capacidade antioxidante equivalente ao Trolox. Os cálculos foram feitos em relação a 100 g de amostra seca.

Entre os três métodos empregados para avaliar a capacidade antioxidante das cultivar BRS FC310, o método ABTS demonstrou ser o mais eficaz, exibindo os valores mais elevados em todos os tratamentos analisados. No entanto, os três métodos exibiram perfis semelhantes em relação à variação da capacidade antioxidante conforme o tratamento aplicado.

Los (2019) encontrou em 15 amostras de feijão carioca, valores de 520 µmol TE/100g a 1321 µmol TE/100g para o método ABTS, 381 µmol TE/100g a 876 µmol TE/100g para o método DPPH e 578 µmol TE/100g a 1290 µmol TE/100g para o método FRAP.

Umeda (2017) determinou a atividade antioxidante do feijão-comum cru pelos métodos FRAP, DPPH e ABTS, obtendo valores de 325,79 μmol de trolox/100 g, 28,70%, e 74.10 μmol trolox/mg, respectivamente. Cavallaro (2019) observou que os hidrolisados proteicos do feijão carioca apresentaram valores de atividade antioxidante variando de 67,13 $\mu\text{mol TE/g}$ a 113,91 $\mu\text{mol TE/g}$ no método ABTS e de 10,41 $\mu\text{mol TE/g}$ a 28,36 $\mu\text{mol TE/g}$ no ensaio FRAP. Em outro estudo realizado por Ávila (2014) com a cultivar de feijão-caupi Novaera, a capacidade antioxidante foi equivalente a 1.613,7 $\mu\text{mol TEAC/100 g}$ pelo método ABTS. Pelo método DPPH, Barros et al., (2017) quantificou a capacidade antioxidante dos grãos *in natura* da cultivar BRS Tumucumaque em 551,5 $\mu\text{mol TEAC/100 g}$.

Foi observado que a capacidade antioxidante é reduzida ao hidratar os grãos, fato este acentuado ao utilizar temperaturas mais elevadas. Carvalho (2022) reportou no seu estudo com feijão-caupi que para a hidratação isotérmica a 30 °C, o método DPPH quantificou o decréscimo da capacidade antioxidante em 36,78%, para a cultivar BRS Guariba, e em 37,67% para a BRS Tumucumaque. Por intermédio da hidratação isotérmica a 60 °C, a capacidade antioxidante é reduzida em 96,75% pelo método DPPH, para a cultivar BRS Guariba, e em 95,51% pelo método ABTS, para a BRS Tumucumaque. Nesse estudo com o aumento da temperatura, no processo isotérmico a capacidade antioxidante é reduzida em 42,62% pelo método DPPH, 61% pelo método ABTS e 74,46% pelo método FRAP. Já para a operação periódica em comparação a 40 °C (maior temperatura) a atividade antioxidante é reduzida em 21,31% pelo método DPPH, 77,12% pelo método ABTS e 74,61% pelo método FRAP.

Em relação aos grãos germinados, apenas os grãos germinados em processo periódico com fortificação obtiverem valores maiores que os *in natura* pelo método de ABTS e DPPH, um acréscimo de 0,35% e 3,20% respectivamente. Khyade e Jagtap (2016) também obtiveram um acréscimo baixo na capacidade antioxidante aferida pelo método DPPH (8,33%) para os grãos de feijão-caupi previamente hidratados por 8-10 h e germinados em 48 h, em relação aos grãos *in natura*.

4.11.2 Compostos Fenólicos, Flavonoides e Taninos Condensados

O conteúdo de compostos fenólicos, flavonoides e taninos condensados das da cultivar BRS FC310 *in natura* e submetida a diferentes tipos de tratamento encontram-se dispostos na (TABELA 30).

TABELA 30 – CONTEÚDO DE COMPOSTOS FENÓLICOS, FLAVONOIDES E TANINOS RESULTANTES DOS TRATAMENTOS REALIZADOS COM AS CULTIVAR BRS FC310.

Tratamento (°C)	C. Fenólicos (mg GAE/100 g)	Flavonoides (mg CE/100 g)	Taninos x10 ⁻² (%LE)
<i>In natura</i>	129,71 ± 0,08 ^a	73,53 ± 6,20 ^a	60,41 ± 1,82 ^a
I10	127,76 ± 0,04 ^{ab}	63,47 ± 1,55 ^{ab}	49,38 ± 1,92 ^{ab}
I20	112,20 ± 0,06 ^{cd}	58,40 ± 7,38 ^{bc}	33,99 ± 1,88 ^{cd}
I30	108,50 ± 0,03 ^d	46,59 ± 7,05 ^{bcd}	32,91 ± 1,44 ^{cde}
I40	98,21 ± 0,04 ^e	42,37 ± 10,15 ^{bcde}	30,34 ± 1,75 ^{cdef}
I50	79,92 ± 0,06 ^g	35,55 ± 13,77 ^{cdefg}	28,70 ± 1,39 ^{cdefg}
I60	61,74 ± 0,04 ^{hi}	28,08 ± 4,65 ^{defgh}	21,69 ± 1,43 ^{efghi}
P20	90,10 ± 0,06 ^f	44,35 ± 12,92 ^{bcde}	25,38 ± 1,02 ^{defgh}
P30	94,86 ± 0,13 ^{ef}	42,69 ± 14,98 ^{cdef}	23,33 ± 1,58 ^{defghi}
P40	46,05 ± 0,03 ^k	22,63 ± 8,60 ^{fgh}	6,26 ± 0,87 ^{klm}
IF20	125,81 ± 0,02 ^b	66,72 ± 2,07 ^{ab}	15,20 ± 1,08 ^{hijkl}
PF20	132,63 ± 0,02 ^a	56,98 ± 11,88 ^{bc}	9,09 ± 0,57 ^{klm}
IG20	127,27 ± 0,06 ^{ab}	67,05 ± 6,53 ^{ab}	27,61 ± 0,95 ^{defgh}
PG20	114,56 ± 0,08 ^c	57,19 ± 6,72 ^{bc}	25,71 ± 0,62 ^{defg}
IGF20	58,60 ± 0,03 ^l	30,10 ± 3,62 ^{defgh}	18,71 ± 0,84 ^{ghij}
PGF20	52,92 ± 0,07 ^j	27,08 ± 5,17 ^{efgh}	15,91 ± 1,35 ^{hijk}
MI20	34,35 ± 0,03 ^l	12,91 ± 7,79 ^h	6,44 ± 1,70 ^{klm}
MP20	51,49 ± 0,07 ^{jk}	26,13 ± 6,82 ^{efgh}	8,87 ± 0,45 ^{klm}
MIF20	33,70 ± 0,03 ^l	13,83 ± 4,17 ^h	2,68 ± 0,52 ^m
MPF20	29,03 ± 0,02 ^l	10,24 ± 4,99 ^h	4,39 ± 0,8 ^{lm}
CI20	66,56 ± 0,08 ^h	25,54 ± 3,25 ^{efgh}	52,96 ± 1,98 ^a
CP20	64,22 ± 0,01 ^{hi}	24,17 ± 4,74 ^{fgh}	34,43 ± 1,78 ^{bc}
CIF20	48,12 ± 0,03 ^{jk}	18,13 ± 10,79 ^{gh}	12,24 ± 1,25 ^{ijklm}
CPF20	52,66 ± 0,02 ^j	19,28 ± 2,63 ^{fgh}	19,17 ± 0,52 ^{fghij}

Médias com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes pelo teste de Tukey (p0,05). “I” – Tratamento Isotérmico; “P” – Tratamento periódico; “G” – Germinação; “F” – Fortificação; “M” – Malte; “C” – Bebida tipo Chá. “GAE” – Equivalente ao ácido gálico; “CE” – Equivalente à catequina; “LE” – Equivalente à leucocianidina. Os cálculos foram feitos em relação a 100 g de amostra seca.

Os resultados obtidos a partir dos tratamentos realizados com a cultivar BRS FC310 revelam variações significativas no conteúdo de compostos fenólicos, flavonoides e taninos. Ao analisar o efeito da temperatura, observa-se uma tendência consistente de redução nos compostos fenólicos com o aumento da temperatura, indicando a sensibilidade desses compostos ao calor. Esse comportamento é frequentemente explicado pela lixiviação desses compostos na água de maceração (MECHA et al., 2019; RANILLA; GENOVESE; LAJOLO, 2009; SINGH et al., 2017; YADAV et al., 2018) e pelo processamento térmico, que pode

levar à destruição dos compostos bioativos, resultando na redução dos mesmos, e/ou à formação de novos compostos com atividade pró-oxidante (ABREU et al., 2019).

O teor de compostos fenólicos e flavonoides da cultivar BRS FC310 *in natura* encontra-se dentro da faixa de valores obtida por Los (2019) que encontrou valores de compostos fenólicos totais variando de 56 a 120 mg GAE/100g para 15 amostras de Feijão carioca (*in natura*), e valores de 44 a 98 mg CE/100g para Flavonoides.

Akillioglu e Karakaya (2010) relataram resultados de 374 mg GAE/100g para compostos fenólicos totais e 127 mg CE/100g para flavonoides em feijão cru. Mojica et al., (2015) apresentaram resultados para compostos fenólicos entre 1.150 e 1.350 mg GAE/100g presente nas cascas de algumas variedades de feijões cariocas.

Nos grãos de leguminosas, a presença de taninos torna a proteína indisponível e reduz a facilidade de digestão (ABBAS; AHMAD, 2018). Em um estudo realizado por Çalışkantürk Karataş et al., (2017), foi observado um teor consideravelmente maior de tanino condensado na farinha de casca de feijão, atingindo 47,7 mg equivalentes de catequina (CE)/g, em comparação com os 1,9 mg CE/g encontrados na farinha de feijão integral.

Outro estudo conduzido por Sharma et al., (2006) em feijões crus revelou que o nível de tanino, inicialmente em 2,8 mg/g, diminuiu para 1,9 mg/g após o cozimento. Os taninos são sensíveis ao calor e podem ser eliminados por meio de tratamento em alta temperatura, como indicado pelos resultados deste estudo.

Ao analisar a (TABELA 30) o fator de maior destaque foi a diminuição significativa de taninos nos maltes, o malte hidratado isotermicamente e fortificado apresentou uma redução de 95,56% enquanto o malte hidratado periodicamente e fortificado apresentou 92,73% de redução, essa redução pode estar associada pela germinação, seguida de secagem e processamento. Alguns autores mencionam o aumento no teor de taninos resultante da germinação (ABBAS; MUSHARAF, 2008; LEE; LEE; LEE, 2004; OLOYO, 2004;), enquanto outros relatam a diminuição (JAMES et al., 2020; KHANDELWAL; UDIPI; GHUGRE, 2010), indicando que ainda não existe uma relação definitivamente estabelecida entre a germinação e seu impacto no conteúdo de taninos, nesse estudo todos os tratamentos com germinação diminuíram o percentual de taninos.

Até o momento, não foram identificadas literaturas que abordem resultados relativos aos compostos bioativos presentes em maltes e em bebidas do tipo chá de

feijão carioca. A ausência desses dados destaca a relevância desta pesquisa para futuros estudos na área de alimentos funcionais.

5 CONCLUSÃO

Com base nos estudos apresentados, observou-se que o aumento da temperatura da água de hidratação exerceu um efeito acelerador sobre a velocidade de hidratação dos grãos de feijão carioca. A cinética de hidratação desses grãos exibiu um perfil caracterizado por uma curva côncava para baixo, independentemente das condições experimentais. Esse comportamento permitiu a subdivisão do processo de hidratação em três fases distintas: a Fase I, caracterizada por uma taxa acelerada de hidratação; a Fase II, marcada pelo declínio na taxa de hidratação; e a Fase III, correspondente a uma condição de estabilidade ou equilíbrio da hidratação.

O ensaio realizado com o traçador azul-de-metileno corroborou com esta hipótese, visto que não foi identificado um comportamento migratório preferencial – os grãos foram adquirindo, ao longo do tempo, coloração com intensidade variada no sentido das bordas para o centro, até atingir uma coloração praticamente homogênea ao final do experimento. Assumiu-se, portanto, que o regime de hidratação dos grãos comporta-se como um sistema de parâmetros distribuídos. Além disso, a influência da temperatura foi evidente nas curvas cinéticas experimentais de hidratação. O aumento da temperatura resultou em uma maior contribuição da Fase I para o ganho total de umidade, indicando uma intensificação na velocidade de hidratação. Da mesma forma, a operação periódica demonstrou ser uma condição intensificadora do processo.

A análise dos grãos hidratados por microscopia eletrônica de varredura (MEV) em condições de maior estresse térmico (60 °C) revelou a gradual formação de estruturas granuladas na região do cotilédone, possivelmente relacionadas aos grânulos de amido que se desprendem das proteínas durante o tratamento hidrotérmico. Além disso, a técnica de Calorimetria Exploratória Diferencial (DSC) permitiu caracterizar o evento endotérmico de gelatinização do amido nas cultivares de feijão carioca, que teve início acima de 58 °C, com pico em torno de 69 °C, em média.

Os modelos matemáticos utilizados para ajustar as curvas cinéticas de hidratação (modelo de Peleg, Page, Miano-Ibarz-Augusto, Difusão, Omoto-Jorge e Nicolin-Jorge) apresentaram um bom ajuste aos dados experimentais, com valores de R^2 satisfatórios. Entre esses modelos, o modelo de Miano-Ibarz-Augusto se

destacou por sua simplicidade e qualidade de ajuste, sendo generalizado para possibilitar a previsão da umidade em qualquer momento durante o processo de hidratação, tanto em operação isotérmica quanto periódica, dentro da faixa de temperaturas investigadas. As predições desse modelo apresentaram desvios inferiores a 16% em relação aos valores observados experimentalmente

A aplicação da equação de Arrhenius permitiu a obtenção das propriedades termodinâmicas dos processos de hidratação avaliados, revelando que esses processos são classificados como não espontâneos e endotérmicos.

Em relação à germinação dos grãos, a condição de hidratação a 20 °C, em operação isotérmica foi a que mais favoreceu a germinação, resultando em uma porcentagem de germinação de 82,0%. Os grãos germinados sob as condições de 20 °C, tanto isotermicamente quanto periodicamente, com a adição de fortificante, apresentaram taxas de germinação de 77% e 71%, respectivamente, na Fase I.

Os grãos submetidos à hidratação, seja pelo método isotérmico ou periódico, apresentaram uma diminuição no teor de fenólicos, flavonoides e taninos condensados, resultando em uma redução correspondente na capacidade antioxidante. Essa tendência também foi observada nos grãos submetidos aos tratamentos com fortificante, bem como nos produtos finais, como malte e bebida tipo chá. É importante destacar que a redução desses compostos bioativos foi mais acentuada quando os grãos foram submetidos a temperaturas de hidratação mais elevadas. Esse fenômeno sugere que o tratamento hidrotérmico causa alterações físico-químicas nos grãos, levando à transformação ou degradação desses compostos, além de sua lixiviação para a água de hidratação.

Por outro lado, os grãos germinados apresentaram teores mais elevados de fenólicos e flavonoides em comparação com os grãos hidratados, especialmente quando consideramos as condições de hidratação em temperaturas mais altas. Isso destaca a vantagem de consumir os grãos após a germinação, uma vez que essa etapa do processo preserva ou até mesmo aumenta a concentração desses compostos bioativos. Embora o malte e a bebida tipo chá tenha exibido resultados ligeiramente inferiores aos grãos germinados, eles ainda representam alternativas promissoras do ponto de vista nutricional.

É importante notar que a aplicação da operação periódica não resultou em alterações substanciais na capacidade antioxidante dos grãos quando comparada à operação isotérmica. Mesmo que a operação periódica envolva um fluxo de água

que possa intensificar a lixiviação dos compostos antioxidantes, os decréscimos observados foram menores do que 21,31%. Assim, a atividade antioxidante resultante ainda é significativa e não representa um impacto negativo do ponto de vista nutricional.

Portanto, a utilização da operação periódica, nas condições investigadas, é altamente recomendada, uma vez que permite a intensificação da cinética de hidratação, resultando na redução do consumo de água no processamento e na diminuição dos gastos energéticos.

5.1 PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

- Investigar a cinética de hidratação em diferentes faixas de temperaturas.
- Avaliar o potencial germinativo por meio da germinação em diversas faixas de temperatura.
- Estudar a liberação de ferro durante a hidratação, tanto isotérmica quanto periódica.
- Analisar a difusividade do ferro no feijão carioca.
- Explorar a fortificação com minerais adicionais, como zinco ou cálcio.
- Realizar análises físico-químicas no malte e bebida do tipo chá.
- Desenvolvimento de outros produtos à base de feijão carioca, como “snacks” e bebidas fermentadas.

REFERÊNCIAS

ABU-GHANNAM, N.; MCKENNA, B. Hydration Kinetics of Red Kidney Beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Food Science**, v. 62, n. 3, p. 520–523, 1997.

ABU-GHANNAM, N.; MCKENNA, B. The application of Peleg's equation to model water absorption during the soaking of red kidney beans (*Phaseolus vulgaris* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 32, n. 4, p. 391–401, 1997.

AGATI, G.; AZZARELLO, E.; POLLASTRI, S.; TATTINI, M. Flavonoids as antioxidants in plants: Location and functional significance. **Plant Science**, v. 196, p. 67–76, 2012.

ALMEIDA, L. D. DE; LEITÃO FILHO, H. F.; MIYASAKA, S. Características do feijão Carioca, um novo cultivar. **Bragantia**, v. 30, n. 1, p. XXXI–XXXVIII, 1971.

ALMEIDA, M. R.; ALVES, R. S.; NASCIMBEM, L. B. L. R.; et al. Determination of amylose content in starch using Raman spectroscopy and multivariate calibration analysis. **Analytical and Bioanalytical Chemistry**, v. 397, n. 7, p. 2693–2701, 2010.

ALVARES, C. R. DE S. **QUALIDADE DE GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA COMERCIALIZADO NO MUNICÍPIO DE VÁRZEA GRANDE-MT**, 2020. VÁRZEA GRANDE: Centro Universitário de Várzea Grande -Univag.

AMBIGAIPALAN, P.; HOOVER, R.; DONNER, E.; et al. Structure of faba bean, black bean and pinto bean starches at different levels of granule organization and their physicochemical properties. **Food Research International**, v. 44, n. 9, p. 2962–2974, 2011a.

AMBIGAIPALAN, P.; HOOVER, R.; DONNER, E.; et al. Structure of faba bean, black bean and pinto bean starches at different levels of granule organization and their physicochemical properties. **Food Research International**, v. 44, n. 9, p. 2962–2974, 2011b.

ANDRABI, S. N.; WANI, I. A.; GANI, A.; HAMDANI, A. M.; MASOODI, F. A. Comparative study of physico-chemical and functional properties of starch extracted from two kidney bean (*Phaseolus vulgaris* L.) and green gram cultivars (*Vigna radiata* L.) grown in India. **Starch - Stärke**, v. 68, n. 5–6, p. 416–426, 2016.

AVÉROUS, L.; HALLEY, P. J. Starch Polymers. **Starch Polymers**. p.3–10, 2014a. Elsevier.

AVÉROUS, L.; HALLEY, P. J. Starch Polymers. **Starch Polymers**. p.3–10, 2014b. Elsevier.

BELLO, M. O.; TOLABA, M. P.; SUÁREZ, C. Hydration Kinetics of Rice Kernels under Vacuum and Pressure. **International Journal of Food Engineering**, v. 4, n. 4, 2008.

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

BILIADERIS, C. G. The structure and interactions of starch with food constituents. **Canadian Journal of Physiology and Pharmacology**, v. 69, n. 1, p. 60–78, 1991.

BORGES, C. W. C.; JORGE, L. M. DE 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, p. e12579, 2017.

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

BOYE, J.; ZARE, F.; PLETCH, A. Pulse proteins: Processing, characterization, functional properties and applications in food and feed. **Food Research International**, v. 43, n. 2, p. 414–431, 2010.

CARBONELL, S. A. M.; CHIORATO, A. F.; BOLONHEZI, D.; et al. “IAC Milênio” - Common bean cultivar with high grain quality. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v. 14, n. 4, p. 273–276, 2014.

CASTANHA, N.; MIANO, A. C.; SABADOTI, V. D.; AUGUSTO, P. E. D. Irradiation of mung beans (*Vigna radiata*): A prospective study correlating the properties of starch and grains. **International Journal of Biological Macromolecules**, v. 129, p. 460–470, 2019.

CECCHIN, G. **AVALIAÇÃO COMPARATIVA E MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL E PERIÓDICA DE DIFERENTES CULTIVARES DE FEIJÃO**, 2016. Dissertação, CURITIBA: Universidade Federal do Paraná.

CEVALLOS-CASALS, B. A.; CISNEROS-ZEVALLOS, L. Impact of germination on phenolic content and antioxidant activity of 13 edible seed species. **Food Chemistry**, v. 119, n. 4, p. 1485–1490, 2010.

CHACÓN ALVAREZ, D.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. The impact of periodic operation on barley hydration. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 2, 2020.

CHANG, K. C.; HARROLD, R. L. Changes in Selected Biochemical Components, In Vitro Protein Digestibility and Amino Acids in Two Bean Cultivars During Germination. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 3, p. 783–787, 1988.

CHEN, Z.; YU, L.; WANG, X.; GU, Z.; BETA, T. Changes of phenolic profiles and antioxidant activity in canaryseed (*Phalaris canariensis* L.) during germination. **Food Chemistry**, v. 194, p. 608–618, 2016.

CHIBBAR, R. N.; AMBIGAIPALAN, P.; HOOVER, R. REVIEW: Molecular Diversity in Pulse Seed Starch and Complex Carbohydrates and Its Role in Human Nutrition and Health. **Cereal Chemistry**, v. 87, n. 4, p. 342–352, 2010.

Conab - Safras. Disponível em: <<https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/>>. Acesso em: 16/8/2022.

COSTA, J. G. C. DA. Morfologia - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/morfologia>>. Acesso em: 9/8/2022.

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

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

DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. DE M. The air temperature modulation impact on the drying of soybeans in a fixed bed. **Drying Technology**, v. 34, n. 5, p. 516–529, 2016.

DEFENDI, R. O.; PARAÍSO, P. R.; JORGE, L. M. DE M. Optimization study of soybean intermittent drying in fixed-bed drying technology. **Drying Technology**, v. 35, n. 1, p. 125–137, 2017.

DEMIATE, I. M.; FIGUEROA, A. M.; ZORTÉA GUIDOLIN, M. E. B.; et al. Physicochemical characterization of starches from dry beans cultivated in Brazil. **Food Hydrocolloids**, v. 61, p. 812–820, 2016.

DERYCKE, V.; VANDEPUTTE, G. E.; VERMEYLEN, R.; et al. Starch gelatinization and amylose–lipid interactions during rice parboiling investigated by temperature resolved wide angle X-ray scattering and differential scanning calorimetry. **Journal of Cereal Science**, v. 42, n. 3, p. 334–343, 2005.

DU, S.; JIANG, H.; YU, X.; JANE, J. Physicochemical and functional properties of whole legume flour. **LWT - Food Science and Technology**, v. 55, n. 1, p. 308–313, 2014.

DUPUY, N. Recognition of starches by Raman spectroscopy. **Carbohydrate Polymers**, v. 49, n. 1, p. 83–90, 2002.

DZAZIO, A. A. L.; SCUDLAREK, G. H. U.; SOWEK, A. B. Caracterização de compósitos de polipropileno com casca de soja / Characterization of polypropylene composites with soybean hull. **Brazilian Journal of Development**, v. 8, n. 4, p. 31890–31903, 2022.

DZIKI, D.; GAWLIK-DZIKI, U. Processing of germinated grains. **Sprouted Grains**. p.69–90, 2019. Elsevier.

FAOSTAT. .Disponível em: <<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>>. Acesso em: 8/5/2022.

FERNÁNDEZ, M. E. A.; STAMFORD, T. C. M.; VIANA, R. D.; et al. EFEITOS DA GERMINAÇÃO EM LEGUMINOSAS E CEREAIS: PROPRIEDADES NUTRICIONAIS E TECNOLÓGICAS. **Avanços em Ciência e Tecnologia de Alimentos - Volume 3**. p.351–366, 2021. Editora Científica Digital.

FERRAZ, M. B. M. **Determinação de cinética de hidratação de ervilhas pisumsativum desidratadas**, 2008. (Mestrado em Engenharia de Alimentos), Campinas, SP: Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP.

FIGUEIRINHA, A.; PARANHOS, A.; PÉREZ-ALONSO, J. J.; SANTOS-BUELGA, C.; BATISTA, M. T. Cymbopogon citratus leaves: Characterization of flavonoids by HPLC–PDA–ESI/MS/MS and an approach to their potential as a source of bioactive polyphenols. **Food Chemistry**, v. 110, n. 3, p. 718–728, 2008.

FoodData Central. .Disponível em: <<https://fdc.nal.usda.gov/fdc-app.html#/food-details/747436/nutrients>>. Acesso em: 10/8/2022.

FORTI, V. A.; CICERO, S. M.; PINTO, T. L. F. Efeitos de potenciais hídricos do substrato e teores de água das sementes na germinação de feijão. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 2, p. 63–70, 2009.

FOTAKIS, C.; TSIGRIMANI, D.; TSIACA, T.; et al. Metabolic and antioxidant profiles of herbal infusions and decoctions. **Food Chemistry**, v. 211, p. 963–971, 2016.

FRACASSO, A. F. **Cinética de hidratação de soja: estudo comparativo entre soja transgênica e convencional**, 2011. Dissertação (Engenharia de Alimentos), Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

GAN, R.-Y.; LUI, W.-Y.; WU, K.; et al. Bioactive compounds and bioactivities of germinated edible seeds and sprouts: An updated review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 59, p. 1–14, 2017.

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, 2014.

GOWEN, A.; ABU-GHANNAM, N.; FRIAS, J.; OLIVEIRA, J. Modelling the water absorption process in chickpeas (*Cicer arietinum* L.)—The effect of blanching pre-treatment on water intake and texture kinetics. **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 810–819, 2007.

HAYTA, M.; İŞÇIMEN, E. M. Optimization of ultrasound-assisted antioxidant compounds extraction from germinated chickpea using response surface methodology. **LWT**, v. 77, p. 208–216, 2017.

HOOVER, R. ACID-TREATED STARCHES. **Food Reviews International**, v. 16, n. 3, p. 369–392, 2000.

HOOVER, R.; HUGHES, T.; CHUNG, H. J.; LIU, Q. Composition, molecular structure, properties, and modification of pulse starches: A review. **Food Research International**, v. 43, n. 2, p. 399–413, 2010.

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

HUNG, T. V.; LIU, L. H.; BLACK, R. G.; TREWHELLA, M. A. Water Absorption in Chickpea (*C. arietinum*) and Field Pea (*P. sativum*) Cultivars using the Peleg Model. **Journal of Food Science**, v. 58, n. 4, p. 848–852, 1993.

IZIDORO, D. R.; SIERAKOWSKI, M.-R.; HAMINIUK, C. W. I.; DE SOUZA, C. F.; SCHEER, A. DE P. Physical and chemical properties of ultrasonically, spray-dried

green banana (*Musa cavendish*) starch. **Journal of Food Engineering**, v. 104, n. 4, p. 639–648, 2011.

JUNIOR, S. E. M. D.; MARCO AURÉLIO CARDOSO LONGUINHOS; THIAGO ALVES XAVIER; et al. QUANTIFICAÇÃO DE FERRO EM ESPÉCIES E VARIEDADES DE FEIJÃO CULTIVADAS NO MUNICÍPIO DE MONTES CLAROS – MG. **Fórum: ensino, pesquisa, extensão, gestão - FEBEC.**, 2014.

KAUR, N.; SINGH, D. P. RETRACTED: Deciphering the consumer behaviour facets of functional foods: A literature review. **Appetite**, v. 112, p. 167–187, 2017.

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

KON, S. EFFECT OF SOAKING TEMPERATURE ON COOKING AND NUTRITIONAL QUALITY OF BEANS. **Journal of Food Science**, v. 44, n. 5, p. 1329–1335, 1979.

DI LANARO, N.; BAJAY, L. G.; QUEIROZ, V. M. P. DE; et al. DETERMINAÇÃO DE PROPRIEDADES FÍSICAS DO FEIJÃO FRADINHO. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**. 1º ed, v. 13, p.27–35, 2011. Campina Grande.

LIMA, D. C.; ABREU, Â. DE F. B.; FERREIRA, R. A. D. C.; RAMALHO, M. A. P. Breeding common bean populations for traits using selection index. **Scientia Agricola**, v. 72, n. 2, p. 132–137, 2015.

LOS, F. G. B. **ESTUDO DO AMIDO, PROTEÍNA E COMPOSTOS FENÓLICOS DO FEIJÃO CARIOCA**, 2019. Tese, Ponta Grossa: Universidade Estadual de Ponta Grossa.

LUCAS CASTANHO. Paraná é o maior produtor de Feijão do Brasil. .

MA, M.; WANG, Y.; WANG, M.; JANE, J.; DU, S. Physicochemical properties and in vitro digestibility of legume starches. **Food Hydrocolloids**, v. 63, p. 249–255, 2017.

MAGALHÃES, B. E. A. DE; SANTOS, W. N. L. DOS. CAPACIDADE ANTIOXIDANTE E CONTEÚDO FENÓLICO DE INFUSÕES E DECOCCÕES DE ERVAS MEDICINAIS. . p.234–347, 2021.

MAMILLA, R. K.; MISHRA, V. K. Effect of germination on antioxidant and ACE inhibitory activities of legumes. **LWT**, v. 75, p. 51–58, 2017.

MARQUEZI, M. **Características físico-químicas e avaliação das propriedades tecnológicas do feijão comum (*Phaseolus vulgaris* L.)**, 2013. Dissertação (mestrado), Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina.

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

MASON, W. R. Starch Use in Foods. **Starch**. p.745–795, 2009. Elsevier.

MATTIODA, F. **INTENSIFICAÇÃO DO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO E FORTIFICAÇÃO DO TRIGO MEDIANTE OPERAÇÃO PERIÓDICA**, 2018. Tese, Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

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

MELO, L. C.; HELTON SANTOS PEREIRA; MARIA JOSÉ DEL PELOSO; et al. Carioca - Portal Embrapa. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/feijao/pre-producao/cultivares/carioca>>. Acesso em: 9/8/2022.

MELO, L. C.; HELTON SANTOS PEREIRA; THIAGO LÍVIO PESSOA OLIVEIRA DE SOUZA; et al. BRS FC310 cultivar de feijoeiro-comum carioca, semiprecoce e com ampla resistência às doenças. Disponível em: <<https://ainfo.cnptia.embrapa.br/digital/bitstream/item/228575/1/ct257-2021.pdf>>. Acesso em: 9/8/2022.

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, n. 2, p. 352–370, 2018.

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

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, 2017.

MIANO, A. C.; SALDAÑA, E.; CAMPESTRINI, L. H.; CHIORATO, A. F.; AUGUSTO, P. E. D. Correlating the properties of different carioca bean cultivars (

Phaseolus vulgaris) with their hydration kinetics. **Food Research International**, v. 107, p. 182–194, 2018.

MONTANUCI, F. D.; PERUSSELLO, C. A.; DE MATOS JORGE, L. 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.

MORAIS, S. M. DE; CAVALCANTI, E. S. B.; COSTA, S. M. O.; AGUIAR, L. A. Ação antioxidante de chás e condimentos de grande consumo no Brasil. **Revista Brasileira de Farmacognosia**, v. 19, n. 1b, p. 315–320, 2009.

MOTHÉ, C. G.; DAMICO, A.; MACHADO, M. DA G. S. Estudo termoanalítico, CLAE e fracionamento físico e químico do subproduto industrial do milho. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, n. 1, p. 1–7, 2005.

NALEPA, K. C.; MARY, S.; FERREIRA, R. **Avaliação da qualidade do feijão preto**. 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, n. 3, p. 765–774, 2013.

NAYAK, B.; LIU, R. H.; TANG, J. Effect of Processing on Phenolic Antioxidants of Fruits, Vegetables, and Grains—A Review. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 55, n. 7, p. 887–918, 2015.

NELSON, K.; STOJANOVSKA, L.; VASILJEVIC, T.; MATHAI, M. Germinated grains: a superior whole grain functional food? **Canadian Journal of Physiology and Pharmacology**, v. 91, n. 6, p. 429–441, 2013.

NICOLIN, D. J.; MARQUES, B. C.; BALBINOTI, T. C. V.; JORGE, R. M. M.; JORGE, L. M. DE M. Modeling rice and corn hydration kinetic by Nicolin-Jorge model. **Journal of Food Process Engineering**, v. 40, n. 6, p. e12588, 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.

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, 2019.

OLADELE, S. O.; OSUNDAHUNSI, O. F.; AGBETOYE, L. A. S.; AUGUSTO, P. E. D. Hydration kinetics of Carioca beans at different pHs. **Journal of Food Process Engineering**, v. 41, n. 8, 2018. Blackwell Publishing Inc.

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

OLIVEIRA, L. C.; MATOS JORGE, L. M.; JORGE, R. M. M. <sc>Intensification of the triticale</sc> (*× triticosecale* Wittmac) <sc>hydration process using periodic operation</sc>. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 7, 2020.

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

OVANDO-MARTÍNEZ, M.; BELLO-PÉREZ, L. A.; WHITNEY, K.; OSORIO-DÍAZ, P.; SIMSEK, S. Starch characteristics of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in different localities. **Carbohydrate Polymers**, v. 85, n. 1, p. 54–64, 2011.

PANDA, B. K.; SHRIVASTAVA, S. L. Microwave assisted rapid hydration in starch matrix of paddy (*Oryza sativa* L.): Process development, characterization, and comparison with conventional practice. **Food Hydrocolloids**, v. 92, p. 240–249, 2019.

PASCHOALINO, P. A. A. T.; MICHELLON, E.; BERNARDELLI, L. V.; GOBI, J. R.; SANTOS, L. G. DE O. Análise espacial da produtividade do feijão nos municípios paranaenses nos anos 2006, 2010 e 2014. **Economia & Região**, v. 5, n. 1, p. 107, 2017.

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

PELEG, M. An Empirical Model for the Description of Moisture Sorption Curves. **Journal of Food Science**, v. 53, n. 4, p. 1216–1217, 1988.

PICCINI, A. R.; MORESCO, C.; MUNHOS, L. Malteação: Características Gerais. Disponível em: <<https://www.ufrgs.br/alimentus1/feira/prcerea/ceveja/maltea.htm>>. Acesso em: 16/8/2022.

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, p. e13376, 2018.

PROLLA, I. R. D.; BARBOSA, R. G.; VEECK, A. P. L.; et al. Cultivar, harvest year, and storage conditions affecting nutritional quality of common beans (*Phaseolus vulgaris* L. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 30, p. 96–102, 2010.

QUAST, D. G.; SIL, S. D. TEMPERATURE DEPENDENCE OF HYDRATION RATE AND EFFECT OF HYDRATION ON THE COOKING RATE OF DRY LEGUMES. **Journal of Food Science**, v. 42, n. 5, p. 1299–1303, 1977.

Raman spectrum of Starch | PublicSpectra. Disponível em: <<https://publicspectra.com/Raman/Starch>>. Acesso em: 13/9/2023.

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, 2005.

RAMÍREZ-CÁRDENASI, L.; LEONEL, A. J.; COSTA, N. M. B. Efeito do processamento doméstico sobre o teor de nutrientes e de fatores antinutricionais de diferentes cultivares de feijão comum. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 1, p. 200–213, 2008a.

RAMÍREZ-CÁRDENASI, L.; LEONEL, A. J.; COSTA, N. M. B. Efeito do processamento doméstico sobre o teor de nutrientes e de fatores antinutricionais de diferentes cultivares de feijão comum. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 28, n. 1, p. 200–213, 2008b.

RASERA, G. B.; DE CASTRO, R. J. S. Germinação de grãos: uma revisão sistemática de como os processos bioquímicos envolvidos afetam o conteúdo e o perfil de compostos fenólicos e suas propriedades antioxidantes. **Brazilian Journal of Natural Sciences**, v. 3, n. 1, p. 287, 2020.

RAWAL VIKAS; KALAMVREZOS NAVARRO DORIAN. The Global Economy of Pulses. , 2019. Acesso em: 17/4/2022.

RONKO, L. Z.; CHEZINI, A.; LOS, F. G. B.; DEMIATE, I. M. Caracterização físico-química de feijão carioca (*Phaseolus vulgaris* L.) e das propriedades tecnológicas de sua fração amido. **Revista Brasileira de Tecnologia Agroindustrial**, v. 15, n. 1, 2021.

RUPOLLO, G. **EFEITOS DAS CONDIÇÕES E DO TEMPO DE ARMAZENAMENTO NA QUALIDADE DE GRÃOS DE FEIJÃO CARIOCA**, 2011. PELOTAS: UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS .

SALEH, H. M.; HASSAN, A. A.; MANSOUR, E. H.; FAHMY, H. A.; EL-BEDAWAY, A. E.-F. A. Melatonin, phenolics content and antioxidant activity of germinated selected legumes and their fractions. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences**, v. 18, n. 3, p. 294–301, 2019.

SANCHO, R. A. S.; PASTORE, G. M. Alimentos Funcionais: a Revolução Silenciosa na Alimentação. **Revista Processos Químicos**, v. 10, n. 19, p. 13–24, 2016.

SANGRONIS, E.; MACHADO, C. J. Influence of germination on the nutritional quality of *Phaseolus vulgaris* and *Cajanus cajan*. **LWT - Food Science and Technology**, v. 40, n. 1, p. 116–120, 2007.

SANTOS, G. N. DE L. M.; LUZIA, D. M. M.; FARIAS, V. L. DA S. COMPOSIÇÃO CENTESIMAL E ATIVIDADE ANTIOXIDANTE DE FEIJÃO (*Phaseolus vulgaris* L.). **Revista Interfaces**. 10^o ed, v. 15, 2023.

SANTOS, I. D. C.; DIAS, A. M.; DITTGEN, C.; et al. COMPOSIÇÃO QUÍMICA E DIGESTIBILIDADE DO AMIDO DE ARROZ, FEIJÃO CARIOCA, FEIJÃO PRETO E SUAS MISTURAS. **XXVII Congresso de iniciação Científica**, 2019.

SANTOS, L. F. DOS; MARTINS, F. B.; GARCIA, S. R. PADRÕES CLIMATOLÓGICOS DE PRECIPITAÇÃO E TEMPERATURA DO AR ASSOCIADOS AO RENDIMENTO DO FEIJÃO COMUM EM MINAS GERAIS. **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 1, 2018.

SANTOS, W. N. L. DOS; MAGALHÃES, B. E. A. DE. Phenolic content and antioxidant capacity of infusions herbs: Optimization of phenolic extraction and HPLC-DAD method. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 92, n. 3, 2020.

ŠÁRKA, E.; DVOŘÁČEK, V. New processing and applications of waxy starch (a review). **Journal of Food Engineering**, v. 206, p. 77–87, 2017.

SARKER, M. Z. I.; ELGADIR, M. A.; FERDOSH, S.; et al. Rheological behavior of starch-based biopolymer mixtures in selected processed foods. **Starch - Stärke**, v. 65, n. 1–2, p. 73–81, 2013.

SARMENTO, H. G. D. S.; DAVID, A. M. S. DE S.; BARBOSA, M. G.; NOBRE, D. A. C.; AMARO, H. T. R. DETERMINAÇÃO DO TEOR DE ÁGUA EM SEMENTES

DE MILHO, FEIJÃO E PINHÃO-MANSO POR MÉTODOS ALTERNATIVOS. **ENERGIA NA AGRICULTURA**, v. 30, n. 3, p. 250, 2015.

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 Agricultural Sciences**, v. 17, n. 3, p. 268–274, 2018.

SHRESTHA, A. K.; HALLEY, P. J. Starch Modification to Develop Novel Starch-Biopolymer Blends. **Starch Polymers**. p.105–143, 2014. Elsevier.

SILVA, D. A. R. O. DA. **MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRATAÇÃO DE GRÃOS DE SORGO**, 2016. Dissertação, Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

SILVA, M. M. DA; SOUZA, H. R. T. DE; DAVID, A. M. S. DE S.; et al. Qualidade fisiológica e armazenamento de sementes de feijão-comum produzidas no norte de Minas Gerais. **REVISTA AGRO@MBIENTE ON-LINE**, v. 8, n. 1, p. 97, 2014.

SILVA, N. MACHADO. **Qualidade tecnológica de cultivares de feijão preto e carioca recomendadas nos últimos 60 anos no Brasil**, 2018. Dissertação (Mestrado em Genética e Melhoramento), SILVA, Natália Machado: Universidade Federal de Viçosa.

SIMONI, R. C. **HIDRATAÇÃO DE GRÃO-DE-BICO (Cicer arietinum L.): ESTUDO CINÉTICO E INFLUÊNCIA NA QUALIDADE TECNOLÓGICA DO GRÃO**, 2017. Dissertação (mestrado), Curitiba: Universidade Federal do Paraná.

SINGH, N.; SINGH, J.; KAUR, L.; SINGH SODHI, N.; SINGH GILL, B. Morphological, thermal and rheological properties of starches from different botanical sources. **Food Chemistry**, v. 81, n. 2, p. 219–231, 2003.

SMITH, A. M. The Biosynthesis of Starch Granules. **Biomacromolecules**, v. 2, n. 2, p. 335–341, 2001.

SOPADE, P. A.; OBEKPA, J. A. Modelling Water Absorption in Soybean, Cowpea and Peanuts at Three Temperatures Using Peleg's Equation. **Journal of Food Science**, v. 55, n. 4, p. 1084–1087, 1990.

SRITONGTAE, B.; SANGSUKIAM, T.; MORGAN, M. R. A.; DUANGMAL, K. Effect of acid pretreatment and the germination period on the composition and antioxidant activity of rice bean (*Vigna umbellata*). **Food Chemistry**, v. 227, p. 280–288, 2017.

TBCA - Tabela Brasileira de Composição de Alimentos. Disponível em: <<https://tbca.net.br/base->

dados/int_composicao_alimentos.php?cod_produto=BRC0002T>. Acesso em: 16/9/2023.

TERZIOGLU BEBITOGLU, B. Frequently Used Herbal Teas During Pregnancy - Short Update. **Medeniyet Medical Journal**, 2020.

TESTER, R. F.; KARKALAS, J.; QI, X. Starch—composition, fine structure and architecture. **Journal of Cereal Science**, v. 39, n. 2, p. 151–165, 2004.

TORGA, P. P.; MELO, P. G. S.; PEREIRA, H. S.; et al. Interaction of common beans cultivars of the black group with years, locations and sowing seasons. **Euphytica**, v. 189, n. 2, p. 239–248, 2013.

TRUGO, L. C.; MUZQUIZ, M.; PEDROSA, M. M.; et al. Influence of malting on selected components of soya bean, black bean, chickpea and barley. **Food Chemistry**, v. 65, n. 1, p. 85–90, 1999.

ULLOA, J. A.; ENRÍQUEZ LÓPEZ, K. V.; CONTRERAS MORALES, Y. B.; et al. Effect of ultrasound treatment on the hydration kinetics and cooking times of dry beans (*Phaseolus vulgaris*). **CyTA - Journal of Food**, p. 1–9, 2015.

VELLOZO, E. P.; FISBERG, M. A contribuição dos alimentos fortificados na prevenção da anemia ferropriva. **Revista Brasileira de Hematologia e Hemoterapia**, v. 32, p. 140–147, 2010.

VERRUCK, S.; SANTANA, F.; MARAN, B. M.; et al. USO DE ANÁLISE TERMOGRAVIMÉTRICA COMO UMA ABORDAGEM INOVADORA PARA CARACTERIZAÇÃO DE MICROCÁPSULA PROBIÓTICA. , 2018. Acesso em: 10/8/2022.

WANG, H. L.; SWAIN, E. W.; HESSELTINE, C. W.; HEATH, H. D. HYDRATION OF WHOLE SOYBEANS AFFECTS SOLIDS LOSSES AND COOKING QUALITY. **Journal of Food Science**, v. 44, n. 5, p. 1510–1513, 1979.

WANG, H.; WANG, J.; GUO, X.; et al. Effect of germination on lignan biosynthesis, and antioxidant and antiproliferative activities in flaxseed (*Linum usitatissimum* L.). **Food Chemistry**, v. 205, p. 170–177, 2016.

WANI, I. A.; SOGI, D. S.; HAMDANI, A. M.; et al. Isolation, composition, and physicochemical properties of starch from legumes: A review. **Starch - Stärke**, v. 68, n. 9–10, p. 834–845, 2016.

WONG, K. S.; JANE, J. Quantitative Analysis of Debranched Amylopectin by HPAEC-PAD with a Postcolumn Enzyme Reactor. **Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies**, v. 20, n. 2, p. 297–310, 1997.

WONG, K.-S.; KUBO, A.; JANE, J.; et al. Structures and Properties of Amylopectin and Phytoglycogen in the Endosperm of sugary-1 Mutants of Rice. **Journal of Cereal Science**, v. 37, n. 2, p. 139–149, 2003.

YEO, J.; SHAHIDI, F. Critical Evaluation of Changes in the Ratio of Insoluble Bound to Soluble Phenolics on Antioxidant Activity of Lentils during Germination. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 63, n. 2, p. 379–381, 2015.

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

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, p. 800–805, 2014.

ZIELINSKI, A. A. F.; HAMINIUK, C. W. I.; ALBERTI, A.; et al. A comparative study of the phenolic compounds and the in vitro antioxidant activity of different Brazilian teas using multivariate statistical techniques. **Food Research International**, v. 60, p. 246–254, 2014.