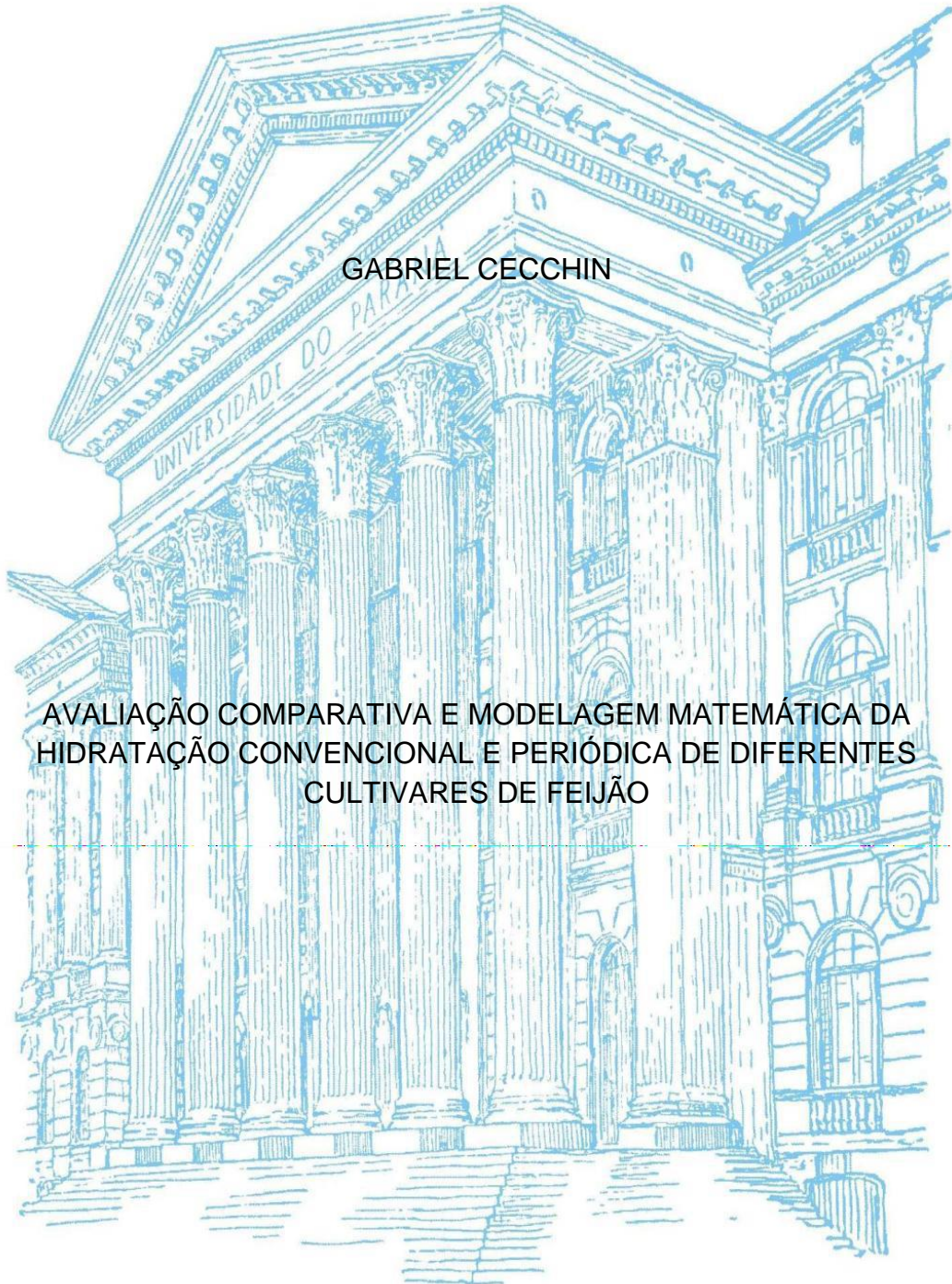


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ



GABRIEL CECCHIN

AVALIAÇÃO COMPARATIVA E MODELAGEM MATEMÁTICA DA
HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL E PERIÓDICA DE DIFERENTES
CULTIVARES DE FEIJÃO

CURITIBA

2016

GABRIEL CECCHIN

AVALIAÇÃO COMPARATIVA E MODELAGEM MATEMÁTICA DA
HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL E PERIÓDICA DE DIFERENTES
CULTIVARES DE FEIJÃO

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

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Regina Maria Matos Jorge
Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Mario de Matos Jorge

CURITIBA

2016

Cecchin, Gabriel
Estudo da hidratação de grãos de feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) /
Gabriel Cecchin. – Curitiba, 2016.
88 f. : il.; tabs.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Setor
de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Alimentos.

Orientadora: Regina Maria Matos Jorge
Coorientador: Luiz Mario de Matos Jorge
Bibliografia: p.91-99


1. Modelos matemáticos. 2. Feijão - Hidratação. I. Jorge, Regina
Maria Matos. II. Jorge, Luiz Mario de Matos.
III. Título.

CDD


GABRIEL CECCHIN

**AVALIAÇÃO COMPARATIVA E MODELAGEM MATEMÁTICA DA
HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL E PERIÓDICA DE DIFERENTES
CULTIVARES DE FEIJÃO**

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


Orientadora: Prof.^a Dr.^a REGINA MARIA MATOS JORGE
Setor de Tecnologia, UFPR


Prof. Dr. ALEXANDRE FERREIRA SANTOS
Setor de Tecnologia, UFPR


Prof. Dr. ALVARO LUIZ MATHIAS
Setor de Tecnologia, UFPR

Curitiba, 09 de março de 2016.

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo modelar o processo de hidratação convencional e hidratação periódica do grão de feijão para três cultivares de feijão preto. As operações foram realizadas a 30, 40, 50 e 60°C, durante 10 horas. Os grãos absorveram água rapidamente no início da hidratação, seguido de sua redução gradativa a partir da fase intermediária. O aumento da temperatura influenciou significativamente na taxa de hidratação. O modelo empírico de Peleg e os modelos fenomenológicos de Parâmetros concentrados e de difusão foram utilizados para modelar o processo de hidratação dos grãos de feijão. Na hidratação convencional o modelo de Peleg gerou bons ajustes, com R^2 entre 99,14 e 99,94% e erro relativo (P) menor que 5,29%; o modelo de parâmetros concentrados teve P máximo de 4,07%. Na hidratação periódica o modelo de Peleg obteve valores de R^2 entre 99,67 e 99,95 e P menor que 6,94%; o modelo de parâmetros concentrados gerou um P máximo de 10,05%. A generalização do modelo de Peleg e do modelo de parâmetros concentrados foi realizado para a hidratação convencional, já na hidratação periódica foi generalizado somente o modelo de Peleg, pois o modelo de parâmetros concentrados não gerou um bom ajuste. O modelo generalizado de Peleg na hidratação convencional teve bom ajuste para o BRS Esplendor durante todo processo e para os cultivares BRS Campeiro e BRS Esteio a partir da terceira hora de imersão. O modelo de parâmetros concentrados generalizado na hidratação convencional se ajustou adequadamente para o BRS Esplendor, o BRS Campeiro conseguiu se ajustar após os primeiros instantes de hidratação e o BRS Esteio não se ajustou ao modelo. Na hidratação periódica o modelo generalizado foi o de Peleg, onde conseguiu seguir uma tendência durante toda a hidratação do cultivar BRS Campeiro, para o BRS Esplendor o modelo conseguiu prever a fase inicial e final do processo, já para o BRS Esteio se ajustou desde a fase intermediária até a fase final da hidratação. Os coeficientes de difusão efetivos variaram de $1,07 \times 10^{-11}$ a $9,41 \times 10^{-12}$ m²/s na hidratação convencional e $1,04 \times 10^{-11}$ a $9,45 \times 10^{-12}$ m²/s na hidratação periódica. A energia de ativação (E_a) prevista pela equação de Arrhenius, teve seu menor valor de 38,72kJ/mol para o cultivar BRS Campeiro, na hidratação periódica. Seu maior valor de E_a foi de 105,19 kJ/mol para o BRS Esteio, na hidratação convencional, para o mesmo cultivar esse valor diminuiu para 56,28kJ/mol, na hidratação periódica, concluindo que este novo método de hidratação requer menor energia para que o processo ocorra.

Palavras-chave: Modelagem matemática, Peleg, coeficiente de difusão, Modelo de Parâmetros concentrados, operação periódica.

ABSTRACT

This study aimed modeling of conventional hydration kinetic process and periodic, using bean grain for three cultivars of black beans. The experiments were conducted at temperatures of 30, 40, 50 and 60 ° C for 10 hours to evaluate the water absorption by the beans. The absorbed water for the grains was fast at the beginning of hydration, and then the speed was reducing reaching the intermediate phase. The temperature increase influence significantly the water absorption rate of the grain. The empirical model of Peleg, the phenomenological model of concentrated parameters and the diffusion were used to model the process of hydration of beans. the conventional hydration by Peleg model showed good results with R² between 99.14 and 99.94% and P less than 5.29%; the concentrated parameters model had a P max about 4.07%. In the periodic hydration Peleg model obtained R² values between 99.67 and 99.95 and P less than 6.94%; the model with concentrated parameters demonstrated a maximum of 10.05% P. The generalization of Peleg model and the concentrated parameters model was performed for conventional hydration, and the regular hydration was just generalized to model of Peleg, because the model of concentrated parameters showed a good adjustment. The generalized model of Peleg in a conventional hydration had good fit for the BRS Esplendor all through the process and to the BRS Campeiro cultivars and BRS Esteio as from just the third hour of immersion. The concentrated generalized model parameters in a conventional hydration were properly set for the BRS Esplendor, the BRS Campeiro could be adjusted after the first instants of hydration while that the BRS Esteio was not adjusted the model. In the periodic hydration generalized model was the Peleg, which able to demonstrate a tendency for the whole the hydration of BRS Campeiro. on the BRS Esplendor model could predict the initial and final phase of the process, to the BRS Esteio set from intermediate stage to the final stage of hydration. The effective diffusion coefficients ranged from $1.07 \times 9.41 \times 10^{-11}$ to $10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$ in a conventional hydration and 1.04×10^{-11} to $9.45 \times 10^{-12} \text{ m}^2 / \text{s}$ in a periodic hydration. The activation energy (Ea) was obtained by the Arrhenius Equation, it had its lowest value in 38,72kJ / mol for BRS Campeiro in periodic operation. Its greatest value of Ea was 105.19 kJ / mol for the BRS Esteio, in a conventional hydration for the same cultivate this value decreased to 56.28kJ / mol, in periodic operation, concluding that this new hydration contact method requires less energy for the process.

Keywords: mathematical modeling, Peleg, diffusion coefficient, concentrated parameters model, periodic operation.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – DIFERENÇA DA OPERAÇÃO CONVENCIONAL E OPERAÇÃO PERIÓDICA FRENTE A UMIDADE EXPERIMENTAL EM 30-50°C.....	35
FIGURA 2 - CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL DO CULTIVAR BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C).....	39
FIGURA 3 - CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL DO CULTIVAR BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C).....	40
FIGURA 4 – IMAGEM DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) PARA OS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (1), BRS ESPLENDOR (2), BRS ESTEIO (3), NO GRÃO IN-NATURA (A) E NA DÉCIMA HORA DE HIDRATAÇÃO (B) AUMENTADO EM 2000 VEZES.....	45
FIGURA 5 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DO FEIJÃO (A), COM DESTAQUE PARA O HILO (B).....	47
FIGURA 6 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO DE PELEG, BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	51
FIGURA 7 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS, BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	52
FIGURA 8 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO DE PELEG, BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	54
FIGURA 9 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS, BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	55
FIGURA 10 - EFEITO DA TEMPERATURA NA CONSTANTE K1 NOS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C).....	60

FIGURA 11 - SIMULAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG PARA OS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	62
FIGURA 12 – EFEITO DA TEMPERATURA NA CONSTANTE K_s NOS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	65
FIGURA 13 - SIMULAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG PARA OS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	67
FIGURA 14 – EFEITO DA TEMPERATURA NA CONSTANTE K_1 NOS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	69
FIGURA 15 - SIMULAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG PARA OS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	71

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DE ENERGIA DE ATIVAÇÃO PARA DIFERENTES GRÃOS NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO.....	29
TABELA 2 – TEOR DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO PARA OS TRÊS CULTIVARES DE FEIJÃO NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	41
TABELA 3 – TEOR DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO PARA OS TRÊS CULTIVARES DE FEIJÃO NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	41
TABELA 4 – ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS PARA OS CULTIVARES DE FEIJÃO.....	43
TABELA 5 – PARÂMETROS DO MODELO DE PELEG PARA OS TRÊS CULTIVARES.....	46
TABELA 6 – PARÂMETROS DO MODELO DE PELEG PARA OS TRÊS CULTIVARES NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	46
TABELA 7 – VALORES DE K_s DO MODELO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS PARA OS 3 CULTIVARES NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	49
TABELA 8 – VALORES DE K_s DO MODELO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS PARA OS 3 CULTIVARES NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	49
TABELA 9 - AJUSTE DO MODELO DE PELEG E DE PARÂMETROS CONCENTRADOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	56
TABELA 10 - AJUSTE DO MODELO DE PELEG E DE PARÂMETROS CONCENTRADOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	57
TABELA 11 - VALORES DE K_2 MÉDIO NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	61
TABELA 12 - ERROS DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG.....	63
TABELA 13 - ERROS DO MODELO GENERALIZADO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	68

TABELA 14 - VALORES DE K2 MÉDIO NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	70
TABELA 15 - ERROS DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	72
TABELA 16 – COEFICIENTE EFETIVO DE DIFUSÃO PARA O FEIJÃO NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL.....	73
TABELA 17 – COEFICIENTE EFETIVO DE DIFUSÃO PARA O FEIJÃO NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA.....	73

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	OBJETIVO	14
1.1.1	Objetivo geral	14
1.1.2	Objetivos específicos	15
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	16
2.1	FEIJÃO	16
2.2	FATORES ANTINUTRICIONAIS	18
2.3	ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)	19
2.5	MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRATAÇÃO	23
2.5.1	Modelo empírico de Peleg	23
2.5.2	Modelos fenomenológicos	24
2.5.2.1	Modelo de Parâmetros concentrados	25
2.5.2.2	Modelo de Difusão	26
2.6	ENERGIA DE ATIVAÇÃO	28
2.7	OPERAÇÃO PERIÓDICA	30
3	MATERIAIS E MÉTODOS	32
3.1	COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DOS GRÃOS	32
3.1.1	Umidade	32
3.1.2	Cinzas	32
3.1.3	Proteínas	33
3.1.4	Lipídios	33
3.1.5	Fibra	33
3.2	MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA	33
3.3	METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO	34
3.3.1	Hidratação convencional	34
3.3.2	Hidratação periódica	35
3.4	DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE	36
3.5	AJUSTE DOS MODELOS	36
3.5.1	Ajuste do modelo de Peleg	36
3.5.2	Ajuste do modelo de Parâmetros concentrados	37

3.5.3 Ajuste do modelo de difusão	37
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DOS DIFERENTES CULTIVARES DE FEIJÃO	38
4.2 ANÁLISES DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL FUNDAMENTAL E ANATÔMICA.....	43
4.3 AJUSTE DO MODELO EMPÍRICO DE PELEG	46
4.4 MODELO PARÂMETROS CONCENTRADOS	49
4.5 QUALIDADE DE AJUSTE	50
4.6 MODELOS GENERALIZADOS NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL	59
4.6.1 Peleg.....	59
4.6.2 Parâmetros concentrados	64
4.7 MODELO GENERALIZADO DE PELEG NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA	68
4.8 MODELO DE DIFUSÃO	72
4.9 ENERGIA DE ATIVAÇÃO	74
5 CONCLUSÕES	76
REFERÊNCIAS.....	78

1 INTRODUÇÃO

O feijão-comum (*Phaseolus vulgaris*) é uma leguminosa originária da América e amplamente cultivada e consumida no Brasil, onde é uma das principais fontes de proteína de origem vegetal da população (DURIGAN, 1987; OLIVEIRA DA SILVA, 2006; KOLE, 2007). Para que suas características organolépticas se tornem desejáveis, o grão de feijão deve passar pelo processo de cocção, esse processo que também inativa alguns fatores anti-nutricionais do grão e pode ser realizado de forma doméstica ou industrial para fabricação de produtos semi prontos (LEMOS, 1996).

O Brasil é um dos maiores produtores e consumidores de feijão, o mercado mundial movimentada 10 milhões de toneladas por ano. A maior parte do feijão produzido no Brasil é representado pela agricultura familiar, com aproximadamente 60% da produção (COMISSÃO, 2010).

A produção da safra de 2014/2015 foi de aproximadamente 3275 mil toneladas de feijão, destacando a região sul com 963 mil toneladas e região centro-oeste com 776 mil (CONAB, 2015).

A preparação e o processamento de alimentos exigem cada vez mais rapidez e praticidade para reduzir custos e aumentar a produtividade, dessa forma, o cozimento e a hidratação do feijão requerem períodos de cozimento e hidratação cada vez menores (RIBEIRO, 2007). Para simular o comportamento da hidratação de alimentos, modelos matemáticos fenomenológicos e empíricos são utilizados a fim de reduzir tempo e custo. Os modelos fenomenológicos podem explicar o processo de hidratação com fundamentação teórica e seus parâmetros possuem significado físico, e por outro lado, os modelos empíricos são menos complexos e de fácil construção e resolução (GARCIA, 2013).

A operação periódica visa a redução de gasto energético de um processo, modulando a temperatura e potencializando os fenômenos de transferência de massa e energia (DEFENDI, 2014).

O modelo empírico mais utilizado na hidratação de grãos atualmente é o modelo de Peleg, criado em 1988 e vem mostrando bons resultados na modelagem da hidratação de grãos, como arroz (FONSECA et al., 2011;

CHEEVITSOPON e NOOMHORM, 2011), feijão (ABU-GHANNAM, 1997), gergelim (KHAZAEI, 2009) e milho (SOPAIDE et al., 1992; FERNÁNDEZ-MUÑOZ et al., 2011; SOBUKOLA e ABAYOMI, 2011).

Dentre os modelos fenomenológicos, existem os modelos de parâmetros distribuídos, os quais avaliam a variação da umidade em relação ao raio do grão ao longo do tempo, e os modelos de parâmetros concentrados que consideram o grão com umidade uniforme ao longo do raio durante a hidratação. Os modelos de parâmetros concentrados possuem menor número de variáveis e são mais fáceis de serem desenvolvidos. Coutinho et al. (2007) desenvolveram um modelo de parâmetros concentrados para soja que também foi utilizado por Omoto et al. (2009) para descrever o processo de hidratação de grãos de ervilha. O modelo de difusão, proposto por Crank (1975) permite relacionar o coeficiente de difusão durante a hidratação para as temperaturas estudadas.

Neste trabalho foi avaliada a qualidade de ajuste dos modelos para a hidratação de feijão.

Vários trabalhos são voltados para a hidratação convencional de feijão, porém, não há registrado na literatura sobre hidratação periódica com modulação da temperatura. Este trabalho tem como objetivo avaliar esta nova metodologia de hidratação e comparar a energia de ativação para as duas operações.

1.1 OBJETIVO

1.1.1 Objetivo geral

Estudar o processo da hidratação de três cultivares de feijão, mediante operação isotérmica e operação periódica.

1.1.2 Objetivos específicos

- Obter e avaliar as curvas de hidratação dos diferentes cultivares de feijão para hidratação convencional e periódica;
- Caracterizar a matéria-prima: análises físico-químicas referentes a composição centesimal e microscopia eletrônica de varredura (MEV);
- Determinar a capacidade de hidratação dos diferentes cultivares;
- Ajustar os modelos de Peleg e de Parâmetros concentrados que representam os dados experimentais da hidratação;
- Comparar e generalizar os modelos que obtiveram os melhores ajustes;
- Determinar o coeficiente de difusão;
- Determinar a energia de ativação na hidratação dos cultivares de feijão;
- Avaliar a melhor operação.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FEIJÃO

De acordo com a instrução normativa do Ministério da Agricultura (Instrução normativa nº 12, de 28 de março de 2008), o feijão é classificado em grupos, classes e tipo, segundo sua espécie, coloração do tegumento e a qualidade. De acordo com os grupos o feijão obtém a seguinte classificação: Grupo I -Feijão Comum: quando proveniente da espécie *Phaseolus vulgaris* L.; Grupo II - Feijão-caupi (Feijão-de-Corda ou Macassar): quando proveniente da espécie *Vigna unguiculata* (L) Walp (BRASIL, 2008).

Esses dois grupos são classificados em quatro classes, correspondente com a coloração do tegumento (película do feijão): branco, preto, cores e misturado. O feijão é classificado em três tipos, de acordo com a qualidade dos grãos, Tipo I, Tipo II e Tipo III, definida segundo os limites máximos de tolerância de defeitos: grãos mofados, ardidos, germinados, matérias estranhas e impurezas, conforme o Regulamento Técnico do Feijão (BRASIL, 2008).

O feijão pertence a divisão *Fanerogamae*, sub-divisão *Angiospermae*, classe *Dicotyledoneae*, ordem *Rosales*, família *Leguminosae*, sub-família *Papilionoideae*, gênero *Phaseolus*, espécie *Phaseolus vulgaris* L. (MECHI; CANIATTI-BRAZACA; ARTHUR, 2005).

A produtividade do feijão está relacionada com fatores climáticos. Os fatores que mais tem influência são: temperatura, que tem participação no florescimento e frutificação do grão; radiação solar; e a precipitação pluvial, que tem grande relevância quinze dias antecedentes a floração e no início da formação de vagens (YAMAGUISHI, 2008).

O grão de feijão é usado como fonte de proteína por diversos países, principalmente onde há uma escassez de proteína animal (Pires et al., 2005).

O teor de ferro encontrado no feijão é similar ao encontrado na carne bovina, além de apresentar uma boa fonte de cálcio, magnésio, cobre, zinco, fósforo e potássio (Sámman *et al.*, 1999; Barampama e Simard, 1993). A fibra

contida nesse grão também traz benefícios à saúde, a fração de fibra solúvel atua como alimento funcional (HUGHES, 1996).

A lisina é o aminoácido em maior quantidade encontrada no feijão, porém, aminoácidos sulfurados metionina e cisteína correspondem a uma parcela muito pequena em sua composição. Esses altos teores de lisina podem ser complementados com as proteínas dos cereais, que obtêm grandes quantidades de aminoácidos sulfurados, com esse fator a dieta brasileira, arroz com feijão fica completa relacionada a aminoácidos essenciais (Rios *et al.*, 2003).

Alguns estudos mostram que as leguminosas, principalmente o feijão possuem a propriedade de reguladoras de níveis de glicemia e insulina, também é considerado uma das melhores fontes vegetais de vitaminas do complexo B. É uma fonte rica em nutrientes, contendo ácidos graxos insaturados, minerais, vitaminas e quantidade significativa de calorias (Obiro *et al.*, 2008; Pari e Venkateswaran, 2004, Geil e Anderson, 1994, RAMÍREZ-CÁRDENAS; LEONEL; COSTA, 2008).

Segundo Tsuda *et al.* (1994) as antocianinas que compõem o feijão preto podem reagir com os radicais livres, efeito esse que causaria proteção aos danos do DNA.

O mercado mundial de feijão movimentada, por ano, aproximadamente 19 milhões de toneladas dessa leguminosa. Sendo o Brasil um dos maiores produtores e consumidores do produto. A maior parte do feijão produzido no Brasil vem da agricultura familiar, cerca de 60 % (COMISSÃO, 2010).

Na safra de 2014/2015 o Brasil teve produção de aproximadamente 3274,8 mil toneladas de feijão, destaca-se a região sul com 962,7 mil toneladas e região centro-oeste com 775,9 mil toneladas. Os três estados que mais se destacam neste cenário são Paraná, Minas Gerais e Mato Grosso, com 733, 534, 511 mil toneladas, respectivamente (CONAB, 2015).

2.2 FATORES ANTINUTRICIONAIS

A dificuldade de digestão do grão está relacionada com substâncias de natureza antinutricional, como inibidores de amilases e proteases, lecitinas, taninos, fitatos, oligossacarídeos da família rafinose. Esses fatores prejudicam o fator nutricional do grão, afetando a disponibilidade de nutrientes, promovendo indisposição e mal-estar ao consumidor. O tratamento térmico é um processo utilizado para melhorar a digestibilidade do feijão, tendo a função de inativar os inibidores das proteases do grão (ANTUNES *et al.*, 1995, FERREIRA, 2010).

Segundo Oboh (1998) as leguminosas apresentam duas vezes mais proteínas que os cereais, porém, o valor biológico desses constituintes fica limitado pela presença de fatores antinutricionais. Os taninos e o ácido fítico estão inseridos nas leguminosas e são substâncias antinutricionais. O ácido fítico é ionizado sendo capaz de interagir com íons metálicos e proteínas, o resultado dessa interação são complexos insolúveis e biologicamente indisponíveis. Outro fator relevante é a presença do fósforo do fitato, que também é indisponível, por ter dificuldade de ser hidrolisado por espécies monogástricas pertencentes ao intestino delgado. Já os taninos tendem a complexar-se às proteínas, resultando na inibição de enzimas (TORRE, RODRIGUEZ e SAURA-CALIXTO 1991; MUZQUIZ *et al.*, 1999; NACZK *et al.*, 1994).

Embora inúmeros estudos apresentem resultados relatando que as substâncias antinutricionais afetam negativamente o organismo humano, Yamaguishu (2008), afirmou que também possui efeitos positivos sobre essa ingestão.

Segundo ele o ácido fítico e os compostos fenólicos (taninos), quando consumidos em pequenas concentrações podem ter ação protetora contra o câncer e prevenção de doenças cardiovasculares.

2.3 ANÁLISE DE MICROSCOPIA ELETRÔNICA POR VARREDURA (MEV)

Esse equipamento fornece instantaneamente informações referente a morfologia e identificação de elementos químicos. O microscópio eletrônico de varredura (MEV) apresenta imagens com aparência tridimensional. O aparelho emite um feixe de elétrons de pequeno diâmetro com o objetivo de explorar a superfície da amostra ponto a ponto, por linhas consecutivas e emite o sinal do detector para uma tela catódica, onde a varredura está sincronizada com o feixe incidente. No momento em que o feixe primário incide na amostra analisada, parcela dos elétrons e ondas eletromagnéticas geradas são exploradas para formação de imagens ou para realizar análises físico-químicas (DEDAVID, GOMES e MACHADO, 2007).

Sua utilização é comum em diversos ramos da indústria química, farmacêutica, metalúrgica, odontológica, além de ser comumente usada na biologia, geologia, medicina e física (MANNHEIMER *et al.*, 2002).

O método está ganhando cada vez mais espaço no ramo de alimentos. Yildirim *et al.* (2011) estudaram a difusão de água no grão de bico durante a hidratação, utilizando tratamento com ultra-som. Roca *et al.* (2008) estudou diversos níveis de hidratação em relação a morfologia do glúten do trigo, massa de bola e chocolate.

Na área de alimentos a utilização deste método vem cada vez mais ganhando espaço. Roca *et al.* (2008), por exemplo, exploraram vários níveis da hidratação sobre a morfologia do chocolate, glúten do trigo e massa de bolo. Yildirim *et al.* (2011) analisaram a difusão de água em grão de bico durante a imersão com o tratamento de ultrassom. Pineda-Gómez *et al.* (2012) analisaram o milho hidratado, com objetivo de maior absorção de cálcio.

Uma das razões da utilização do MEV se deve pelo fato de obter uma alta resolução nas amostras analisadas e proporcionar uma imagem tridimensional (NAGATANI *et al.* 1987) e PINTO E LOPES, 2003).

Chiang e Yeh (2002) analisaram o efeito da hidratação sobre a estrutura do amido da farinha de arroz e a alteração da estrutura no decorrer do cozimento. Wu *et al.* (2010) estudou a retrogradação do amido de arroz em

diferentes teores de amilose e Zhou *et al.* (2010) verificaram o efeito da temperatura do armazenamento do grão em propriedades físicas.

2.4 HIDRATAÇÃO

A etapa de hidratação inicia-se através da transferência de água para a superfície do sólido seguido pela penetração da água até que seja difundido no sólido, ocorrendo a liberação de sólidos solúveis que serão passados para a solução (GEANKOPLIS, 1983). A operação de hidratação geralmente é realizada nos processos industriais em temperatura constante.

O processo de hidratação é denominado um fenômeno físico, relacionado com as características da permeabilidade da casca, propriedades dos coloides componentes do grão e temperatura da água. O potencial celular do grão é o parâmetro que regula a entrada e saída de água, que ocorre do maior para o menor potencial hídrico por difusão e capilaridade. (WOODSTOCK 1988; BEWLEY e BLACK, 1994, SINGH; KULSHRESTHA, 1987; BELLO *et al.*, 2004; BRAGA *et al.*, 2012).

Grande parte dos processos que ocorrem nas indústrias de cereais e leguminosas necessitam de uma etapa de hidratação a fim de facilitar as operações como o cozimento do grão, produção de conservas e germinação, melhoramento da aparência, desnaturação das proteínas e em determinadas temperaturas a pré-gelatinização do amido. O processo de transferência de massa de água em alimentos tanto através da hidratação quanto da desidratação, possui grande importância na área de alimentícia. Através destes métodos, é possível uma maior flexibilidade quanto a manipulação, processamento e empacotamento dos alimentos. (MASKAN, 2002).

O teor de umidade do grão depende diretamente das variáveis tempo e temperatura de hidratação. Conforme a temperatura aumenta, a velocidade de hidratação também aumenta. Como também se faz necessário considerar que a quantidade de água absorvida aumenta de acordo com o aumento do tempo de hidratação. (WANG *et al.*, 1979; SOPADE e OBEKPA, 1990; CHOPRA e PRASAD, 1994).

Thanos (1998) estudou a hidratação de ervilhas e feijões, e notou que o tempo de hidratação necessário para os grãos, foi reduzido com o aumento da temperatura da água. Foi observado que com o acréscimo da temperatura, maior é a taxa de absorção de água do grão. Constatou uma curiosidade em temperaturas acima de 60°C, que a umidade final foi menor que ao intervalo de 40 a 60°C, porém o tempo que atingia a umidade de equilíbrio foi menor.

A fim de otimizar o processo de hidratação, reduzir o tempo de cozimento do grão e melhorar a qualidade sensorial do produto, é essencial que ocorra o monitoramento das alterações do processo como a expansão dos grãos, o efeito do binômio tempo/temperatura, a transferência de massa, a capacidade de germinação e a caracterização da qualidade fisiológica do grão. (BECKERT *et al.*, 2000; AHROMRIT *et al.*, 2006; ROCA *et al.*, 2008; COUTINHO *et al.*, 2010). De acordo com OLIVEIRA *et al.* (2013) os dados coletados são de grande importância para prever o caminho de maior rendimento de absorção em função do tempo e da temperatura.

Em estudos realizados por Beckert *et al.* (2000) e Omoto (2006), existem alguns componentes químicos que são capazes tanto de favorecer quanto dificultar o processo de hidratação.

Cavariani *et al.* (2009) em seus estudos sobre a velocidade de hidratação de sementes de soja alegam que a velocidade pode ser afetada pela permeabilidade do tegumento em função das variações de composição e de espessura, ou seja, a variável velocidade na hidratação de sementes de soja é afetada pelo cultivar e local de produção.

A qualidade final do produto em leguminosas depende muito da absorção de água no processo de hidratação, por isso é importante compreender bem este fenômeno. Esses dados obtidos são de grande valia para o processamento e engenharia, pois permite a otimização de processos industriais (TURHAN *et al.*, 2002; JIDEANI e MPOTOKWANA, 2009, MASKAN, 2002).

A cinética de hidratação é pesquisada amplamente devido a sua importância no ramo alimentício. Destacam-se as pesquisas com produtos como grãos de cereais e leguminosas (ABU-GHANNAM & MCKENNA, 1997; LUCAS *et al.*, 2007), Omoto *et al.* (2009) com ervilha, Coutinho *et al.* (2005) e Nicolin *et al.* (2014) com soja.

O processo de hidratação reduz a dureza do grão, devido a incorporação de água e aumento do teor de umidade, alterando assim sua textura. Algumas pesquisas sobre a modificação de textura durante a imersão foram realizadas em grão de bico (GOWEN *et al.*, 2007) e lentilha (JOSHI *et al.*, 2010).

Joshi *et al.* (2010) utilizaram três variedades de lentilhas a 20, 50 e 85°C. Eles concluíram que a dureza do grão foi mais afetada pela temperatura do processo e quantidade de água absorvida que pela massa e dimensão do grão. Na temperatura de 20°C foi verificado que a maior absorção de água em uma variedade foi conferida às características dos poros existentes, como maior comprimento e alta permeabilidade. Em temperaturas maiores, como 50 e 85°C foi atribuída ao maior teor de proteína e maior área superficial.

A medida que o grão de feijão absorve água, ocorre o aumento do seu teor de umidade, diminuindo sua força de cisalhamento. Em relação a dureza do grão após um determinado tempo foi verificado que suas alterações permanecem constantes, mesmo absorvendo mais água. Nas temperaturas de 20, 30, 40 e 60°C a força de cisalhamento aplicada no feijão foi diminuindo até atingir o equilíbrio em $33 \pm 2N$ (Abu-Ghannam, 1998).

Durante o processo de imersão pode haver a perda de sólidos solúveis do grão para a água de embebição, este fenômeno afeta diretamente a absorção de água no interior do grão. Abu-Ghannam e Mackenna (1997) analisou amostras de feijões à 20, 30, 40 e 60°C e comprovou que a 60°C sua umidade de equilíbrio era menor que nas temperaturas baixas, em razão da perda de sólidos solúveis.

De acordo com o estudo de Pilosof, Boquet e Bartholomai (1985), algumas proteínas isoladas tendem a absorver mais água que o amido. Sopade e Obekpa (1990) diz que o que limita a absorção de água é a proporção de gordura no grão.

A composição química de um grão pode influenciar na capacidade de absorção de água, entretanto esta associação é complexa e não tende a ser linear. Compostos como amido, celulose, mucilagens e substâncias pécicas contribuem para essa absorção, porém, a proteína é o principal constituinte do grão que auxilia neste fenômeno (SOPADE, AJISEGIRI e BADAU, 1992).

2.5 MODELAGEM MATEMÁTICA DA HIDRATAÇÃO

Vários modelos que representam a hidratação são desenvolvidos para prever o tempo necessário para atingir a umidade estimada para o processo sobre alguma temperatura. Existem dois tipos de modelos desenvolvidos para desempenhar o comportamento dinâmico da absorção: empíricos e fenomenológicos (MASKAN, 2002).

2.5.1 Modelo empírico de Peleg

Esses modelos são obtidos a partir de correlações matemáticas ajustadas aos dados experimentais, não tendo como base as leis físicas ou teorias de transferência de massa. Modelos empíricos frequentemente resultam em equações mais simples e de acessível aplicação, ajustando satisfatoriamente as curvas de hidratação em vários produtos analisados. O modelo empírico mais utilizado na hidratação de grãos é o de Peleg (MONTANUCI, 2013).

Este modelo empírico, não exponencial e com dois parâmetros, foi usado para ajustar as curvas de hidratação de leite em pó e arroz, segundo a equação 1, contendo valores de R^2 satisfatórios Peleg (1988).

$$X_{bu} = X_{buo} + \frac{t}{(k_1 + k_2 t)} \quad (1)$$

Onde, X_{bu} é a umidade no instante t (%b.s.), X_{buo} a umidade inicial (%b.s.), t é o tempo (h), a unidade de k_1 é (h. %bs⁻¹) e do k_2 é (%bs⁻¹).

A constante k_1 do modelo está associada a taxa de transferência de massa, considerando que quanto menor seu valor, maior será a taxa de absorção inicial de água no grão (Turhan, Sayar e Gunasekaran 2002).

Segundo Sopade e Obekpa (1990) a constante k_2 pode servir como parâmetro que caracteriza o produto durante o processo de hidratação.

O modelo de Peleg (1988) descreveu satisfatoriamente dados provenientes da hidratação de vários alimentos como grãos-de-bico (PRASAD, VAIRAGAR e BERA, 2010), feijão (RESENDE e CORRÊA, 2007), trigo (MASKAN, 2002), soja, feijão-caupi (SOPADE e OBEKPA, 1990) e arroz (BOTELHO *et al.*, 2010).

Sopade, Ajisegiri e Badau (1992) constatou que quanto menor for o valor de k_2 da equação de Peleg, maior será a capacidade de absorção de água pelo grão.

As constantes de Peleg k_1 e k_2 são influenciadas pela temperatura de imersão, segundo o estudo do trigo (Variedade *Triticum aestivum*) de Maskan (2002) e do feijão vermelho (*Phaseolus vulgaris* L.) de Resende e Corrêa (2007), ambos os estudos obtiveram resultados satisfatórios com relação ao ajuste de Peleg nas faixas de temperaturas estudadas pelos autores.

2.5.2 Modelos fenomenológicos

O princípio dos modelos fenomenológicos considera etapas elementares da transferência de massa por difusão e/ou convecção, são de parâmetros concentrados ou parâmetros distribuídos, frequentemente demonstram as principais tendências de um processo, mesmo fora da condição experimental que foi submetida. Modelos de parâmetros concentrados não conseguem considerar variações espaciais da concentração e propriedades físicas no sistema, à medida que os parâmetros distribuídos geralmente as desempenham. Os dois podem simular o comportamento de um grão durante a hidratação, porém é difícil determinar os perfis de umidade interno dos grãos, impedindo a validação dos modelos de parâmetros distribuídos e limitando sua utilidade (BECKER e SALLANS, 1955; FAN *et al.*, 1963; HSU, 1983^a; MONTANUCI, 2013).

2.5.2.1 Modelo de Parâmetros concentrados

Hsu (1983a) apresentou um modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos, obtido de um balanço de massa diferencial do grão de soja, supondo sua forma como esférica e de diâmetro constante, representado por uma equação diferencial parcial solucionada numericamente. Hsu (1983b) estudou também a influência da temperatura na difusão da água na soja, este modelo fenomenológico de parâmetros distribuídos apresentou concordância com os dados experimentais.

Coutinho *et al.* (2005), validaram um modelo fenomenológico de parâmetros concentrados da hidratação de grãos de soja, esse estudo foi realizado a temperaturas de 10, 15, 20, 30, 42 e 49°C. O modelo foi proposto por um balanço de massa para água no interior do grão, considerando o aumento de volume do grão durante a imersão, a soja foi considerada como um formato esférico. Foi obtido experimentalmente que a variação do volume ao longo da hidratação é independente da temperatura da hidratação.

Coutinho *et al.* (2007) apresentaram outro modelo fenomenológico de parâmetros concentrados para hidratação de grãos de soja. Baseado em um balanço de massa em regime transiente, com dois parâmetros estimados a partir do ajuste do modelo aos dados experimentais, também foi considerado que o coeficiente de transferência de massa aparente se modifica exponencialmente com a concentração de água no grão. Esse modelo foi satisfatório aos resultados, o coeficiente de transferência de massa aparente é dependente da temperatura e obteve variações significativas durante a imersão.

Omoto *et al.* (2009) desenvolveram um modelo de parâmetros concentrados, a partir do balanço de massa de água dentro do grão, admitindo-se regime transiente, onde o fluxo mássico (N_A) e o acúmulo de água no grão foram igualados, obtendo a Equação 2.

$$\frac{d(\rho_A \cdot V)}{dt} = N_A \cdot A \quad (2)$$

Onde ρ_A significa a concentração mássica de água no grão, A é a área superficial do grão e V o volume do grão.

Considerando-se o grão como geometricamente esférico, com raio e volume constantes e definindo-se o fluxo mássico (Equação 3) como,

$$N_A = K_s(\rho_{Aeq} - \rho_A) \quad (3)$$

Onde K_s o coeficiente de transferência de massa, ρ_A a concentração média interna do grão, ρ_{Aeq} a concentração mássica de água no equilíbrio. Substituindo a Equação 3 na Equação 2, obtém-se a Equação 4, que é utilizada como base para estimar a umidade dos grãos pelo modelo de parâmetros concentrados.

$$\frac{d(\rho_A)}{dt} = \frac{3K_s}{r_0}(\rho_{Aeq} - \rho_A) \quad (4)$$

Analisando que ρ_{Aeq} como K_s são constantes para uma determinada temperatura, integrando a Equação 4, chegando na Equação 5.

$$\ln\left(\frac{\rho_{Aeq} - \rho_A}{\rho_{Aeq} - \rho_{A0}}\right) = -\frac{3K_s}{r_0}t \quad (5)$$

2.5.2.2 Modelo de Difusão

Este modelo de difusão líquida é comumente utilizado para o processo de hidratação. O modelo tem aplicabilidade em secagem e hidratação de sólidos, obtendo como principal mecanismo a difusão líquida baseada na Lei de Fick, que relaciona taxas de variação temporal e espacial da concentração de água, segundo o coeficiente de difusão. Para ocorrer essa difusão da água no interior do grão é necessário que haja uma força motriz, que seria um gradiente de concentração de água entre o interior e a superfície do produto

sólido. Entretanto ocorre alterações em produtos agrícolas durante esse processo, como a modificação da estrutura química e física dos mesmos. Grande parte dos produtos agrícolas são porosos, isto facilita o transporte de água para o interior dos grãos, sendo os prováveis mecanismos: a difusão líquida, difusão na superfície, difusão capilar, difusão de vapor, difusão térmica e fluxo hidrodinâmico (BROOKER; BAKKER-ARKEMA; HALL, 1992).

Para uma esfera a difusão de água pode ser demonstrada pela Equação 6.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = De \left(\frac{\partial^2 M}{\partial r^2} + \frac{2}{r} \frac{\partial M}{\partial r} \right) \quad (6)$$

Na resolução da segunda lei de Fick em coordenadas esféricas é alcançada por Crank (1975), segundo a seguinte Equação 7.

$$MR = \frac{(Mt - Ms)}{(Mo - Ms)} = \frac{6}{\pi^2} + \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n^2} \exp \left(\frac{-Den^2\pi^2t}{r^2} \right) \quad (7)$$

Onde temos, M sendo o teor de umidade em função do tempo, De a difusividade efetiva, r a coordenada radial e t o tempo. Assumindo a partícula como esfera, é obtida uma solução analítica, desconsiderando a variação de volume ao longo da hidratação, resistência de transporte da massa desprezível na interface líquido-sólido, coeficiente de difusão constante e independente da concentração. Desta forma é obtida a quantidade de água difundida para o interior do grão num dado momento. Durante um prolongado período de imersão, a solução na forma de somatória é simplificada implicando somente o primeiro termo, apresentado pela Equação 8.

$$MR = \frac{(Mt - Ms)}{(Mo - Ms)} = \frac{6}{\pi^2} e^{-\left(\frac{De\pi^2t}{r^2}\right)} \quad (8)$$

Mt é o teor de umidade em função do tempo (g/g), Mo é o teor de umidade inicial (g/g), Ms é o teor de umidade na saturação (g/g), De é a difusividade efetiva (m²/s), t é o tempo (h) e r é a coordenada radial (m).

2.6 ENERGIA DE ATIVAÇÃO

A equação de Arrhenius é capaz de demonstrar a relação existente entre o coeficiente de transferência de massa e a temperatura. Através da equação, é possível estimar a energia de ativação no processo de hidratação. A seguir, a equação de Arrhenius é apresentada através da Equação 9. (BOTELHO *et al.*, 2010; RESENDE e CORRÊA, 2007; RESIO *et al.*, 2003; LOPES FILHO, RAMOS e ROMERO, 2006; SEYHAN-GURTAS, AK E EVRANUZ, 2001).

$$k_s = k_0 \cdot e^{-E'/T} \quad (9)$$

Onde k_0 é constante, E' é a energia de ativação e R a constante universal dos gases (8,31kJ/mol).

Através do modelo de Peleg pode-se dizer que a constante k_s da equação de Arrhenius é igual a $1/k_1$, sendo k_1 a taxa de absorção de água de forma a ser inversamente proporcional ao aumento de temperatura, como mostra a Equação 10 a seguir. (SOPADE, AJISEGIRIB e BADAU, 1992; MASKAN, 2002).

$$1/k_1 = k_0 \cdot e^{-E'/T} \quad (10)$$

Onde k_0 é a constante de proporcionalidade, T a temperatura em Kelvin, $E'=E_a.R^{-1}$, e R é a constante universal dos gases (8,314 J/K.mol) (SOPADE *et al.*, 1992; RESENDE E CORRÊA, 2007; BOTELHO *et al.*, 2013). A Tabela 1 apresenta alguns estudos e seus respectivos valores de energia de ativação.

TABELA 1 - VALORES DE ENERGIA DE ATIVAÇÃO PARA DIFERENTES GRÃOS NO PROCESSO DE HIDRATAÇÃO

Grão	Variedade	Ea (kJ/mol)	Temperatura (°C)	Autor
Feijão	Vermelho	6,74	20-50	Resende e Corrêa (2007)
Feijão	NSTR	37,83	25-100	Jideani e Mpotokwana (2009)
	BotR	39,69	25-100	
	DipC1	33,02	25-100	
	DipC2	33,33	25-100	
	AS17	16,46	25-100	
Feijão	Battal	41,9	15-40	Seyhan-Gurtas, Ak e Evranuz (2001)
	Dermason	40,4	15-40	
	Horoz	33,6	15-40	
	Seker	50,8	15-40	
Amaranto	-	32,1	30-60	Resio et al. (2003)
Grão-de-bico	Kusbasi	48,6	15-40	Seyhan-Gurtas, Ak e Evranuz (2001)
	Koçbasi	49,8	15-40	
Feijão	Mahali Khomein	86,77	5-45	Shafaei, Masoumi, Roshan (2014)

2.7 OPERAÇÃO PERIÓDICA

A operação periódica é realizada mediante a modulação de uma variável do processo entre um ou mais níveis para evitar que seja atingido o estado estacionário. Existem vários tipos de operação periódica que podem ser adotados para melhorar a performance do processo. A peculiaridade desta técnica de contato é que ela força a permanência em regime transiente do processo por um tempo maior do que em regime estacionário. Neste tipo de operação, o rendimento torna-se uma quantidade estimada como uma média no tempo (SILVESTON, 1998).

A operação periódica é raramente conhecida. Qualquer reator catalítico heterogêneo no qual o catalisador necessita ser regenerado *in situ* opera periodicamente. Normalmente os períodos encontrados para sistemas envolvendo a regeneração catalítica são medidos em dias, em meses ou até mesmo em anos. Em tais casos, o reator opera em estado estacionário na escala fixada pelo tempo de residência dos reagentes no sistema. Esta é uma importante diferença entre os sistemas (SILVESTON, 1998). Na operação transiente proposta neste trabalho, ao ser estabelecida a modulação da variável, pretende-se que a variável permaneça transiente durante todo o tempo. A composição da modulação é uma técnica de contato que com maior frequência é alternada em uma série temporal do que em função do espaço, ou seja, do equipamento.

Esta técnica vem sendo estudada em sistemas reativos nas últimas décadas para melhorar a performance de reatores, quer seja associada a um maior rendimento ou a um ganho na seletividade. E vem crescendo o seu estudo aplicado a processos físicos, como por exemplo os de secagem, verificando se existe ganho energético e em alguns casos se é possível alcançar uma melhor qualidade dos produtos mediante a operação periódica (PUTRANTO, et al. 2011)

Chua et al. (2003) observaram experimentalmente que foi possível melhorar a qualidade de goiaba seca em secagem com modulação da temperatura do ar em comparação a secagem com fornecimento de ar a uma

temperatura fixa. Eles observaram que a quantidade de ácido ascórbico presente na goiaba seca foi 20% superior mediante secagem periódica. Segundo Defendi et al (2014) em seu estudo de secagem periódica de soja, observou que a esta operação pode ser mais vantajosa se comparado à secagem convencional, potencializando o transporte de energia e massa comparado à secagem convencional, considerando uma situação na qual as duas operações tenham o mesmo gasto energético. Defendi mostra que esta nova operação aumentou as taxas de secagem, comparadas à secagem a temperatura constante. Foi relatado que quanto maior a diferença de modulação entre a temperatura constante, maior foi a quantidade de água evaporada (DEFENDI *et al.*, 2014b).

Este método de operação consiste em uma nova metodologia como alternativa para a realização da hidratação, a fim de reduzir custo por meio desta operação periódica. Onde pode ocorrer a potencialização dos transportes de massa e energia que estão envolvidos no processo possibilitando um menor consumo de energia.

Neste contexto, este trabalho procura contribuir com o estudo da operação periódica focando a operação periódica na hidratação de grãos de feijão. O trabalho também contribui no ajuste de modelos para a hidratação de três cultivares de feijão, operando tanto isotermicamente (convencional) quanto periodicamente.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

As três amostras de feijão, da safra 2014/2015 produzidas em Goiás foram doadas pela Empresa Brasileira de Pesquisa e Agropecuária (EMBRAPA) – EMBRAPA Arroz e Feijão, do município de Santo Antônio do Goiás – GO, sendo as seguintes cultivares BRS Campeiro, BRS Esplendor, BRS Esteio, que foram utilizados para os experimentos de hidratação. Os grãos foram limpos manualmente para retirar sujidades e qualquer material estranho.

3.1 COMPOSIÇÃO CENTESIMAL DOS GRÃOS

As análises de composição do feijão foram efetuadas no laboratório de Pós-Graduação em Engenharia de Alimentos da Universidade Federal do Paraná. As análises de fibras e cinzas no laboratório de Análise Sensorial (CTA-7) do Departamento de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Ponta Grossa. Todas estas análises foram executas em triplicata.

3.1.1 Umidade

O teor de umidade das amostras foi estimado segundo o método de secagem em estufa a 105° C por 24 horas (INSTITUTO ADOLF LUTZ, 1985).

3.1.2 Cinzas

O teor de cinzas foi determinado pelo método de incineração da amostra em mufla a 550° C, pelo método 923.03 descrito AOAC (AOAC, 1995).

3.1.3 Proteínas

O teor de nitrogênio da amostra foi determinado segundo método de Kjeldahl, descrito na metodologia 920.87 da AOAC (AOAC, 1995). Usando 6,25 como fator de conversão do nitrogênio presente em proteína bruta.

3.1.4 Lipídios

O teor de lipídios foi determinado pelo aparelho de extração de Soxhlet, segunda a metodologia 920.85 descrita na AOAC (AOAC, 1995).

3.1.5 Fibra

O teor de fibras foi determinado no laboratório da Universidade Estadual de Ponta Grossa, segundo o Instituto Adolfo Lutz (2008)

3.2 MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA

As análises foram realizadas no Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná, com amostras de feijão *in-natura* e retiradas da hidratação décima hora de hidratação, para analisar a mudança estrutural do grão.

3.3 METODOLOGIA DOS ENSAIOS DE HIDRATAÇÃO

As amostras foram colocadas em uma forma contendo água destilada na proporção de 1:3 (v/v), com temperatura constante em um banho termostático. As amostras foram retiradas em triplicata nos intervalos de tempo determinados de 0, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 90, 120, 150, 180, 210, 240, 300, 360, 420, 480, 510, 540, 570 e 600 minutos e secas superficialmente com papel toalha para que a água superficial fosse eliminada e não interferisse nos resultados.

Aproximadamente 5 gramas de amostra foram pesadas e transportadas para estufa à 105 °C/24h para o cálculo da umidade.

A umidade das amostras em bulbo úmido (X_{bu}) foi determinada em cada intervalo de tempo de acordo com a Equação 11.

$$X_{bu}(\%) = \frac{x_i - x_f}{x_i} \cdot 100 \quad (11)$$

Onde x_i representa o peso da amostra úmida e x_f a amostra seca.

3.3.1 Hidratação convencional

A hidratação convencional usou apenas um banho termostático, mantendo-se o grão durante todo o ensaio de hidratação no recipiente com água destilada. Foram realizados ensaios nas temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C +/- 1°C.

3.3.2 Hidratação periódica

Na hidratação periódica foram utilizados dois banhos termostáticos, montou-se um dispositivo, similar a um coador, onde os grãos estavam imersos em água destilada dentro deste dispositivo, e a cada 30 min eram retirados do banho termostático, drenados, para que somente os grãos fossem imersos em outro banho termostático contendo água destilada a temperatura de modulação desejada. Os ensaios foram realizados nas temperaturas de 30-50°C, 40-60°C e 50-70°C, que permaneceram até o fim da hidratação. A Figura 1 apresenta a diferença entre a hidratação convencional a 40°C e a hidratação periódica com modulação da temperatura, 30-50°C (junto com a umidade experimental). A cada operação periódica, ocorreu uma operação convencional efetuada com a temperatura da água constante no valor igual à média da temperatura na operação periódica.

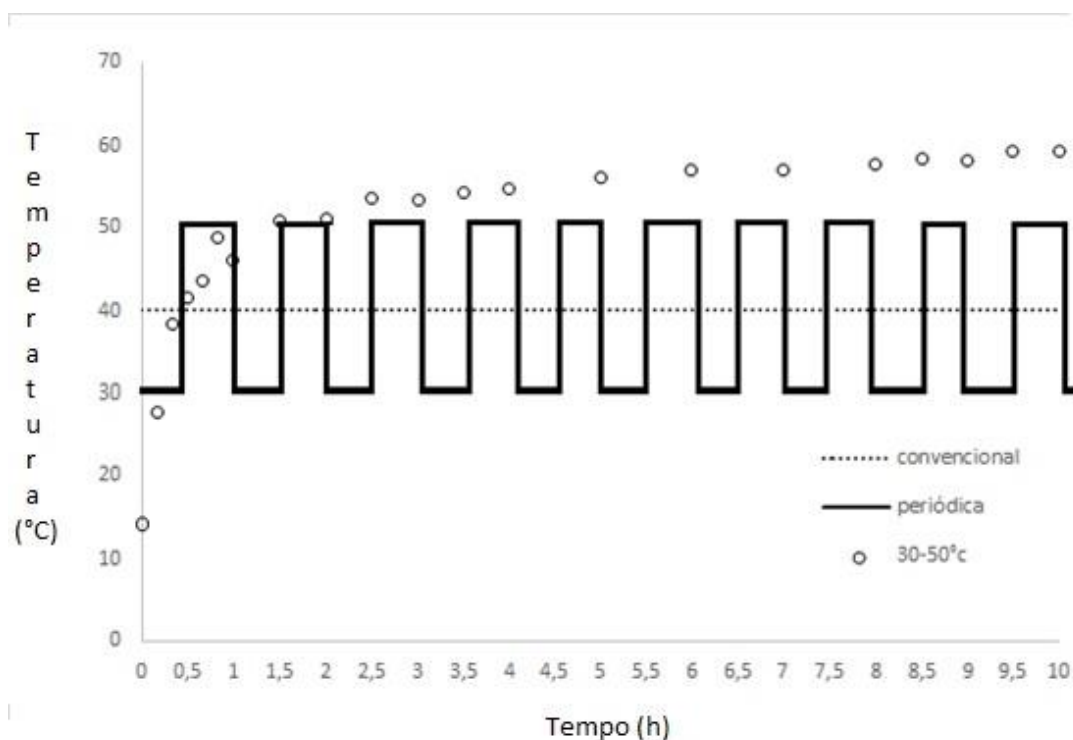


FIGURA 1 – DIFERENÇA DA OPERAÇÃO CONVENCIONAL E OPERAÇÃO PERIÓDICA FRENTE A UMIDADE EXPERIMENTAL EM 30-50°C

3.4 DETERMINAÇÃO DA DENSIDADE

Uma parte da amostra foi utilizada para medir sua densidade (d). Onde 20 grãos de feijão foram destinados a pesagem e transferidos para uma proveta graduada de 50 mL contendo 25 mL de água destilada. O volume deslocado foi utilizado para determinar a densidade do feijão conforme a Equação 12, sendo m a massa dos 20 grãos e V o volume deslocado na proveta.

$$d = \frac{m}{V} \quad (12)$$

3.5 AJUSTE DOS MODELOS

3.5.1 Ajuste do modelo de Peleg

A Equação 1 pode ser linearizada obtendo a Equação 13, resultando os parâmetros k_1 e k_2 .

$$\frac{t}{Xbu(t) - Xbuo} = k_1 + k_2t \quad (13)$$

O ajuste do modelo de Peleg aos dados experimentais permite gerar os novos valores de k_1 e k_2 . A constante k_2 é obtida pela média de seus valores, para a constante k_1 é obtido uma equação por regressão linear de k_1 em função da temperatura.

3.5.2 Ajuste do modelo de Parâmetros concentrados

O ajuste do modelo de parâmetros concentrados é obtido a partir da Equação 5,

$$\ln\left(\frac{\rho_{Aeq}-\rho_A}{\rho_{Aeq}-\rho_{A0}}\right) = -\frac{3K_S}{r_0}t \quad (14)$$

Onde a constante K_S é obtida pela equação de regressão linear de K_S em função da temperatura.

3.5.3 Ajuste do modelo de difusão

O ajuste do modelo de difusão aos dados experimentais de hidratação do feijão permite obter-se informações importantes, como por exemplo a estimativa a difusividade efetiva da água na matriz do grão.

A difusividade efetiva foi obtida a partir do ajuste da Equação 8, aos dados experimentais, para cada uma das condições térmicas estudadas, mediante regressão linear de $\ln(MR)$ em função do tempo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO DOS DIFERENTES CULTIVARES DE FEIJÃO

A cinética representa o teor de umidade dos grãos de feijão no decorrer da hidratação. As curvas são típicas dos produtos agrícolas, onde nos instantes iniciais, que ocorre o contato do grão com a água, a absorção é instantânea e ocorre a uma taxa acelerada de absorção de água, esta fase é chamada de transiente. Na fase intermediária, a taxa de absorção é reduzida, esta fase representa o tempo em que o grão consegue chegar próximo a sua umidade de equilíbrio. Na fase permanente, ocorre a absorção de água relacionada a umidade de equilíbrio do grão, onde nesta etapa pode ocorrer a perda e ganho de água, à medida que o produto está perto de atingir a umidade de equilíbrio (MARQUES *et al*, 2014). Este fator é decorrente da rápida absorção de água que a camada externa consegue absorver e também pelo alto gradiente entre os tecidos do grão e o meio (BELLO, TOLABA e SUÁREZ, 2004; BOTELHO *et al.*, 2013).

A temperatura tem efeito na velocidade inicial de hidratação, diminuindo o tempo em que o grão alcança o teor de umidade de equilíbrio (MARQUES, 2014).

A cinética dos cultivares BRS Campeiro, BRS Esplendor e BRS Esteio na hidratação convencional estão representadas na Figura 2. A cinética da hidratação periódica para os 3 cultivares está apresentada na Figura 3. A umidade de equilíbrio está apresentada na Tabela 2 para a hidratação convencional e na Tabela 3 para a hidratação periódica.

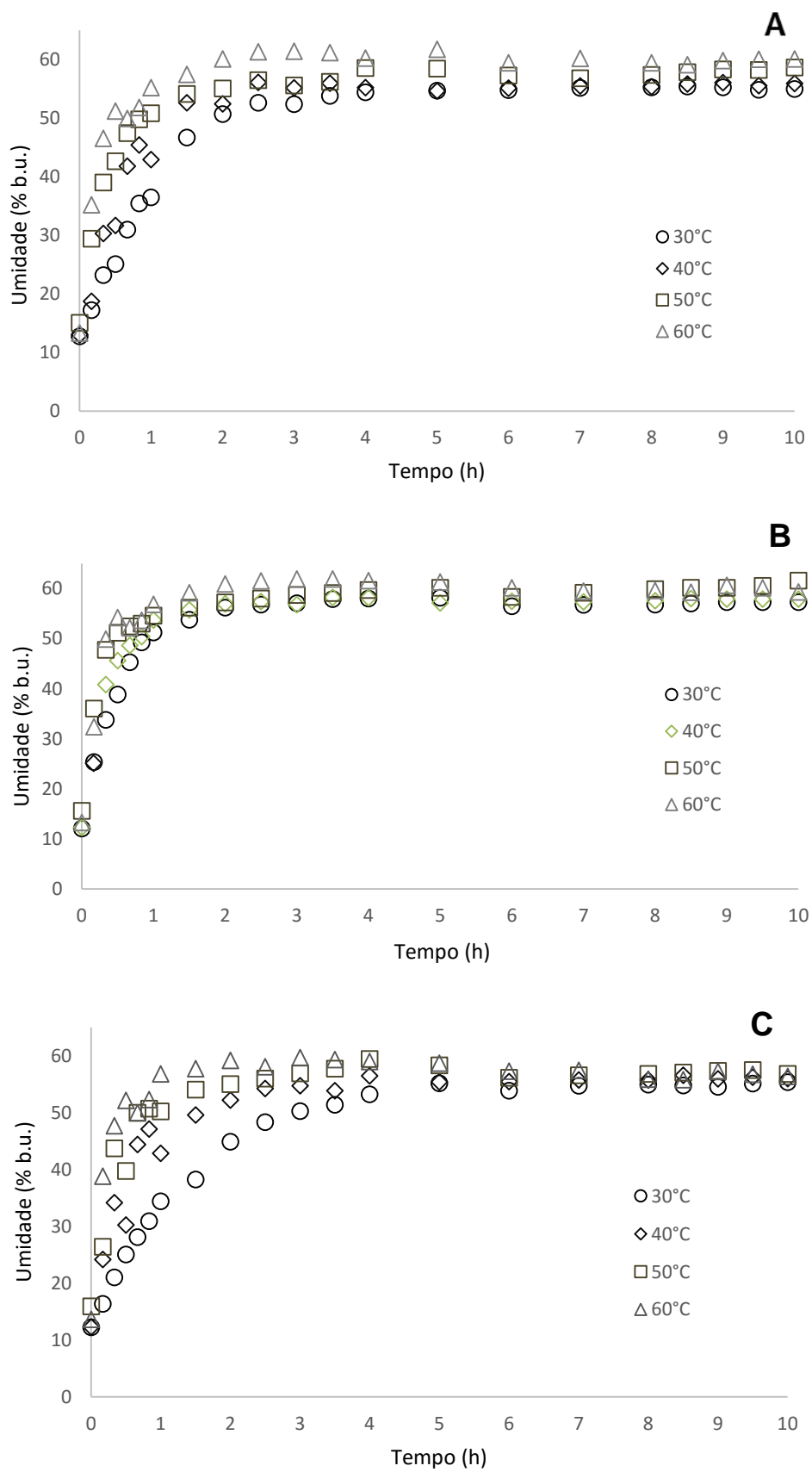


FIGURA 2 - CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL DO CULTIVAR BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C)

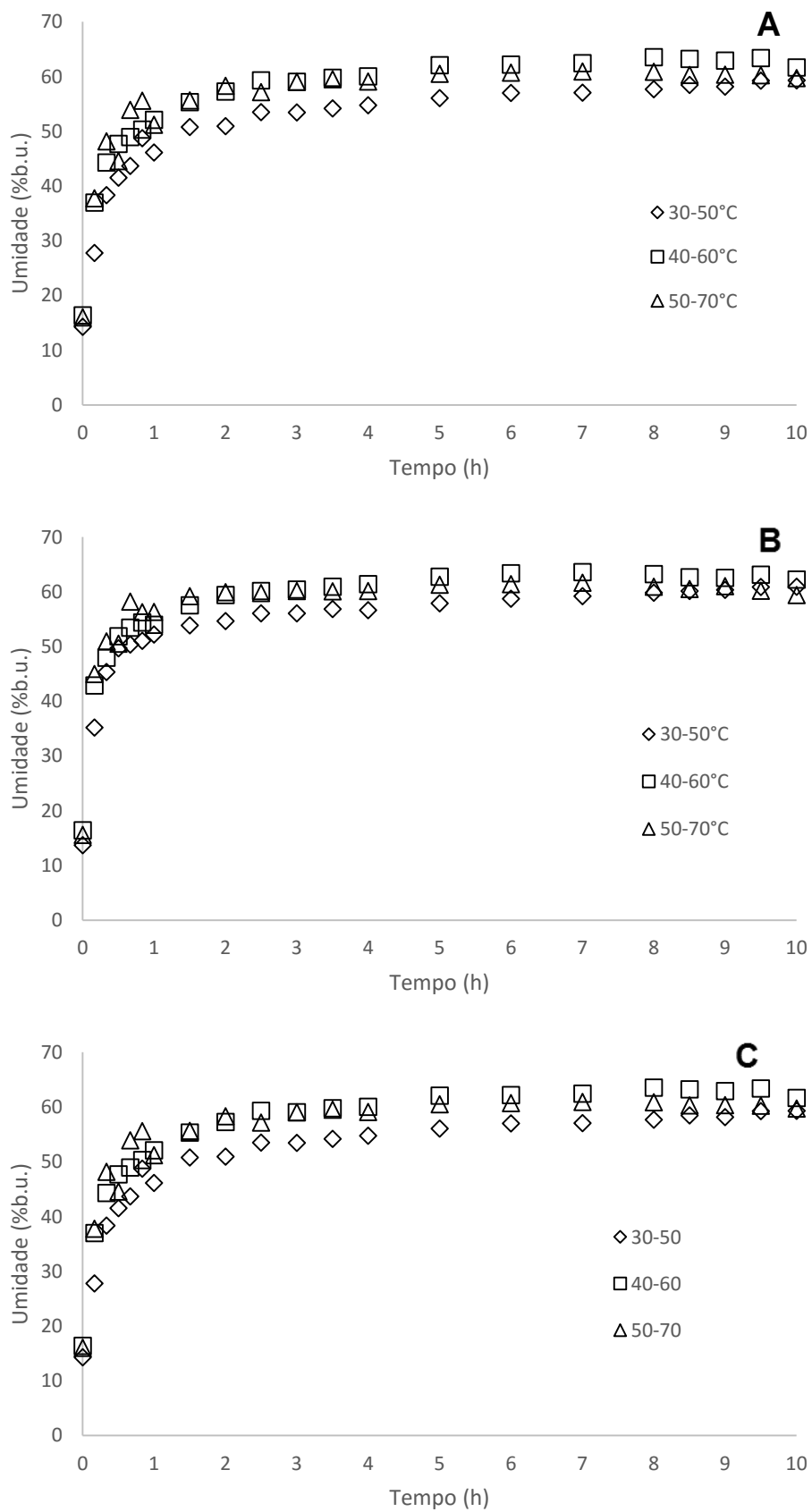


FIGURA 3 - CINÉTICA DE HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL DO CULTIVAR BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C)

TABELA 2 – TEOR DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO PARA OS TRÊS CULTIVARES DE FEIJÃO NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

Cultivar	Temperatura (°C)	Ueq (%b.u.)
CAMPEIRO	30	54,98
	40	55,91
	50	58,66
	60	60,10
ESPLENDOR	30	57,28
	40	57,91
	50	61,57
	60	59,31
ESTEIO	30	55,38
	40	56,02
	50	56,84
	60	56,40

TABELA 3 – TEOR DA UMIDADE DE EQUILÍBRIO PARA OS TRÊS CULTIVARES DE FEIJÃO NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

Cultivar	Temperatura (°C)	Ueq (%b.u.)
CAMPEIRO	30-50	59,31
	40-60	61,65
	50-70	59,72
ESPLENDOR	30-50	60,91
	40-60	62,23
	50-70	59,42
ESTEIO	30-50	58,58
	40-60	59,41
	50-70	56,93

Como podemos observar nas Tabelas 2 e 3 para os três cultivares, a hidratação periódica obteve maior teor da umidade no equilíbrio, para o BRS Campeiro a hidratação periódica para a modulação, 30-50°C, obteve uma umidade de equilíbrio 3,4% maior comparada a hidratação convencional a 40°C. Para a variação de 40-60°C a umidade de equilíbrio se mostrou 2,99% a mais que na hidratação convencional a 50°C.

O BRS Esplendor obteve maiores valores de umidade de equilíbrio para a hidratação periódica nas modulações de 30-50°C e 40-60°C, comparadas a hidratação convencional nas temperaturas de 40 e 50°C, obtendo 3% e 0,66%, respectivamente. O cultivar BRS Esteio também apresentou resultados

semelhantes, onde na modulação de 30-50°C apresentou 2,56% a mais de umidade de equilíbrio que a hidratação convencional a 40°C. Para a variação de 40-60°C foi obtido um valor 2,57% a mais de umidade de equilíbrio que para a temperatura de 50°C para a hidratação convencional

Embora na temperatura de 60°C da hidratação convencional, a umidade de equilíbrio tenha sido quase igual, se comparada a modulação de temperatura de 50-70°C para a hidratação periódica. Isto mostra uma vantagem nesse novo tipo de hidratação, sendo que no mesmo tempo de imersão, é alcançado uma maior porcentagem de umidade no grão.

Para algumas espécies de cereais a umidade de saturação aumenta quando ocorre um aumento na temperatura, esse fato foi relatado por Resio *et al.* (2006) e Sopade e Obekpa (1990), porém é decrescente para ervilha no estudo feito por Singh e Kulshrestha (1987).

O cultivar BRS Campeiro e BRS Esteio apresentam umidade de equilíbrio maior com o aumento da temperatura, o cultivar Esplendor apresentara um comportamento semelhante, porém na temperatura de 50°C o valor de umidade de equilíbrio foi ligeiramente maior que a 60°C, esse fato pode ser explicado pela perda de sólidos solúveis do grão de feijão.

De acordo com Bayram *et al.* (2004) o processo de hidratação se inicia quando ocorre a transferência da água para o grão, no decorrer deste processo a água entra e é difundida no produto e os sólidos solúveis se dissolvem na água. O soluto é transportado do grão para água, essa transferência significa a perda de sólidos.

Segundo Abu-Ghannan e McKenna (1997) o decréscimo da umidade de saturação devido ao aumento da temperatura tem relação direta com a perda de sólidos solúveis durante a hidratação, uma vez que esse fato não é considerado nos cálculos do teor de água no grão.

Quando o feijão se encontra na faixa de estabilização, onde ganha e perde sólidos com mais facilidade devido ao equilíbrio do sistema, o grão chega na situação homogênea, a taxa de absorção de água diminui. Com o decorrer da hidratação a velocidade diminui acentuadamente, ocorrendo a estabilidade (SAYAR *et al.*, 2001; MARQUES *et al.*, 2014; THAKUR E GUPTA 2006; KASHANINEJAD *et al.*, 2007; OMOTO *et al.*, 2009 e KORNARZYŃSKI *et al.*, 2002).

Pesquisadores como (QUAST e da SILVA, 1977; KON, 1979; SOPADE e OBEKPA, 1990; ABU-GHANNAM e MCKENNA, 1997a; TANG *et al*, 1994; HUNG *et al*, 1993, HSU *et al*, 1983 e SEYHAN-GÜRTAS *et al*, 2001; MASKAN, 2002) observaram que aumentar a temperatura de hidratação é um método de acelerar a absorção de água no grão, reduzindo o tempo de imersão do produto.

A absorção de água de maneira rápida no início do processo pode ocorrer devido a presença de fissuras ou poros no grão, permitindo ação capilar na superfície, conduzindo a absorção de umidade no grão. A casca também tem função protetora e reguladora, controlando a velocidade de absorção de água, prevenindo de danos que podem ser causados pelas pressões desenvolvidas na hidratação. Se o aumento da temperatura for favorável ao rompimento da casca, o grão tem alterações irreversíveis (TAGAWA *et al*, 2003; KASHANINEJAD *et al*, 2009; CAVARIANI *et al*, 2009; BOTELHO *et al*, 2010; ELIAS *et al*, 2003 e VOLPE, 2014).

4.2 ANÁLISES DA COMPOSIÇÃO CENTESIMAL FUNDAMENTAL E ANATÔMICA

Os três cultivares de feijão preto doados pela EMBRAPA, foram submetidas as análises físico-químicas de cinzas, fibras, lipídeos, proteínas e umidade. Estes valores estão representados na Tabela 4.

TABELA 4 – ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS PARA OS CULTIVARES DE FEIJÃO

Componente (%)	Campeiro	Esplendor	Esteio
Cinzas	4,20±0,06	4,39±0,04	4,08±0,02
Fibras	3,76±0,09	4,83±0,08	4,56±0,10
Lipídeos	1,54±0,21	1,25±0,06	2,15±0,13
Proteínas	21,95±1,23	22,53±1,16	21,04±1,09
Carboidratos	55,18±1,00	54,28±0,75	55,70±1,14
Umidade	13,37±0,30	12,72±0,66	12,47±0,79

Os carboidratos para estes três cultivares foram calculados por diferença, onde % carboidrato = [100 – (cinzas% + fibras% + lipídeos% + proteínas% + umidade%)].

Autores como Pires et al. (2005) encontraram resultados parecidos para feijão preto da espécie Diamante Negro, com 3,96% de cinzas, 1,43% de lipídeos, 22,75% de proteínas e 58,49% de carboidratos. Para o cultivar Ouro Negro a porcentagem de cinzas foi de 3,87%, lipídeos 1,21%, proteínas 18,17% e carboidratos de 63,03%.

A análise de microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi realizada para os três cultivares de feijão, a uma tensão de 15Kvolts e baixo vácuo (10Pa). Pode-se notar que o grão *in-natura*, ou seja, sem hidratar apresenta as células vegetais intactas, já na décima hora de hidratação, é observado que a parede celular sofreu alterações bruscas, modificando a estrutura morfológica do grão. Na Figura 4 são apresentados as imagens dos cultivares, representados pelo grão *in-natura* e o grão ao final da hidratação, todos os cultivares em todas as temperaturas analisadas tiveram o mesmo resultado, tanto na hidratação convencional, como na hidratação periódica.

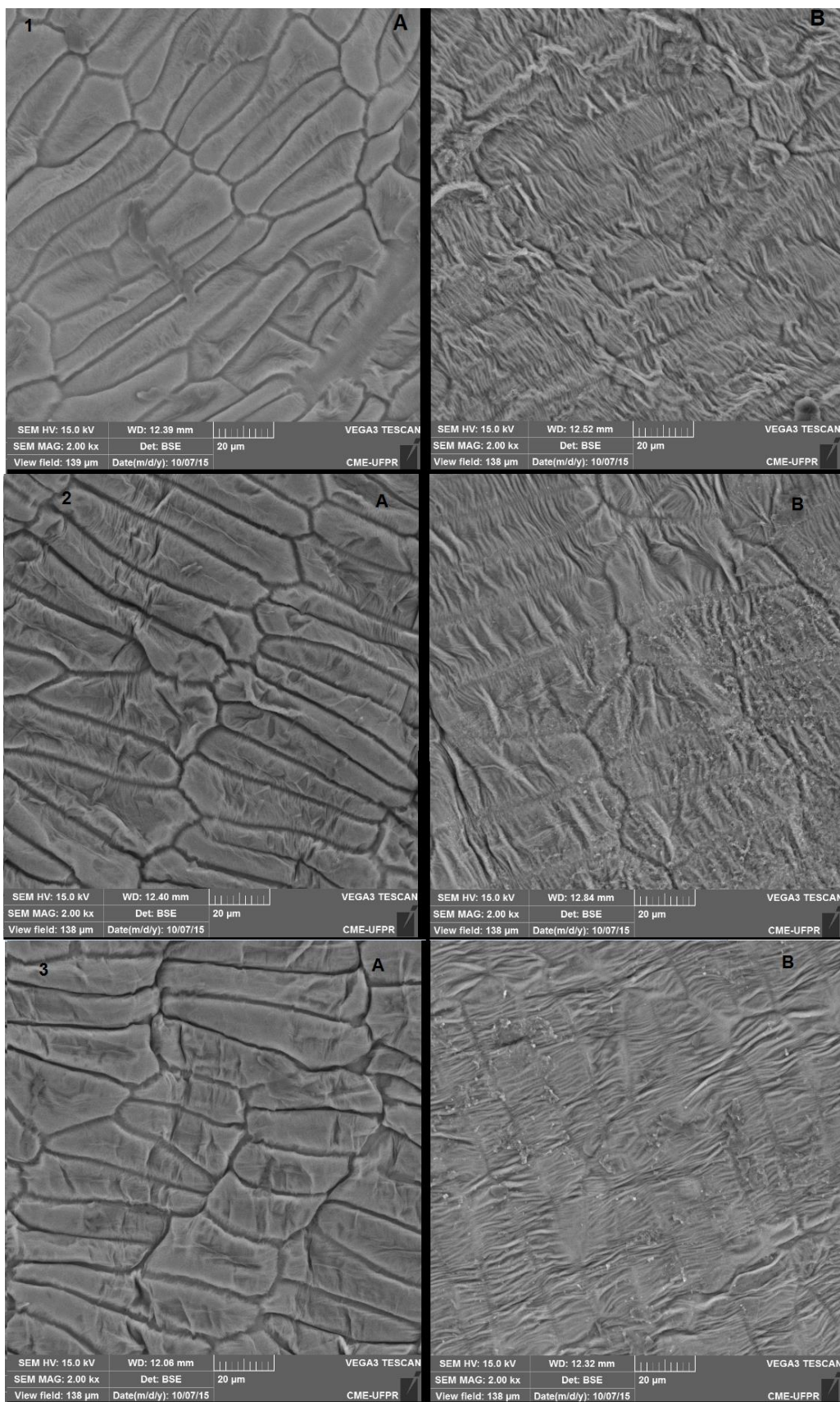


FIGURA 4 – IMAGEM DA MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) PARA OS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (1), BRS ESPLENDOR (2), BRS ESTEIO (3), NO GRÃO IN-NATURA (A) E NA DÉCIMA HORA DE HIDRATAÇÃO (B) AUMENTADO EM 2000 VEZES

4.3 AJUSTE DO MODELO EMPÍRICO DE PELEG

Por meio da equação 2 foi obtido o valor das constantes do modelo de Peleg, k_1 e k_2 , por regressão linear para cada temperatura analisada.

Os valores obtidos de k_1 e k_2 na hidratação convencional são mostrados na Tabela 5 e para a hidratação periódica são apresentados conforme a Tabela 6.

TABELA 5 – PARÂMETROS DO MODELO DE PELEG PARA OS TRÊS CULTIVARES

Cultivar	Temperatura (°C)	k_1 (h.%b.u ⁻¹)	k_2 (%b.u ⁻¹)
CAMPEIRO	30	0,0189	0,0211
	40	0,0098	0,0211
	50	0,0056	0,0226
	60	0,0018	0,0212
ESPLENDOR	30	0,0046	0,0216
	40	0,0036	0,0215
	50	0,0040	0,0219
	60	0,0009	0,0213
ESTEIO	30	0,0224	0,0206
	40	0,0080	0,0218
	50	0,0046	0,0236
	60	0,0004	0,0232

TABELA 6 – PARÂMETROS DO MODELO DE PELEG PARA OS TRÊS CULTIVARES NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

Cultivar	Temperatura (°C)	k_1 (h.%b.u ⁻¹)	k_2 (%b.u ⁻¹)
CAMPEIRO	30-50	0,0093	0,0216
	40-60	0,0064	0,0208
	50-70	0,0038	0,0221
ESPLENDOR	30-50	0,0074	0,0217
	40-60	0,0068	0,0210
	50-70	0,0026	0,0216
ESTEIO	30-50	0,0120	0,0218
	40-60	0,0043	0,0221
	50-70	0,0033	0,0233

A constante k_1 é influenciada com a taxa de transferência de massa, sendo que quanto menor seu valor, maior será a taxa inicial de absorção de água (TURHAN, SAYAR E GUNASEKARAN, 2002). Os resultados obtidos por Resende e Corrêa (2007) que analisaram a hidratação do feijão vermelho, demonstraram que a absorção de água nos primeiros instantes da hidratação ocorre a uma taxa mais acelerada comparada com outras etapas do processo. Essa absorção acelerada ocorre pela capilaridade natural contida nas camadas externas do feijão, que estão localizadas próximas ao hilo (Figura 5) e ao processo de difusão.

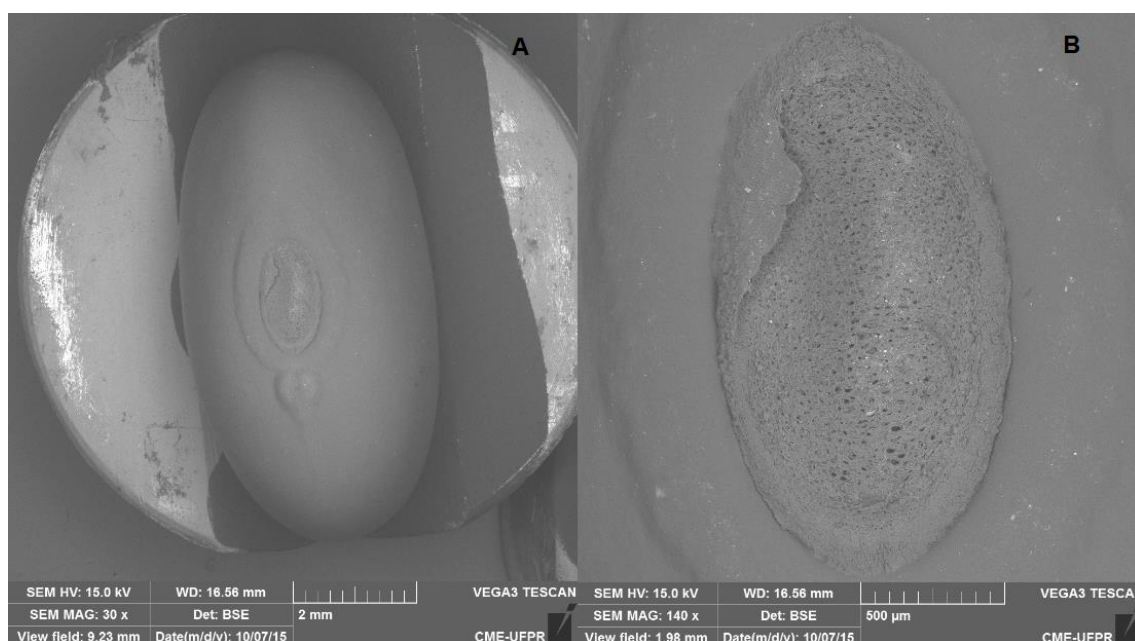


FIGURA 5 – MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DO FEIJÃO (A), COM DESTAQUE PARA O HILO (B)

Segundo PEREZ *et al.*, 2011, MASKAN, 2002 e TURHAN *et al.*, 2002 a constante k_1 que está associada à transferência de massa e apresenta uma relação com o coeficiente de difusão aparente.

Os três cultivares analisadas tiveram decréscimo da constante k_1 conforme a temperatura foi aumentando, sinalizando o aumento da velocidade inicial de hidratação. Este comportamento foi observado com diferentes tipos de feijão nos estudos de Resende e Corrêa, (2007), Abu-Ghannam e Mackenna (1997), Jideani e Mpotokwana (2009).

A constante k_2 está relacionada com a capacidade de absorção de água, quanto menor seu valor, maior será a capacidade de absorção do produto no equilíbrio (TURHAN, SAYAR e GUNASEKARAN, 2002).

García-pascual *et al.* 2005 apontaram que se ocorrer variação nas propriedades do grão, ou se sua estrutura for modificada pela temperatura ao longo da hidratação os valores de k_2 tendem a mudar (MARQUES, 2014).

De acordo com Abu-Ghannam e Mackenna (1997) que realizaram um estudo envolvendo o feijão vermelho, o aumento da constante k_2 com a temperatura pode ser devido a liberação de sólidos solúveis do grão para a água de hidratação.

O cultivar BRS Esteio apresentou uma tendência de aumento de k_2 conforme o aumento da temperatura para os dois tipos de hidratação, porém o cultivar BRS Campeiro e BRS Esplendor tiveram esse comportamento somente sob 30 e 40°C na hidratação convencional e variaram em 50 e 60°C, devido ao fato de ocorrer maior perda de sólidos nessas temperaturas. Na hidratação periódica somente o BRS Esteio seguiu uma tendência de aumentar o valor de k_2 com o aumento da temperatura, o BRS Campeiro e BRS Esplendor não seguiram uma tendência, devido a mudança de temperatura durante a imersão, sendo que o grão demora um tempo para se estabilizar quando é submetido a troca de temperatura, fazendo com que o grão adquira temperaturas muito variadas até sua estabilização. Abu-Ghannam e Mackenna (1997) obtiveram resultados semelhantes aos apresentados, onde em temperaturas mais baixas seu valor de k_2 tende a aumentar, porém em temperaturas entre 40 e 60°C a constante teve uma variação não regular.

Segundo Jideani e Mpotokwana (2009) que estudou a hidratação de feijão bambara (*Vigna subterranean (L.) Verdc.*), o valor de k_2 foi aumentando nas faixas de 25 a 75°C, sinalizando que a capacidade de absorção de água diminui com a elevação da temperatura. Na temperatura de 100°C o valor da constante foi significativamente menor comparado as outras faixas estudadas, mostrando que a umidade de equilíbrio foi maior nesta temperatura. Esse fato foi justificado devido ao rompimento dos tecidos do feijão e quebra celular.

4.4 MODELO PARÂMETROS CONCENTRADOS

Os valores da constante do modelo fenomenológico de parâmetros concentrados K_s foram obtidos por regressão linear para as três cultivares nas quatro diferentes temperaturas estudadas. Os valores da hidratação convencional estão representados na Tabela 7 e da hidratação periódica na Tabela 8.

TABELA 7 – VALORES DE K_s DO MODELO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS PARA OS 3 CULTIVARES NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

Cultivar	Temperatura (°C)	K_s ($10^{-3} \cdot \text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
CAMPEIRO	30	2,36
	40	3,40
	50	4,52
	60	7,52
ESPLENDOR	30	3,63
	40	3,85
	50	6,43
	60	8,65
ESTEIO	30	1,42
	40	2,61
	50	3,50
	60	0,95

TABELA 8 – VALORES DE K_s DO MODELO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS PARA OS 3 CULTIVARES NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

Cultivar	Temperatura (°C)	K_s ($10^{-3} \cdot \text{cm} \cdot \text{min}^{-1}$)
CAMPEIRO	30-50	3,83
	40-60	5,64
	50-70	6,25
ESPLENDOR	30-50	6,47
	40-60	6,32
	50-70	7,94
ESTEIO	30-50	4,23
	40-60	6,37
	50-70	10,80

Segundo Omoto et al. (2009) a temperatura tem influência no valor de K_s , porém o tipo e espécie do grão também tem interferência significativa no valor da constante.

Os 3 cultivares de feijão apresentaram uma tendência de obter maiores valores de K_s com o aumento da temperatura. Indicando que a velocidade inicial de absorção de água no grão foi maior em temperaturas mais altas (MARQUES, 2014).

Estudos mostram que o acréscimo da temperatura, implica no aumento da constante K_s , como na soja (FRACASSO *et al*, 2010; COUTINHO *et al* 2007; COUTINHO *et al* 2005), na ervilha (OMOTO *et al*, 2009).

4.5 QUALIDADE DE AJUSTE

As curvas de hidratação convencional foram obtidas segundo a predição dos modelos analisados, na Figura 6 são apresentadas as curvas preditas pelo modelo de Peleg e na Figura 7 foram apresentadas as curvas preditas pelo modelo de Parâmetros concentrados.

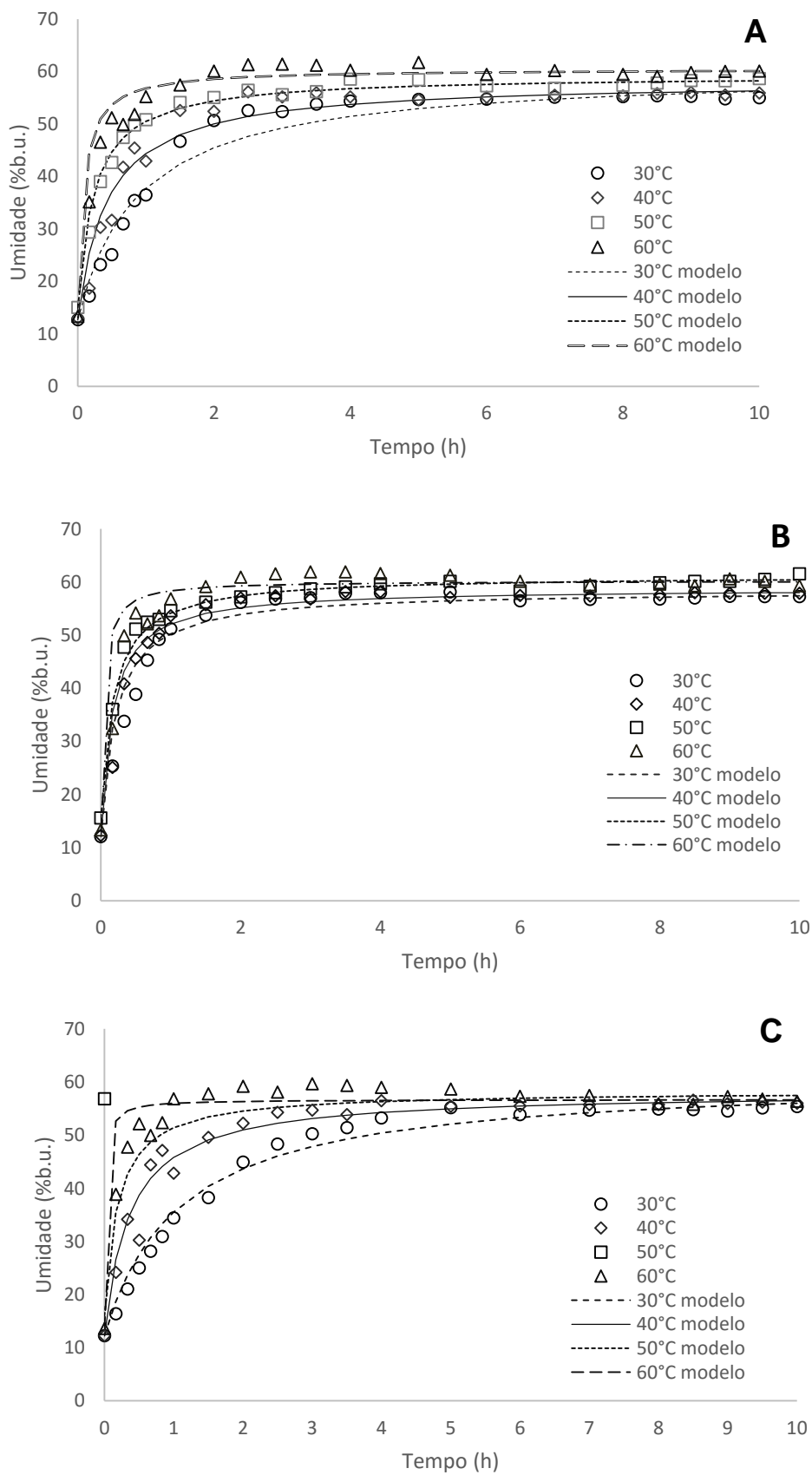


FIGURA 6 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO DE PELEG, BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

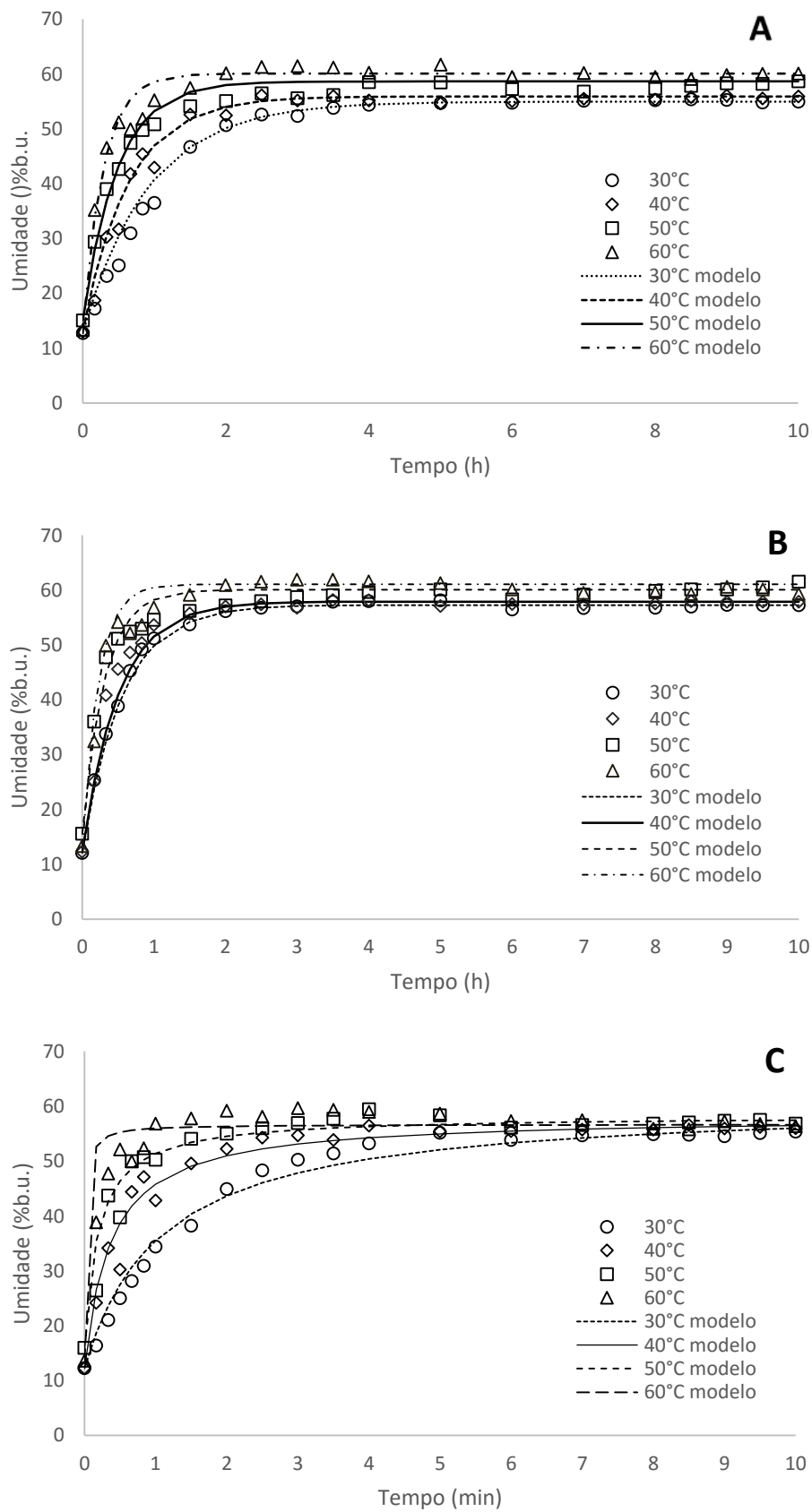


FIGURA 7 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS, BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

As curvas de hidratação periódica foram obtidas segundo a predição dos modelos analisados, na Figura 8 são apresentadas as curvas preditas pelo modelo de Peleg e na Figura 9 foram apresentadas as curvas preditas pelo modelo de Parâmetros concentrados.

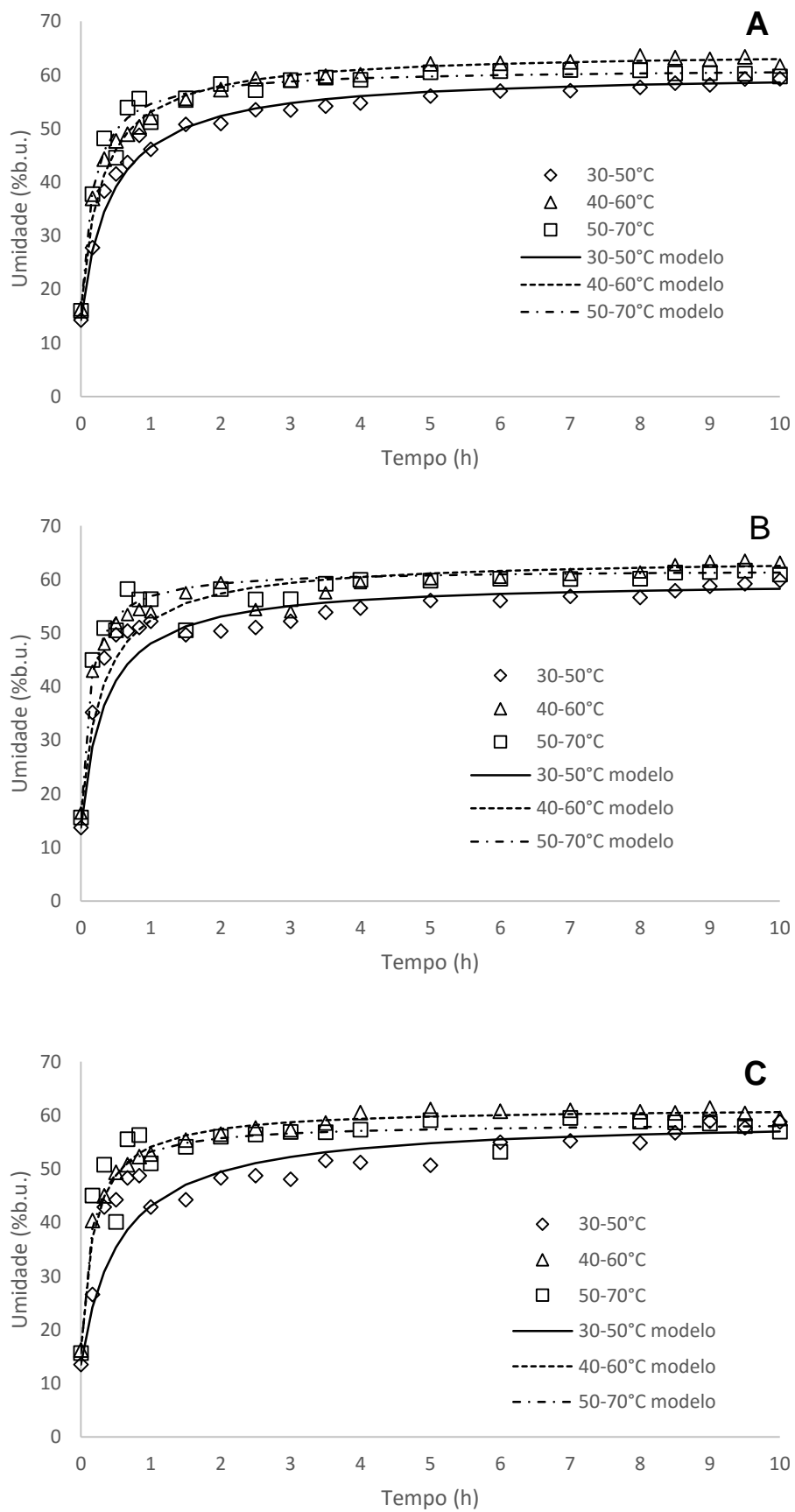


FIGURA 8 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO DE PELEG, BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

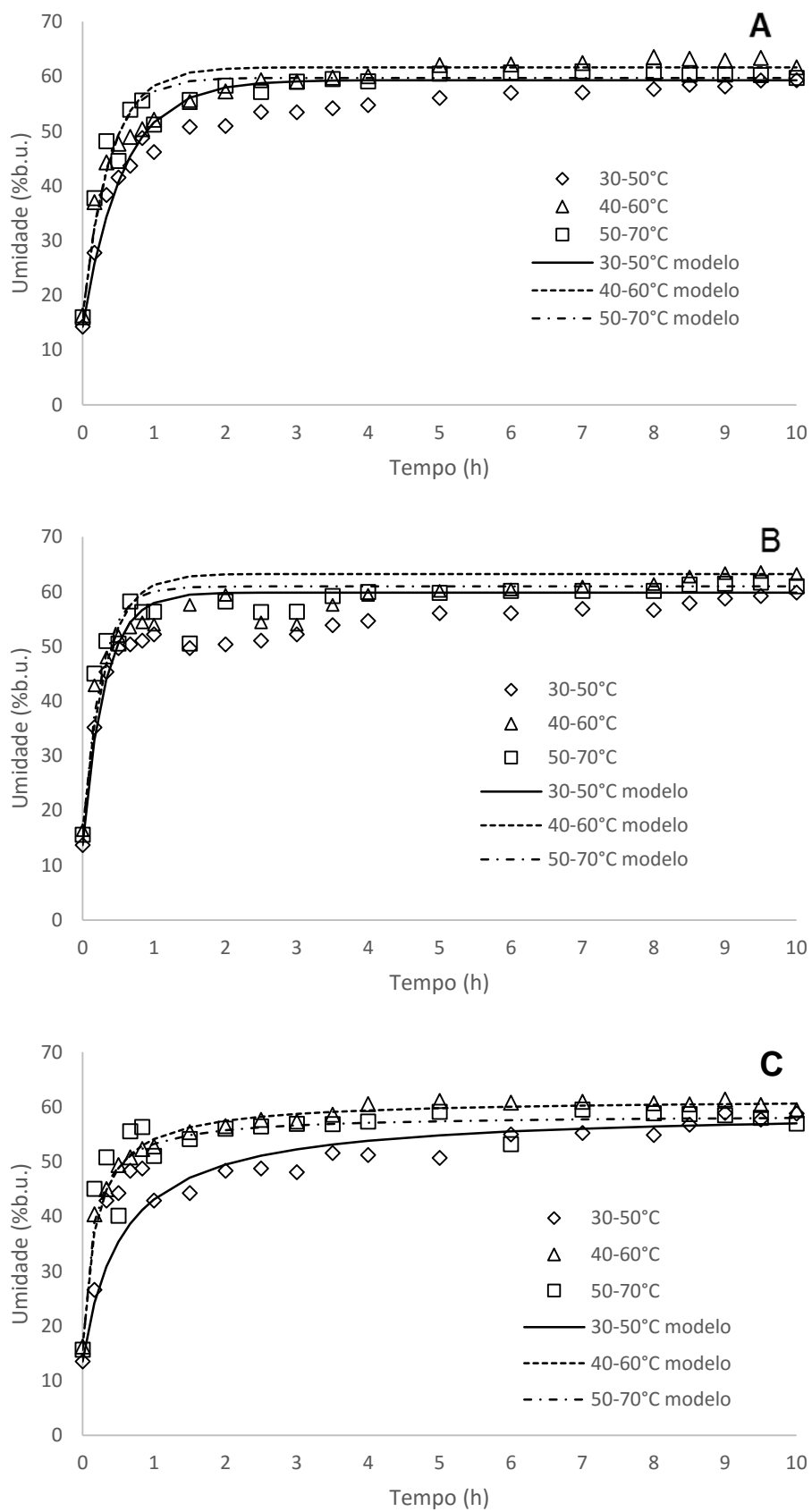


FIGURA 9 - VALORES EXPERIMENTAIS E ESTIMADOS PELO MODELO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS, BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C)

Na Tabela 9 referente aos parâmetros de Peleg e Parâmetros concentrados na hidratação convencional, foi observado que os valores de R² foram maiores para Peleg, embora, os valores dos erros, P (%) e SE (%) foram menores para o modelo de parâmetros concentrados.

TABELA 9 - AJUSTE DO MODELO DE PELEG E DE PARÂMETROS CONCENTRADOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

Modelo	Cultivar	Temperatura (°C)	R ² (%)	P (%)	SE (%b.u.)
Peleg	CA ¹	30	99,14	5,44	2,79
		40	99,57	5,28	2,87
		50	99,94	1,82	1,21
		60	99,91	4,05	3,12
	ER ²	30	99,89	4,47	2,86
		40	99,94	3,48	2,63
		50	99,93	1,26	1,09
		60	99,89	5,55	4,82
	EO ³	30	99,51	4,60	1,97
		40	99,85	3,58	2,47
		50	99,84	3,84	2,81
		60	99,86	5,29	4,22
Parâmetros concentrados	CA ¹	30	97,36	3,97	2,04
		40	92,76	3,18	1,84
		50	96,70	2,60	1,73
		60	97,14	2,54	2,21
	ER ²	30	99,30	1,46	0,92
		40	95,67	2,23	2,10
		50	91,69	2,80	2,08
		60	96,24	3,55	2,78
	EO ³	30	98,84	1,15	0,66
		40	93,48	4,07	2,95
		50	87,98	3,05	3,01
		60	98,61	23,73	17,26

¹CULTIVAR BRS CAMPEIRO

²CULTIVAR BRS ESPLENDOR

³CULTIVAR BRS ESTEIO

Na Tabela 10 referente aos ajustes de Peleg e Parâmetros concentrados na hidratação periódica, observou-se que os valores de R^2 foram maiores para Peleg, e os valores dos erros, P (%) e SE (%) foram menores para o modelo de Peleg, escolhendo assim este modelo para generalizar a hidratação periódica.

TABELA 10 - AJUSTE DO MODELO DE PELEG E DE PARÂMETROS CONCENTRADOS EM FUNÇÃO DA TEMPERATURA NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

Modelo	Cultivar	Temperatura (°C)	R^2 (%)	P (%)	SE (%b.u.)
Peleg	CA ¹	30-50	99,91	2,35	1,61
		40-60	99,92	1,84	1,35
		50-70	99,95	2,12	1,73
	ER ²	30-50	99,69	5,87	4,04
		40-60	99,67	5,40	4,06
		50-70	99,88	2,92	2,56
	EO ³	30-50	99,22	6,94	4,88
		40-60	99,92	1,52	1,11
		50-70	99,61	3,20	3,12
Parâmetros concentrados	CA ¹	30-50	92,00	5,65	3,72
		40-60	67,51	4,65	3,26
		50-70	82,14	2,70	2,58
	ER ²	30-50	93,87	7,76	5,25
		40-60	26,81	6,53	4,79
		50-70	72,86	4,61	3,75
	EO ³	30-50	78,23	10,05	6,65
		40-60	50,29	3,83	2,70
		50-70	96,27	3,19	3,70

¹CULTIVAR BRS CAMPEIRO

²CULTIVAR BRS ESPLENDOR

³CULTIVAR BRS ESTEIO

Os valores foram condizentes com outros pesquisadores de feijão, que estudaram a hidratação com Peleg, como Resende e Corrêa (2007) que apresentaram valores de R^2 entre 99,83 a 99,97%, Abu-Ghannam e McKenna

(1997) obtiveram valor de R^2 , acima de 98%. Jideani e Mpotokwana estudaram cinco cultivares de feijão bambara a 25, 50, 75 e 100°C e obteve valores de R^2 satisfatório, exceto em uma cultivar a 25°C.

Os valores de P (erro relativo), para o modelo de Peleg estiveram abaixo do valor máximo previsto por Mohapatra e Rao (2005) que é de 10%, onde todos os valores de P na hidratação convencional permaneceram abaixo de 5,29%, enquanto que na hidratação periódica estiveram abaixo de 6,94%.

O modelo de Parâmetros concentrados obteve valores de P abaixo de 3,97% na hidratação convencional, a exceção no cultivar BRS Esteio na temperatura de 60°C, onde obteve valores de erros muito elevados, devido a absorção de água excessiva no início da imersão indicando que nesta temperatura o modelo não conseguiu se adequar para modelar a hidratação de grãos de feijão. Enquanto, na hidratação periódica os valores de R^2 e P (%) foram piores comparados à hidratação convencional, obtendo assim os piores ajustes do modelo.

A estimativa do desvio padrão (SE) é outro parâmetro usado para o ajuste de modelos matemáticos. O modelo de Peleg na hidratação convencional apresentou variações de SE entre 1,09 e 4,82%b.u., enquanto que no modelo de parâmetros concentrados o SE apresentou valores entre 0,92 e 3,01%b.u., na hidratação periódica os valores de SE para o modelo de Peleg variou de 1,35 e 4,88% b.u., enquanto que no modelo de parâmetros concentrados a variação ficou entre 2,58 e 6,65%.

Os dois modelos utilizados na hidratação convencional apresentaram bons ajustes, sendo escolhidos para serem generalizados, para a hidratação periódica foi escolhido o modelo de Peleg para ser generalizado, por obtenção dos menores erros e melhores ajustes.

4.6 MODELOS GENERALIZADOS NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

4.6.1 Peleg

Para obtenção do modelo generalizado de Peleg foi usado o valor de k_2 médio para cada cultivar apresentado na Tabela 9 e a equação de regressão para obter k_1 (Figura 10).

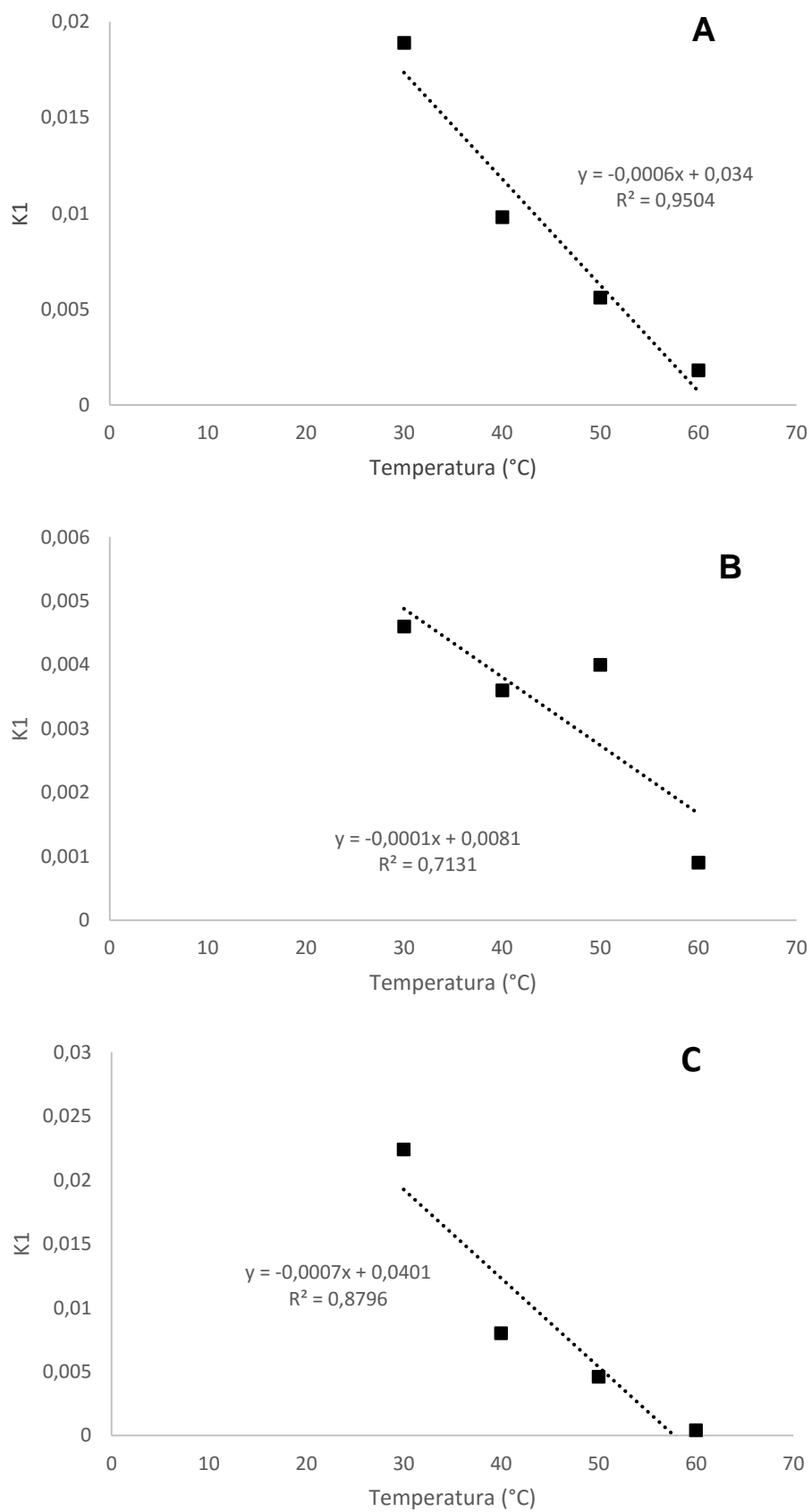


FIGURA 10 – EFEITO DA TEMPERATURA NA CONSTANTE K1 NOS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C)

TABELA 11 - VALORES DE K2 MÉDIO

Cultivar	K2
BRS Campeiro	0,0217
BRS Esplendor	0,0216
BRS Esteio	0,0223

Após a obtenção dos valores de k1 e k2, foram substituídos na Equação 2 de Peleg.

$$Xbu = Xbuo + \frac{t}{(k1 + k2t)}$$

Gerando as seguintes equações generalizadas: Equação 14 para o cultivar BRS Campeiro, Equação 15 para BRS Esplendor e Equação 16 para BRS Esteio.

$$Xbu = Xbuo + \frac{t}{(0,034 - 0,0006T + 0,0217t)} \quad (14)$$

$$Xbu = Xbuo + \frac{t}{(0,0081 - 0,0001T + 0,0216t)} \quad (15)$$

$$Xbu = Xbuo + \frac{t}{(0,0401 - 0,000T + 0,0223t)} \quad (16)$$

Com as equações acima foi plotado outro gráfico simulando o modelo generalizado em função das temperaturas de 30, 40, 50 e 60°C para os três cultivares (Figura 11) seguindo da Tabela 12 com os erros do modelo.

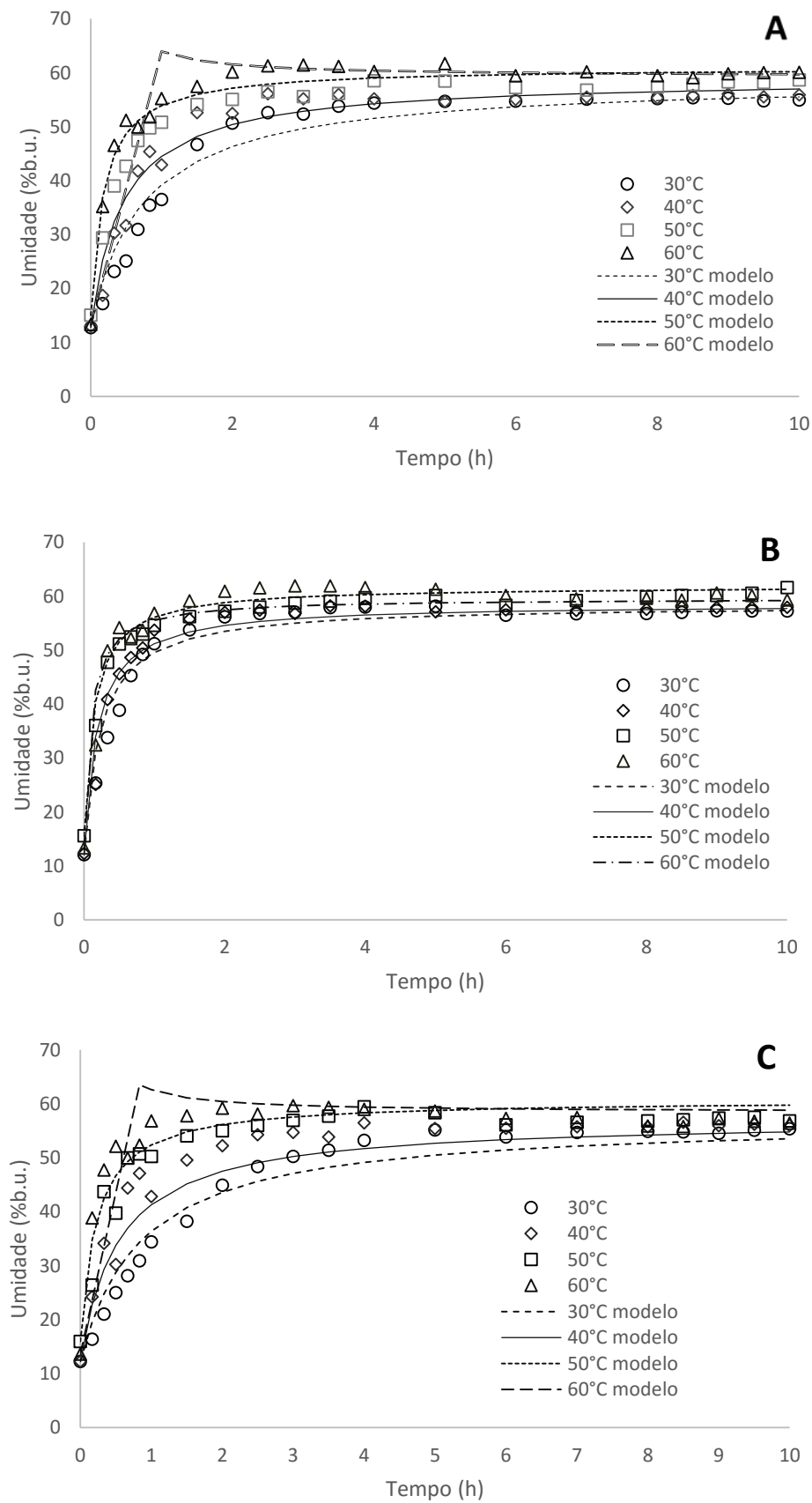


FIGURA 11 - SIMULAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG PARA OS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

TABELA 12 - ERROS DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG

Cultivar	Temperatura (°C)	P (%)	SE (%b.u.)
Campeiro	30	6,61	3,38
	40	5,42	3,12
	50	5,87	3,82
	60	2,42	2,76
Esplendor	30	4,16	2,88
	40	3,17	2,69
	50	2,41	1,86
	60	4,23	3,57
Esteio	30	7,22	3,37
	40	6,82	4,47
	50	4,77	3,45
	60	3,42	2,51

Como representado na Figura 11, o modelo generalizado consegue seguir uma tendência durante todas as fases do processo para todas as cultivares, porém, para os cultivares BRS Campeiro e BRS Esteio a temperatura mais elevada, 60°C, não seguiu uma tendência nos primeiros instantes de hidratação, somente a partir da terceira hora de imersão do grão que o modelo conseguiu seguir uma tendência frente aos dados experimentais. Em temperaturas mais elevadas, como 60°C os modelos empíricos não conseguem prever um acontecimento fenomenológico, como a perda de sólidos do grão, por isso houve maior erro nesta temperatura.

A Tabela 12 apresenta os erros dos modelos para os três cultivares, demonstrando que o cultivar BRS Esplendor em geral apresentou o melhor ajuste para o modelo generalizado de Peleg com os menores valores de P e SE.

Os cultivares BRS Campeiro e BRS Esteio obtiveram na temperatura de 60°C erros de P e SE muito elevados, sendo de todos os cultivares e todas as temperaturas, os únicos que não podem representar satisfatoriamente o modelo generalizado de Peleg.

Esse modelo pode ser utilizado como ferramenta preliminar para avaliar o tempo necessário para um determinado cultivar obter a umidade desejada no processo em função da temperatura utilizada.

4.6.2 Parâmetros concentrados

Para obter o modelo generalizado de parâmetros concentrados utilizamos a Equação 6, considerando os valores de K_s calculado a partir da Equação 17.

$$\ln K_s = \ln K_o - E' \frac{1}{T} \quad (17)$$

A equação de regressão foi utilizada para obter o valor de K_s em função da temperatura (Figura 12).

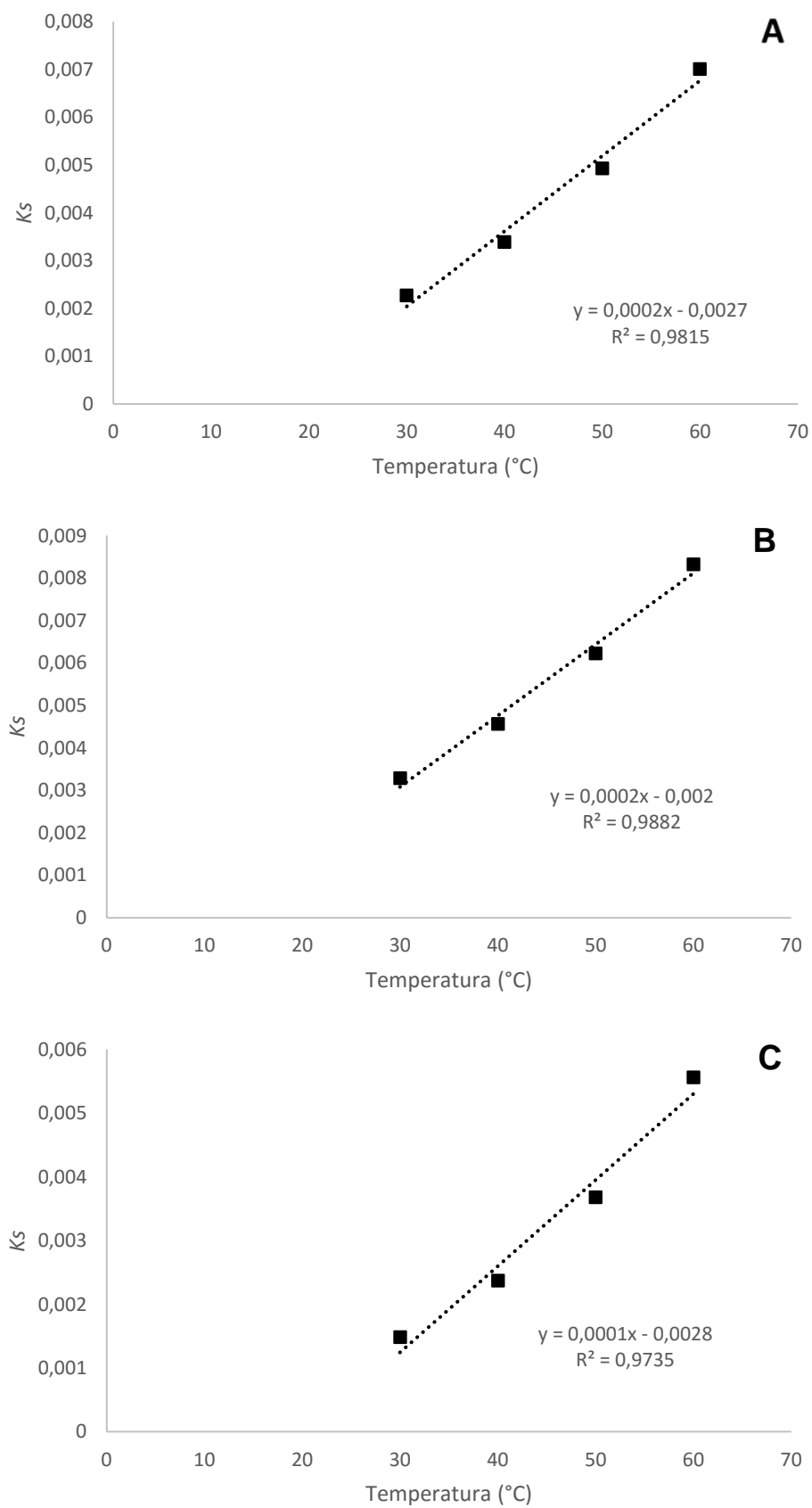


FIGURA 12 – EFEITO DA TEMPERATURA NA CONSTANTE K_s NOS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

Após a obtenção do valor de K_s , foi substituído na Equação 6. Gerando as equações generalizadas para cada cultivar: Equação 18 para BRS Campeiro, Equação 19 para BRS Esplendor e Equação 20 para BRS Esteio.

$$\rho A = - \left(e. \frac{(-3. (0,0002. T) - 0,0027). t}{r_0} \right) . \rho A_{eq} - \rho A_0 + \rho A_{eq} \quad (18)$$

$$\rho A = - \left(e. \frac{(-3. (0,0002. T) - 0,002). t}{r_0} \right) . \rho A_{eq} - \rho A_0 + \rho A_{eq} \quad (19)$$

$$\rho A = - \left(e. \frac{(-3. (0,0001. T) - 0,0028). t}{r_0} \right) . \rho A_{eq} - \rho A_0 + \rho A_{eq} \quad (20)$$

A partir das equações acima foi plotado um gráfico com a simulação do modelo generalizado em função das temperaturas para os três cultivares (Figura 13), e a Tabela 13 apresenta os erros do modelo.

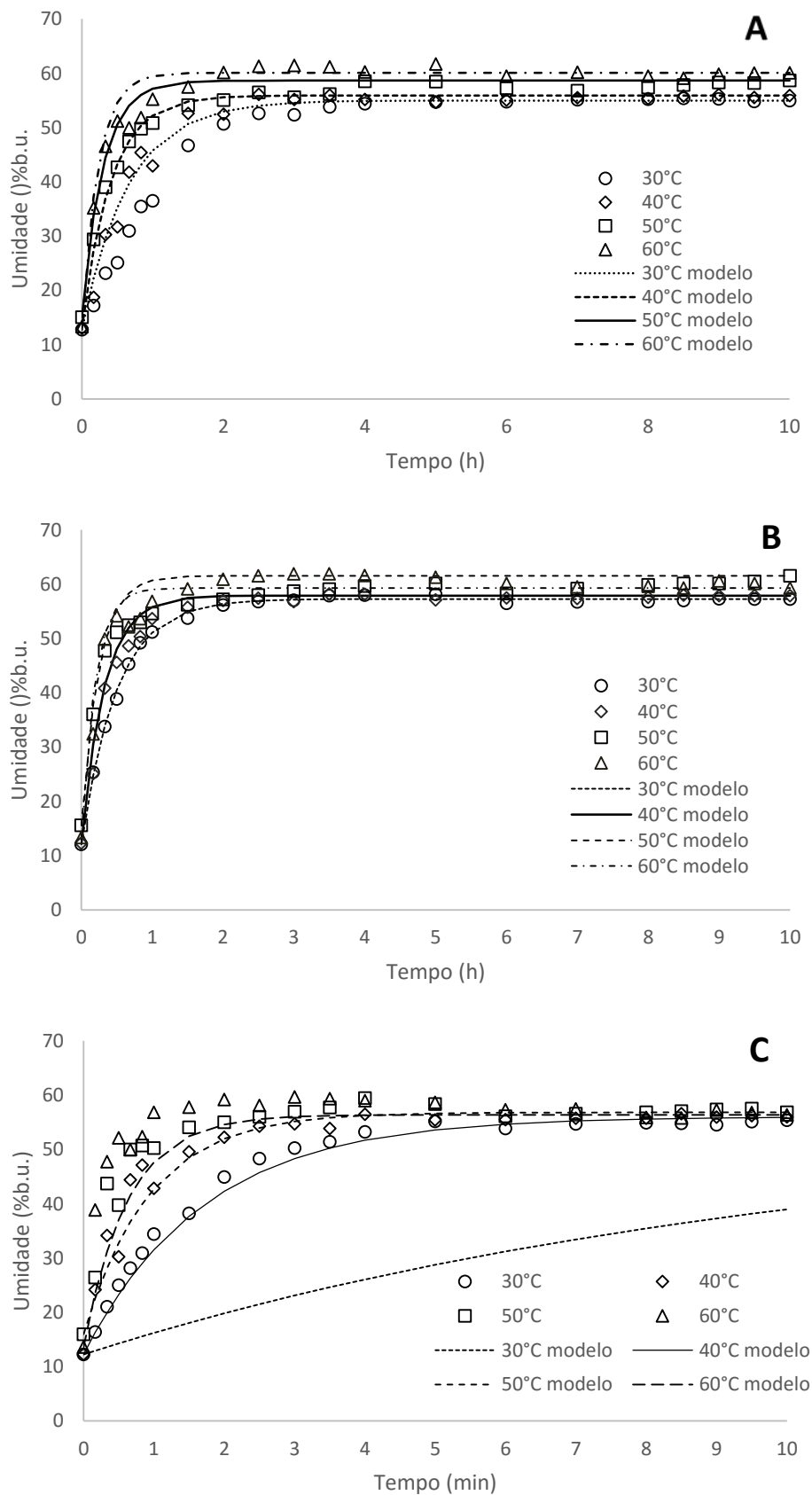


FIGURA 13 - SIMULAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG PARA OS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

TABELA 13 - ERROS DO MODELO GENERALIZADO DE PARÂMETROS CONCENTRADOS NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

Cultivar	Temperatura (°C)	P (%)	SE (%b.u.)
Campeiro	30	9,41	3,18
	40	8,12	3,91
	50	5,97	3,90
	60	3,40	1,58
Esplendor	30	0,93	0,92
	40	2,84	3,88
	50	5,16	2,71
	60	3,75	1,84
Esteio	30	40,95	22,89
	40	14,14	10,04
	50	8,03	7,84
	60	9,45	11,91

Como representado na Figura 13, o cultivar BRS Esplendor foi o que teve os melhores ajustes, com os menores erros dentre os outros cultivares, conseguindo seguir uma tendência aos dados experimentais durante toda a hidratação. O cultivar BRS Esteio não se ajustou adequadamente ao modelo generalizado de parâmetros concentrados. O cultivar BRS Campeiro ficou dentro dos limites permitidos, como o P (erro relativo) menor que 10%, ele conseguiu se ajustar melhor após os instantes iniciais de hidratação, ou seja, a partir do momento que a velocidade de hidratação começou a diminuir.

4.7 MODELO GENERALIZADO DE PELEG NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

Para obter o modelo generalizado de Peleg foi utilizado a equação de regressão para obtenção do k_1 (Figura14) e o valor médio de k_2 para cada cultivar, representado na Tabela 14.

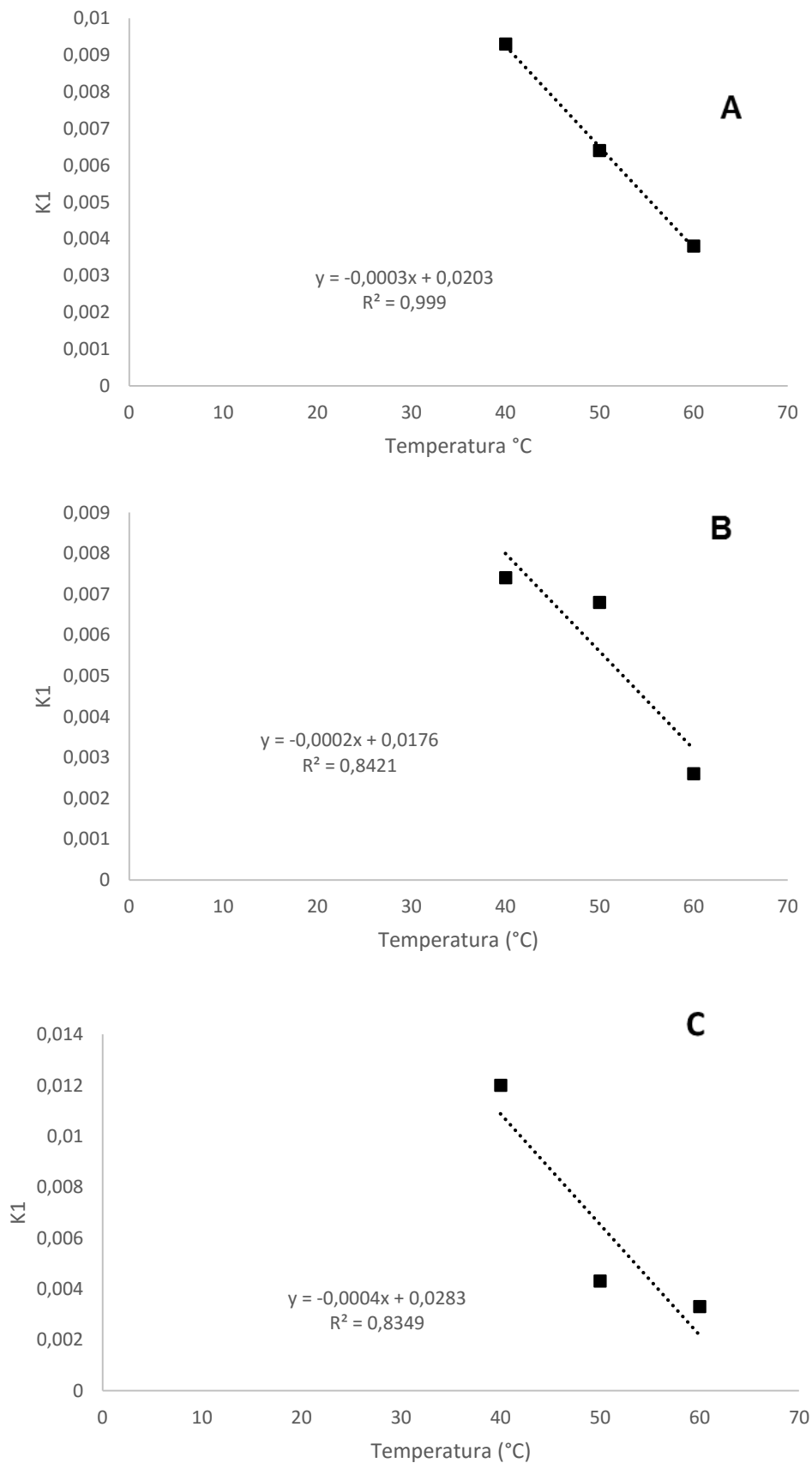


FIGURA 14 – EFEITO DA TEMPERATURA NA CONSTANTE K1 NOS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B) E BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

TABELA 14 - VALORES DE K2 MÉDIO NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

Cultivar	k ₂
BRS Campeiro	0,0215
BRS Esplendor	0,0214
BRS Esteio	0,0224

Após a obtenção dos valores das constantes de Peleg, foram substituídos na Equação 2.

$$Xbu = Xbuo + \frac{t}{(k1 + k2t)}$$

Gerando uma equação generalizada para cada cultivar: Equação 21 para o cultivar Campeiro, Equação 22 para cultivar Esplendor e Equação 23 para o cultivar BRS Esteio.

$$Xbu = Xbuo + \frac{t}{(0,0203 - 0,0003T + 0,0215t)} \quad (21)$$

$$Xbu = Xbuo + \frac{t}{(0,0176 - 0,0002T + 0,0214t)} \quad (22)$$

$$Xbu = Xbuo + \frac{t}{(0,0283 - 0,0004T + 0,0224t)} \quad (23)$$

A partir das equações acima, foi plotado um gráfico simulando o modelo generalizado de Peleg em função das temperaturas para os três cultivares (Figura 15) e a Tabela 15 apresenta os erros do modelo.

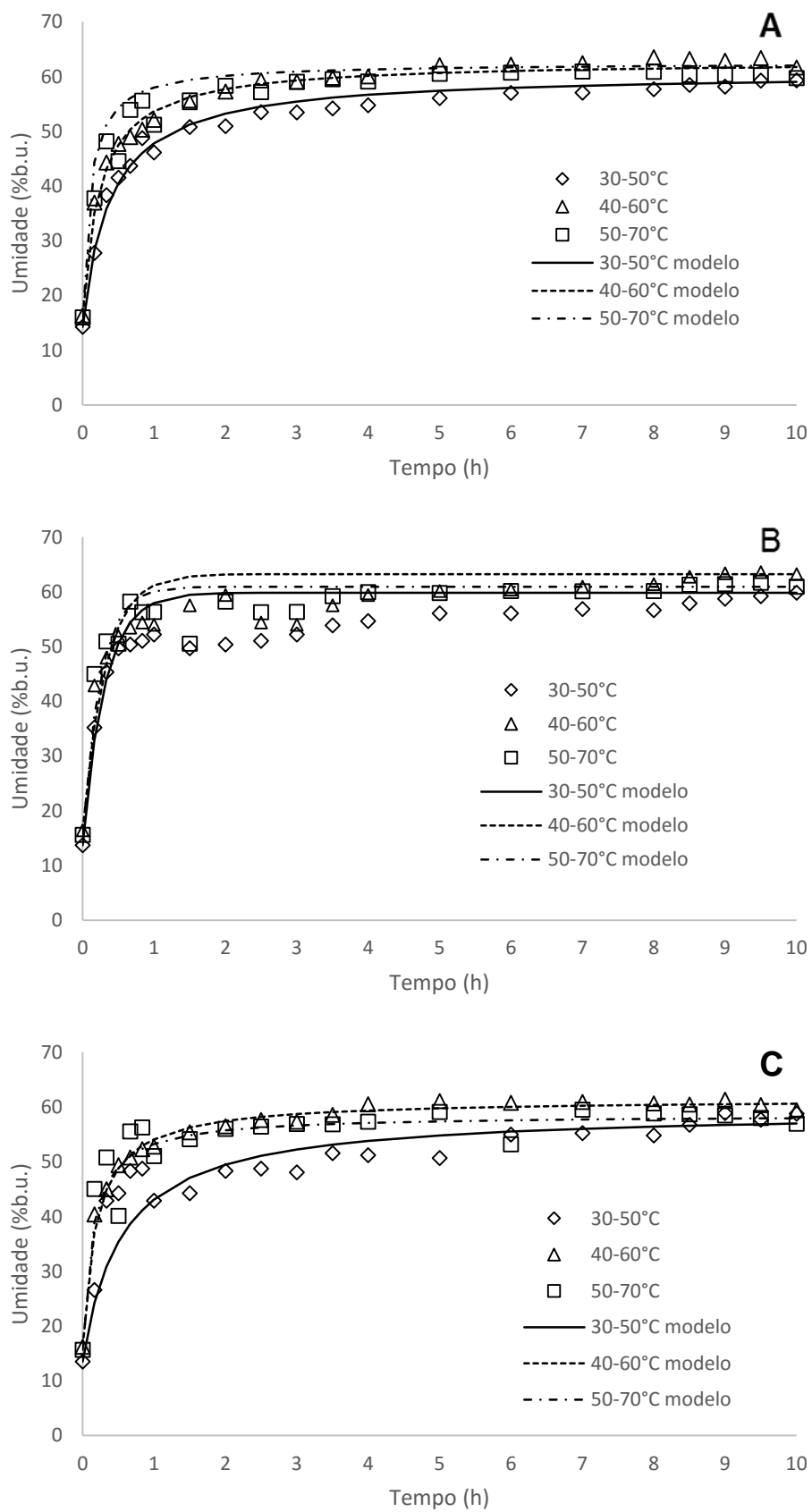


FIGURA 15 - SIMULAÇÃO DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG PARA OS CULTIVARES BRS CAMPEIRO (A), BRS ESPLENDOR (B), BRS ESTEIO (C) NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

TABELA 15 - ERROS DO MODELO GENERALIZADO DE PELEG NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

Cultivar	Temperatura (°C)	P (%)	SE (%b.u.)
Campeiro	30-50	2,34	1,67
	40-60	1,85	1,43
	50-70	5,24	4,16
Esplendor	30-50	6,81	5,95
	40-60	2,77	2,62
	50-70	2,99	2,92
Esteio	30-50	6,82	5,67
	40-60	6,54	4,98
	50-70	4,96	4,31

Na Figura 15, é observado que o modelo conseguiu representar uma tendência em todas as etapas do processo para o cultivar BRS Campeiro, para o BRS Esplendor o modelo conseguiu prever a fase inicial de hidratação e a fase final, relacionada a umidade de equilíbrio. Para o cultivar BRS Esteio o modelo conseguiu prever a fase intermediária e a fase final de hidratação, não prevendo a mesma qualidade de ajuste para a fase inicial de imersão.

4.8 MODELO DE DIFUSÃO

Os valores de coeficiente efetivo de difusão obtido a partir da Equação 8 para a hidratação convencional do feijão estão apresentados na Tabela 16 e para a hidratação periódica na Tabela 17.

TABELA 16 – COEFICIENTE EFETIVO DE DIFUSÃO PARA O FEIJÃO NA HIDRATAÇÃO CONVENCIONAL

Cultivar	Temperatura (°C)	De (10^{11} m ² /s)
Campeiro	30	0,58
	40	0,84
	50	0,94
	60	1,07
Esplendor	30	0,94
	40	1,00
	50	1,12
	60	1,91
Esteio	30	0,46
	40	0,68
	50	0,84
	60	2,62

TABELA 17 – COEFICIENTE EFETIVO DE DIFUSÃO PARA O FEIJÃO NA HIDRATAÇÃO PERIÓDICA

Cultivar	Temperatura (°C)	De (10^{11} m ² /s)
Campeiro	30-50	1,08
	40-60	1,26
	50-70	1,77
Esplendor	30-50	0,95
	40-60	1,04
	50-70	1,58
Esteio	30-50	1,09
	40-60	1,17
	50-70	2,76

Como observado nas Tabelas 16 e 17 o coeficiente efetivo de difusão teve um aumento conforme a elevação da temperatura, variando na hidratação convencional de 0,46 a 2,62 x 10⁻¹¹ m²/s e na hidratação periódica variou de 0,95 a 2,76 x 10⁻¹¹ m²/s. Quando ocorre o aumento da temperatura, a viscosidade da água diminui, e como esta propriedade é uma medida da resistência do fluido no escoamento, essas variações resultam na alteração da

difusão da água nas camadas capilares do grão, onde favorece sua movimentação para o interior do produto. Ocorre também outro fenômeno que pode ser atribuído a variação do coeficiente efetivo de difusão, que é a vibração das moléculas de água, que com o aumento da temperatura, também aumenta o nível de vibração, favorecendo a difusão de maneira mais acelerada (BOTELHO *et al.*, 2010).

O mesmo comportamento do coeficiente efetivo de difusão foi descrito por vários autores. Doymaz (2004) obteve valores entre $2,64$ e $5,71 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ para feijão verde, nas temperaturas entre 50 a 70°C . Bello, Tolaba e Suarez (2004), estudaram o arroz em casca, descascado e polido, obtendo valores entre, $1,56$ a $7,2 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, $2,22$ a $8,82 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ e $20,5$ a $47 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$, respectivamente, para a faixa de temperatura de 25 a 65°C . Addo, Bart-Plange e Dzisi (2006) pesquisaram duas variedades de milho, onde obtiveram valores variando de $7,3$ a $9,3 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e $6,3$ a $8,25 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, para a faixa de temperatura entre 30 e 60°C .

4.9 ENERGIA DE ATIVAÇÃO

A energia de ativação foi obtida segundo o item 2.10, para a hidratação convencional o cultivar BRS Esplendor teve o menor valor, correspondente a $39,52 \text{ kJ/mol}$, o cultivar BRS Esteio teve o maior valor, $105,19 \text{ kJ/mol}$ e o BRS Campeiro obteve $63,61 \text{ kJ/mol}$.

Para a hidratação periódica os valores de energia de ativação para o cultivar BRS Campeiro ($38,72 \text{ kJ/mol}$) e BRS Esteio ($56,28 \text{ kJ/mol}$) foram menores comparados aos da hidratação convencional, para o BRS Esplendor ($44,93 \text{ kJ/mol}$) o valor foi muito parecido, somente um pouco maior durante este tipo de hidratação. Considerando os valores de energia de ativação dos cultivares pode-se considerar que esta nova metodologia de hidratação é mais vantajosa que a hidratação convencional, pelo fato de requerer menos energia para que o processo ocorra.

Valores entre 33,02 a 39,60 kJ/mol foram encontrados em feijão bambara por Jideani e Mpotokwana (2009).

Resende e Corrêa (2007) encontraram um valor menor para energia de ativação em feijões vermelhos, 6,74 kJ/mol. Shafaei, Masoumi, Roshan (2014) apresentaram valores de 86,77 kJ/mol em feijão da variedade Mahali Khomein.

A diferença entre os grãos pode ser pela diferença de estruturas de cada cultivar e pela variação nas propriedades químicas dos grãos analisados (Montanuci et al., 2013).

5 CONCLUSÕES

Durante o processo de hidratação os cultivares apresentaram alta taxa de absorção de água inicial, seguido da diminuição desta taxa até sua fase de estabilização. A temperatura teve efeito significativo na velocidade inicial de hidratação.

O modelo empírico de Peleg apresentou bons resultados, onde obteve erro relativo máximo de $P = 5,29\%$ para a hidratação convencional e $P = 6,94\%$ para a hidratação periódica, onde estes valores estão dentro do previsto pela literatura.

O modelo de parâmetros concentrados obteve valor máximo de $P = 3,97\%$ para a hidratação convencional, obtendo bons ajustes, exceto para o cultivar BRS Esteio a 60°C .

O modelo de Peleg generalizado na hidratação convencional obteve bons resultados para todas as temperaturas do cultivar BRS Esplendor, se adequando aos dados experimentais e representando uma tendência durante todo o processo. Os cultivares BRS Campeiro e BRS Esteio conseguiram prever as principais tendências do processo a partir da terceira hora de imersão.

O modelo de parâmetros concentrados generalizado para a hidratação convencional se ajustou adequadamente para o cultivar BRS Esplendor, representando uma tendência durante toda a hidratação. O BRS Campeiro conseguiu se ajustar após os instantes iniciais do processo e o BRS Esteio não se ajustou ao modelo generalizado.

Na hidratação periódica foi generalizado o modelo de Peleg, o cultivar BRS Campeiro obteve bons ajuste, com os menores erros e conseguiu seguir uma tendência durante todo o processo. Para o cultivar Esplendor o modelo conseguiu prever a fase inicial e final de hidratação. O cultivar Esteio se ajustou desde sua fase intermediária até a fase final do processo.

A energia de ativação (E_a) teve seu menor valor representado pelo cultivar BRS Campeiro, correspondente a $38,72 \text{ kJ/mol}$, na hidratação periódica. Obteve seu maior valor para BRS Esteio com $105,19 \text{ kJ/mol}$, na

hidratação convencional, e para o mesmo cultivar este valor caiu para 56,28 kJ/mol na hidratação periódica, concluindo assim que este novo método de hidratação requer menos energia para que o processo ocorra.

REFERÊNCIAS

ABU-GHANNAM, N. Modelling textural changes during the hydration process of red beans. **Journal of food Engineering**, v. 38, p. 341-352, 1998.

ABU-GHANNAN, N.; MACKENNA, 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, p.391-401, 1997.

ADDO, A.; BART-PLANGE, A.; DZISI, K. Water Absorption characteristics of Obatanpa and Mamaba Maize Hybrids (*Zea mays*). **International Journal of Food Engineering**, v. 2, n. 3, p. 7, 2006.

AHROMRIT, A.; LEDWARD, D. A.; NIRANJAN K. High pressure induced water uptake characteristics of thai glutinous rice. **Journal of Food Engineering**, v. 72, p. 225-233, 2006.

ANTUNES, P. L. *et al.* Valor nutricional de feijão (*Phaseolus vulgaris*, L.), cultivares rico 23, carioca, pirata-1 e rosinha-G2. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 1, n. 1, p. 12-18, 1995.

BARAMPAMA, Z.; SIMARD, R.E. Nutrient composition, protein quality and antinutritional factors of some varieties of dry beans (*Phaseolus vulgaris* L.) grown in Burundi. *Food Chemistry*, **47**, 159-167. 1993

BAYRAM. M.; KAYA. A.; ONER. M. D. Changes in properties of soaking water during production of soy-bulgur. **Journal of Food Engineering**, v. 61, p. 221–230, 2004.

BECKER, H. A.; SALLANS, H. R. A study of diffusion in solids of arbitrary shape with application to the drying of the wheat kernel, **Cereal Chemistry**, v. 32, p. 212-226, 1955.

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

BELLO, M.; TOLABA, M. P.; SUAREZ, C. Factors affecting water uptake of rice grain during soaking. **Lebensmittel-Wissenschaft und-Technologie**, v. 37, p. 811-816, 2004.

BEWLEY, J. D.; BLACK, M. Seeds: physiology of development and germination. 2nd. Edition. **Plenum Publishing Corporation**. New York, 1994.

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

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Regulamento Técnico do Feijão, definindo o seu padrão oficial de classificação. Portaria n. 12, de 28 de março de 2008.

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport: The AVI Publishing Company, 1992.

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

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

CAVARIANI, C.; TOLEDO, M. Z.; RODELLA, R. A.; NETO, J. B. F.; NAKAGAWA, J. Velocidade de hidratação em função de características do tegumento de sementes de soja de diferentes cultivares e localidades. **Revista Brasileira de Sementes**, v. 31, n. 1, p. 030-039, 2009.

CHEEVITSOPON, E.; NOOMHORM, A. Kinetics of hydration and dimensional changes of brown rice. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 35, n. 6, p. 840–849, 2011.

CHIANG, P. Y.; YEH, A. I. Effect of soaking on wet-milling of rice. **Journal of Cereal Science**, v. 35, p. 85-94, 2002.

CHOPRA. R.; PRASAD. D. N. Standardization of soaking conditions for soybean seeds/cotyledons for improved quality of soymilk. **Indian Journal of Animal Sciences**, v. 64, p. 405–410, 1994.

CHUA, K.L.; MUJUMDAR, A.S.; CHOU, S.K. Intermittent drying of bioproducts – an overview. *Bioresource Technology* 2003, 90, 285-295.

COMISSÃO técnica sul-brasileira de feijão. **Informações técnicas para o cultivo de feijão na Região Sul brasileira 2009**. Florianópolis: Epagri, 2010.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira. Grãos, v. 2 - Safra 2014/15, n. 9 - Nono levantamento, Brasília, p. 1-104, junho 2015.**

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

COUTINHO, M. R.; CONCEIÇÃO, W. A. S.; PARAÍSO, P. R.; ANDRADE, C. M. G.; OMOTO, E. S.; JORGE, R. M. M.; FILHO, R. M.; JORGE, L. M. M. Application of the Hsu model to soybean grain hydration. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, 2010.

COUTINHO, M. R.; OMOTO, E. S. ANDRADE, C. M. G. e JORGE, L M. M. Modelagem e Validação da Hidratação de Grãos de Soja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 25, nº. 3, p. 603-610, Campinas, 2005.

CRANK, J. The mathematics of diffusion. Oxford University Press, 2 ed. London, 1975. 424p.

DEDAVID, B. A., GOMES, C. I.; MACHADO, G. Microscopia eletrônica de varredura. Aplicações e preparação de amostra. Materiais poliméricos, metálicos e semicondutores. EDIPUCRS, Porto alegre, 2007.

DEFENDI, R. O., SILVA, R.O., PARAÍSO, P. R., JOREGE, L. M. M. Simulação de secagem periódica de feijão em leito fixo. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, 2014.

DEFENDI, R. O., SILVA, R.O., PARAÍSO, P. R., JOREGE, L. M. M. Secagem periódica de soja em camada delgada. XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química, Florianópolis, 2014b.

DOYMAZ, I., Drying behaviour of green beans. *Journal of Food Engineering*. V. 69, p. 161-165, 2004.

DURIGAN, J. F.;SGARBIERI, V. C.; BULISANI, E.A. Protein Value of Dry Bean Cultivars: Factors Interfering with Biological Utilization. *Journal Agric. Food Chemistry*. v. 35, n. 5, p. 694-698, 1987.

ELIAS, M. C. **Secagem e armazenamento de grãos de milho e de sorgo na propriedade rural**. Pelotas: Pólo de Alimentos – UFPEL, 2003. 84p. Relatório técnico.

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

FERNÁNDEZ-MUÑOZ, J.L., ACOSTA-OSORIO, A.A., GRUINAL-SANTOS, M.A., ZELAYA-ANGEL, O. Kinetics of water diffusion in corn grain during the alkaline cooking at diferente temperatures and calcium hydroxide concentration. *Journal of Food Engineering*, v. 106, p. 60–64, 2011.

FERREIRA, Andrea C. P. **Feijão pré-cozido irradiado com raios gama do Cobalto-60: uma alternativa de consumo**. 2010. 62 f. Tese. (Doutorado em Ciências) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2010.

FONSECA, F.A.; SOARES JÚNIOR, M.S.; CALIARI, M.; BASSINELLO, P.Z.; EIFERT, E.C.; GARCIA, D.M. Changes occuring during the parboiling of upland rice and in the maceration water at diferente temperatures and soaking times. *International Journal of Food Science and Technology*, n. 46, p.1912–1920, 2011.

FRACASSO, A. F.; MARQUES, B. C., ZANONCINE, B.; PINTO, H.; MARTELLI, L. B.; JORGE, L. M. M.; RIBANI, R. H.; JORGE, R. M. M. Estudo da cinética da hidratação de soja transgênica. Foz do Iguaçu, Pr, XVIII COBEQ, 2010.

GARCIA, C. Modelagem e simulação de processos industriais e de sistemas eletromecânicos. 2º ed. rev. e ampl., 2º reimpr. – São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, p. 20-27, 2013.

GARCÍA-LARA, S.; BERGVINSON, D. J.; BURT, A. J.; RAMPUTH, A. I.; DÍAZ-PONTONES, D. M.; ARNASON, J. T. The role of pericarp cell wall components in maize weevil resistance. **Crop Science**, v.44, n.5, p.1546-1552, 2004.

GARCÍA-PASCUAL, P., SANJUÁN, N., BON, J., CARRERES, J. E., & MULET, A. Rehydration process of *Boletus edulis* mushroom: Characteristics and modeling, **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 85, p, 1397-1404, 2005.

GEANKOPLIS, C.J. Transport Processes: Momentum, Heat and Mass (Allyn and Bacon series in engineering. 350p, 1983.

GEIL, P.B.; ANDERSON, J.W. Nutrition and health implications of dry beans: a review. *Journal of the American College of Nutrition*, **13**, 549–558, 1994.

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**, 78, p. 810-819, 2007.

HSU, K. H. A diffusion model with a concentration-dependent diffusion coefficient for describing water movement in legumes during soaking, **Journal of Food Science**, v. 48, p. 618-622 e 645, 1983a.

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

HUGHES, J.S.; ACEVEDO, E.; BRESSANI, R.; SWANSON, B.G., 1996. Effects of dietary fiber and tannins on protein utilization in dry beans (*Phaseolus vulgaris*). *Food Science & Human Nutrition*, **29**, 331-338.

HUNG. T. V.; LIU. L. H.; BLACK. R. G.; TREWHELLA. M. A. Water absorption in chickpea and field pea cultivars using the Peleg model. **Journal of Food Science**, v. 58, p. 848–852, 1993.

INSTITUTO ADOLF LUTZ. Normas analíticas do Instituto Adolf Lutz, v.1, 3a ed., São Paulo: O Instituto, 1985.

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

JOSHI, M.; ADHIKARI, B.; PANOZZO, J.; ALDRED, P. Water uptake and its impact on the texture of lentils (*Lens culinaris*). **Journal of Food Engineering**, v. 100, p. 61-69, 2010.

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

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

KOLE, C. Genome mapping molecular breeding in plants. Ed. Springer, p. 1-2, 2007.

KON, S. Effect of soaking temperature on cooking and nutritional quality of beans. **Journal of Food Science**, v. 44, p. 1329-1334, 1979.

KORNARZYNSKI, K.; PIETRUSZEWSKI, S.; LACEK, R. Measurement of the water absorption rate in wheat grain. **International Agrophysics**, v. 16, p. 33-36, 2002.

LEMOS, L. B.; DURIGAN, J. F.; FORNASIERI FILHO, D.; PEDROSO, P. A. C.; BANZATTO. Características de cozimento e hidratação de grãos de genótipos de feijão-comum (*phaseolus vulgaris L.*). **Alim. Nutrição**, v.7, p. 47-57, 1996.

LUCAS, T.; LE RAY, D.; MARIETTE, F. Kinetics of water absorption and solute leaching during soaking of breakfast cereals. **Journal of Food Engineering**, v. 80, p. 377-384, 2007.

MANNHEIMER W.A; SCHMIDT P.F.; VANDER VOORT G.F.; WILLIAMS D.B. **Microscopia dos Materiais: Uma Introdução**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Microscopia, 221p. 2002. Relatório técnico.

MARQUES, B. C.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. . Hydration kinetics, physicochemical composition, and textural changes of transgenic corn kernels of flint, semi-flint, and dent varieties. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 34, p. 88-93, 2014

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

MECHI, R.; CANIATTI-BRAZACA, S. G.; ARTHUR, V. Avaliação química, nutricional e fatores antinutricionais do feijão preto (*Phaseolus vulgaris* L.) irradiado. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, Campinas, v. 1, n. 25, p. 109-114, 2005.

MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. *J. Food Eng.*, London, v. 66, n. 4, p. 13- 18, 2005.

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

MUZQUIZ, M. *et al.* The investigation of antinutritional factors in *Phaseolus Vulgaris*: environmental and varietal differences. **Biotechnology, Agronomy, Society and Environment**, v. 4, n. 3, p. 210–216, 1999.

NACZK, M *et al.* Condensed tannins in canola hulls. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 10, n. 42, p. 2196-2200, 1994.

NAGATANI, T.; SAITO S.; SATO, M.; YAMADA, M. Development of an ultra high resolution scanning electron microscope by means of a field emission source and in-lens system. **Scanning Microscopy**. v.11, p. 901-909, 1987.

NICOLIN, D. J.; JORGE, R. M. M.; JORGE, L. M. M. Stefan Problem Approach Applied to the Diffusion Process in Grain Hydration. **Transport in Porous Media**, v. 102, p. 387-402, 2014.

OBIRO, W.C.; ZHANG, T.; JIANG, B., 2008. The nutraceutical role of the *Phaseolus vulgaris* α -amylase inhibitor. *British Journal of Nutrition*, **100**, 1–12.

OBOH, H. A. Anti-nutritional constituents of six underutilized legumes grown in Nigéria. **Journal of Chromatography A**, v. 823, p. 307–312, 1998.

OLIVEIRA DA SILVA, C.; GOMES, J. C.; BRUNONO C. N. M.; DE ANDRADE, N. J.; MINIM, V. P. R. Caracterização nutricional de feijão (*phaseolus vulgaris* L.) após processamento térmico. *Ceres*. v. 53, n. 309, p 528-532, 2006.

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

OMOTO, E.S. **Modelagem da Hidratação de Grãos de Ervilha Segundo a Hipótese de Volume Constante**. Maringá, 2006. 124 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual do Paraná – UEM.

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

PARI, L.; VENKATESWARAN, S. Protective role of *Phaseolus vulgaris* on changes in the fatty acid composition in experimental diabetes. *Journal of Medicinal Food*, **7**, 204-209, 2004.

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

PEREZ, J. H.; TANAKA, F.; UCHINO, T. Comparative 3D simulation on water absorption and hygroscopic swelling in japonica rice grains under various isothermal soaking conditions. **Food Research International**, v. 44, n. 9, p. 2615–2623, 2011

PILOSOF, A. M. R.; BOQUET, R.; BARTHOLOMAI, G. B. Kinetics of water uptake by food powders. **Journal of Food Science**, v. 50, p. 278-282, 1985.

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

PINTO, A. L.; LOPES, A. M. **Textura e relações de orientação: deformação**

plástica, recristalização e crescimento de grão. 2 ed, São Paulo: IPEN, 2003.

PIRES, C.V.; OLIVEIRA, M.A.G.; CRUZ, G.A.D.R.; MENDES, F.Q.; DE REZENDE, S.T.; MOREIRA, M.A., 2005. Physicochemical composition of different cultivars of beans (*Phaseolus vulgaris* L.). *Alimentação e Nutrição*, **16**, 157-162.

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

PUTRANTO, A.; XIAO, Z.; CHEN, X.D.; WEBLEY, P.A. Intermittent drying of mango tissues: implementation of the reaction engineering approach. *Industrial e Engineering Chemistry Research* 2011, 50, 1089-1098.

QUAST, D. G. E DA SILVA, S. D. Temperature dependence of hydration rate and effect of hydration on the cooking rate of dry legumes. **Journal of Food Science**, v. 42, p. 1299–1303, 1977.

RAMÍREZ-CÁRDENAS, Lucía; LEONEL, Alda J.; COSTA, Neuza 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**, Campinas, v. 28, 2008.

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

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

RIBEIRO, N. D.; RODRIGUES, J. A.; GARGNELUTTI FILHO, A.; POERSCH, N. L.; TRENTIN, M.; ROSA, S. S. Efeito de períodos de semeadura e das condições de armazenamento sobre a qualidade de grãos de feijão para o cozimento. *Bragantia*, v. 66, n. 3, p. 369-376, 2007.

RIOS, A.O.; ABREU, S. M. P.; CÔRREA, A.D., 2003. Efeito da estocagem e das condições de colheita sobre algumas propriedades físicas, químicas e nutricionais de três cultivares de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). *Ciência e Tecnologia dos Alimentos*, **23**, 39-45.

ROCA, E.; GUILLARD, V.; BROYART, B.; GUILBERT, S.; GONTARD, N. Effective moisture diffusivity modeling food structure and hygroscopicity. **Food Chemistry**, v. 106, p. 1428-1437, 2008.

SAMMÁN, N.; MALDONADO, S.; ALFARO, M.E.; FARFAN, N.; GUTIERREZ, J., 1999. Composition of different bean varieties (*Phaseolus vulgaris*) of northwestern Argentina (region NOA): cultivation zone influence. *Journal Agricultural and Food Chemistry*, **47**, 2685-2689.

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

SEYHAN-GÜRTAS. F.; AK. M. M. e EVRANUZ E. O. Water diffusion coefficients of selected legumes grown in turk as affected by temperature and variety. **Turkish Journal of Agriculture and Forestry**, v. 25, p. 297-304, 2001

SHAFAEI, S. M.; MASOUMI, A. A.; ROSHAN, H. Analysis of water absorption of bean and chickpea during soaking using Peleg model. **Journal of the Saudi Society of Agricultural Science**, 2014.

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

SINGH, B. P. N.; KULSHRESTHA, S. P. Kinetics of water sorption by soybean and pigeonpea grains. **Journal of Food Science**, v. 52, n. 6, p. 1538-1541 e 1544, 1987.

SOBUKOLA, O.P., ABAYOMI, H.T. Physical properties and rehydration characteristics of different varieties of maize (*Zea mays* L.) and cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp) seeds. *Journal of Food Processing and Preservation*, v. 35, n. 3, p. 299–307, 2011.

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, p.1084-.1087, 1990.

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

TAGAWA A, MURAMATSU Y, NAGASUNA T, YANO A, IIMOTO M & MURATA S. Water absorption characteristics of wheat and barley during soaking. **Transactions of the ASAE** v.46, p. 361–366, 2003.

TANG. J.; SOKHANSANJ. S.; SOSULSKI. F. W. Moisture-absorption characteristics of Laird lentils and hard shell seeds. **Cereal Chemistry**, v. 71, p. 423- 428, 1994.

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

THANOS, A.J., Water changes in canned dry peas and beans during heat processing. **International Journal of Food Science and Technology**, v. 33, p. 539-545,1998.

TORRE, M; RODRIGUEZ, A. R.; SAURA-CALIXTO, F. Effects of dietary fiber and phytic acid on mineral availability. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 1, n. 1, p. 1-22, 1991.

TSUDA, T. *et al.* Antioxidative pigments isolated from the seeds of the *Phaseolus vulgaris* L. **Journal of Agricultural Food Chemistry**, v. 42, p. 248-251, 1994.

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

VOLPE, Thaisa C. Cinética da hidratação do grão de arroz no processo de parboilização. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) - Setor de Tecnologia, Programa de Pós-graduação em Engenharia de Alimentos, Universidade Federal do Paraná, 2014.

WANG. H. L.; SWAIN. E. W.; HESSELTINE. C. W.; HEATH. H. D. Hydration of whole soybeans affects solids losses and cookint quality. **Journal of Food Science**, v. 44, p. 1510-1513, 1979.

WOODSTOCK, L.W. Seed imbibition: a critical period for successful germination. **Jornal of seed technology**, v.12, n.1, p.1-15, 1988.

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

YAMAGUISHI, Caroline T. **Processo biotecnológico para a produção de feijão desidratado com baixo teor de oligossacarídeos da família rafinose**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Processos Biotecnológicos) – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2008.

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

ZHOU, Z.; ROBARDS, K.; HELLIWELL, S.; BLANCHARD, C. Effect of storage temperature on rice thermal properties. **Food Research International**, v. 43, p. 709–715, 2010.