



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA
"JÚLIO DE MESQUITA FILHO"
Câmpus de São José do Rio Preto

Gisandro Reis de Carvalho

**Aplicação de ultrassom de potência na etapa de maceração da cevada para
produção de malte**

São José do Rio Preto
2018

Gisandro Reis de Carvalho

**Aplicação de ultrassom de potência na etapa de maceração da cevada para
produção de malte**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Financiadora: CAPES.

Orientador: Prof. Dr. Javier Telis-Romero

Co-orientador: Prof. Dr. José Bon Corbín
(Universidade Politécnica de Valência)

São José do Rio Preto
2018

Carvalho, Gisandro Reis de.

Aplicação de ultrassom de potência na etapa de maceração da cevada para produção de malte / Gisandro Reis de Carvalho. -- São José do Rio Preto, 2018

123 f. : il.

Orientador: Javier Telis-Romero

Coorientador: José Bon Corbín

Tese (doutorado) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas

1. Tecnologia de alimentos. 2. Cevada. 3. Malte. 4. Ultrassom. 5. Hidratação. I. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho". Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas. II. Título.

CDU – 633.1

Gisandro Reis de Carvalho

**Aplicação de ultrassom de potência na etapa de maceração da cevada para
produção de malte**

Tese apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos, junto ao programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciência de Alimentos, do Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Campus de São José do Rio Preto.

Comissão Examinadora

Prof. Dr. Javier Telis-Romero
UNESP – São José do Rio Preto
Orientador

Prof. Dr. Roger Darros-Barbosa
UNESP – São José do Rio Preto

Prof. Dr. Vanildo Luiz Del Bianchi
UNESP – São José do Rio Preto

Prof. Dr. Jefferson Luiz Gomes Correa
UFLA – Lavras

Prof. Dr. Pedro Esteves Duarte Augusto
USP – Piracicaba

São José do Rio Preto
22 de março de 2018

Dedico este trabalho...

...Aos meus pais, Gilvan e Eloiza, que, mesmo apesar de todas as dificuldades, sempre fizeram o possível (e o impossível) para que eu prosseguisse em minha jornada.

Agradecimentos

Primeiramente, agradeço a Deus, pelo dom da vida e por me proporcionar saúde.

Aos meus pais, pelo exemplo de dignidade e perseverança, por sempre me ajudarem e me apoiarem e por serem meu porto seguro. À minha irmã pelo carinho.

À minha família por sempre estar presente o tempo todo.

À minha namorada e companheira Érika, por esses 3 anos de amor, carinho e amizade, por sempre me acalmar, por sempre acreditar que posso ser uma pessoa melhor e me ajudar a ser essa pessoa melhor... Te amo!

A todos meus amigos, em especial o André, por ser meu irmão por todos esses anos de amizade. A meu amigo e colega de trabalho Tiago, por toda ajuda e troca de conhecimento.

Ao meu orientador Prof. Dr. Javier Telis-Romero, por ter me acompanhado por toda minha vida acadêmica, desde de a iniciação científica.

Ao meu co-orientador Prof. Dr. José Bon Corbín, pela ajuda e ensinamentos durante o doutorado.

A todos os professores do DETA – UNESP, por todo o conhecimento compartilhado desde a graduação.

Ao Professor Sebastião Roberto Taboga e ao Técnico Luiz Roberto do Centro Multiusuário de Microscopia e Microanálises do IBILCE – UNESP, pela grande ajuda com as análises microscópicas.

A todos os funcionários do DETA e do IBILCE – UNESP, que auxiliaram nessa caminhada desde a graduação.

Ao IBILCE – UNESP, por ter sido minha segunda casa durante todos esses 11 anos da minha vida.

À CAPES, pelo suporte financeiro durante o doutorado, na forma de auxílio financeiro.

À FAPESP e CNPq, pelo suporte de projetos que ajudaram a financiar a pesquisa.

À AGRARIA, pela doação do material utilizado na pesquisa e intercâmbio de conhecimento.

Enfim, a todos que de alguma forma contribuíram para a minha formação pessoal e profissional, meu muitíssimo obrigado.

*“Em momentos de crise, só a
imaginação é mais importante que
o conhecimento.”*

Albert Einstein

RESUMO

A cevada é uma das principais culturas de cereais do mundo e a principal matéria prima para a produção de malte. Para a produção de malte, a cevada tem que passar por transformações físico-químicas, que ocorrem durante três etapas principais. Inicialmente, a cevada tem sua umidade elevada de 0,1 a 0,44 kg/kg_{bu} (base úmida) durante a maceração. Posteriormente, ocorre a germinação do grão, que promove a formação de enzimas e alterações desejadas no malte. Por fim, é realizada a secagem do agora malte verde, de modo a garantir estabilidade ao produto, além de características organolépticas. A utilização de tecnologias emergentes, que possam melhorar tanto o processo quanto o produto, podem ser uma alternativa para reduzir déficits de produção e o ultrassom de potência vem sendo estudado como uma destas tecnologias. No presente trabalho, a aplicação do ultrassom de potência durante a maceração de cevada foi investigada, assim como alguns efeitos desta aplicação na etapa de germinação da cevada para produção de malte. As propriedades físicas da cevada foram determinadas em função da umidade, para uma faixa de 0,1268 a 0,8028 kg/kg_{bs} (base seca). A maceração foi realizada nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C sem a aplicação de ultrassom de potência e com aplicação nas potências nominais de 750 e 1500 W, na forma de períodos de 30 minutos e na forma pulsada (1ON:4OFF). Os modelos matemáticos empíricos de Peleg, exponencial tipo Weibull e difusivo foram utilizados para descrever o processo de maceração. A potência real transmitida ao meio durante a aplicação de ultrassom foi estimada pelo método calorimétrico. Após a obtenção das cinéticas de maceração, esta etapa foi realizada até atingir a umidade necessária para a germinação (aprox. 0,75 kg/kg_{bs}) e, então, a germinação da cevada foi realizada. A germinação foi avaliada através da porcentagem de germinação (%GER) e do tempo médio de germinação (MGT), além da análise de açúcares redutores presentes no malte e determinação das atividades de alfa- e beta-amilase. Por fim, análises microscópicas foram realizadas para observar o efeito do ultrassom de potência na estrutura do malte. A aplicação de ultrassom de potência reduziu significativamente o tempo necessário de maceração e, para alguns tempos de germinação, aumentou a quantidade de açúcares redutores presentes no malte assim como as atividades de alfa- e beta-amilase, de modo que pode ser uma tecnologia promissora para melhorar o processo de produção de malte de cevada.

Palavras-chave: Ultrassom, engenharia de processos, propriedades físicas, hidratação, atividade enzimática, poder diastático.

ABSTRACT

Barley is one of the major cereal crops in the world and the main raw material for malting. For the malt production, barley has to undergo physical-chemical changes, which occur during three main steps. Initially, barley has its moisture increased from 0.1 to 0.44 kg/kg_{db} during steeping. Subsequently, the germination of the grains occurs, which promotes the formation of enzymes and desired changes in the malt. Finally, the green malt is dried in order to guarantee stability to the product, in addition to organoleptic characteristics. The use of emerging technologies that can improve both the process and the product may be an option to reduce production deficits, and high-intensity ultrasound has been studied as one of these technologies. In the present work, the application of power ultrasound during steeping of barley was investigated, as well as some effects of this application in the germination step of malting. Physical properties of the barley were determined as a function of moisture, for a range of 0.1268 to 0.8028 kg/kg_{db}. The steeping was carried out at temperatures of 10, 15, 20 and 25 °C without the application of high-intensity ultrasound and with application at nominal power of 750 and 1500 W, in the form of periods of 30 minutes and in pulsed form (1ON:4OFF). Empirical mathematical models of Peleg, exponential Weibull and diffusive were used to describe the steeping process. The real power transmitted to the medium during the ultrasound application was estimated by the calorimetric method. After obtaining the steeping kinetics, this step was carried out until reaching the needed germination humidity (approx. 0.75 kg/kg_{db}), and then the germination of the barley was carried out. Germination was evaluated by percentage of germination (%GER) and mean germination time (MGT), in addition to the analysis of reducing sugars present in the malt and determination of alpha- and beta-amylase activities. Finally, microscopic analyses were performed to observe the effect of high-intensity ultrasound on the malt structure. The application of high-intensity ultrasound significantly reduced the time required for steeping and, for some germination times, increased the amount of reducing sugars present in the malt as well as the activities of alpha- and beta-amylase, so that it may be a promising technology to improve the barley malting process.

Keywords: *Ultrasound, Process engineering, physical properties, hydration, enzymatic activity, diastatic power.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Cevada de duas fileiras e de seis fileiras.	18
Figura 3.2 – Corte longitudinal do grão de cevada.	19
Figura 3.3 – Diagrama do processo de malteação.	20
Figura 3.4 – O espectro do som.	25
Figura 3.5 – Transdutor operado por meio de fluidos.	27
Figura 3.6 – Princípio de funcionamento de um transdutor magnetoestrutivo.	28
Figura 3.7 – Efeito piezoelétrico.	29
Figura 3.8 – Transdutor piezoelétrico tipo “sanduíche”.	30
Figura 3.9 – Banho ultrassônico, no detalhe a formação da onda estacionária.	31
Figura 3.10 – Sistema de sonda para aplicação de ultrassom de potência.	33
Figura 3.11 – Diferentes tipos de sondas acústicas e seus fatores de amplificação.	34
Figura 3.12 – Estrutura de um transdutor ligado a uma sonda tipo prato.	35
Figura 3.13 – Cavitação ultrassônica.	36
Figura 4.1 – Amostra de corpos estranhos e grãos quebrados removidos após a seleção da cevada.	38
Figura 4.2 – Dimensões características do grão de cevada.	40
Figura 4.3 - Equipamentos utilizados para realização de experimentos com aplicação de ultrassom de alta intensidade.	44
Figura 4.4 – (a) Painel de controle e (b) diagrama de blocos do programa utilizado para medida da temperatura.	45
Figura 4.5 – Representação do balanço de energia aplicado no sistema.	47
Figura 4.6 – Posição dos termopares durante a medição de temperatura para determinação da potência ultrassônica transmitida.	50
Figura 4.7 – Representação do elemento de volume.	51
Figura 4.8 – Amostra de cevada hidratada acondicionada na bandeja para a germinação.	57
Figura 4.9 – (a) Disposição dos grãos para determinação do poder germinativo e (b) grão considerado germinado.	58
Figura 5.1 – (■) Comprimento, (●) largura, (▲) espessura, (□) diâmetro aritmético e (○) diâmetro geométrico do grão de cevada (média ± desvio padrão).	65
Figura 5.2 – Inchamento do grão de cevada devido ao aumento da umidade de (— · —) 0,1268, (— —) 0,2958, (- - -) 0,4648, (-.-.-) 0,6338 e (——) 0,8028 kg/kg _{bs} . (a) largura x comprimento e (b) espessura x comprimento.	66
Figura 5.3 – (■) Esfericidade e (□) área superficial do grão de cevada (média ± desvio padrão).	67
Figura 5.4 – Variação da (■) Massa e do (□) volume de 1000 grãos (média ± desvio padrão).	68
Figura 5.5 – (■) Densidade aparente, (□) densidade real e (●) porosidade do leito de grão de cevada (média ± desvio padrão).	69
Figura 5.6 – Área superficial específica (■) do grão e (□) do leito de grãos de cevada (média ± desvio padrão).	71
Figura 5.7 – Variação de temperatura, em °C/s, em função da potência durante a aplicação de ultrassom.	73
Figura 5.8 – Variação de temperatura (média volumétrica) durante a aplicação de ultrassom ((■) 300 (■) 900 e (□) 1500 W) (média ± desvio padrão).	74
Figura 5.9 – Cinéticas de maceração da cevada sem aplicação de ultrassom e com a aplicação de ultrassom de potência (média ± desvio padrão).	77

Figura 5.10 – Variação de temperatura durante os experimentos com aplicação de ultrassom (— 750 W(30); - - - 750 W(P); — 1500 W(30); - - - 1500 W(P)).	79
Figura 5.11 – Ajuste do modelo de Peleg: valores experimentais de umidade, em kg/kg _{bs} (eixo das ordenadas) em função dos valores preditos pelo modelo, em kg/kg _{bs} (eixo das abscissas).	80
Figura 5.12 – (a) Taxa inicial de hidratação e (b) umidade de equilíbrio do modelo de Peleg.	84
Figura 5.13 – Ajuste do modelo exponencial tipo Weibull: valores experimentais de umidade, em kg/kg _{bs} (eixo das ordenadas) em função dos valores preditos pelo modelo, em kg/kg _{bs} (eixo das abscissas).	85
Figura 5.14 – Umidade de equilíbrio do modelo exponencial tipo Weibull.	88
Figura 5.15 – Teste de hidratação a 10 °C sem aplicação de ultrassom para determinação da umidade de equilíbrio.	89
Figura 5.16 – Ajuste do modelo difusivo: valores experimentais de umidade, em kg/kg _{bs} (eixo das ordenadas) em função dos valores preditos pelo modelo, em kg/kg _{bs} (eixo das abscissas).	90
Figura 5.17 – Perfil de umidade da cevada para diversos tempos de maceração (umidade (eixo das ordenadas), em kg/kg _{bs} , versus o raio (eixo das abscissas), em m).	93
Figura 5.18 – Registro fotográfico da germinação da cevada submetida a diferentes condições de maceração.	95
Figura 5.19 – Curva padrão de absorvância em função da concentração de maltose na solução.	98
Figura 5.20 – Concentração de açúcares redutores no malte (média ± desvio padrão).	99
Figura 5.21 – Atividade de alfa-amilase do malte (média ± desvio padrão).	101
Figura 5.22 – Atividade de beta-amilase do malte (média ± desvio padrão).	102
Figura 5.23 – Seção histológica do interior da amostra com a coloração HE (hematoxilina-Eosina) sob luz normal (letras maiúsculas) e luz polarizada (letras minúsculas) com aumento de 20x. Maceração a 20 °C com 0 hora de germinação (A e a) e com 96 horas de germinação (B e b); maceração a 20 °C com ultrassom com 750 W de potência com 0 hora de germinação (C e c) e com 96 horas de germinação (D e d).	103
Figura 5.24 – Seção histológica do interior da amostra com a coloração PAS (Periodic Acid-Shiff) com aumento de 40x. Maceração a 20 °C com 0 hora de germinação (A) e com 96 horas de germinação (B); maceração a 20 °C com ultrassom com 750 W de potência com 0 hora de germinação (C) e com 96 horas de germinação (D).	104
Figura 5.25 – Seção histológica do interior da amostra com a coloração XP (Xilidine Ponceau) com aumento de 40x. Maceração a 20 °C com 0 hora de germinação (A) e com 96 horas de germinação (B); maceração a 20 °C com ultrassom com 750 W de potência com 0 hora de germinação (C) e com 96 horas de germinação (D).	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Principais constituintes da cevada.	19
Tabela 4.1 – Condições temperatura e aplicação de ultrassom de potência utilizadas na maceração de cevada.	53
Tabela 4.2 – Fatores e níveis utilizados para avaliação do malte.	59
Tabela 4.3 – Concentrações de maltose para confecção da curva padrão.	60
Tabela 5.1 – Parâmetros estatísticos do ajuste das respectivas equações às dimensões do grão de cevada.	65
Tabela 5.2 – Potência real transmitida ao meio durante a aplicação de ultrassom de potência (média $\pm$ desvio padrão).	74
Tabela 5.3 – Parâmetros de ajuste do modelo de Peleg.	81
Tabela 5.4 – Parâmetros do ajuste do modelo exponencial tipo Weibull.	86
Tabela 5.5 – Parâmetros de ajuste do modelo difusivo.	91
Tabela 5.6 – Tempo de maceração necessário para atingir 0,75 kg/kgbs (média $\pm$ desvio padrão).	94
Tabela 5.7 – Tempo médio de germinação (MGT) e porcentagem de germinação (%GER) do malte (média $\pm$ desvio padrão).	97

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
SUMÁRIO	13
1. INTRODUÇÃO	15
2. OBJETIVOS	17
2.1. Objetivo Geral	17
2.2. Objetivos Específicos	17
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	18
3.1. Cevada	18
3.2. Processo de malteação	20
3.2.1. Maceração	20
3.2.2. Germinação	21
3.2.3. Secagem	22
3.2.4. Remoção da radícula.....	23
3.2.5. Poder diastático.....	23
3.3. Ultrassom	24
3.3.1. Generalidades.....	24
3.3.2. Classificação do ultrassom.....	24
3.3.2.1. <i>Ultrassom de potência</i>	26
3.3.2.2. <i>Transdutores operados por meio de fluidos</i>	26
3.3.2.3. <i>Transdutores magnetoestrictivos</i>	27
3.3.2.4. <i>Transdutores piezoelétricos</i>	28
3.3.3. Equipamentos de ultrassom de potência	30
3.3.3.1. <i>Banhos ultrassônicos</i>	30
3.3.3.2. <i>Sistemas de sonda</i>	32
3.3.4. Mecanismos de atuação e efeitos do ultrassom	35
4. MATERIAL E MÉTODOS	38
4.1. Matéria prima	38
4.2. Propriedades físicas	38
4.2.1. Preparo das amostras	39
4.2.2. Dimensões do grão.....	39
4.2.3. Esfericidade e área superficial do grão	40

4.2.4.	Massa e volume de mil grãos.....	41
4.2.5.	Densidades e porosidade do leito de grãos	41
4.2.6.	Área específica do grão e do leito de grãos	42
4.2.7.	Ajuste matemático e análise estatística.....	42
4.3.	Ultrassom de potência	43
4.3.1.	Descrição dos equipamentos.....	43
4.3.2.	Potência ultrassônica transmitida.....	47
4.3.2.1.	<i>Balanco de energia e equacionamento</i>	<i>47</i>
4.4.	Maceração da cevada	52
4.4.1.	Cinética de maceração	52
4.4.2.	Efeito do ultrassom de alta intensidade e da temperatura.....	53
4.4.3.	Modelagem matemática e análise estatística	54
4.4.3.1.	<i>Modelo de Peleg.....</i>	<i>54</i>
4.4.3.2.	<i>Modelo exponencial</i>	<i>55</i>
4.4.3.3.	<i>Modelo difusivo.....</i>	<i>55</i>
4.4.4.	Maceração para germinação	56
4.5.	Germinação da cevada	57
4.5.1.	Poder germinativo.....	58
4.5.2.	Quantificação de açúcares redutores e da atividade enzimática	59
4.5.2.1.	<i>Curva padrão de maltose</i>	<i>59</i>
4.5.2.2.	<i>Quantificação dos açúcares redutores totais.....</i>	<i>61</i>
4.5.2.3.	<i>Atividade de alfa e beta amilase</i>	<i>61</i>
4.5.3.	Análise microscópica.....	62
5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	64
5.1.	Propriedades físicas da cevada.....	64
5.1.1.	Dimensões do grão.....	64
5.1.2.	Esfericidade e área superficial do grão de cevada	66
5.1.3.	Massa e volume de mil grãos.....	68
5.1.4.	Densidades e porosidade do leito.....	69
5.1.5.	Área superficial específica do grão e do leito de grãos	71
5.2.	Potência ultrassônica transmitida.....	72
5.3.	Maceração da cevada	75
5.3.1.	Cinética de maceração	75
5.3.2.	Modelagem matemática.....	80
5.3.2.1.	<i>Modelo de Peleg.....</i>	<i>80</i>
5.3.2.2.	<i>Modelo exponencial (Weibull)</i>	<i>85</i>
5.3.2.3.	<i>Modelo difusivo.....</i>	<i>88</i>

5.3.3. Maceração para germinação	94
5.4. Germinação da cevada	95
5.4.1. Poder germinativo.....	97
5.4.2. Quantificação dos açúcares redutores e da atividade enzimática	98
5.4.2.1. <i>Curva padrão de maltose</i>	98
5.4.2.2. <i>Quantificação de açúcares redutores</i>	99
5.4.2.3. <i>Atividade de alfa e beta amilase</i>	100
5.4.3. Microestrutura.....	102
6. CONCLUSÕES	106
7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS.....	108
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICE I.....	117
APÊNDICE II	119

1. INTRODUÇÃO

A cevada é uma das principais culturas de grãos do mundo. Em termos de produção, é o quarto cereal mais produzido no mundo, sendo apenas menos produzido que o milho, que o arroz e que o trigo. Os maiores produtores mundiais são a Rússia, a França, a Alemanha, a Ucrânia e a Austrália (FAOSTAT, 2018).

A fabricação de bebidas como a cerveja e o uísque é um dos principais destinos da cevada, visto que é o cereal mais adequado para a produção de malte, que é um ingrediente de suma importância para a cerveja e o uísque. Estima-se que um terço da cevada produzida no mundo seja destinada à produção de malte. O Brasil é um dos maiores produtores de cerveja do mundo, mas sua oferta, tanto de cevada quanto de malte, é insuficiente para suprir a demanda, sendo necessária a importação (BAIK, ULLRICH, 2008; FAOSTAT, 2018).

A produção de malte envolve etapas que promovem transformações físico-químicas importantes, entre elas estão a maceração (ou hidratação) onde a umidade do grão é elevada de 10 até 42-46% (b.u.). Após o grão alcançar a umidade desejada, é realizada a germinação, onde o grão é submetido a condições de temperatura (em torno de 16 °C) e umidade controladas por 4-6 dias, para que haja a formação de enzimas que irão catalisar a hidrólise do amido, transformando-o em açúcares, e outras enzimas que irão degradar compostos indesejáveis no malte. Terminada a germinação, o agora malte verde é submetido a uma secagem, que é realizada para cessar a germinação, garantir a estabilidade e posterior atividade das enzimas produzidas, além de promover as características organolépticas do malte (LEWIS, YOUNG, 1995).

O estudo de tecnologias que permitam acelerar o processo e/ou melhorar a qualidade do malte é de grande interesse da indústria, visto o valor agregado deste produto e a vasta aplicação do mesmo.

O ultrassom é uma tecnologia emergente que vem sendo estudada para melhoria de processos e, conseqüentemente, de produtos. A ação mecânica do ultrassom promove alterações estruturais micro e macroscópicas durante sua aplicação, pois esse se propaga por todos meios possíveis, podendo então melhorar operações envolvendo transferência de massa e calor, processos onde haja agitação e/ou reações químicas (PATIST, BATES, 2008; CÁRCEL et al., 2012).

Uma grande vantagem do ultrassom é a sua facilidade de uso e aplicação, quando comparado a outras tecnologias como micro-ondas, radiação, altas pressões, entre outras, não necessitando de cuidados excessivos durante a utilização.

A aplicação de ultrassom vem sendo estudada em diversos processos de alimentos envolvendo a transferência de massa como salga de carne (CÁRCEL et al., 2007a), desidratação osmótica de (CÁRCEL et al., 2007b), hidratação de grão de bico (YILDIRIM et al., 2010), hidratação de feijão branco (GHAFOOR et al., 2014), hidratação de Sorgo (PATERO, AUGUSTO, 2015) e de feijão (MIANO; SABADOTI, AUGUSTO, 2018) e na germinação de cevada (YALDAGARD; MORTAZAVI, TABATABAIE, 2007; YALDAGARD; MORTAZAVI, TABATABAIE, 2008a; YALDAGARD; MORTAZAVI, TABATABAIE, 2008b; MIANO et al., 2015).

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo Geral

Estudar a aplicação de ultrassom de potência durante a etapa de maceração da cevada, para produção de malte.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar as propriedades físicas do grão e do leito de grãos de cevada em função da umidade;
- Determinar a potência ultrassônica real transmitida;
- Obter as cinéticas de maceração (hidratação da cevada);
- Modelar matematicamente o processo de maceração (hidratação);
- Avaliar a germinação da cevada e o malte obtido;

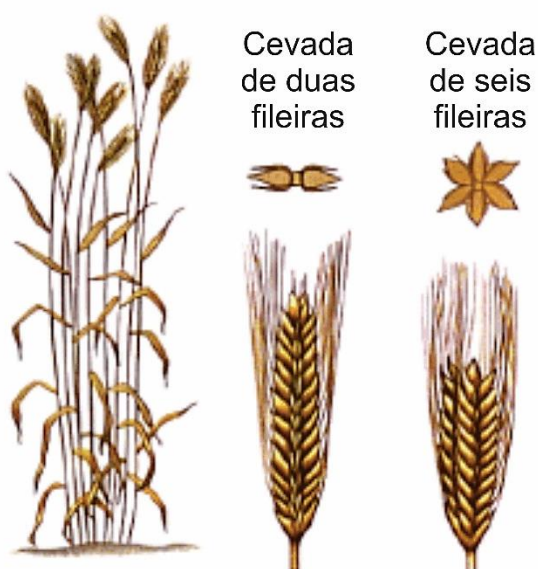
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. Cevada

A cevada é o quarto cereal mais cultivado no mundo, depois do milho, do arroz e do trigo e, de acordo com a FAO, em 2016, os maiores produtores mundiais foram a Rússia, a França, a Alemanha, a Ucrânia e a Austrália (FAOSTAT, 2018). A cevada é largamente utilizada na fabricação de cerveja e de bebidas destiladas como o uísque, visto que é o cereal mais adequado para a produção de malte, pois apresenta elevado conteúdo de amido, alta taxa de formação de enzimas, teor adequado de proteínas e alta resistência a doenças (HOUGH, BRIGGS, STEVENS, 1971).

Pertencente à família das gramíneas do gênero *Hordeum*, a cevada pode apresentar grãos alinhados na espiga na forma de duas fileiras (*Hordeum vulgare* var. *distichum*) ou de seis fileiras (*Hordeum vulgare* var. *hexatichon*) (Figura 3.1). A cevada de duas fileiras, quando comparada a de seis, apresenta maior teor de amido, grãos maiores e mais homogêneos e, por estes motivos, é a mais utilizada como matéria-prima para a produção de malte (GOLDAMMER, 1999).

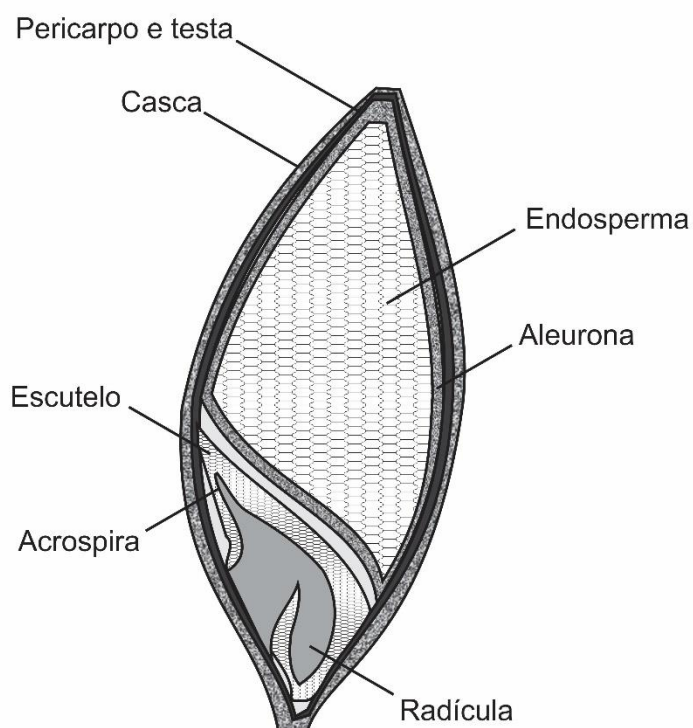
Figura 3.1 – Cevada de duas fileiras e de seis fileiras.



Fonte: The Drunk Alchemist (2014).

O grão de cevada apresenta uma forma alongada (Figura 3.2) e é formado por uma camada externa mais resistente, a casca. Abaixo da casca estão contidos o pericarpo, a testa e a camada de aleurona, sendo esta última muito importante para a produção de cerveja, pois é ela quem produzirá e secretará amilases no endosperma. O endosperma corresponde a maior fração do grão, onde se encontram as substâncias de reserva da semente, sendo que uma pequena parte é ocupada pelo embrião (onde estão contidas a radícula, a acrospira e o escutelo) responsável pelas funções vitais do grão (BRIGGS, 2002).

Figura 3.2 – Corte longitudinal do grão de cevada.



Fonte: Adaptado de Pollock (1979).

Tabela 3.1 – Principais constituintes da cevada.

Casca	Camada de Aleurona	Endosperma	Embrião
Celulose	Lipídeos	Amido	Lipídios
Pentosanas	Açúcares	Proteínas	Açúcares
Compostos fenólicos	Proteínas	Beta-glucanas	Proteínas
Sílica	Fosfatos (ác. fítico)	Pentosanas	Ác. giberélico
	Enzimas		Vitamina B
	Vitamina B		Minerais (K e Mg)
	Minerais		
	Beta-glucanas		
	Pentosanas		

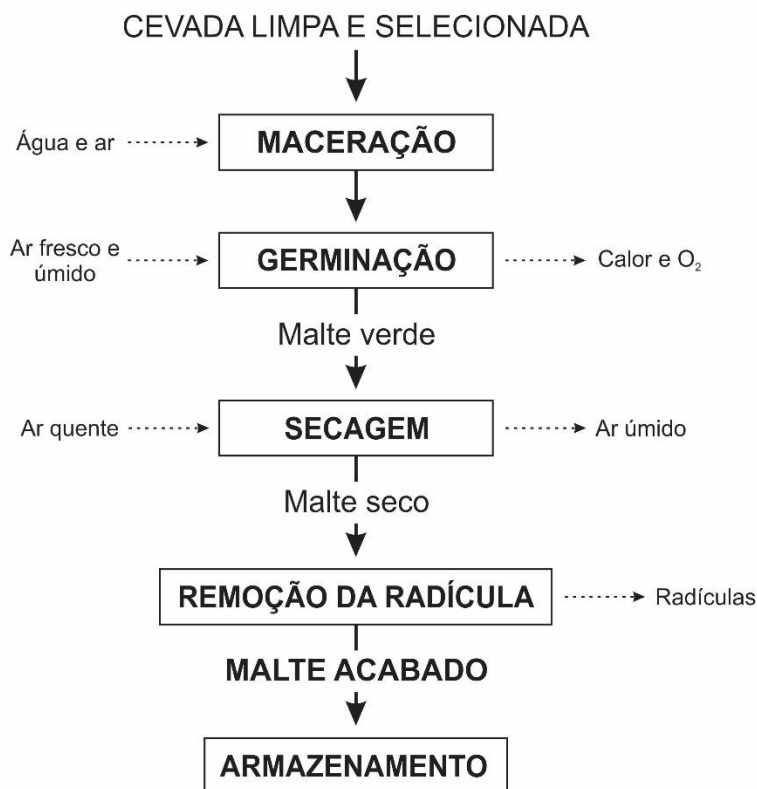
Fonte: Adaptado de European Brewing Convention (2000).

De acordo com Baik & Ullrich (2008), estima-se que um terço da cevada produzida no mundo é destinada para a produção de malte. No Brasil, tanto a produção de cevada, quanto a de malte é insuficiente para suprir a demanda, havendo a necessidade de importação (DE MOR, MINELLA, 2012; MINELLA, 2010; FAOSTAT, 2018).

3.2. Processo de malteação

A malteação é o processo de transformação da cevada em malte. Este processo engloba três etapas fundamentais: a maceração, a germinação e a secagem (Figura 3.3).

Figura 3.3 – Diagrama do processo de malteação.



Fonte: Adaptado de EBC (2000).

3.2.1. Maceração

A maceração (ou hidratação) é a primeira fase do processo de malteação e os principais objetivos desta fase são induzir a entrada de água no grão de cevada, ativando o processo de

desenvolvimento fisiológico (fase biológica), e proporcionar a limpeza da superfície do grão, com remoção parcial de substâncias indesejáveis da casca (TSCHOPE, NOHEL, 1999).

Durante a maceração, a umidade do grão de cevada é elevada de 10-13 para 42-46% (b.u), que é a umidade ideal para iniciar a etapa posterior, a germinação. A maceração promove a absorção da água através da zona do embrião e, então, o metabolismo do embrião dormiente é ativado e a camada de aleurona inicia a produção de enzimas que começam a degradar moléculas específicas. Ocorre então a solubilização e desagregação do endosperma, reduzindo sua rigidez. O aparecimento da radícula, que corresponde ao momento em que o grão começa a respirar intensamente, indica o início da germinação (SILVA et al., 2008).

A água utilizada na maceração deve ser potável e fria (10-15 °C). A respiração do grão, durante a maceração, promove o acúmulo de CO₂ e calor, que ainda pode ser agravado pela ação de microrganismos associados à cevada. Para remover os microrganismos, calor e o CO₂ acumulado, a água deve ser trocada periodicamente (LEWIS, YOUNG, 1995).

O tempo de maceração depende de vários fatores como a variedade e constituintes da cevada, seu tamanho, e a temperatura em que ocorre. A maceração é uma etapa de fundamental importância para a qualidade do malte (BROOKES, LOVETT, MACWILLIAM, 1976).

3.2.2. Germinação

Após o grão atingir a umidade necessária, dá-se sequência na fase de germinação, que teve início durante a maceração. Durante a germinação, são produzidas as enzimas que irão realizar as modificações desejadas no malte.

As modificações enzimáticas iniciam-se no embrião e vão se propagando ao longo do grão. A água começa a dissolver uma substância liberada pelo escutelo, o ácido giberélico (um hormônio vegetal da classe das giberelinas), que também pode ser adicionado, sendo limitado por leis que variam para cada país, na cevada para induzir a germinação. O ácido giberélico é então transportado até a camada de aleurona que, por sua vez, é induzida a sintetizar as hidrolases (α e β -amilases) posteriormente secretadas no endosperma. Esta síntese é realizada a partir dos aminoácidos resultantes da hidrólise das proteínas presentes na camada de aleurona (LEWIS, YOUNG, 1995; BRIGGS, 2002).

No endosperma, as enzimas α e β -amilase catalisam a hidrólise do amido em açúcares, que serão transportados para o embrião e servirão de fonte energética para o crescimento da acrospira (futura folha) e da radícula. Além disso, a degradação das paredes celulares resulta

numa perda de resistência que irá tornar o grão mais friável (farinhoso), facilitando posteriormente sua moagem. Nesta fase também são ativadas as β -glucanases, enzimas que irão degradar as proteínas e β -glucanas que envolvem os grânulos de amido. A modificação completa dos grãos se dá após a total desagregação das β -glucanas, da matriz e dos grânulos de amido (LEWIS, YOUNG, 1995; PARKER, PROUDLOVE, 1995).

O fim desta etapa é determinado pelo grau de germinação dos grãos, controlado por uma avaliação visual e tátil. A plúmula e a radícula são indicadores visuais que definem o momento em que a germinação deve ser encerrada. Para evitar degradação excessiva do endosperma do grão, a germinação deve ser concluída quando a acrospira atingir $\frac{3}{4}$ do tamanho do grão, a radícula pode atingir até duas vezes o comprimento do grão (EBC, 2000).

A germinação é realizada sob condições de temperatura, umidade e arejamento controladas durante 3-6 dias, tempo que levam para atingir o nível de alteração desejado (LEWIS, YOUNG, 1995; GRUBER, 2001). A temperatura de germinação deve estar em torno de 15-22 °C (EBC, 2000).

No fim da germinação, é obtido o malte verde que possui a quantidade de enzimas e o nível de modificação do endosperma desejados e, neste momento, a germinação pode ser interrompida.

3.2.3. Secagem

A secagem do malte é a operação final no processo de malteação, sendo, então, a fase em que o malte é preparado para ser utilizado como matéria-prima. Por isso, é uma etapa onde se definem parâmetros importantes para obtenção de um produto final com as características desejadas. O objetivo principal é interromper as reações bioquímicas no grão e fixar as suas características organolépticas (WARPALA, PANDIELLA, 2000).

Na secagem do malte estão envolvidas reações importantes e a carga microbiana é drasticamente reduzida, de modo a aumentar o tempo de armazenamento (PRIOR, 1996). Durante a secagem, a umidade do malte verde é reduzida de 45% até 4-5% e os seguintes fenômenos ocorrem:

- O crescimento da acrospira e das radículas é cessado e a modificação do malte é paralisada;
- Inativação do sistema enzimático para preservar as enzimas;
- Redução do teor de umidade para obtenção de um malte estável;

- Desenvolvimento e estabilização de aromas;
- Remoção de aromas indesejáveis;
- Desidratação da radícula para que sua remoção seja facilitada.

A grande dificuldade do processo de secagem é reduzir a umidade do malte até um teor seguro sem danificar o sistema enzimático (HOSENEY, 1986). Em elevados teores de umidade, algumas enzimas são sensíveis ao calor. Então, para protegê-las, o malte deve ser aquecido cuidadosamente, com temperaturas iniciais de 50-60 °C e aumentando de forma gradual, podendo chegar a 70 °C quando o malte atingir umidades próximas a 12%. Após o malte chegar à umidade de 5%, ele é então “curado”. Neste estágio da secagem a temperatura pode chegar a 80-85 °C, para maltes do tipo *American pale*, e até acima de 110 °C, para maltes *British ale* (LEWIS, YOUNG, 1995). Apenas para baixos teores de umidade, o aumento da temperatura é conveniente para a produção de aromas característicos, podendo então se produzir os mais diversos tipos de malte (HOSENEY, 1986).

3.2.4. Remoção da radícula

Após a secagem, a remoção das radículas é necessária, pois estas apresentam elevado teor de compostos nitrogenados e fenólicos, prejudicando a produção da cerveja, promovendo sabor amargo e adstringente. Além disso, a radícula possui alta higroscopicidade, o que poderia comprometer a estabilidade do malte. Após a secagem, devido a baixa umidade, a radícula pode ser facilmente removida através da passagem por peneiras vibratórias (MALTEUROP, 2018).

3.2.5. Poder diastático

O poder diastático está relacionado à quantidade de enzimas produzidas e ativadas durante a malteação e que irão atuar na conversão do amido em açúcares redutores e fermentescíveis, durante a mosturação. Estas enzimas, alfa- e beta-amilase, são as que vão degradar o amido transformando em açúcares fermentescíveis (FINDLAY, 1971). É um parâmetro muito importante, pois está relacionado à eficiência do processo de malteação. A beta-amilase é a enzima de maior contribuição para o poder diastático (GIBSON et al., 1995).

3.3. Ultrassom

3.3.1. Generalidades

Ultrassom são ondas sonoras que se propagam com frequência superior ao limite da audição humana (20 kHz). As leis físicas de geração e propagação do som são válidas para todo espectro de frequências. O ultrassom está amplamente presente na natureza (CARLIN, 1972). A frequência máxima captada pela audição humana é inferior à de muitos animais, como os cachorros, por exemplo que podem ouvir frequências superiores a 50 kHz ou os golfinhos e morcegos que podem captar ondas próximas aos 100 kHz. Alguns destes animais utilizam o ultrassom para se comunicar (CÁRCEL, 2003; CAPOTE, DE CASTRO, 2007).

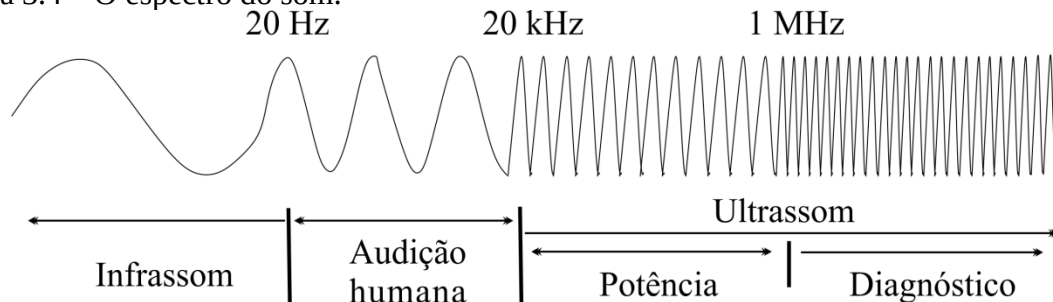
A utilização do ultrassom pelo homem começou em 1880, quando o casal Curie descobriu o efeito piezoelétrico, que é o mecanismo fundamental em que se baseia a tecnologia dos transdutores modernos. Porém, o primeiro transdutor de ultrassom foi o apito, desenvolvido por Francis Galton em 1883 ao estudar o limite da audição humana. A primeira aplicação comercial do ultrassom ocorreu em 1917 com o “rastreador de ecos” (eco-sounder), inventado e desenvolvido por Paul Langevin. Esse sistema deu lugar ao SONAR (*Sound Navigator and Ranging*) na detecção submarina, que foi desenvolvido durante a Segunda Guerra Mundial. Posteriormente, surgiu o microscópio de varredura ultrassônica e numerosas aplicações como análise não destrutiva na medicina, na verificação de soldas, na detecção de fissuras, entre outras (KUTTRUFF, 1991).

O ultrassom, quando aplicado com uma potência suficientemente grande, pode influenciar em um determinado processo, produto ou reação química. Essa influência é dada, na maioria das vezes, pela cavitação. Este fenômeno foi identificado em 1895 nas hélices dos barcos. Se o movimento das mesmas fosse muito rápido, eram produzidas as então denominadas bolhas da cavitação, que, ao se romperem, causavam erosão nas hélices. A partir de 1945, houve maior conhecimento do fenômeno de cavitação e o desenvolvimento de novos equipamentos para aplicação de ultrassom com uma potência desejada (MASON, LORIMER, 2002).

3.3.2. Classificação do ultrassom

Os tipos de ondas sonoras são classificados em função de suas frequências (Figura 3.4).

Figura 3.4 – O espectro do som.



Fonte: adaptado de Feng; Barbosa-Cánovas, Weiss, (2010).

O termo infrassom refere-se às ondas de baixas frequências. Abaixo da faixa de frequência perceptível pelo ouvido humano. Essa classe de onda é utilizada por barcos e submarinos em seus equipamentos do tipo SONAR. A faixa perceptível à audição humana encontra-se entre 20 Hz a 20 kHz. O ultrassom é tipo de onda que possui uma frequência superior à percepção humana. Este espectro ultrassônico pode ser dividido em duas sub-faixas, a primeira, classificada como ultrassom de potência, onde o maior foco de estudos está na faixa de 20 kHz a 1 MHz e, a segunda, chamada de ultrassom de diagnóstico, que supera a frequência de 1 MHz (FENG; BARBOSA-CÁNOVAS, WEISS, 2010).

Segundo Mason (2000), a pesquisa aplicando ultrassom pode ser dividida em três vertentes:

- Sonoquímica: originada na química e física, que inclui aplicações tradicionais como catálise e síntese, onde o fenômeno da cavitação, foco de estudo, é o principal responsável por estes processos. Indústrias como a de proteção ambiental (tanto biológicas como químicas), ciência dos materiais (novos materiais catalíticos, extração, cristalização, polimerização), eletroquímica (eletrossíntese e eletroanalítica) e biotecnológica (modificação de atividades enzimáticas e celular).
- Ultrassom de potência: tem sua origem na engenharia de processamento, que inclui limpeza de soldas e processamento de materiais em nível industrial. Na indústria de alimentos, vem sendo utilizado em operações envolvendo transferência de massa (secagem, desidratação osmótica, hidratação, extração, etc.), pasteurização, homogeneização, entre tantos outros.
- Ultrassom de diagnóstico: para ensaios não destrutivos e digitalização médica, tem despertado grande interesse na pesquisa e na indústria.

Para a indústria de alimentos, o ultrassom pode apresentar grande vantagem, devido a sua classificação como energia limpa, quando comparado com técnicas como micro-ondas, radiação gama e pulsos elétricos, que requerem precauções no momento da aplicação.

3.3.2.1. *Ultrassom de potência*

De maneira geral, a produção de ultrassom consiste na conversão de qualquer outro tipo de energia em energia acústica. O modo de realizar este processo dependerá das necessidades de geração, principalmente da intensidade necessária e da faixa de frequência a cobrir (CARLIN, 1972). Qualquer sistema de geração de ultrassom conta com dois componentes essenciais, uma fonte de energia e um transdutor. A princípio, a energia fornecida pela fonte pode ser de qualquer tipo, elétrica, magnética ou mecânica. O transdutor é encarregado de transformar esta energia em energia acústica, com características de frequência e intensidade necessárias (FAHY, 2000).

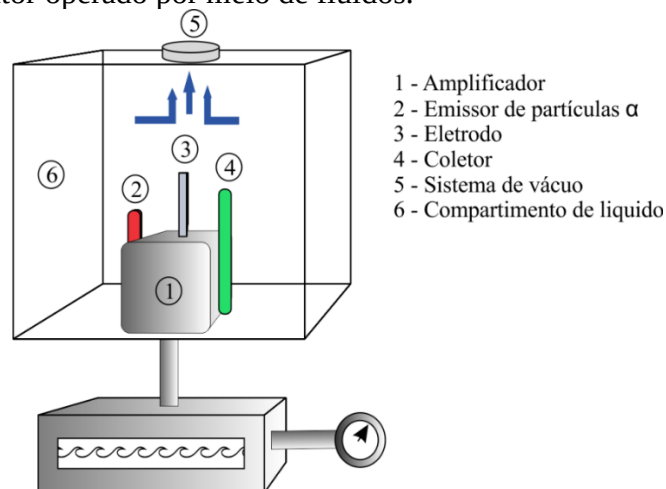
Os transdutores são dispositivos formados por um conjunto de elementos, onde, entre eles, o mais importante é o responsável pela produção do ultrassom. Os demais componentes da estrutura do transdutor são elementos mais ou menos passivos que se encarregam de melhorar a dissipação da energia acústica. Os principais pontos a considerar nos transdutores são a capacidade de potência, o rendimento na conversão da energia inicial em energia acústica, a amplitude e distribuição da vibração e a capacidade de direcionar a energia emitida (GALLEGO-JUÁREZ, 2002).

Os transdutores podem ser classificados em três grupos principais, de acordo com a maneira de transformar a energia em ondas ultrassônicas: os transdutores operados por meio de fluidos, os transdutores magnetoestrictivos e os transdutores piezoelétricos (CAPOTE, DE CASTRO, 2007).

3.3.2.2. *Transdutores operados por meio de fluidos*

Estes tipos de transdutores convertem a energia cinética de um fluido em energia acústica. O exemplo mais comum é o apito. Seu funcionamento consiste em um fluxo de gás em uma cavidade ressonante através de um orifício. O sólido influencia no escoamento do gás e então é produzido um som na mesma frequência que a perturbação produzida no gás (MASON, LORIMER, 2002).

Figura 3.5 – Transdutor operado por meio de fluidos.



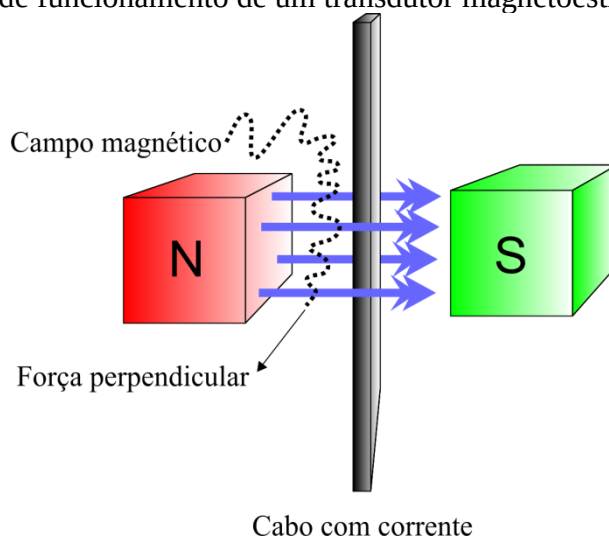
Fonte: Adaptado de Kuttruff (1991).

Também existem os chamados transdutores operados por meio de líquidos (Figura 3.5). Seu funcionamento consiste em bombear um fluido para uma câmara através de um orifício. A câmara dispõe de uma lâmina de aço delgada que começa a vibrar pela ação da corrente de fluido. Esta vibração cria a onda acústica. Estes sistemas são muito utilizados na homogeneização e em operações de mistura. Além disso, a operação de mistura é favorecida pelo efeito Venturi que se produz pela expansão do líquido ao passar para a câmara pelo orifício (KUTTRUFF, 1991).

3.3.2.3. Transdutores magnetoestritivos

Estes foram os primeiros transdutores utilizados em escala industrial para a geração de ultrassom de alta intensidade. O funcionamento é baseado na propriedade de alguns materiais, como, por exemplo, o níquel, de ter o tamanho reduzido, quando submetido a um campo magnético, e retornar ao seu tamanho original quando retirado do campo. Se o campo magnético é aplicado em uma série de pulsos curtos, o transdutor vibra com a mesma frequência de aplicação dos pulsos magnéticos (CARLIN, 1972).

Figura 3.6 – Princípio de funcionamento de um transdutor magnetoestrutivo.



Fonte: adaptado de Kuttruff (1991).

As principais vantagens destes tipos de transdutores são a robustez e a durabilidade. Além disso, proporcionam sinais muito mais potentes, o que os capacita para aplicações pesadas e em temperaturas elevadas. Porém, apresentam duas desvantagens consideráveis. A primeira é que a frequência máxima gerada é de 100 kHz, já que os materiais não conseguem responder com velocidade maior ao efeito magnetoestrutivo. A segunda é a eficiência que é menor que 60 %, o que resulta em grandes perdas na forma de calor (KUTTRUFF, 1991).

3.3.2.4. Transdutores piezoelétricos

Os equipamentos de ultrassom mais comumente empregados na produção e detecção utilizam propriedades piezoelétricas de certos materiais cristalinos como, por exemplo, o quartzo. Se uma seção fina deste cristal é cortada, de modo que a superfície maior seja normal ao eixo x da seção resultante, o material irá apresentar duas propriedades complementares (Figura 3.7):

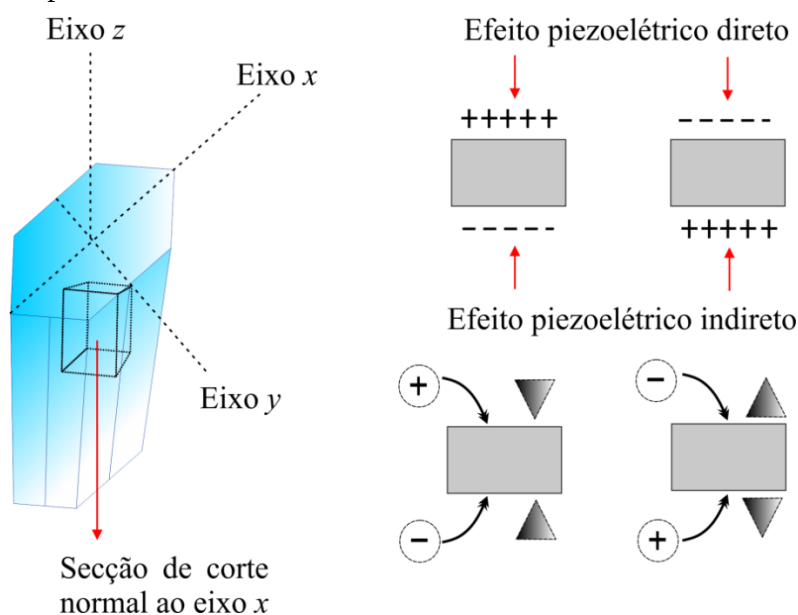
O efeito direto: ocorre quando a pressão é aplicada através da maior superfície da seção, e então uma carga de mesma intensidade, com sinais opostos é produzida em cada face. A polaridade é invertida, sendo que a tensão é aplicada ao longo da superfície.

O efeito indireto: ocorre ao se aplicar cargas iguais, porém de sinais opostos em cada uma das faces do cristal, fazendo com que esse se expanda ou se contraia em função da polaridade.

Ao se aplicar uma corrente elétrica com mudanças de polaridade suficientemente rápidas é possível gerar uma vibração no cristal, produzindo então uma onda acústica. O funcionamento ótimo de um determinado cristal se obtém na frequência de ressonância, que depende das dimensões do mesmo (CAPOTE, DE CASTRO, 2007).

Além do quartzo, existem muitos outros materiais piezoelétricos empregados em equipamentos de ultrassom. Três dos mais comumente utilizados são o titanato de bário (BaTiO_3), o metaniobato de chumbo (PbNb_2O_6) e a mistura titanato-zirconato de chumbo (PZT's). Estes materiais são compostos ferroelétricos, isto é, são espontaneamente polarizados e suas polaridades são alteradas por deformação mecânica; Estes materiais não podem ser obtidos na forma de grandes cristais, mas sim, moídos com ligantes e sintetizados sob pressão e temperatura de 1000 °C até se obter um material cerâmico. Geralmente, dois compostos são combinados a fim de aumentar o movimento global. A mistura de diferentes materiais tem permitido o desenvolvimento de transdutores ultrassônicos de potência e frequência variável, podendo então atender diversas aplicações (CAPOTE, DE CASTRO, 2007).

Figura 3.7 – Efeito piezoelétrico.

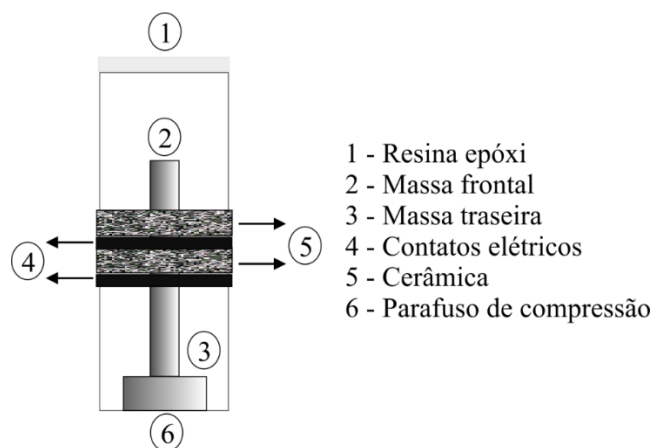


Fonte: adaptado de Capote, de Castro (2007).

Os transdutores piezoelétricos baseados nesses tipos de combinação são chamados de “compósitos 1-3” ou “sanduíche” (Figura 3.8), que consistem de uma matriz de pilares piezoelétricos incorporada em um material flexível, fornecendo a forma de folha moldável, abrindo novos caminhos para o desenvolvimento. Pelo fato da face emissora ser uma

combinação entre cerâmica e plástico, a transmissão acústica em sistemas aquosos é facilitada (CAPOTE, DE CASTRO, 2007).

Figura 3.8 – Transdutor piezoelétrico tipo “sanduíche”.



Fonte: adaptado de Capote, de Castro (2007).

3.3.3. Equipamentos de ultrassom de potência

A maioria dos sistemas utilizados para a aplicação de ultrassons de alta intensidade baseia-se em sistemas eletroacústicos, principalmente piezoelétricos e, em menor escala, magnetoestrictivos. O equipamento necessário para qualquer destas duas aplicações é o mesmo, e se compõe de três partes essenciais. Um gerador para converter o sinal elétrico da rede à frequência requerida; um transdutor que converta esta corrente de alta frequência em vibrações mecânicas; e por último, é necessário um sistema de aplicação que transporte a energia acústica gerada pelo transdutor ao meio que se deseja tratar. Este sistema de aplicação pode limitar-se a transmitir a energia acústica ou, também, a produzir alguma modificação como, por exemplo, amplificá-la (MASON, LORIMER, 2002; HEIKKOLA, LAITINEN, 2005).

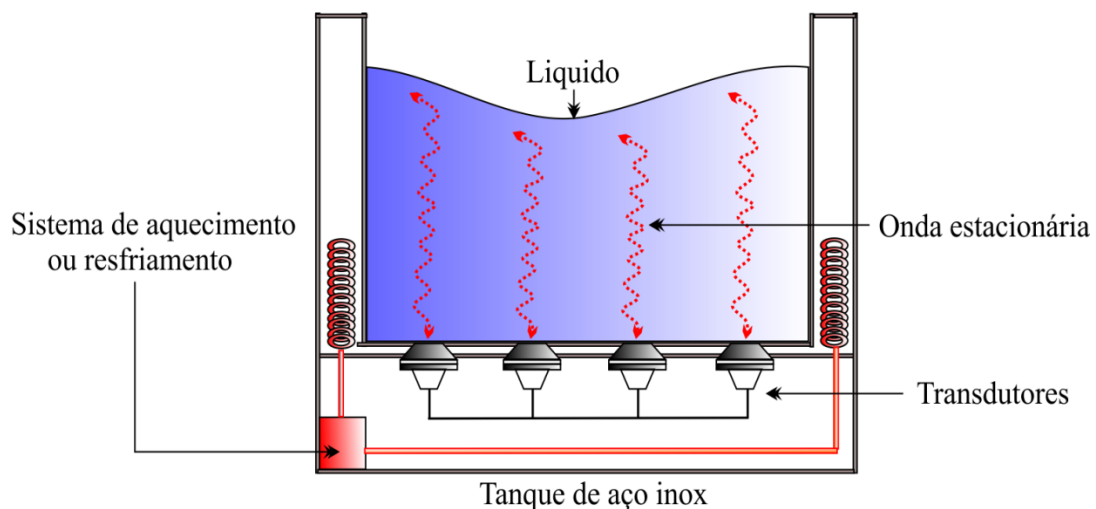
3.3.3.1. Banhos ultrassônicos

Provavelmente seja um dos sistemas de produção de ultrassom mais econômicos e acessíveis, e, por esta razão, seja a fonte de maior parte dos trabalhos de pesquisa publicados (MULET et al., 1999). De maneira geral, consistem num tanque de aço inox no qual se acoplam transdutores em sua base (Figura 3.9). Por sua vez, os transdutores vão conectados a um equipamento eletrônico capaz de fornecer energia elétrica nas condições necessárias

(frequência e intensidade) para excitá-los. O número de transdutores pode variar, porém todos têm que vibrar na mesma fase. Com isso, aumenta-se a quantidade de energia acústica produzida por unidade de superfície emitente. A potência gerada dependerá principalmente do número de transdutores e a frequência do tipo de transdutor (MASON, 2000).

Para começar a funcionar, os banhos ultrassônicos são preenchidos com um líquido. O tratamento será realizado no líquido ou em algum recipiente submerso no mesmo (banho-maria). Quando os transdutores vibram, a base do tanque converte-se em emissor das ondas acústicas. A base do tanque, além do meio, também transmite a vibração às paredes do banho, o que a converte em emissores de ondas. Devido à reflexão dos sinais, são geradas ondas estacionárias. A principal se localiza entre a base do banho e a interface líquido-ar. A diferença de impedâncias acústicas entre estes dois meios (qualquer líquido e um gás como o ar) é muito elevada, provocando a reflexão na interface de praticamente 100% das ondas acústicas. Portanto, a onda que parte da base do banho chega à interface líquido-ar, reflete-se e interage com a nova onda proveniente do transdutor criando assim o campo estacionário. Todos estes emissores de ondas e as sucessivas reflexões das mesmas nas interfaces provocam a criação de áreas de máxima e mínima intensidade ultrassônica e, finalmente, um campo acústico bastante caótico (WELTI-CHANES; VERGARA-BALDERAS, BERMÚDEZ-AGUIRRE, 2005; CAPOTE, DE CASTRO, 2007). Como se pode deduzir, a altura do líquido no banho pode influenciar muito no campo criado, o que torna conveniente trabalhar com o nível de líquido recomendado pelos fabricantes (MASON, LORIMER, 2002).

Figura 3.9 – Banho ultrassônico, no detalhe a formação da onda estacionária.



Fonte: adaptado de Povey, Mason (1998).

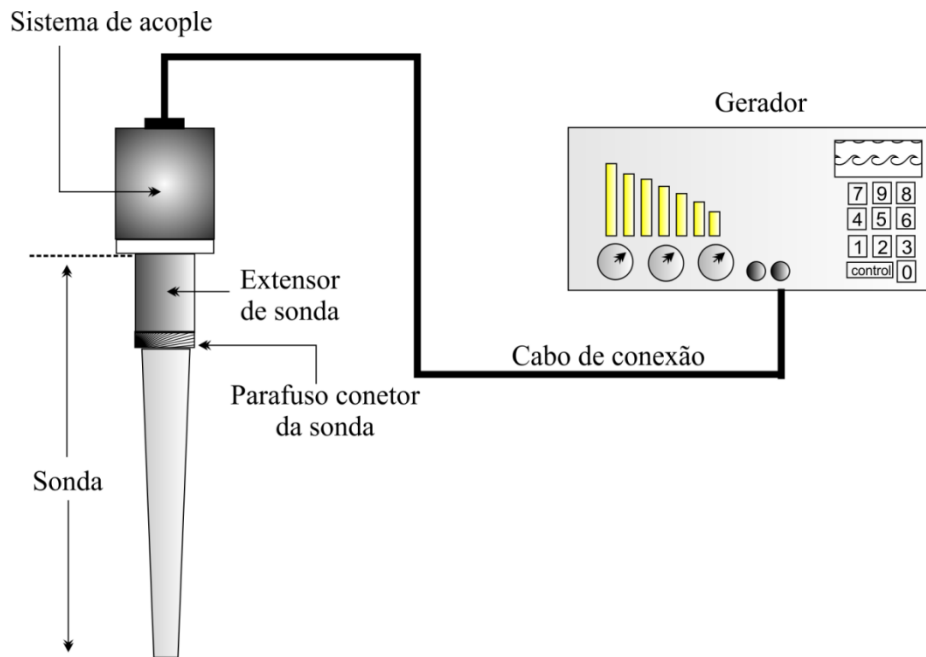
Para evitar, na medida do possível, a formação de campos estacionários, alguns banhos dispõem de sistemas que realizam uma varredura de frequências. Eles também podem apresentar algum sistema termostático de aquecimento ou resfriamento para regular a temperatura. Alguns banhos são equipados com reguladores da potência emitida e, inclusive, de dispositivos para aplicar ultrassom em forma de pulsos que minimizam o problema da criação de campos estacionários (POVEY, MASON, 1998).

Como principais vantagens destes equipamentos, pode-se dizer que são simples, relativamente econômicos e fáceis de encontrar no mercado. Entre as desvantagens convém destacar a dificuldade para medir a intensidade ultrassônica real produzida. Outro inconveniente destes equipamentos é a baixa potência que são capazes de transmitir ao meio em comparação com outros sistemas. A isto se soma que a intensidade ultrassônica varia dentro do banho com relação à posição das amostras resultando em um parâmetro muito importante de ser controlado. Por último, destaca-se a dificuldade do controle de temperatura quando se deseja trabalhar com uma faixa de erro mínimo (POVEY, MASON, 1998; CAPOTE, DE CASTRO, 2007).

3.3.3.2. *Sistemas de sonda*

Estes sistemas baseiam-se na transferência de energia ultrassônica ao meio, em que esta é produzida por um transdutor e transmitida através de uma sonda metálica (Figura 3.10). Utilizam-se para aplicações tanto em líquidos como em gases. O sistema constitui-se de um gerador que produz um sinal elétrico na frequência e potência desejada, um transdutor piezelétrico que transforma a energia elétrica em acústica e, uma sonda que transmite esta energia acústica ao meio a ser tratado. A intensidade da onda emitida, isto é, a amplitude de vibração da ponta da sonda, pode ser controlada alterando a potência aplicada pelo gerador. Praticamente todos os equipamentos dispõem de um controle de potência deste tipo, possibilitando a aplicação do sinal em forma de pulsos (PINJARI, PANDIT, 2010).

Figura 3.10 – Sistema de sonda para aplicação de ultrassom de potência.

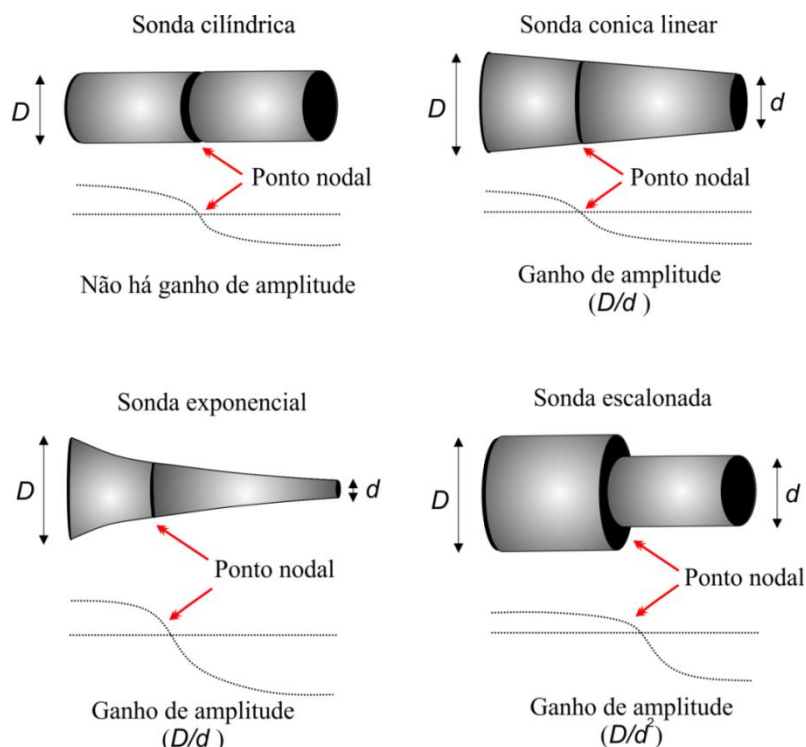


Fonte: adaptado de Lingyu-Yu, Giurgiutiu (2009).

O material utilizado para a fabricação das sondas deve ter uma boa resistência à fadiga mecânica, baixas perdas acústicas e resistência à erosão que é produzida pela cavitação. Os materiais mais utilizados são diferentes ligas de titânio (LINGYU-YU, GIURGIUTIU, 2009).

A geometria da sonda também tem grande importância. Para aplicações em líquidos, uma sonda de forma cilíndrica se limita a transmitir o sinal acústico produzido pelo transdutor ao meio a tratar (Figura 3.11). Se a forma é cônica ou com uma redução de diâmetro exponencial, o sinal se amplificará seguindo a relação D/d , sendo D o diâmetro do transdutor e d o diâmetro da ponta da sonda, isto é, a superfície emissora. Se a forma é escalonada o ganho seguirá a relação D/d^2 . Neste caso, para evitar um stress mecânico importante, o degrau deve situar-se no ponto nodal da sonda, já que a vibração neste ponto é zero. Muitos sistemas são projetados para operar com sondas intercambiáveis de diferentes diâmetros, alternando então a área da superfície emissora (KUTTRUFF, 1991; CAPOTE, DE CASTRO, 2007).

Figura 3.11 – Diferentes tipos de sondas acústicas e seus fatores de amplificação.



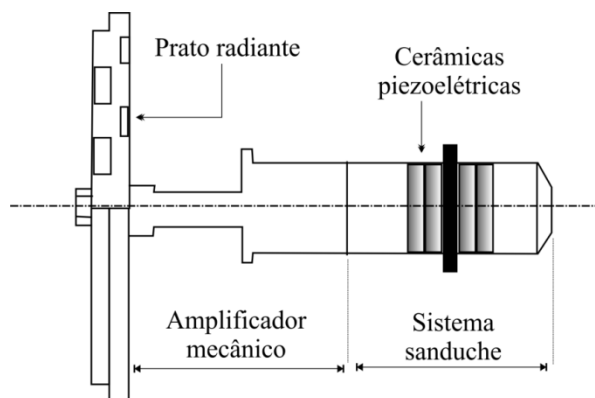
Fonte: adaptado de Capote, De Castro (2007).

Um aspecto importante a ser considerado nestes sistemas é o desgaste que sofrem as sondas. A cavitação gerada no meio produz um grande stress mecânico que ocasiona a erosão da ponta da sonda. Desta maneira, formam-se irregularidades na superfície da sonda que impedem a correta emissão de ondas planas. Devido a este fenômeno, se produzem várias ondas que se anulam parcialmente entre si. Isto resulta em uma perda de eficiência na geração e emissão de ultrassom. A erosão também provoca a diminuição do comprimento total da sonda que deixa de ser um múltiplo de meio comprimento de onda. Como consequência, o sistema deixa de estar otimizado geometricamente e a intensidade emitida é reduzida. Muitos sistemas apresentam sondas com pontas descartáveis, de modo que não há necessidade de trocar a sonda inteira, quando nesta aparece erosão. Isto resulta em uma economia considerável, devido ao elevado preço destes tipos de sondas (LINGYU-YU, GIURGIUTIU, 2009).

Há também sondas para aplicações em gases. Um dos principais problemas, neste caso, é conseguir uma boa adaptação entre o transdutor e o meio onde se deseja introduzir o ultrassom. Em meios líquidos isto se torna relativamente fácil, porém, os meios gasosos apresentam uma baixa impedância acústica específica e uma elevada absorção acústica, o que dificulta a adaptação com o transdutor e a transmissão de ultrassom em seu meio. Para evitar estes problemas nas sondas, o emissor tem a forma de um prato com um perfil escalonado, onde

se consegue uma boa adequação com sistemas gasosos, amplitude de vibração e uma elevada direcionalidade (Figura 3.12) (GALLEGO-JUÁREZ, 2002).

Figura 3.12 – Estrutura de um transdutor ligado a uma sonda tipo prato.



Fonte: adaptado de Gallego-Juárez (2002).

3.3.4. Mecanismos de atuação e efeitos do ultrassom

Ultrassom é um exemplo de nova tecnologia que vem sendo aplicada no processo de alimentos e sua utilização pode apresentar melhorias em duas áreas: por um lado, como uma ferramenta de diagnóstico para controlar parâmetros, produtos alimentícios ou processos e, por outro lado, sendo utilizado para melhorar processos, influenciando na cinética dos mesmos (CÁRCEL et al., 2012).

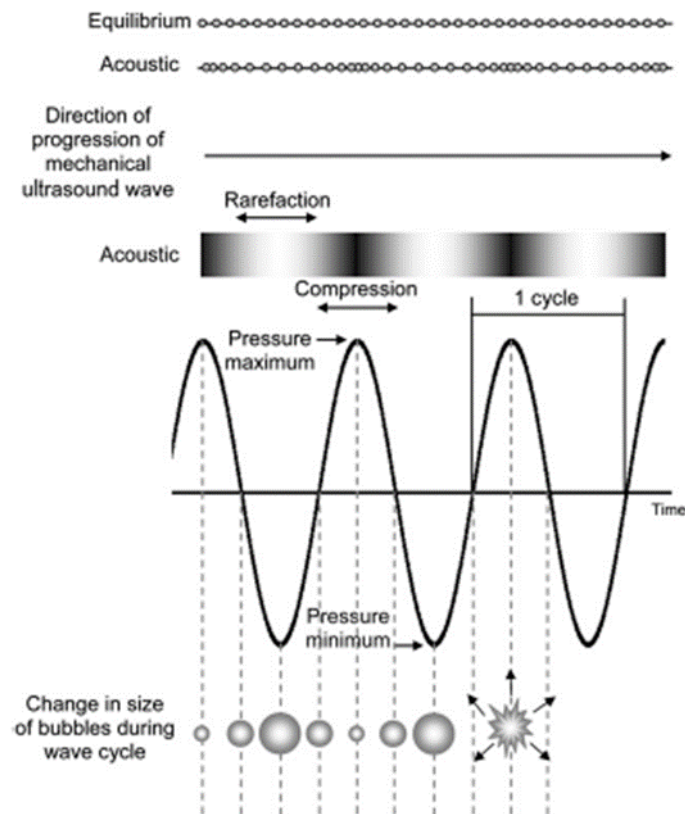
As principais aplicações do ultrassom no processamento de alimentos estão ligadas aos efeitos que exerce sobre os fenômenos de transferência de calor ou massa. A maior parte das aplicações reportadas na literatura está em sistemas líquido-líquido ou líquido-sólido, devido à relativa facilidade com que as ondas ultrassônicas são transmitidas em líquidos (MULET et al., 2003). Há uma grande oferta de equipamentos comerciais disponíveis no mercado, incluindo banhos ultrassônicos e diferentes sistemas de sonda, que podem ser adaptados para diferentes operações.

Os efeitos do ultrassom em sistemas líquidos estão relacionados principalmente ao fenômeno de cavitação. O ultrassom se propaga por uma série de ondas de compressões e expansões induzidas nas moléculas do meio (Figura 3.13) (MASON, 2005; SORIA, VILLAMIEL, 2010). Com uma potência suficientemente alta, o ciclo de expansão, que corresponde ao momento de mínima pressão exercida no meio, pode superar as forças atrativas presentes nas moléculas do líquido e bolhas de cavitação podem surgir a partir de gases

nucleares presentes no fluido. Estas bolhas, distribuídas no líquido, crescem, em um período de poucos ciclos, até um tamanho crítico, tornando-se então instáveis e colapsando violentamente (SHUKLA, 1992; MASON, 1998; BARBOSA-CÁNOVAS, RODRIGUEZ, 2002). A implosão das bolhas de cavitação leva a um acúmulo de energia em zonas denominadas *hot spots*, gerando temperaturas e pressões extremas (5000 K e 1000 atm, respectivamente), o que, por sua vez, produz ondas de alta energia de cisalhamento e turbulência na zona de cavitação.

A combinação destes fatores (calor, pressão e turbulência) tem uma variedade de efeitos sobre o sistema irradiado por ultrassom. Energia (em $\text{kWh}\cdot\text{L}^{-1}$) e intensidade ($\text{W}\cdot\text{cm}^{-2}$), juntamente com a viscosidade, tensão superficial, pressão de vapor, natureza e concentração de gás dissolvido e presença de partículas sólidas no meio, além de temperatura e pressão do tratamento, determinam a dimensão da cavitação. Caso haja a intenção de alterar a escala do processo, o conhecimento da densidade ultrassônica ($\text{W}\cdot\text{m}^{-3}$) deve ser considerado (PATIST, BATES, 2008).

Figura 3.13 – Cavitação ultrassônica.



Fonte: SORIA, VILLAMIEL, 2010.

Outro fenômeno resultante da variação do tamanho da bolha e consequente colapso é o desenvolvimento de fortes micro-jatos, associados com grandes gradientes de velocidade e

tensões de cisalhamento, que alteram as características do meio (SUSLICK, 1988; SORIA, VILLAMIEL, 2010). Além disso, parte da energia acústica pode ser absorvida na forma de calor, no entanto, dependendo das condições de operação e substrato, a temperatura alcançada é geralmente menor que 70 °C (VILLAMIEL, DE JONG, 2000). Outro efeito importante é a possível quebra de moléculas de água, gerando radicais livres altamente reativos ($\text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{H}^+ + \text{OH}^-$) que podem reagir e modificar outras moléculas (RIESZ, KONDO, 1992). Essa variedade de mecanismos envolvidos no tratamento ultrassônico pode induzir a efeitos físico-químicos com várias aplicações em potencial na indústria de alimentos.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Matéria prima

Para realização do presente trabalho, cevada dística (*Hordeum vulgare*) da variedade Shakira foi utilizada. Cevada dos lotes 3003, 3001 e 3014 foi fornecida pela Cooperativa Agroindustrial Agraria (Guarapuava – PR, Brasil).

Ao ser recebida, a cevada passou por um processo de seleção, para remoção de corpos estranhos e para garantir que apenas grãos inteiros fossem utilizados nos experimentos (Figura 4.1). Após a seleção, a cevada foi acondicionada em potes de vidro vedados e armazenada sob resfriamento (de 5 a 7 °C) até a realização dos experimentos.

Figura 4.1 – Amostra de corpos estranhos e grãos quebrados removidos após a seleção da cevada.



Fonte: Arquivo pessoal.

4.2. Propriedades físicas

As propriedades físicas da cevada (lote 3001) foram determinadas para a faixa de umidade que o grão atinge durante o processo de maceração. A umidade da cevada foi determinada, em triplicata, por secagem em estufa a 105 °C (AOAC, 2010). A umidade inicial obtida foi de $0,1268 \pm 0,0088$ kg/kg_{bs} (base seca).

4.2.1. Preparo das amostras

As amostras foram preparadas pesando-se aproximadamente 80 g de cevada em balança analítica, com precisão de 0,0001 g (AUY220, Shimadzu, Quioto, Japão). Após serem pesadas, as amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, água destilada foi adicionada e, então, os sacos foram fechados hermeticamente. A quantidade de água adicionada para que as amostras alternassem o teor de umidade de 0,1268 a 0,8028 kg/kg_{bs} (que é a faixa que compreende a umidade alcançada pelo grão durante a etapa de maceração) foi determinada de acordo com a Equação (4.1)

$$M_a = \frac{M_0 (X - X_0)}{X_0 + 1} \quad (4.1)$$

onde M_a e M_0 são, respectivamente, a massa de água adicionada e a massa inicial da amostra, em kg, e X_0 e X são, respectivamente, a umidade inicial da amostra e a umidade final da amostra, em kg/kg_{bs}.

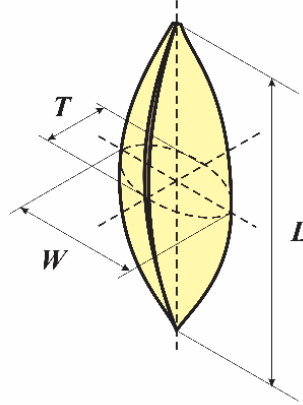
Após a adição da água, as amostras foram mantidas sob refrigeração ($5 \pm 1^\circ\text{C}$) por uma semana e, durante esse período, a cada 48 horas, as amostras eram movimentadas dentro dos sacos plásticos para promover uniformidade na absorção da água. Para a determinação das propriedades físicas, as amostras eram retiradas da refrigeração com pelo menos 2 horas de antecedência para se ambientarem com a temperatura do laboratório ($23 \pm 2^\circ\text{C}$).

Todas as propriedades físicas foram determinadas nas umidades obtidas (0,1268; 0,1831; 0,2395; 0,2958; 0,3521; 0,4085; 0,4648; 0,5211; 0,5755; 0,6338; 0,6901; 0,7465 e 0,8028 kg/kg_{bs}) e, para cada teor de umidade, cinco amostras foram preparadas.

4.2.2. Dimensões do grão

Para determinar o tamanho e a forma do grão de cevada, 10 grãos foram selecionados aleatoriamente de cada amostra e então as três dimensões características, sendo elas o comprimento (L), a largura (W) e a espessura (T) (Figura 4.2), foram medidas com um paquímetro com precisão de 0,05 mm.

Figura 4.2 – Dimensões características do grão de cevada.



Fonte: Elaborada pelo autor.

O diâmetro médio aritmético e o diâmetro médio geométrico do grão de cevada foram calculados a partir das dimensões características, conforme as equações a seguir (MOHSENIN, 1970):

$$D_a = \frac{L + W + T}{3} \quad (4.2)$$

$$D_g = (LWT)^{\frac{1}{3}} \quad (4.3)$$

onde L , W e T são, respectivamente, o comprimento, a largura e a espessura do grão, em m, e D_a e D_g são, respectivamente, os diâmetros médios aritmético e geométrico do grão, também em m.

4.2.3. Esfericidade e área superficial do grão

A esfericidade do grão de cevada foi calculada pela seguinte relação (MOHSENIN, 1970):

$$\phi = \left(\frac{(LWT)^{\frac{1}{3}}}{L} \right) \times 100 \quad (4.4)$$

onde ϕ é a esfericidade, em %.

A área superficial equivalente do grão de cevada foi obtida a partir do diâmetro médio geométrico, por analogia à uma esfera, de acordo com a Equação (4.5)

$$S = \pi D_g^2 \quad (4.5)$$

onde S é a área superficial equivalente do grão de cevada, em m².

4.2.4. Massa e volume de mil grãos

Para determinação da massa de mil grãos de cevada (m_{1000}), cem grãos foram selecionados aleatoriamente de cada amostra. A massa dos cem grãos foi medida em uma balança analítica com precisão de 0,0001 g e então multiplicada por 10, resultando na massa de 1000 grãos (COŞKUNER, KARABABA, 2007; SOLOGUBIK et al., 2013).

O volume de mil grãos de cevada (V_{1000}) foi determinado através do volume de líquido (tolueno) deslocado pelos mesmos cem grãos selecionados para a obtenção do peso de mil grãos.

4.2.5. Densidades e porosidade do leito de grãos

A densidade aparente do leito de grãos de cevada foi determinada pela relação entre a massa de grãos que ocupa um determinado volume (Eq. (4.6)). Em um recipiente de 80 mL (proveta que possui volume total de 80 ml), grãos de cevada foram colocados até o preenchimento total do volume e então a massa dos grãos foi medida em balança analítica com precisão de 0,0001 g.

$$\rho_b = \frac{m_{grãos}}{V_{recipiente}} \quad (4.6)$$

onde ρ_b é a densidade aparente do leito de grãos, em kg/m³, $m_{grãos}$ é a massa de grãos, em kg, necessária para preencher o volume do recipiente, $V_{recipiente}$, dado em m³.

A densidade real do leito de grãos de cevada foi calculada pela relação entre a massa e o volume de mil grãos, de acordo com a Equação (4.7)

$$\rho_t = \frac{m_{1000}}{V_{1000}} \quad (4.7)$$

onde ρ_t é a densidade real do leito de grãos, em kg/m^3 .

A porosidade do leito de grãos de cevada foi calculada a partir da relação entre a densidade aparente e a densidade real do leito de grãos, descrita pela Equação (4.8)

$$\varepsilon = \left(1 - \frac{\rho_b}{\rho_t} \right) \times 100 \quad (4.8)$$

onde ε é a porosidade do leito de grãos, em %.

4.2.6. Área específica do grão e do leito de grãos

A área superficial específica do grão de cevada foi calculada pela relação entre a área superficial e o volume do grão de cevada (Eq. (4.9))

$$S_{sp} = \left(\frac{S}{V} \right)_{\text{cevada}} \quad (4.9)$$

onde S_{sp} é a área superficial específica do grão de cevada, em m^{-1} , e V é o volume do grão de cevada, em m^3 , calculado a partir do volume de 1000 grãos, (V_{1000} , obtido experimentalmente e descrito na seção 4.2.4).

A área superficial específica do leito de grãos de cevada foi calculada a partir da correlação entre a área específica do grão e a porosidade do leito de grãos (Eq. (4.10))

$$S_{sb} = (1 - \varepsilon) S_{sp} \quad (4.10)$$

onde S_{sb} é a área superficial específica do leito de grãos, em m^{-1} .

4.2.7. Ajuste matemático e análise estatística

Os dados experimentais das propriedades físicas, obtidos para 13 valores de umidade na de 0,1268 a 0,8028 kg/kg_{bs} , foram submetidos à análise de variância (ANOVA) e teste de Tuckey com nível de significância de 95%, utilizando o software Minitab 16.1.1 (Minitab Inc., State College-PA, EUA).

Além da análise de variância, equações polinomiais (de grau 1 a 3) foram ajustadas aos dados experimentais. Para realizar os ajustes, a ferramenta *Solver* do software Excel 2013 (Microsoft, Redmond-WA, EUA) foi empregada, utilizando como objetivo do ajuste a minimização do erro absoluto entre os dados experimentais e a equação ajustada.

A qualidade do ajuste foi medida pelo coeficiente de correlação, pelo erro relativo médio e pelo erro quadrático médio normalizado (SHCHERBAKOV et al., 2013) entre os valores experimentais e os preditos pelo modelo, calculados a partir das Equações (4.11), (4.12) e (4.13), respectivamente

$$R^2 = \frac{\sum_i (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_i (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.11)$$

$$MRE = \frac{100}{n} \sum_i \left| \frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right| \quad (4.12)$$

$$NRMSE = \frac{100}{\bar{y}} \sqrt{\frac{\sum_i (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad (4.13)$$

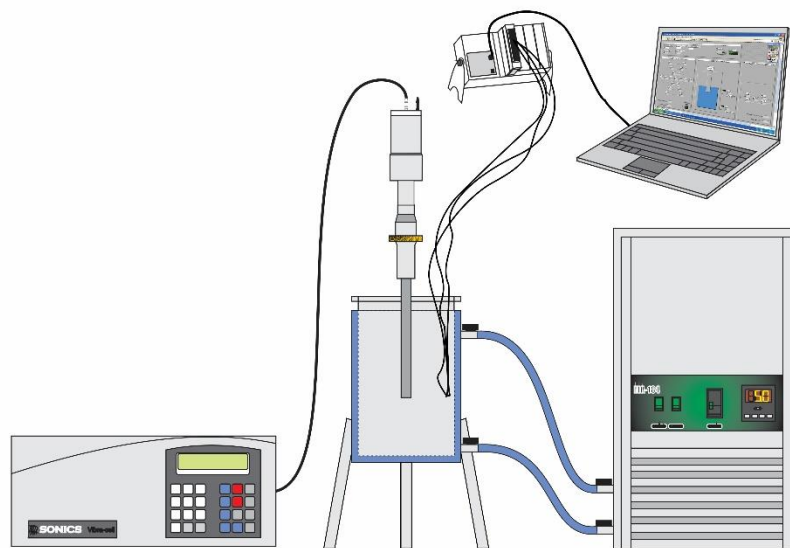
onde R^2 é o coeficiente de correlação, adimensional, MRE é o erro relativo médio, em %, $NRMSE$ é o erro quadrático médio normalizado, em %, y_i são os valores observados, $\hat{y}_i$ são os valores preditos, $\bar{y}$ é a média dos valores observados e n é número de observações.

4.3. Ultrassom de potência

4.3.1. Descrição dos equipamentos

Para realização dos experimentos com aplicação do ultrassom, foram utilizados os equipamentos mostrados na Figura 4.3.

Figura 4.3 - Equipamentos utilizados para realização de experimentos com aplicação de ultrassom de alta intensidade.

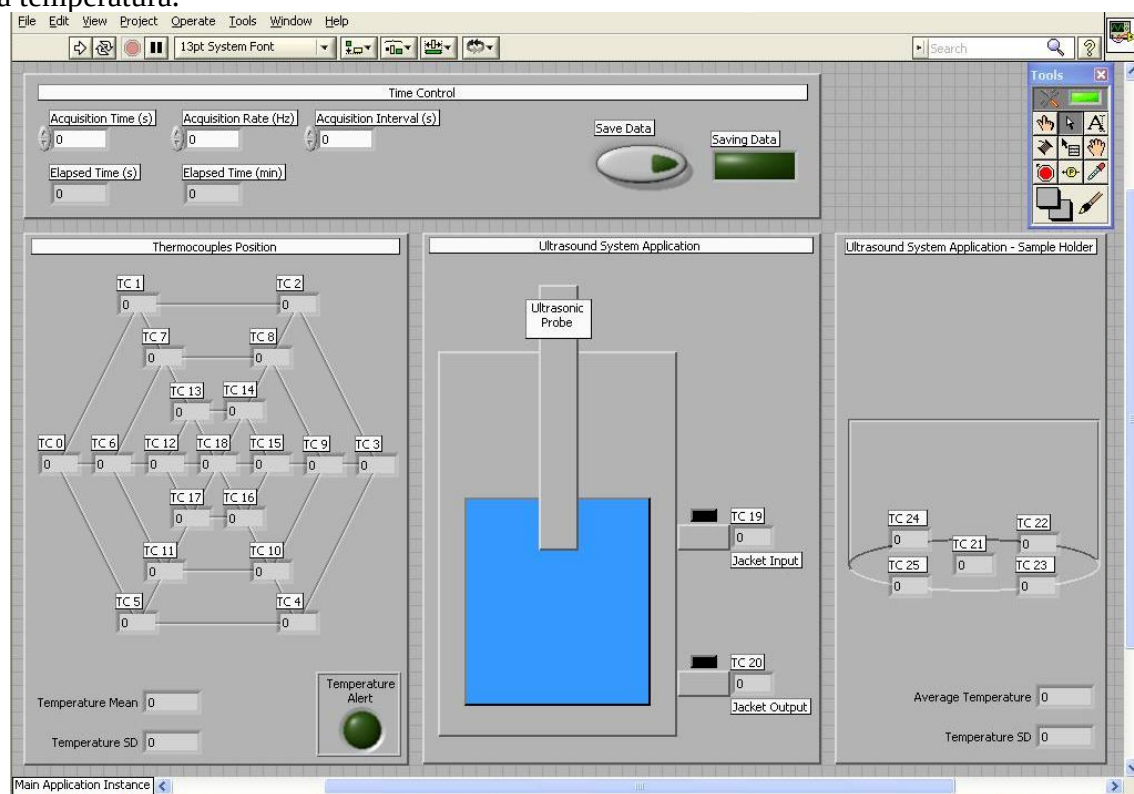


Fonte: Elaborado pelo autor.

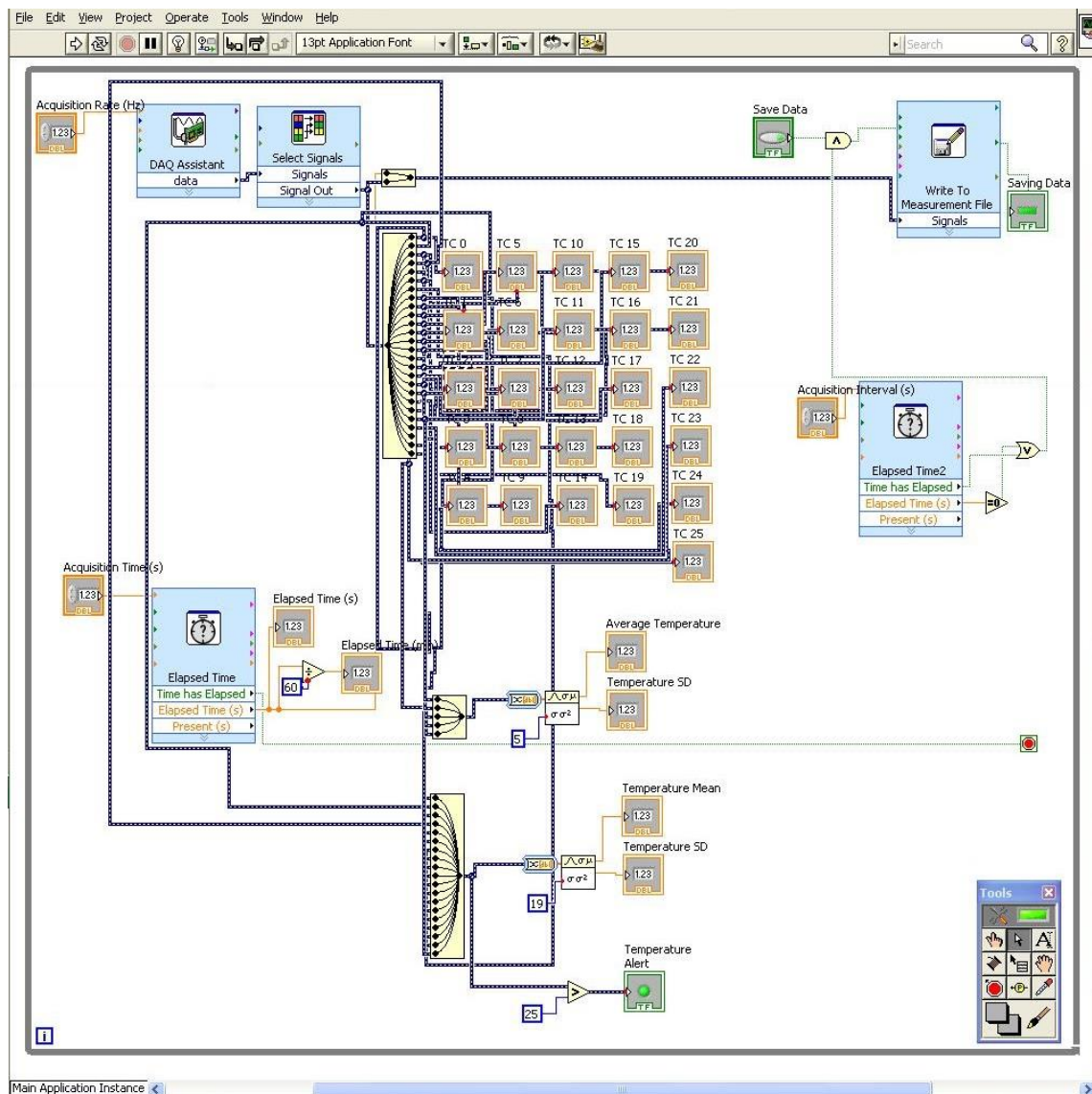
O sistema foi constituído de um recipiente de aço inox (AISI 304) encamisado, com medidas internas de 21,5 cm de altura e 15 cm de diâmetro. Para o controle da temperatura dos experimentos, pela camisa do recipiente circulava água proveniente de um banho ultratermostatizado (MA-184, Marconi, Piracicaba-SP, Brasil). A temperatura no interior do recipiente, por sua vez, era medida por termopares tipo K (TT-K-40-SLE, Omega Engineering, Stamford-CT, EUA) inseridos em diversos pontos.

Os termopares estavam conectados a um módulo de aquisição de dados (NI-9213, National Instruments, Austin-TX, EUA) que, ligado a um computador, era operado por uma rotina criada no programa Labview (Versão 2010, National Instruments, Austin-TX, EUA). A rotina, criada no Labview, permitia monitorar e salvar os dados de temperatura durante os experimentos realizados (Figura 4.4).

Figura 4.4 – (a) Painel de controle e (b) diagrama de blocos do programa utilizado para medida da temperatura.



(a)



(b)

Fonte: Elaborado pelo autor.

A aplicação de ultrassom de potência, quando realizada, foi feita por meio de um processador ultrassônico VCX-1500 (Sonics & Materials, Newton-CT, EUA), operando na frequência nominal de 20 kHz e com potência nominal que pode variar de 300 a 1500 W, faixa que corresponde a 20 e 100% da capacidade total do equipamento, respectivamente.

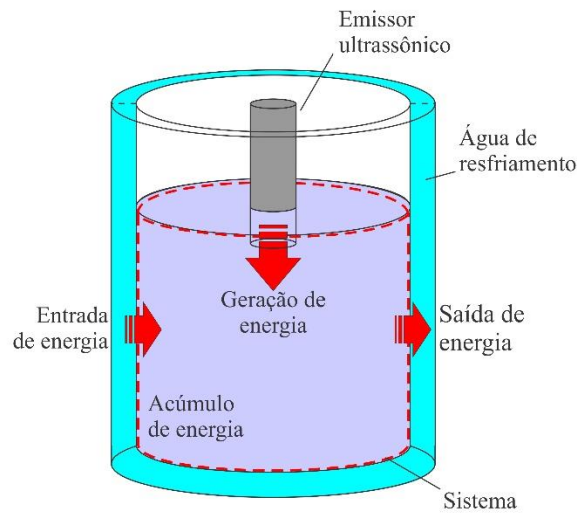
O emissor utilizado no equipamento de ultrassom foi do tipo axial (emite ondas apenas pela extremidade inferior e na direção axial), fabricado em titânio e com 2,5 cm de diâmetro. Durante os experimentos com aplicação de ultrassom de alta intensidade, o emissor era posicionado no centro do recipiente encamisado e 4,5 cm acima do fundo do mesmo e submerso aproximadamente 2,5 cm na água.

4.3.2. Potência ultrassônica transmitida

4.3.2.1. Balanço de energia e equacionamento

A potência ultrassônica transmitida para o meio foi determinada adaptando o método calorimétrico, descrito por Raso et al. (1999) e por Margulis & Margulis (2003), que consiste na medida do aumento da temperatura provocado pela aplicação do ultrassom, que é considerado proporcional à potência ultrassônica transmitida para o meio.

Figura 4.5 – Representação do balanço de energia aplicado no sistema.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 4.5 ilustra o balanço global de energia realizado no sistema, que, por sua vez, é representado pela Equação (4.15)

$$\begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{entrada} \\ \text{de energia} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{geração} \\ \text{de energia} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{acúmulo} \\ \text{de energia} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{saída} \\ \text{de energia} \end{bmatrix} \quad (4.15)$$

os termos da Equação (4.15), por sua vez, são dados por

$$\begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{entrada} \\ \text{de energia} \end{bmatrix} = 0 \quad (4.16)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{geração} \\ \text{de energia} \end{bmatrix} = P_{US} \quad (4.17)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{acúmulo} \\ \text{de energia} \end{bmatrix} = \rho V c_p \frac{dT}{dt} \quad (4.18)$$

$$\begin{bmatrix} \text{Taxa de} \\ \text{saída} \\ \text{de energia} \end{bmatrix} = hA(T - T_s) \quad (4.19)$$

onde P_{US} é a potência ultrassônica transmitida, em W; ρ é a densidade do meio por onde se propaga a onda ultrassônica, em kg/m^3 ; V é o volume do meio, em m^3 ; c_p é o calor específico do meio, em $\text{J/kg}^\circ\text{C}$; T é a temperatura do meio, em $^\circ\text{C}$; t é o tempo, em s; h é o coeficiente convectivo de transferência de calor no meio, em $\text{W/m}^2^\circ\text{C}$; A é a área de troca de calor entre o meio e o recipiente de aço inox, em m^2 ; e T_s é a temperatura da parede (que é a temperatura da água que circula pela camisa), ou seja, por onde há maior troca de calor, em $^\circ\text{C}$.

Para resolução do balanço de energia, o mesmo foi aplicado em dois períodos diferentes. Inicialmente, durante a aplicação de ultrassom de potência

$$P_{US} = \rho V c_p \frac{dT}{dt} + hA(T - T_s) \quad (4.20a)$$

e, posteriormente, após a aplicação de ultrassom

$$0 = \rho V c_p \frac{dT}{dt} + hA(T - T_s) \quad (4.20b)$$

Integrando as equações (4.20a) e (4.20b), a primeira durante o tempo de aplicação de ultrassom (t_{US}), no qual a temperatura do meio varia desde a temperatura inicial (T_0) até a temperatura máxima (T_{US}), que atinge durante a aplicação de ultrassom, e a segunda equação desde que a aplicação de ultrassom é encerrada, em t_{US} , até quando se chega à temperatura inicial (T_0), em t_f , tem-se

$$\int_0^{t_{US}} P_{US} dt = \rho V c_p \int_0^{t_{US}} dT + hA \int_0^{t_{US}} (T - T_s) dt \quad (4.21a)$$

$$0 = \rho V c_p \int_{t_{US}}^{t_f} dT + hA \int_{t_{US}}^{t_f} (T - T_s) dt \quad (4.21b)$$

resolvendo as integrais,

$$P_{US} t_{US} = \rho V c_p (T_{US} - T_0) + hA \int_0^{t_{US}} (T - T_s) dt \quad (4.22a)$$

$$0 = \rho V c_p (T_0 - T_{US}) + hA \int_{t_{US}}^{t_f} (T - T_s) dt \quad (4.22b)$$

considerando que a energia que sai do sistema é condicionada pela capacidade da água que circula pela camisa do recipiente tem de remover calor do sistema, a energia removida (ou que sai) do sistema é a mesma nos dois períodos do balanço de energia, ou seja, durante a aplicação de ultrassom, quando a temperatura varia de T_0 até T_{US} , e após a aplicação de ultrassom, quando a temperatura varia de T_{US} até T_0 .

A igualdade entre os termos que representam a energia que sai do sistema não implicaria necessariamente em igualdade do coeficiente convectivo de troca de calor durante os dois períodos do balanço de energia, pois, como mostrado por Cárcel (2012), o ultrassom de potência aumenta o coeficiente convectivo de transferência de calor. Logo, a igualdade se dá no produto ht , ou seja, durante a aplicação de ultrassom de potência, há o aumento do coeficiente convectivo de transferência de calor e redução no tempo para que o sistema atinja o equilíbrio térmico e, após aplicação do ultrassom de potência, há convecção natural, ou seja, redução no coeficiente convectivo, mas, em contra partida, há o aumento do tempo para se atingir o equilíbrio térmico.

Então, substituindo a Equação (4.22b) em (4.22a), tem-se:

$$P_{US} = \frac{2\rho V c_p (T_{US} - T_0)}{t_{US}} \quad (4.23)$$

Que pode ser escrita como:

$$P_{US} = \frac{2\rho V c_p \Delta T}{t_{US}} \quad (4.24)$$

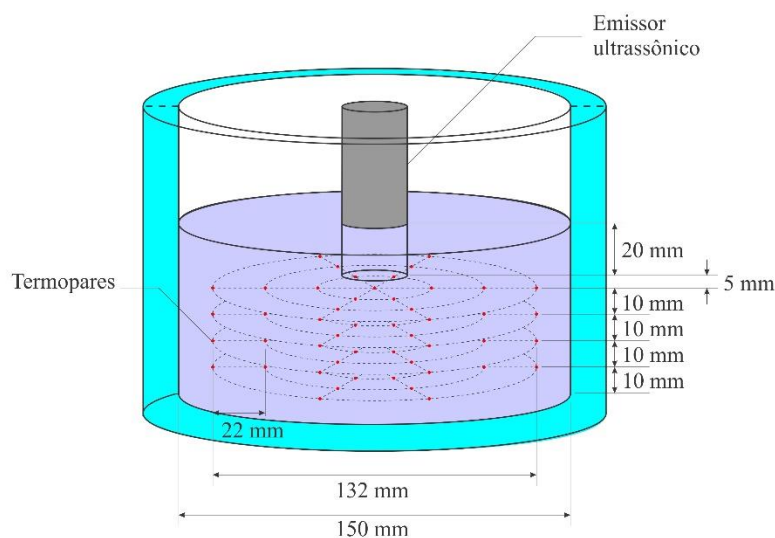
Portando, a Equação (4.24) correlaciona a potência ultrassônica transmitida para o meio com o aumento de temperatura e as propriedades termofísicas do mesmo, levando ainda em consideração a energia que é dissipada através da parede do recipiente.

A partir da obtenção da Equação (4.24), faz-se necessária a medida da variação da temperatura ao longo do tempo de aplicação de ultrassom de potência. Em todos experimentos com aplicação de ultrassom, utilizou-se 1 litro água destilada como meio de propagação (que foi o mesmo volume de água utilizado nos experimentos de maceração, mostrados no item 4.4). As propriedades termofísicas da água foram determinadas por correlações descritas por Carvalho et al. (2015).

A potência real transmitida foi determinada utilizando as potências nominais do equipamento de 300, 450, 600, 750, 900, 1050, 1200, 1350 e 1500 W. A temperatura da água foi de 15 °C (pois ensaios preliminares com a temperatura variando de 10 a 25 °C, mostraram que a potência real transmitida não era influenciada pela temperatura inicial) e o tempo de aplicação de ultrassom foi de 90 segundos. Para cada potência nominal aplicada, as medidas da variação de temperatura foram feitas em triplicata.

As medidas das variações de temperatura foram realizadas durante os 90 segundos de aplicação de ultrassom de potência em quatro posições radiais ($r = 0, 2,2, 4,4$ e $6,6$ cm), seis posições angulares ($\theta = 0, \pi/3, 2\pi/3, \pi, 4\pi/3$ e $5\pi/3$ radianos) e quatro posições axiais ($z = 1, 2, 3, 4$ cm acima do fundo recipiente), resultando em 76 pontos de medida (Figura 4.6).

Figura 4.6 – Posição dos termopares durante a medição de temperatura para determinação da potência ultrassônica transmitida.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A partir da variação de temperatura em cada ponto na água, faz-se necessário o cálculo da média volumétrica de variação de temperatura de acordo com a Equação (4.25) (WHITAKER, 1987)

$$\langle \Delta T \rangle = \frac{1}{V} \int_V \Delta T dV \quad (4.25)$$

onde $\langle \Delta T \rangle$ é a média volumétrica de variação de temperatura, em °C; ΔT e dV são, respectivamente, a temperatura e o elemento de volume.

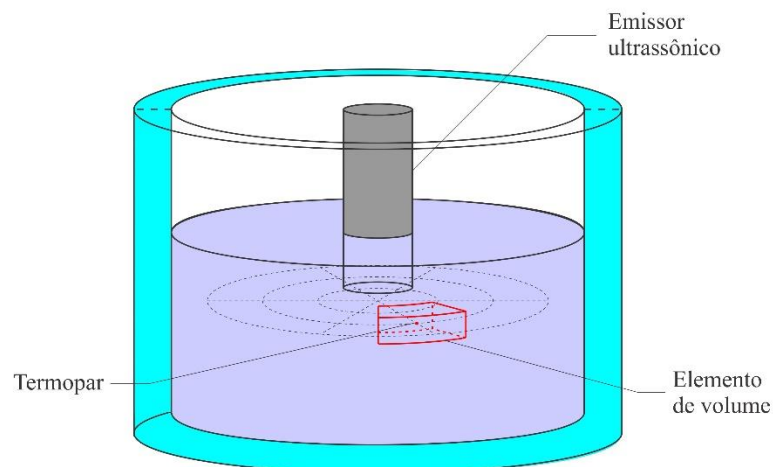
Como não há uma função definida para que se possa realizar a integração necessária para solucionar a Equação (4.25), a mesma foi resolvida numericamente, aplicando a regra do ponto médio.

$$\int_V \Delta T dV = \sum_1^n \alpha_i \Delta T_i \quad (4.26)$$

onde ΔT_i é a variação de temperatura no ponto médio de cada elemento de volume e α_i são os pesos de quadratura ou o volume correspondente de cada elemento de volume.

O elemento de volume (dV_i) para um ponto de medida de temperatura é representado na Figura 3.7, que foram utilizados como pesos de quadratura (α_i) na obtenção da média volumétrica de variação de temperatura.

Figura 4.7 – Representação do elemento de volume.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Substituindo (4.26) em (4.25), tem-se:

$$\langle \Delta T \rangle = \frac{1}{V} \sum_1^n \alpha_i \Delta T_i \quad (4.27)$$

Finalmente, substituindo (4.27) em (4.24), tem-se a expressão da potência ultrassônica média transmitida para o meio (Equação (4.28)).

$$\langle P_{US} \rangle = \frac{2\rho V c_p \langle \Delta T \rangle}{t_{US}} \quad (4.28)$$

4.4. Maceração da cevada

A maceração da cevada foi realizada com amostras dos lotes 3003 e 3014. Antes da realização dos experimentos, a umidade da cevada foi determinada por secagem em estufa a 105 °C (AOAC, 2010). Os lotes 3003 e 3014 apresentaram umidade de $0,1001 \pm 0,0065$ e $0,1187 \pm 0,0053$ kg/kg_{bs}, respectivamente.

Os experimentos de maceração de cevada foram realizados nos equipamentos mostrados na Figura 4.3.

4.4.1. Cinética de maceração

Para obtenção das cinéticas de maceração, aproximadamente 100 g de cevada, pesados em balança semianalítica (BK3000, Gehaka, São Paulo-SP, Brasil), foram acondicionados em uma cesta de aço inox (AISI 304) perfurada de 12,5 cm de diâmetro e 5,1 cm de altura que, por sua vez, era inserida no recipiente encamisado, contendo 1000 mL de água destilada já na temperatura de realização do experimento, que era controlada pela água que circulava na camisa, proveniente do banho ultratermostatizado. Durante os experimentos de maceração a temperatura foi monitorada por termopares tipo K acoplados à cesta de aço inox em cinco pontos diferentes.

Após intervalos de tempo específicos (1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 e 14 horas), a cesta contendo a amostra foi retirada da água. A amostra foi então escorrida, para retirar o excesso de água da

superfície, pesada em balança semianalítica e colocada novamente na água. Após 24 horas de maceração, o procedimento de pesagem foi repetido e a maceração encerrada.

Dada a umidade inicial, previamente determinada, a umidade da cevada em cada tempo de maceração foi calculada através de um balanço de massa entre a massa inicial da amostra e a massa em cada tempo de maceração (Eq. (4.31)) (PATERO, AUGUSTO, 2015)

$$X(t) = \frac{(m(t) - m_0)(X_0 + 1)}{m_0} + X_0 \quad (4.31)$$

onde m_0 e $m(t)$ são, respectivamente, a massa da amostra no início da maceração e a massa da amostra após o tempo t de maceração, em kg, e X_0 e $X(t)$ são, respectivamente, a umidade da amostra no início da maceração e a umidade após o tempo t de maceração em kg/kg_{bs}.

4.4.2. Efeito do ultrassom de alta intensidade e da temperatura

A fim de se avaliar a aplicação de ultrassom de potência, tanto em relação à potência nominal utilizada quanto à forma de aplicação, e a temperatura do processo na cinética de maceração, as seguintes condições experimentais foram utilizadas (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 – Condições temperatura e aplicação de ultrassom de potência utilizadas na maceração de cevada.

Temperatura (°C)	Potência nominal aplicada (W)	Forma de aplicação do ultrassom
10	0	30 minutos (30)
15	750	Pulsado (1ON:4OFF) (P)
20	1500	
25		

Fonte: Elaborado pelo autor.

Para cada condição experimental, a cinética foi realizada em duplicata.

Os equipamentos utilizados para a aplicação do ultrassom foram os mesmos descritos no Item 4.3.1. Durante a cinética de maceração da cevada com aplicação de ultrassom de potência, o emissor ultrassônico foi posicionado a 1,5 cm acima da amostra.

Visto que não haviam estudos aplicando ultrassom durante todo o processo de maceração da cevada e nem para a faixa de potência nominal utilizada, as potências nominais

utilizadas foram escolhidas levando-se em conta a potência nominal máxima do equipamento (1500 W) e uma potência nominal intermediária (750 W).

A aplicação de ultrassom durante a maceração da cevada, quando utilizada, foi realizada de duas formas distintas (como mostrado na Tabela 4.1), a primeira, aplicando o ultrassom de forma permanente durante 30 minutos assim que a cevada era inserida na água, ou seja, nos tempos 0, 1, 2, 3, 4, 6, 8, 10 e 14 horas de maceração, resultando em 270 minutos de aplicação de ultrassom e, a segunda, empregando o ultrassom na forma pulsada com 1 segundo ligado e 4 segundos desligado (1ON:4OFF), resultando em um tempo total de aplicação de 288 minutos.

Inicialmente, a aplicação de ultrassom na cinética de maceração da cevada foi realizada de forma permanente durante 30 minutos assim que a cevada era inserida na água, mas devido ao grande aumento na temperatura da água de maceração (como será mostrado nos resultados), posteriormente, a aplicação pulsada foi utilizada permitindo maior manutenção da temperatura durante o processo de maceração.

4.4.3. Modelagem matemática e análise estatística

A modelagem matemática do processo de maceração da cevada foi realizada por meio de modelos empíricos e semiempíricos comumente aplicados a processos de hidratação e desidratação.

4.4.3.1. Modelo de Peleg

Peleg (1988) propôs uma equação para descrever cinéticas de hidratação/desidratação que se aproximam da umidade de equilíbrio na forma de uma assíntota. O modelo de Peleg é representado pela Equação (4.32)

$$X(t) = X_0 \pm \frac{t}{k_1 + k_2 t} \quad (4.32)$$

onde k_1 é a taxa constante do modelo de Peleg, em h/(kg/kg_{bs}); e k_2 é a constante de capacidade do modelo de Peleg, em (kg/kg_{bs})⁻¹.

Na Equação (4.32), o sinal “±” é substituído por “+” para descrever processos de hidratação, como é o caso da maceração, e por “-” para descrever processos de desidratação. A

partir do modelo de Peleg, é possível calcular a taxa inicial de ganho de umidade, R_0 , ($t = 0$), que é dada por:

$$\left. \frac{dX(t)}{dt} \right|_{t=0} = R_0 = \frac{1}{k_1} \quad (4.33)$$

A umidade de equilíbrio pode ser estimada pelo modelo de Peleg aplicando-o para longos tempos de processo ($t \rightarrow \infty$), resultando na Equação (4.34)

$$X_{eq} = X_0 + \frac{1}{k_2} \quad (4.34)$$

onde X_{eq} é a umidade de equilíbrio, em kg/kg_{bs}.

4.4.3.2. Modelo exponencial

Um modelo exponencial de dois parâmetros foi utilizado para descrever a cinética de ganho de umidade. Este modelo é um tipo *Weibull*, descrito pela Equação (4.38) (CUNHA et al., 2001; SCHMIDT; CARCIOFI, LAURINDO, 2009)

$$\frac{XG}{XG_{eq}} = \frac{X(t) - X_0}{X_{eq} - X_0} = 1 - \exp \left[- \left(\frac{t}{\beta} \right)^\alpha \right] \quad (4.38)$$

onde α é o parâmetro de forma, adimensional; e β é o parâmetro de escala, em horas.

O parâmetro de forma ou índice de comportamento representa a velocidade com que a umidade se aproxima da umidade de equilíbrio, quanto menor o valor deste maior é taxa inicial de hidratação (SCHMIDT; CARCIOFI, LAURINDO, 2009). O parâmetro de escala representa a taxa do processo, ou seja, o tempo para que XG/XG_{eq} seja igual a $1 - e^{-1}$ ou 63,21% (CUNHA et al., 2001).

4.4.3.3. Modelo difusivo

O modelo difusivo, baseado na Segunda Lei de Fick (Eq. (4.39)), foi utilizado para a obtenção da difusividade efetiva da água no grão de cevada.

$$\frac{\partial X}{\partial t} = D_{eff} \frac{\partial^2 X}{\partial r^2} \quad (4.39)$$

onde $\partial X/\partial t$ é a variação de umidade com relação ao tempo; $\partial^2 X/\partial r^2$ é a variação de umidade no espaço; e D_{eff} é difusividade efetiva da água no grão, em m²/s.

O ajuste aos dados experimentais foi realizado considerando as soluções da lei de Fick para uma geometria esférica (MAYOLLE et al., 2012). Para a solução aplicada, as condições iniciais e de contorno foram: para $t = 0$, em qualquer posição do grão, $X = X_0$; para $t > 0$, na superfície do grão, $X = X_{eq}$; e para $t > 0$, no centro do grão, $dX/dr = 0$.

Ao aproximar o grão de cevada a uma esfera e considerar as condições iniciais e de contorno acima, utilizou-se a solução mostrada na Equação (4.40) (CRANK, 1979), para $0 < r < R$.

$$\frac{X(t) - X_0}{X_{eq} - X_0} = \bar{\theta} = 1 - 6 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{\gamma_n^2} \exp \left[\frac{-\gamma_n^2 D_{eff} t}{R^2} \right] \quad (4.40)$$

onde $\gamma_n = n\pi$.

O raio equivalente de uma esfera foi obtido a partir o diâmetro geométrico do grão de cevada ($R = D_g/2$), que por sua vez foi determinado a partir das dimensões do grão (Eq. (4.3), Item 4.2.2). O ajuste da Equação (4.40) aos dados experimentais de umidade da cevada foi realizado através da ferramenta *solver* do *software* Excel (Versão 2016, Microsoft, Redmond-WA, EUA), considerando 100 termos da série.

4.4.4. Maceração para germinação

Após a obtenção da cinética de maceração da cevada, nas condições anteriormente citadas, o tempo requerido para se alcançar a umidade necessária para a germinação (aproximadamente 0,75 kg/kg_{bs}) foi determinado através do modelo que apresentou melhor qualidade de ajuste (maior coeficiente de correlação, R^2 , e menores erros, MRE e $NRMSE$).

Logo, a maceração foi realizada, colocando-se aproximadamente 100 g de cevada na cesta perfurada de aço inox e esta, por sua vez, foi inserida no recipiente encamisado de aço inox contendo um litro de água destilada e, após passar o tempo requerido para se atingir a

umidade necessária para germinação, o experimento foi encerrado e a cevada hidratada foi conduzida para a etapa de germinação.

Diferentemente da cinética de maceração, onde o ultrassom foi aplicado de duas formas (Item 4.4.2), a maceração para germinação foi realizada utilizando apenas o ultrassom de potência aplicado na forma de pulso, por um segundo ligado e quatro segundos desligado (1ON:4OFF), pois essa forma de aplicação permitiu que a temperatura da água utilizada na maceração fosse melhor controlada, não ocorrendo grandes variações de temperatura durante a aplicação de ultrassom de potência, como será mostrado nos resultados. Cada condição de maceração para germinação foi realizada em duplicata.

4.5. Germinação da cevada

Após a realização da maceração até a umidade necessária para a germinação, as amostras de cevada hidratada foram submetidas à germinação. Para tanto, a amostra de cevada hidratada foi dividida em cinco partes iguais (aproximadamente mesma massa), que foram acondicionadas em bandejas retangulares de alumínio com tampa de 220 mL de capacidade (12,7 cm de comprimento, 9,8 cm de largura, 3,3 cm de altura com tampa de papel cartão aluminizado) (Figura 4.8) e submetidas a tempos de germinação de 0, 24, 48, 72 e 96 horas.

Figura 4.8 – Amostra de cevada hidratada acondicionada na bandeja para a germinação.



Fonte: Arquivo pessoal.

Na tampa da bandeja foram feitos vários furos para que houvesse troca de gases (saída de CO₂ e entrada de O₂), mas que, ao mesmo tempo, não permitissem a saída excessiva de umidade.

As bandejas foram então acondicionadas em uma estufa incubadora BOD (MA 415, Marconi, Piracicaba-SP, Brasil) a 16 °C (com exceção da amostra com zero hora de germinação) e, após decorrido o tempo de germinação de cada amostra, a mesma foi retirada e a germinação interrompida.

Durante a germinação, a massa das amostras foi periodicamente monitorada em balança semianalítica, a umidade das amostras foi mantida em torno de 0,75 kg/kg_{bs} com a reposição de água em intervalos de 12 horas com auxílio de um borrifador. A quantidade de água adicionada era igual à redução da massa da amostra.

Para interromper a germinação, as amostras foram submetidas a secagem a 50 °C, em estufa a vácuo (TE-395, Tecnal, Piracicaba-SP, Brasil) (com vácuo de 680 mmHg), por 48 horas. Após a secagem, as radículas foram removidas manualmente e as amostras de malte foram acondicionadas em sacos plásticos herméticos até utilização para as análises posteriores.

4.5.1. Poder germinativo

Para avaliação da germinação, três amostras de 20 grãos foram separadas após cada experimento de maceração e foram envoltas por papel toalha umedecido com água destilada (Figura 4.9(a)) que, por sua vez, foi acondicionado em bandejas de alumínio (como as utilizadas para a germinação). Este método foi adaptado a partir do método para determinação de porcentagem germinativa da cevada (EBC, 2004; BRASIL, 2009).

Figura 4.9 – (a) Disposição dos grãos para determinação do poder germinativo e (b) grão considerado germinado.



(a)



(b)

Fonte: Arquivo pessoal.

A bandeja foi então colocada em uma estufa incubadora a 16 °C e a germinação foi conduzida por sete dias. A contagem dos grãos germinados foi realizada diariamente, sendo

que o grão era considerado germinado com o surgimento da radícula (Figura 4.9(b)). A quantificação da germinação foi realizada pelo percentual de germinação (%GER) e pelo número médio de dias requerido para que as sementes germinem, que é dado pelo tempo médio de germinação (MGT). O tempo médio de germinação é calculado a partir da equação a seguir (EBC, 2004; YALGADAGARD; MORTAVAZI, TABATABAIE, 2008a):

$$MGT = \frac{\sum gn}{G} \quad (4.41)$$

onde g é número de sementes recentemente germinadas no tempo n ; n é tempo em dias decorridos; e G é o número total de sementes germinadas ao final dos sete dias de germinação (ELLIS, ROBERTS, 1981).

4.5.2. Quantificação de açúcares redutores e da atividade enzimática

O malte produzido a partir das diferentes condições de maceração da cevada e diferentes tempos de germinação (Tabela 4.2) foi submetido às análises para quantificação dos açúcares redutores totais e da atividade de alfa e beta amilases. Esta quantificação foi feita através da reação com ácido 3,5 – Dinitrosalicílico (BERNFELD, 1955) e determinada em equivalentes de maltose, a partir de uma curva padrão obtida com soluções com concentrações diversas de maltose. Antes da realização das análises, as amostras de malte foram finamente trituradas em um moinho portátil (IKA A11, IKA, Werke GmbH & Co., Staufen, Germany).

Tabela 4.2 – Fatores e níveis utilizados para avaliação do malte.

Fator	Nível				
Temperatura (°C)	10	15	20	25	
Potência ultrassônica* (W)	0	750	1500		
Tempo de germinação (h)	0	24	48	72	96

*Foram analisadas as amostras de malte produzidas a partir da maceração de cevada com aplicação de ultrassom de ultrassom e potência na forma pulsada 1ON:4OFF.

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.5.2.1. Curva padrão de maltose

A curva padrão de maltose foi obtida preparando-se uma solução base com concentração de 10 g/L. Para o preparo da solução base, 1 g de maltose foi pesado em balança analítica com

precisão de 0,0001 g e transferido para um balão volumétrico e, então, o volume foi completado até 100 mL. A partir da solução base, foram obtidas soluções com diferentes concentrações adicionando uma alíquota necessária desta solução base e realizando a diluição com água destilada, conforme mostrado na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Concentrações de maltose para confecção da curva padrão.

Concentração (g/L)	Volume da solução base (mL)	Volume de água (mL)
10*	-	-
0	0	10
0,1	0,1	9,9
0,2	0,2	9,8
0,3	0,3	9,7
0,4	0,4	9,6
0,5	0,5	9,5
1	1	9
2	2	8
4	4	6
6	6	4
8	8	2

*Solução base.

Fonte: Elaborado pelo autor.

Após a obtenção das soluções com diferentes concentrações de maltose, 0,5 mL de cada solução foi transferido para tubos plásticos tipo *falcon* de 15 mL. Para cada concentração, a reação foi realizada em triplicata. Em cada tubo foi adicionado então 0,5 mL do reagente DNS e os tubos foram colocados em um banho maria a 100 °C durante 5 minutos, para a reação de formação de cor. Decorrido o tempo de reação, os tubos foram retirados do banho maria e colocados em um banho de gelo para interrupção da reação. Após o resfriamento dos tubos, foram adicionados 4 mL de água destilada. Os tubos foram agitados e 200 µL de cada amostra foram pipetados em microplacas. A intensidade de cor foi então lida em um espectrofotômetro leitor de microplacas (EZ Read 2000, Biochrom Ltda., Cambridge, Reino Unido) no comprimento de onda de 540 nm.

Uma curva padrão foi então obtida e representada por uma equação linear que correlaciona a absorvância com a concentração de maltose da amostra.

4.5.2.2. Quantificação dos açúcares redutores totais

Para quantificação dos açúcares redutores totais, aproximadamente 1 g de malte finamente triturado, pesado em balança analítica com precisão de 0,0001 g, foi colocado em um frasco reagente de vidro de 250 mL, no qual foram adicionados 50 mL de água destilada. O frasco de vidro foi colocado em um *shaker* a 25 °C e agitado (com frequência de agitação de 120 rpm) durante 10 minutos, para extração dos açúcares. Após a extração, a solução foi filtrada em papel filtro qualitativo.

Após a filtração, 0,25 mL do filtrado foi adicionado em um tubo plástico tipo *falcon* de 15 mL com 0,25 mL de água destilada para diluir a amostra (testes preliminares mostraram que a adição de 0,5 mL do filtrado, ao reagir com o DNS, ultrapassava a absorvância máxima obtida na curva de calibração). Para reação, foi adicionado 0,5 mL de reagente DNS e a amostra foi incubada em banho maria a 100 °C por 5 minutos.

Após decorrer o tempo de reação a amostra foi retirada do banho maria e colocada em um banho de gelo para interrupção da reação e, posteriormente, foram adicionados 4 mL de água destilada. A amostra foi homogeneizada e 200 µL foram transferidos para microplacas e a absorvância foi lida a 540 nm. A análise de quantificação de açúcares redutores totais foi realizada em triplicata.

A quantidade de açúcares redutores foi determinada como equivalente em maltose através da seguinte equação

$$AR = \frac{C_{maltose} \cdot V_{\text{água}} \cdot F_d}{m_{malte}} \quad (4.42)$$

onde AR é a quantidade de açúcares redutores, em g_{maltose}/g_{malte}; $C_{maltose}$ é a concentração de maltose obtida na curva padrão a partir da absorvância, em g_{maltose}/L; $V_{\text{água}}$ é o volume de água destilada, em L, utilizado para dissolver a massa de malte, m_{malte} , em g.

4.5.2.3. Atividade de alfa e beta amilase

As atividades de alfa e beta amilase foram determinadas de acordo com o método descrito por Bernifield (1955), utilizando amido solúvel como substrato. Primeiramente, o extrato enzimático foi preparado pesando-se, em balança analítica com precisão de 0,0001 g, aproximadamente 1 g de malte finamente triturado. O malte foi colocado em um frasco reagente

de vidro de 250 mL, onde foram adicionados 50 mL de solução de NaCl 0,5% e, então, foram colocados sob agitação constante, em um *shaker* a 25 °C (com frequência de rotação de 120 rpm) durante uma hora. Após a extração, a solução foi filtrada em papel filtro qualitativo (SANTOS et al., 2010).

Para determinação da atividade de alfa amilase, 0,25 ml do extrato enzimático foi adicionado a 0,25 mL da solução de amido 1% em tampão fosfato de sódio 0,02 M, pH 6,9, contendo 0,0067 M de NaCl. Após a incubação durante 3 minutos a 25 °C, 0,5 mL de reagente DNS foi adicionado. A solução foi então incubada em banho maria a 100 °C durante 5 minutos. Passados os 5 minutos, a solução foi retirada e colocada em um banho de gelo para interrupção da reação com o DNS. Em seguida, 4 ml de água destilada foram adicionados, a amostra foi homogeneizada e a absorvância foi medida, transferindo-se 200 µL da solução para microplacas e realizando a leitura no comprimento de onda 540 nm em um leitor de microplacas.

O mesmo procedimento foi realizado para determinação da atividade de beta amilase, mas utilizando 0,25 mL de solução de amido 1% em tampão acetato de sódio 0,016 M, pH 4,8.

As atividades de alfa- e beta-amilases podem ser expressas pela seguinte equação:

$$U = \frac{C_{maltose} \cdot V_{sol.} \cdot F_d}{t \cdot m_{malte}} \quad (4.43)$$

onde U é a atividade específica que corresponde à quantidade equivalente de maltose liberada, em g, durante o tempo de incubação por grama de malte; $C_{maltose}$ é a concentração de maltose obtida a partir da curva padrão, em g/l; $V_{sol.}$ é volume de solução de NaCl adicionado na extração, em ml; F_d é o fator de diluição; t é o tempo de incubação, em min; e m_{malte} é a massa de malte adicionada na extração, em g.

4.5.3. Análise microscópica

A avaliação microscópica do malte foi realizada no Centro Multiusuário de Microscopia e Microanálises do IBILCE – UNESP. Como seria inviável avaliar microscopicamente a estrutura em todas as condições de maceração e germinação, foi escolhida uma temperatura de maceração sem e com aplicação de ultrassom na potência de 750 W e para os tempos de germinação de 0 hora e 96 horas, logo a avaliação microscópica foi realizada para quatro condições diferentes.

Após cada condição experimental acima citada, 10 grãos de cevada hidratada foram selecionados aleatoriamente então o grão foi cortado ao meio (na direção paralela ao plano formado pelo comprimento e pela espessura do grão) com auxílio de uma lâmina, a casca foi removida, pois poderia dificultar o corte posteriormente, e inseridos em uma solução de glutaraldeído e formaldeído, durante 24 horas, para imobilização.

Posteriormente, as amostras foram desidratadas em etanol, embebidas em parafina, cortadas em seções de 12 µm e então foi feita a coloração HE (Hematoxilina-Eosina), para mostrar a morfologia básica do grão (RIBEIRO, LIMA, 2000). Para coloração dos carboidratos (amido), foi utilizado PAS (*Periodic Acid-Schiff*) (BEHMER; TOLOSA; FREITAS-NETO, 1976) e, para coloração de compostos proteicos, foi utilizado o Xilidine Ponceau (DE BRITO et al., 2001.).

As imagens da microestrutura das amostras foram obtidas utilizando um microscópio Olympus BX60 (Olympus Optical Co. Ltda., Tóquio, Japão) utilizando magnificação de 20 vezes para as amostras com coloração *HE* e de 40 vezes para as colorações de *PAS* e *XP*.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1. Propriedades físicas da cevada

Todas as propriedades físicas do grão de cevada foram determinadas nas umidades de 0,1268; 0,1831; 0,2395; 0,2958; 0,3521; 0,4085; 0,4648; 0,5211; 0,5755; 0,6338; 0,6901; 0,7465 e 0,8028 kg/kg_{bs}, com cinco amostras para cada umidade.

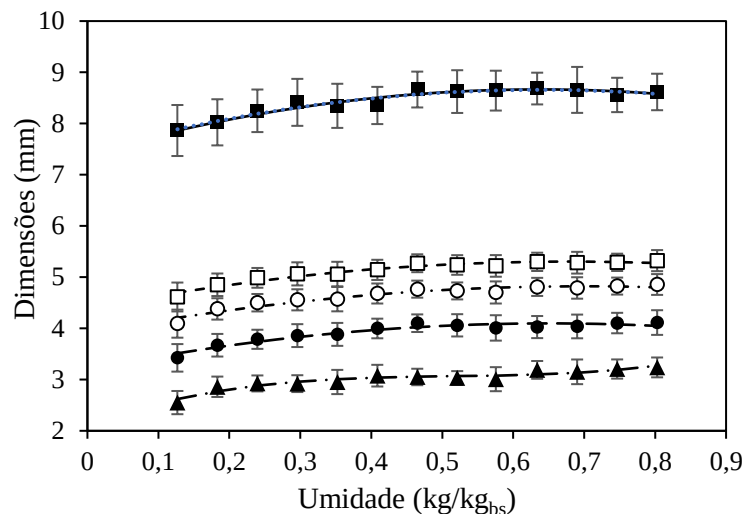
5.1.1. Dimensões do grão

Todas as dimensões do grão aumentaram significativamente ($p < 0,001$) com a umidade variando de 0,1268 a 0,8028 kg/kg_{bs}. O comprimento (L) variou de 7,86 para 8,68 mm, com um desvio padrão e coeficiente de variação máximos de 0,498 mm e 6,33%, respectivamente. A largura (W) variou de 3,42 a 4,11 mm, com desvio padrão e coeficiente de variação máximos de 0,269 mm e 7,86%, respectivamente. Já a espessura variou de 2,55 a 3,24 mm, com desvio padrão e coeficiente de variação máximos de 0,241 mm e 8,89%, respectivamente.

Os diâmetros médios aritmético e geométrico (D_a e D_g), calculados a partir das dimensões do grão, também aumentaram significativamente ($p < 0,001$) de 4,61 para 5,32 e de 4,09 para 4,86 mm, respectivamente, com a umidade variando de 0,1268 a 0,8028 kg/kg_{bs}. Os desvios padrões e coeficientes de variação máximos foram de 0,282 mm e 6,11% e 0,274 mm e 6,7% para os diâmetros médios aritméticos e geométricos, respectivamente. As médias e os respectivos desvios padrões das dimensões do grão são mostradas na Figura 5.1.

Como pode ser observado na Figura 5.1, as dimensões do grão se elevaram até o mesmo atingir umidades em torno de 0,4 a 0,6 kg/kg_{bs}. Para umidades acima destes valores, a variação nas dimensões não foi significativa, ou seja, pôde-se notar um limite para a expansão do grão com o aumento da umidade, mostrando que o grão possui uma capacidade máxima de expansão.

Figura 5.1 – (■) Comprimento, (●) largura, (▲) espessura, (□) diâmetro aritmético e (○) diâmetro geométrico do grão de cevada (média ± desvio padrão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A dependência das dimensões do grão de cevada com relação à umidade pode ser representada pelas equações a seguir

$$L = 7,416 + 3,918X - 3,073X^2 \quad (5.1)$$

$$W = 3,196 + 2,765X - 2,122X^2 \quad (5.2)$$

$$T = 2,100 + 5,236X - 9,792X^2 + 6,337X^3 \quad (5.3)$$

$$D_a = 4,387 + 2,711X - 1,998X^2 \quad (5.4)$$

$$D_g = 3,904 + 2,625X - 1,875X^2 \quad (5.5)$$

onde as dimensões são dadas em mm, e a umidade em kg/kg_{bs}.

Os parâmetros estatísticos do ajuste das Equações (5.1) a (5.5) são mostrados na Tabela a seguir

Tabela 5.1 – Parâmetros estatísticos do ajuste das respectivas equações às dimensões do grão de cevada.

Dimensão	Equação	R^2 (-)	MRE (%)	NRMSE (%)
L	(5.1)	0,9308	0,574	0,799
W	(5.2)	0,9208	1,249	1,394
T	(5.3)	0,9080	1,570	1,768
D_a	(5.4)	0,9479	0,780	0,898
D_g	(5.5)	0,9274	1,024	1,207

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como mostrado na Tabela 5.1, o ajuste das Equações (5.1) a (5.5) apresentaram $R^2 > 0,9$, $MRE < 1,6\%$ e $NRMSE < 1,8\%$, caracterizando um bom ajuste das Equações aos dados experimentais, pois o desvio entre os valores experimentais e preditos foi baixo.

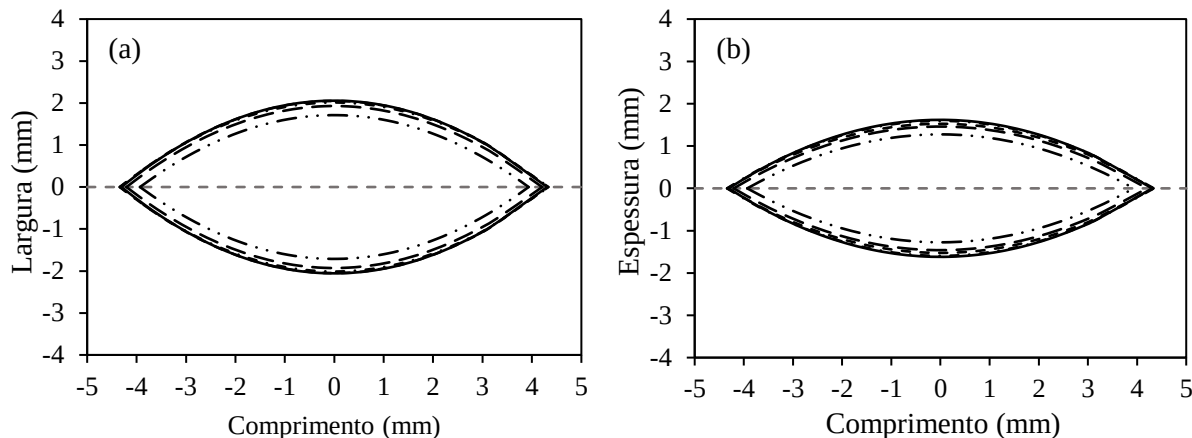
A Figura 5.2 mostra a variação na forma do grão, com o aumento em sua umidade. Pode-se perceber o inchamento do grão de cevada, resultante do aumento da umidade, sendo que o inchamento do grão foi mais intenso em umidades menores e alcançou um limite para umidades em torno de 0,4 a 0,6 kg/kg_{bs}.

As curvas da Figura 5.2 (a) e (b) foram calculadas utilizando as expressões dadas nas Equações (5.6a) e (5.6b), respectivamente

$$|y| = -\frac{2W}{L^2}x^2 + \frac{W}{2} \quad (5.6a)$$

$$|y| = -\frac{2T}{L^2}x^2 + \frac{T}{2} \quad (5.6b)$$

Figura 5.2 – Inchamento do grão de cevada devido ao aumento da umidade de (— · · —) 0,1268, (— —) 0,2958, (- - -) 0,4648, (---) 0,6338 e (—) 0,8028 kg/kg_{bs}. (a) largura x comprimento e (b) espessura x comprimento.



Fonte: Elaborado pelo autor.

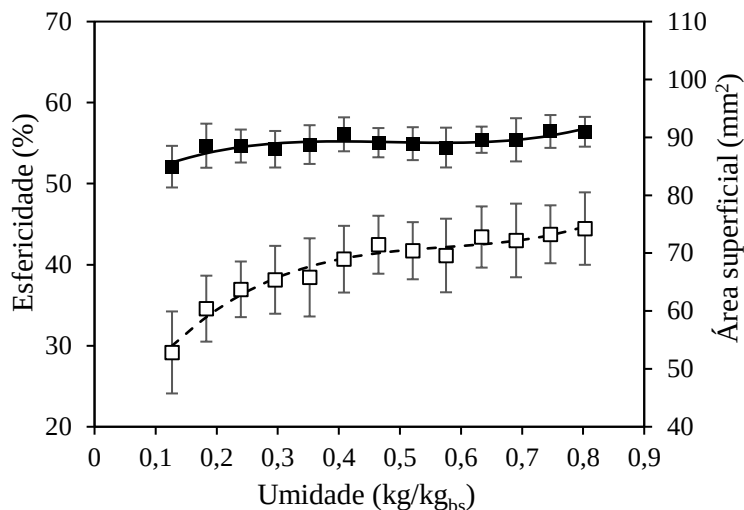
A expansão dos grãos pode ser resultado da absorção de umidade nos espaços intracelulares no interior do grão (SOLOMON, ZEUDU, 2009. SOLOGUBIK et al., 2013)

5.1.2. Esfericidade e área superficial do grão de cevada

A esfericidade e a área superficial do grão de cevada, em função da umidade, são mostrados na Figura 5.3. A esfericidade do grão de cevada apresentou um pequeno aumento (p

< 0,001), cerca de 8,3%, variando de 52,1 a 56,4%, com desvio padrão e coeficiente de variância máximos de 2,72% e 4,98%, respectivamente.

Figura 5.3 – (■) Esfericidade e (□) área superficial do grão de cevada (média ± desvio padrão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento na esfericidade, mesmo que discreto, pode ser explicado pelo maior aumento na largura (20,14%) e espessura (26,93%) em comparação com o aumento do comprimento do grão (10,42%).

A área superficial variou ($p < 0,001$) de 52,5 a 74,2 mm², com desvio padrão e coeficiente de variação máximos de 7,08 mm² e 13,4%, respectivamente. A área superficial do grão de cevada apresentou desvios padrão elevados, resultando em coeficientes de variação também elevados, em média 8,65%. Estes altos valores, tanto de desvios padrão quanto de coeficientes de variação, se deram devido à propagação e ampliação dos desvios apresentados pelas propriedades físicas das quais a área superficial foi calculada (D_g e, conseqüentemente, L , W e T).

A dependência da esfericidade e da área superficial com relação à umidade pode ser representada pelas Equações (5.7) e (5.8), respectivamente.

$$\phi = 48,31 + 45,10X - 95,98X^2 + 65,94X^3 \quad (5.7)$$

$$S = 37,84 + 158,07X - 261,71X^2 + 151,69X^3 \quad (5.8)$$

onde a esfericidade é dada em %, a área superficial em mm² e a umidade em kg/kg_{bs}.

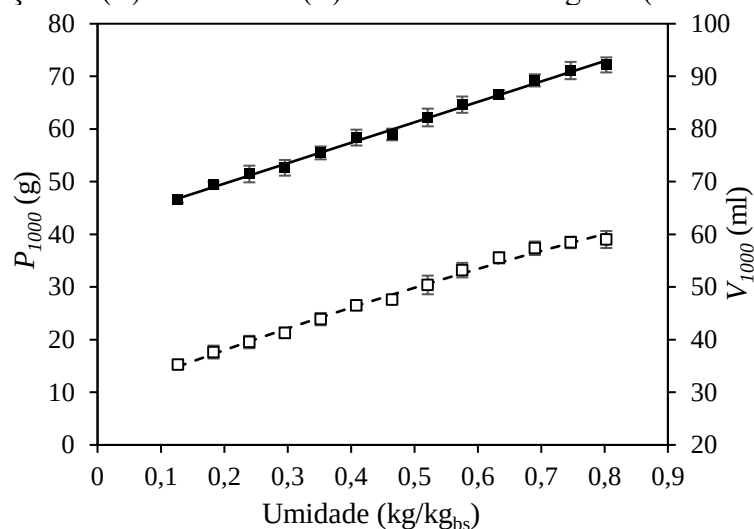
A Equação (5.6), ajustada aos dados experimentais de esfericidade, apresentou $R^2 = 0,7734$, $MRE = 0,78\%$ e $NRMSE = 0,93\%$. Equações polinomiais de grau maior foram ajustadas, mas não apresentaram redução expressiva no desvio entre os valores experimentais e preditos, de modo que a Equação (5.7) foi escolhida por ser mais simples e, ainda assim, apresentar erro relativo menor que 1%.

O ajuste da Equação (5.8) aos dados experimentais apresentou $R^2 = 0,9687$, $MRE = 1,26\%$ e $NRMSE = 1,53\%$, mostrando um bom ajuste para a faixa de umidade avaliada.

5.1.3. Massa e volume de mil grãos

O efeito do aumento da umidade na massa e volume de 1000 grãos é mostrado na Figura 5.4.

Figura 5.4 – Variação da (■) Massa e do (□) volume de 1000 grãos (média $\pm$ desvio padrão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Como esperado, o aumento da umidade do grão provocou um acréscimo ($p < 0,001$) linear na massa de 1000 grãos, que variou de 46,55 a 72,18 g e apresentou desvio padrão e coeficiente de variância máximos de 1,682 g e 3,09%, respectivamente.

O volume de 1000 grãos também aumentou ($p < 0,001$) com a elevação da umidade, mas apresentou, para umidades acima de 0,6-0,7 kg/kg_{bs}, uma tendência a permanecer constante, comportamento este já constatado na variação das dimensões dos grãos que, para maiores umidades, não foi significativo, reforçando então a hipótese de que o grão atinge uma capacidade máxima de expansão e não sofre mais alterações em seu tamanho.

O volume de 1000 grãos variou de 35,23 a 59,02 ml. O desvio padrão máximo foi de 1,77 ml e o coeficiente de variação máximo foi de 3,52%.

As variações da massa e do volume de 1000 grãos, em função da umidade, podem ser representadas pelas Equações (5.9) e (5.10), respectivamente.

$$m_{1000} = 41,87 + 38,80X \quad (5.9)$$

$$V_{1000} = 29,20 + 45,77X - 9,009X^2 \quad (5.10)$$

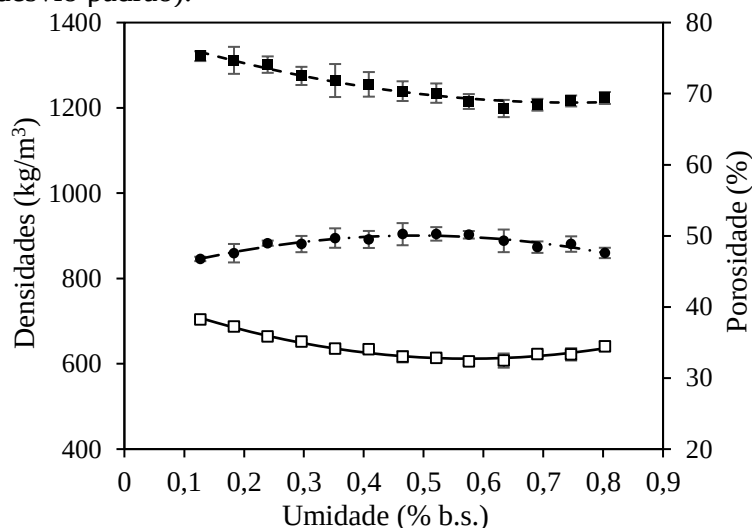
onde a massa de 1000 grãos é dada em g, o volume em ml e a umidade em kg/kg_{bs}.

Os ajustes das Equações (5.9) e (5.10) apresentaram, respectivamente, R^2 de 0,9961 e 0,9937, MRE de 0,72 e 1,06% e $NRMSE$ de 0,86 e 1,30%.

5.1.4. Densidades e porosidade do leito

As variações na densidade aparente e na densidade real, assim como a variação na porosidade do leito de grãos de cevada, são mostradas na Figura 5.5.

Figura 5.5 – (■) Densidade aparente, (□) densidade real e (●) porosidade do leito de grão de cevada (média ± desvio padrão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento da umidade do grão resultou em comportamentos semelhantes para as densidades aparente e real do leito de grãos de cevada. Tanto a densidade aparente quanto a densidade real apresentaram uma redução até a umidade alcançar aproximadamente 0,6 kg/kg_{bs} e, posteriormente, aumentaram novamente, a densidade aparente reduzindo ($p < 0,001$) de 703,6

para 605,6 kg/m³ e depois aumentando para 641,0 kg/m³. Já a densidade real diminuiu ($p < 0,001$) de 1321,3 para 1198,6 kg/m³ e para umidades maiores que 0,6 kg/kg_{bs} aumentou para 1223,3 kg/m³.

Os dados experimentais de densidade aparente e real apresentaram desvio padrão máximo de 16,62 e 38,68 kg/m³ e coeficientes de variação de 2,74 e 3,06%, respectivamente.

A porosidade apresentou comportamento inverso ao das densidades, aumentou ($p < 0,001$) de 46,75 para 50,28% e, posteriormente, para umidades maiores que aproximadamente 0,5 kg/kg_{bs}, diminuiu ($p < 0,001$) para 47,80%. Os dados experimentais de porosidade apresentaram desvio padrão e coeficiente de variação máximos de 1,59 e 3,23%, respectivamente.

As variações de densidade aparente, densidade real e porosidade, em função da umidade, podem ser representadas pelas Equações (5.11), (5.12) e (5.13), respectivamente.

$$\rho_b = 768,9 - 544,4X + 472,4X^2 \quad (5.11)$$

$$\rho_t = 1384,1 - 456,7X + 303,6X^2 \quad (5.12)$$

$$\varepsilon = 44,09 + 24,40X - 24,95X^2 \quad (5.13)$$

onde as densidades são dadas em kg/m³, a porosidade é dada em % e a umidade é dada em kg/kg_{bs}.

Os ajustes das Equações (5.11), (5.12) e (5.13) apresentaram R^2 de 0,9788, 0,9599 e 0,9100, MRE de 0,56, 0,52 e 0,54% e $NRMSE$ de 0,67, 0,63 e 0,65%, respectivamente.

A redução das densidades, até a cevada atingir umidade de aproximadamente 0,6 kg/kg_{bs}, pode ser atribuída à maior variação no volume do grão de cevada, que aumentou aproximadamente 67,5% na faixa de umidade estudada, enquanto que o aumento na massa do grão foi de, aproximadamente, 55%. Além dessa maior variação do volume, a redução pode ser resultado da adição de uma substância com menor densidade que a do grão em baixas umidades, no caso a água.

Para umidades acima de 0,6 kg/kg_{bs}, o aumento na densidade, pode ser atribuído ao maior aumento na massa do grão, que foi constante em toda a faixa de umidade estudada, fato que não foi constatado na variação do volume que, para umidades acima de 0,6 kg/kg_{bs}, foi menor.

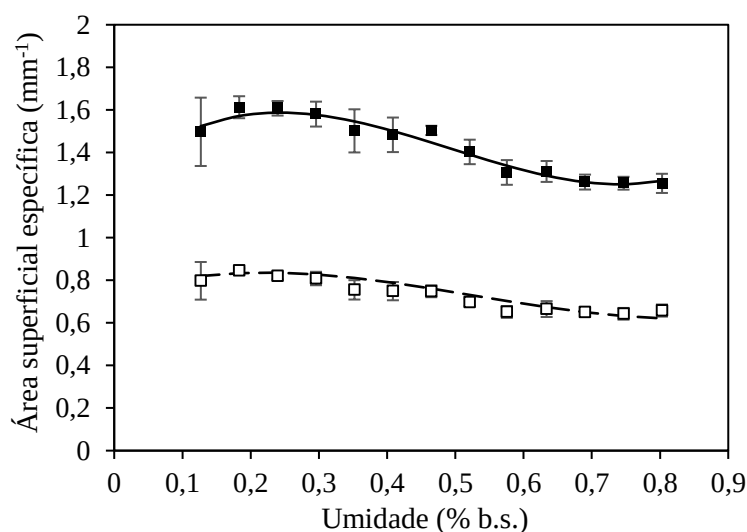
O conhecimento de propriedades como a massa e volume de 1000 grãos de cevada, e por consequência as densidades aparente e real do leito de grãos é de extrema importância para o dimensionamento de equipamentos presentes na cadeia produtiva do malte, para

determinação do volume necessário dos equipamentos que acondicionarão o material durante o processo, capacidade e rendimentos de produção.

5.1.5. Área superficial específica do grão e do leito de grãos

As variações das áreas superficiais específicas do grão e do leito de grãos de cevada são mostradas na Figura 5.6.

Figura 5.6 – Área superficial específica (■) do grão e (□) do leito de grãos de cevada (média $\pm$ desvio padrão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

Tanto a área superficial específica do grão quanto a do leito de grãos diminuíram ($p < 0,001$) com o aumento na umidade da cevada. A área superficial específica da partícula variou de 1,61 a 1,26 mm⁻¹ e essa redução é devida ao maior aumento no volume do grão do que em sua área superficial. A área superficial específica do leito diminuiu de 0,85 para 0,64 mm⁻¹ e essa redução é resultante do aumento do volume do grão e também da porosidade, de modo que, com o aumento da umidade, em um volume constante de leito estaria contida uma quantidade menor de grãos e, conseqüentemente, a área superficial dos grãos contidos neste volume de leito seria menor.

Os dados experimentais da área superficial específica da partícula apresentaram desvio padrão e coeficiente de variação médios de 0,06 mm⁻¹ e 4,19%, respectivamente, e os da área superficial específica do leito apresentaram valores médios de 0,03 mm⁻¹ e 4,45% para o desvio padrão e para o coeficiente de variação, respectivamente.

As Equações (5.14) e (5.15) representam as variações das áreas superficiais específicas do grão e do leito de grãos, respectivamente.

$$S_{sp} = 1,27 + 2,93X - 8,00X^2 + 5,41X^3 \quad (5.14)$$

$$S_{sb} = 0,73 + 1,05X - 3,00X^2 + 1,90X^3 \quad (5.15)$$

onde as áreas superficiais específicas do grão e do leito de grãos são dadas em mm^{-1} e a umidade é dada em kg/kg_{bs} .

Os ajustes das Equações (5.14) e (5.15) apresentaram R^2 de 0,9557 e 0,8967, MRE de 1,53 e 3,4% e $NRMSE$ de 1,95 e 4,06%, respectivamente.

Os resultados obtidos para as propriedades físicas da cevada estão em conformidade com os apresentados por Tavakoli et al. (2009) e Sologubik et al. (2013), ao estudarem as propriedades físicas da cevada da variedade *Nosrat* para umidades de 0,734 a 0,2158 kg/kg_{bs} e *Scarlett* para umidades de 0,1315 a 0,4582 kg/kg_{bs} , respectivamente.

5.2. Potência ultrassônica transmitida

A aplicação do ultrassom de potência provocou variação na temperatura do meio que, por apresentar um grande volume, resultou em um perfil de variação da temperatura com relação à posição. A Figura 5.7 mostra a variação de temperatura, em $^{\circ}\text{C/s}$, que é diretamente proporcional à potência ultrassônica real transmitida, conforme mostrado no Item 4.3.2, ou seja, a ação do ultrassom de potência é mais acentuada nas regiões com maior aumento de temperatura.

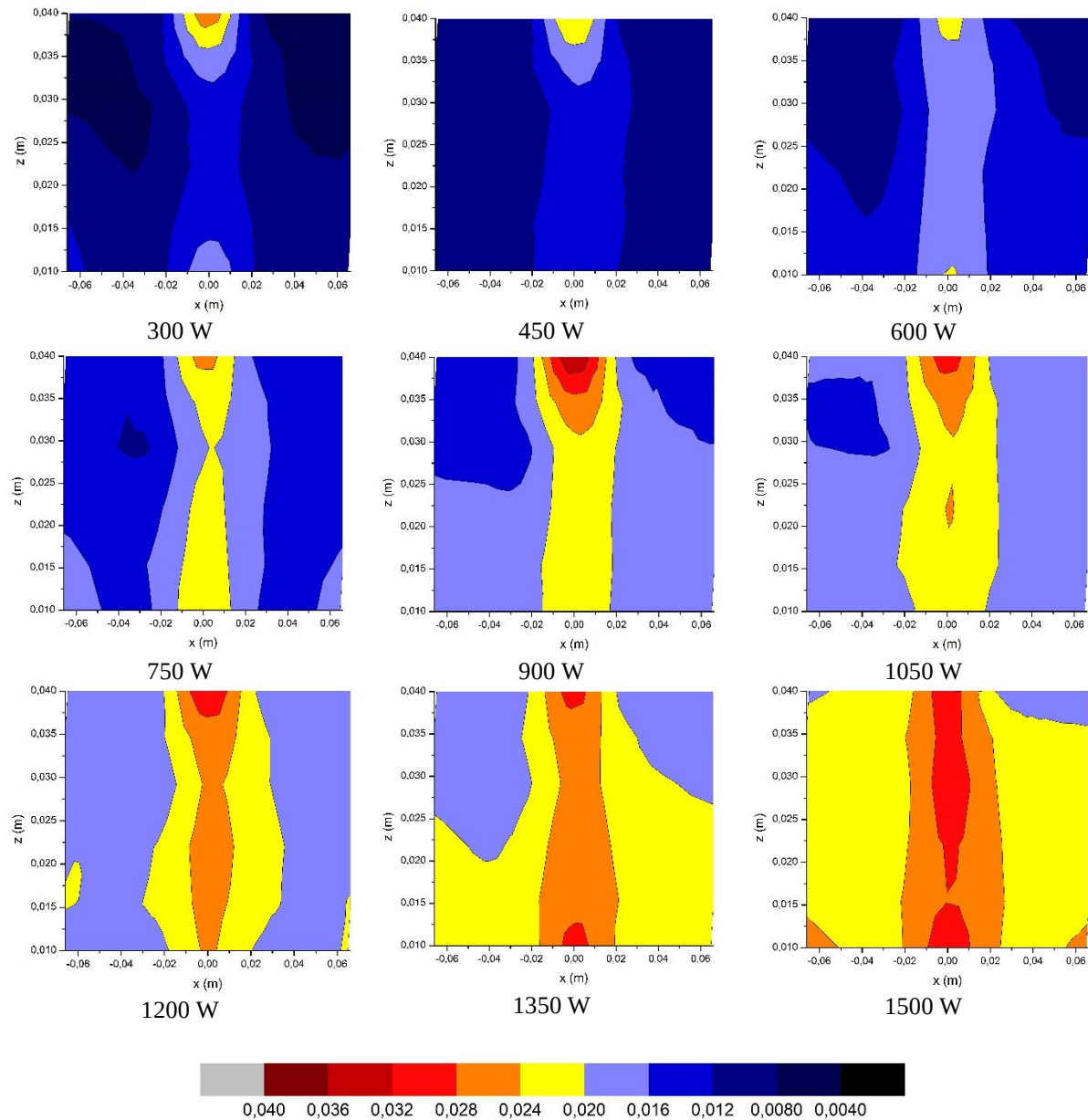
A Figura 5.7 foi feita a partir da média entre as 3 posições axiais medidas, ela mostra a taxa de variação da temperatura, em $^{\circ}\text{C/s}$, durante o tempo de aplicação de ultrassom de potência (90 segundos) em função das posições radiais e axiais.

Como pode ser observado na Figura 5.7, o aumento da potência ultrassônica nominal resultou em maiores variações de temperatura que, por sua vez, foram maiores no centro do recipiente, por onde as ondas ultrassônicas se propagavam primordialmente, já que o emissor utilizado irradiava o ultrassom axialmente, a partir de sua extremidade inferior. Próximo às paredes do recipiente, a variação de temperatura foi menor devido ao resfriamento causado pela água que circulava na camisa.

O aumento da potência nominal resultou ainda em uma variação da temperatura mais homogênea (Figura 5.7). Para a potência de 300 W, a variação na temperatura do meio foi de

0,004 a até 0,028 °C/s, enquanto que, para a potência de 1500 W, a variação foi de 0,016 a até 0,032 °C/s, provavelmente esse efeito se deu pela movimentação provocada no meio ter sido intensificada, facilitando a dissipação do calor gerado pelo ultrassom.

Figura 5.7 – Variação de temperatura, em °C/s, em função da potência durante a aplicação de ultrassom.

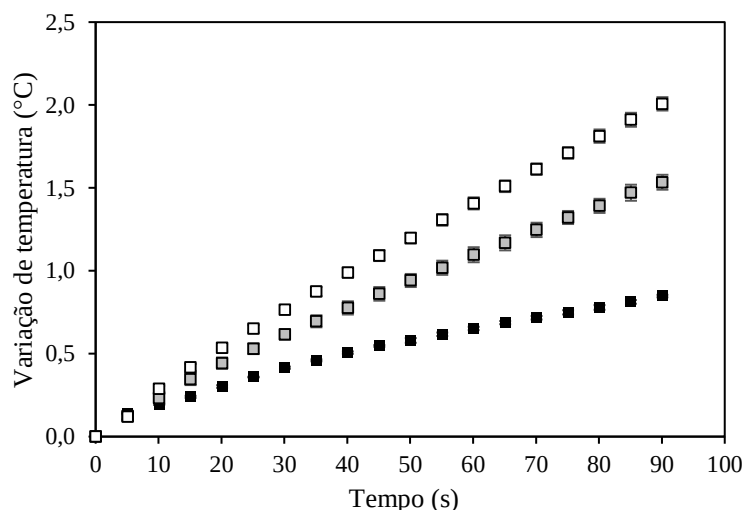


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.8 apresenta a média da variação de temperatura (média volumétrica aplicada em todo o meio) para diferentes potências nominais aplicadas. Para as potências nominais aplicadas, a média volumétrica de variação de temperatura apresentou uma tendência linear (R^2

> 0,974) e, assim como mostrado na Figura 5.7, a variação de temperatura aumentou com o aumento da potência nominal aplicada.

Figura 5.8 – Variação de temperatura (média volumétrica) durante a aplicação de ultrassom ((■) 300 (■) 900 e (□) 1500 W) (média $\pm$ desvio padrão)



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5.2 mostra os valores da potência real transmitida, obtida pelo método calorimétrico, para as diferentes potências nominais aplicadas no meio.

Tabela 5.2 – Potência real transmitida ao meio durante a aplicação de ultrassom de potência (média $\pm$ desvio padrão).

Potência Nominal (P_N) (W)	Potência real transmitida (P_{US}) (W)	P_{US}/P_N (%)
300	77,11 $\pm$ 0,68	25,70
450	84,24 $\pm$ 4,00	18,72
600	103,87 $\pm$ 2,54	17,31
750	124,21 $\pm$ 0,52	16,56
900	139,58 $\pm$ 4,08	15,51
1050	147,95 $\pm$ 0,23	14,07
1200	156,47 $\pm$ 0,73	13,04
1350	168,98 $\pm$ 3,30	12,52
1500	182,60 $\pm$ 3,67	12,17

Fonte: Elaborado pelo autor.

A relação entre a potência real transmitida e a potência nominal, que pode ser considerada um rendimento de conversão entre as duas formas de energia, diminuiu com o aumento da potência nominal aplicada, variando de 25,70 a 12,17% para as potências nominais de 300 e 1500 W, respectivamente.

Essa redução no rendimento de conversão pode ser atribuída a outros efeitos que se tornam mais intensos com a utilização de maiores potências nominais, mas que podem, de certa forma, aumentar a atenuação das ondas ou fazer com que se dissipem mais intensamente. Um desses efeitos é agitação mecânica provocada pela aplicação do ultrassom de potência e resultante da cavitação. A agitação no meio durante a aplicação de ultrassom de potência se torna mais vigorosa à medida que se aumenta a potência nominal aplicada (RASO et al., 1999; MARGULIS, MARGULIS, 2003; CÁRCEL et al. 2012).

Patero & Augusto (2015), ao utilizarem um banho ultrassônico auxiliando a hidratação de sorgo, reportaram uma potência ultrassônica volumétrica de 0,026 W/ml. Miano et al. (2015) reportaram uma potência ultrassônica volumétrica de 0,028 W/m³ ao avaliarem o efeito da sonicação de cevada nas propriedades de germinação. Cárcel et al. (2007b) relataram densidades acústicas de 0,0074 a 0,0268 W/ml, ao utilizarem potências nominais de 15 a 90 W, respectivamente, durante a aplicação de ultrassom de potência na salga de carne de porco.

Ao comparar os resultados dos trabalhos citados com o presente trabalho, que apresentou potências volumétricas de 0,077 a 0,183 W/ml para potências nominais de 300 a 1500 W, respectivamente, pode parecer que o rendimento de conversão da potência nominal aplicada em potência transmitida é baixo, mas este resultado apresentado no presente trabalho é uma média volumétrica da potência e, como mostrado na Figura 5.7, houve a existência de pontos com maiores potências ultrassônicas.

5.3. Maceração da cevada

5.3.1. Cinética de maceração

A cinética de maceração da cevada foi realizada nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C sem aplicação de ultrassom de potência e com aplicação nas potências nominais de 750 e 1500 W, com duas formas de aplicação permanente (30 minutos após cada pesagem da amostra) e pulsado (ligado 1 segundo e desligado 4 segundos). A umidade da cevada (média ± desvio padrão) durante as 24 horas de maceração, para as diferentes condições de temperatura e de aplicação de ultrassom de potência, é mostrada na Figura 5.9.

A umidade da cevada aumentou rapidamente na primeira hora de processo e, ao longo do tempo de maceração, a variação da umidade apresentou uma redução, de modo que a curva

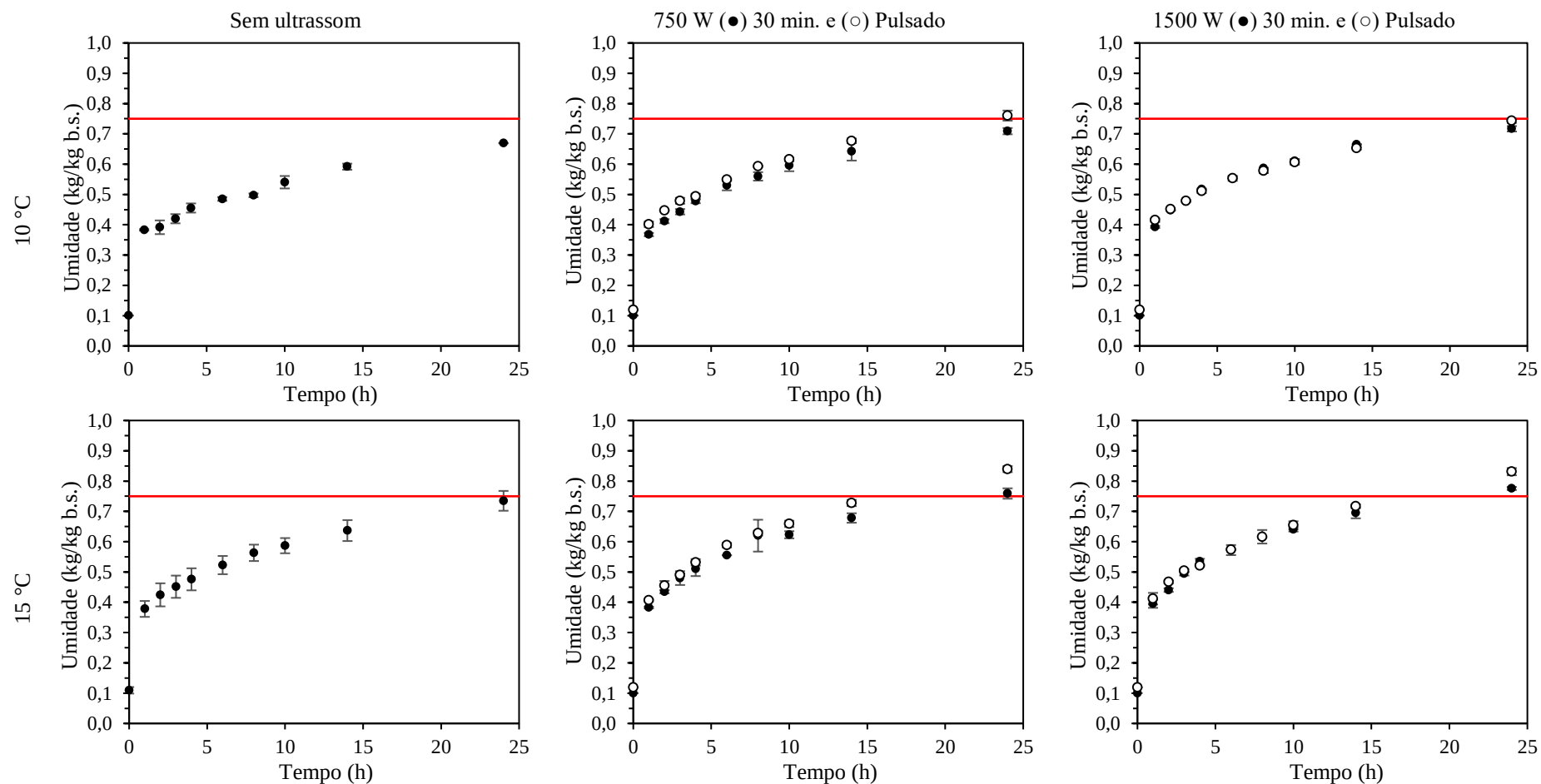
de cinética apresentou uma forma assintótica, onde, para tempos longos de processo, tenderia a uma umidade de equilíbrio, que seria uma umidade máxima que o grão atinge.

O aumento da temperatura, assim como a aplicação de ultrassom, acelerou o processo de maceração. Na Figura 5.9, pode-se observar que, para a maceração realizada a 10 °C sem aplicação de ultrassom e com a aplicação durante 30 minutos, tanto na potência de 750 quanto na de 1500 W, após 24 horas de experimento, a cevada não atingiu a umidade de 0,75 kg/kg (b.s.) (linha vermelha nos gráficos), que é a umidade necessária para realização da germinação do grão. Já a aplicação de ultrassom na forma pulsada, nas duas potências utilizadas, fez com que a cevada atingisse a umidade de germinação em 24 horas de maceração.

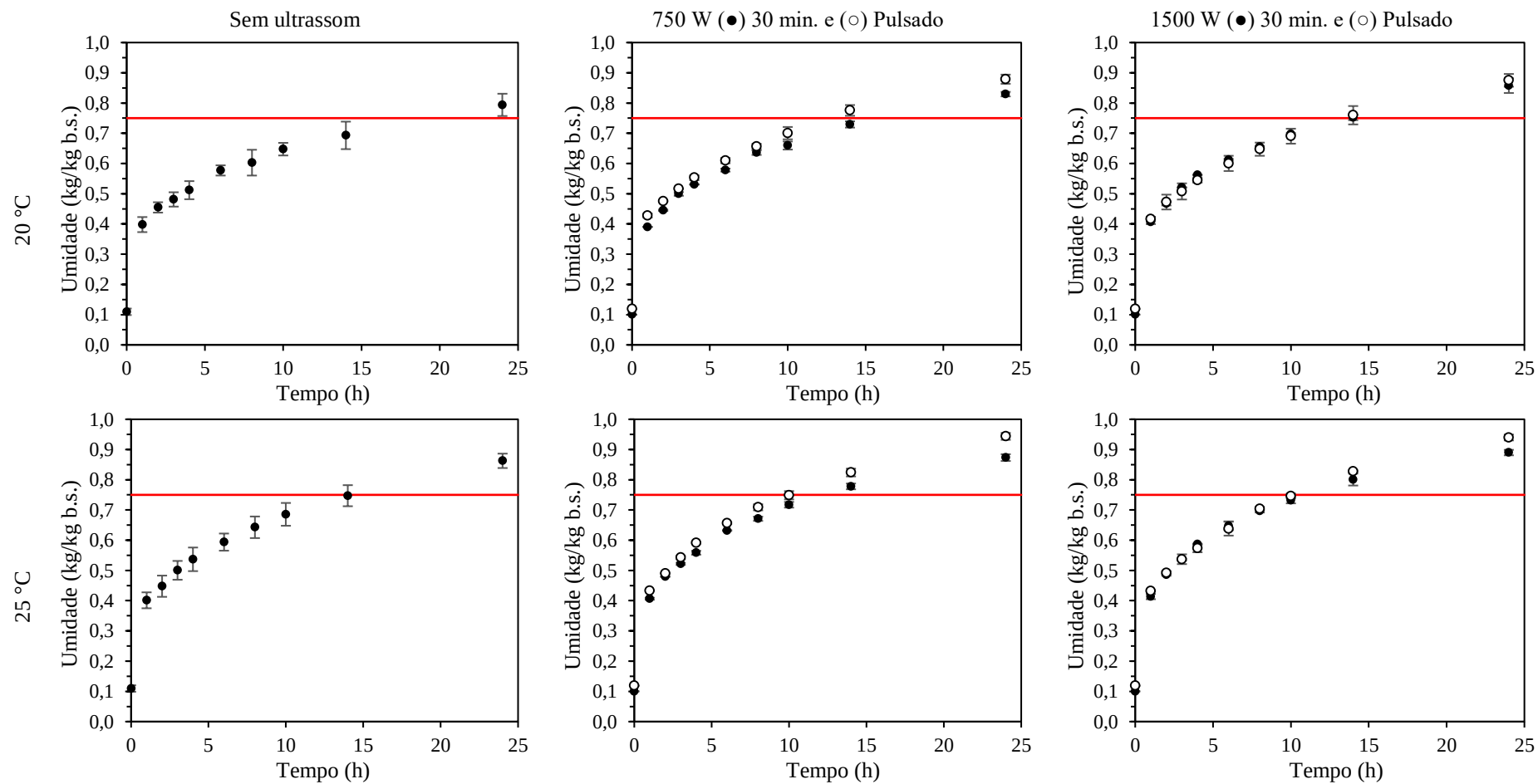
Para as macerações realizadas a 15 °C, apenas o experimento sem a aplicação de ultrassom não atingiu a umidade de germinação após 24 horas. Todos os experimentos com aplicação de ultrassom de potência reduziram o tempo necessário para que a cevada atingisse a umidade de germinação, sendo que a aplicação na forma pulsada se mostrou mais eficiente para a redução do tempo necessário para atingir a umidade de germinação.

Nas temperaturas de 20 e 25 °C, todos os experimentos atingiram a umidade de germinação antes de 24 horas de maceração e a aplicação de ultrassom de potência, principalmente na forma pulsada, promoveu uma redução no tempo necessário para atingir a umidade de germinação.

Figura 5.9 – Cinéticas de maceração da cevada sem aplicação de ultrassom e com a aplicação de ultrassom de potência (média $\pm$ desvio padrão).



Continuação da Figura 5.9

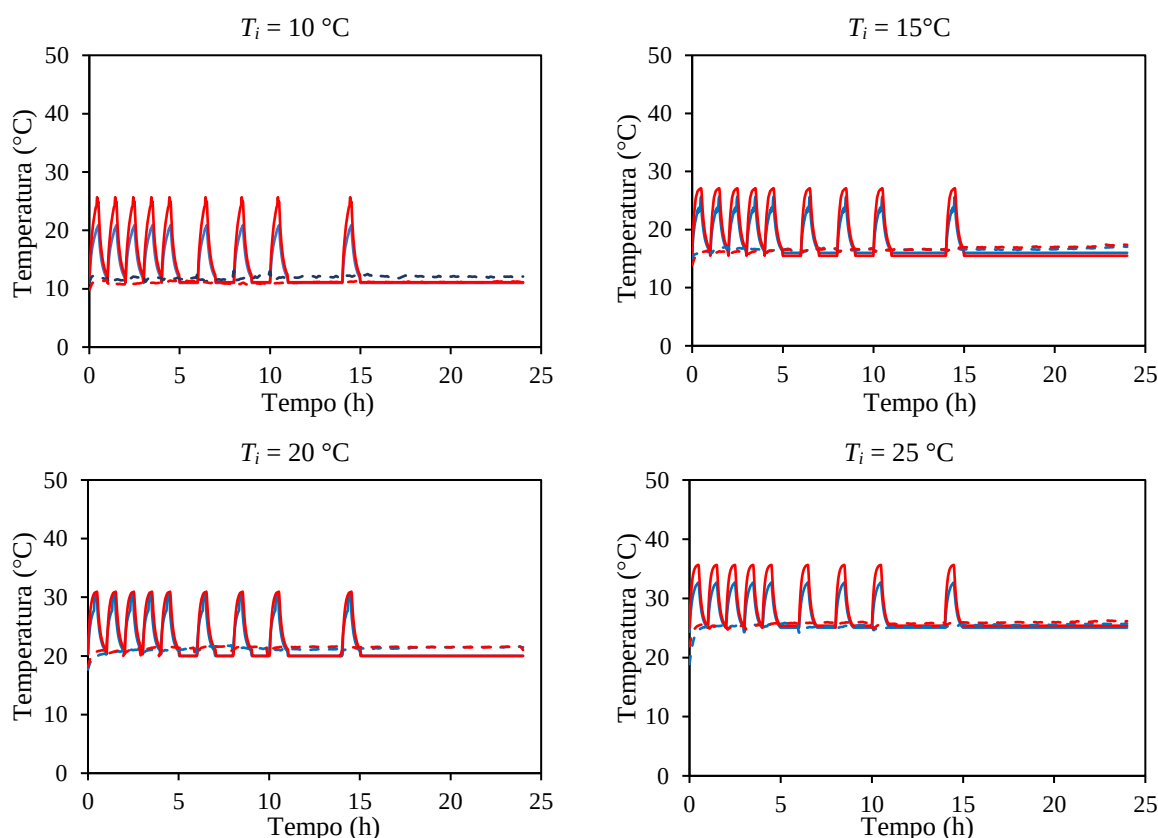


Fonte: Elaborado pelo autor.

Inicialmente, a utilização de ultrassom de potência na maceração de grãos de cevada para a germinação foi realizada somente aplicando-o por 30 minutos após a inserção da amostra na água, mas o sistema de controle de temperatura não foi capaz de manter a temperatura inicial do meio durante a aplicação do ultrassom, de modo que havia um aumento de até 15 °C (Figura 5.10) na temperatura da água utilizada na maceração. Logo, como não havia uma possibilidade viável de mudar o sistema de controle de temperatura, optou-se por encontrar uma forma de aplicação do ultrassom de potência que não elevasse de forma excessiva a temperatura do meio.

Após testes, a aplicação pulsada, com pulsos de 1 segundo ligado seguidos por 4 segundos desligado (1ON:4OFF), permitiu um melhor controle da temperatura durante a aplicação do ultrassom, não resultando em variações de temperatura que pudessem afetar o experimento com relação a esse fator (Figura 5.10). Por esse motivo, a maceração realizada para posterior germinação foi conduzida aplicando somente o ultrassom na forma pulsada.

Figura 5.10 – Variação de temperatura durante os experimentos com aplicação de ultrassom (— 750 W(30); - - - 750 W(P); — 1500 W(30); - - - 1500 W(P)).



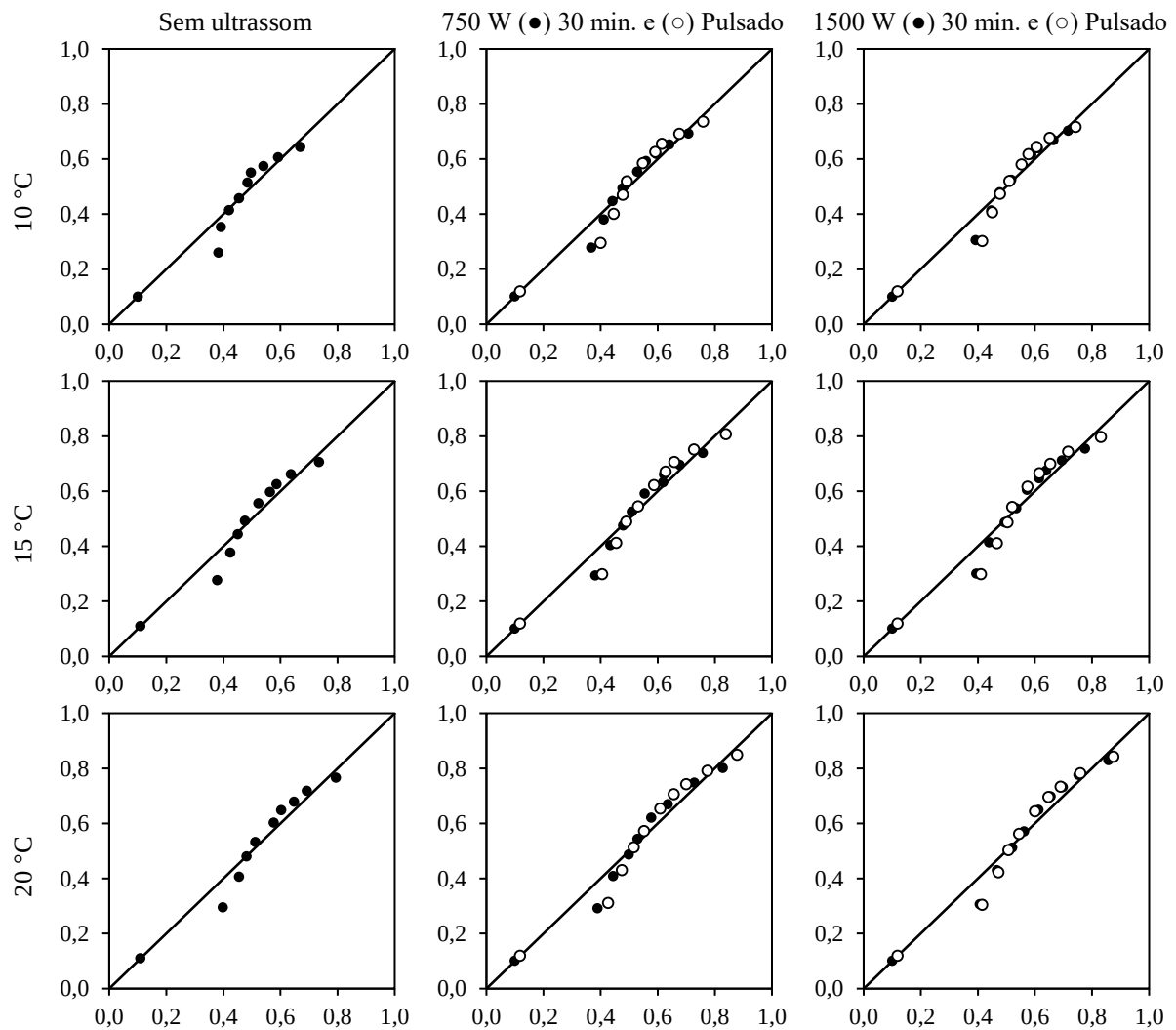
Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2. Modelagem matemática

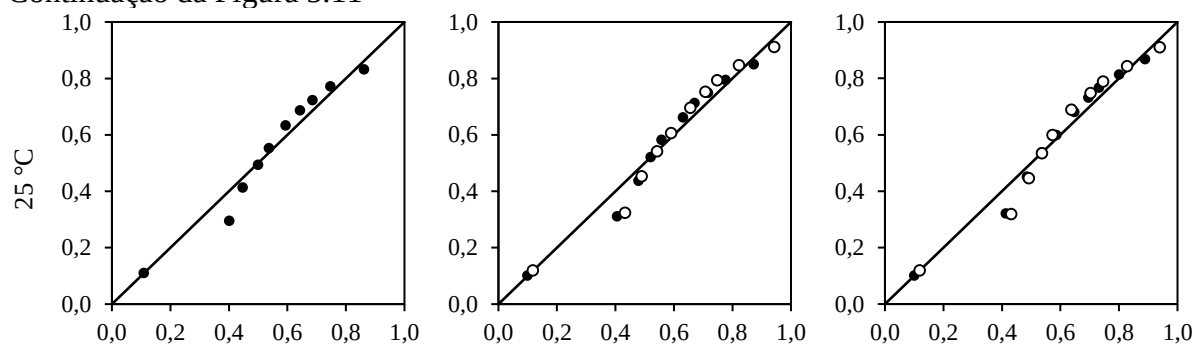
5.3.2.1. Modelo de Peleg

O ajuste do modelo de Peleg, através dos valores de umidade, em kg/kg_{bs} , preditos em função dos valores de umidade, em kg/kg_{bs} , experimentais, são mostrados na Figura 5.11.

Figura 5.11 – Ajuste do modelo de Peleg: valores experimentais de umidade, em kg/kg_{bs} (eixo das ordenadas) em função dos valores preditos pelo modelo, em kg/kg_{bs} (eixo das abscissas).



Continuação da Figura 5.11



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5.3 mostra os parâmetros do modelo de Peleg, assim como os parâmetros estatísticos do ajuste.

Tabela 5.3 – Parâmetros de ajuste do modelo de Peleg.

Condição experimental	Parâmetros do modelo (média $\pm$ desvio padrão)		Parâmetros estatísticos do ajuste	
10 °C	k_1	$4,622 \pm 0,373$	R^2	0,9194
	k_2	$1,647 \pm 0,001$	MRE	7,28
	R_0	$0,2171 \pm 0,0175$	$NRMSE$	10,41
	X_{eq}	$0,7072 \pm 0,0005$		
10 °C;750 W(30)	k_1	$4,107 \pm 0,155$	R^2	0,9650
	k_2	$1,520 \pm 0,041$	MRE	5,43
	R_0	$0,2437 \pm 0,0092$	$NRMSE$	7,12
	X_{eq}	$0,7581 \pm 0,0179$		
10 °C;750 W(P)	k_1	$4,223 \pm 0,052$	R^2	0,9481
	k_2	$1,446 \pm 0,033$	MRE	6,79
	R_0	$0,2368 \pm 0,0029$	$NRMSE$	8,47
	X_{eq}	$0,8105 \pm 0,0156$		
10 °C;1500 W(30)	k_1	$3,356 \pm 0,077$	R^2	0,9672
	k_2	$1,520 \pm 0,021$	MRE	4,87
	R_0	$0,2980 \pm 0,0069$	$NRMSE$	6,68
	X_{eq}	$0,7580 \pm 0,0091$		
10 °C;1500 W(P)	k_1	$3,951 \pm 0,192$	R^2	0,9411
	k_2	$1,511 \pm 0,013$	MRE	6,53
	R_0	$0,2534 \pm 0,0123$	$NRMSE$	8,76
	X_{eq}	$0,7806 \pm 0,0058$		
15 °C	k_1	$4,530 \pm 0,427$	R^2	0,9472
	k_2	$1,490 \pm 0,041$	MRE	6,98
	R_0	$0,2222 \pm 0,0211$	$NRMSE$	8,71
	X_{eq}	$0,7810 \pm 0,0289$		

Continuação da Tabela 5.3

15 °C;750 W(30)	k_1	$3,786 \pm 0,258$	R^2	0,9680
	k_2	$1,411 \pm 0,034$	MRE	5,39
	R_0	$0,2647 \pm 0,0180$	$NRMSE$	6,93
	X_{eq}	$0,8091 \pm 0,0171$		
15 °C;750 W(P)	k_1	$4,298 \pm 0,131$	R^2	0,9552
	k_2	$1,275 \pm 0,016$	MRE	6,57
	R_0	$0,2328 \pm 0,0071$	$NRMSE$	8,33
	X_{eq}	$0,9032 \pm 0,0097$		
15 °C;1500 W(30)	k_1	$3,627 \pm 0,143$	R^2	0,9673
	k_2	$1,379 \pm 0,012$	MRE	5,32
	R_0	$0,2759 \pm 0,0109$	$NRMSE$	7,03
	X_{eq}	$0,8254 \pm 0,0064$		
15 °C;1500 W(P)	k_1	$4,266 \pm 0,117$	R^2	0,9436
	k_2	$1,299 \pm 0,020$	MRE	7,71
	R_0	$0,2345 \pm 0,0065$	$NRMSE$	9,20
	X_{eq}	$0,8885 \pm 0,0119$		
20 °C	k_1	$4,053 \pm 0,142$	R^2	0,9559
	k_2	$1,357 \pm 0,060$	MRE	6,46
	R_0	$0,2469 \pm 0,0087$	$NRMSE$	8,14
	X_{eq}	$0,8473 \pm 0,0436$		
20 °C;750 W(30)	k_1	$3,978 \pm 0,024$	R^2	0,9639
	k_2	$1,261 \pm 0,021$	MRE	6,37
	R_0	$0,2514 \pm 0,0015$	$NRMSE$	7,73
	X_{eq}	$0,8932 \pm 0,0133$		
20 °C;750 W(P)	k_1	$4,024 \pm 0,073$	R^2	0,9546
	k_2	$1,203 \pm 0,037$	MRE	6,71
	R_0	$0,2486 \pm 0,0045$	$NRMSE$	8,46
	X_{eq}	$0,9505 \pm 0,0255$		
20 °C;1500 W(30)	k_1	$3,623 \pm 0,135$	R^2	0,9673
	k_2	$1,221 \pm 0,040$	MRE	5,94
	R_0	$0,2762 \pm 0,0103$	$NRMSE$	7,35
	X_{eq}	$0,9288 \pm 0,0138$		
20 °C;1500 W(P)	k_1	$4,200 \pm 0,302$	R^2	0,9543
	k_2	$1,210 \pm 0,034$	MRE	6,95
	R_0	$0,2387 \pm 0,0172$	$NRMSE$	8,54
	X_{eq}	$0,9456 \pm 0,0230$		
25 °C	k_1	$4,208 \pm 0,445$	R^2	0,9621
	k_2	$1,212 \pm 0,021$	MRE	6,45
	R_0	$0,2397 \pm 0,0253$	$NRMSE$	7,95
	X_{eq}	$0,9349 \pm 0,0217$		
25 °C;750 W(30)	k_1	$3,570 \pm 0,087$	R^2	0,9712
	k_2	$1,187 \pm 0,020$	MRE	5,67
	R_0	$0,2802 \pm 0,0068$	$NRMSE$	6,96
	X_{eq}	$0,9428 \pm 0,0141$		

Continuação da Tabela 5.3

25 °C;750 W(P)	k_1	$3,795 \pm 0,060$	R^2	0,9665
	k_2	$1,104 \pm 0,008$	MRE	6,01
	R_0	$0,2636 \pm 0,0042$	$NRMSE$	7,51
	X_{eq}	$1,0243 \pm 0,0063$		
25 °C;1500 W(30)	k_1	$3,375 \pm 0,055$	R^2	0,9760
	k_2	$1,162 \pm 0,018$	MRE	5,06
	R_0	$0,2963 \pm 0,0049$	$NRMSE$	6,37
	X_{eq}	$0,9605 \pm 0,0132$		
25 °C;1500 W(P)	k_1	$3,925 \pm 0,160$	R^2	0,9617
	k_2	$1,102 \pm 0,004$	MRE	6,56
	R_0	$0,2550 \pm 0,0104$	$NRMSE$	8,02
	X_{eq}	$1,0262 \pm 0,0031$		

Fonte: Elaborado pelo autor.

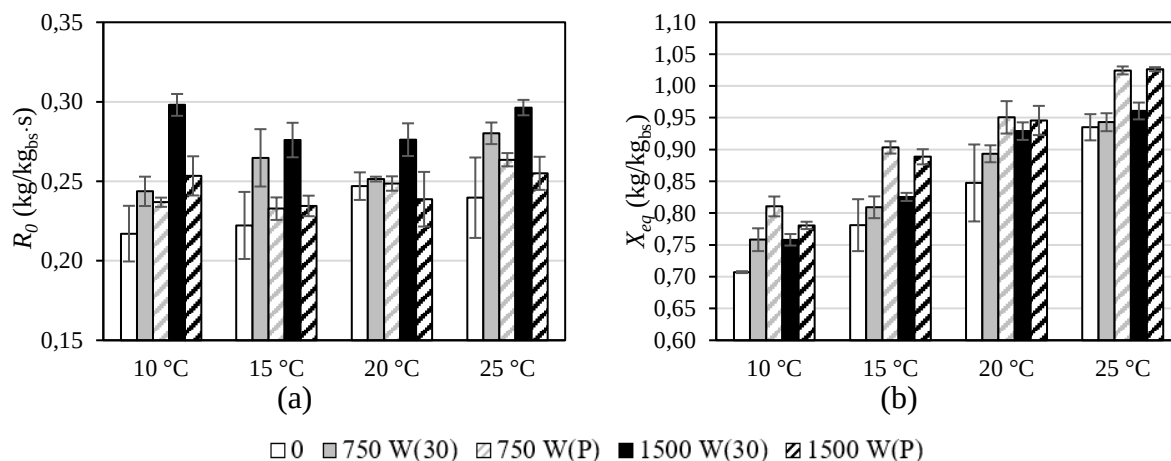
O ajuste do modelo de Peleg apresentou $R^2 > 0,91$, $MRE < 7,71\%$ e $NRMSE < 10,41\%$. Através da Figura 5.11, pode-se observar que os maiores desvios entre os valores experimentais e os preditos pelo modelo ocorreram para o início do processo de hidratação.

A taxa inicial de hidratação (R_0) (Figura 5.12a), calculada a partir da taxa constante (k_1) do modelo de Peleg, variou significativamente ($p < 0,05$) com o aumento da temperatura e com a aplicação de ultrassom. O aumento da temperatura resultou no aumento da taxa inicial de hidratação, assim como a aplicação de ultrassom de potência.

Com relação ao ultrassom de potência, a aplicação durante 30 minutos apresentou uma maior taxa inicial que a aplicação de forma pulsada, efeito esse que pode ser relacionado ao tempo de ação do ultrassom que foi maior no início do processo de maceração para aplicação realizada durante 30 minutos. Para a aplicação durante 30 minutos, a potência de 1500 W apresentou maior taxa inicial quando comparada a 750 W, já para a aplicação de forma pulsada, não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre as duas potências utilizadas.

A umidade de equilíbrio (X_{eq}) (Figura 5.12b), calculada a partir da constante de capacidade (k_2) do modelo de Peleg, também aumentou ($p < 0,05$) com o aumento da temperatura e com a aplicação de ultrassom. A aplicação de ultrassom de potência na forma pulsada resultou em maiores umidades de equilíbrio quando comparada à aplicação durante 30 minutos, pois a aplicação pulsada se estendeu por todo o tempo de maceração enquanto que, para aplicação durante 30 minutos, a última ação do ultrassom foi após 14 horas de maceração, onde foi aplicado por mais 30 minutos e, no restante do processo, não houve mais aplicação.

Figura 5.12 – (a) Taxa inicial de hidratação e (b) umidade de equilíbrio do modelo de Peleg.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com a aplicação de ultrassom na forma pulsada não houve diferença significativa ($p > 0,05$) entre as potências utilizadas, mas, para a aplicação durante 30 minutos, a potência de 1500 W resultou em maiores umidades de equilíbrio, quando comparada a potência de 750 W ($p < 0,05$).

Montanuci, Jorge & Jorge (2013) utilizaram o modelo de Peleg para descrever a hidratação de cinco variedades de cevada (BRS CAUE, BRS BRAU, BRS BOREMA, BRS 195 e BRS GRETA), nas temperaturas de 10 a 35 °C. Os valores da taxa constante (k_1), apresentada por eles, variaram de 2,73 a 6,7 h(%_{bs})⁻¹, sendo que o aumento da temperatura provocou a redução de k_1 . A constante de capacidade (k_2) variou de 1,07 a 1,93%_{bs}⁻¹, diminuindo com o aumento da temperatura. A umidade de equilíbrio, calculada a partir de k_2 , variou de 69,4 a 108,5%_{bs}.

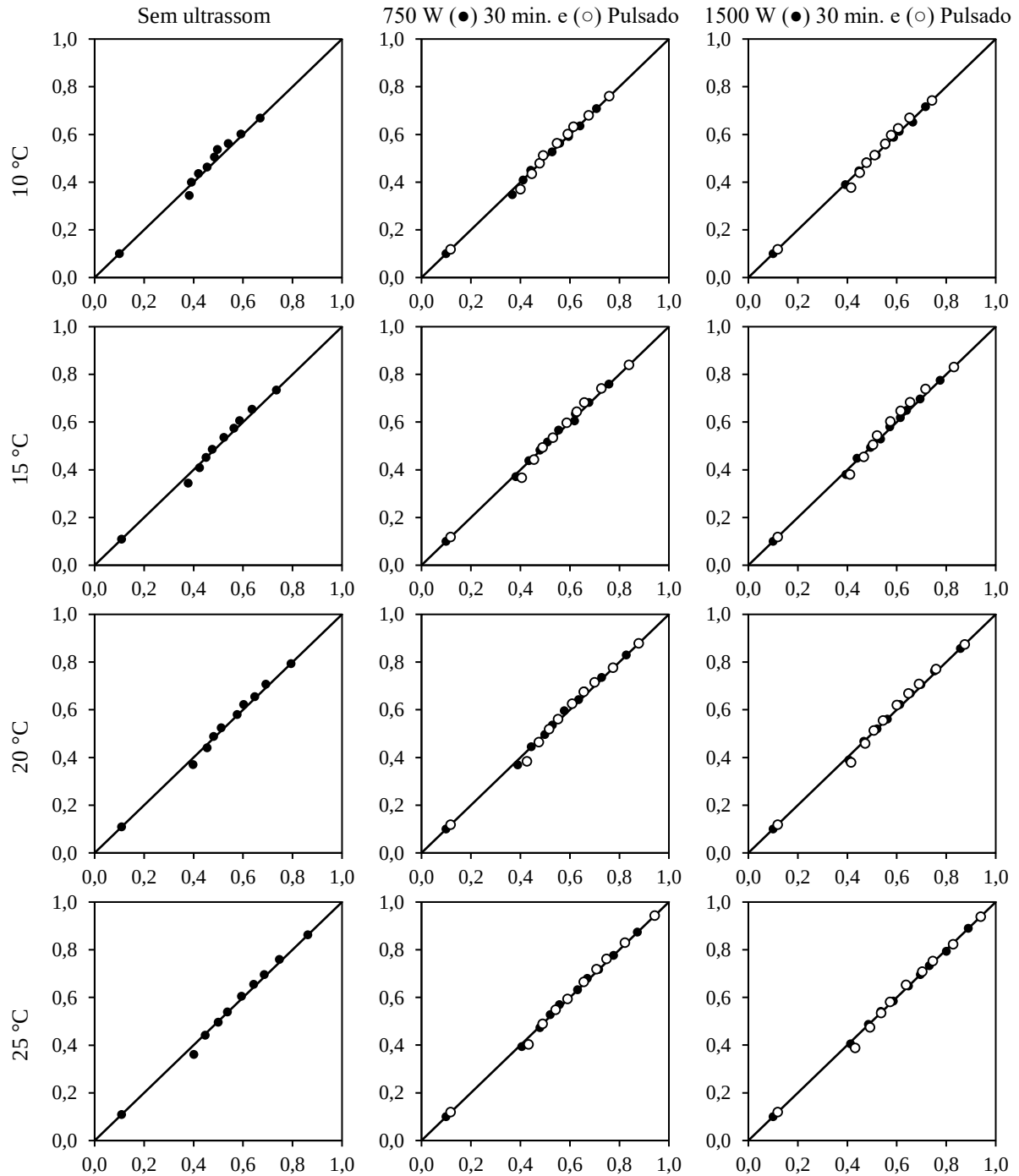
Para a hidratação de cevada da variedade BRS ELIS nas temperaturas de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 °C, o modelo de Peleg apresentou valores de k_1 de 7,56 a 4,44 h(%_{bs})⁻¹ e valores de k_2 de 1,97 a 1,15%_{bs}⁻¹ (MONTANUCI; JORGE, JORGE, 2015).

Patero & Augusto (2015) estudaram a aplicação de ultrassom durante a hidratação de sorgo e, ao utilizar o modelo de Peleg, obtiveram valores de k_1 na ordem de 0,01 a 0,02 h(%_{bs})⁻¹ e k_2 de 0,022 a 0,028%_{bs}⁻¹.

5.3.2.2. Modelo exponencial (Weibull)

O ajuste do modelo exponencial tipo *Weibull* é mostrado na Figura 5.13.

Figura 5.13 – Ajuste do modelo exponencial tipo *Weibull*: valores experimentais de umidade, em kg/kg_{bs} (eixo das ordenadas) em função dos valores preditos pelo modelo, em kg/kg_{bs} (eixo das abscissas).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5.4 mostra os parâmetros do modelo, assim como os parâmetros estatísticos do ajuste.

Tabela 5.4 – Parâmetros do ajuste do modelo exponencial tipo *Weibull*.

Condição experimental	Parâmetros do modelo (média $\pm$ desvio padrão)		Parâmetros estatísticos do ajuste	
10 °C	α	$0,343 \pm 0,006$	R^2	0,9849
	β	$44,35 \pm 5,22$	MRE	3,57
	X_{eq}	$1,125 \pm 0,026$	$NRMSE$	4,65
10 °C;750 W(30)	α	$0,373 \pm 0,005$	R^2	0,9983
	β	$29,78 \pm 2,40$	MRE	1,08
	X_{eq}	$1,110 \pm 0,002$	$NRMSE$	1,49
10 °C;750 W(P)	α	$0,392 \pm 0,000$	R^2	0,9937
	β	$26,25 \pm 0,38$	MRE	2,20
	X_{eq}	$1,155 \pm 0,023$	$NRMSE$	2,82
10 °C;1500 W(30)	α	$0,318 \pm 0,007$	R^2	0,9990
	β	$34,78 \pm 2,33$	MRE	0,61
	X_{eq}	$1,147 \pm 0,003$	$NRMSE$	1,03
10 °C;1500 W(P)	α	$0,379 \pm 0,018$	R^2	0,9917
	β	$21,84 \pm 2,54$	MRE	2,38
	X_{eq}	$1,085 \pm 0,015$	$NRMSE$	3,25
15 °C	α	$0,410 \pm 0,026$	R^2	0,9928
	β	$24,79 \pm 2,69$	MRE	2,56
	X_{eq}	$1,106 \pm 0,067$	$NRMSE$	3,24
15 °C;750 W(30)	α	$0,378 \pm 0,008$	R^2	0,9978
	β	$23,18 \pm 0,42$	MRE	1,24
	X_{eq}	$1,135 \pm 0,023$	$NRMSE$	1,63
15 °C;750 W(P)	α	$0,447 \pm 0,001$	R^2	0,9939
	β	$21,91 \pm 0,52$	MRE	2,34
	X_{eq}	$1,233 \pm 0,009$	$NRMSE$	3,09
15 °C;1500 W(30)	α	$0,376 \pm 0,004$	R^2	0,9987
	β	$22,84 \pm 0,15$	MRE	1,04
	X_{eq}	$1,157 \pm 0,007$	$NRMSE$	1,30
15 °C;1500 W(P)	α	$0,423 \pm 0,001$	R^2	0,9910
	β	$21,74 \pm 0,17$	MRE	3,25
	X_{eq}	$1,219 \pm 0,02$	$NRMSE$	4,06
20 °C	α	$0,407 \pm 0,014$	R^2	0,9955
	β	$23,43 \pm 0,47$	MRE	2,10
	X_{eq}	$1,187 \pm 0,048$	$NRMSE$	2,56
20 °C;750 W(30)	α	$0,422 \pm 0,009$	R^2	0,9975
	β	$21,66 \pm 0,06$	MRE	1,50
	X_{eq}	$1,225 \pm 0,010$	$NRMSE$	2,08

Continuação da Tabela 5.4

20 °C;750 W(P)	α	$0,442 \pm 0,017$	R^2	0,9933
	β	$21,45 \pm 0,13$	MRE	2,23
	X_{eq}	$1,287 \pm 0,024$	$NRMSE$	3,00
20 °C;1500 W(30)	α	$0,411 \pm 0,021$	R^2	0,9986
	β	$20,86 \pm 0,79$	MRE	1,07
	X_{eq}	$1,259 \pm 0,025$	$NRMSE$	1,54
20 °C;1500 W(P)	α	$0,443 \pm 0,003$	R^2	0,9942
	β	$23,01 \pm 2,37$	MRE	2,56
	X_{eq}	$1,301 \pm 0,006$	$NRMSE$	3,08
25 °C	α	$0,462 \pm 0,031$	R^2	0,9957
	β	$20,12 \pm 0,55$	MRE	1,96
	X_{eq}	$1,247 \pm 0,029$	$NRMSE$	2,67
25 °C;750 W(30)	α	$0,413 \pm 0,012$	R^2	0,9991
	β	$21,15 \pm 0,00$	MRE	0,90
	X_{eq}	$1,287 \pm 0,016$	$NRMSE$	1,14
25 °C;750 W(P)	α	$0,440 \pm 0,010$	R^2	0,9978
	β	$24,80 \pm 0,24$	MRE	1,37
	X_{eq}	$1,435 \pm 0,022$	$NRMSE$	1,88
25 °C;1500 W(30)	α	$0,408 \pm 0,000$	R^2	0,9996
	β	$20,56 \pm 0,31$	MRE	0,52
	X_{eq}	$1,305 \pm 0,010$	$NRMSE$	0,72
25 °C;1500 W(P)	α	$0,462 \pm 0,014$	R^2	0,9954
	β	$22,60 \pm 2,76$	MRE	2,02
	X_{eq}	$1,395 \pm 0,027$	$NRMSE$	2,71

Fonte: Elaborado pelo autor

O ajuste do modelo exponencial apresentou valores de $R^2 > 0,98$, $MRE < 3,6\%$ e $NRMSE < 4,7\%$, de modo que o modelo exponencial pode ser utilizado para prever o processo de maceração da cevada com menor erro.

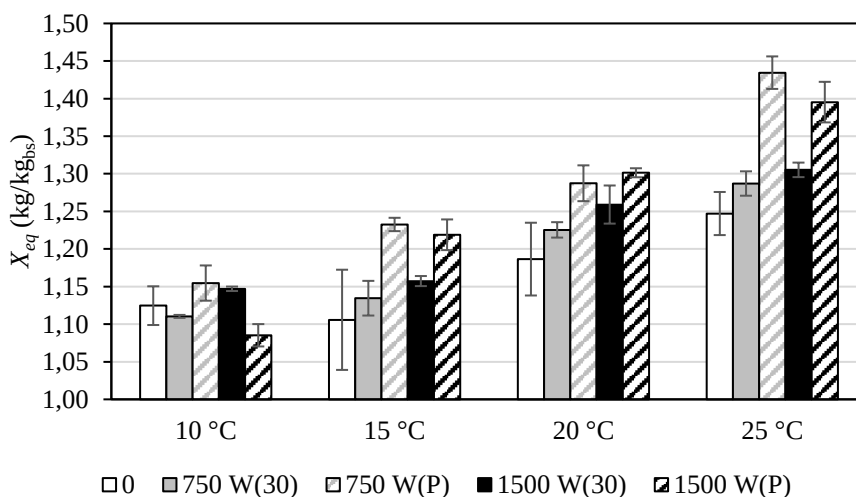
O parâmetro de forma (α) do modelo exponencial aumentou ($p < 0,05$) com o aumento da temperatura. Com relação ao ultrassom de potência, a aplicação por 30 minutos diminuiu ($p < 0,05$) o valor de α , sendo que, para a potência de 1500 W, foi menor, com relação à potência de 750 W. A aplicação de ultrassom na forma pulsada provocou um aumento ($p < 0,05$) no parâmetro de forma, quando comparada à aplicação por 30 minutos, e não houve diferença com relação às duas potências utilizadas.

O parâmetro de escala (β), que representa o tempo para que a cevada atinja 63% da umidade de equilíbrio (CUNNINGHAM et al., 2007), foi maior ($p < 0,05$) para a temperatura de 10 °C, e não apresentou diferença significativa entre as temperaturas de 15, 20 e 25 °C. A aplicação de ultrassom reduziu os valores do parâmetro de escala, mas não houve diferença significativa tanto em relação à forma de aplicação quanto à potência utilizada.

A umidade de equilíbrio (X_{eq}) (Figura 5.14), estimada pelo modelo exponencial, aumentou ($p < 0,05$) com o aumento da temperatura. A aplicação de ultrassom também promoveu aumento ($p < 0,05$) na umidade de equilíbrio, apresentando maiores valores quando a aplicação foi feita na forma pulsada. Este resultado está em conformidade com o obtido através do modelo de Peleg (mostrado no Item 5.3.2.1).

Montanuci, Jorge & Jorge (2015) utilizaram o modelo exponencial para descrever a hidratação de cevada da variedade BRS ELIS e obtiveram valores para o parâmetro de forma (α) similares aos encontrados neste trabalho, variando de 0,41 a 0,60 e para o parâmetro de escala (β) variando de 8,87 a 5,66 h. Em seu trabalho, também obtiveram uma pior qualidade de ajuste, com R^2 máximo de 0,91.

Figura 5.14 – Umidade de equilíbrio do modelo exponencial tipo *Weibull*.

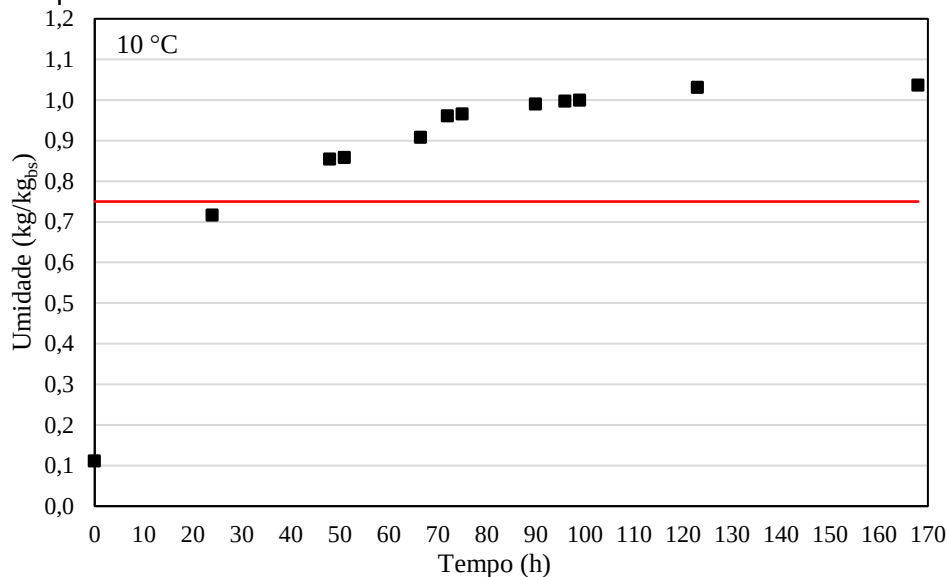


Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3.2.3. Modelo difusivo

Para o ajuste do modelo difusivo, o conhecimento da umidade de equilíbrio se faz necessário, mas a determinação experimental deste parâmetro é complexa, pois durante a própria maceração começam ocorrer alterações no grão, como reações enzimáticas e solubilização do endosperma, surgimento de substâncias mais solúveis como açúcares, por exemplo e, conseqüentemente, a absorção de grande quantidade de água devido a essas alterações, de modo que essa água absorvida não corresponderia ao equilíbrio da cevada propriamente dito.

Figura 5.15 – Teste de hidratação a 10 °C sem aplicação de ultrassom para determinação da umidade de equilíbrio.



Fonte: Elaborado pelo autor.

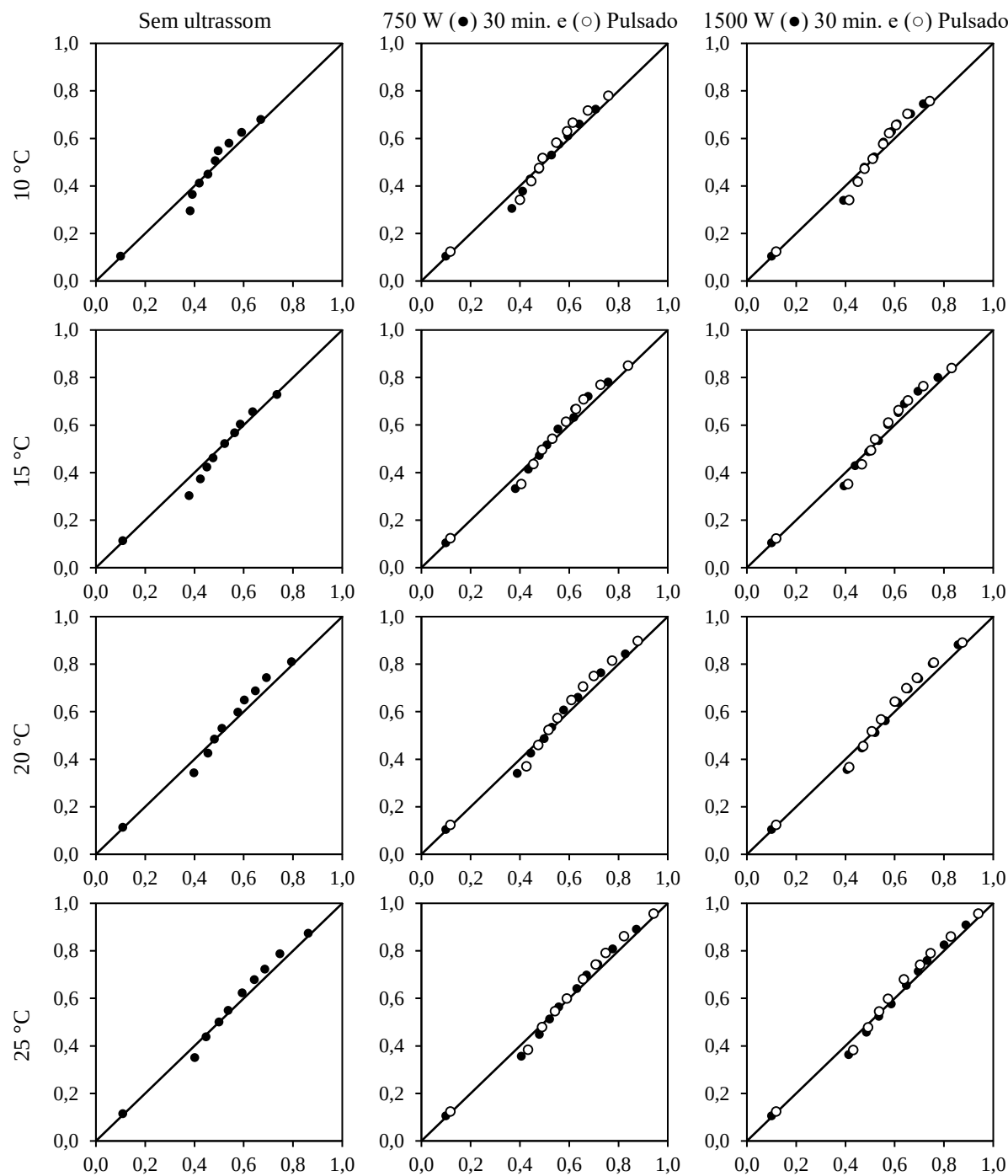
A Figura 5.15 mostra um teste de maceração realizado a 10 °C sem a aplicação de ultrassom. Pode-se observar que a variação da umidade ocorreu até em tempos muito longos de processo. Após a cevada atingir a umidade necessária para germinação (0,75 kg/kg_{bs}, linha vermelha), ainda houve absorção de água por um longo período de tempo, entrando em equilíbrio depois de sete dias de maceração, aproximadamente, de modo que, após este suposto equilíbrio, diversas alterações já teriam ocorrido no grão.

Logo, para o ajuste do modelo difusivo, a umidade de equilíbrio teria de ser predita por modelos empíricos como os utilizados anteriormente (Peleg e exponencial tipo Weibull). Entretanto, a umidade de equilíbrio predita pelos modelos também pode resultar em incoerências, como no caso do modelo exponencial que, por apresentar três parâmetros de ajuste (α , β e X_{eq}), pode resultar em diferentes combinações entre os valores destes parâmetros com a mesma qualidade de ajuste, de modo que a umidade acabe sendo superestimada.

Portanto, apesar do modelo exponencial ter apresentado melhor qualidade de ajuste, a umidade de equilíbrio obtida através do modelo de Peleg foi utilizada para determinar a difusividade efetiva, através do ajuste do modelo difusivo.

O ajuste do modelo difusivo, aproximando a cevada para uma esfera, é mostrado na Figura 5.16, através dos valores experimentais de umidade em função dos valores preditos pelo modelo, ambos em kg/kg_{bs}.

Figura 5.16 – Ajuste do modelo difusivo: valores experimentais de umidade, em kg/kg_{bs} (eixo das ordenadas) em função dos valores preditos pelo modelo, em kg/kg_{bs} (eixo das abscissas).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A Tabela 5.5 mostra os parâmetros do modelo, assim como os parâmetros estatísticos do ajuste.

Tabela 5.5 – Parâmetros de ajuste do modelo difusivo.

Condição experimental	Parâmetros do modelo (média $\pm$ desvio padrão)		Parâmetros estatísticos do ajuste	
10 °C	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$1,938 \pm 0,104$	R^2	0,9528
	X_{eq}	$0,7072 \pm 0,0005$	MRE	6,61
	R	$0,0025 \pm 1,12E-5$	$NRMSE$	6,53
10 °C;750 W(30)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$2,095 \pm 0,145$	R^2	0,9856
	X_{eq}	$0,7581 \pm 0,0179$	MRE	5,09
	R	$0,0026 \pm 1,36E-5$	$NRMSE$	4,83
10 °C;750 W(P)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$2,077 \pm 0,224$	R^2	0,9764
	X_{eq}	$0,8105 \pm 0,0156$	MRE	5,95
	R	$0,0026 \pm 6,83E-6$	$NRMSE$	6,07
10 °C;1500 W(30)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$2,712 \pm 0,023$	R^2	0,9799
	X_{eq}	$0,7580 \pm 0,0091$	MRE	5,47
	R	$0,0026 \pm 1,99E-6$	$NRMSE$	5,36
10 °C;1500 W(P)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$2,254 \pm 0,169$	R^2	0,9654
	X_{eq}	$0,7806 \pm 0,0058$	MRE	6,00
	R	$0,0026 \pm 3,46E-6$	$NRMSE$	6,40
15 °C	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$1,953 \pm 0,147$	R^2	0,9760
	X_{eq}	$0,7810 \pm 0,0289$	MRE	5,92
	R	$0,0026 \pm 3,79E-5$	$NRMSE$	6,06
15 °C;750 W(30)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$2,214 \pm 0,03$	R^2	0,9853
	X_{eq}	$0,8091 \pm 0,0171$	MRE	4,82
	R	$0,0026 \pm 1,96E-5$	$NRMSE$	4,93
15 °C;750 W(P)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$1,857 \pm 0,023$	R^2	0,9843
	X_{eq}	$0,9032 \pm 0,0097$	MRE	4,97
	R	$0,0027 \pm 1,03E-5$	$NRMSE$	5,83
15 °C;1500 W(30)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$2,262 \pm 0,127$	R^2	0,9846
	X_{eq}	$0,8254 \pm 0,0064$	MRE	5,04
	R	$0,0026 \pm 1,01E-5$	$NRMSE$	5,52
15 °C;1500 W(P)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$1,870 \pm 0,036$	R^2	0,9763
	X_{eq}	$0,8885 \pm 0,0119$	MRE	6,06
	R	$0,0027 \pm 1,12E-5$	$NRMSE$	6,69
20 °C	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$1,883 \pm 0,143$	R^2	0,9815
	X_{eq}	$0,8473 \pm 0,0436$	MRE	5,52
	R	$0,0026 \pm 3,09E-5$	$NRMSE$	5,91
20 °C;750 W(30)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$1,866 \pm 0,052$	R^2	0,9877
	X_{eq}	$0,8932 \pm 0,0133$	MRE	4,72
	R	$0,0026 \pm 4,53E-6$	$NRMSE$	5,06
20 °C;750 W(P)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$1,894 \pm 0,010$	R^2	0,9845
	X_{eq}	$0,9505 \pm 0,0255$	MRE	5,46
	R	$0,0027 \pm 6,95E-6$	$NRMSE$	6,50
20 °C;1500 W(30)	D_{eff} ($\times 10^{-11}$)	$1,976 \pm 0,014$	R^2	0,9878
	X_{eq}	$0,9288 \pm 0,0138$	MRE	4,92
	R	$0,0027 \pm 6,98E-6$	$NRMSE$	5,69

Continuação da Tabela 5.5

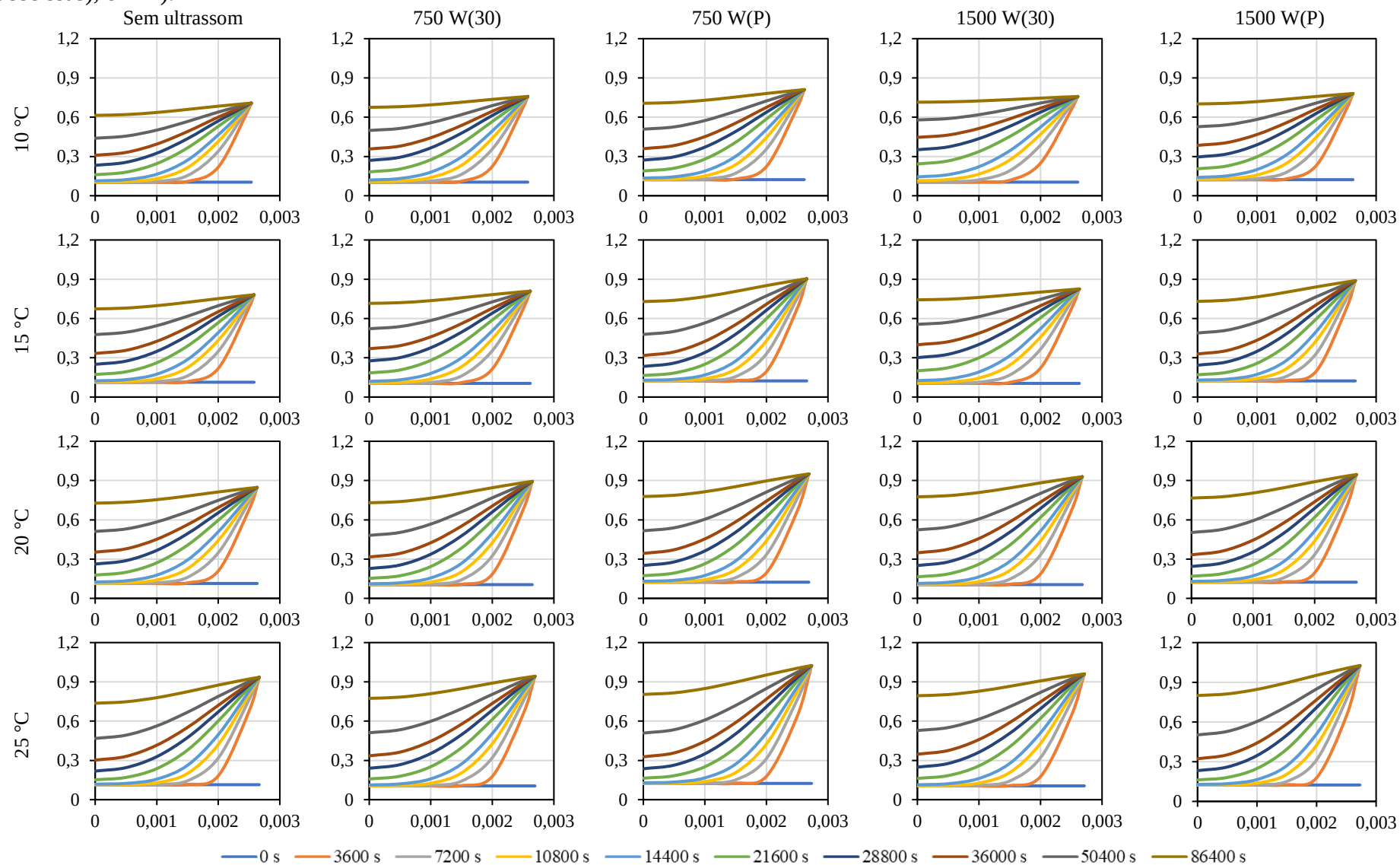
20 °C;1500 W(P)	$D_{eff} (\times 10^{-11})$	$1,864 \pm 0,046$	R^2	0,9846
	X_{eq}	$0,9456 \pm 0,0230$	MRE	5,67
	R	$0,0027 \pm 2,45E-5$	$NRMSE$	6,73
25 °C	$D_{eff} (\times 10^{-11})$	$1,769 \pm 0,266$	R^2	0,9891
	X_{eq}	$0,9349 \pm 0,0217$	MRE	4,42
	R	$0,0027 \pm 3,84E-5$	$NRMSE$	5,30
25 °C;750 W(30)	$D_{eff} (\times 10^{-11})$	$1,951 \pm 0,015$	R^2	0,9909
	X_{eq}	$0,9428 \pm 0,0141$	MRE	4,15
	R	$0,0027 \pm 2,43E-6$	$NRMSE$	4,48
25 °C;750 W(P)	$D_{eff} (\times 10^{-11})$	$1,841 \pm 0,032$	R^2	0,9913
	X_{eq}	$1,0243 \pm 0,0063$	MRE	4,07
	R	$0,0027 \pm 9,91E-8$	$NRMSE$	5,20
25 °C;1500 W(30)	$D_{eff} (\times 10^{-11})$	$2,009 \pm 0,093$	R^2	0,9922
	X_{eq}	$0,9605 \pm 0,0132$	MRE	3,97
	R	$0,0027 \pm 9,76E-6$	$NRMSE$	4,18
25 °C;1500 W(P)	$D_{eff} (\times 10^{-11})$	$1,765 \pm 0,027$	R^2	0,9897
	X_{eq}	$1,0262 \pm 0,0031$	MRE	4,83
	R	$0,0027 \pm 9,93E-6$	$NRMSE$	5,88

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como pode ser observado na Tabela 5.5, o modelo difusivo aplicado à uma esfera apresentou bons parâmetros estatísticos, com $R^2 > 0,9528$, $MRE < 6,61\%$ e $NRMSE < 6,69\%$. Para efeito de comparação, a difusividade efetiva apresentada pelo modelo tem que ser avaliada juntamente com a umidade de equilíbrio utilizada para obtenção da mesma e o raio utilizado, que, no caso, dependia da umidade da cevada, pois a difusividade efetiva depende da quantidade de água que será absorvida até se atingir o equilíbrio e da distância a ser percorrida pela água (r_{max}).

Tagawa et al. (2002) obtiveram valores de difusividade efetiva de $3,5 \times 10^{-12}$, $6,17 \times 10^{-12}$, $1,27 \times 10^{-11}$, $2,09 \times 10^{-11}$ e $3,89 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ e umidade de equilíbrio de 95,59, 101,3, 97,57, 94,38 e 90,53%_{bs} para as temperaturas de 10, 20, 30, 40 e 50 °C, respectivamente, ao estudarem cevada da variedade *Ryohwho*. Mayolle et al. (2012) determinaram a difusividade efetiva de quatro variedades diferentes de cevada (Cebastian, Azurel, Esterel e Cervoise) a 22 °C, que variou de 5,28 a $7,81 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ e, durante a hidratação, as variedades tiveram uma absorção máxima de 45,9 a 48,3%_{bu}, ou 84,8 a 94,5%_{bs}, após 50 horas de hidratação. Montanuci et al. (2014) estudaram a hidratação da cevada variedade BRS ELIS nas temperaturas de 10, 15, 20 e 25 °C e obtiveram valores de difusividade de $5,14 \times 10^{-12}$ a $1,08 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$.

Figura 5.17 – Perfil de umidade da cevada para diversos tempos de maceração (umidade (eixo das ordenadas), em kg/kg_{bs} , versus o raio (eixo das abscissas), em m).



A partir da difusividade efetiva, obtida pelo modelo difusivo, considerando a cevada como uma esfera, os perfis de umidade em função do raio, para $0 < r < R$, foram determinados de acordo com a Equação 5.16, que foi desenvolvida por Cranck (1975), para diferentes tempos de processo e são mostrados na Figura 5.17.

$$\frac{X(t) - X_0}{X_{eq} - X_0} = \frac{2R}{\pi r} \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{-1^{n+1}}{n} \right) \exp \left(-\frac{D_{eff} n^2 \pi^2 t}{R^2} \right) \text{sen} \left(\frac{n\pi r}{R} \right) \quad (5.16)$$

5.3.3. Maceração para germinação

Após a obtenção das cinéticas de maceração e da modelagem matemática das mesmas, o tempo de maceração requerido para que a cevada atingisse a umidade necessária para a germinação (t_{ger}) foi determinado.

Como o modelo exponencial apresentou os melhores parâmetros estatísticos para o ajuste (maiores R^2 e menores MRE e $NRMSE$), t_{ger} foi determinado a partir deste modelo (Equação 5.17).

$$t_{ger} = \beta \left[-\ln \left(1 - \frac{X - X_0}{X_{eq} - X_0} \right) \right]^{\frac{1}{\alpha}} \quad (5.17)$$

Os valores de t_{ger} são mostrados na Tabela a seguir.

Tabela 5.6 – Tempo de maceração necessário para atingir 0,75 kg/kg_{bs} (média ± desvio padrão).

$T (^{\circ}\text{C})$	$P_N (\text{W})$				
	0	750(30)	750(P)	1500(30)	1500(P)
10	45,00 ± 0,36	32,29 ± 2,27	22,51 ± 2,48	31,58 ± 2,52	25,30 ± 1,30
15	27,02 ± 5,38	22,63 ± 2,69	14,70 ± 0,75	20,14 ± 0,73	14,35 ± 0,91
20	18,70 ± 3,43	15,23 ± 0,44	12,15 ± 0,51	13,04 ± 1,26	12,5 ± 1,46
25	13,39 ± 1,71	12,07 ± 0,41	9,43 ± 0,20	11,01 ± 0,49	9,83 ± 0,30

Fonte: Elaborado pelo autor.

O aumento da temperatura de maceração e a aplicação de ultrassom promoveram a redução de t_{ger} ($p < 0,05$). A forma de aplicação do ultrassom também influenciou t_{ger} , que apresentou menores valores para o ultrassom pulsado, quando comparado ao ultrassom aplicado

por 30 minutos. Dentro de cada forma de aplicação, não houve diferença significativa em t_{ger} , com relação às potências de 750 e 1500 W.

Como já citado anteriormente, a maceração até a umidade de germinação foi realizada apenas com a aplicação de ultrassom na forma pulsada, pois esta forma de aplicação de ultrassom permitiu melhor controle da temperatura de maceração.

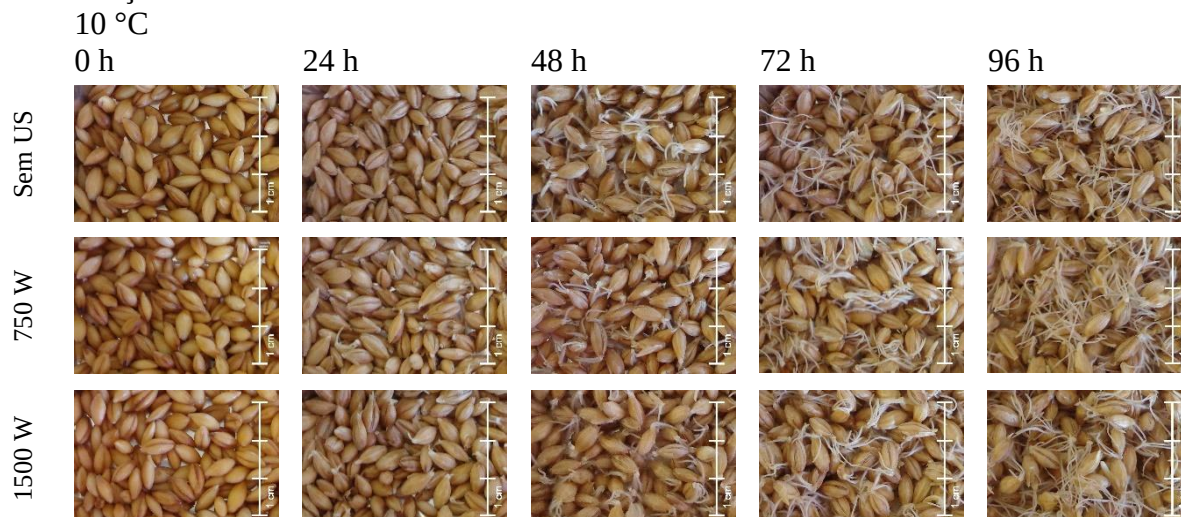
5.4. Germinação da cevada

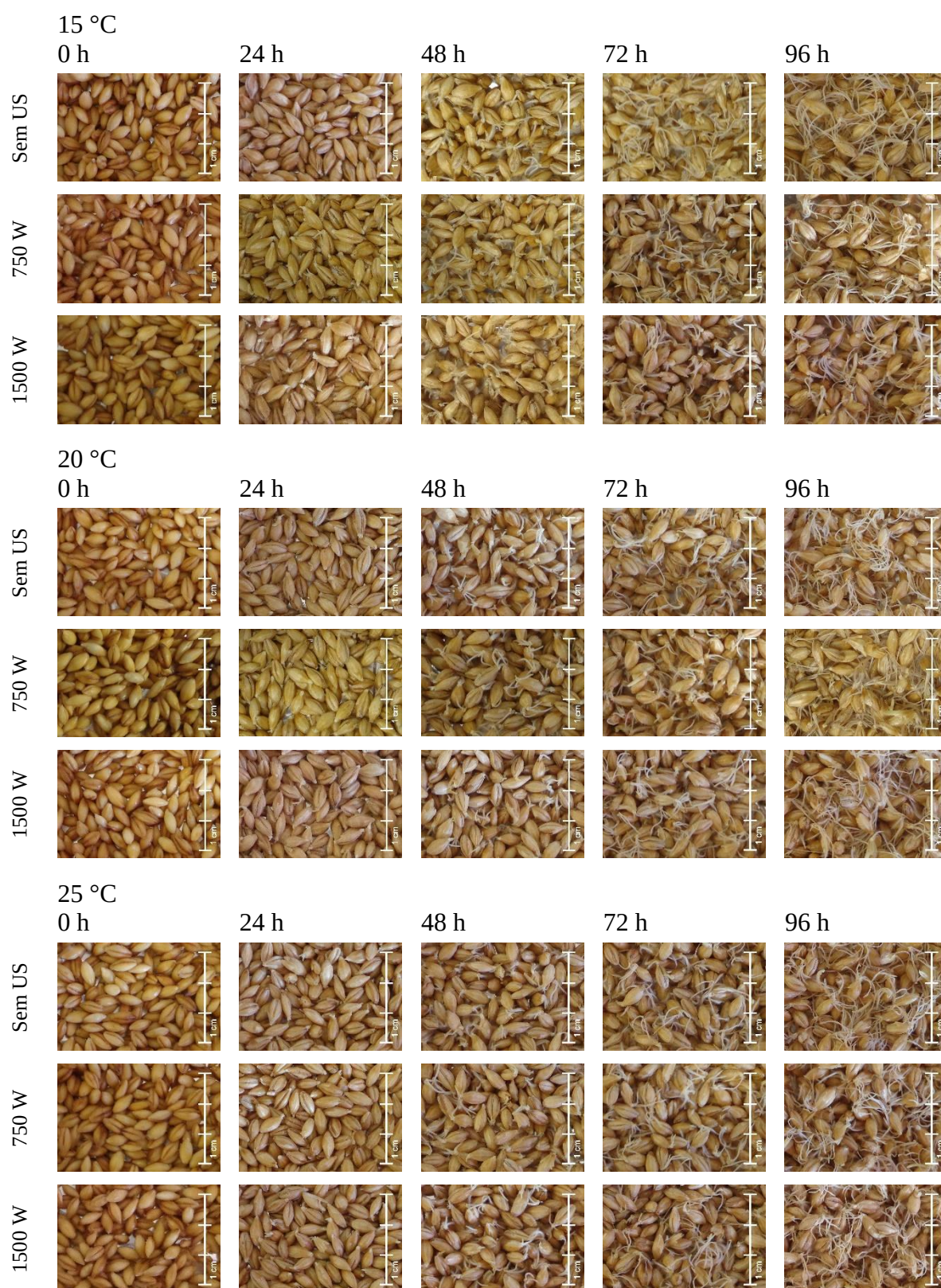
A germinação da cevada foi realizada durante 96 horas para a cevada hidratada a 10, 15, 20 e 25 °C sem aplicação de ultrassom e com a aplicação de ultrassom de potência na forma pulsada, nas potências de 750 e 1500 W.

O acompanhamento da germinação da cevada foi realizado diariamente através do registro de imagem das amostras, como mostrado na Figura 5.18.

Na indústria, a germinação é considerada suficiente quando a radícula atinge o tamanho do grão e começa o surgimento da acrospira, essa condição se dá após 3 a 6 dias de germinação. O processo de germinação prolongado além do tempo necessário provoca a solubilização excessiva do endosperma e da matriz celular do grão. Como pode ser observado na Figura 5.18, após 24 horas de germinação, já houve o surgimento de radículas em alguns grãos de cevada e, após 3 dias, para algumas condições de maceração, já pode ser observada uma radícula bem desenvolvida.

Figura 5.18 – Registro fotográfico da germinação da cevada submetida a diferentes condições de maceração.





Fonte: Elaborado pelo autor.

5.4.1. Poder germinativo

Os valores determinados de tempo médio de germinação (*MGT*) e a porcentagem de germinação (*%GER*) são mostrados na Tabela 5.7.

A temperatura de maceração não afetou significativamente ($p > 0,05$) os parâmetros de germinação da cevada, tanto *MGT* quanto *%GER*. A aplicação de ultrassom na potência nominal de 750 W durante a maceração não apresentou diferença significativa ($p > 0,05$) nos parâmetros de germinação, quando comparado ao processo sem aplicação de ultrassom. Já a aplicação de ultrassom na potência de 1500 W, quando comparada à maceração sem aplicação de ultrassom, atrapalhou a germinação, pois resultou no aumento ($p < 0,05$) do tempo médio de germinação. A aplicação de ultrassom não afetou ($p > 0,05$) a porcentagem de germinação, *%GER*.

Tabela 5.7 – Tempo médio de germinação (*MGT*) e porcentagem de germinação (*%GER*) do malte (média $\pm$ desvio padrão).

<i>T</i> (°C)	<i>P_N</i> (W)	<i>MGT</i> (dia)	<i>%GER</i> (%)
10	0	1,12 $\pm$ 0,12	97,5 $\pm$ 6,12
	750	1,28 $\pm$ 0,09	97,5 $\pm$ 4,18
	1500	1,17 $\pm$ 0,10	100,0 $\pm$ 0,0
15	0	1,19 $\pm$ 0,15	95,8 $\pm$ 3,76
	750	1,19 $\pm$ 0,12	95,0 $\pm$ 5,48
	1500	1,37 $\pm$ 0,17	93,3 $\pm$ 2,58
20	0	1,21 $\pm$ 0,16	97,5 $\pm$ 2,74
	750	1,27 $\pm$ 0,13	92,5 $\pm$ 6,89
	1500	1,33 $\pm$ 0,09	95,8 $\pm$ 3,76
25	10	1,24 $\pm$ 0,08	98,3 $\pm$ 2,58
	750	1,27 $\pm$ 0,08	95,0 $\pm$ 3,16
	1500	1,43 $\pm$ 0,26	95,0 $\pm$ 3,16

Fonte: Elaborado pelo autor.

Além dos parâmetros, a germinação das amostras com diferentes condições de maceração foi acompanhada através do registro fotográfico diário, que é mostrado no APÊNDICE II A avaliação da germinação poderia ter sido realizada através das imagens, analisando o crescimento da radícula, mensurando esse crescimento no decorrer da germinação, para então correlacioná-lo com a temperatura de maceração ou com a aplicação de ultrassom de potência, mas, no presente trabalho, somente a germinação de um grão foi acompanhada

através do registro fotográfico, de modo que não seria uma análise representativa para toda a amostra. Portanto, as imagens presentes no APÊNDICE II são meramente para ilustrar o crescimento da radícula e da acrospira durante o processo de germinação.

Miano et al. (2015) avaliaram parâmetros de germinação de cevada após a imersão das amostras embaladas a vácuo em um banho ultrassônico e concluíram que o ultrassom não prejudicou a germinação da cevada.

Yaldagard et al. (2008a) reportaram um aumento na porcentagem de germinação e redução do tempo médio de germinação ao aplicarem ultrassom de potência na cevada já hidratada, por no máximo 15 minutos.

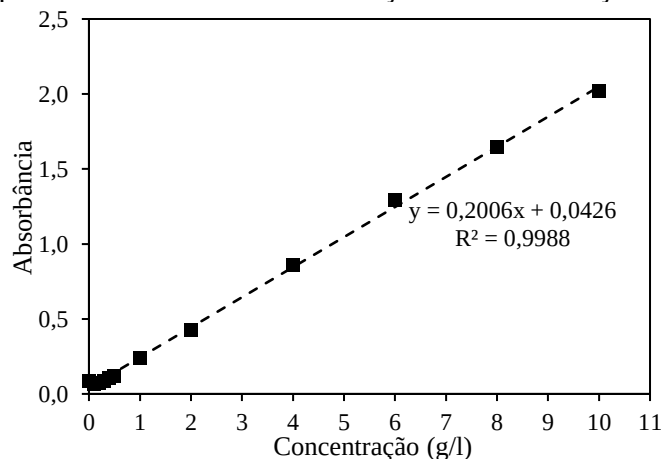
A diferença dos estudos acima citados com relação aos resultados do presente trabalho pode estar relacionada a forma de aplicação do ultrassom, que no caso do trabalho de Miano et al. (2015) foi feita com um banho ultrassônico, que promove uma ação menos intensa do ultrassom quando comparado ao sistema de sonda e, no caso do estudo de Yaldagard et al. (2008a), mesmo também sendo utilizado um sistema de sonda, o tempo de aplicação foi de, no máximo, 15 minutos, muito menor que o tempo de aplicação de ultrassom utilizado no presente trabalho.

5.4.2. Quantificação dos açúcares redutores e da atividade enzimática

5.4.2.1. Curva padrão de maltose

A curva padrão de maltose obtida é mostrada na Figura 5.19.

Figura 5.19 – Curva padrão de absorvância em função da concentração de maltose na solução.



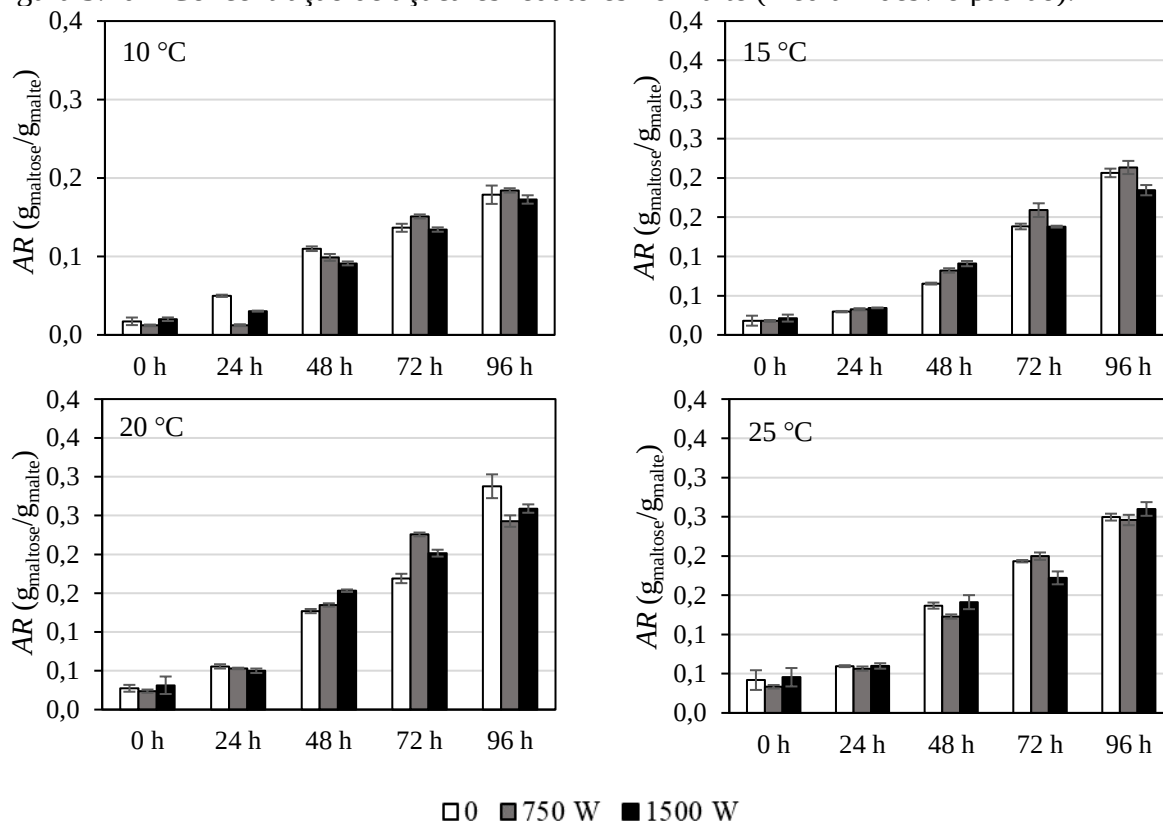
Fonte: Elaborado pelo autor.

A absorvância das soluções de diferentes concentrações de maltose pôde ser representada por uma equação linear, com R^2 de 0,9988.

5.4.2.2. Quantificação de açúcares redutores

As amostras de malte obtidas a partir das condições de maceração e tempo de germinação foram submetidas a análise de açúcares redutores. A quantificação foi realizada pela reação com o Ácido 3,5 – Dinitrosalicílico (BERNFELD, 1955). A quantidade de açúcares redutores presente nas amostras é mostrada na Figura 5.20 como gramas de equivalente em maltose por grama de malte.

Figura 5.20 – Concentração de açúcares redutores no malte (média $\pm$ desvio padrão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

A aumento da temperatura de maceração resultou em maiores concentrações ($p < 0,05$) de açúcares redutores no malte. O aumento no tempo de germinação, como esperado, resultou em maiores concentrações de açúcares redutores. A aplicação de ultrassom de potência, no

geral, resultou em um pequeno aumento na concentração de açúcares redutores, principalmente após 72 e 96 horas de germinação.

5.4.2.3. *Atividade de alfa e beta amilase*

A determinação da atividade de alfa- e beta- amilase foi realizada quantificando o equivalente em maltose liberado após a reação do substrato (solução de amido solúvel) com o extrato enzimático.

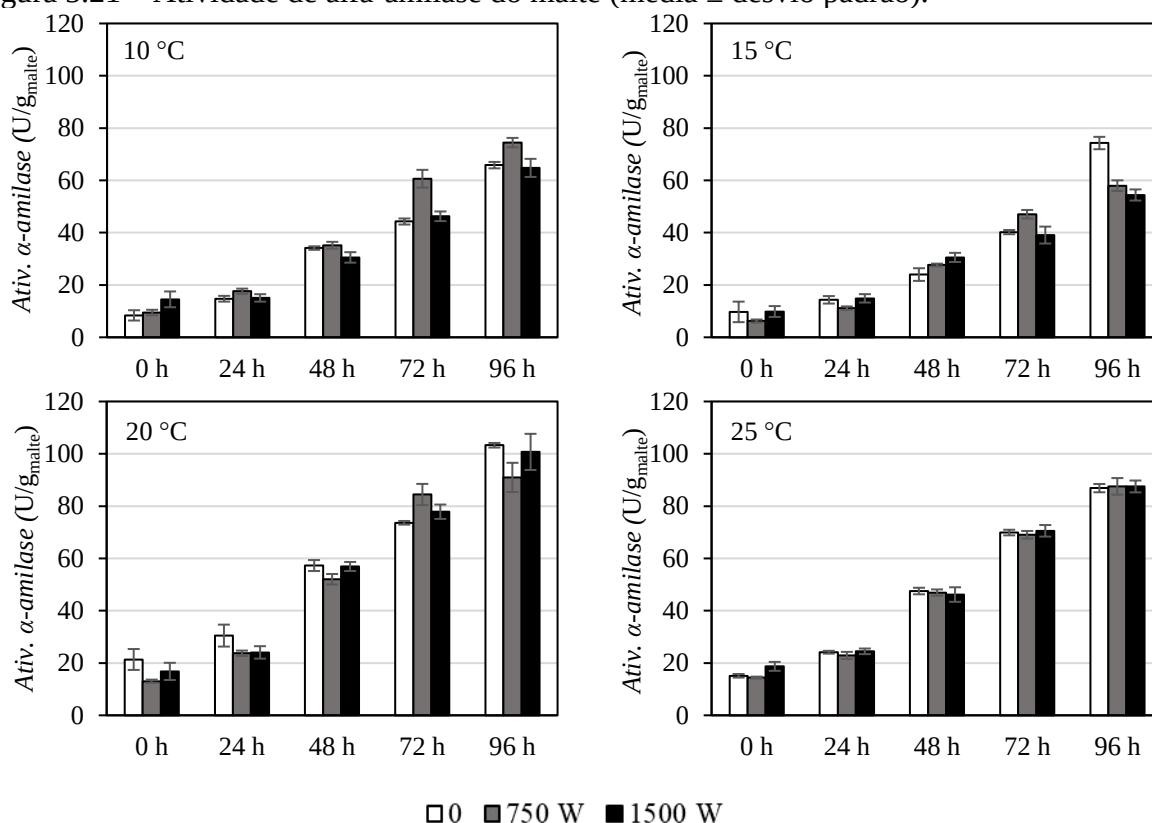
A atividade de alfa-amilase do malte, para as diferentes condições de maceração e diferentes tempos de germinação, é mostrada na Figura 5.21.

Como pode ser observado na Figura 5.21, a atividade de alfa-amilase foi crescente no decorrer do tempo de germinação, como esperado. Quando comparada à maceração sem a aplicação de ultrassom, a utilização de ultrassom de potência provocou redução ($p < 0,05$) na atividade enzimática para a maceração realizada a 15 °C seguida de 96 horas de germinação, tanto para a potência nominal de 750 quanto para a de 1500 W. Para a maceração realizada a 10 °C com aplicação de ultrassom com 750 W a atividade de alfa amilase também foi menor ($p < 0,05$), quando comparada ao processo sem aplicação de ultrassom e com aplicação de ultrassom com 1500 W.

A atividade de beta-amilase do malte, para as diferentes condições de maceração e diferentes tempos de germinação, é mostrada na Figura 5.22.

Assim como ocorreu com a atividade de alfa-amilase, em algumas temperaturas de maceração e para alguns tempos de germinação, a atividade de beta-amilase foi menor. Esse efeito da utilização do ultrassom de potência foi mais acentuado para a maceração realizada a 15 °C para o malte com 96 horas de germinação, onde a atividade de beta-amilase para o malte produzido a partir da maceração sem aplicação de ultrassom foi aproximadamente 28% maior que a atividade do malte produzido a partir da maceração com ultrassom de potência a 750 W e aproximadamente 40% maior quando comparado ao malte produzido com aplicação de ultrassom com 1500W de potência.

Figura 5.21 – Atividade de alfa-amilase do malte (média $\pm$ desvio padrão).



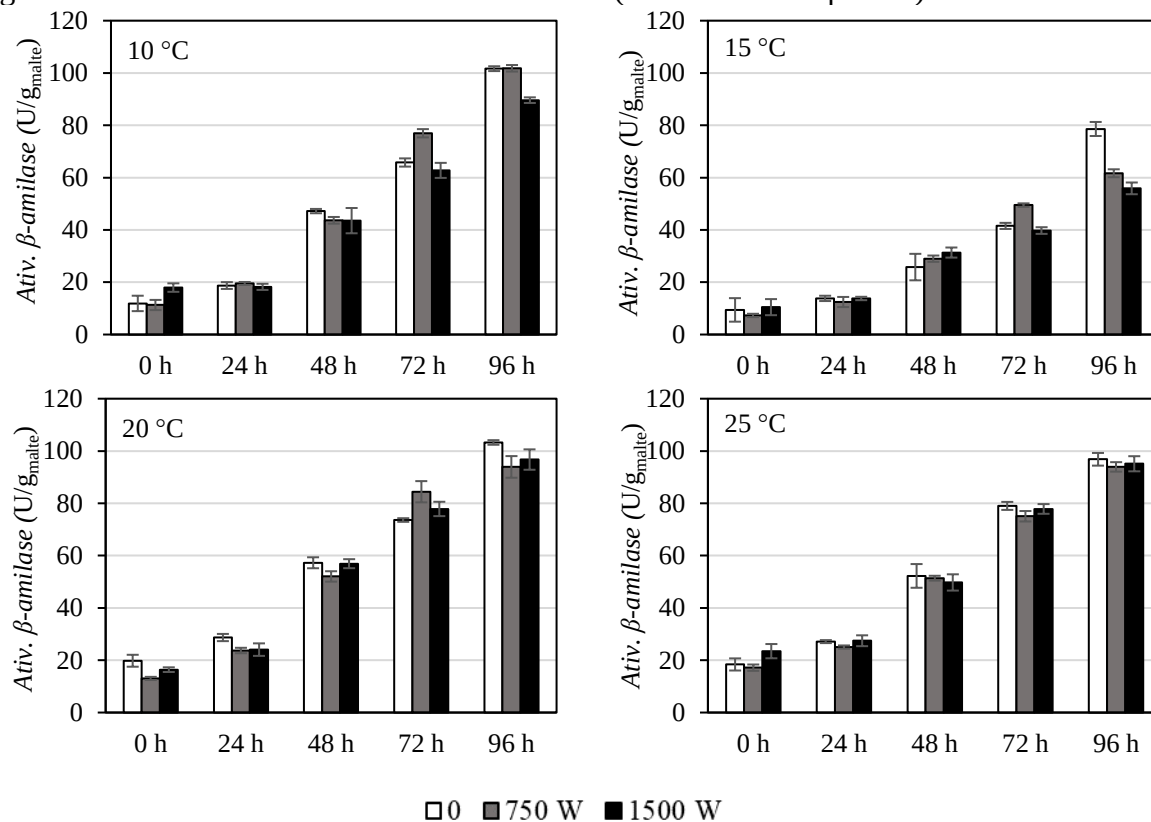
Fonte: Elaborado pelo autor.

Portanto, no geral, a aplicação de ultrassom de potência não resultou em prejuízo nas atividades de alfa e beta-amilase. Apenas para a maceração realizada a 15 °C e germinação por 96 horas, a amostra sem aplicação de ultrassom apresentou maior atividade de alfa e beta-amilase, quando comparada as amostras submetidas à maceração com aplicação de ultrassom.

Yaldagard et al. (2008b) estudaram o efeito da aplicação de ultrassom de potência em amostras de malte (10 g de farinha de malte em 80 ml de água destilada) e reportaram a redução da atividade de alfa-amilase causada pela ação do ultrassom. Eles alegaram que mecanismos ação do ultrassom de potência, como a cavitação, os microjatos resultantes da explosão das bolhas de cavitação e a tensão de cisalhamento causada por estes micro jatos, podem afetar a estrutura das enzimas, danificando os seus sítios de ação.

O efeito do ultrassom de potência na atividade enzimática quanto este foi aplicado durante a maceração da cevada pode ter sido menos prejudicial que o reportado por Yaldagard et al. (2008b), pois as enzimas estavam na matriz sólida do grão e não solubilizadas como apresentado no referido estudo.

Figura 5.22 – Atividade de beta-amilase do malte (média $\pm$ desvio padrão).



Fonte: Elaborado pelo autor.

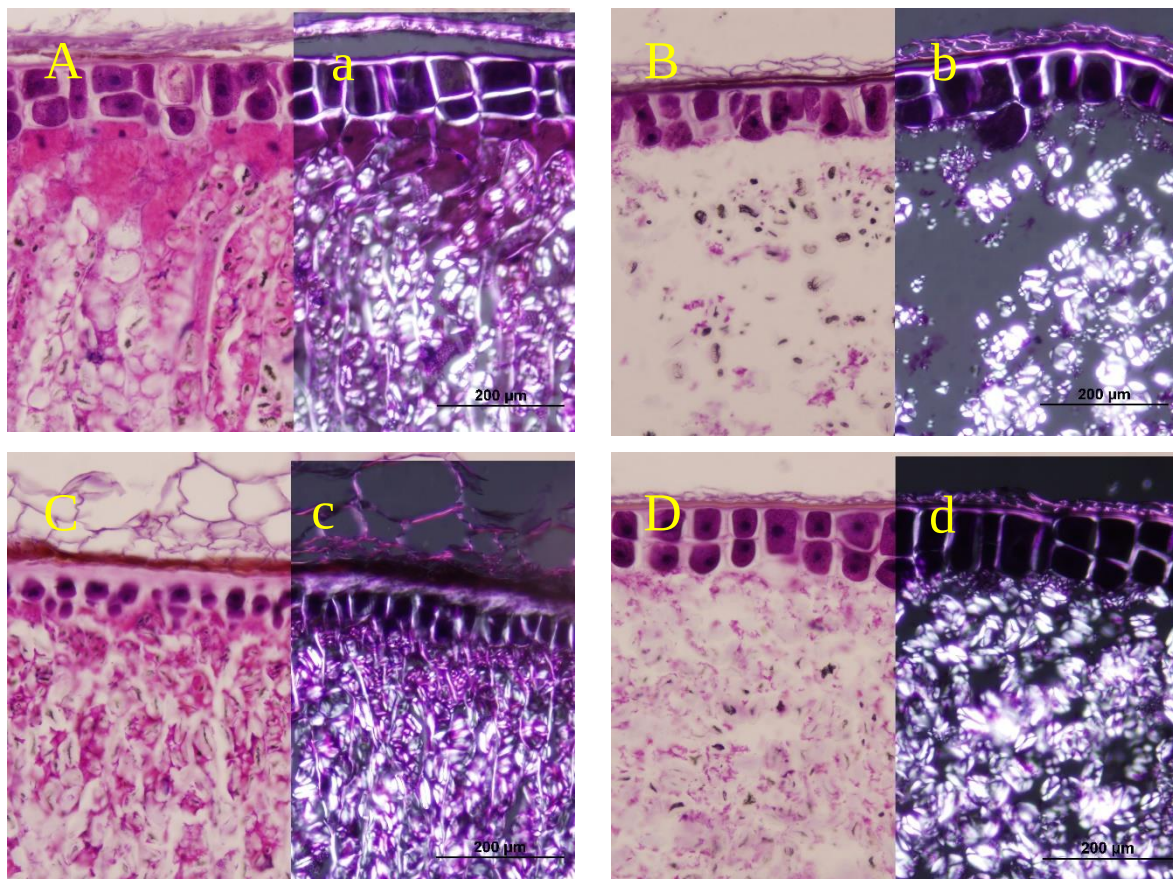
5.4.3. Microestrutura

A microestrutura do malte foi avaliada em amostras de maceração a 20 °C sem e com aplicação de ultrassom de potência a 750 W para os tempos de germinação de 0 hora e 96 horas.

A Figura 5.23 mostra a estrutura do grão marcada com HE (hematoxilina-Eosina), que é usada para visualização da morfologia básica (BUENO et al., 2018), tanto com luz normal quanto com luz polarizada. A partir da Figura 5.23, é possível visualizar (de cima para baixo) o pericarpo (camada mais fina na parte superior), a camada de aleurona (com a presença de células maiores) e o endosperma do grão, apresentando os grânulos de amido, que são evidenciados na imagem polarizada.

Na imagem C da Figura 5.23, que apresenta a amostra proveniente da maceração a 20 °C com aplicação de ultrassom com 750 W e com tempo de germinação de 0 hora, ou seja, logo após a maceração, pode-se perceber uma expansão do pericarpo, que pode ser resultado da aplicação do ultrassom e de sua ação mecânica no grão.

Figura 5.23 – Seção histológica do interior da amostra com a coloração HE (hematoxilina-Eosina) sob luz normal (letras maiúsculas) e luz polarizada (letras minúsculas) com aumento de 20x. Maceração a 20 °C com 0 hora de germinação (A e a) e com 96 horas de germinação (B e b); maceração a 20 °C com ultrassom com 750 W de potência com 0 hora de germinação (C e c) e com 96 horas de germinação (D e d).

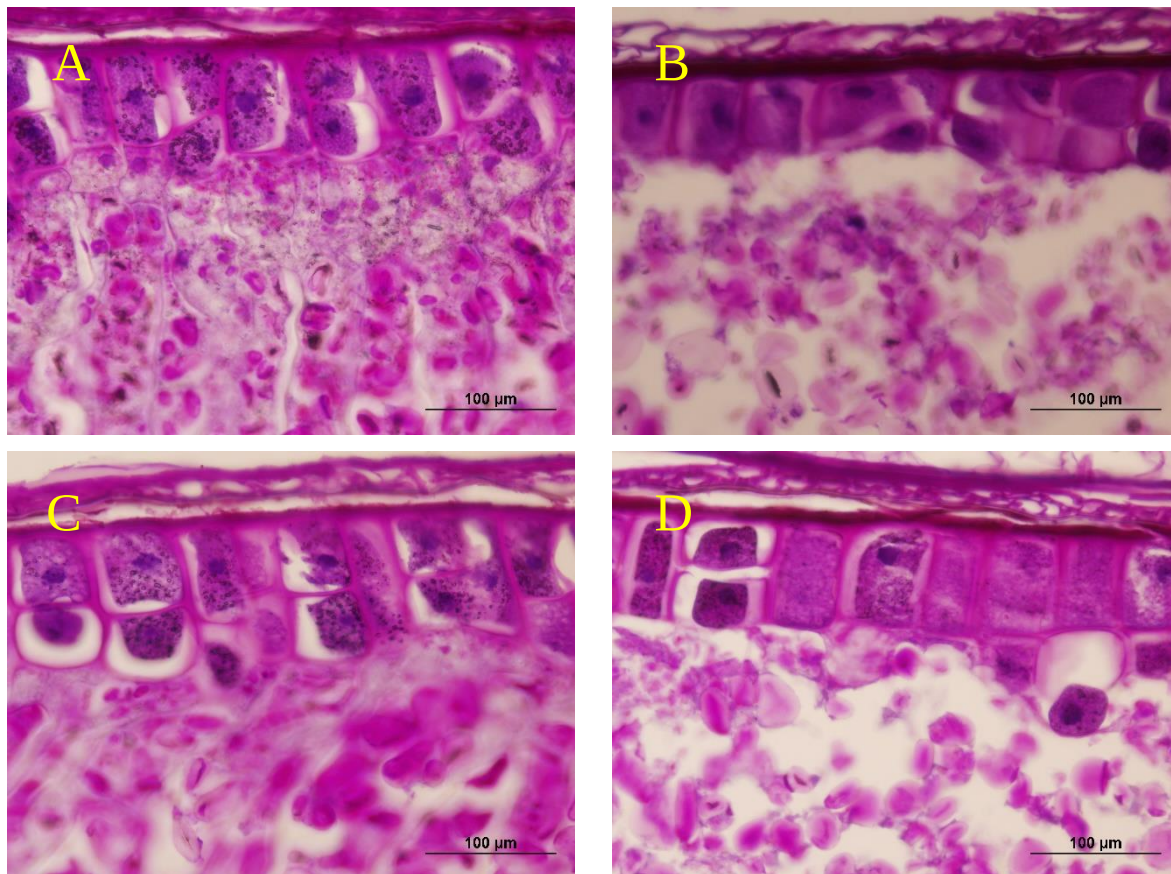


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.24 mostra a coloração das amostras com PAS, que é utilizado para visualização de carboidratos, no caso o amido. É possível verificar a redução na quantidade de grânulos de amido presentes no endosperma após 96 horas de germinação (B e D) e, ainda é possível verificar, uma menor quantidade de grânulos de amido na amostra onde houve a aplicação de ultrassom de potência (D), quando comparada à amostra sem a utilização de ultrassom (B).

É possível também constatar o efeito da aplicação de ultrassom nas células da camada de aleurona, através do descolamento da parede celular das mesmas.

Figura 5.24 – Seção histológica do interior da amostra com a coloração PAS (*Periodic Acid-Shiff*) com aumento de 40x. Maceração a 20 °C com 0 hora de germinação (A) e com 96 horas de germinação (B); maceração a 20 °C com ultrassom com 750 W de potência com 0 hora de germinação (C) e com 96 horas de germinação (D).

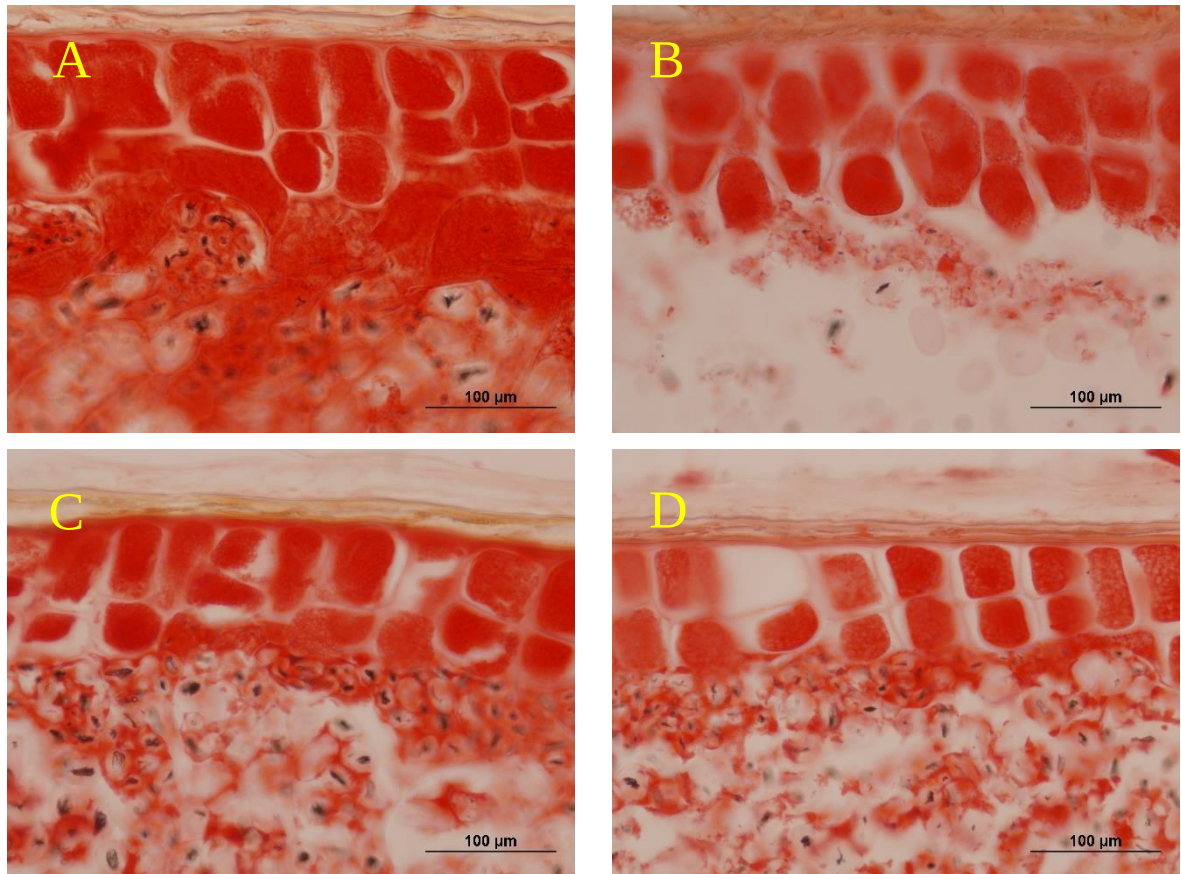


Fonte: Elaborado pelo autor.

A Figura 5.25 mostra a coloração das amostras com *Xylidine Ponceau*, que é utilizado para a detectar substâncias proteicas. As amostras com 96 horas de germinação, sem e com a aplicação de ultrassom (B e D, respectivamente), apresentaram menor quantidade de corpos proteicos em sua estrutura. Ainda observando as amostras com 96 horas de germinação, é possível verificar a alteração ocorrida na camada de aleurona, que é a principal fornecedora de proteínas para a formação das enzimas do malte, como a alfa- e beta-amilase.

A aplicação do ultrassom pode ter causado a maior mistura de substâncias proteicas no endosperma do grão, como mostrado na imagem D, da Figura 5.25. A partir da Figura 5.25 é possível confirmar a ação do ultrassom de potência nas células da camada de aleurona, como já foi mostrado anteriormente na Figura 5.24.

Figura 5.25 – Seção histológica do interior da amostra com a coloração XP (*Xilidine Ponceau*) com aumento de 40x. Maceração a 20 °C com 0 hora de germinação (A) e com 96 horas de germinação (B); maceração a 20 °C com ultrassom com 750 W de potência com 0 hora de germinação (C) e com 96 horas de germinação (D).



Fonte: Elaborado pelo autor.

6. CONCLUSÕES

Com relação às propriedades físicas do grão de do leito de grãos de cevada, todas variaram significativamente ($p < 0,05$) com o aumento na umidade. O aumento provocou a expansão dos grãos, mas foi possível observar que, ao alcançar teores de umidade acima de 0,6 kg/kg_{bs}, o aumento do grão foi menor ou nulo, demonstrando uma capacidade máxima de expansão.

A potência ultrassônica transmitida (média volumétrica, P_{US}) para o meio variou de $77,11 \pm 0,68$ a $182,60 \pm 3,67$ W, para potências nominais (P_N) aplicadas de 300 a 1500 W e o rendimento de conversão (P_{US}/P_N) diminuiu com o aumento da potência nominal utilizada.

A temperatura e a aplicação de ultrassom, tanto com relação à potência aplicada quanto com relação à forma de aplicação, influenciaram ($p < 0,05$) na maceração da cevada. O aumento da temperatura e a aplicação de ultrassom, assim como a elevação da potência aplicada provocaram uma aceleração no processo de maceração, reduzindo o tempo necessário para que a cevada atinja a umidade necessária para a germinação. O ultrassom aplicado durante 30 minutos após cada pesagem promoveu maiores taxas iniciais de hidratação, mas também provocou aumentos excessivos na temperatura da água usada na maceração, enquanto que a aplicação na forma pulsada permitiu um melhor controle da temperatura da água de maceração e resultou no aumento da capacidade de absorção de água, aumentando a umidade de equilíbrio (X_{eq}).

Com relação à germinação da cevada, a aplicação de ultrassom na forma pulsada com potência nominal de 1500 W provocou um aumento no tempo médio de germinação, mas a porcentagem de germinação não foi afetada nem pela variação da temperatura da maceração e nem pela aplicação de ultrassom.

A aplicação de ultrassom não apresentou uma tendência de prejudicar a atividade de alfa- e beta-amilase do malte. Para algumas condições de maceração e tempo de germinação, a aplicação de ultrassom durante a maceração resultou na redução da atividade enzimática, quando comparado ao processo sem aplicação de ultrassom, mas para outras condições resultou no aumento da atividade enzimática. A aplicação de ultrassom aumentou a concentração de açúcares redutores presentes no malte.

A microestrutura do malte foi afetada pela aplicação do ultrassom, havendo maior degradação do amido presente no endosperma, maior alteração nas células da camada de aleurona e, principalmente, uma desagregação das camadas do pericarpo.

Portanto a tecnologia de ultrassom aplicada na maceração da cevada se mostrou viável, pois acelerou esta etapa da produção do malte sem danificar a atividade de alfa- e beta-amilase do produto.

7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Os resultados apresentados neste trabalho podem ser complementados e aprimorados realizando estudos com outras formas de determinação da potência ultrassônica transmitida, como a utilização de hidrofones ou sensores piezoelétricos, para efeito de comparação com o método calorimétrico utilizado no presente trabalho.

O efeito do ultrassom de potência pode ainda ser investigado com a utilização de potências diferentes das utilizadas neste trabalho (com mais níveis de potência nominal), além da aplicação de ultrassom em outras etapas do processo de produção do malte, como na germinação e na secagem.

Finalmente, para melhor avaliação do efeito da aplicação do ultrassom de potência, pode ser realizada a caracterização do malte produzido, através de mais análises, permitindo assim analisar diversos parâmetros deste produto.

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AOAC INTERNATIONAL. **Official methods of analysis of AOAC International**. AOAC International, 2010.
- BAIK, B.; ULLRICH, S. E. Barley for food: characteristics, improvement, and renewed interest. **Journal of Cereal Science**, v. 48, n. 2, p. 233-242, 2008.
- BARBOSA-CÁNOVAS, G. V.; RODRÍGUEZ, J. J. Update on non thermal food processing technologies: pulsed electric field, high hydrostatic pressure, irradiation and ultrasound. **Food Australia**, v. 54, p. 513-518, 2002.
- BEHMER, O. A.; TOLOSA, E. M. C.; FREITAS-NETO, A. G. **Manual de técnicas para Histologia Normal e Patológica**. São Paulo: Edart. 1976.
- BERNFELD, P. **Methods of Enzymology**. Vol. I., ed. SP COLOWICK. 1955.
- BRASIL. **Regras para Análise de Sementes**. [Rules for Seed Testing], Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, SNDA/DNDV/CLAV. 2009.
- BRIGGS, D. E. Malt modification—a century of evolving views. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 108, n. 4, p. 395-405, 2002.
- BROOKES, P. A.; LOVETT, D. A.; MACWILLIAM, I. C. The steeping of barley. A review of the metabolic consequences of water uptake, and their practical implications. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 82, n. 1, p. 14-26, 1976.
- BUENO, L. M.; CAUN, D. L.; COMELIS, M. T.; BEGUELINI, M. R.; TABOGA, S. R.; MORIELLE-VERSUTE, E. Ovarian morphology and folliculogenesis and ovulation process in the flat-faced fruit-eating bat *Artibeus planirostris* and the Argentine brown bat *Eptesicus furinalis*: A comparative analysis. **Acta Zoologica**. 2018.
- CAPOTE, F. P.; DE CASTRO, D. L. **Analytical applications of ultrasound**. Salt Lake City: Elsevier Science, 2007.
- CÁRCEL, J. A. **Influencia de los ultrasonidos de potencia en procesos de transferencia de materia**. 344 p Universidad Politécnica de Valencia, Valencia, España. 2003.
- CÁRCEL, J. A., GARCÍA-PÉREZ, J. V., BENEDITO, J., MULET, A. Food process innovation through new technologies: use of ultrasound. **Journal of Food Engineering**, v. 110, n. 2, p. 200-207, 2012.

- CÁRCEL, J. A.; BENEDITO, J.; BON, J.; MULET, A. High intensity ultrasound effects on meat brining. **Meat Science**, v. 76, n. 4, p. 611-619, 2007b.
- CÁRCEL, J. A.; BENEDITO, J.; ROSSELLÓ, C.; MULET, A. Influence of ultrasound intensity on mass transfer in apple immersed in a sucrose solution. **Journal of food engineering**, v. 78, n. 2, p. 472-479, 2007a.
- CARLIN, B. **Ultrasonica**. Bilbao: Ediciones Urmo, 1972.
- CARVALHO, G. R.; CHENLO, F.; MOREIRA, R.; TELIS-ROMERO, J. Physicothermal properties of aqueous sodium chloride solutions. **Journal of Food Process Engineering**, v. 38, n. 3, p. 234-242, 2015.
- COŞKUNER, Y.; KARABABA, E. Some physical properties of flaxseed (*Linum usitatissimum* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 78, n. 3, p. 1067-1073, 2007.
- CRANK, J. **The mathematics of diffusion**. Oxford university press, 1979.
- CUNHA, L.M.; OLIVEIRA, F.A.R.; ABOIM, A.P.; FRÍAS, J.M.; PINHEIRO-TORRES, A. Stochastic approach to the modelling of water losses during osmotic dehydration and improved parameter estimation. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 36, p. 253-262. 2001.
- CUNNINGHAM, S. E.; MCMINN, W. A. M. MAGEE, T. R. A.; RICHARDSON, P. S. Modelling water absorption of pasta during soaking. **Journal of food Engineering**, v. 82, n. 4, p. 600-607, 2007.
- DE BRITO, E. S.; GARCÍA, N. H. P.; GALLÃO, M. I.; CORTELAZZO, A. L.; FEVEREIRO, P. S.; BRAGA, M. R. Structural and chemical changes in cocoa (*Theobroma cacao* L) during fermentation, drying and roasting. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 81, n. 2, p. 281-288, 2001.
- DE MORI, C.; MINELLA, E. **Aspectos econômicos e conjunturais da cultura da cevada**. Passo Fundo: Embrapa Trigo, 28 p. html. (Embrapa Trigo. Documentos Online, 139). Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do139.htm>. 2012. Acesso em: 03 jan. 2018.
- EBC, **Analytica-EBC**. European brewery convention. Nurberg, Germany. 2004.
- ELLIS, R.A.; ROBERTS, E.H., The quantification of aging and survival in orthodox seeds. **Seed Science and Technology**, v. 9, p. 373-409. 1981.

- EUROPEAN BREWING CONVENTION. **Malting Technology - Manual of good practice**; Germany: European Brewing Convention. 2000.
- FAHY, F. **Foundations of Engineering Acoustics**. 1 ed. San Diego: Elsevier, 465 p. 2000.
- FAOSTAT. **Statistical database. Food. agriculture organization of the United Nations**, 2018.
- FENG, H.; BARBOSA-CÁNOVAS, G.; WEISS, J. **Ultrasound Technologies for Food and Bioprocessing**. Oxford: Springer, 2010.
- FINDLAY, W. **Modern Brewing Technology**; London: The Macmillan Press. 1971.
- GALLEGO-JUÁREZ, J. A. Macrosonics: phenomena, transducers and applications. **Revista de Acústica**, Madrid, v. 33, n. 3-4, p. 36-42, 2002.
- GHAFOOR, M.; MISRA, N. N.; MAHADEVAN, K.; TIWARI, B. K. Ultrasound assisted hydration of navy beans (*Phaseolus vulgaris*). **Ultrasonics sonochemistry**, v. 21, n. 1, p. 409-414, 2014.
- GIBSON, T. S., SOLAH, V., HOLMES, M. G., TAYLOR, H. R. Diastatic power in malted barley: contributions of malt parameters to its development and the potential of barley grain beta-amylase to predict malt diastatic power. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 101, n. 4, p. 277-280, 1995.
- GOLDAMMER, T. ed. **The brewers' handbook**. KVP Publishers, 1999.
- GRUBER, M. A. The flavor contributions of kilned and roasted products to finished beer styles. **Technical Quarterly-Master Brewers Association of the Americas**, v. 38, n. 4, p. 227-233, 2001.
- HEIKKOLA, E.; LAITINEN, M. Model-based optimization of ultrasonic transducers. **Ultrasonics Sonochemistry**, Coventry, v. 12, p. 53-57, 2005.
- HOSENEY, R. C. **Principles of Cereal Science and Industry**; USA: American Association of Cereal Chemistry, Inc.. 1986.
- HOUGH, J. S.; BRIGGS, D. E.; STEVENS, R. **Malting and brewing science**. Chapman and Hall; distributed by Wiley, 1971.
- KUTTRUF, H. **Ultrasonics: fundamentals and applications**. 1 ed. London: Elsevier,. 1-453 p. 1991.

- LEWIS, M. J.; YOUNG, T. W. **Brewing**. Springer Science & Business Media, 1 ed. 1995.
- LINGYU-YU; GIURGIUTIU, V. Multi-mode Damage Detection Methods with Piezoelectric Wafer Active Sensors. **Journal of Intelligent Material Systems and Structures**, Michigan, v. 20, n. 11, p. 1329-1341, 2009.
- MALTEUROP. **Os nossos domínios – Maltagem**. Mateurop Inc. html. Disponível em: <<https://pt.malteurop.com/os-nossos-dominios/maltes/maltagem>>. 2018. Acesso em: 03 fev. 2018.
- MARGULIS, M. A.; MARGULIS, I. M. Calorimetric method for measurement of acoustic power absorbed in a volume of a liquid. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 10, n. 6, p. 343-345, 2003.
- MASON, T. J. **Power ultrasound in food processing – the way forward**. In POVEY, M. J.; MASON, T. J. (Eds.). *Ultrasound in Food Processing*, p. 105-126, London, Blackie Academic and Professional, 1998.
- MASON, T. J. Large scale sonochemical processing: aspiration and actuality. **Ultrasonics Sonochemistry**, Coventry, v. 7, n. 4, p. 145-149, 2000.
- MASON, T. J.; LORIMER, J. P. **Applied sonochemistry: the uses of power ultrasound in chemistry and processing**. Wiley-VCH Verlag, Weinheim, 303 pp., 2002.
- MASON, T. J. **Application of ultrasound**. In SUN, D. W. (Ed.) *Emerging Technologies for Food Processing*, p. 323-350, California, Elsevier Academic Press, 2005.
- MAYOLLE, J. E.; LULLIEN-PELLERIN, V.; CORBINEAU, F.; BOIVIN, P.; GUILLARD, V. Water diffusion and enzyme activities during malting of barley grains: a relationship assessment. **Journal of Food Engineering**, v. 109, n. 3, p. 358-365, 2012.
- MIANO, A. C.; FORTI, V. A.; ABUD, H. F.; GOMES-JUNIOR, F. G., CICERO, S. M., AUGUSTO, P. E. D. Effect of ultrasound technology on barley seed germination and vigour. **Seed Science and Technology**, v. 43, n. 2, p. 297-302, 2015.
- MIANO, A. C.; SABADOTI, V. D.; AUGUSTO, P. E. D. Enhancing the hydration process of common beans by ultrasound and high temperatures: Impact on cooking and thermodynamic properties. **Journal of Food Engineering**, v. 225, p. 53-61, 2018.
- MINELLA, E. Cevada – demanda em alta, produção em baixa. **A Granja**. Edição 738, 2010.
- MOHSENIN, N.N. **Physical Properties of Plant and Animal Materials**. Gordon. 1970.

- MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Kinetic, thermodynamic properties, and optimization of barley hydration. **Food Science and Technology** (Campinas), v. 33, n. 4, p. 690-698, 2013.
- MONTANUCI, F. D. PERUSSELLO, C. A. JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Experimental analysis and finite element simulation of the hydration process of barley grains. **Journal of Food Engineering**, v. 131, p. 44-49, 2014.
- MONTANUCI, F. D.; JORGE, L. M. M.; JORGE, R. M. M. Effect of time and temperature on the hydration process of barley grains. **Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 3, p. 363-372, 2015.
- MULET, A.; BENEDITO, J.; BON, J.; SANJUÁN, N. Low intensity ultrasonics in food technology. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 5, n. 4, p. 285-297, 1999.
- MULET, A.; CÁRCEL, J. A.; SANJUÁN, N.; BON, J. New food drying technologies. Use of ultrasound. **Food Science and Technology International**, v. 9(3), p. 215-221, 2003.
- PARKER, D. K.; PROUDLOVE, M. O. Studies on the mechanisms of rootlet inhibition in developing barley embryos. **Journal of Cereal Science**, v. 21, n. 1, p. 71-78, 1995.
- PATERO, T.; AUGUSTO, P. E. D. Ultrasound (US) enhances the hydration of sorghum (*Sorghum bicolor*) grains. **Ultrasonics sonochemistry**, v. 23, p. 11-15, 2015.
- PATIST, A.; BATES, D. Ultrasonic innovations in the food industry: from the laboratory to commercial production. **Innovative Food Science and Emerging Technologies**, v. 5, p. 353-360, 2008.
- PELEG, M. An empirical model for the description of moisture sorption curves. **Journal of Food science**, v. 53, n. 4, p. 1216-1217, 1988.
- PINJARI, D. V.; PANDIT, A. B. Cavitation milling of natural cellulose to nanofibrils. **Ultrasonics Sonochemistry**, Coventry, v. 17, p. 845-852, 2010.
- POLLOCK, J. R. A. **Brewing Science**, Vol. 1, 2. 1979.
- POVEY, J. W.; MASON, T. J. **Ultrasound in Food Processing**. Oxford: Springer, 1998.
- PRIOR, G.; **Malting Technology**; The Brewer. Volume 82, pp. 117-124. 1996.
- RASO, J.; MAÑAS, P.; PAGÁN, R.; SALA, F. J. Influence of different factors on the output power transferred into medium by ultrasound. **Ultrasonics Sonochemistry**, v. 5, n. 4, p. 157-162, 1999.

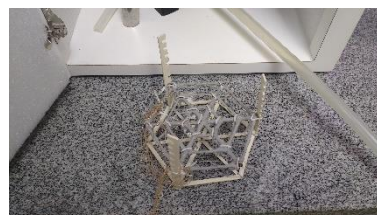
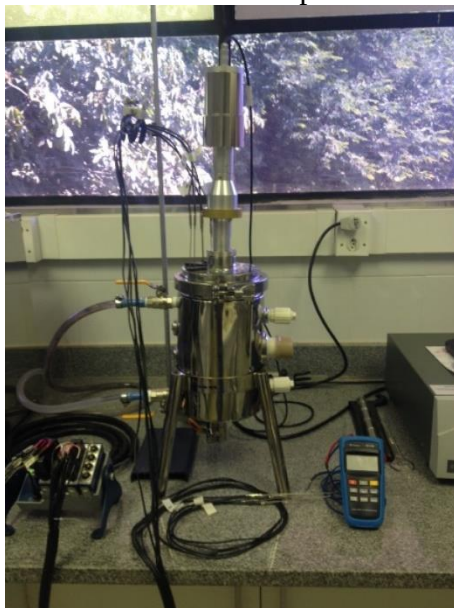
- RIBEIRO, M. G.; LIMA, S. R. **Iniciação às técnicas de preparação de material para o estudo e pesquisa em morfologia**. Belo Horizonte: SEGRAC-Editora e Gráfica Ltda. 2000
- RIESZ, P.; KONDO, T. Free radical formulation induced by ultrasound and its biological implications. **Free Radical Biological Medicine**, v. 13, p. 247-270, 1992.
- SANTOS, I. J.; SANTOS, Y. L.; OLIVEIRA, M. G. A.; SILVA, P. H. A. expressão da alfa e beta amilase durante a germinação de cevada. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v.12, n.1, p. 67-73, 2010
- SCHMIDT, F. C.; CARCIOFI, B. A. M.; LAURINDO, J. B. Application of diffusive and empirical models to hydration, dehydration and salt gain during osmotic treatment of chicken breast cuts. **Journal of Food Engineering**, v. 91, n. 4, p. 553-559, 2009.
- SHCHERBAKOV, M.V.; BREBELS, A.; SHCHERBAKOVA, N.L.; TYUKOV, A.P.; JANOVSKY, T.A.; KAMAEV, V.A.E. A survey of forecast error measures. **World Applied Sciences Journal**. v. 24, p. 171-176. 2013.
- SHUKLA, T. P. Microwave ultrasonics in food processing. **Cereal Food World**, v. 37, p. 332-333, 1992.
- SILVA, F.; NOGUEIRA, L. C.; GONÇALVES, C.; FERREIRA, A. A.; FERREIRA, I. M. P. L. V. O.; TEIXEIRA, N. Electrophoretic and HPLC methods for comparative study of the protein fractions of malts, worts and beers produced from Scarlett and Prestige barley (*Hordeum vulgare* L.) varieties. **Food Chemistry**, v. 106, n. 2, p. 820-829, 2008.
- SOLOGUBIK, C. A.; CAMPAÑONE, L. A.; PAGANO, A. M.; GELY, M. C. Effect of moisture content on some physical properties of barley. **Industrial Crops and Products**, v. 43, p. 762-767, 2013.
- SORIA, A. C.; VILLAMIEL, M. Effect of ultrasound on the technological properties and bioactivity of food: a review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 21, p. 323-331, 2010.
- SUSLICK, K. S. **Homogeneous sonochemistry**. In SUSLICK, K. S. (Ed.). *Ultrasound: Its Chemical, Physical and Biological Effects*, p. 123-163, New York, VCH Publishers, 1988.
- 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, n. 2, p. 361, 2003.

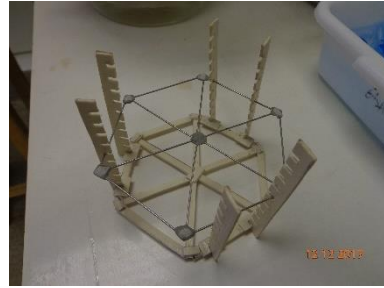
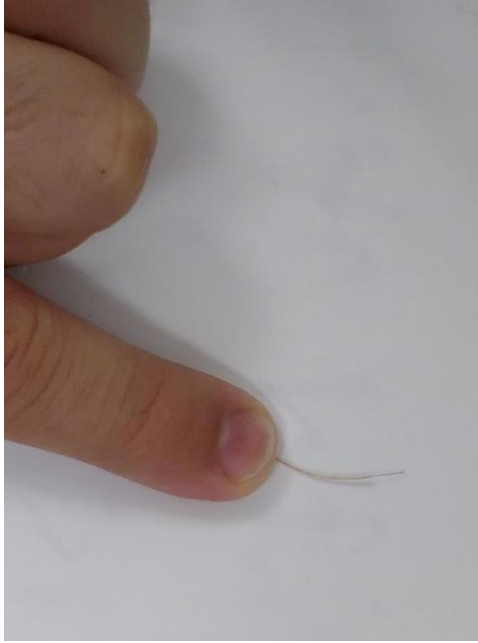
- TAVAKOLI, M.; TAVAKOLI, H.; RAJABIPOUR, A.; AHMADI, H.; GHARIB-ZAHEDI, S. M. T. Moisture-dependent physical properties of barley grains. **International Journal of Agricultural and Biological Engineering**, v. 2, n. 4, p. 84-91, 2010.
- THE DRUNK ALCHEMIST. **Rise and Fall of US Barley**. Disponível em: <<http://drunkalchemist.blogspot.com.br/2014/05/rise-and-fall-of-us-barley.html>>. 2014. Acesso em: 01 ago. 2015.
- TSCHOPE, E. C.; NOHEL, F. **A malteação da cevada**. Vassouras: Senai-RJ, 1999.
- VILLAMIEL, M.; DE JONG, P. Influence of high-intensity ultrasound and heat treatment in continuous flow of fat, proteins and native enzymes of milk. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 48, p. 472-478, 2000.
- WARPALA, I. W. S.; PANDIELLA, S. S. Shorter Communication: Grist Fractionation and Starch Modification During the Milling of Malt. **Food and bioproducts processing**, v. 78, n. 2, p. 85-89, 2000.
- WELTI-CHANGES, J.; VERGARA-BALDERAS, F.; BERMÚDEZ-AGUIRRE, D. Transport phenomena in food engineering: basic concepts and advances. **Journal of Food Engineering**, Davis, v. 67, n. 1-2, p. 113-128, 2005.
- WHITAKER, S. The role of the volume-averaged temperature in the analysis of nonisothermal, multiphase transport phenomena. **Chemical Engineering Communications**, v. 58, n. 1-6, p. 171-183, 1987.
- YALDAGARD, M.; MORTAZAVI, S. A.; TABATABAIE, F. The effect of ultrasound in combination with thermal treatment on the germinated barley's alpha-amylase activity. **Korean Journal of Chemical Engineering**, v. 25, n. 3, p. 517-523, 2008b.
- YALDAGARD, M.; MORTAZAVI, S. A.; TABATABAIE, F. The effectiveness of ultrasound treatment on the germination stimulation of barley seed and its alpha-amylase activity. In: **Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology**. p. 489-492. 2007.
- YALDAGARD, M.; MORTAZAVI, S. A.; TABATABAIE, F. Application of ultrasonic waves as a priming technique for accelerating and enhancing the germination of barley seed: Optimization of method by the Taguchi approach. **Journal of the Institute of Brewing**, v. 114, n. 1, p. 14-21, 2008a.

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

APÊNDICE I

Equipamentos utilizados nos experimentos de maceração.





APÊNDICE II

Registro do crescimento das radículas e da acrospira durante a determinação do poder germinativo.

