

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS**  
**FACULDADE DE AGRONOMIA ELISEU MACIEL**  
**DEPARTAMENTO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA AGROINDUSTRIAL**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE**  
**ALIMENTOS**



**TESE DE DOUTORADO**

**USO DA IRRADIAÇÃO MICRO-ONDAS PARA MELHORAR A QUALIDADE DO**  
**ARROZ PARBOILIZADO**

Caroline Tuchtenhagen Rockembach

Licenciada em Química

Pelotas, 2019

**Caroline Tuchtenhagen Rockembach**

Uso da irradiação micro-ondas para melhorar a qualidade do arroz parboilizado

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Universidade Federal de Pelotas, como requisito à obtenção do título de Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Comitê de Orientação:

Professor Dr. Maurício de Oliveira

Professor Dr. Moacir Cardoso Elias

Dr. Cristiano Dietrich Ferreira

Pelotas, 2019

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas  
Catalogação na Publicação

R682u Rockembach, Caroline Tuchtenhagen

Uso da irradiação micro-ondas para melhorar a qualidade do arroz parboilizado / Caroline Tuchtenhagen Rockembach ; Maurício de Oliveira, orientador ; Moacir Cardoso Elias, Cristiano Dietrich Ferreira, coorientadores. — Pelotas, 2019.

91 f. : il.

Tese (Doutorado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2019.

1. Parboilização. 2. Arroz. 3. Irradiação micro-ondas. 4. Tempo de processamento. I. Oliveira, Maurício de, orient. II. Elias, Moacir Cardoso, coorient. III. Ferreira, Cristiano Dietrich, coorient. IV. Título.

CDD : 633.18

**Caroline Tuchtenhagen Rockembach**

**Uso da irradiação micro-ondas para melhorar a qualidade do arroz parboilizado**

Tese aprovada como requisito parcial, para obtenção do grau de Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas.

Data da defesa: 25/02/2019

Banca examinadora:

---

Prof. Dr. Maurício de Oliveira

Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos – UFPel

---

Prof. Dr. Ricardo Scherer Pohndorf

Doutor em Engenharia e Ciência de Alimentos – FURG

---

Prof. Dr. Jander Luis Fernandes Monks

Doutor em Ciência e Tecnologia de Alimentos – UFPel

---

Dr<sup>a</sup>. Inajara Beatriz Brose Piotrowicz

Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos – FURG

---

Dr<sup>a</sup>. Jessica Hoffmann

Doutora em Ciência e Tecnologia de Alimentos – UFPel

*Dedico este trabalho ao meu esposo Guilherme com  
amor e gratidão.*

## **Agradecimentos**

Durante todo o período de doutorado, muitas pessoas colaboraram, direta ou indiretamente, para torná-lo mais suave. Dedico este espaço para registrar meus sinceros agradecimentos pela participação de cada um para que fosse possível a conclusão desta pesquisa.

Primeiramente, agradeço de forma muito especial meu esposo Guilherme por acreditar nos meus sonhos e buscar junto comigo a realização destes. Obrigada por escutar minhas angústias e sempre me auxiliar a ver o lado bom de tudo, por compreender os momentos em que estive ausente e ainda me incentivar a continuar;

Agradeço a minha família, pelo apoio e carinho e em especial minha mãe por todo teu esforço para me ver feliz e por participar de cada momento da minha vida;

Agradeço meu orientador Prof. Dr. Maurício de Oliveira por ter me oportunizado grande aprendizado durante este processo, proporcionando-me crescimento profissional e pessoal;

Agradeço também a comissão orientadora Dr. Cristiano Dietrich e Prof. Dr. Moacir Elias pelas colaborações a fim de aumentar a qualidade do trabalho e por estar sempre disponível para me auxiliar;

Com enorme carinho agradeço a Dra. Shanise Melo Al Halal, pela dedicação e constante disposição em ajudar. Não tenho palavras para agradecer e expressar a satisfação de trabalhar com você, competente e extremamente comprometida.

Aos colegas e amigos do Laboratório – Labgrãos – pela amizade durante esta jornada. A todos, sou grata pelos momentos de descontração e constante disposição em me auxiliar. Em especial e com muito carinho agradeço a Franciene, Suzane e Jorge pela constante disponibilidade e colaboração com experimentos realizados e pela amizade.

Deixo aqui também minha gratidão à Universidade Federal de Pelotas, a CAPES e ao Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, pela oportunidade e por proporcionar o desenvolvimento deste trabalho. Agradeço também a todos os professores desta instituição pela atenção e presteza.

Com muito carinho e reconhecimento agradeço a banca examinadora dessa tese pela disponibilidade, atenção, carinho e contribuição para o presente trabalho.

Para finalizar este breve momento de gratidão, agradeço a todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho, jamais me esquecerei de vocês.

Muito Obrigada!!

“Tente ser uma pessoa de sucesso, mas efetivamente tente ser  
uma pessoa de valor” Albert Einstein

## Resumo

ROCKEMBACH, Caroline Tuchtenhagen. **Irradiação micro-ondas como um processo inovador para a melhoria da qualidade do arroz parboilizado**. 2019, 81f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

Algumas das principais desvantagens do processo de parboilização do arroz são as intensificações da cor e *flavor* dos grãos, que pode ser devido às reações de escurecimento durante a etapa hidrotérmica e a etapa de vaporização, estas características afetam negativamente a aceitabilidade do consumidor. Os processos de parboilização têm evoluído, devido à ampliação na pesquisa em parboilização de arroz e ao desenvolvimento de novas técnicas. Entretanto existem limitações ao longo do processo, demonstrando a importância de buscar novas técnicas que possam diminuir o tempo do processo e o escurecimento dos grãos de arroz parboilizado. O desenvolvimento de processos de parboilização do arroz mais rápidos e eficientes, como a irradiação por micro-ondas, podem melhorar a qualidade dos grãos e reduzir as reações de escurecimento. Este estudo avaliou os efeitos da irradiação de microondas no processo de parboilização em propriedades morfológicas, tecnológicas e estruturais de grãos de arroz. A parboilização foi realizada via irradiação micro-ondas sob as mesmas condições de temperatura (encharcamento e autoclavagem) utilizadas no processo convencional. No entanto, foram utilizados dois passos de aquecimento (Primeira etapa = 400 W e Segunda etapa = 500 W) em diferentes tempos de exposição à irradiação de microondas (a) primeira etapa: 10, 20 30 e 40 min e (b) segunda etapa: 0, 5 e 10 min. Os grãos de arroz submetidos ao primeiro passo de irradiação de microondas absorveram mais água e perderam menos sólidos lixiviados quando comparados ao parboilizado pelo arroz parboilizado convencional. A irradiação de microondas diminuiu o tempo de cocção dos grãos de arroz e modificou sua solubilidade protéica quando comparada à parboilização convencional. Além disso, esta técnica modificou a morfologia e a estrutura cristalina dos grãos. O uso do aquecimento por microondas no processo de parboilização reduz significativamente o tempo de processamento, possibilitando obter grãos de arroz parboilizados com maior brancura em um tempo médio dez vezes menor quando comparado ao processo convencional.

**Palavras-chave:** Parboilização; Arroz; irradiação micro-ondas; tempo de processamento.

## Abstract

ROCKEMBACH, Caroline Tuchtenhagen. **Microwave irradiation as an innovative process for improving the quality of parboiled rice.** 2019, 81p. Thesis (doctor's degree in Food Science and Technology) - Graduate Program in Food Science and Technology, Faculty of Agronomy Eliseu Maciel, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2019.

Some of the main drawbacks of the rice parboiling process are the intensities of grain color and flavor, which may be due to the browning reactions during the hydrothermal stage and the vaporization stage, these characteristics adversely affect consumer acceptability. The processes of parboiling have evolved, due to the expansion in the research on rice parboiling and the development of new techniques. However, there are limitations throughout the process, demonstrating the importance of searching for new techniques that can reduce the process time and the browning of parboiled rice grains. The development of faster and more efficient rice parboiling processes, such as microwave irradiation, can improve grain quality and reduce browning reactions. This study evaluated the effects of microwave irradiation on the parboiling process on morphological, technological and structural properties of rice grains. Parboiling was performed via microwave irradiation under the same temperature conditions (soaking and vaporization) used in the conventional process. However, two heating stages (400 and / or 500 W) were used at different exposure times to microwave irradiation (a) stage first: 10, 20, 30 and 40 min and (b) stage second: 0,5 and 10 min. The rice grains submitted to the first step of microwave irradiation absorbed more water and lost less leached solids when compared to the parboiled by conventional parboiled rice. Microwave irradiation decreased the cooking time of rice grains and modified their protein solubility when compared to conventional parboiling. In addition, this technique modified the morphology and crystalline structure of the grains. The use of microwave heating in the parboiling process significantly reduces processing time, making it possible to obtain parboiled rice grains with greater whiteness.

**Key-words:** Parboiling; Rice; Irradiation microwave; Processing time.

## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 1</b> - ARROZ BRANCO POLIDO (A), PARBOILIZADO POLIDO (B) E INTEGRAL (C). .....	18
<b>FIGURA 2</b> - ESTRUTURA ANATÔMICA DO GRÃO DE ARROZ.....	20
<b>FIGURA 3</b> - PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO DO ARROZ.....	22
<b>FIGURA 4</b> - DIFRATOGRAMA DE RAIO-X DE DIFERENTES AMIDOS. A- PADRÃO TIPO A DE AMIDOS DE CEREAIS, B- PADRÃO TIPO B DE AMIDOS DE TUBÉCULOS, C-PADRÃO TIPO C DE AMIDOS DE LEGUMINOSAS E V- PADRÃO TIPO V DE AMILOSE COMPLEXADA.....	26
<b>FIGURA 5</b> - MICROGRAFIA DE MICROSCÓPIO ELETRÔNICO DE VARREDURA (MEV) DE ARROZ COM PERICARPO PRETO (PP) INTEGRAL E POLIDO NÃO PARBOILIZADO E PARBOILIZADO COM FOCO EM SUA CAMADA DE ALEURONA. ....	27
<b>FIGURA 6</b> - CURVA TÍPICA DE VISCOSIDADE DO RVA. ....	28
<b>FIGURA 7</b> -ETAPAS DA REAÇÃO DE MAILLARD. AS LETRAS A,B,C,D,E,F,G REPRESENTAM AS ETAPAS DO PROCESSO. ....	29
<b>FIGURA 8</b> - ESQUEMA FORMAÇÃO HMF. ....	31
<b>FIGURA 9</b> - PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO MICRO-ONDAS.....	33
<b>FIGURA 10</b> - REPRESENTAÇÃO DOS PROCESSOS DE PARBOILIZAÇÃO UTILIZADOS.....	37
<b>FIGURA 11</b> - MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA (MEV) DE GRÃOS DE ARROZ POLIDOS: PE10SE0 EM X43 (A) E X150 (B); PE40SE10 EM X43 (C) E X150 (D); PARABOLIZADO CONVENCIONAL X43 (E) E X150 (F); NÃO-PARBOILIZADO EM X43 (G) E X150 (H). PE= PRIMEIRO ESTÁGIO (MIN); SE= SEGUNDO ESTÁGIO (MIN). ....	49
<b>FIGURA 12</b> - DIFRAÇÃO DE RAIOS X DE GRÃOS DE ARROZ PARBOILIZADO POR PARBOILIZAÇÃO RÁPIDA POR MICROONDAS, CONVENCIONAL PARBOILIZADO E NÃO PARBOILIZADO. PE = PRIMEIRO ESTÁGIO (MIN); SE = SEGUNDO ESTÁGIO (MIN) <b>A</b> -PE10SE0; <b>B</b> -PE20SE0; <b>C</b> -PE30SE0; <b>D</b> -PE40SE0; <b>G</b> -PE10SE5; <b>H</b> -PE20SE5; <b>I</b> -PE30SE5; <b>J</b> -PE40SE5; <b>K</b> -PE10SE10; <b>L</b> -PE20SE10; <b>M</b> -PE30SE10; <b>N</b> -PE40SE10; <b>E</b> -ARROZ PARBOILIZADO CONVENCIONAL; <b>F</b> -ARROZ NÃO PARBOILIZADO. ....	51
<b>FIGURA 13</b> - DISTRIBUIÇÃO DO PESO MOLECULAR DE PROTEÍNAS DE GRÃOS DE ARROZ PARBOILIZADO POR PARBOILIZAÇÃO RÁPIDA POR MICRO-ONDAS, PARBOILIZADO CONVENCIONAL E NÃO PARBOILIZADO. (A- ARROZ NÃO PARBOILIZADO; ARROZ PARBOILIZADO CONVENCIONAL; B- PE10SE0; PE20SE5; PE40SE10; ARROZ PARBOILIZADO CONVENCIONAL). ....	54
<b>FIGURA 14</b> - IMAGEM DE GRÃOS DE ARROZ PARBOILIZADOS VIA PARBOILIZAÇÃO RÁPIDA EM MICRO-ONDAS E PARBOILIZADO CONVENCIONAL. PE: PRIMEIRO ESTÁGIO (MIN); SE: SEGUNDO ESTÁGIO (MIN). ....	64
<b>FIGURA 15</b> - TEOR DE SACAROSE (A), GLICOSE (B) E FRUTOSE (C) DOS GRÃOS DE ARROZ SUBMETIDOS AO PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO POR MICRO-ONDAS. A MÉDIA SEGUIDA POR DIFERENTES LETRAS	

<p>MAIÚSCULAS PARA IMERSÃO E DIFERENTES LETRAS MINÚSCULAS PARA GELATINIZAÇÃO DIFEREM PELO TESTE DE TUKEY (P &lt;0,05). CONVENCIONAL PARBOILIZADO: SACAROSE = 111,9 MG/L; GLICOSE = 597,5 MG/L E FRUTOSE = 82,7 MG/L. ....</p>	67
<p><b>FIGURA 16</b> - TEOR DE HMF LIVRE E LISINA LIVRE DOS GRÃOS DE ARROZ SUBMETIDOS AO PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO POR MICRO-ONDAS. A MÉDIA SEGUIDA POR DIFERENTES LETRAS MAIÚSCULAS PARA IMERSÃO E DIFERENTES LETRAS MINÚSCULAS PARA GELATINIZAÇÃO DIFEREM PELO TESTE DE <i>TUKEY</i> (P &lt;0,05). PARBOILIZADO CONVENCIONAL: HMF LIVRE = 24,44 µG/G E LISINA LIVRE = 0,203 MG/100G.....</p>	69
<p><b>FIGURA 17</b> - FÓSFORO RESIDUAL DOS GRÃOS DE ARROZ SUBMETIDOS AO PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO POR MICRO-ONDAS. A MÉDIA SEGUIDA POR DIFERENTES LETRAS MINÚSCULAS PARA GELATINIZAÇÃO DIFERE PELO TESTE DE <i>TUKEY</i> (P &lt;0,05). ....</p>	71

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 1</b> - PERCENTUAL DE GRÃOS INTEIROS DOS GRÃOS DE ARROZ PARBOILIZADO POR MICRO-ONDAS .....	45
<b>TABELA 2</b> - PORCENTAGEM DE GRÃOS GELATINIZADOS E NÃO GELATINIZADOS SUBMETIDOS A IRRADIAÇÃO MICRO-ONDAS .....	46
<b>TABELA 4</b> - TEMPO DE COCÇÃO DOS GRÃOS DE ARROZ SUBMETIDOS A IRRADIAÇÃO MICRO-ONDAS .....	48
<b>TABELA 6</b> - PROPRIEDADES DE PASTA DO ARROZ PARBOILIZADO VIA MICRO-ONDAS, PARBOILIZADO PELO PROCESSO CONVENCIONAL E NÃO PARBOILIZADO.....	57
<b>TABELA 7</b> - TEXTURA DE GRÃOS DE ARROZ PARBOILIZADO VIA MICRO-ONDAS E PARBOILIZADO PELO PROCESSO CONVENCIONAL .....	60
<b>TABELA 8</b> - PERFIL COLORIMÉTRICO, PORCENTAGEM DE GRÃOS DE ARROZ QUEBRADOS E NÃO-GELATINIZADOS SUBMETIDOS À PARBOILIZAÇÃO POR IRRADIAÇÃO DE MICRO-ONDAS E PARBOILIZAÇÃO CONVENCIONAL .....	62
<b>TABELA 3</b> - BRANCURA DOS GRÃOS DE ARROZ SUBMETIDOS A IRRADIAÇÃO MICRO-ONDAS .....	65
<b>TABELA 5</b> – ABSORÇÃO DE ÁGUA E SÓLIDOS LIXIVIADOS DOS GRÃOS DE ARROZ PARBOILIZADO, UTILIZANDO UM PROCESSO DE PARBOILIZAÇÃO RÁPIDA POR MICRO-ONDAS, PROCESSO CONVENCIONAL E GRÃOS NÃO PARBOILIZADOS .....	70

## SUMÁRIO

<b>1. Introdução</b> .....	15
Objetivos .....	17
2.1. Objetivo Geral .....	17
2.2. Objetivos Específicos .....	17
2.3. Hipóteses .....	17
<b>3. Revisão Bibliográfica</b> .....	18
3.1. O arroz .....	18
3.2. Estrutura e composição dos grãos .....	19
3.3. Parboilização.....	21
3.4. Qualidade dos grãos .....	25
3.5. Reações de escurecimento .....	28
3.6. Micro-ondas .....	32
4.1. Material .....	36
4.2. Rendimento .....	38
4.3. Grãos de arroz 100% gelatinizados e 100% não gelatinizados .....	38
4.4. Tempo de cocção.....	39
4.5. Avaliação microscópica .....	39
4.6. Difração de raios-X.....	39
4.7. Distribuição de peso molecular de proteínas por SE-HPLC.....	39
4.8. Propriedades de pasta .....	40
4.9. Perfil textuométrico .....	40
4.10. Perfil colorimétrico .....	41
4.11. Brancura .....	41
4.12. Teor de sacarose, glicose e frutose .....	41
4.13. Teor de 5-hidroximetil-2-furfural livre (HMF) .....	42
4.14. Teor de lisina livre .....	42
4.15. Absorção de água.....	43
4.16. Sólidos lixiviados.....	43
4.17. Teor de fósforo.....	43
4.18. Análise estatística .....	44
<b>5. Resultados e discussões</b> .....	45
5.1. Rendimento de inteiros .....	45
5.2. Grãos de arroz 100% gelatinizados e 100% não gelatinizados .....	46
5.3. Tempo de cocção.....	47

5.4. Avaliação microscópica.....	48
5.5. Difractogramas de raios-X .....	50
5.6. Distribuição de peso molecular de proteínas (SE-HPLC).....	53
5.7. Propriedades de pasta e perfil texturométrico .....	55
5.8. Parâmetros de cor.....	61
5.9. Sacarose, glicose e frutose .....	65
5.10. 5-hidroximetil-2-furaldeído livre (HMF) e conteúdo de lisina livre .....	68
5.11. Absorção de água e sólidos lixiviados .....	70
5.12. Teor residual de fósforo .....	71
<b>6. Considerações finais .....</b>	<b>73</b>
Referências Bibliográficas .....	75
APÊNDICES.....	88

## 1. Introdução

O arroz está entre os cereais mais produzidos e consumidos no mundo, sendo nutricionalmente importante, devido ao seu alto teor de carboidratos, além de apresentar vitaminas, fibras, minerais e compostos bioativos, principalmente na sua forma integral. Tendo em vista a mudança no estilo de vida, preocupação com a saúde e bem estar, e que o grão é consumido por mais da metade da população mundial, estudos para melhorar os processos de industrialização e a qualidade dos grãos são de suma importância.

A parboilização do arroz é uma técnica antiga, bastante conhecida e utilizada com intuito de aumentar o valor nutritivo do grão quando relacionado ao arroz branco polido, pelo fato de no seu processamento ocorrer a migração de vários compostos para seu interior. Além disso, destaca-se sua menor digestibilidade em relação ao arroz branco. No entanto, o arroz parboilizado apresenta características físicas e organolépticas, que nem sempre agradam o consumidor, como a coloração escura, odor e sabor característico. O escurecimento destes grãos se deve as mudanças na cor durante a parboilização que pode ser devido à migração de pigmentos da casca para o interior dos grãos, ao escurecimento enzimático e não enzimático, como a reação de Maillard.

O processo de parboilização é constituído por três diferentes etapas: (a) encharcamento do arroz em casca, (b) gelatinização e (c) secagem. O encharcamento é essencial dado que a água é necessária para uma gelatinização adequada.

A parboilização potencializa a lixiviação dos sólidos e também o escurecimento dos grãos de arroz, pois para a etapa de hidratação dos grãos é necessário um longo tempo de encharcamento. Por outro lado, na etapa de autoclavagem utiliza-se alta temperatura, o que pode provocar também o escurecimento dos grãos.

Desta forma, o uso do micro-ondas, ao invés das etapas tradicionais de encharcamento e gelatinização, constitui uma alternativa para a diminuição da lixiviação de sólidos e escurecimento dos grãos. O mecanismo de funcionamento do micro-ondas proporciona um aquecimento rápido devido à polarização das moléculas pela ação de um campo elétrico, o que ocasiona uma desnaturação momentânea nas proteínas, além de, facilitar a absorção de água pelo amido, diminuindo o tempo de hidratação, e conseqüentemente o tempo de processo.

Os processos de parboilização têm evoluído muito, devido à ampliação na pesquisa e ao desenvolvimento de novas técnicas. Entretanto existem limitações ao longo do processo, demonstrando a importância de buscar novas técnicas que possam diminuir o tempo do processo e o escurecimento dos grãos de arroz parboilizado.

## **Objetivos**

### **2.1. Objetivo Geral**

Desenvolver um sistema de parboilização com o uso de irradiação micro-ondas a fim de diminuir o tempo do processo, a lixiviação de compostos e o escurecimento dos grãos de arroz.

### **2.2. Objetivos Específicos**

Verificar se o uso da irradiação micro-ondas diminui o tempo de processo de parboilização;

Avaliar se a parboilização em micro-ondas reduz a lixiviação de compostos;

Verificar se a redução do tempo de parboilização diminui reações de escurecimento;

Avaliar se o processo da parboilização rápida por micro-ondas afeta as características estruturais e morfológicas dos grãos.

### **2.3. Hipóteses**

A irradiação por micro-ondas facilita a hidratação dos grãos de arroz e diminui o tempo de encharcamento.

A redução do tempo de parboilização dos grãos de arroz diminui a lixiviação de seus compostos, assim como seu escurecimento.

### 3. Revisão Bibliográfica

#### 3.1. O arroz

O arroz é um dos cereais mais produzidos e consumidos no mundo (FAO, 2014). O cultivo do arroz (*Oryza sativa* L.) se espalhou pelo mundo, ganhando valor econômico na Europa durante as Cruzadas. Atualmente, mais da metade da população mundial tem este cereal como um dos principais itens da sua dieta (MUTHAYYA et al., 2014) e constitui a base alimentar da maioria dos países asiáticos (XU et al., 2011).

A China é o principal produtor e consumidor de grãos de arroz, por causa dos hábitos alimentares da população, produtores e analistas de mercado têm previsão de produção de aproximadamente 140 milhões de toneladas na safra 2018/19 (CONAB, 2018). Segundo a CONAB (2018) os países que integram o Mercosul produzirão, na safra 2018/19, aproximadamente 15,3 milhões toneladas de arroz em casca, sendo o Brasil responsável por 76,8% da produção do bloco.

O consumo de arroz se divide em diversas formas: arroz branco polido, integral, parboilizado polido, parboilizado integral e ultimamente os pigmentados (preto e vermelho). Cada categoria apresenta características específicas em relação às propriedades nutricionais e sensoriais (BRANDÃO et al., 2015). No Brasil, o consumo se dá prioritariamente na forma de branco polido, parboilizado polido e integral (Figura 1), respectivamente (PAIVA, 2011).

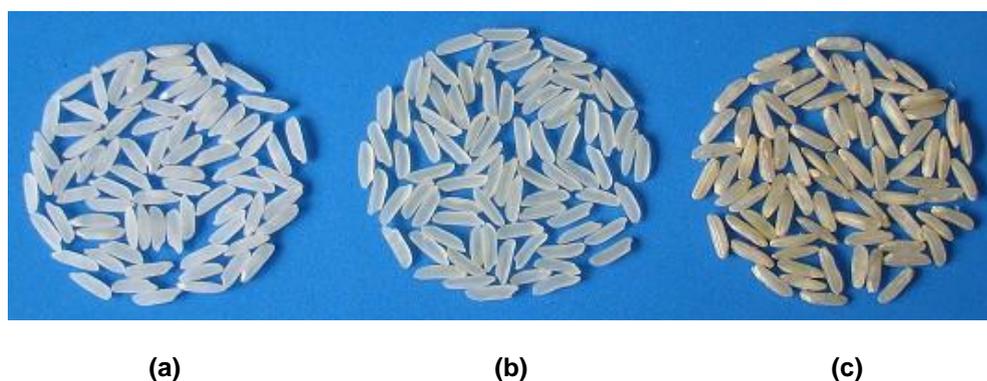


Figura 1 - Arroz branco polido (a), parboilizado polido (b) e integral (c).  
Fonte: Epagri (2016).

Dentre as principais formas de consumo, o arroz branco polido apresenta maior aceitabilidade pelo consumidor, por apresentar coloração e características

organolépticas mais agradáveis. No entanto, o arroz branco polido é composto basicamente de amido, com baixo teor de proteínas, lipídeos, minerais e vitaminas, pois estes estão presentes na camada de aleurona, a qual é removida na etapa de polimento estimulando assim, o consumo do arroz parboilizado, por aumentar a concentração de minerais e vitaminas que migram para o interior do grão durante o processo (LAMBERTS et al., 2007),.

O brunimento e polimento são uma operação reduz o teor dos nutrientes supracitados, promovendo assim as diferenças na composição entre o arroz integral e o polido. Visto que, o pericarpo está constituído basicamente de lipídios, proteínas, vitaminas e sais minerais, compondo aproximadamente 6% do peso do grão e o endosperma é composto principalmente por amido, o qual se apresenta nas formas de amilose e amilopectina (DORS et al., 2009). Após o polimento o grão de arroz possui cerca de 90% de seu peso seco correspondente em amido, desta forma é importante conhecer a composição do amido para aferir a qualidade do grão (AMATO & ELIAS, 2005).

Atualmente, a comercialização de arroz no Brasil segue as normas da Instrução Normativa N° 6 de 16 de fevereiro de 2009 do Ministério da Agricultura Pecuária e Abastecimento (MAPA), e o arroz é classificado em seis sub-grupos, sendo eles: arroz em casca natural, arroz em casca parboilizado, arroz beneficiado integral, arroz beneficiado parboilizado polido, arroz beneficiado parboilizado integral e arroz beneficiado polido, com cinco tipos de classificação para cada sub-grupo.

### **3.2. Estrutura e composição dos grãos**

O arroz é formado por lema, pálea, gérmen, endosperma, aleurona e pericarpo (Figura 2). O amido é o maior constituinte do grão, o que lhe atribui um alto valor energético, contudo outros compostos também fazem parte da constituição dos grãos de arroz, como os lipídeos, proteínas, vitaminas do complexo B, além de sais minerais como fósforo, ferro e cálcio, e aminoácidos essenciais, os quais se encontram nas camadas externas do grão (pericarpo, tegumento e aleurona), sendo parcialmente eliminados durante o beneficiamento (BAO et al., 2004; HEINEMANN et al., 2005).

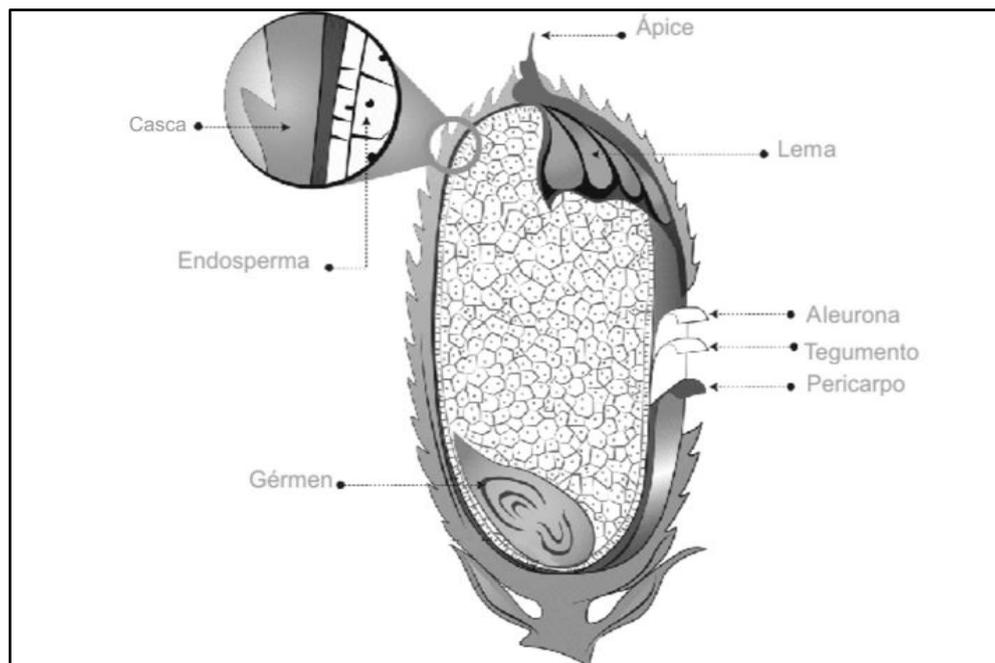


Figura 2- Estrutura anatômica do grão de arroz.  
 Fonte: Adaptado de BERNAS, 2017.

O amido é composto por duas macromoléculas, a amilose que é uma cadeia polimérica predominantemente linear e a amilopectina formada por ligações glicosídicas  $\alpha$ -1,4 e  $\alpha$ -1,6, apresentando uma estrutura ramificada. As quantidades destas moléculas variam com a fonte e com o grau de maturação do vegetal (BUGGENHOUT et al., 2013; ORDÓÑEZ et al., 2005; ZAVAREZE & DIAS, 2011). A amilose possui uma cadeia oligossacarídica menor que a amilopectina e com estrutura helicoidal, podendo ser lixiviada para fora do grânulo (BERTOFT et al., 2016; TESTER et al., 2004), e está localizada entre as cadeias de amilopectina. A amilopectina é muito importante na estruturação do amido, pois geralmente é responsável pela formação do grânulo.

A gelatinização do amido ocorre quando há aquecimento em excesso de água, sendo que este processo é irreversível, pois o grânulo de amido se rompe com a expansão, liberando amilose para a fase aquosa (VALLONS et al., 2014). Ao esfriar o amido ocorre a formação de um rearranjo entre as cadeias solubilizadas, principalmente da amilose, o qual é chamado de retrogradação (COLUSSI et al., 2015; FU et al., 2013). Nesse contexto, várias alterações nas características sensoriais e de cocção do arroz estão atribuídas às mudanças nas propriedades do amido (FU et al., 2014; TEO et al., 2000).

Além de ser fonte de amido, o arroz também pode ser considerado importante fonte energética devido a concentração de proteínas, vitaminas, minerais e lipídios, sendo (WALTER et al., 2008). A principal proteína de reserva do arroz é a orizenina (glutelina), que apresenta aproximadamente 80% do total da proteína do arroz. (MARTIN & FITZGERALD, 2002). O ácido glutâmico é o aminoácido em maior concentração neste cereal, apesar de também ser encontrada em pouca concentração a histidina (GUNARATNE et al., 2013).

A maior concentração de lipídeos é encontrada no germe (embrião), apresentando aproximadamente 2,5% da composição do grão que é removido durante o polimento, formando parte do farelo (MOONGNGARMA, DAOMUKDA & KHUMPIKA, 2012). A fração lipídica do grão esta sujeita à oxidação durante o processo de parboilização, devido à alta temperatura utilizada e a formação de radicais livres, o que pode acarretar na rancificação lipídica.

Do farelo pode-se obter o óleo de arroz, que é composto aproximadamente 90 a 96% de compostos saponificáveis. Há também uma pequena concentração de compostos insaponificáveis (aproximadamente 2%), o  $\gamma$ -orizanol é o principal destes componentes por apresentar diversas propriedades benéficas a saúde (PAUCAR-MENACHO et al., 2007).

### **3.3. Parboilização**

Embora não haja registros sobre a origem do processo de parboilização, há relatos que este foi usado primeiramente na Índia. Originalmente, é possível que este tratamento tenha sido usado como uma forma de facilitar o descascamento dos grãos. Em escala industrial, o processo foi aplicado em 1940 nos Estados Unidos da América, Itália entre outros. Hoje em dia, devido às vantagens econômicas e nutricionais, a parboilização está difundida em todas as partes do mundo (BORTOLINI, 2014).

O processo de parboilização tem sido usado como uma das formas de minimizar a remoção excessiva de compostos importantes do ponto de vista nutricional e também diminuir a quebra de grãos durante o beneficiamento (HEINEMANN et al., 2005). Devido aos avanços na pesquisa, observou-se que o arroz parboilizado tem vários benefícios para a saúde, como redução nos níveis de

glicose no sangue (HAMAD, ZAFAR, & SIDHU, 2018) e aumento da absorção mineral, principalmente potássio (K) e fósforo (P) (SILVA et al., 2017).

O processo de parboilização é dividido em três etapas, conforme a Figura 3. Na etapa de encharcamento ocorre a hidratação dos grãos de arroz, devido a imersão dos mesmos em água. A temperatura da água de encharcamento é o parâmetro mais crítico, pois determina a taxa de absorção de água e o tempo desta etapa do processo, resultando em um aumento no coeficiente de difusão (KWOPIE & NGADI, 2017).

Este processo promove a desestruturação dos grânulos de amido com a ruptura na estrutura cristalina. A hidratação promove aumento das atividades de enzimas hidrolíticas como amilase, protease, fosfatase e  $\beta$ -glicosidase, desta forma, sacarídeos e proteínas mais simples são produzidos e lixiviados para a água de imersão (DUTTA & MAHANTA, 2014). Inicialmente, o processo de parboilização surgiu como uma alternativa para melhorar a estrutura física, o rendimento de grãos integrais e a estabilidade do armazenamento (ATUNGULU & PAN, 2014). O processo convencional de parboilização de arroz utiliza grande volume de água e maior tempo de imersão, que além do gasto energético, promovem a contaminação ambiental pela alta quantidade de resíduos, principalmente fósforo (MUKHERJEE et al., 2016).

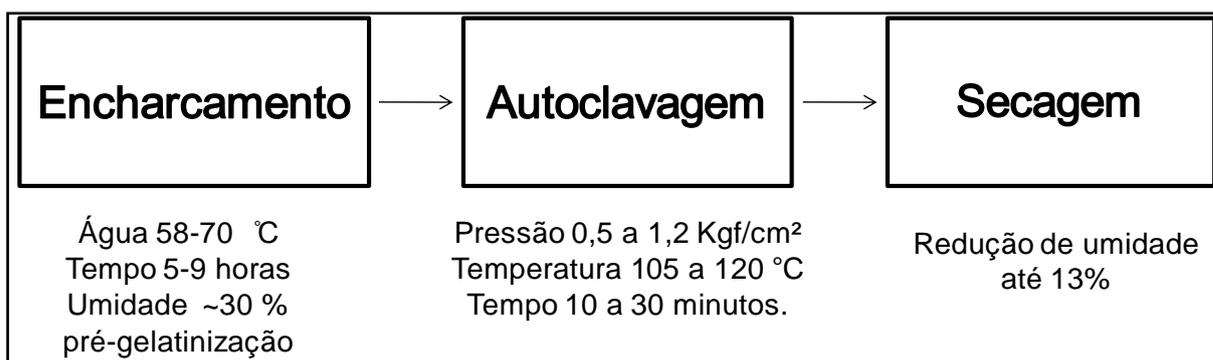


Figura 3 - Processo de parboilização do arroz.  
 Fonte: Adaptado de ELIAS et al., 2005.

O processo de parboilização provoca diversas alterações na estrutura do amido devido à gelatinização e retrogradação. Desta forma o grão perde a birrefringência com o desaparecimento das zonas cristalinas. Estas modificações proporcionam maior grau de dureza, tempo de cocção e resistência a quebra no polimento do grão (OLI et al., 2014).

No encharcamento, por causa da umidade, as enzimas presentes na camada da aleurona e no gérmen aumentam sua atividade. Desta forma, as enzimas lipolíticas, atuam sobre os lipídeos ocasionando rancificação hidrolítica. As amilolíticas quebram o amido, formando moléculas de baixo peso molecular, as quais podem ser convertidas em açúcares redutores e reagir com aminoácidos, propiciando produtos da reação de *Maillard*, que podem ser atribuídos à coloração acentuada dos grãos de arroz parboilizados. Outro fator que também pode ser associado às mudanças de coloração observada nos grãos de arroz parboilizado, é à migração de pigmentos da casca para o interior do grão (ITANI et al., 2002; LAMBERTS, et al., 2007).

De acordo com Volpe (2014) o encharcamento pode ocorrer por absorção molecular, absorção capilar e hidratação. Para que o processo de parboilização seja eficaz é necessário que o amido absorva o máximo possível de água durante o encharcamento sem deformar o grão (aproximadamente 30%), para que gelatinização seja efetivada na próxima etapa (AMATO & ELIAS, 2005). Durante o encharcamento do arroz as primeiras moléculas de água se aderem à casca e penetram, através de microporos, para o interior do grão. Por absorção capilar, partes das moléculas de água são absorvidas pelos grânulos de amido, enquanto outras ocupam os espaços intragranulares. Experimentalmente é difícil determinar a contribuição de cada um destes mecanismos para o encharcamento.

O encharcamento à temperatura ambiente pode ocasionar contaminação microbiológica afetando assim a cor, o sabor e o cheiro do produto. Entretanto, ao utilizar água morna neste processo há um decréscimo no tempo de hidratação, visto que o aumento da temperatura aumenta a taxa de hidratação. Ainda assim, é aconselhado não utilizar temperaturas muito próximas ou acima da gelatinização do amido para que não haja desestruturação celular e, assim, maior lixiviação de sólidos (CHAVAN, 2017).

São encontrados estudos na literatura com a utilização de agentes químicos, durante o encharcamento com o intuito de aumentar a taxa de absorção de água e a migração de compostos para o interior do grão, diminuir a coloração e odor característico de arroz parboilizado (BELLO et al., 2004; BUGGENHOUT et al., 2013; SAREEPUANG et al., 2008). Bello et al. (2004) incorporaram ácido clorídrico, ácido acético, ácido fosfórico, hidróxido de sódio e carbonato de sódio na água de encharcamento. Para os autores a incorporação de ácidos durante a maceração não

aumentou a absorção de água. Já ao utilizar bases houve um aumento da permeabilidade do grão, facilitando a entrada de água e por consequência diminuindo o tempo de encharcamento.

Na etapa de gelatinização, o arroz é submetido à pressão (0,5 a 1,2 Kgf/cm<sup>2</sup>) e altas temperaturas com a finalidade de proporcionar a completa gelatinização do amido, ocasionando a reestruturação do grão (AMATO & ELIAS, 2005). Durante a gelatinização grande parte das enzimas presentes são inativadas, o que pode aumentar a conservação dos grãos, bem como a estabilidade do farelo (VILLANOVA et al., 2017). Esta etapa do processo é a principal causadora das mudanças na coloração dos grãos de arroz parboilizado, devido a alta temperatura e tempo utilizados (OLI et al., 2014).

Posteriormente, na etapa de secagem, é concluída a gelatinização do amido e sua retrogradação, o que torna os grãos mais resistentes às operações que usam fricção. Diminuir o teor de água dos grãos tem como propósito manter a qualidade dos grãos de arroz após a parboilização (ELIAS et al., 2015). Estudos apontam que a secagem do arroz parboilizado é mais difícil, uma vez a gelatinização do amido presente nos grãos de arroz dificulta a retirada de água (secagem) do produto (BELLO, TOLABA & SUAREZ, 2004, BUGGENHOUT et al., 2013).

Durante a parboilização do arroz as alterações que ocorrem nas características dos grãos devido à gelatinização do amido (modificação da forma do amido de cristalina para amorfa), lixiviação de compostos, reações enzimáticas, dentre outras, tornam os grãos de arroz mais firmes, translúcidos, duráveis e resistentes a quebras do que os grãos de arroz naturais (DORS et al., 2009; TAGHINEZHAD, et al., 2016).

Vários sistemas de parboilização estão sendo desenvolvidos com o objetivo de melhorar a qualidade do arroz e reduzir o consumo de energia. O efeito de parboilização utilizando o processo convencional em grãos de arroz tem sido extensivamente estudado. Muitos estudos visam reduzir o tempo de processo de parboilização do arroz. Bello, Tolaba, and Suarez (2004) adicionaram soluções alcalinas de NaOH e Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> durante o encharcamento e observaram a redução do tempo de processo. Processos que utilizam diferentes tipos de aquecimento estão sendo amplamente estudados atualmente, como a utilização infravermelho para a secagem dos grãos (BUALUANG, TIRAWANICHAKUL, TIRAWANICHAKUL, 2013).

### **3.4. Qualidade dos grãos**

Os grãos de arroz que passam pelo processo de parboilização possuem maior rendimento, bem como maiores benefícios nutricionais dos grãos de arroz, em comparação com o arroz branco polido, demonstrando a importância do processamento para promover maior qualidade dos grãos (YADAV & JINDAL, 2008).

As propriedades tecnológicas são indicadores diretos da qualidade do arroz e são afetadas pelo tempo, processamento e temperatura. A qualidade dos grãos de arroz parboilizados pode ser avaliada como rendimento de inteiros, manchados, danificados, dureza e solubilidade (textura), aroma, entretanto muitas dessas características variam consideravelmente em diferentes cultivares, sendo o amido o principal responsável pela textura e cocção dos grãos de arroz (VILLANOVA, 2017). O teor de amilose no arroz influencia as propriedades de textura destes grãos (principalmente adesividade), bem como no comportamento do grão durante a cocção (PAIVA, 2014).

Se o processo de parboilização for realizado por um tempo prolongado, devido ao calor e pressão, pode ocorrer o aumento da quantidade de grãos danificados bem como o aumento da coloração mais amarelada dos grãos, no entanto, tempos curtos demais podem proporcionar grãos não gelatinizados diminuindo a resistência mecânica dos mesmos (AMATO & ELIAS, 2005; DUTTA & MAHANTA, 2014). O processo de parboilização pode dificultar o processamento (descasque) por aumentar a dureza dos grãos, entretanto melhora a qualidade textuométrica e aumenta a qualidade nutricional (DUTTA & MAHANTA, 2014).

#### **3.4.1. Estrutura cristalina**

A cristalinidade dos grânulos de amido está relacionada com as duplas hélices formadas pelas cadeias laterais da amilopectina (PINTO, 2011), contudo o tamanho do cristal, o número de regiões cristalinas variam conforme a quantidade e comprimento da amilopectina (MIAO, ZHANG & JIANG, 2009).

A estrutura cristalina é avaliada a partir do difratograma obtido por difração de raio-X. Este difratograma pode apresentar três tipos de estrutura cristalina que foram identificadas e classificadas por Katz e Itallie em 1930 (tipo A, B, C e V) (Figura 4). Esta classificação em três tipos diferentes é devido aos ângulos de difração

específicos de cada grânulo de amido que se apresentam com o empacotamento em dupla-hélice das cadeias ramificadas da amilopectina (BIAN & CHUNG, 2016).

O padrão A é característico de amido de cereais, o padrão B de amido de tubérculos, de frutas, de milho com alto teor de amilose e amidos retrogradados, como o arroz parboilizado. O padrão C é característico de amido de leguminosas. Quando a amilose complexar com compostos orgânicos, água ou iodo será apresentado características do tipo V (MA & BOYE, 2018).

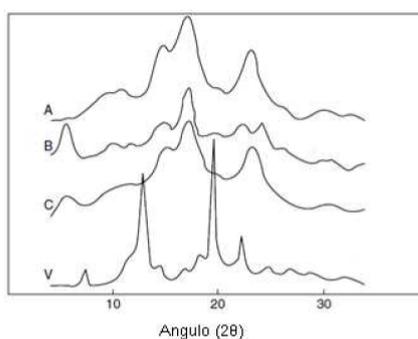


Figura 4 - Difratograma de raio-X de diferentes amidos. A- padrão tipo A de amidos de cereais, B- padrão tipo B de amidos de tubérculos, C- padrão tipo C de amidos de leguminosas e V- padrão tipo V de amilose complexada.

Fonte: Liu ( 2005)

### 3.4.2. Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A microscopia eletrônica de varredura e transmissão (MEV) é uma ferramenta amplamente utilizada para estudar diversas superfícies, pois realizada a caracterização superficial e estrutural das membranas, analisando a morfologia do material em uma escala de até cerca de 10 nm (SCHWANKE E PERGHER, 2012). A morfologia da superfície e suas características podem ser investigadas pela microscopia eletrônica de varredura, sendo a avaliação morfológica a principal função da referida técnica (PANKJ et al., 2018). Esta técnica proporciona a visualização da estrutura superficial da membrana bem como a seção transversal, desta forma, pode-se observar qualquer assimetria estrutural (BUENO et al., 2016).

Por se tratar de uma técnica versátil de observação e análise estrutural de objetos sólidos, a MEV pode ser utilizada em diversas áreas de conhecimento, como por exemplo, a indústria alimentícia e a odontologia. Por fornecer imagens com alta precisão pode ser usada como análise complementar de morfologia (OLIVEIRA, 2016).

Na figura 5 estão apresentadas as fotografias de micrografia de microscópio eletrônico de varredura de arroz de pericarpo preto, pode ser observada na figura 5 a diferença na estrutura dos grãos integrais, parboilizado e polido.

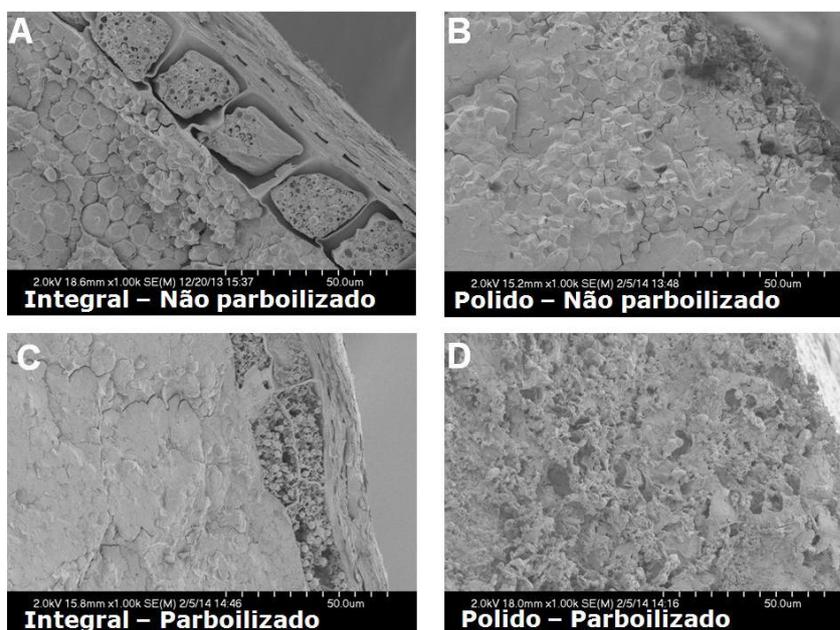


Figura 5 - Micrografia de microscópio eletrônico de varredura (MEV) de arroz com pericarpo preto (PP) integral e polido não parboilizado e parboilizado com foco em sua camada de aleurona.  
Fonte: PAIVA, 2014

### 3.4.3. Propriedades de pasta

As propriedades de pasta ou viscoamilográficas têm como principal objetivo avaliar as características de viscosidade de farinhas ou amidos isolados (BUENO, 2008). O analisador rápido de viscosidade (RVA) é o equipamento responsável por avaliar as propriedades de pasta. Os parâmetros avaliados pela técnica estão apresentados na Figura 6, temperatura de pasta (TP), pico de viscosidade (PV), quebra, viscosidade final (VF) e tendência à retrogradação.

O RVA pode auxiliar na avaliação das características de cocção dos grãos de arroz, uma vez que o RVA mede a viscosidade da amostra enquanto a mesma é agitada, aquecida e gelatinizada. Segundo Heineck et al. (2008), a complexação da amilose com lipídeos interfere nas propriedades de pasta da amostra, modificando a viscosidade observada.

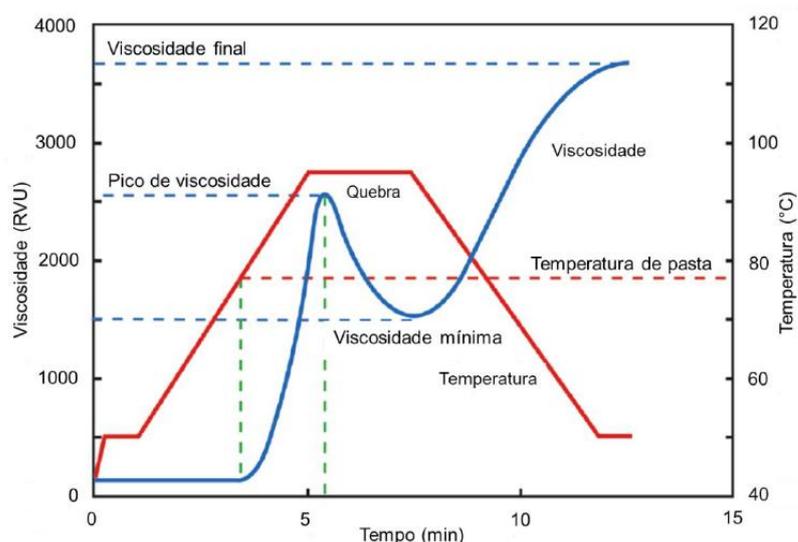


Figura 6 - Curva típica de viscosidade do RVA.  
Adaptado de Newport Scientific, 2001

### 3.5. Reações de escurecimento

A cor escura e o *aroma* são aspectos considerados negativos na qualidade do arroz parboilizado (LAMBERTS et al., 2008). As alterações de cor durante a parboilização podem ser causadas pela migração de pigmentos das camadas periféricas do grão, por escurecimento enzimático e não enzimático do tipo *Maillard* (reações entre açúcares redutores e aminoácidos, proteínas ou amins simples) (LAMBERTS et al., 2008; LI et al., 2013; LOYPIMAI et al., 2017; VILLANOVA et al., 2017). Nestas condições, o amido é hidrolisado em açúcares redutores por ação enzimática ou fermentativa, que durante a gelatinização reagirá com os aminoácidos, especialmente a lisina (HOU et al., 2017; MAŁGORZATA, KONRAD, & ZIELIŃSKI, 2016). Desta forma, os produtos da reação de *Maillard* podem ser utilizados como importantes indicativos, pois estes influenciam nas características supracitadas. A formação de compostos com aroma depende do tipo de açúcar, dos aminoácidos envolvidos, do tempo e da temperatura de reação assim como da quantidade de água no meio (VAN BOEKEL, 2006).

Na reação de *Maillard* as vias químicas gerais que conduzem a classes de compostos não são completamente conhecidas, assim como ainda não é conhecido como desviar as rotas de maneira desejada. Além disso, os estudos sobre o escurecimento utilizam sistemas modelo ao invés de alimentos reais, por isso os efeitos da matriz alimentar, incluindo os efeitos do pH, teor de água, catálise

específica, ainda não são completamente conhecidos (LI et al., 2009; VAN BOEKEL, 2006).

Nas últimas décadas, a reação de *Maillard* tem sido estudada em diversas matrizes (ARENA et al., 2017; FIORE et al., 2012; GUPTA et al., 2018; LI et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2016). A Figura 3 apresenta as etapas da reação de *Maillard*.

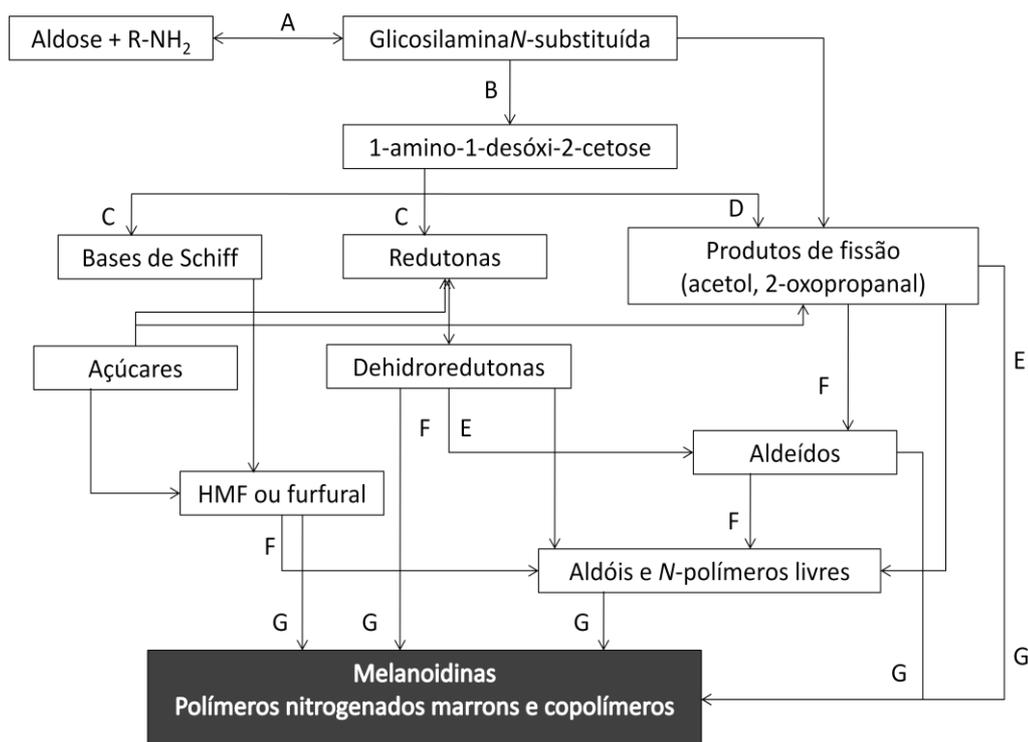


Figura 7-Etapas da Reação de Maillard. As letras A,B,C,D,E,F,G representam as etapas do processo. Adaptado de Nursten, 2005.

A reação de *Maillard* é iniciada pela condensação do grupamento amino das proteínas com o grupamento carbonila dos açúcares redutores e pode ser dividida em três etapas: inicial, intermediária e final.

Na etapa inicial há formação de substâncias incolores, com absorção na região do ultravioleta, sendo a primeira reação a condensação do açúcar com o grupamento amino (A). Posteriormente, ocorre o rearranjo de Amadori (B) e na etapa intermediária há a formação de substâncias de coloração amarela com absorção na região do UV (aproximadamente 280nm). A degradação de aminoácidos ocorre em seguida (C) e na etapa final (F) a condensação aldólica. Posteriormente, condensa em amina-aldeído (G), formando assim compostos nitrogenados (NURSTEN, 2005; QUEIROZ et al., 2014; SHIBAO & BASTOS, 2011).

Todas estas etapas (Figura 7) podem ocorrer simultaneamente e estão relacionadas. Além disso, todos os estágios da reação de *Maillard* são afetados pelos parâmetros da reação, como atividade da água, natureza dos reagentes, temperatura, tempo de reação e pH (SILVÁN et al., 2011).

Os produtos da reação de *Maillard* que apresentam coloração podem ser utilizados como parâmetros para avaliar os estágios da reação em alimentos, como por exemplo, a furosina e o 5-hidroximetil-2-furaldeído (HMF). Os estágios iniciais da reação podem ser avaliados pela quantificação da furosina, e os estágios intermediários através do HMF (GUERRA-HERNADEZ et al., 1999; LAMBERTS, 2008). O Hidroximetilfurfural (HMF) é um composto intermediário formado pela reação de *Maillard*, mas também pode ser formado pela degradação de hexoses a altas temperaturas em meio ácido (Figura 8), sendo considerado um importante marcador para dano térmico em produtos com altos índices de carboidratos. Após a complexação com grupamentos amina é que são formados pigmentos escuros. A formação de HMF está diretamente ligada à quantidade de calor que o produto foi exposto (RUFIAN-HENARES et al., 2001).

A determinação do HMF pode ser executada através de métodos espectrofotométricos e colorimétricos. Entretanto, estes métodos, apontam limitações, pois podem sofrer interferência de outras substâncias cromóforas, que absorvem radiação na mesma região de leitura.

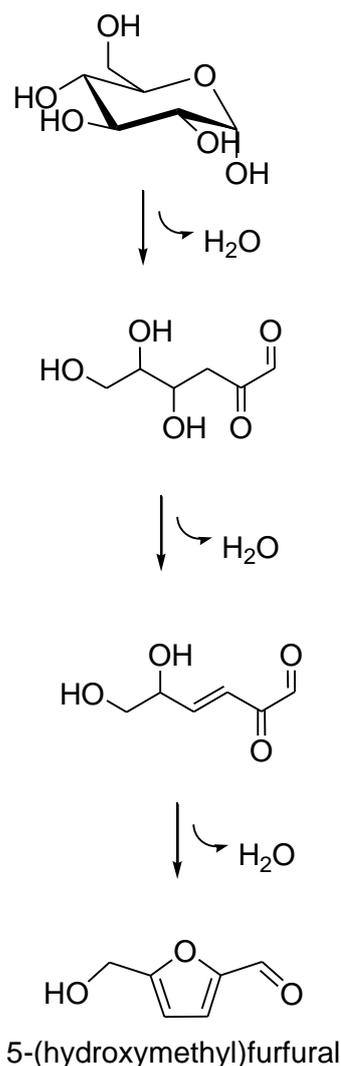


Figura 8 - Esquema formação HMF.  
Adaptado de Rufian-Henares et al., 2001.

Evitar o escurecimento e sabor desagradável com a utilização de novas técnicas é um dos maiores desafios nos processos de parboilização. Villanova et al. (2017) avaliaram a adição de compostos (ácido gálico, glicina, cisteína e glutatona) em diferentes concentrações, como inibidores de escurecimento durante a etapa de imersão. Eles relataram que a glicina e a glutatona foram mais eficazes na inibição do escurecimento dos grãos de arroz parboilizados. Vanier et al. (2015) avaliaram o encharcamento do arroz com adição de bissulfito de sódio em concentrações de 0,0 a 1,0% (65 ° C / 6 h) seguido de gelatinização durante 10 minutos a 116 ° C. Eles relataram um aumento na brancura em todas as concentrações utilizadas, no entanto, a redução de tiamina e o alto teor de sulfito residual ocorreram.

### 3.6. Micro-ondas

As diversas modificações que a parboilização provoca nos grãos de arroz estão intimamente vinculadas às técnicas empregadas. Ao invés das etapas tradicionais de encharcamento e gelatinização, o uso da irradiação micro-ondas, pode ser uma alternativa para a diminuição do tempo de processo. A irradiação microondas gera maior calor em pouco tempo, o que pode diminuir o tempo de processo e aumentar o rendimento do produto (FAN et al., 2014; LEWANDOWICZ, JANKOWSKI, & FORNAL, 2000; MATSUMOTO et al., 2011; STAROSZCZYK & JANAS, 2010).

A irradiação micro-ondas é utilizada há aproximadamente 40 anos como fonte de aquecimento em reações químicas e físicas. São da mesma natureza das ondas de rádio, ou da luz, diferindo apenas na frequência. No aquecimento de dielétricos, (utilização de energia eletromagnética em um determinado nível de frequência) há transformação da energia eletromagnética em calor. A vantagem da utilização deste tipo de aquecimento é que somente a parte que possui umidade do alimento absorve a energia, podendo ser denominada de aquecimento seletivo (JONES et al., 2002). O uso de micro-ondas tem sido amplamente utilizado no campo de processamento de alimentos, como secagem, aquecimento, cocção, pasteurização e preservação de alimentos (CHANDRASEKARAN, RAMANATHAN, & BASAK, 2013). Além disso, a irradiação de micro-ondas é usada para a extração de amido e óleos, pois permite processos mais limpos e de baixo custo. Grãos de arroz submetidos à irradiação de micro-ondas apresentam polarização de moléculas, isto ocorre devido à ação de um campo elétrico, que pode causar desnaturação momentânea das proteínas em grãos de arroz. O mecanismo de ação da irradiação microondas na estrutura de amido não está completamente elucidado na literatura, mas pode estar relacionado à taxa de aquecimento rápida (BILBAO-SÁINZ et al., 2007), e/ou à vibração de moléculas polares (PALAV & SEETHARAMAN, 2006). Os mecanismos de aquecimento mais importantes utilizando a irradiação micro-ondas são a rotação polar e a condução iônica (Figura 9) (PUROHIT, SHARMA & VYAS, 1977).

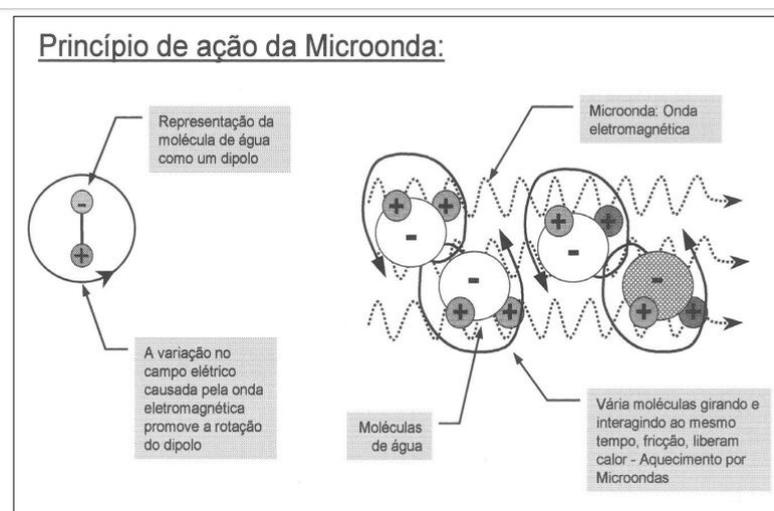


Figura 9 - Princípio de funcionamento micro-ondas.  
 Fonte: MAGALHÃES, LIMA & SOUZA, 2003.

O mecanismo por rotação polar ocorre devido à molécula de água apresentar-se como um dipolo elétrico. Perante a ação de um campo elétrico externo, esse dipolo tende a rotacionar, orientando-se na direção do campo elétrico, isto é, quando o campo elétrico é induzido, moléculas que possuem dipolo elétrico ou que podem se tornar dipolo induzido tendem a se alinhar com o campo, e quando este campo é removido, ocorrerá um relaxamento dielétrico, ou seja, as moléculas irão retornar a sua orientação não alinhada, dissipando a energia absorvida em forma de calor, que é resultante da ruptura das pontes de hidrogênio das moléculas de água (ANWAR et al. 2015; ROBERTS, 1977), e que facilita o processo de gelatinização do amido.

A condução iônica ocorre, pois a migração iônica no interior da amostra orientada pelo campo eletromagnético está relacionada com a indução do campo elétrico gerado, as moléculas ionizadas quando submetidas a este campo irão colidir com as moléculas e átomos não ionizados, portando a energia elétrica dos íons será convertida em calor durante as colisões (ROCHA, 1998). Esses efeitos diferenciam a irradiação micro-ondas do processo convencional, que realiza o aquecimento nas camadas periféricas transferindo o calor para as camadas internas.

O mecanismo de funcionamento do micro-ondas proporciona um aquecimento rápido, devido à ação de um campo elétrico o que pode ocasionar uma desnaturação momentânea nas proteínas, facilitando a absorção de água pelo amido, diminuindo o tempo de hidratação, e conseqüentemente o tempo de processo. No entanto, não está claro como o aquecimento por microondas afeta a

estrutura lamelar dos grânulos de amido, o que pode estar relacionado à taxa de aquecimento rápido, conforme relatado por Bilbao-Sáinz et al. (2007), ou ao forte movimento vibratório de moléculas polares (PALAV & SEETHARAMAN, 2006).

Alguns estudos envolvendo o processo de parboilização por micro-ondas foram encontrados, entretanto as propostas são diferentes do estudo apresentado no presente trabalho. A patente intitulada “Parboilização do arroz em micro-ondas” (4810511) também utiliza dois estágios de irradiação micro-ondas na sua parboilização de arroz, todavia deixa sua matéria-prima durante cinco horas de encharcamento antes de submeter à irradiação micro-ondas.

A patente “Parboilização do arroz com ultrassom em micro-ondas” (CN102240001 B) é um estudo bem recente com equipamentos modernos, entretanto a grande diferença deste estudo é que o processo de parboilização do arroz ocorre com o grão já descascado (**Method for preparing preboiled rice by ultrasound microwave**, 2012). Desta forma destaca-se que o presente trabalho apresenta um estudo diferenciado com a proposta de uma parboilização rápida com o intuito de diminuir a intensidade da cor do arroz parboilizado, utilizando somente um equipamento para as duas etapas do processo.

Wambura, Yang, and Wang (2008) avaliaram os efeitos do ultrassom na parboilização de arroz e observaram a redução no tempo de processo. Mais recentemente, Balbinoti, de Matos Jorge, and Jorge (2018) modelaram o mecanismo de hidratação do arroz e avaliaram os efeitos de diferentes condições hidrotérmicas e descobriram que, com o aumento da temperatura, o tempo necessário para a absorção de água durante o encharcamento foi reduzido. Poucos estudos investigam o impacto da parboilização nas propriedades dos grãos, usando a irradiação de micro-ondas. Bhattacharya and Ali (1985) usaram a irradiação micro-ondas durante a etapa de gelatinização, no entanto, antes de o arroz ser submetido à irradiação micro-ondas, foi realizado o encharcamento à 70 °C. Kaasova, Kadlec, Bubnik, and Pour (2001) avaliaram o efeito da irradiação micro-ondas na gelatinização e secagem do arroz, previamente hidratado.

A irradiação micro-ondas, devido sua alta eficiência, tem sido utilizada como metodologia alternativa também para a secagem de diversos materiais (AMBROS et al., 2018; MONTEIRO et al., 2018). A irradiação micro-ondas pode ser considerada um método de aquecimento volumétrico significa que todo o corpo do material pode ser aquecido simultaneamente, o que é completamente diferente do processo de

transferência de calor da superfície para o interior por condução de calor no processo de secagem a ar quente. Com base neste mecanismo de aquecimento, o processo de secagem por microondas geralmente possui um curto tempo de secagem e alta eficiência energética (JIANG et al.,2017).

## **4. Metodologia**

### **4.1. Material**

Arroz em casca da cultivar Puitá INTA CL (arroz com alto teor de amilose) foi utilizado. Os grãos foram cultivados sob sistema de irrigação em uma fazenda localizada em Pelotas, RS, Brasil. Os grãos do tipo longo-fino foram obtidos com umidade próxima a 20%. A cultivar Puitá foi selecionada porque o amido presente em sua constituição exige temperaturas mais elevadas ( $\geq 65$  ° C) para gelatinização em relação às demais cultivares. Assim, é possível demonstrar a eficiência da técnica utilizada, pois mesmo com maior temperatura as reações de escurecimento dos grãos não apresentaram intensificação (SIRISOONTARALAK & NOOMHORM, 2006).

Para realização das análises foram utilizados reagentes de grau analítico ou maior.

#### **4.1.1. Processo convencional de parboilização**

Para o processo de parboilização convencional, o arroz em casca (100 g) foi misturado com água destilada na proporção de 1: 2 (m / v) e colocado em béqueres. As amostras foram mantidas em banho-maria (Dubnoff Microprocessed – Q226M; Quimis, São Paulo, SP, Brasil) a temperatura controlada de 65 °C por 5 h. Posteriormente, os grãos hidratados foram autoclavados (Segundo Estágio, SE) (EL503 / 50, Eletrolab, São Paulo, SP, Brasil) a 110 ° C por 10 min. Os grãos de arroz foram secos em estufa (modelo 400-2ND; Nova Ética, São Paulo, SP, Brasil) a 40 °C até 13% de umidade (Figura 10).

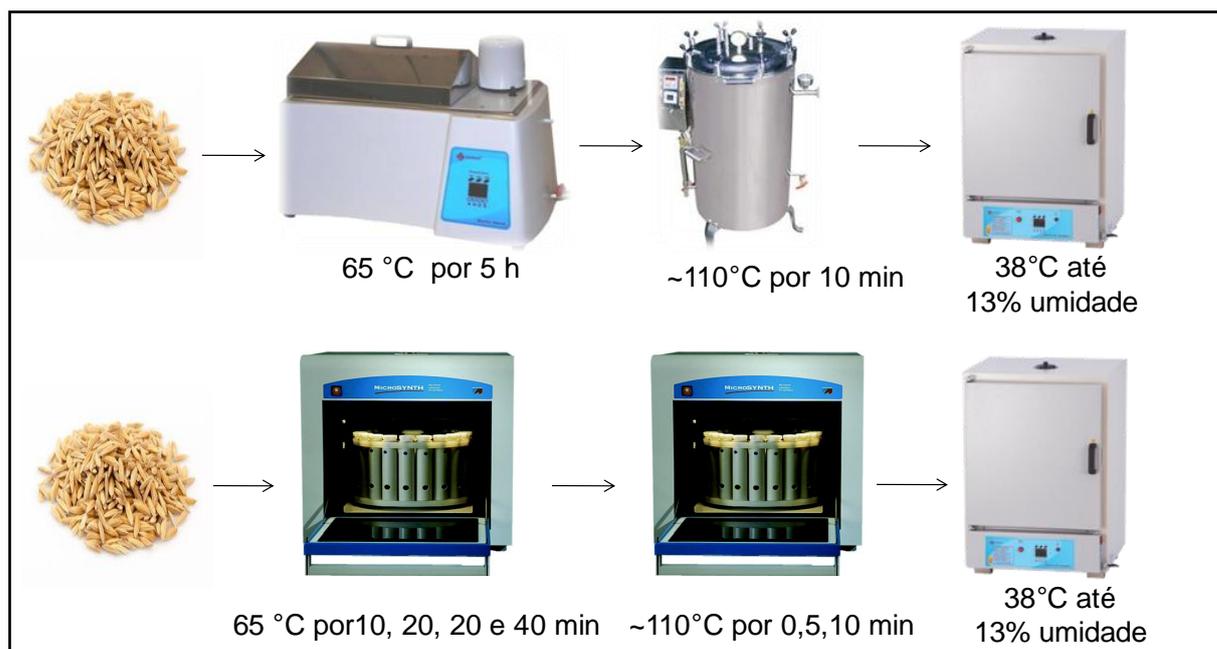


Figura 10 - Representação dos processos de parboilização utilizados.

#### 4.1.2. Processo de parboilização rápida via micro-ondas

As condições de temperatura durante a parboilização por micro-ondas (Multiwave 3000 Microwave Preparation System, Anton Paar, Áustria) foram as mesmas utilizadas para o processo convencional (2.2); entretanto, dois estágios de aquecimento foram utilizados, este sistema foi equipado com vasos de quartzo de alta pressão (pressão máxima e temperatura de 80 bar e 280 °C, respectivamente). No primeiro estágio (PE) para hidratar grãos, a temperatura utilizada foi de aproximadamente 65 °C (temperatura utilizada no processo convencional) foi obtida usando potência de 400 W. Na segunda etapa (SE), a água dos grãos hidratados foi removida, e a temperatura utilizada foi de aproximadamente 110 ° C (temperatura utilizada no processo convencional) foi obtida utilizando potência de 500 W. Para diminuir o teor de água dos grãos as mesmas condições que as utilizadas para o processo convencional foram utilizadas para o processo em micro-ondas (Figura 10).

Foram utilizados grãos de arroz (*Oryza sativa* L.), cultivados em Pelotas, Rio Grande do Sul, Brasil. Os grãos foram colhidos com um teor de umidade em torno de 20% e imediatamente transportados para o Laboratório de Pós-Colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos da Universidade Federal de Pelotas, e foram limpos e secos até aproximadamente 13% de umidade.

#### 4.1.3. Preparação das amostras

Os grãos de arroz parboilizados foram descascados e polidos com o uso de uma máquina de arroz Zaccaria (Tipo PAZ-1-DTA, Zaccaria, Limeira, SP, Brasil). Para análises de difração de raios X, SE-HPLC e propriedades de pasta, os grãos de arroz foram moídos com o auxílio de um moinho de laboratório (Perten 3100, Perten Instruments, Hägersten, Suécia) utilizando de uma peneira com malha 70 (210  $\mu$ m).

#### 4.2. Rendimento

O rendimento de grãos inteiros foi avaliado com auxílio de um *trieur* (cilindro alveolado) do engenho de provas Zaccaria durante um minuto. O comprimento dos grãos inteiros foi medido com paquímetro digital (Mitutoyo, Santo Amaro, SP, Brasil), e considerou-se inteiro os grãos com comprimento superior à 4,5mm, conforme descrito nas Normas Brasileiras Oficiais para Classificação de arroz (BRASIL, 2009). O percentual de grãos inteiros foi calculado segundo a equação.

$$\text{Grãos inteiros (\%)} = \left( \frac{\text{peso(g) dos grãos inteiros}}{\text{peso(g) do arroz polido}} \right) \times 100$$

#### 4.3. Grãos de arroz 100% gelatinizados e 100% não gelatinizados

Os grãos 100% gelatinizados e 100% não gelatinizados foram avaliados visualmente usando filtros polarizantes (Polarizadora de Arroz 11635, Comag, Panambi, RS, Brazil). Cinco repetições de 50 grãos foram distribuídas em um filtro polarizador sobre uma luz artificial, outro filtro polarizado foi colocado acima dos grãos proporcionando desalinhamento do feixe de luz pelo filtro. Em luz polarizada os grãos que se apresentaram opacos foram considerados não gelatinizados e os grãos 100% translúcidos foram considerados totalmente gelatinizados, e expressos em percentagem, como sugerido por Brasil, 2009

#### **4.4. Tempo de cocção**

O tempo de cocção das amostras de arroz foi determinado pelo teste de Ranghino (MOHAPATRA & BAL, 2006). Aproximadamente 5 g de arroz foram colocados em um béquer (250 ml) e foram fervidos 100 ml de água destilada ( $98 \pm 2$  °C). Após 10 min, 10 grãos foram removidos e prensados entre duas placas de vidro limpas para medir o grau de cocção. Uma luz polarizada foi usada para avaliar a translucidez e o tempo observado dos grãos. Isso foi repetido a cada minuto até que 90% dos grãos apresentassem translucidez.

#### **4.5. Avaliação microscópica**

A morfologia da seção transversal dos grãos de arroz foi visualizada usando um microscópio eletrônico de varredura (Microscópio Eletrônico de Varredura da Série - SEM; JEOL, JSM-6610LV; EUA). Os grãos de arroz foram cortados e aderidos a uma fita de carbono de dupla face no topo do *stub* para análise. Os grãos foram cobertos com uma camada de ouro e analisados usando MEV a uma voltagem de aceleração de 12 kV. As micrografias dos grãos de arroz foram avaliadas em ampliações de 43 e 150x.

#### **4.6. Difração de raios-X**

Os difratogramas de raios-X foram obtidos utilizando um difratômetro de raios-X (D8 Advance, Bruker, Atibaia, SP, Brasil). Os difratogramas foram registrados de 3° a 30° (2 $\theta$ ) com uma tensão alvo de 40 kV e corrente de 40 mA. A cristalinidade relativa foi estimada como a razão entre a área do pico e a área total do difratograma (RABEK, 1980).

#### **4.7. Distribuição de peso molecular de proteínas por SE-HPLC**

As amostras de farinha foram preparadas para cromatografia de exclusão por tamanho de alto desempenho (SE-HPLC) seguindo o método proposto por Buggenhout et al. (2013). Proteínas solúveis foram extraídas de 10 mg de farinha

usando tampão fosfato de sódio ( $0,05 \text{ mol L}^{-1}$ , pH 6,8 contendo 2,0% (m/v) de dodecil sulfato de sódio (SDS)). Uma alíquota de  $10 \mu\text{L}$  do sobrenadante foi injetada no HPLC (sistema Prominence UFLC; Shimadzu, Japão). A separação por exclusão de tamanho foi realizada usando a coluna Yarra  $3\mu \text{ SEC-2000}$  ( $300 \times 4.6 \text{ mm}$ ; Phenomenex, EUA). A eluição isocrática foi realizada a uma taxa de fluxo de  $0,35 \text{ mL min}^{-1}$  e a temperatura da coluna foi mantida constante a  $30^\circ \text{C}$ . Fosforilase (97000 Da), albumina (66000 Da), pepsina (34000 Da), citocromo (12000 Da), dextrano azul (2000 Da) e citidina (240 Da) foram utilizados como padrões.

#### **4.8. Propriedades de pasta**

As propriedades de pasta do arroz parboilizado foram determinadas usando um Analisador Rápido de Viscosidade (RVA-4; Newport Scientific Pty. Ltda., Warriewood, Austrália) usando uma Análise de Perfil Padrão 1, de acordo com o Método 61-02 da Associação Americana de Químicos de Cereais (AACC, 2000). A amostra (2,0 g de farinha) foi mantida a  $50^\circ \text{C}$  durante 1 min, aquecida a  $95^\circ \text{C}$  em 3,5 min e, depois, mantida a  $95^\circ \text{C}$  durante 2,5 min. Em seguida, eles foram resfriados a  $50^\circ \text{C}$  em 3,8 min e mantidos por 2 min. A velocidade de rotação foi mantida a 960 rpm durante 10 s e depois a 160 rpm ao longo do restante do processo. A viscosidade foi expressa em Unidades Rapid Visco (RVU).

#### **4.9. Perfil textuométrico**

O perfil textuométrico dos grãos cozidos foi determinado usando um analisador de textura (Stable Micro Systems Texture Analysers; TA.XT plus, UK) usando uma célula de carga de 5 kg com uma compressão de dois ciclos. As amostras de arroz foram preparadas em béqueres de 250 mL contendo 200 mL de água destilada a  $98 \pm 2^\circ \text{C}$ . A amostra (10 g) permaneceu durante o tempo previamente determinado para cozinhar os grãos de arroz com agitação constante. No final, toda a água de cocção foi removida e o arroz no interior do béquer foi retido para teste enquanto ainda estava quente. Utilizou-se uma força de compressão de programa de dois tempos *versus* tempo para comprimir as amostras a 90% da espessura original.

#### **4.10. Perfil colorimétrico**

O perfil colorimétrico dos grãos polidos foi realizado utilizando um colorímetro (Minolta CR 300, Osaka, Japão), utilizando os parâmetros de cores CIELAB (atributos  $L^*$ ,  $a^*$  e  $b^*$ ). O valor  $L^*$  mede de preto ( $L = 0$ ) para branco ( $L = 100$ ),  $a^*$  mede de verde (-a) a vermelho (+ a) e  $b^*$  de azul (-b) a amarelo (+ b).

#### **4.11. Brancura**

A coloração dos grãos foi avaliada através da determinação do perfil branquimétrico com o auxílio de um medidor Zaccaria (MBZ-1, Zaccaria, São Paulo, Brasil), os parâmetros de brancura, e os resultados foram avaliados e expressos usando a escala fornecida com o equipamento pelo medidor nas unidades da GBZ.

#### **4.12. Teor de sacarose, glicose e frutose**

A extração de glicose, sacarose e frutose foi realizada conforme descrito por Xiaoli et al. (2008) com modificações. As amostras de farinha (1,0 g) foram misturadas com 10 mL de etanol (80 mL de etanol / 100 mL de água destilada) e mantidas a 50 °C em banho-maria (Dubnoff Microprocessed - Q226M, Quimis, São Paulo, SP, Brasil) por 3 horas. A mistura foi centrifugada a 920 xg durante 5 min, e o sobrenadante foi coletado e reservado. O resíduo da centrifugação foi novamente ressuspensionado em etanol (80 mL de etanol / 100 mL de água destilada) e mantido em banho maria por 30 min. Os sobrenadantes foram combinados e concentrados em rota evaporador a 40 °C. Na sequência, as amostras foram filtradas em papel filtro e coletadas em placas de petri para secagem em estufa (Modelo 400-2ND, Nova Ética, São Paulo, SP, Brasil) com circulação de ar a 30 °C, até a completa evaporação do solvente. Após a secagem, as amostras foram suspensas em 2 mL da fase móvel (acetoneitrila-água, 70/30, v/v) e filtrado em filtro de nylon (0,22  $\mu$ m) para subsequente injeção (30  $\mu$ L) no sistema cromatográfico.

A quantificação de glicose, sacarose e frutose foi realizada por cromatografia líquida (HPLC, Shimadzu, Japão). O sistema HPLC foi equipado com injetor

automático, coluna (Luna NH2 modelo 100A - 250mm x 4, mm, 5 $\mu$ m - Phenomenex - USA) com uma bomba quaternária, detector de índice de refração, fase móvel composta por acetonitrila e água ultrapura (70:30, v:v), fluxo de 0.8 mL.min<sup>-1</sup> e tempo de corrida de 20 min. A extração dos açúcares foi realizada em duplicata, com duas repetições analíticas. A quantificação foi realizada por curva de calibração externa com os padrões (Sigma–Aldrich Co., St. Louis, MO, USA) de D-glicose, sacarose e frutose, e os resultados foram expressos em mg/L.

#### **4.13. Teor de 5-hidroximetil-2-furfural livre (HMF)**

O teor de HMF livre foi determinado conforme descrito por Lamberts et al. (2008) com modificações. As amostras de farinha de arroz desengorduradas (300 mg) foram colocadas em tubos de Falcon juntamente com ácido oxálico 0,15 M (3,0 mL) e mantidas sob agitação durante 30 minutos utilizando um homogeneizador de sangue (Modelo AP-22, Phoenix, Brasil). Na sequência, foram adicionados 2 mL de ácido tricloroacético (40:100 -v/v) e centrifugou-se o material a 3000g durante 10 minutos. Após centrifugação, 1,6 mL do sobrenadante foram coletados e misturados com 0,9 mL de ácido tiobarbitúrico (0,03M) para posterior incubação em banho-maria a 40 °C por 40 minutos.

A absorbância das amostras incubadas foi medida em espectrofotômetro a 443 nm e a quantificação realizada através de curva de calibração externa com padrão de HMF (Sigma–Aldrich Co., St. Louis, MO, USA). Os resultados foram expressos em  $\mu$ g/g.

#### **4.14. Teor de lisina livre**

A extração de lisina livre foi realizada conforme descrito por Nimbalkar et al. (2012). As amostras de farinha de arroz (500 mg) foram homogeneizadas com 2 mL de metanol (20mL/100 mL de água destilada) acidificado com 0,1% de ácido fórmico. A mistura foi agitada em vortéx e centrifugada a 16.222 xg durante 10 min a 4 °C. O sobrenadante coletado foi filtrado em filtro de nylon de 0,22  $\mu$ m para posterior análise por LC-MS/MS. Para a identificação e quantificação da lisina foi utilizado um cromatógrafo líquido (UFLC) (Shimadzu, Japão) acoplado a espectrômetro de massas de alta resolução do tipo quadrupolo-tempo de voo (Maxis

Impact, Bruker Daltonics, Bremen, Alemanha). Para a separação cromatográfica foi utilizada a coluna Cogent Diamond Hydride (150mm x 2,1mm -2,2µm - MicroSolv Technology, Eatontown, NJ, USA). As fases móveis foram água acidificada com 0,1% de ácido fórmico (A) e acetonitrila acidificada com 0,1% de ácido fórmico (B). O fluxo utilizado foi de 0,2 mL.min<sup>-1</sup> e a temperatura da coluna foi mantida a 40 °C. A quantificação foi realizada através de curva de calibração externa com o padrão de monoclórato de L-lisina. Os resultados foram expressos em mg/100g.

#### **4.15. Absorção de água**

A absorção de água dos grãos de arroz foi medida com o encharcamento dos grãos de arroz em água na proporção de 1:2 a 65 °C. O peso dos grãos foi medido em diferentes momentos para obter a quantidade de absorção de água (SARANGAPANI et al., 2015).

#### **4.16. Sólidos lixiviados**

Os sólidos lixiviados foram obtidos no encharcamento (PE). A água coletada foi pesada colocando-a em cápsulas de alumínio que foram mantidas em estufa por 24 horas a 105 °C. Os resultados foram expressos em porcentagem (BRAILE & CAVALCANTI, 1979).

#### **4.17. Teor de fósforo**

O teor total de fósforo na água de imersão foi determinado por espectrofotometria, conforme descrito por Ganesh et al. (2012). Os resultados foram obtidos através de uma curva de calibração e os resultados foram expressos em mg/L.

#### **4.18. Análise estatística**

A análise dos dados foi realizada por meio de análise de variância (ANOVA). As médias foram comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5% de significância. Os resultados apresentados são as médias de três repetições.

## 5. Resultados e discussões

### 5.1. Rendimento de inteiros

Os percentuais de grãos inteiros do arroz parboilizado por micro-ondas está apresentado na tabela 1, observa-se que com o aumento do tempo de processo a porcentagem de grãos inteiros aumenta. Para os grãos submetidos ao processo de parboilização convencional a porcentagem de grãos inteiros foi de aproximadamente 99% altos índices de grãos inteiros são importantes para determinar a qualidade do processo. Para a parboilização por micro-ondas a utilização de uma segunda etapa de irradiação proporcionou maiores rendimentos de grãos inteiros. Os grãos de arroz submetidos ao segunda etapa por 5 e 10 minutos apresentaram reduções nos grãos quebrados e não gelatinizados, comparando aos grãos de arroz parboilizado pelo processo convencional. Vanier et al. (2015), relataram uma redução em grãos de arroz quebrados e não gelatinizados submetidos ao processo de parboilização convencional, com tempo de imersão de 6 horas a 65 °C e tempo de gelatinização de 10 minutos a 110 °C.

Tabela 1 - Percentual de grãos inteiros dos grãos de arroz parboilizado por micro-ondas

		Grãos inteiros (%)			
Tempo de aquecimento		Primeira etapa (min)			
Segunda etapa (min)		10	20	30	40
0		88,29 ± 0,34f	89,40 ± 0,13e	88,05 ± 0,29f	92,36 ± 0,59d
5		96,67 ± 0,11bc	97,61 ± 0,54ab	98,24 ± 0,64a	96,39 ± 0,29c
10		97,81 ± 0,38a	97,53 ± 0,28ab	97,57 ± 0,36ab	98,44 ± 0,50a

A média seguida por letras diferentes maiúsculas diferem pelo teste de Tukey (P <0,05).

Valores mais baixos de grãos quebrados estão diretamente associados ao aumento do grau de gelatinização. Durante o processo de parboilização, ocorre desestruturação parcial ou total dos grânulos de amido, pela desordem das estruturas semicristalinas e amorfas (LI & GILBERT, 2018). Durante o estágio final

de parboilização ocorre o processo de retrogradação porque a água é removida, o que favorece a retrogradação entre as moléculas de amilose e amilopectina, levando a uma estrutura mais organizada (ZOHOUN et al., 2018).

## 5.2. Grãos de arroz 100% gelatinizados e 100% não gelatinizados

Na tabela 2 estão apresentados os resultados referentes ao grau de gelatinização dos grãos de arroz submetidos a irradiação micro-ondas. O aumento do índice de grãos 100% gelatinizados foi observado com o aumento do tempo de processo. Foi observada a necessidade da segunda etapa de irradiação para diminuir a porcentagem de grãos 100% não gelatinizados e aumentar a porcentagem de grãos 100% gelatinizados. Os resultados apresentados indicam que somente uma etapa de irradiação não são suficientes para parboilizar os grãos de arroz, necessitando uma segunda etapa de exposição a irradiação micro-ondas, com maior temperatura.

Tabela 2 - Porcentagem de grãos gelatinizados e não gelatinizados submetidos a irradiação micro-ondas

Grãos 100% gelatinizados				
Tempo de aquecimento	Primeira etapa (min)			
Segunda etapa (min)	10	20	30	40
0	0 ± 0,0f	0 ± 0,0f	0 ± 0,0f	0 ± 0,0f
5	14 ± 2,4e	33,5 ± 2,8d	56 ± 0,8a	40 ± 1,6c
10	40 ± 2,9c	49 ± 1,0b	48,5 ± 3,1b	44,5 ± 2,2bc
Grãos 100% não gelatinizados				
Tempo de aquecimento	Primeira etapa (min)			
Segunda etapa (min)	10	20	30	40
0	100 ± 0,0a	100 ± 0,0a	87,5 ± 1,3b	96,5 ± 1,7 <sup>a</sup>
5	2,5 ± 1,0d	7,5 ± 1,0c	0 ± 0,0d	0 ± 0,0d
10	0,5 ± 0,5d	1,0 ± 0,6d	0 ± 0,0d	0 ± 0,0d

A média seguida por letras diferentes maiúsculas diferem pelo teste de Tukey (P <0,05).

Modificações nos grãos de arroz podem auxiliar na gelatinização dos grânulos de amido, como por exemplo, a mudança de pH. Segundo Ohishi et al. (2003) ao diminuir o pH dos grãos de arroz, ocorre desnaturação protéica proporcionando maior absorção de água pelos grãos e por consequência maior grau de gelatinização. Os mecanismos de aquecimento por micro-ondas também sugerem uma desnaturação protéica (momentânea) durante a irradiação, desta forma quanto maior o tempo de exposição maior será o grau de gelatinização, corroborando com os resultados obtidos.

### **5.3. Tempo de cocção**

Na tabela 4 estão apresentados os resultados para o tempo de cocção dos grãos de arroz submetidos a irradiação micro-ondas, pode ser observado que os tratamentos submetidos a irradiação micro-ondas apresentaram tempo de cocção menor quando relacionados ao tempo de cocção dos grãos de arroz parboilizados pelo processo convencional, que foi de aproximadamente 19 minutos.

Observou-se que os grãos submetidos a menores tempos de irradiação (10, 20 e 30 min) apresentaram menor tempo de cocção. Menos tempo de irradiação reduziu o tempo de cozimento dos grãos (Tabela 4) este comportamento pode ser atribuído à rápida absorção de água que a irradiação micro-ondas proporciona devido seu mecanismo de aquecimento.

A maioria dos grãos submetidos apenas ao PE de irradiação apresentou menor tempo de cocção em relação aos submetidos ao processo SE e convencional (Tabela 4). O maior tempo de processo propicia a desnaturação das proteínas o que pode enfraquecer a matriz proteína-amido e levar a diminuição do tempo de cocção (VANIER et al., 2015).

Tabela 3 - Tempo de cocção dos grãos de arroz submetidos a irradiação micro-ondas

Tempo de cocção (min)				
Tempo de aquecimento	Primeira etapa (min)			
Segunda etapa (min)	10	20	30	40
0	13,18 ± 0,25e	14,87 ± 0,75de	14,0 ± 0,71e	16,17 ± 0,23cd
5	14,03 ± 0,02e	14,01 ± 0,69e	16,15 ± 0,40cd	18,63 ± 0,81ab
10	16,85 ± 0,49bcd	17,30 ± 0,28bc	18,33 ± 0,32ab	17,63 ± 0,74abc

<sup>a</sup>Os resultados são as médias de três determinações, Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ). Tempo de cocção dos grãos de arroz parboilizado convencional  $19,47 \pm 0,44^a$ .

#### 5.4. Avaliação microscópica

A figura 11 apresenta a morfologia interna dos grãos de arroz PE10SE0 e PE40SE10 que representam os extremos de tratamento (tempos de irradiação mais curtos e mais longos). Diferenças morfológicas foram observadas na superfície dos grãos de arroz (Figura 11), com fissuras presentes no endosperma dos grãos parboilizados e não parboilizados devido, talvez, ao atrito durante o polimento dos grãos. Independentemente do tratamento, a morfologia do arroz parboilizado foi diferente da do arroz não parboilizado (Figura 11 G e H), e o arroz parboilizado tem uma massa mais uniforme, com menor distinção de compartimentos celulares e fissuras foram parcialmente consolidadas e tornaram-se menores (Figura 11 A, B, C e D).

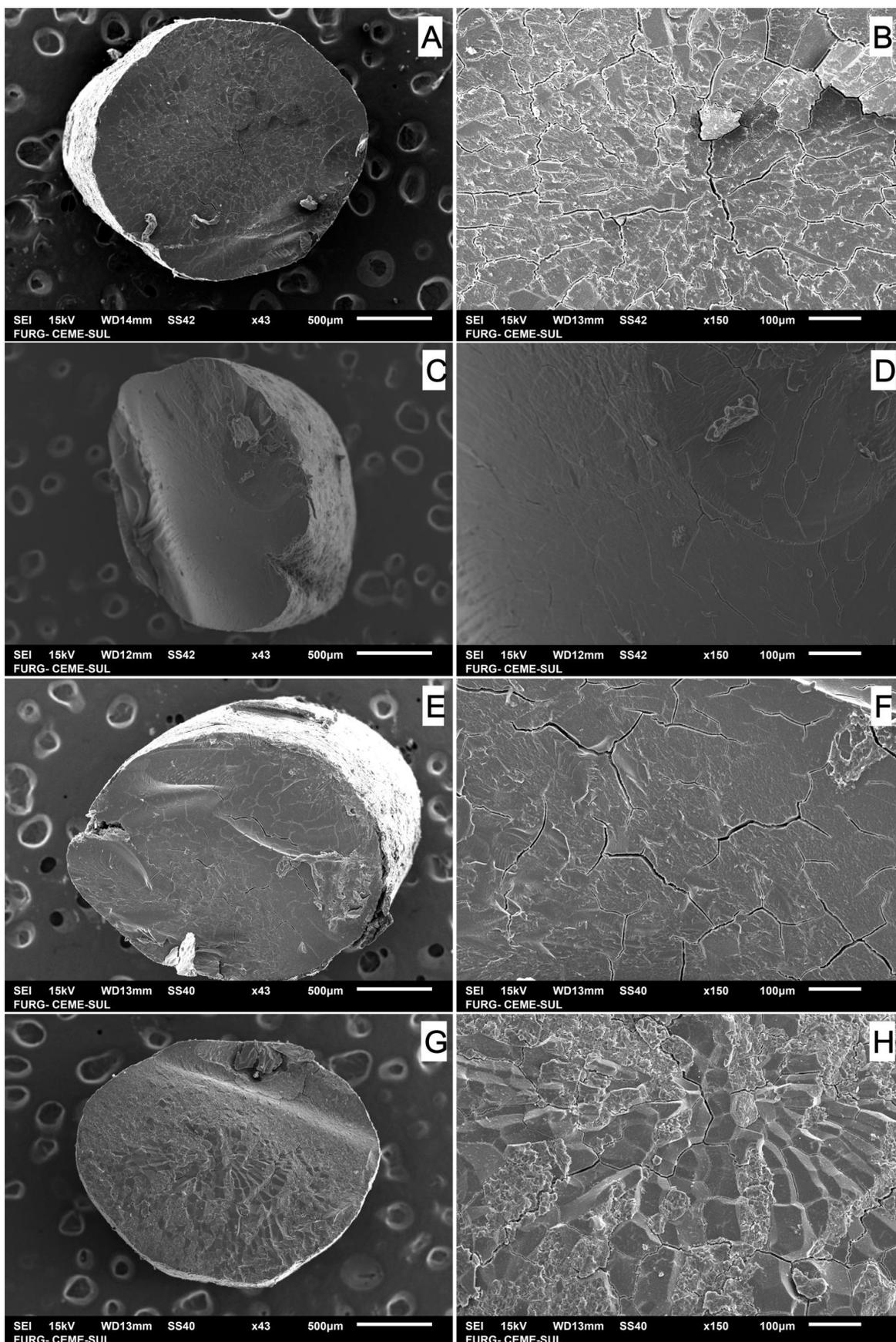


Figura 11 - Microscopia eletrônica de varredura (MEV) de grãos de arroz polidos: PE10SE0 em x43 (A) e x150 (B); PE40SE10 em x43 (C) e x150 (D); parabolizado convencional x43 (E) e x150 (F); não-parboilizado em x43 (G) e x150 (H). PE= Primeiro Estágio (min); SE= Segundo Estágio (min).

Paiva et al. (2016) observaram mudanças na estrutura do grão após a parboilização e atribuíram esse comportamento à gelatinização dos grânulos de amido. No primeiro estágio do processo de irradiação micro-ondas os grânulos de amido não são completamente gelatinizados, e um segundo estágio é necessário para a completa gelatinização (SITTIPOD & SHI, 2016), como pode ser observado na tabela 2 e figuras 8 e 9. Segundo Pineda-Gómez, Rosales-Rivera e Rodríguez-García (2012), o aquecimento induz a ruptura dos complexos de amido. Portanto, as moléculas de amido são orientadas aleatoriamente, permitindo que fissuras e espaços intermoleculares no grão sejam preenchidos, formando uma estrutura sólida com alto grau de compactação, o que torna os grãos mais resistentes ao processamento. A morfologia dos demais tratamentos (disponível no Apêndice A) foi semelhante aos tratamentos morfológicos apresentados na Figura 11. A maior porosidade dos grãos de arroz também influencia no tempo de cozimento, grãos mais porosos apresentaram menor tempo de cocção (Tabela 4). Segundo Prasert e Suwannaporn (2009), rachaduras e poros no arroz permitem a entrada rápida de água e maior transferência de calor durante a cocção.

### **5.5. Difratogramas de raios-X**

Os difratogramas de raios-X e cristalinidade relativa estão apresentados na figura 12. Os grânulos de amido são gelatinizados durante o processo de parboilização, para que possam se reorganizar durante a secagem quando ocorre a retrogradação (PAIVA et al., 2016). O arroz não parboilizado apresentou uma estrutura cristalina do tipo A, com os principais picos em um ângulo de difração ( $2\theta$ ) de  $15^\circ$ ,  $17^\circ$ ,  $18^\circ$  e  $23^\circ$  (Figura 12).

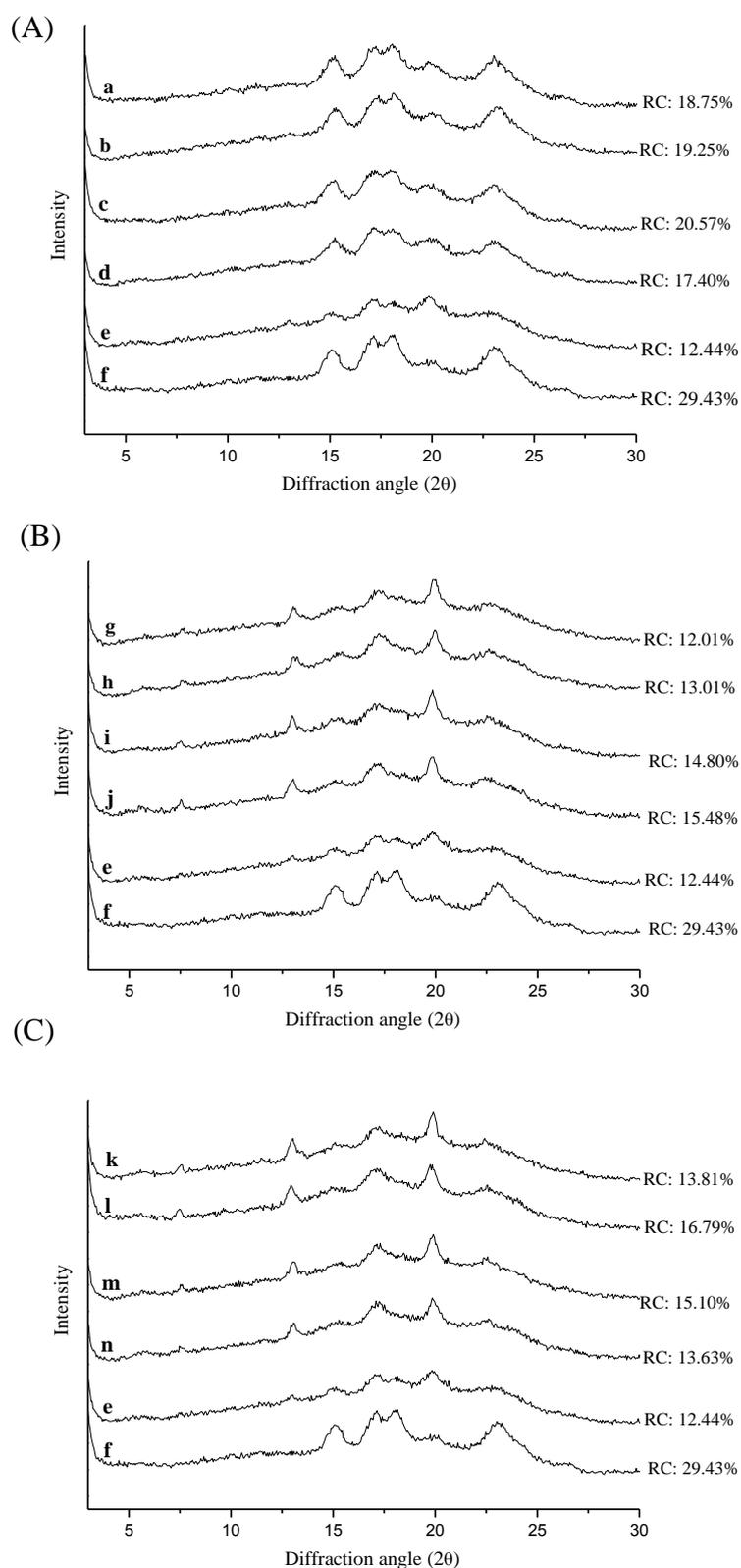


Figura 12 - Difração de raios X de grãos de arroz parboilizado por parboilização rápida por microondas, convencional parboilizado e não parboilizado. PE = Primeiro Estágio (min); SE = Segundo Estágio (min) **a**-PE10SE0; **b**-PE20SE0; **c**-PE30SE0; **d**-PE40SE0; **g**-PE10SE5; **h**-PE20SE5; **i**-PE30SE5; **j**-PE40SE5; **k**-PE10SE10; **l**-PE20SE10; **m**-PE30SE10; **n**-PE40SE10; **e**-Arroz parboilizado Convencional; **f**-Arroz não parboilizado.

Os picos de difração são atribuídos às lamelas cristalinas dos grânulos de amido distribuídos no endosperma dos grãos de arroz (DUTTA et al., 2016). Geralmente, no arroz não parboilizado, a estrutura cristalina predominante é do tipo A, enquanto que no arroz parboilizado coexistem estruturas cristalinas do tipo B e V (OLI et al., 2014; PAIVA et al., 2016).

Os grãos de arroz submetidos somente a primeira etapa de irradiação apresentaram estrutura cristalina muito semelhante à do arroz não parboilizado (tipo A) indicando apenas uma gelatinização parcial do amido, como observado via microscopia (Figura 11). O processo de gelatinização modifica a estrutura organizacional do amido em vários cereais. Estudando amidos resistentes a enzimas Eerlingen, Crombez e Delcour (1993) relataram que o amido de trigo gelatinizado retrogradado pode resultar em cristalinidade do tipo A ou B dependendo da temperatura de recristalização. Cai e Shi (2013) também observaram a formação de esferulitos de amido do tipo A e B indicando cadeia linear curta, dependendo das condições de cristalização. Grãos de arroz parboilizado submetidos a segunda etapa de irradiação de micro-ondas (Figura 12 B e C) apresentaram comportamento similar quando comparados ao arroz convencionalmente parboilizado com estruturas tipo B e V.

A parboilização pode induzir uma mudança no padrão de raios-X do tipo A do arroz ao padrão tipo V, típico de complexos amilose-lipídeos, e pode indicar retrogradação do amido, que é caracterizada pelo tipo B (TESTER, KARKALAS, & QI, 2004). O arroz não parboilizado apresentou maior cristalinidade relativa do que o arroz submetido aos demais tratamentos (Figura 12). A irradiação afetou a cristalinidade relativa dos grãos de arroz parboilizados por micro-ondas, embora com menos intensidade do que nos grãos convencionalmente parboilizados (Figura 12). Os grãos submetidos ao PE de irradiação apresentaram maior cristalinidade relativa em relação àqueles também submetidos ao SE (Figura 9). Esse comportamento pode ser atribuído à ruptura de cristalitos de amilopectina devido à temperatura mais alta (110 °C) nesse estágio.

Segundo Biliaderis (1991), são as áreas cristalinas do amido que mantêm sua estrutura granular, controlam seu comportamento na presença de água e apresentam resistência à degradação enzimática ou química. Yang et al. (2017) avaliaram o uso da irradiação de microondas no amido de milho e observaram que com o curto tempo de irradiação (5 min), a estrutura cristalina permaneceu similar à

do amido nativo. A cristalinidade relativa diminuiu em relação à do amido nativo, no entanto, indicando que a irradiação de microondas destruiu a região amorfa.

Com tempos de exposição mais curtos e sem o SE de irradiação, também foi observado no presente estudo que os grãos de arroz apresentaram uma estrutura cristalina semelhante à do arroz não parboilizado. Yang et al. (2017) também observaram uma diminuição na intensidade do pico com o aumento do tempo de irradiação, sugerindo que a irradiação de microondas danifica a região cristalina. Grãos de arroz parboilizados convencionalmente e irradiados com micro-ondas SE exibiram uma diminuição na intensidade do pico de  $17^\circ$  e a aparência de um pico de  $20^\circ$  em relação aos não parboilizados e grãos irradiados em apenas um estágio (Figura 9). Esse comportamento pode estar relacionado à retrogradação do amido (FU et al., 2013; NAGATAKI et al., 2018). Além disso, os grãos irradiados apresentaram menor cristalinidade relativa (Figura 12), maior absorção de água pelo amido, menor tempo de cocção, bem como menor porcentagem de grãos 100% gelatinizados.

#### **5.6. Distribuição de peso molecular de proteínas (SE-HPLC)**

A distribuição de peso molecular das proteínas está apresentada na figura 13. Os tratamentos PE10SE0 e PE40SE10 foram selecionados para análise dos perfis de distribuição de peso molecular da proteína (Figura 13), porque esses tratamentos representaram os dois extremos, menor e maior, respectivamente, tempo de exposição a irradiação micro-ondas. Os demais tratamentos apresentaram comportamento semelhante ao apresentado na figura 13 (Apêndice B).

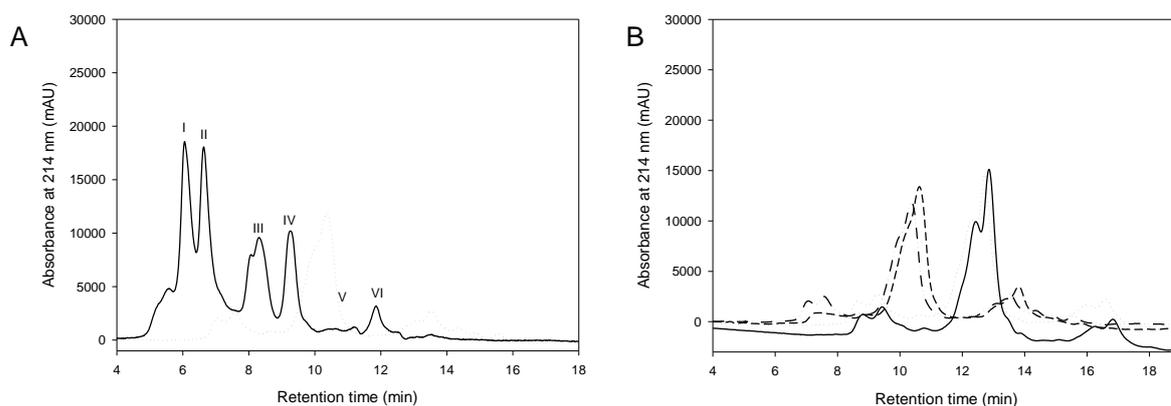


Figura 13 - Distribuição do peso molecular de proteínas de grãos de arroz parboilizado por parboilização rápida por micro-ondas, parboilizado convencional e não parboilizado. (A- Arroz não parboilizado; Arroz parboilizado convencional; B- PE10SE0; PE20SE5; PE40SE10; Arroz parboilizado convencional).

As frações I e II têm pesos moleculares de aproximadamente 97000 e 66000 respectivamente (Figura 13) e representam a região constituída por dímeros, trímeros e formas de proteínas mais polimerizadas. A fração III, com um peso molecular entre 12.000 e 34.000 Da, representa as subunidades da glutelina ( $\alpha$ - $\beta$ ). A fração IV representa as subunidades de ácido livre ( $\alpha$ ) e básica ( $\beta$ ) das glutelinas de arroz, e as frações V e VI representam proteínas de baixo peso molecular, principalmente albuminas, globulinas e prolaminas.

Um aumento na solubilidade da proteína foi observado para tratamentos submetidos à irradiação micro-ondas com tempos de exposição mais curtos, sugerindo que a irradiação primeiro modifica a matriz proteica para posterior modificação do amido. Este aumento na solubilidade da proteína foi observado para corresponder às subunidades de ácido livre ( $\alpha$ ) e básica ( $\beta$ ) na fração IV, sugerindo que os tratamentos facilitaram a clivagem de ligações dissulfeto que se ligam covalentemente a essas subunidades de glutelina de arroz (VAN DER BORGHT et al., 2006). Normalmente, as proteínas do grão de arroz resultam em baixa solubilidade em soluções aquosas (LIU et al., 2011). A maior solubilidade dessas frações expande a utilidade das proteínas do arroz em produtos alimentícios, por exemplo, em produtos com maior porcentagem de água, devido à facilidade de interação com a água (combinação / retenção de água), permitindo e melhorando a textura e estabilidade do produto.

O aumento na solubilidade dessas frações pode estar associado ao menor tempo de cocção dos grãos submetidos à irradiação micro-ondas. A irradiação micro-ondas propiciou aumento na solubilidade das frações IV e VI em relação à solubilidade do arroz convencionalmente parboilizado (Figura 13). De acordo com os resultados acima, os grãos de arroz submetidos a um SE de irradiação por 10 min apresentaram um perfil protéico semelhante ao arroz convencionalmente parboilizado.

### **5.7. Propriedades de pasta e perfil texturométrico**

A Tabela 4 descreve as propriedades viscoamilográficas dos grãos de arroz. A parboilização reduziu o pico de viscosidade, a viscosidade inicial e aumentou a quebra, a viscosidade final e a retrogradação. Observou-se que o aumento do tempo de irradiação no primeiro estágio reduziu o pico de viscosidade quando também foi submetido a 0 e 5 min no segundo estágio. No entanto, em grãos submetidos a irradiação de 10 min no segundo estágio, esse comportamento não foi verificado e os valores permaneceram abaixo de 9,2 RVU. PE20SE5 e PE30SE5 foram os mais parecidos com a parboilização convencional.

Pode ser observado que tempos de irradiação menores influenciaram para uma viscosidade de pasta mais elevada (103,59 RVU). Com exceção do tratamento submetido somente a 10 minutos na primeira etapa que apresentou menor viscosidade, o que pode ser atribuído a modificação protéica devido a irradiação micro-ondas, como foi observado no teste de distribuição de peso molecular de proteínas (Figura 13). Foi observado que a irradiação por apenas 10 minutos modificou as proteínas do arroz, modificando também as propriedades de pasta.

Os grãos submetidos a segunda etapa de irradiação micro-ondas apresentaram uma diminuição no pico de viscosidade quando relacionados aos submetidos somente a primeira etapa. Como por exemplo, a viscosidade do tratamento PE20SE5 foi semelhante aos grãos de arroz submetidos ao processo convencional.

A vibração molecular causada pelas microondas, devido à alta taxa de aquecimento, influencia a estrutura lamelar do amido, levando à gelatinização e redução da viscosidade da pasta. Segundo Fan et al. (2014) ainda não está claro como o aquecimento por micro-ondas afeta a estrutura lamelar dos grânulos de

amido, no entanto, o impacto eletromagnético leva à rápida vibração de moléculas polares afetando a estrutura lamelar do amido devido à rápida taxa de aquecimento das microondas, arranjos lamelares dentro da região semi-cristalina do amido são destruídos antes do início da gelatinização.

Tabela 4 - Propriedades de pasta do arroz parboilizado via micro-ondas, parboilizado pelo processo convencional e não parboilizado

Tempo de aquecimento		Pico de viscosidade (RVU)	Viscosidade inicial (RUV)	Quebra (RVU)	Viscosidade final (RUV)	Retrogradação (RVU)
(min) <sup>a</sup>						
Primeiro Estágio	Segundo Estágio					
10		26,09 ± 5,89 <sup>e</sup>	23,34 ± 5,54 <sup>f</sup>	2,75 ± 0,35 <sup>de</sup>	31,34 ± 7,66 <sup>e</sup>	8,00 ± 2,12 <sup>d</sup>
20	0	120,38 ± 1,94 <sup>b</sup>	103,59 ± 0,94 <sup>b</sup>	16,79 ± 1,00 <sup>a</sup>	162,42 ± 3,42 <sup>b</sup>	58,83 ± 2,47 <sup>b</sup>
30		85,83 ± 7,07 <sup>c</sup>	85,17 ± 7,19 <sup>c</sup>	11,67 ± 1,53 <sup>bc</sup>	105,63 ± 7,01 <sup>c</sup>	32,46 ± 0,18 <sup>c</sup>
40		84,42 ± 0,83 <sup>c</sup>	70,84 ± 2,00 <sup>d</sup>	13,59 ± 1,18 <sup>b</sup>	103,50 ± 1,17 <sup>c</sup>	32,67 ± 0,83 <sup>c</sup>
10	5	62,92 ± 2,83 <sup>d</sup>	52,96 ± 3,59 <sup>e</sup>	9,96 ± 0,76 <sup>c</sup>	79,92 ± 4,83 <sup>d</sup>	26,96 ± 1,24 <sup>c</sup>
20		16,50 ± 0,35 <sup>ef</sup>	13,75 ± 0,11 <sup>fg</sup>	2,75 ± 0,24 <sup>e</sup>	21,21 ± 0,41 <sup>ef</sup>	7,46 ± 0,30 <sup>d</sup>
30		10,96 ± 0,18 <sup>f</sup>	9,67 ± 0,23 <sup>g</sup>	1,29 ± 0,06 <sup>e</sup>	13,00 ± 0,35 <sup>ef</sup>	3,34 ± 0,12 <sup>e</sup>
40		9,38 ± 0,06 <sup>f</sup>	8,67 ± 0,12 <sup>d</sup>	0,71 ± 0,06 <sup>e</sup>	10,75 ± 0,11 <sup>f</sup>	2,09 ± 0,23 <sup>e</sup>
10	10	8,84 ± 0,23 <sup>f</sup>	8,21 ± 0,30 <sup>g</sup>	0,63 ± 0,06 <sup>e</sup>	10,50 ± 0,11 <sup>f</sup>	2,30 ± 0,18 <sup>e</sup>
20		11,34 ± 4,36 <sup>f</sup>	10,75 ± 4,24 <sup>g</sup>	0,59 ± 0,12 <sup>e</sup>	12,67 ± 4,24 <sup>ef</sup>	1,92 ± 0,00 <sup>e</sup>
30		8,55 ± 0,18 <sup>f</sup>	7,88 ± 0,29 <sup>g</sup>	0,67 ± 0,12 <sup>e</sup>	10,38 ± 0,53 <sup>f</sup>	2,50 ± 0,24 <sup>e</sup>
40		9,67 ± 0,00 <sup>f</sup>	9,00 ± 0,00 <sup>g</sup>	0,67 ± 0,00 <sup>e</sup>	11,17 ± 0,12 <sup>f</sup>	2,17 ± 0,12 <sup>e</sup>
Parboilizado Convencional		14,63 ± 0,42 <sup>ef</sup>	13,46 ± 0,53 <sup>fg</sup>	1,17 ± 0,12 <sup>e</sup>	16,50 ± 0,11 <sup>ef</sup>	3,04 ± 0,41 <sup>e</sup>
Não Parboilizado		203,10 ± 2,95 <sup>a</sup>	198,42 ± 3,66 <sup>a</sup>	5,34 ± 0,37 <sup>d</sup>	433,34 ± 12,395 <sup>a</sup>	249,13 ± 13,26 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Os resultados são as médias de três determinações. Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

Os grãos de arroz submetidos a parboilização utilizando irradiação de microondas ou o processo convencional apresentaram menor retrogradação em relação ao arroz não parboilizado (Tabela 4). Este comportamento está relacionado à perda de sólidos lixiviados na irradiação micro-ondas e na parboilização convencional. Componentes como a amilose, responsáveis pela retrogradação do amido, são lixiviados durante o encharcamento (LERMA-GARCIA et al., 2009). Além disso, a irradiação de micro-ondas não altera apenas a estrutura molecular do amido, mas também a de outros componentes do arroz, como proteínas, afetando adicionalmente suas propriedades de pasta (ZHAO et al., 2007), como pode ser observado na tabela 3, bem como tempo de cocção (Tabela 2) e distribuição do peso molecular das proteínas (Figura13).

Quando os grãos são parboilizados usando irradiação micro-ondas, moléculas polares são orientadas de acordo com o campo magnético aplicado. Após o desaparecimento do campo magnético aplicado, a orientação molecular também se dissipa. Portanto, tempos de irradiação mais longos podem resultar em mudanças nas proteínas e amido de grãos devido ao rápido aquecimento causado pela polarização das moléculas. A Tabela 5 descreve o perfil texturométrico dos grãos de arroz parboilizados por irradiação de microondas ou o processo convencional após o cozimento. Os grãos submetidos ao maior tempo de exposição a irradiação micro-ondas e segunda etapa de irradiação apresentaram perfil texturométrico semelhante ao processo convencional. A dureza dos grãos aumentou com o aumento do tempo de exposição e com o uso do SE de irradiação de microondas.

Nasirahmadi et al. (2014) relataram que um aumento na intensidade da parboilização aumenta a dureza dos grãos de arroz. Mudanças na textura do arroz parboilizado, como aumento da dureza, podem estar relacionadas ao aumento da adesão / coesão dos grânulos de amido, possivelmente influenciando a solubilidade do amido e da proteína na água de cozimento (PRASERT & SUWANNAPORN, 2009).

Gomosidade, coesividade e mastigabilidade dos grãos de arroz parboilizados por irradiação micro-ondas e pelo processo convencional não apresentaram diferenças ( $p \leq 0,05$ ) (Tabela 5). Normalmente, a variação nesses parâmetros é observada em grãos contendo diferentes níveis de amilose, ao utilizar a mesma cultivar dificilmente ocorrerá variação nestes parâmetros. Durante o processo de parboilização, ocorre desestruturação parcial ou total dos grânulos de amido, pela

desordem das estruturas semicristalinas e amorfas (LI & GILBERT, 2018). Durante o estágio final de parboilização ocorre o processo de retrogradação porque a água é removida, o que favorece a retrogradação entre as moléculas de amilose e amilopectina, levando a uma estrutura mais organizada (ZOHOUN et al., 2018).

Tabela 5 - Textura de grãos de arroz parboilizado via micro-ondas e parboilizado pelo processo convencional

Tempo de aquecimento (min) <sup>a</sup>		Dureza (N)	Mastigabilidade (N.s <sup>-1</sup> )	Gomosidade (N)	Coesividade
Primeiro Estágio	Segundo Estágio				
10	0	52,06 ± 2,15 <sup>d</sup>	7,94 ± 0,83 <sup>a</sup>	18,47 ± 0,48 <sup>a</sup>	0,33 ± 0,02 <sup>a</sup>
20		52,59 ± 1,74 <sup>d</sup>	8,14 ± 0,36 <sup>a</sup>	18,58 ± 0,69 <sup>a</sup>	0,38 ± 0,05 <sup>a</sup>
30		58,04 ± 1,49 <sup>bcd</sup>	8,11 ± 0,82 <sup>a</sup>	18,49 ± 1,40 <sup>a</sup>	0,33 ± 0,01 <sup>a</sup>
40		52,08 ± 2,11 <sup>d</sup>	8,51 ± 0,17 <sup>a</sup>	16,52 ± 1,66 <sup>a</sup>	0,31 ± 0,01 <sup>a</sup>
10	5	51,26 ± 2,43 <sup>d</sup>	7,74 ± 0,86 <sup>a</sup>	18,15 ± 0,96 <sup>a</sup>	0,34 ± 0,01 <sup>a</sup>
20		57,58 ± 0,70 <sup>cd</sup>	8,09 ± 0,21 <sup>a</sup>	18,85 ± 0,63 <sup>a</sup>	0,33 ± 0,01 <sup>a</sup>
30		63,69 ± 1,52 <sup>abc</sup>	8,15 ± 0,03 <sup>a</sup>	18,32 ± 1,02 <sup>a</sup>	0,32 ± 0,01 <sup>a</sup>
40		64,65 ± 2,70 <sup>ab</sup>	8,11 ± 1,15 <sup>a</sup>	18,20 ± 0,14 <sup>a</sup>	0,33 ± 0,02 <sup>a</sup>
10	10	62,04 ± 2,67 <sup>abc</sup>	8,05 ± 0,75 <sup>a</sup>	18,85 ± 1,11 <sup>a</sup>	0,35 ± 0,03 <sup>a</sup>
20		64,10 ± 3,51 <sup>abc</sup>	8,28 ± 0,80 <sup>a</sup>	18,54 ± 1,89 <sup>a</sup>	0,33 ± 0,01 <sup>a</sup>
30		66,07 ± 3,52 <sup>a</sup>	8,54 ± 1,08 <sup>a</sup>	19,23 ± 0,63 <sup>a</sup>	0,33 ± 0,04 <sup>a</sup>
40		64,50 ± 2,12 <sup>ab</sup>	8,62 ± 0,50 <sup>a</sup>	18,28 ± 0,72 <sup>a</sup>	0,33 ± 0,01 <sup>a</sup>
Parboilizado convencional		60,47 ± 1,25 <sup>abc</sup>	8,20 ± 0,22 <sup>a</sup>	17,82 ± 1,66 <sup>a</sup>	0,30 ± 0,01 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Os resultados são as médias de três determinações. Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ).

## 5.8. Parâmetros de cor

Grãos submetidos apenas ao primeiro estágio de irradiação micro-ondas apresentaram aparência de grãos não parboilizados, independentemente do tempo, enquanto os grãos submetidos ao segundo estágio de irradiação micro-ondas podem ser comparados aos grãos de arroz parboilizado pelo processo convencional (Figura 15). Estes resultados corroboram com o grau de gelatinização dos grãos submetidos a irradiação micro-ondas, que apresentou baixos níveis de gelatinização para os grãos submetidos somente a primeira etapa.

O perfil colorimétrico está apresentado na tabela 6. Foi observado também que, a luminosidade reduziu com o aumento do tempo de processo. Os tratamentos submetidos somente a primeira etapa de irradiação apresentaram luminosidade aproximada de 68, enquanto que os tratamentos submetidos a segunda etapa apresentaram luminosidade aproximada de 57, uma diminuição de aproximadamente 10, demonstrando maior escurecimento dos grãos submetidos as duas etapas de irradiação micro-ondas (Figura 14).

O valor  $L^*$  variou de 68,86 a 56,85, respectivamente nos tratamentos PE20 SE0 e PE20 SE10; o valor  $a^*$  variou de -2,05 a -4,34, respectivamente nos tratamentos PE30 SE0 e PE30 SE10; e o valor de  $b^*$  variou de 19,26 a 25,40, respectivamente, nos tratamentos PE20 SE0 e PE40 SE10. Em comparação com os grãos parboilizados pelo método convencional, todos os tratamentos apresentaram menores valores de  $a^*$  e  $b^*$  e maiores valores de  $L^*$ , indicando uma coloração mais clara dos grãos parboilizados por micro-ondas. Os parâmetros de cor obtidos para o processo convencional variam para luminosidade  $L^* 55,60 \pm 2,29$ , para o valor de  $a^*$  foi de  $-1,69 \pm 0,64$  e para o valor de  $b^*$  foi de  $25,54 \pm 1,04$ .

A formação de pigmentos escuros tem sido atribuída à caramelização, à oxidação fenólica ou à formação de melanoidinas durante a reação de Maillard (LOYPIMAI et al., 2017; SALEH, AKASH & ONDIER, 2018). O aumento do tempo de encharcamento e o calor fornecido na etapa de gelatinização intensificaram o escurecimento dos grãos (KALE, JHA & NATH, 2018; OLI et al., 2016).

Tabela 6 - Perfil colorimétrico, porcentagem de grãos de arroz quebrados e não-gelatinizados submetidos à parboilização por Irradiação de micro-ondas e parboilização convencional

Parâmetro L*				
Tempo de aquecimento	Primeira etapa (min)			
Segunda etapa (min)	10	20	30	40
0	67,74 ± 2,45a	68,86 ± 2,17 <sup>a</sup>	67,38 ± 1,73a	63,89 ± 1,27a
5	59,94 ± 2,05b	56,86 ± 1,53b	61,74 ± 2,04b	59,91 ± 0,96b
10	59,80 ± 2,79b	56,85 ± 2,17b	57,45 ± 1,72c	59,03 ± 1,78b
Parâmetro a*				
Tempo de aquecimento	Primeira etapa (min)			
Segunda etapa (min)	10	20	30	40
0	-3,64 ± 0,38b	-4,18 ± 0,25b	-4,34 ± 0,48b	-3,52 ± 0,22b
5	-3,09 ± 0,33b	-2,63 ± 0,29 <sup>a</sup>	-3,27 ± 0,61b	-3,21 ± 0,40b
10	-2,27 ± 0,45a	-2,23 ± 0,37 <sup>a</sup>	-2,05 ± 0,64a	-2,36 ± 0,62a
Parâmetro b*				
Tempo de aquecimento	Primeira etapa (min)			
Segunda etapa (min)	10	20	30	40
0	19,69 ± 0,77b	19,26 ± 1,12b	20,51 ± 0,70c	21,36 ± 1,12b
5	21,68 ± 1,13b	21,64 ± 0,89ab	22,85 ± 1,18b	22,99 ± 0,90b
10	24,08 ± 0,70a	22,22 ± 0,66 <sup>a</sup>	25,07 ± 0,89a	25,40 ± 0,64a

A média seguida por letras maiúsculas diferentes para imersão (Primeira etapa) e diferentes letras minúsculas para gelatinização (Segunda etapa) diferem pelo teste de Tukey (P <0,05).

As imagens dos grãos de arroz parboilizados estão apresentadas na figura 14. Ao analisar o primeiro estágio (PE) de parboilização, com o aumento do tempo de irradiação micro-ondas, os grãos de arroz ficaram mais escuros e parcialmente translúcidos, indicando que o tempo de encharcamento pode interferir no escurecimento dos grãos durante a parboilização bem como iniciar o processo de gelatinização do amido, corroborando com os resultados de Oli et al. (2016). Contudo, pode ser observado que a primeira etapa de irradiação micro-ondas inicia o processo de gelatinização, mas não é possível considerar estes grãos gelatinizados, corroborando com os resultados apresentados anteriormente para grau de gelatinização, perfil texturométrico, perfil viscoamilográfico, microscopia e difração de raio-X.

Os grãos submetidos ao segundo estágio (SE) de irradiação de micro-ondas mostraram escurecimento mais intenso (Figura 8), porém menos intenso que os parboilizados pelo processo convencional, esta intensificação da cor pode ser atribuída à alta temperatura usada neste estágio. Lamberts et al. (2008) e Prasert & Suwannaporn (2009) também observaram que o escurecimento dos grãos de arroz aumentou com o aumento do calor e atribuíram esse comportamento às reações de *Maillard*. No entanto, uma temperatura mais alta e um tempo de aquecimento mais longo também podem aumentar a solubilização dos pigmentos e, conseqüentemente, o escurecimento.

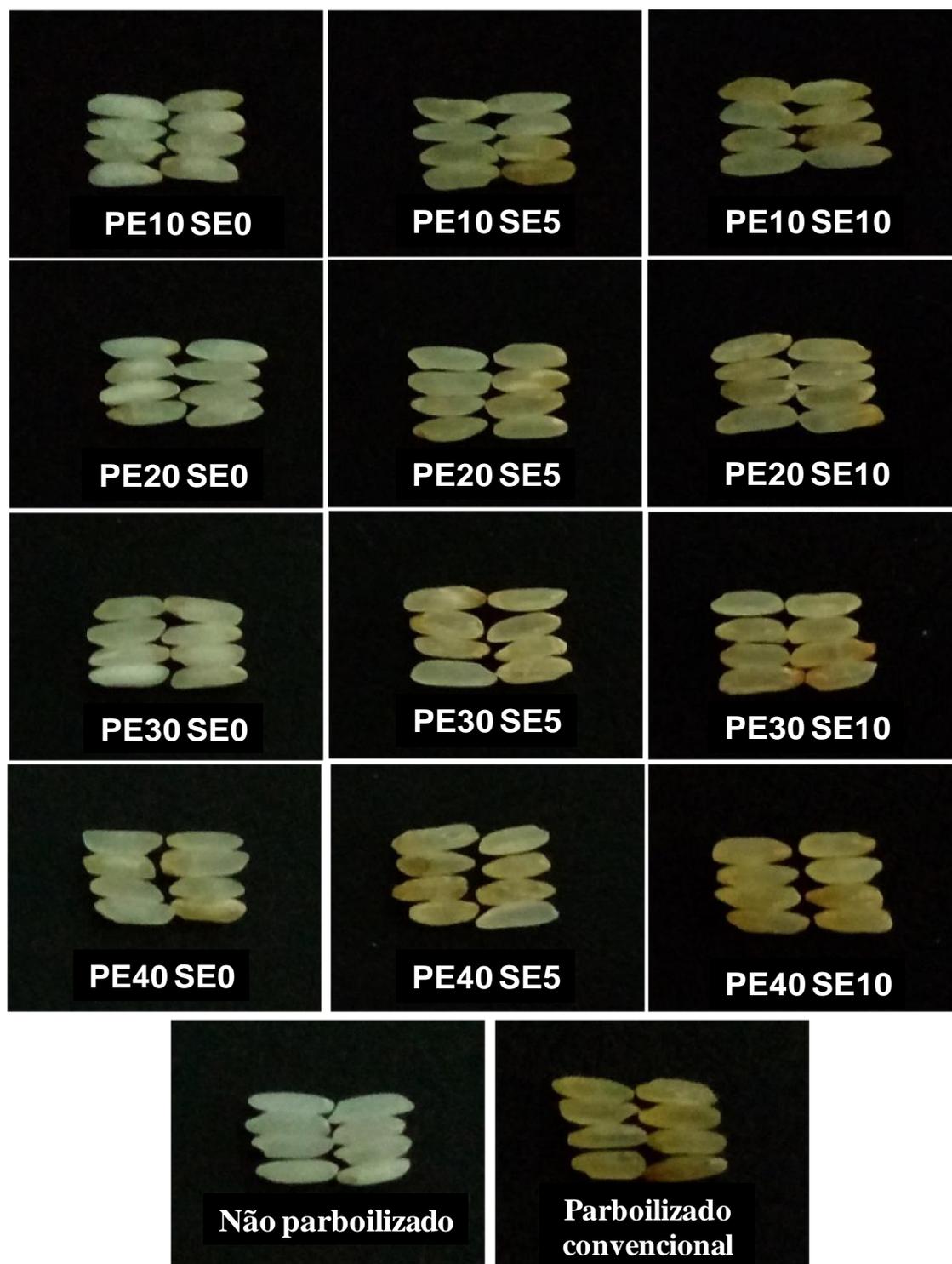


Figura 14 - Imagem de grãos de arroz parboilizados via parboilização rápida em micro-ondas e parboilizado convencional. PE: Primeiro Estágio (min); SE: Segundo Estágio (min).

A Tabela 7 apresenta o grau de brancura dos grãos de arroz parboilizados por irradiação micro-ondas, parboilizado convencional e não parboilizado. Os grãos de arroz submetidos à primeira etapa de irradiação micro-ondas apresentaram maior

grau de brancura em relação ao parboilizado convencional. Os grãos submetidos a segunda etapa de irradiação apresentaram menor grau de brancura quando comparados aos grãos submetidos somente a primeira etapa de irradiação e ao não parboilizado, quanto maior tempo de exposição à irradiação menor valor de brancura. Pode ser observado que os grãos de arroz parboilizados pelo processo convencional apresentaram brancura aproximada de 28 GBZ, enquanto que os grãos submetidos somente a primeira etapa apresentaram em média brancura aproximada de 50 GBZ.

Tabela 7- Brancura dos grãos de arroz submetidos a irradiação micro-ondas

Tempo de aquecimento	Brancura (GBZ)			
	Primeira etapa (min)			
Segunda etapa (min)	10	20	30	40
0	66,8 ± 5,7a	47,7 ± 0,3b	65,7 ± 1,4a	44,0 ± 2,5bc
5	39,6 ± 1,8cd	37,7 ± 1,2de	31,4 ± 1,6efg	35,6 ± 1,3def
10	29,8 ± 2,1fg	34,6 ± 2,3defg	31,3 ± 0,7efg	28,1 ± 1,1g

<sup>a</sup>Os resultados são as médias de três determinações, Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes ( $p < 0,05$ ). Brancura dos grãos de arroz parboilizado convencional 28,6 ± 0,4g.

### 5.9. Sacarose, glicose e frutose

Foi observado a diminuição no teor de sacarose quando comparada com a parboilização convencional e aumentos no teor de glicose e frutose foram observados com o aumento do tempo de imersão, a maioria das alterações observadas em 10 minutos de gelatinização (Figura 15). A parboilização via micro-ondas, a concentração de sacarose variou de 256,50 mg/L (PE40 SE0) a 128,40mg/L (PE30 SE10), a glicose variou de 68,50 mg/L (PE10 SE0) a 110,10 mg/L (PE20 SE10) e frutose de 32,26 mg/L (PE20 SE5) a 88,04 mg/L (PE30 SE10).

A sacarose é um dissacarídeo formado por glicose e frutose, que durante o processo de parboilização sofre hidrólise, liberando seus monômeros, o que pode justificar o aumento da glicose observada no processo de parboilização via micro-ondas. A reação de *Maillard* ocorre mais rapidamente com a glicose do que a

frutose, porque as aldoses reagem mais rapidamente com os aminoácidos do que com cetoses (YUAN et al., 2018).

A diferença no teor de glicose nos diferentes processos de parboilização pode ser devido à reação de *Maillard*, às reações de isomerização da glicose-frutose, às reações de degradação durante o aquecimento e à degradação térmica do amido (YU et al., 2018). No processo de parboilização convencional foram observados, 111,93 mg/L de sacarose e 597,53 mg/L de glicose. Quando o tempo de imersão foi maior, conforme utilizado no processo convencional observou-se a hidrólise do amido, liberando glicose.

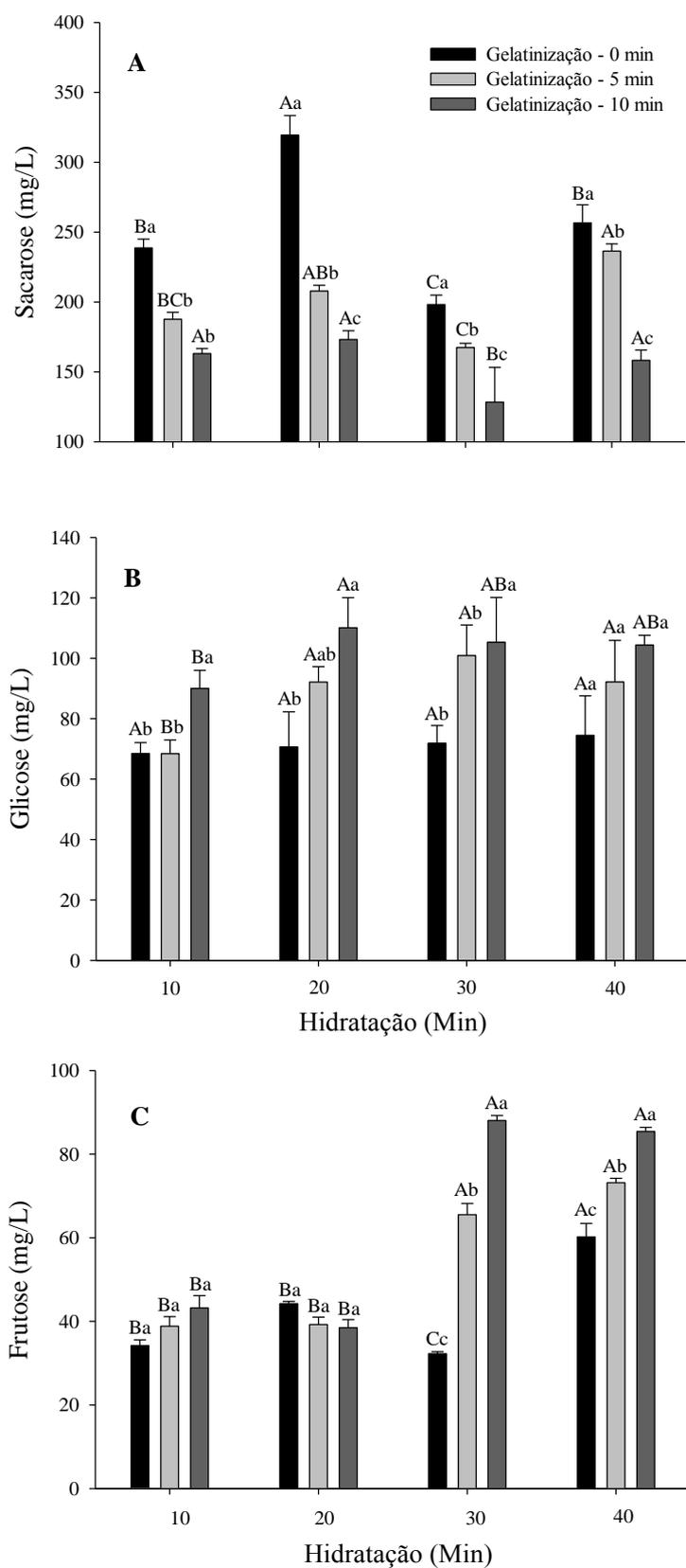


Figura 15 - Teor de sacarose (A), glicose (B) e frutose (C) dos grãos de arroz submetidos ao processo de parboilização por micro-ondas. A média seguida por diferentes letras maiúsculas para imersão e diferentes letras minúsculas para gelatinização diferem pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Convencional parboilizado: sacarose = 111,9 mg/L; glicose = 597,5 mg/L e frutose = 82,7 mg/L.

### 5.10. 5-hidroximetil-2-furaldeído livre (HMF) e conteúdo de lisina livre

A figura 16 apresenta os resultados para o teor de HMF livre dos grãos submetidos a irradiação micro-ondas. Pode ser observado que os grãos submetidos somente a primeira etapa de irradiação apresentaram menores teores de HMF, indicando uma menor intensidade das reações de *Maillard*, quando comparados aos grãos submetidos a segunda etapa de irradiação e parboilizado pelo processo convencional. A variação no teor de HMF para os grãos submetidos a irradiação micro-ondas foi de 19,43 a 23,00  $\mu\text{g/g}$ , respectivamente por PE10 SE0 e PE40 SE0 (Figura 16). O arroz parboilizado pelo processo convencional apresentou 24,44  $\mu\text{g/g}$  de conteúdo livre de HMF, sendo superior aos tratamentos com micro-ondas. Corroborando com maiores valores de  $L^*$  e menores valores de  $a^*$  e  $b^*$ , o que indica colorações mais claras dos grãos de arroz (Tabela 6) e por consequência menor taxa de compostos pigmentados.

Estudos relataram a correlação entre os níveis de HMF e o desenvolvimento de pigmentos escuros em produtos submetidos ao aquecimento (CAPUANO & FOGLIANO, 2011; LEIVA, NARANJO & MALEC, 2017). O HMF é um produto avançado da reação de *Maillard* e é um bom indicador desse processo. Normalmente, condições suaves de parboilização podem levar à formação de furosemida, que é formada nos estágios iniciais da reação de *Maillard* pela complexação de glicose com lisina (GIANNETTI et al., 2014), enquanto condições mais severas favorecem o rearranjo de Amadori promovendo compostos mais escuros nos estágios finais da reação de *Maillard*, como HMF (SHUKLA, BAJWA & BHISE, 2017). Poucas alterações foram observadas no teor de lisina livre nos grãos parboilizados via micro-ondas (Figura 16), variando de 0,174 mg/100g (10 min / 0 min) a 0,151 mg/100g (10 min / 10 min). Quando os grãos de arroz foram parboilizados pelo processo convencional, observou-se 0,203 mg/100g de lisina livre. Os aumentos no teor de lisina livre podem ocorrer no arroz parboilizado devido à atividade proteolítica durante a imersão (VILLANOVA et al., 2017).

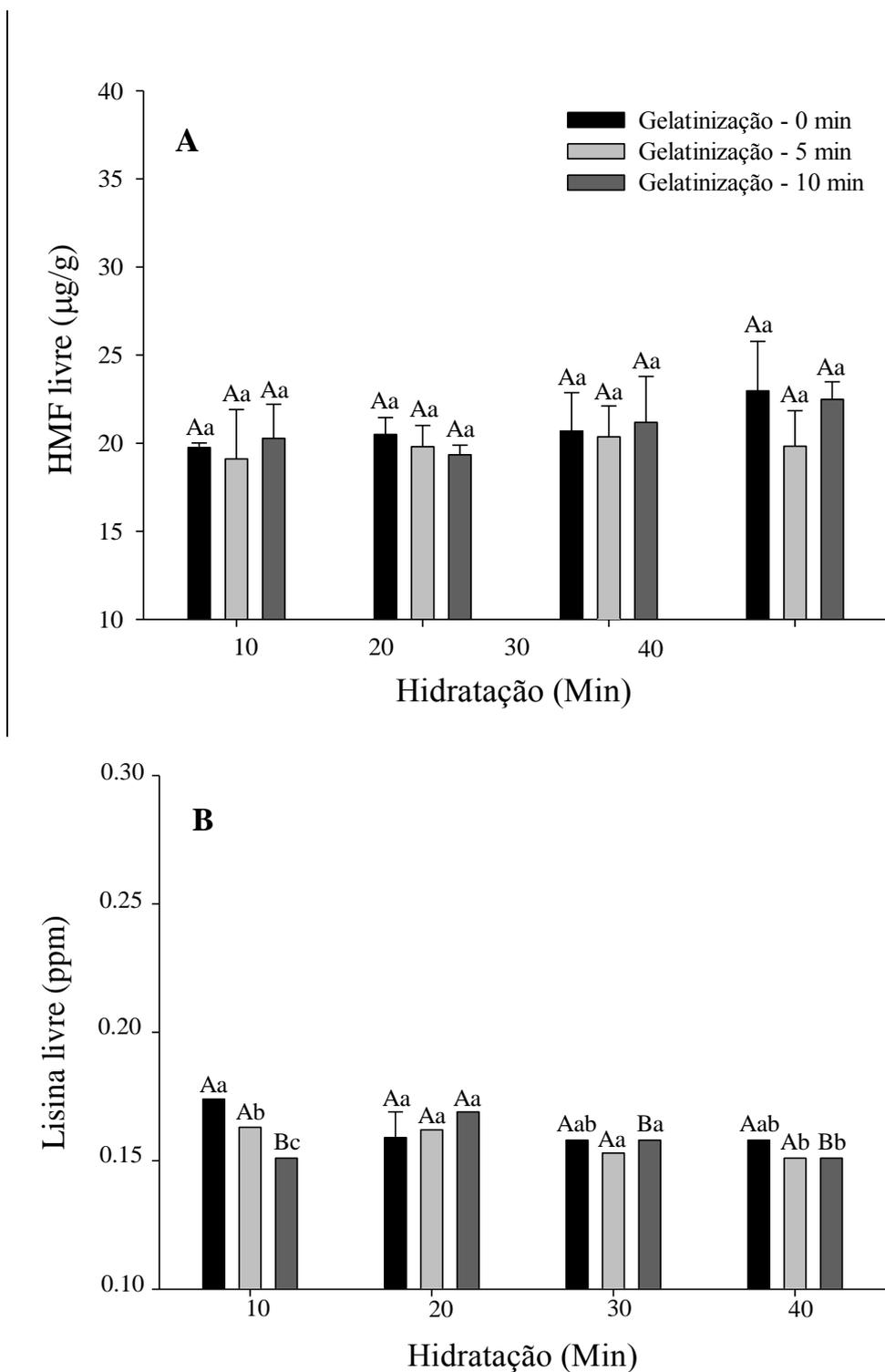


Figura 16 - Teor de HMF livre e lisina livre dos grãos de arroz submetidos ao processo de parboilização por micro-ondas. A média seguida por diferentes letras maiúsculas para imersão e diferentes letras minúsculas para gelatinização diferem pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ). Parboilizado convencional: HMF livre =  $24,44 \mu\text{g/g}$  e lisina livre =  $0,203 \text{ mg}/100\text{g}$

### 5.11. Absorção de água e sólidos lixiviados

A porcentagem de absorção de água dos grãos de arroz é apresentada na Tabela 8. Para que o processo de parboilização seja mais eficiente, o amido precisa absorver o máximo de água durante a imersão sem deformar os grãos (aproximadamente 30%), para completa gelatinização o processo de vaporização (DUTTA et al., 2016; SARANGAPANI et al., 2015).

No processo parboilização por irradiação micro-ondas com 20 min de exposição, a absorção de água recomendada de 30% foi alcançada; em contraste, 300 min de parboilização convencional foram necessários para atingir aproximadamente 30% de absorção de água. As porcentagens de sólidos lixiviados da água após o PE são apresentadas na Tabela 8. Os grãos submetidos à irradiação de micro-ondas de 10, 20 e 30 min apresentaram menor conteúdo de sólidos lixiviados em comparação aos submetidos a 40 min de irradiação e parboilização convencional.

Tabela 8 – Absorção de água e sólidos lixiviados dos grãos de arroz parboilizado, utilizando um processo de parboilização rápida por micro-ondas, processo convencional e grãos não parboilizados

Tempo de aquecimento (min) <sup>a</sup>	Absorção de água (%)	Sólidos lixiviados (%)
Primeiro Estágio		
10	27,62 ± 0,97 <sup>c</sup>	0,153 ± 0,026 <sup>b</sup>
20	30,58 ± 0,04 <sup>b</sup>	0,163 ± 0,26 <sup>b</sup>
30	34,05 ± 0,85 <sup>a</sup>	0,203 ± 0,16 <sup>ab</sup>
40	36,53 ± 1,00 <sup>a</sup>	0,254 ± 0,36 <sup>a</sup>
300 (parboilizado convencional)	30,87 ± 0,24 <sup>b</sup>	0,264 ± 0,015 <sup>a</sup>

<sup>a</sup>Os resultados são as médias de três determinações, Valores com letras diferentes na mesma coluna são significativamente diferentes (p <0,05).

A diminuição do tempo de processo reduz a quantidade de sólidos lixiviados na água (BELLO, TOLABA & SUAREZ, 2004). Analisar o conteúdo de sólidos lixiviados durante a parboilização é importante porque componentes como amilose, proteínas, fenóis e fosfatos e compostos solúveis em água, como vitaminas e outros nutrientes, são lixiviados na solução de encharcamento (LERMA-GARCIA et al., 2009). Os sólidos lixiviados citados são compostos solúveis em água, portanto,

quanto maior o tempo de hidratação dos grãos de arroz, maior a taxa de sólidos a serem lixiviados na água.

### 5.12. Teor residual de fósforo

Foram observados aumento nos valores ( $P < 0,05$ ) do teor de fósforo residual na água de imersão à medida que o tempo de processamento aumentou. O processo de parboilização convencional promoveu maior fósforo residual (67,58 mg/L) (Figura 17). Durante a etapa de imersão, ocorre a absorção de água por grãos de arroz e lixiviação de compostos, principalmente minerais, por exemplo, fósforo.

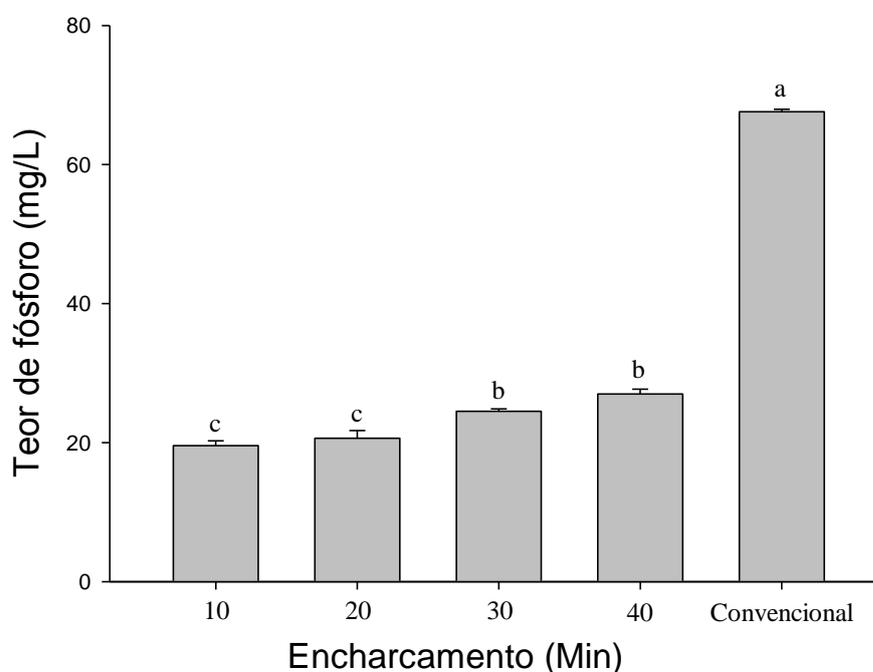


Figura 17 - Fósforo residual dos grãos de arroz submetidos ao processo de parboilização por micro-ondas. A média seguida por diferentes letras minúsculas para gelatinização difere pelo teste de Tukey ( $P < 0,05$ ).

O consumo de arroz vem crescendo nos últimos anos, principalmente em países em desenvolvimento como Índia, Bangladesh, Paquistão, Mianmar, Malásia, Sri Lanka, Brasil, Gana, Nigéria, Guiné, África do Sul e Tailândia, gerando uma grande quantidade de resíduos (MUKHERJEE et al., 2016). Com base nisso, o processo de parboilização via micro-ondas pode ser considerado uma alternativa mais limpa, com reduções no conteúdo de fósforo residual de mais de 60%, principalmente porque leva menos tempo no encharcamento (primeiro estágio) quando comparado ao processo convencional.

Na parboilização via micro-ondas foram obtidos grãos de arroz com alto grau de gelatinização, baixo teor de grãos quebrados e menos pigmentos escuros (Tabela 5), mesmo em estágios moderados (PE10 SE5), reduzindo em cerca de 95% o tempo de parboilização.

## 6. Considerações finais

Os resultados obtidos para os grãos de arroz submetidos a irradiação micro-ondas demonstrou a potencialidade do processo de parboilização, uma vez que foram obtidos grãos com alto grau de parboilização com tempo dez vezes menor quando comparados ao processo de parboilização convencional. Podendo ser considerada uma parboilização rápida.

Contudo o processo utilizando irradiação micro-ondas apresentou a necessidade de submeter os grãos a duas etapas de irradiação micro-ondas para obter grãos completamente gelatinizados, por tanto, considerados parboilizados. A necessidade de uma segunda etapa de irradiação micro-ondas proporcionou gelatinização mais uniforme dos grãos de arroz, bem como grãos com maior qualidade tecnológica, morfológica e estruturas similares às dos grãos parboilizados pelo processo convencional, por aquecimento via condução. O uso da irradiação de microondas no processo de parboilização influencia as características dos grãos de arroz, como tempo de cocção e composição estrutural. Comparado a parboilização convencional, a irradiação micro-ondas diminuiu o tempo de cocção, aumentou a solubilidade das proteínas e permitiu maior índice de branqueamento dos grãos de arroz parboilizado. O rendimento de inteiros aumenta tanto com a parboilização convencional como com a por irradiação com micro-ondas, quando empregada a segunda etapa de irradiação.

Um dos aspectos mais importantes para os grãos de arroz parboilizado é a coloração, pois grãos escuros diminuem a aceitabilidade dos consumidores. Pode ser observado que em todos os tempos de processo por irradiação micro-ondas foram obtidos grãos de arroz com coloração menos intensa, quando comparados ao arroz parboilizado pelo processo convencional.

Outro aspecto positivo para a parboilização por irradiação micro-ondas é diminuição do tempo de cocção e sólidos lixiviados dos grãos de arroz proporcionando mais benefícios ao consumidor, se apresentando um processo eficiente e ambientalmente mais limpo em relação ao processo de parboilização convencional. Além dos parâmetros tecnológicos positivos, o processo de micro-ondas reduz o tempo de parboilização e o teor residual de fósforo, no entanto, mais estudos são necessários para identificar se os atributos nutricionais e sensoriais são mantidos após o processo.

O presente estudo teve como objetivo avaliar a possibilidade de obter grãos de arroz parboilizados, a partir de um processo mais rápido via irradiação micro-ondas. Em estudo com escala piloto, pode ser observada a eficiência da técnica, contudo é conhecida a deficiência na quantidade de análises realizadas, demonstrando a necessidade de prosseguimento dos estudos relacionados a presente técnica utilizada.

## Referências Bibliográficas

- AACC-American Association of Cereal Chemists (2000). *Approved methods of the American association of cereal chemists*. St. Paul, MN, USA: American Association of Cereal Chemists Inc..
- AMATO, G.W.; CARVALHO, J.L.V.; SILVEIRA F, S. **Arroz parboilizado: tecnologia limpa, produto nobre**. Ed. Ricardo Lenz, Porto Alegre, 2002. 240p.
- AMATO, Gilberto Wageck; ELIAS, Moacir Cardoso. **Parboilização do arroz**. Ed. Ricardo Lenz, Porto Alegre, 2005. 160p.
- AMBROS, S. et al. Structural basis of the impact of microwave drying on survival and shelf life of *Lactobacillus paracasei*. **LWT**, v. 98, p. 291-298, 2018.
- ANWAR, J.; SHAFIQUE, U.; REHMAN, R.; SALMAN, M.; DAR, A.; ANZANO, J. M.; ASHRAF, S. Microwave chemistry: Effect of ions on dielectric heating in microwave ovens. **Arabian Journal of Chemistry**, v. 8, n. 1, p. 100-104, 2015.
- AOCS - American Oil Chemists' Society. **Official methods and recommended practices**, (5th ed.).Champaign, IL, USA: AOCS Press, 2009.
- ARENA, S. et al. Dairy products and the Maillard reaction: A promising future for extensive food characterization by integrated proteomics studies. **Food chemistry**, v. 219, p. 477-489, 2017.
- ASAE - American Society of Agricultural Engineers. Moisture measurement unground grain and seeds. In: Standards, 2000.St. **Joseph: ASAE**, p. 563, 2000.
- ATUNGULU, G. G.; PAN, Z. Rice industrial processing worldwide and impact on macro- and micronutrient content, stability, and retention. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1324, n. 1, p. 15-28, 2014.
- BALBINOTI, T. C. V., DE MATOS JORGE, L. M., & JORGE, R. M. M. Modeling the hydration step of the rice (*Oryza sativa*) parboiling process. **Journal of Food Engineering**, 216, 81-89, 2018.
- BAO, J. et al. Analysis of quantitative trait loci for some starch properties of rice (*Oryza sativa* L.): thermal properties, gel texture and swelling volume. **Journal of Cereal Science**, v. 39, n. 3, p. 379-385, 2004.
- BARBOZA, A. et al. Aquecimento em forno de microondas/desenvolvimento de alguns conceitos fundamentais. **Química Nova**, v. 24, n. 6, p. 901-904, 2001.
- BELLO, M., TOLABA, M. P., & SUAREZ, C. Factors affecting water uptake of rice grain during soaking. **LWT-Food Science and Technology**, 37 (8), 811-816, 2004.

BERNAL, C. et al. Influência de alguns parâmetros experimentais nos resultados de análises calorimétricas diferenciais-DSC. **Química Nova**, v. 25, n. 5, p. 849-855, 2002.

BERNAS. **Rice Anatomy**. <<http://bernas.com.my/index.php/rice-anatomy>> Acesso em: 10 mai. 2017.

BERTOFT, E. et al. Small differences in amylopectin fine structure may explain large functional differences of starch. **Carbohydrate polymers**, v. 140, p. 113-121, 2016.

BETA, T. et al. Starch properties as affected by sorghum grain chemistry. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 81, n. 2, p. 245-251, 2001.

BHATTACHARYA, K. R., & ALI, S. Z. Changes in rice during parboiling, and properties of parboiled rice. **Advances in cereal science and technology (USA)**.105-167,1985.

BIAN, L.; CHUNG, H.. Molecular structure and physicochemical properties of starch isolated from hydrothermally treated brown rice flour. **Food Hydrocolloids**, v. 60, p. 345-352, 2016.

BILBAO-SÁINZ, C.; BUTLER, M.; WEAVER, T. e BENT, J. Wheat starch gelatinization under microwave irradiation and conduction heating. **Carbohydrate Polymers**, v.69, n.2, p.224-232, 2007.

BILIADERIS, C. G. The structure and interactions of starch with food constituents. **Canadian journal of physiology and pharmacology**, 69 (1), 60-78, 1991.

BORTOLINI, Vera Maria de Souza. **Caracterização nutricional de misturas à base de arroz parboilizado, soja e uva e seus efeitos em parâmetros biológicos de ratos Wistarem crescimento**. 2014. 115f. Tese de doutorado. Programa de Ciência e Tecnologia de Alimentos. Universidade Federal de Pelotas.

BOURNE, M. C. Texture profile analysis [Food acceptability]. **Food technology**, 1978.

BRAILE, P. M.; CAVALCANTI, J. E. W. A. **Manual de tratamento de águas residuárias**. São Paulo: CETESB, 1979. p. 764.

BRANDÃO, J. B.; CONTREIRA, R. A.; CAIRES, L. M. Análise da comercialização do arroz: uma abordagem desde as agroindústrias gaúchas até a região Sudeste. **Electronic Journal of Management, Education and Environmental Technology (REGET)**, v. 20, n. 1, p. 01-15, 2015.

Brasil - **Regras para Análise de Sementes**. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Instrução Normativa N° 6. Diário Oficial da União 2009, Seção 1, Página 3.

BUALUANG, O.; TIRAWANICHAKUL, Y.; TIRAWANICHAKUL, S. Comparative study between hot air and infrared drying of parboiled rice: Kinetics and qualities aspects. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 37, n. 6, p. 1119-1132, 2013.

BUENO, P. D. F. **Viscoamilografia na estimativa do teor de amilose e características de consumo de arroz**. Pelotas, 2008. 69p. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Pelotas.

BUENO, M.; D CAVALCANTI, A. D.; MELO, J.; OLIVO, J.; ZANIN, G. Obtenção de ciclomalto-dextrina-glucano-transferase em processo fermentativo por bacillus firmus cepa 37 para produção de ciclodextrinas. **Blucher Chemical Engineering Proceedings**, v. 1, n. 2, p. 910-919, 2015.

BUENO, M. Z. et al. Evaluation of nanofiltration and reverse osmosis membranes on removal of carbofuran in drinking waters. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 21, n. 3, p. 447-458, 2016.

BUGGENHOUT, J. et al. The breakage susceptibility of raw and parboiled rice: a review. **Journal of Food Engineering**, v. 117, n. 3, p. 304-315, 2013.

CAI, L., SHI, Y.C.. Self-assembly of short linear chains to A-and B-type starch spherulites and their enzymatic digestibility. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 61, n. 45, p. 10787-10797, 2013.

CAPUANO, E.; FOGLIANO, V.. Acrylamide and 5-hydroxymethylfurfural (HMF): A review on metabolism, toxicity, occurrence in food and mitigation strategies. **LWT-food science and technology**, v. 44, n. 4, p. 793-810, 2011.

CHANDRASEKARAN, S.; RAMANATHAN, S.; BASAK, Tanmay. Microwave food processing—A review. **Food Research International**, v. 52, n. 1, p. 243-261, 2013.

CHAVAN, P., SHARMA, S. R., MITTAL, T. C., MAHAJAN, G. AND GUPTA, S. K. Optimization of Parboiling Parameters to Improve the Quality Characteristics of Pusa basmati 1509. **Journal of Food Process Engineering**, v.40, n3, p.12454, 2017.

COLUSSI, R. et al. Acetylation of rice starch in an aqueous medium for use in food. **LWT - Food Science and Technology**, v. 62, n. 2, p. 1076-1082, 7// 2015.

COLUSSI, R.; SINGH, J.; KAUR, L.; DA ROSA ZAVAREZE, E.; DIAS, A. R. G.; STEWART, R. B.; SINGH, H. Microstructural characteristics and Gastro-small Intestinal Digestion In Vitro of Potato Starch: Effects of Refrigerated Storage and Reheating in Microwave. **Food Chemistry**, 2017.

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da Safra Brasileira – Grãos**. V.2 - SAFRA 2015/16 - N. 12- Décimo Segundo levantamento (Setembro 2016). Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16\\_09\\_09\\_15\\_18\\_32\\_boletim\\_12\\_setembro.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/16_09_09_15_18_32_boletim_12_setembro.pdf)> Acesso em 21 de novembro de 2016.

CONAB: Companhia Nacional de Abastecimento. **A cultura do arroz**. Brasília: Conab, 2018. 180 p.

DAMODARAN, P. KL; FENNEMA, OR Química de Alimentos de Fennema, 4<sup>a</sup> Edição. **Editora, Artmed SA**, 2010.

DE OLIVEIRA, F. C. et al. Food protein-polysaccharide conjugates obtained via the maillard reaction: A review. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 56, n. 7, p. 1108-1125, 2016.

DHITAL, Sushil et al. In vitro digestibility and physicochemical properties of milled rice. **Food chemistry**, v. 172, p. 757-765, 2015.

DORS, G. C.; PINTO, HEIDTMANN, R.; FURLONG, E. B. Influencia das condições de parboilização na composição química do arroz. **Ciência e Tecnologia de Alimentos (Online)**, v. 29, p. 219-224, 2009.

DUTTA, H., MAHANTA, C. L. Traditional parboiled rice-based products revisited: Current status and future research challenges. **Rice Sci**, v. 21, n. 4, p. 187-200, 2014.

DUTTA, H., MAHANTA, C. L., SINGH, V., DAS, B. B., & RAHMAN, N. Physical, physicochemical and nutritional characteristics of Bhojachaul, a traditional ready-to-eat dry heat parboiled rice product processed by an improvised soaking technique. **Food chemistry**, 191, 152-162, 2016.

EBLLING, J. M.; SIBRELLI, P.; OGDEN, S. R.; SUMMERFELT, S. T. Evaluation of chemical coagulation-flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorous from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. **Aquacultural Engineering, Sheperdstown-USA**, v. 29, n. 3, p. 32-42, 2005.

EERLINGEN, R.C., CROMBEZ, M., DELCOUR, J.A. Enzyme-resistant starch. I. Quantitative and qualitative influence of incubation time and temperature of autoclaved starch on resistant starch formation. **Cereal Chemistry**, 70, 3, 339-344, 1993.

ELIAS, M.C. et al. Pós-colheita de arroz: secagem, armazenamento e qualidade. **Pelotas: Editora e Gráfica Universitária**, 2007.

ELIAS, M.C. **Efeitos da espera para secagem e do tempo de armazenamento na qualidade das sementes e grãos do arroz irrigado**. Pelotas, Tese (Doutorado) 164f. 1998.

FAN, D. et al. Effect of microwave on lamellar parameters of rice starch through small-angle X-ray scattering. **Food Hydrocolloids**, v. 35, p. 620-626, 2014.

FAN, D. et al. Influence of microwave parameters and water activity on radical generation in rice starch. **Food chemistry**, v. 196, p. 34-41, 2016.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponível em: <<http://faostat.fao.org/beta/en/#data/QC>>. Acesso em: 04 abril. 2017.

FARIA, O. L. V.; KOETZ, P. R.; SANTOS, M. S.; NUNES, W. A.. Remoção de fósforo de efluentes da parboilização de arroz por absorção biológica estimulada em reator em batelada seqüencial (RBS). **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 26, n. 2, p. 309-317, 2006.

FIORE, A. et al. Controlling the Maillard reaction by reactant encapsulation: sodium chloride in cookies. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 60, n. 43, p. 10808-10814, 2012.

FONSECA, F. A.; JÚNIOR, M. S. S.; CALIARI, M.; GARCIA, D. M.; BASSINELLO, P. Z.; DA COSTA EIFERT, E. Efeito da temperatura e do tempo de imersão da etapa de encharcamento sobre a cor dos grãos de arroz parboilizado de cultivares de terras altas. **Semina: Ciências Agrárias, Londrina**, v. 32, n. 1, p. 221-234, 2011.

FU, Z. Q.; Wang, L. J.; Zou, H.; Li, D.; Adhikari, B. Studies on the starch–water interactions between partially gelatinized corn starch and water during gelatinization. **Carbohydrate polymers**, v. 101, p. 727-732, 2014.

FU, Z.-Q. et al. The effect of partial gelatinization of corn starch on its retrogradation. **Carbohydrate polymers**, v. 97, n. 2, p. 512-517, 2013.

GANESH, S. et al. Spectrophotometric determination of trace amounts of phosphate in water and soil. **Water Science and Technology**, v. 66, n. 12, p. 2653-2658, 2012.

GIANNETTI, V. et al. Furosine and flavour compounds in durum wheat pasta produced under different manufacturing conditions: Multivariate chemometric characterization. **LWT-Food Science and Technology**, v. 56, n. 1, p. 15-20, 2014.

GUNARATNE, A.; WU, K.; LI, D.; BENTOTA, A.; CORKE, H.; CAI, Y. Z. Antioxidant activity and nutritional quality of traditional red-grained rice varieties containing proanthocyanidins. **Food Chemistry**, v. 138, p. 1153-1161, 2013.

GUPTA, R. K. et al. Maillard reaction in food allergy: Pros and cons. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 58, n. 2, p. 208-226, 2018.

HAMAD, S.; ZAFAR, T. A.; SIDHU, J. Parboiled rice metabolism differs in healthy and diabetic individuals with similar improvement in glycemic response. **Nutrition**, v. 47, p. 43-49, 2018.

HEINEMANN, R. et al. Comparative study of nutrient composition of commercial brown, parboiled and milled rice from Brazil. **Journal of Food Composition and Analysis**, v. 18, n. 4, p. 287-296, 2005.

HEINECK, M. E. et al. Evidences of amylose coil-to-helix transition in stored dilute solutions. **Polymer**, v. 49, n. 20, p. 4386-4392, 2008.

HOU, C. et al. A novel emulsifier prepared from Acacia seyal polysaccharide through Maillard reaction with casein peptides. **Food Hydrocolloids**, v. 69, p. 236-241, 2017.

HU, Z. et al. Effect of parboiling on phytochemical content, antioxidant activity and physicochemical properties of germinated red rice. **Food Chemistry**, v. 214, p. 285-292, 2017.

JIANG, J. et al. Thin layer drying kinetics of pre-gelatinized starch under microwave. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 72, p. 10-18, 2017.

JONES, D. A. et al. Microwave heating applications in environmental engineering—a review. **Resources, conservation and recycling**, v. 34, n. 2, p. 75-90, 2002.

JULIANO, B. O.; BECHTEL, D. B. The rice grain and its gross composition. 1985.  
KAASOVA, J., KADLEC, P., BUBNIK, Z., & POUR, V. Microwave treatment of rice. **Czech Journal of Food Sciences**, 19 (2), 62-66, 2001.

KALE, S.; JHA, S. K.; NATH, P.. Soaking effects on physical characteristics of basmati (Pusa Basmati 1121) rice. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 19, n. 4, p. 114-123, 2018.

KWOFIE, E. M.; NGADI, M. A review of rice parboiling systems, energy supply, and consumption. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 72, p. 465-472, 2017.

LAMBERTS, L. et al. Impact of parboiling conditions on Maillard precursors and indicators in long-grain rice cultivars. **Food chemistry**, v. 110, n. 4, p. 916-922, 2008.

LAMBERTS, L. et al. Effect of milling on colour and nutritional properties of rice. **Food Chemistry**, v. 100, n. 4, p. 1496-1503, 2007.

LAMBERTS, L.; BRIJS, K.; MOHAMED, R.; VERHELST, N.; DELCOUR, J. A. Impact of browning reactions and bran pigments on color of parboiled rice. **Journal of agricultural and food chemistry**, v. 54, n. 26, p. 9924-9929, 2006.

LEIVA, Graciela E.; NARANJO, Gabriela B.; MALEC, Laura S. A study of different indicators of Maillard reaction with whey proteins and different carbohydrates under adverse storage conditions. **Food chemistry**, v. 215, p. 410-416, 2017.

LERMA-GARCIA, M. J.; HERRERO-MARTINEZ, J. M.; SIMÓ-ALFONSO, E. F.; MENDONÇA, C. R.; RAMIS-RAMOS, G. Composition, industrial processing and applications of rice bran  $\gamma$ -oryzanol. **Food Chemistry**, v. 115, n. 2, p. 389-404, 2009.

LEWANDOWICZ, G., JANKOWSKI, T., & FORNAL, J. Effect of microwave radiation on physico-chemical properties and structure of cereal starches. **Carbohydrate Polymers**, 42 (2), 193-199, 2000.

- LI, Y. et al. Functional properties of Maillard reaction products of rice protein hydrolysates with mono-, oligo- and polysaccharides. **Food Hydrocolloids**, v. 30, n. 1, p. 53-60, 2013.
- LI, Y. et al. Functional properties of the Maillard reaction products of rice protein with sugar. **Food Chemistry**, v. 117, n. 1, p. 69-74, 2009.
- LIU, Y., LI, X., ZHOU, X., YU, J., WANG, F., & WANG, J. Effects of glutaminase deamidation on the structure and solubility of rice glutelin. **LWT-Food Science and Technology**, 44 (10), 2205-2210, 2011.
- LIU, Q. Starch Modifications and Applications. In: CUI, S. W (Ed.). **Food Carbohydrates: Chemistry, Physical Properties, and Applications**, CRC Press, 2005. cap. 7, p. 357-406.
- LOYPIMAI, Patiwit et al. Influence of sodium chloride and vacuum impregnation on the quality and bioactive compounds of parboiled glutinous rice. **Journal of food science and technology**, v. 54, n. 7, p. 1990-1998, 2017.
- MA, Z.; BOYE, J. I. Research advances on structural characterization of resistant starch and its structure-physiological function relationship: A review. **Critical reviews in food science and nutrition**, v. 58, n. 7, p. 1059-1083, 2018.
- MALGORZATA, Wronkowska; KONRAD, Piskuła Mariusz; ZIELIŃSKI, Henryk. Effect of roasting time of buckwheat groats on the formation of Maillard reaction products and antioxidant capacity. **Food chemistry**, v. 196, p. 355-358, 2016.
- MAGALHÃES, R. S.; LIMA, R. M. F.; SOUZA, H. A.. O uso de microondas para determinação de umidade de bauxita. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 56, n. 4, p. 255-259, 2003.
- MARTIN, M.; FITZGERALD, M. A. Proteins in rice grains influence cooking properties!. **Journal of Cereal Science**, v. 36, n. 3, p. 285-294, 2002.
- MARTINS, G. S. **Avaliação da eficiência da estação de tratamento de efluentes de uma indústria de beneficiamento de arroz da cidade de Meleiro no sul de Santa Catarina**. 2015. 62f. Dissertação – UNISUL, Palhoça.
- MATSUMOTO, A., TSUBAKI, S., SAKAMOTO, M., & AZUMA, J. I. A novel saccharification method of starch using microwave irradiation with addition of activated carbon. **Bioresource technology**, 102 (4), 3985-3988, 2011.  
**Method for preparing preboiled rice by ultrasound microwave**. Google Patents 2012.
- MIAO, M., ZHANG, T., JIANG, B. Characterisations of kabuli and desi chickpea starches cultivated in China, **Food Chemistry**, 113, 1025–1032, 2009.
- MOHAPATRA, D., & BAL, S. Cooking quality and instrumental textural attributes of cooked rice for different milling fractions. **Journal of food engineering**, 73 (3), 253-259, 2006.

MONTEIRO, R. L. et al. Effect of multi-flash drying and microwave vacuum drying on the microstructure and texture of pumpkin slices. . **LWT-Food Science and Technology**, v. 96, p. 612-619, 2018.

MOONGNGARMA, A.; DAOMUKDA, N.; SAOWAROSE KHUMPIKA, S. Chemical composition, phytochemical and antioxidant capacity of rice bran. rice bran layer, and rice germ. **APCBEE Procedia**, v. 2, p. 73-79, 2012.

MUKHERJEE, C. et al. Parboiled rice effluent: A wastewater niche for microalgae and cyanobacteria with growth coupled to comprehensive remediation and phosphorus biofertilization. **Algal Research**, v. 19, p. 225-236, 2016.

MUTHAYYA, S. et al. An overview of global rice production, supply, trade, and consumption. **Annals of the New York Academy of Sciences**, v. 1324, n. 1, p. 7-14, 2014.

NAGATAKI, A., TOMITA, H., HIMEDA, Y., TAKEMORI, T., & FUKUOKA, M. A quantification method of retrogradation for cooked rice based on a single isolated peak in X-ray diffraction. **Journal of Cereal Science**, 79, 80-85, 2018.

NASIRAHMADI, A., ABBASPOUR-FARD, M. H., EMADI, B., & KHAZAEI, N. B. Modelling and analysis of compressive strength properties of parboiled paddy and milled rice. **International Agrophysics**, 28 (1), 73-83, 2014.

NAWAZ, M. A.; FUKAI, S.; BHANDARI, B. Effect of alkali treatment on the milled grain surface protein and physicochemical properties of two contrasting rice varieties. **Journal of Cereal Science**, v. 72, p. 16-23, 2016.

NIMBALKAR, M. S. et al. Free amino acid profiling in grain Amaranth using LC-MS/MS. **Food Chemistry**, v. 134, n. 4, p. 2565-2569, 2012.

NURSTEN, H. E. **The Maillard reaction: chemistry, biochemistry, and implications**. Royal Society of Chemistry, 2005.

OLI, P. et al. Parboiled rice: understanding from a materials science approach. **Journal of Food Engineering**, v. 124, p. 173-183, 2014.

OLI, P.; WARD, R.; ADHIKARI, B.; TORLEY, P. Colour change in rice during hydration: effect of hull and bran layers. **Journal of Food Engineering**, v. 173, p. 49-58, 2016.

OLIVEIRA, Ana Mafalda Silva. **Aplicação das Técnicas de Espectroscopia  $\mu$ -Raman e MEV na Análise da Interface Adesiva entre o Substrato Dentinário e o Material Restaurador**. 2016. Tese de Doutorado. Universidade Nova de Lisboa.

ORDÓÑEZ, J. A.; COLABORADORES. **Tecnologia de Alimentos – Componentes dos Alimentos e Processos** – vol. 1. Porto Alegre – Editora Artmed, 2005.

OHISHI, K., KASAI, M.; SHIMADA, A.; HATAE, K. Effect of Acetic Acid Added to Cooking Water on the Dissolution of Proteins and Activation of Protease in Rice. **Journal of Agriculture and Food Chemistry**, 51, p.4054–4059, 2003.

OZEL, B. et al. NMR relaxometry as a tool to understand the effect of microwave heating on starch-water interactions and gelatinization behavior. **LWT-Food Science and Technology**, v. 83, p. 10-17, 2017.

PAIVA, F. F. et al. Polishing and parboiling effect on the nutritional and technological properties of pigmented rice. **Food chemistry**, v. 191, p. 105-112, 2016.

PAIVA, Flávia Fernandes. **Efeitos da pressão e do tempo de autoclavagem na parboilização sobre a qualidade dos grãos e a fração lipídica do arroz**. 2011. 105 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) – Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

PAIVA, Flávia Fernandes. **Efeitos da intensidade de polimento e da parboilização em parâmetros químicos e tecnológicos de arroz com pericarpo preto e vermelho**. 2014. 137 f. Tese (Mestrado em Ciência e Tecnologia Agroindustrial) – Faculdade de Agronomia “Eliseu Maciel”, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011

PALAV, T. e SEETHARAMAN, K. Mechanism of starch gelatinization and polymer leaching during microwave heating. **Carbohydrate Polymers**, v.65,n.3, p.364-370, 2006.

PARK, C.; KIM, Y.; PARK, K.; KIM, B. Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. **Journal of Stored Products Research**. v.48, p.25-29, 2012.

PARK, J. K.; KIM, S. S.; KIM, K. O. Effect of milling ratio on sensory properties of cooked rice and on physicochemical properties of milled and cooked rice. **Cereal Chemistry**, v. 78, n. 2, p. 151-156, 2001.

PANKAJ, Sharma et al. Study on impact of acid and alkali pretreatment of rice straw using FTIR spectroscopy and SEM analysis. **Annals of Agri Bio Research**, v. 23, n. 2, p. 130-135, 2018

PATINDOL, J. A.; GONZALEZ, B. C.; WANG, Y. J.; MCCLUNG, A. M. Starch fine structure and physicochemical properties of specialty rice for canning. **Journal of cereal science**, v. 45, n. 2, p. 209-218, 2007.

PINEDA-GÓMEZ, P., ROSALES-RIVERA, A., & RODRÍGUEZ-GARCÍA, M. E. Modeling calcium and water intake in threshed corn grain during thermo-alkaline treatment. **Journal of food engineering**, 113 (3), 434-441, 2012.

PINTO, Vania Zanella. **Efeito do tratamento térmico de baixa umidade e da oxidação nas propriedades físico-químicas, reológicas e térmicas do amido de pinhão (araucaria angustifolia, bert, o. ktze)**. 2011. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

- PRASERT, W., & SUWANNAPORN, P. Optimization of instant jasmine rice process and its physicochemical properties. **Journal of food engineering**, 95 (1), 54-61, 2009.
- PUROHIT, H. D.; SHARMA, H. S.; VYAS, A. D. Dielectric dispersion and relaxation mechanism in some trichloro esters at microwave frequencies. **Canadian Journal of Physics**, v. 55, n. 21, p. 1902-1905, 1977.
- QUEIROZ, Y. S. et al. Bioactive compounds, in vitro antioxidant capacity and Maillard reaction products of raw, boiled and fried garlic (*Allium sativum* L.). **International Journal of Food Science & Technology**, v. 49, n. 5, p. 1308-1314, 2014.
- RABEK, J. F. Experimental methods in polymer chemistry: applications of wide-angle X-ray diffraction (WAXD) to the study of the structure of polymers. **UK: Wiley-Interscience Chichester**, 505, 1980.
- ROBERTS, R.L. Effect of microwave treatment of pré-soaked paddy, Brown and White Rice. **Journal of Food Science**, v.42, n.3,1977.
- ROCHA, C.R. **Aplicação de microondas na parboilização do arroz**. 1998. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Alimentos) -Faculdade de Engenharia de Alimentos - FEA, Universidade Estadual de Campinas, Campinas.
- ROSINI, F.; NASCENTES, C. C.; NÓBREGA, J. A. Experimentos didáticos envolvendo radiação microondas. **Quimica Nova**, v. 27, n. 6, p. 1012-1015, 2004.
- RUFIAN-HENARES, J. A.; GARCIA-VILLANOVA, B.; GUERRA-HERNANDEZ, E. Determination of furfural compounds in enteral formula. **Journal of liquid chromatography & related technologies**, v. 24, n. 19, p. 3049-3061, 2001.
- SALEH, M; AKASH, M; ONDIER, G. Effects of temperature and soaking durations on the hydration kinetics of hybrid and pureline parboiled brown rice cultivars. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 12, n. 2, p. 1369-1377, 2018.
- SAMARANAYAKE, M. D. W., ABEYSEKERA, W. K. S. M., &RATNASOORIYA, W. D. (2018). Physicochemical and nutritional prope long grain rice varieties of Sri Lanka at different polishing rates. **Research Journal of Chemical**, 8(5), 29-35.
- SANDHU, K. S.; SHARMA, L.; KAUR, M. Effect of granule size on physicochemical, morphological, thermal and pasting properties of native and 2-octenyl-1-ylsuccinylated potato starch prepared by dry heating under different pH conditions. **LWT-Food Science and Technology**, v. 61, n. 1, p. 224-230, 2015.
- SARANGAPANI, C., DEVI, Y., THIRUNDAS, R., ANNAPURE, U. S., & DESHMUKH, R. R. Effect of low-pressure plasma on physico-chemical properties of parboiled rice. **LWT-food Science and Technology**, 63(1), 452-460, 2015.

SCHIAVON, Rafael de Almeida. **Efeitos do método de secagem sobre a qualidade e o desempenho industrial de grãos de arroz armazenados em ambiente controlado com temperatura reduzida**. 2010. 72f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.

SCHIFFMANN, R.F. **Microwave and dielectric drying**. In: MUJUNDAR, A.S. Handbook of Industrial Drying. 1 ed. New York: Marcel Decker, 1987. Cap 10, p. 327-356.

SCHOENHALS, M.; SENA, R. F.; JOSÉ, H. J. Avaliação da eficiência do processo de coagulação/flotação aplicado como tratamento primário de efluentes de abatedouro de frangos. **Engenharia Ambiental: Pesquisa e Tecnologia**, v. 3, n. 2, 2006.

SHIBAO, J.; BASTOS, D. H. M. Produtos da reação de Maillard em alimentos: implicações para a saúde. **Revista de nutrição**, p. 895-904, 2011.

SHUKLA, P. et al. Effect of industrial processing on HMF generation in sucrose-milk protein model systems. **International Journal of Agriculture, Environment & Biotechnology**, v. 10, n. 4, p. 429, 2017.

SILVA, W. M. F. et al. Starch digestibility and molecular weight distribution of proteins in rice grains subjected to heat-moisture treatment. **Food chemistry**, v. 219, p. 260-267, 2017.

SILVÁN, J. M. et al. Control of the Maillard reaction by ferulic acid. **Food chemistry**, v. 128, n. 1, p. 208-213, 2011.

SINGH, N.; SANDHU, K. S.; KAUR, M. Characterization of starches separated from Indian chickpea (*Cicer arietinum* L.) cultivars. **Journal of Food Engineering**, v. 63, n. 4, p. 441-449, 2004.

SCHWANKE, A. J.; PERGHER, S. B. C. Peneiras moleculares mesoporosas MCM41: Uma perspectiva histórica, o papel de cada reagente na síntese e sua caracterização básica. **Perspectiva**, v. 36, n. 135, p. 113-125, 2012.

SINGH, S.; RAINA, C. S.; BAWA, A. S.; SAXENA, D. C. Effect of Heat-Moisture Treatment and Acid Modification on Rheological, Textural, and Differential Scanning Calorimetry Characteristics of Sweetpotato Starch. **Journal of Food Science**, v. 70, n. 6, 2005.

SIRISOONTARALAK, P.; NOOMHORM, A. Changes to physicochemical properties and aroma of irradiated rice. **Journal of stored products research**, v. 42, n. 3, p. 264-276, 2006.

SITTIPOD, S., & SHI, Y. C. Changes of starch during parboiling of rice kernels. **Journal of Cereal Science**, 69, 238-244, 2016.

STAROSZCZYK, H., & JANAS, P. Microwave-assisted synthesis of zinc derivatives of potato starch. **Carbohydrate Polymers**, 80 (3), 962-969, 2010.

- TAGHINEZHAD, E.; KHOSHTAGHAZA, M. H.; MINAEI, S.; SUZUKI, T.; BRENNER, T. Relationship Between Degree of Starch Gelatinization and Quality Attributes of Parboiled Rice During Steaming. **Rice Science**, v. 23, n. 6, p. 339-344, 2016.
- TEO, C. H.; KARIM, A. A.; CHEAH, P. B.; NORZIAH, M. H.; SEOW, C. C. On the roles of protein and starch in the aging of non-waxy rice flour. **Food Chemistry**, v. 69, n. 3, p. 229-236, 2000.
- TESTER, R. F.; KARKALAS, J.; QI, X.. Starch—composition, fine structure and architecture. **Journal of Cereal Science**, v. 39, n. 2, p. 151-165, 2004.
- THYS, R. C. S.; WESTFAHL, H., JR.; NORENA, C. P. Z.; MARCZAK, L. D. F.; SILVEIRA, N. P.; E CARDOSO, M. B. Effect of the alkaline treatment on the ultrastructure of C-type starch granules. **Biomacromolecules**, v.9, n.7, p.1894-1901, 2008.
- VALLONS, K. J. R.; RYAN, L. A. M.; ARENDT, E. K. Pressure-Induced Gelatinization of Starch in Excess Water. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 54, n. 3, p. 399-409, 2014.
- VAN BOEKEL, M. Formation of flavour compounds in the Maillard reaction. **Biotechnology advances**, v. 24, n. 2, p. 230-233, 2006.
- VAN DER BORGHT, A., VANDEPUTTE, G. E., DERYCKE, V., BRIJS, K., DAENEN, G., & DELCOUR, J. A. Extractability and chromatographic separation of rice endosperm proteins. **Journal of Cereal Science**, 44 (1), 68-74, 2006.
- VANIER, N. L.; PARAGINSKI, R.T.; BERRIOS, J. DE J.; OLIVEIRA, L. C.; ELIAS, M. C. Thiamine content and technological quality properties of parboiled rice treated with sodium bisulfite: Benefits and food safety. **Journal of Food Composition and Analysis**.v.41, p.98-103, 2015.
- VANIER, N.; LINDEMANN, I S; POHNDORF, R. S.; OLIVEIRA, M.; ELIAS, M. C.. **Classificação oficial, pós-colheita e industrialização de arroz**. Pelotas: Cópia Santa Cruz, 2017. 420p.
- VILLANOVA, F. A. et al. Improvement of the quality of parboiled rice by using anti-browning agents during parboiling process. **Food chemistry**, v. 235, p. 51-57, 2017.
- VILLANOVA, Franciene Almeida. **Uso de inibidores de escurecimento na parboilização de arroz: efeitos nas propriedades químicas e tecnológicas dos grãos**. 2017. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Pelotas.
- VOLPE, Thaisa Carvalho. **Cinética da hidratação do grão de arroz no processo de parboilização**. 2014. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná.
- WALTER, M.; MARCHEZAN, E.; DE AVILA, L. A. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, v. 38, n. 4, p.1184-1193, 2008.

WAMBURA, P., YANG, W., & WANG, Y. Power ultrasound enhanced one-step soaking and gelatinization for rough rice parboiling. **International journal of food engineering**, 4, 4, 2008.

XIAOLI, X. et al. Determination of oligosaccharide contents in 19 cultivars of chickpea (*Cicer arietinum* L) seeds by high performance liquid chromatography. **Food chemistry**, v. 111, n. 1, p. 215-219, 2008.

XU, J. et al. The impact of germination on the characteristics of brown rice flour and starch. **Journal of the Science of Food and Agriculture**, v. 92, n. 2, p. 380-387, 2012.

YADAV, B. K.; JINDAL, V. K. Changes in head rice yield and whiteness during milling of rough rice (*Oryza sativa* L.). **Journal of Food Engineering**, v. 86, n. 1, p. 113–121, 2008.

YANG, Q., QI, L., LUO, Z., KONG, X., XIAO, Z., WANG, P., & PENG, X. Effect of microwave irradiation on internal molecular structure and physical properties of waxy maize starch. **Food Hydrocolloids**, 69, 473-482, 2017.

YU, H. et al. Kinetic study of high-intensity ultrasound-assisted Maillard reaction in a model system of d-glucose and glycine. **Food chemistry**, v. 269, p. 628-637, 2018.

YUAN, Heng et al. An analysis of the changes on intermediate products during the thermal processing of black garlic. **Food chemistry**, v. 239, p. 56-61, 2018.

ZANÃO, C. F. P.; CANNIATTI-BRAZACA, S. G.; SARMENTO, S. B. S.; ARTHUR, V. (Efeito da irradiação gama nas características físico-químicas e sensoriais do arroz (*Oryza sativa* L.) e no desenvolvimento de *Sitophilus oryzae* L. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v. 29, n. 1, p. 46-55, 2009.

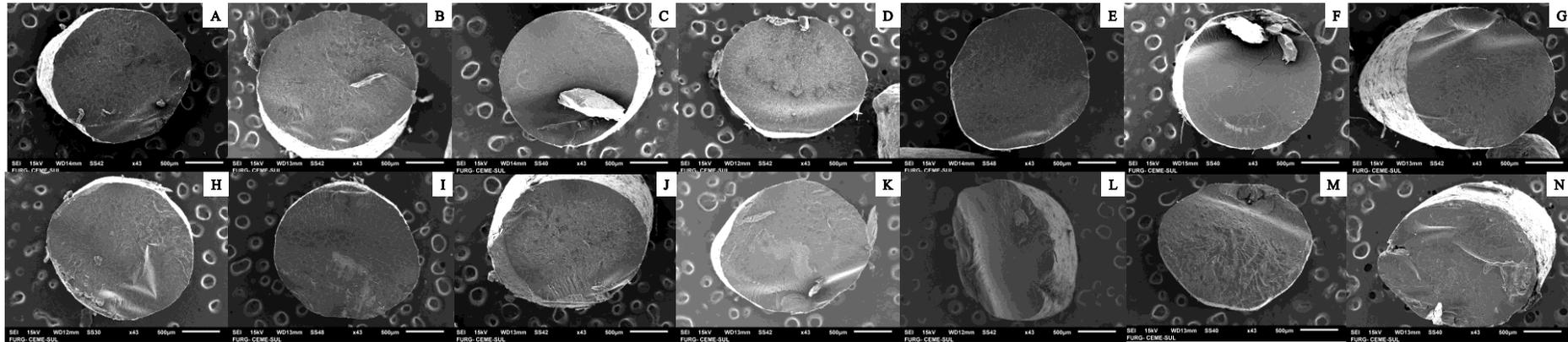
ZAVAREZE, E. D. R.; DIAS, A. R. G. Impact of heat-moisture treatment and annealing in starches: A review. **Carbohydrate Polymers**, v. 83, n. 2, p. 317-328, 2011.

ZHAO, S., XIONG, S., QIU, C., & XU, Y. Effect of microwaves on rice quality. **Journal of stored products research**, 43 (4), 496-502, 2007.

ZOHOUN, Elvire V. et al. Appropriate parboiling steaming time at atmospheric pressure and variety to produce rice with weak digestive properties. **Food Science & Nutrition**, 2018.

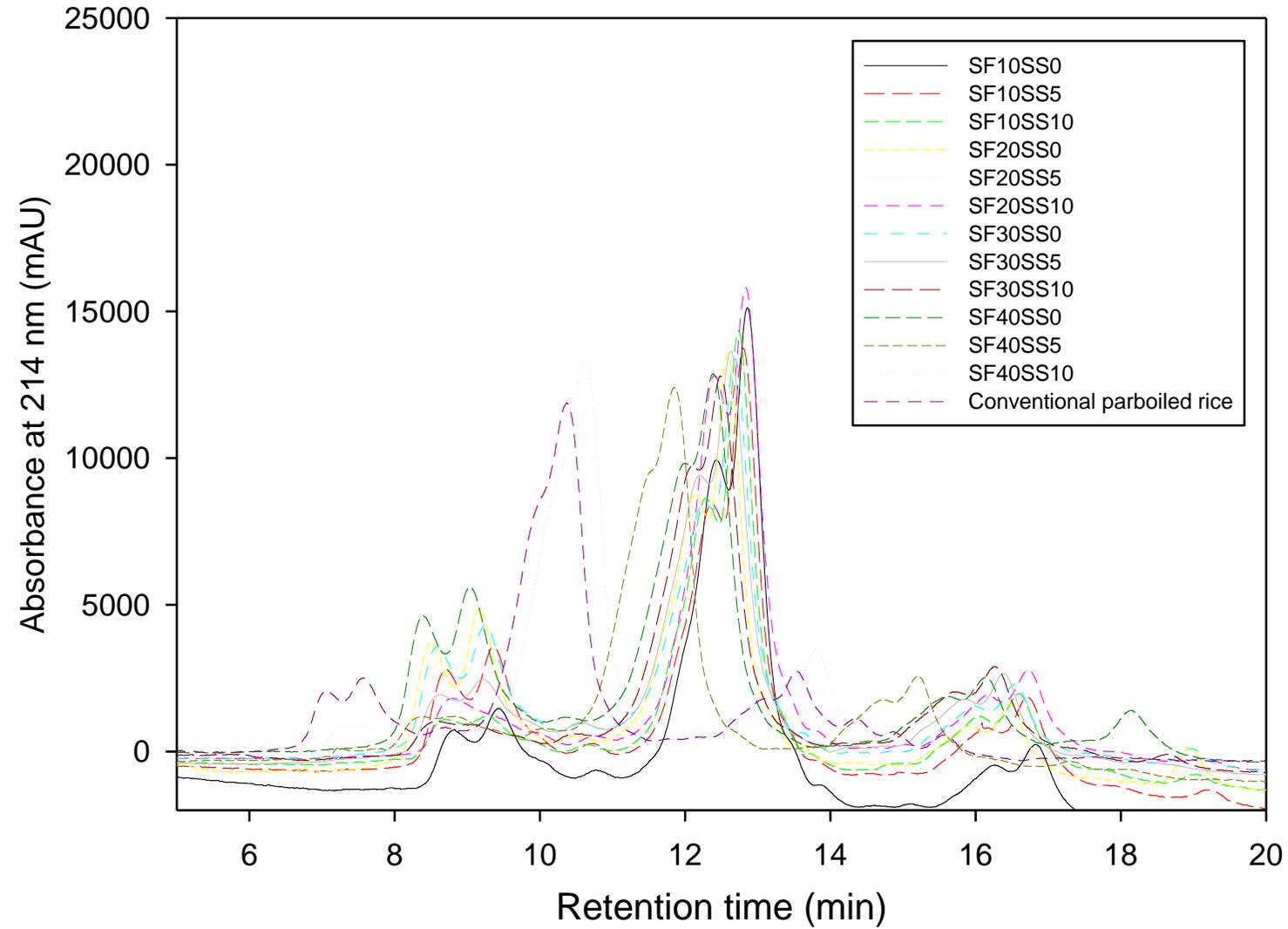
## APÊNDICES

Apêndice A – Microscopia eletrônica de varredura (MEV) em x43 de grãos de arroz polidos

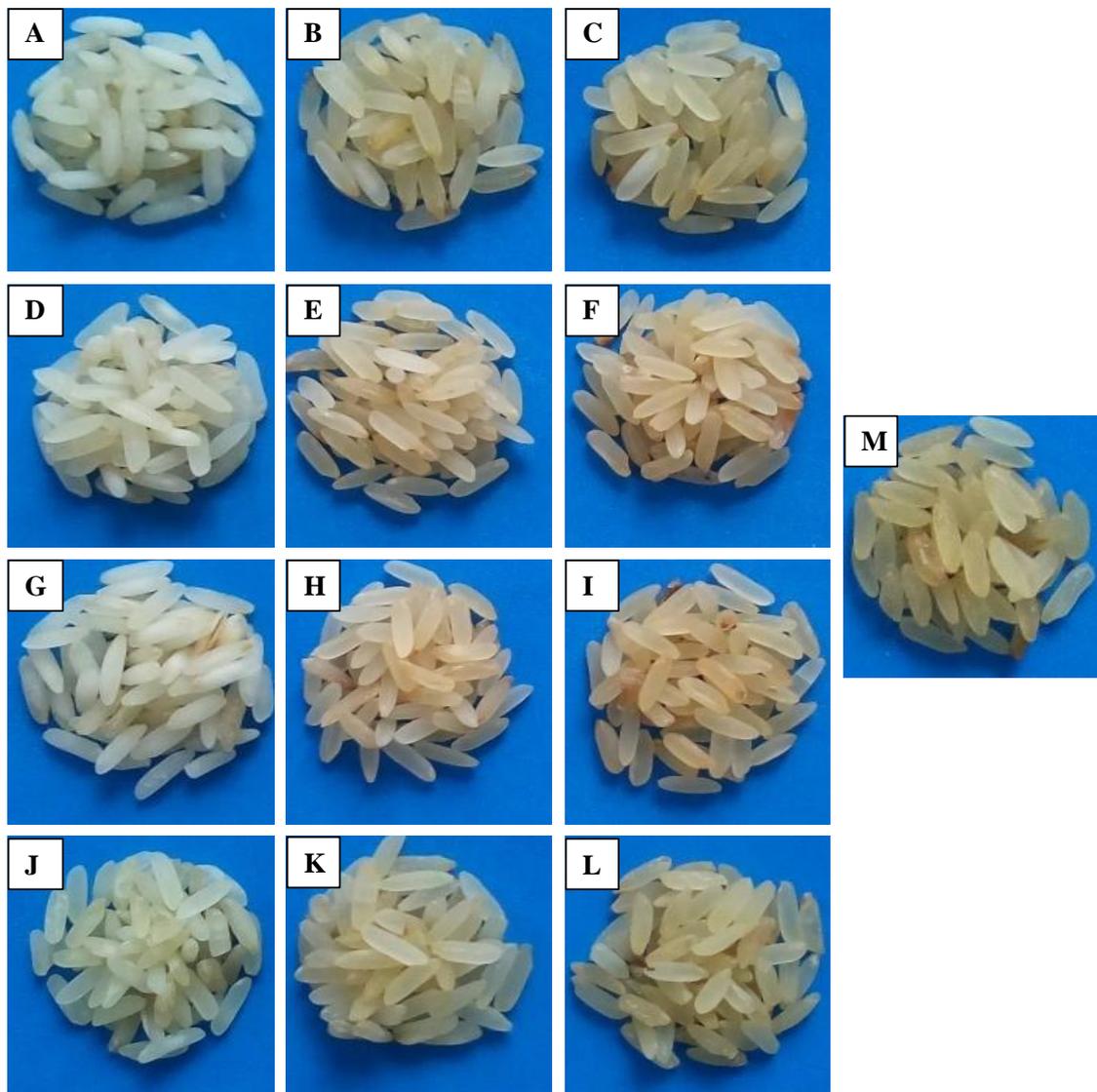


PE10SE0 (A); PE10SE5 (B); PE10SE10 (C); PE20SE0 (D); PE20SE5 (E); PE20SE10 (F); PE30SE0 (G); PE30SE5 (H); PE30SE10 (I); PE40SE0 (J); PE40SE5 (K); PE40SE10 (L); não-parboilizado (M); parabolizado convencional (N); PE= Primeiro Estágio (min); SE= Segundo Estágio (min).

Apêndice B – Distribuição do peso molecular de proteínas de grãos de arroz irradiados por micro-ondas e parboilizado convencional



Apêndice C - Grãos de arroz submetidos a irradiação micro-ondas e parboilizado convencional.



Microondas: PE10 SE0 (A), PE10 SE5 (B) e PE10 SE10 (C); PE20 SE0 (D), PE20 SE5 (E), e PE20 SE10 (F); PE30 SE0 (G), PE30 SE5 (H) e PE30 SE10 (I); PE40 SE0 (J), PE40 SE5 (K) e PE40 SE10 (L) . parboilizado Convencional: PE300SE10 em autoclave (M).