

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PELOTAS
Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel
Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos



Dissertação

**Propriedades físicas, químicas e tecnológicas de arroz submetido ao
envelhecimento natural e ao acelerado por micro-ondas**

Paulo Alberto de Azevedo
Engenheiro Agrônomo

Pelotas, 2024

Paulo Alberto de Azevedo

Propriedades físicas, químicas e tecnológicas de arroz submetido ao envelhecimento natural e ao acelerado por micro-ondas

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos da Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel da Universidade Federal de Pelotas, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia de Alimentos.

Orientador: Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias
Coorientadores: Prof. Dr. Nathan Levien Vanier
Prof^a Dr^a Rosana Colussi

Pelotas, 2024

Universidade Federal de Pelotas / Sistema de Bibliotecas
Catalogação da Publicação

A992p Azevedo, Paulo Alberto de

Propriedades físicas, químicas e tecnológicas de arroz submetido ao envelhecimento natural e ao acelerado por micro-ondas [recurso eletrônico] / Paulo Alberto de Azevedo ; Moacir Cardoso Elias, orientador ; Nathan Levien Vanier, Rosana Colussi, coorientadores. — Pelotas, 2024.

82 f. : il.

Dissertação (Mestrado) — Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, 2024.

1. Envelhecimento de arroz. 2. Micro-ondas. 3. Propriedades físico-químicas. 4. Propriedades tecnológicas. I. Elias, Moacir Cardoso, orient. II. Vanier, Nathan Levien, coorient. III. Colussi, Rosana, coorient. IV. Título.

CDD 633.186

Paulo Alberto de Azevedo

Propriedades físicas, químicas e tecnológicas de arroz submetido ao envelhecimento natural e ao acelerado por micro-ondas

Dissertação aprovada como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre 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: 11 de outubro de 2024.

Banca examinadora:

Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias (orientador)

Doutor em Agronomia, pela Universidade Federal de Pelotas

Prof^a. Dr^a. Elessandra da Rosa Zavareze

Doutora em Engenharia e Ciência de Alimentos, pela Universidade Federal de Rio Grande

Prof. Dr. Fabrício da Fonseca Barbosa

Doutor em Ciência e Tecnologia Agroindustrial, pela Universidade Federal de Pelotas

Prof. Dr. Géri Eduardo Meneghello

Doutor em Ciência e Tecnologia de Sementes pela Universidade Federal de Pelotas

**Dedico este trabalho a Deus, à
minha família e aos meus amigos.**

Agradecimentos

Agradeço primeiramente a Deus, pela vida, pela saúde e por todas as bênçãos. Sem Ele nada seria possível.

À minha querida avó Cilma Hartwig Peter (*in memoriam*), que sempre me incentivou nos estudos e me ensinou o significado de humildade, fé e persistência.

À minha família, por estar junto comigo em todos os momentos da minha vida, sejam eles bons ou ruins, e por todo apoio e carinho de sempre.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Moacir Cardoso Elias, pela amizade e por todos os ensinamentos que vão além da pós-graduação.

Aos meus coorientadores, Prof. Dr. Nathan Levien Vanier e Prof^a Dr^a Rosana Colussi, pela amizade, apoio e ensinamentos que irei levar por toda a vida.

À professora, Dr^a Márcia Foster Mesko e ao grupo de pesquisa em química analítica, pela cedência do laboratório para realização dos tratamentos no micro-ondas e pelos conhecimentos adquiridos.

Aos meus amigos e colegas de laboratório, Marcos Monte, Nelson Mubai, Henrique Ferreira, Patrick da Silva, Cristian Batista, Nataniele Schaun, Miriã Miranda, Aline Clark, Janaína Goveia e Eliane Lemke, pelo companheirismo e aprendizados.

Aos estudantes de iniciação científica, Abner Rutz, Matheus Lima, Leonardo Duarte, Vitor Longaray, Enzo Pessina, Manuela Geiger, Emily Garcia, Caroline Peter e Stéfane Belmonte, pela amizade e por todo auxílio durante a execução das análises.

Aos demais amigos do Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos - PPGCTA da UFPEL, pela amizade e pelos ensinamentos adquiridos.

Aos professores do PPGCTA, pelos aprendizados na área de ciência de alimentos e apoio necessário nesses dois anos de mestrado.

À Universidade Federal de Pelotas, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e ao Laboratório de Pós-colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos (LABGRÃOS), muito obrigado.

A todos que contribuíram de alguma maneira para a realização desse sonho, muito obrigado.

Você Mesmo

Lembre-se de que você mesmo é o melhor secretário de sua tarefa, o mais eficiente propagandista de seus ideais, a mais clara demonstração de seus princípios, o mais alto padrão do ensino superior que seu espírito abraça e a mensagem viva das elevadas noções que você transmite aos outros. Não se esqueça, igualmente, de que o maior inimigo de suas realizações mais nobres, a completa ou incompleta negação do idealismo sublime que você apregoa, a nota discordante da sinfonia do bem que pretende executar, o arquiteto de suas aflições e o destruidor de suas oportunidades de elevação – é você mesmo.

Chico Xavier

Resumo

AZEVEDO, Paulo Alberto de. **Propriedades físicas, químicas e tecnológicas de arroz submetido ao envelhecimento natural e ao acelerado por micro-ondas**. Orientador: Moacir Cardoso Elias. 2024. 82 f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2024.

O envelhecimento natural do arroz é o processo pelo qual os grãos permanecem armazenados por um determinado período, que geralmente varia de seis meses a um ano, em condições de temperatura e umidade controladas. O arroz armazenado (safra velha) apresenta vantagens em relação ao arroz recém-colhido (safra nova), devido ao maior rendimento de grãos inteiros na indústria e maior expansão de volume e absorção de água na cocção. Entretanto, o envelhecimento natural é um processo demorado, custoso e requer tempo prolongado no armazenamento dos grãos. Por razões como essas, tecnologias emergentes como a aplicação de micro-ondas vêm sendo estudadas como alternativas viáveis para acelerar o envelhecimento de arroz. Grãos de arroz em casca da cultivar IRGA 424 RI, amplamente cultivada na região Sul do Brasil, foram submetidos ao envelhecimento natural por um ano em armazenamento a 27 °C e ao envelhecimento acelerado pela irradiação com micro-ondas na potência de 900 W em seis tempos de exposição (30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos). Os resultados demonstraram que o arroz envelhecido naturalmente apresentou melhores rendimentos gravimétrico e volumétrico, com 378,15% e 425,68%, respectivamente. Além disso, apresentou menor viscosidade máxima, de quebra, final e retrogradação, maior temperatura de pasta e menor percentual de sólidos lixiviados (5,34%). A estrutura celular dos grãos tornou-se mais espessa (MEV) e a digestibilidade *in vitro* do amido foi mais lenta, com maior percentual de amido resistente (32%) e menor índice glicêmico (79%). No entanto, apresentou percentual de acidez maior (0,4%), menor cristalinidade relativa do amido (18,7%) e grãos mais escuros. O envelhecimento acelerado dos grãos pela irradiação com micro-ondas proporcionou resultados positivos. O tratamento de 120 segundos com micro-ondas foi o que mais se aproximou do arroz envelhecido naturalmente. Os grãos apresentaram rendimento gravimétrico de 365,5% e rendimento volumétrico de 441,7%. Ainda, apresentaram menor viscosidade máxima, de quebra, final e retrogradação, menor percentual de sólidos lixiviados (5,5%) e menor índice de acidez (0,3%). A estrutura celular apresentou característica mais densa (MEV) e a digestibilidade *in vitro* do amido foi reduzida, com percentual de amido resistente de 20,4% e índice glicêmico de 86,0%. Porém, o tratamento com micro-ondas resultou em grãos mais escuros e opacos e a cristalinidade relativa do amido também foi reduzida (19,5%). Entretanto, o tratamento com micro-ondas foi eficaz no envelhecimento acelerado do arroz.

Palavras-chave: Envelhecimento de arroz; Micro-ondas; Propriedades físico-químicas; Propriedades tecnológicas.

Abstract

AZEVEDO, Paulo Alberto de. **Physical, chemical and technological properties of rice subjected to natural and accelerated aging by microwave.** Advisor: Moacir Cardoso Elias. 2024. 82 p. Dissertation (Masters in Food Science and Technology) - Graduate Program in Food Science and Technology, Federal University of Pelotas, Pelotas, 2024.

Natural aging of rice is the process by which grains remain stored for a certain period, which generally varies from six months to one year, under controlled temperature and humidity conditions. Stored rice (old crop) has advantages over freshly harvested rice (new crop), due to the higher head rice yield in the industry and the greater expansion of volume and water absorption in cooking. However, natural aging is a time-consuming and costly process, and requires prolonged storage of the grains. For these reasons, emerging technologies such as the application of microwaves have been studied as viable alternatives to accelerate rice aging. Paddy rice grains of the IRGA 424 RI cultivar, widely cultivated in the southern region of Brazil, were subjected to natural aging for one year in storage at 27 °C and accelerated aging by microwave irradiation at a power of 900 W for six exposure times (30, 60, 90, 120, 150 and 180 seconds). The results demonstrated that naturally aged rice presented better water uptake and kernel expansion ratio, with 378.15% and 425.68%, respectively. In addition, it presented lower peak, breakdown, final and retrogradation viscosities, higher paste temperature and lower percentage of solid loss (5.34%). The cellular structure of the grains became thicker (SEM) and the in vitro digestibility of starch was slower, with a higher percentage of resistant starch (32%) and lower glycemic index (79%). However, it presented higher percentage of free fatty acids (0.4%), lower relative crystallinity of starch (18.7%) and darker grains. Accelerated aging of the grains by microwave irradiation provided positive results. The 120-second microwave treatment was the closest to naturally aged rice. The grains presented water uptake ratio of 365.5% and kernel expansion ratio of 441.7%. Furthermore, they presented lower peak, breakdown, final and retrogradation viscosity, lower percentage of solid loss (5.5%) and lower free fatty acids (0.3%). The cellular structure presented a denser characteristic (MEV) and the in vitro digestibility of starch was reduced, with a percentage of resistant starch of 20.4% and glycemic index of 86.0%. However, the microwave treatment resulted in darker and more opaque grains and the relative crystallinity of starch was also reduced (19.5%). Nevertheless, the microwave treatment was effective in accelerated aging of rice.

Keywords: Rice aging; Microwave; Physicochemical properties; Technological properties.

LISTA DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Ciclo de desenvolvimento do arroz | 18 |
| Figura 2 - Morfologia da planta de arroz | 19 |
| Figura 3 - Arroz em casca (A), integral (B), branco polido (C) e parboilizado polido (D) | 20 |
| Figura 4 - Estrutura morfológica de um grão de arroz e as partes que o compõem | 20 |
| Figura 5 - Estrutura química do amido. Representação do polímero linear de amilose (a) e ramificado de amilopectina (b). Extremidades não-redutora (hidroxila do carbono anomérico ligada) e redutora (hidroxila do carbono anomérico livre) | 22 |
| Figura 6 - Estrutura molecular dos grânulos de amido. Representação gráfica dos polímeros amilose e amilopectina. A estrutura ramificada da amilopectina permite que as cadeias adjacentes formem duplas-hélices que se agrupam em lamelas cristalinas, enquanto os pontos de ramo residem em lamelas amorfas..... | 23 |
| Figura 7 - Ilustração das principais mudanças químicas que ocorrem durante o envelhecimento natural do arroz..... | 25 |
| Figura 8 - Diferença entre os aquecimentos por condução e por irradiação micro-ondas..... | 29 |
| Figura 9 - Mecanismo de aquecimento por micro-ondas..... | 30 |
| Figura 10 - Diagrama representando o mecanismo de envelhecimento acelerado de arroz via irradiação micro-ondas. (a), formação das pontes dissulfídicas nas proteínas; (b), liberação dos ácidos fenólicos livres; (c), mudanças micromecânicas nas células do endosperma; (d) e (e), restrição do poder de inchamento da farinha de arroz durante a formação de pasta; (f) gel de arroz..... | 31 |
| Figura 11 - Representação do tratamento dos grãos de arroz em casca via irradiação micro-ondas e beneficiamento em engenho de provas..... | 34 |
| Figura 12 - Sistema tridimensional das cores, demonstrando as coordenadas L^* , a^* e b^* | 36 |
| Figura 13 - Ilustração do rendimento volumétrico dos grãos de arroz safra velha, safra nova e micro-ondas após cocção..... | 49 |

| | |
|--|----|
| Figura 14 - Difrátogramas de raios-X dos tratamentos safra nova, safra velha e micro-ondas 90 e 120 segundos. CR é o percentual de cristalinidade relativa de cada tratamento..... | 52 |
| Figura 15 - Microscopia eletrônica de varredura de grãos de arroz safra nova (SN), safra velha (SV) e micro-ondas 90 e 120 segundos após processo de cocção e liofilização. A = grão inteiro; B = seção transversal do grão; C = seção transversal lateral do grão; D = seção transversal central do grão..... | 54 |
| Figura 16 - Mudanças nos percentuais de amido resistente (AR), amido rapidamente digerível (ARD) e amido lentamente digerível (ALD) após a digestibilidade dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 90 e 120 segundos..... | 57 |
| Figura 17 - Curvas de hidrólise do amido (%) dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 90 e 120 segundos..... | 58 |
| Figura 18 - <i>Loadings</i> obtidos por Análise de Componentes Principais para as amostras de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratadas no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos..... | 63 |
| Figura 19 - <i>Scores</i> obtidos por Análise de Componentes Principais para as amostras de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratadas no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos..... | 64 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Composição nutricional média (%) de alguns nutrientes encontrados em grãos de arroz integral, branco polido e parboilizado polido longo..... | 21 |
| Tabela 2 - Rendimento de grãos inteiros, grãos quebrados, temperatura e índice de acidez dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos..... | 43 |
| Tabela 3 - Perfil branquimétrico em UBZ dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos..... | 45 |
| Tabela 4 - Perfil colorimétrico dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos..... | 45 |
| Tabela 5 - Rendimento gravimétrico, volumétrico e tempo de cocção dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos..... | 47 |
| Tabela 6 - Viscosidade máxima ($V_{máx}$); viscosidade mínima ($V_{mín}$); viscosidade de quebra (V_q); viscosidade final (V_f); viscosidade de retrogradação (V_r); temperatura de pico (T_{pi}) e temperatura de pasta (T_{pa}) dos grãos de arroz moído da safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas no tempo de exposição de 120 segundos..... | 50 |
| Tabela 7 - Amido total (AT), frações de amido quanto à sua hidrólise: amido rapidamente digerível (ARD), amido lentamente digerível (ALD) e amido resistente (AR), concentração de equilíbrio de hidrólise do amido (C_{∞}), constante da reação (k), índice de hidrólise (IH) e índice glicêmico estimado (IGe) dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 90 e 120 segundos..... | 56 |
| Tabela 8 - Sólidos lixiviados, umidade e proteína bruta dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos..... | 59 |

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1. Introdução | 16 |
| 2. Objetivos | 17 |
| 2.1. Objetivo geral..... | 17 |
| 2.2. Objetivos específicos..... | 17 |
| 3. Hipótese | 17 |
| 4. Revisão bibliográfica | 17 |
| 4.1. Arroz..... | 17 |
| 4.2. Estrutura e composição dos grãos..... | 20 |
| 4.3. Envelhecimento natural de arroz..... | 24 |
| 4.4. Envelhecimento acelerado de arroz..... | 26 |
| 4.5. Micro-ondas..... | 28 |
| 4.6. Envelhecimento acelerado de arroz por micro-ondas..... | 30 |
| 5. Material e métodos | 33 |
| 5.1. Material..... | 33 |
| 5.2. Métodos..... | 33 |
| 5.2.1. Envelhecimento natural..... | 33 |
| 5.2.2. Envelhecimento acelerado de arroz por micro-ondas..... | 33 |
| 5.3. Análises..... | 34 |
| 5.3.1. Rendimento de grãos inteiros..... | 34 |
| 5.3.2. Tempo de cocção..... | 35 |
| 5.3.3. Perfil branquimétrico..... | 35 |
| 5.3.4. Perfil colorimétrico..... | 35 |
| 5.3.5. Rendimento gravimétrico e volumétrico..... | 36 |
| 5.3.6. Índice de acidez..... | 37 |
| 5.3.7. Propriedades viscoamilográficas (RVA)..... | 37 |
| 5.3.8. Cristalinidade relativa (difração de raios-X)..... | 38 |
| 5.3.9. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)..... | 38 |
| 5.3.10. Digestibilidade <i>in vitro</i> do amido..... | 39 |
| 5.3.11. Sólidos lixiviados..... | 41 |
| 5.3.12. Umidade..... | 42 |
| 5.3.13. Proteína bruta..... | 42 |
| 5.4. Análise estatística..... | 42 |
| 5.4.1. Análise univariada..... | 42 |

| | |
|---|-----------|
| 5.4.2. Análise multivariada..... | 43 |
| 6. Resultados e discussão..... | 43 |
| 6.1. Rendimento de grãos inteiros e índice de acidez..... | 43 |
| 6.2. Perfil branquimétrico e colorimétrico | 44 |
| 6.3. Rendimento gravimétrico, volumétrico e tempo de cocção | 47 |
| 6.4. Propriedades viscoamilográficas (RVA) | 50 |
| 6.5. Cristalinidade relativa (difração de raios-X)..... | 51 |
| 6.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) | 53 |
| 6.7. Digestibilidade <i>in vitro</i> do amido..... | 56 |
| 6.8. Sólidos lixiviados, umidade e proteína bruta | 59 |
| 6.9. Análise multivariada | 61 |
| 7. Considerações finais e conclusões..... | 65 |
| 8. Referências | 66 |

1. Introdução

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos principais cereais cultivados no mundo, sendo fonte de alimento para mais da metade da população mundial. Como qualquer outro grão, o arroz apresenta vida útil após ser colhido e necessita ser armazenado corretamente para a manutenção de sua qualidade.

O arroz armazenado (safra velha) se destaca ao arroz recém-colhido (safra nova), devido ao fato de apresentar propriedades culinárias satisfatórias, como maior absorção de água e expansão de volume na cocção. Além disso, o arroz armazenado tende a apresentar maior rendimento de grãos inteiros, o que é uma característica preferível nas indústrias de beneficiamento de grãos. Este processo pelo qual os grãos ficam submetidos ao armazenamento por um determinado período é chamado de envelhecimento natural.

Uma das desvantagens do envelhecimento natural é o tempo de armazenamento, que geralmente necessita de seis meses a um ano para ser concluído, acarretando custos operacionais e de manutenção que encarecem esse processo. Métodos de envelhecimento acelerado de arroz, por sua vez, surgem como alternativas viáveis, visto que induzem transformações físicas e químicas desejáveis, similares às que ocorrem no arroz envelhecido naturalmente, porém em períodos significativamente mais curtos.

Alguns métodos de envelhecimento acelerado de arroz vêm sendo estudados, dentre os quais o tratamento em que os grãos são submetidos à irradiação micro-ondas e que tem apresentado resultados promissores. Estudos anteriores demonstraram que a tecnologia que utiliza micro-ondas é capaz de acelerar o processo de envelhecimento de arroz num período relativamente curto. A variação de parâmetros como potência do equipamento e tempo de exposição à irradiação são responsáveis por alterar as propriedades físicas, químicas e tecnológicas dos grãos, possibilitando obter características semelhantes às do arroz armazenado durante um ano ou menos através do tratamento com micro-ondas em tempos de exposição relativamente curtos.

Contudo, estudos relacionados ao envelhecimento acelerado de arroz utilizando tecnologias emergentes como a irradiação micro-ondas ainda são escassos no Brasil. Nesse sentido, há necessidade de maiores informações a respeito desse tema de pesquisa em cultivares Sul-Americanas de arroz pela academia científica.

2. Objetivos

2.1. Objetivo geral

O objetivo deste estudo foi avaliar a influência do método de envelhecimento acelerado de grãos de arroz por micro-ondas sobre as suas propriedades físicas, químicas e tecnológicas, comparando com grãos de arroz envelhecidos naturalmente.

2.2. Objetivos específicos

Avaliar efeitos do método de envelhecimento natural de arroz em casca nas propriedades físicas, químicas e tecnológicas dos grãos, durante um ano de armazenamento na temperatura de $25^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$.

Avaliar efeitos do método de envelhecimento acelerado de arroz em casca via irradiação por micro-ondas nas propriedades físicas, químicas e tecnológicas dos grãos, com 12-13% de umidade, usando potência de 900 W, em exposições de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos.

3. Hipótese

Alterando-se tempos de exposição dos grãos de arroz em casca na potência de 900 W no micro-ondas, é possível controlar alterações que interferem em propriedades físicas, químicas e tecnológicas, gerando arroz com qualidade similar à obtida no envelhecimento natural ocorrido no armazenamento.

4. Revisão bibliográfica

4.1. Arroz

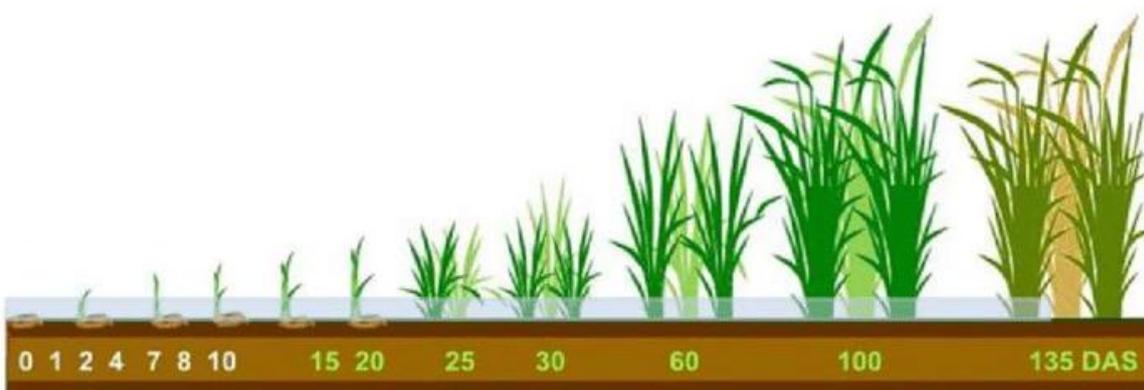
O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais mais cultivados no mundo, sendo de extrema importância para a alimentação humana. Está presente diariamente na dieta de quase metade da população mundial, principalmente dos países Asiáticos, Sul-Americanos e Africanos (Zhou *et al.*, 2015; Baroudy *et al.*, 2020). Historiadores e cientistas relatam que a cultura teve origem no sudeste da Ásia. A literatura chinesa descreve as referências mais antigas ao cultivo do arroz há cerca de 5.000 anos (Brondani *et al.*, 2005).

Por apresentar alto teor de amido em sua composição, o grão é uma excelente fonte de carboidratos. O amido é composto basicamente por dois polissacarídeos: amilose e amilopectina. As concentrações desses polímeros e as interações intramoleculares e/ou intermoleculares do amido com outros componentes dos grãos como proteínas, lipídios e polissacarídeos não-amiláceos, são fatores que influenciam na qualidade do arroz (Balindong *et al.*, 2018).

O arroz é uma planta herbácea monocotiledônea da família Poaceae, de origem aquática e apresenta ciclo anual que varia de 100 a 140 dias para cultivos inundados e de 110 a 150 dias para cultivos em terras altas (Nunes, 2016). Basicamente três fases compreendem o ciclo de desenvolvimento da cultura: plântula, que vai da semente até a emergência; vegetativa, que vai da emergência até o aparecimento do colar da última folha (folha bandeira) no colmo principal; e reprodutiva, que vai da diferenciação da panícula até a maturação fisiológica (Counce, Keisling & Mitchell, 2000) (Figura 1).

O surgimento de um determinado órgão na planta é definido como estágio de desenvolvimento, já a fase de desenvolvimento caracteriza-se pelo intervalo de tempo entre dois estágios (Streck *et al.*, 2003). A adaptação da cultura em solos alagados ocorre devido à presença de aerênquima em suas raízes e nos colmos, característica fundamental que permite a passagem de oxigênio do ar para a camada da rizosfera. A morfologia da planta é composta por raízes, colmos, folhas e panículas (Figura 2).

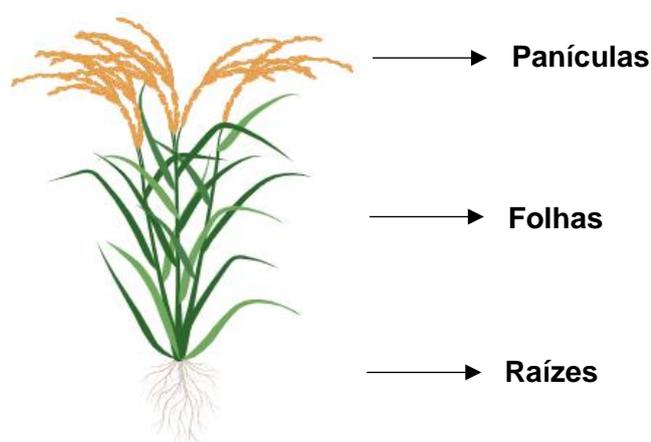
Figura 1 – Ciclo de desenvolvimento do arroz



Fonte: Adaptado de Hickel, (2020).

O arroz foi introduzido pelos portugueses no Brasil, havendo relatos da produção nos primeiros anos após o descobrimento do país (Lemos & Soares, 1999). A maior produção orizícola ocorre na região Sul do país, nos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, que apresentam sistemas de cultivo com manejo de irrigação por inundação, majoritariamente no Rio Grande do Sul, onde ocorre a maior produção da cultura no país (Ferreira, 2022). Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2024), registram produção de 10.589,1 mil toneladas de arroz, sendo 1.281,9 mil hectares de cultivo em sistema irrigado e 325,6 mil hectares de cultivo de sequeiro na safra 2023/24.

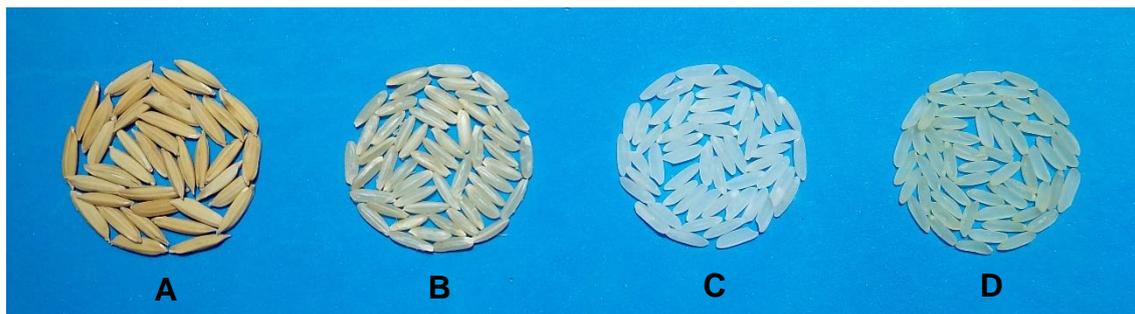
Figura 2 - Morfologia da planta de arroz



Fonte: BioRender.com.

O arroz é consumido de diferentes maneiras: arroz branco polido, integral, parboilizado polido, parboilizado integral e ultimamente os pigmentados (preto e vermelho). As propriedades nutricionais, culinárias e sensoriais são distintas entre essas categorias (Brandão, Contreira & Caires, 2016). No Brasil, o arroz branco polido, o parboilizado polido e o integral (Figura 3) são as formas mais comuns de consumo (Paiva, 2011), com preferência para o branco polido, da classe longo-fino, subespécie indica. Este arroz apresenta alto teor de amilose ($\geq 23\%$) e baixa temperatura de gelatinização (63 a 73°C), características fundamentais para a formação de grãos macios e soltos, bem como menor tempo de cocção (Streck *et al.*, 2018). Segundo Fitzgerald, McCouch e Hall (2009), o consumidor é exigente no quesito de qualidade do arroz, valorizando atributos como aparência visual, textura, aroma e sabor.

Figura 3 – Arroz em casca (A), integral (B), branco polido (C) e parboilizado polido (D)

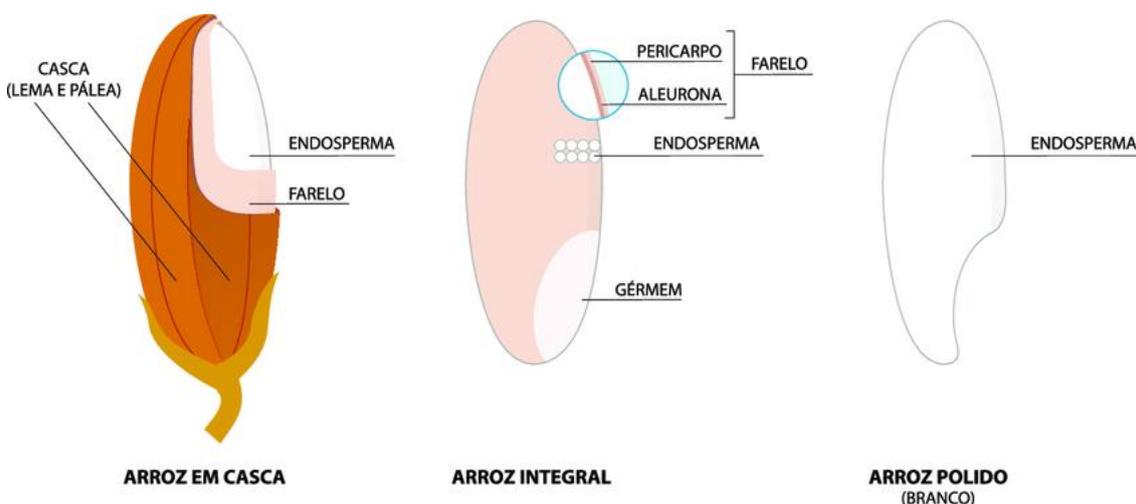


Fonte: Autor.

4.2. Estrutura e composição dos grãos

O arroz é composto basicamente por pálea, lema, gérmen, endosperma, aleurona e pericarpo (Figura 4). Por apresentar alta concentração de amido no endosperma, o grão é considerado um dos principais alimentos energéticos, fornecendo também proteínas, minerais, fibras, vitaminas e lipídios em menores quantidades.

Figura 4 - Estrutura morfológica de um grão de arroz e as partes que o compõem



Fonte: Oliveira, (2021).

Devido ao processo de beneficiamento industrial (integral, polido ou parboilizado) e a diferenças varietais, ocorrem variações na composição nutricional do grão. Além disso, o mesmo genótipo pode apresentar composição diferente devido a distintas condições de clima, solo e manejo agrônomico de produção (Oliveira, 2021). Na Tabela 1 está apresentada a composição nutricional média de grãos de arroz longo integral, polido e parboilizado polido.

Tabela 1 – Composição nutricional média (%) de alguns nutrientes encontrados em grãos de arroz integral, branco polido e parboilizado polido longo

| Nutriente/ Composto | Arroz Integral | Arroz Branco Polido | Arroz Parboilizado Polido |
|--------------------------------|---------------------------|------------------------------------|--------------------------------------|
| Amido | 74,12 | 87,58 | 85,08 |
| Proteínas | 10,46 | 8,94 | 9,44 |
| Lipídios | 2,52 | 0,36 | 0,69 |
| Minerais | 1,15 | 0,30 | 0,67 |
| Fibra total | 11,76 | 2,87 | 4,15 |
| Fibra insolúvel | 8,93 | 1,05 | 1,63 |
| Fibra solúvel | 2,82 | 1,82 | 2,52 |

Fonte: Adaptado de Storck, (2004).

O amido corresponde a cerca de 90% do total de matéria seca na composição dos grãos. O teor de proteínas pode variar de 5% a 13%, de acordo com o genótipo, o manejo da adubação nitrogenada e a temperatura média durante o desenvolvimento da planta (Fonseca, 2015).

As quatro principais proteínas encontradas nos grãos de arroz são: albumina, globulina, prolamina e glutelina (Tong *et al.*, 2019). A principal proteína, presente em maior quantidade no arroz, é a orizenina, uma glutelina, com aproximadamente 80% do total de proteínas presentes no grão (Martin & Fitzgerald, 2002).

A concentração de lipídios em arroz branco polido é baixa (menos que 1%). Já em grãos integrais, as concentrações de lipídios são maiores, podendo chegar até 3% deste nutriente, devido à permanência das camadas mais externas dos grãos, enquanto a fração de fibra alimentar presente no arroz, contém os polissacarídeos: celulose, hemicelulose, amido resistente e pectinas (Walter, Marchezan & Avila, 2008).

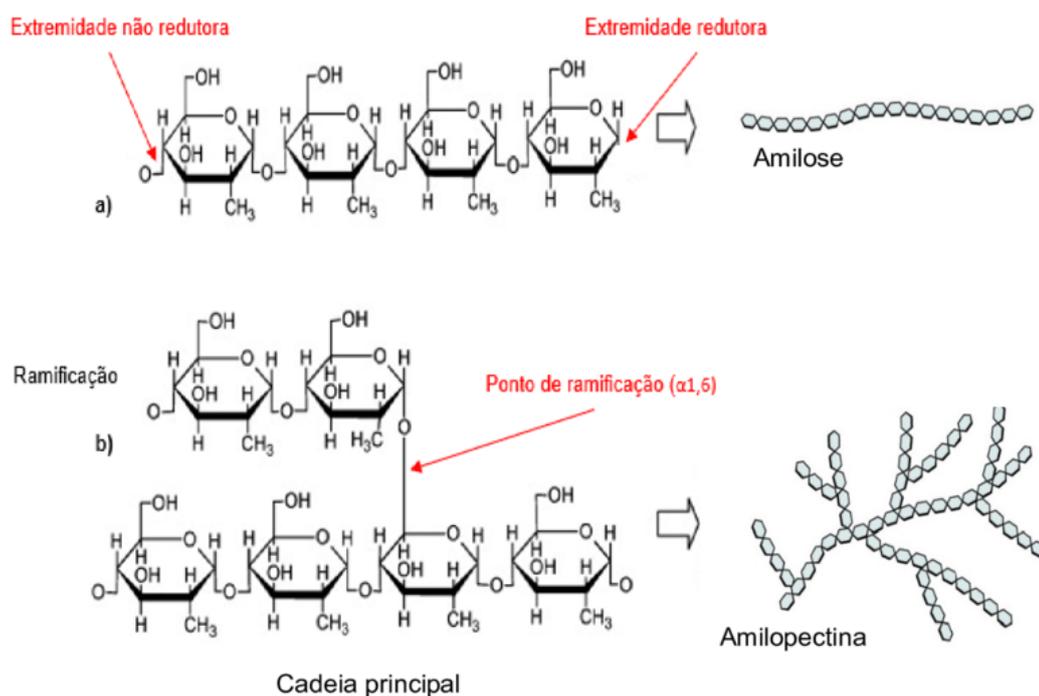
Os minerais e as vitaminas, similarmente ao que acontece com os demais constituintes, são variáveis, porém, estão presentes em maiores quantidades nas camadas periféricas dos grãos (Silva *et al.*, 2017).

Nos países em desenvolvimento, o grão exerce papel importante na dieta e é responsável por fornecer, em média, 715 kcal per capita por dia, 27% dos carboidratos, 20% das proteínas e 3% dos lipídios da alimentação. No Brasil, o consumo per capita é de 108 g por dia, fornecendo 14% dos carboidratos, 10%

das proteínas e 0,8% dos lipídios da dieta (Kennedy, Burlingame, & Nguyen, 2002). No entanto, podem ocorrer variações na composição dos grãos, devido a diferenças varietais, alterações ambientais, de manejo, de processamento e de armazenamento, produzindo grãos com características nutricionais diferenciadas (Zhou *et al.*, 2002a).

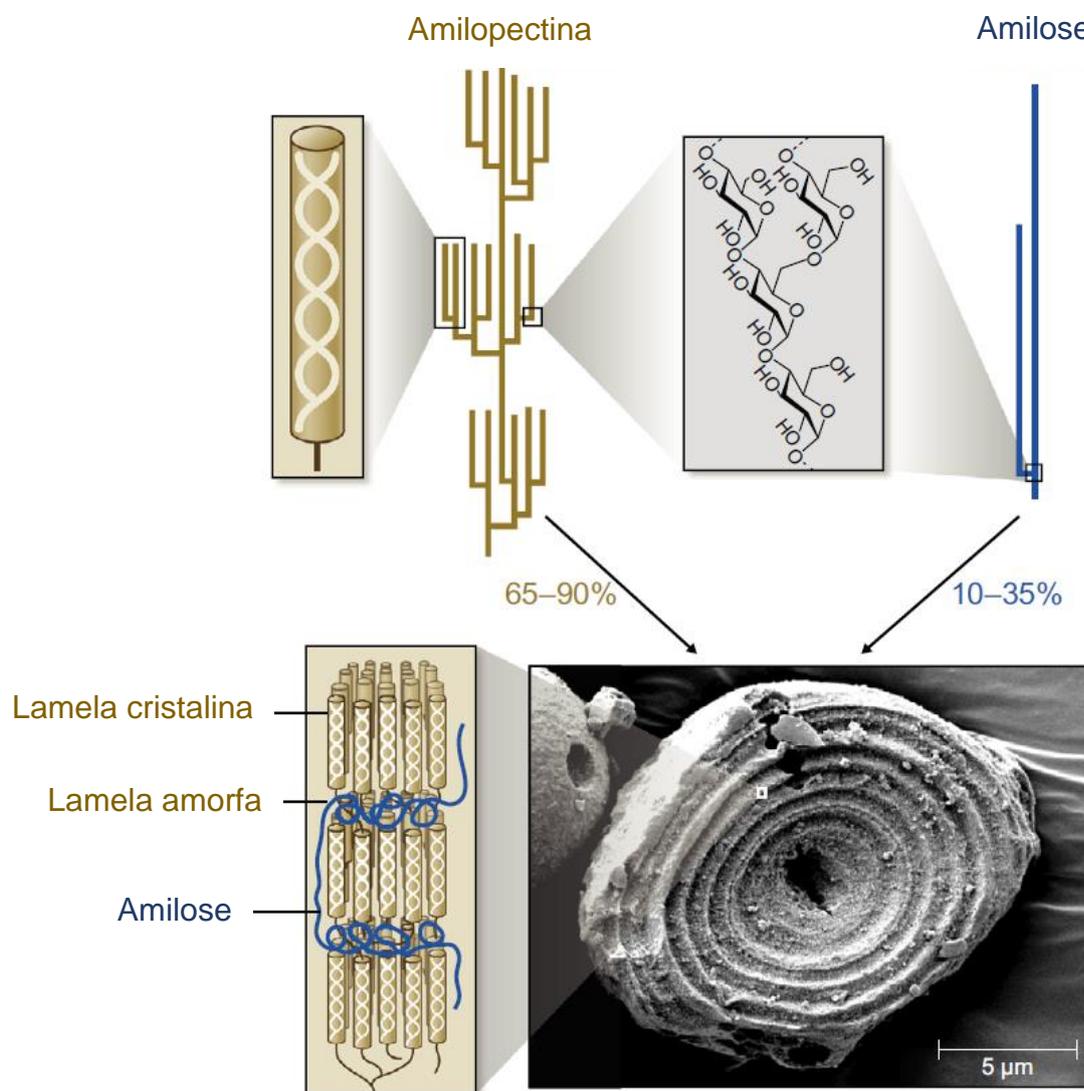
O amido, diferentemente do que ocorre com os demais carboidratos, é constituído por grânulos semicristalinos (Bemiller, 2019; Damodaran & Parkin, 2019), os quais apresentam dois principais polissacarídeos: amilose e amilopectina (Figura 5). A amilopectina possui cadeias de glicose ligadas a α -1,4 e apresenta ramificações em sua estrutura ligadas a α -1,6. A característica semicristalina dos grânulos de amido é devida à conformação da amilopectina. As cadeias adjacentes, que são organizadas e formadas por duplas-hélices, constituem as lamelas cristalinas, enquanto os pontos de ramificações dão origem a lamelas amorfas (Figura 6). A amilose, por sua vez, não é necessária para a formação de grânulos semicristalinos e é composta geralmente por cadeias longas e lineares ligadas a α -1,4 podendo haver algumas ramificações ligadas a α -1,6 (Seung, 2020).

Figura 5 – Estrutura química do amido. Representação do polímero linear de amilose (a) e ramificado de amilopectina (b). Extremidades não-redutora (hidroxila do carbono anomérico ligada) e redutora (hidroxila do carbono anomérico livre)



Fonte: Dala-Paula *et al.*, (2021).

Figura 6 – Estrutura molecular dos grânulos de amido. Representação gráfica dos polímeros amilose e amilopectina. A estrutura ramificada da amilopectina permite que as cadeias adjacentes formem duplas-hélices que se agrupam em lamelas cristalinas, enquanto os pontos de ramo residem em lamelas amorfas



Fonte: Seung, (2020).

Segundo Juliano (1993), pelas proporções entre amilose e amilopectina, os grãos de diferentes genótipos são classificados em categorias como: ceroso (1-2% de amilose), conteúdo de amilose muito baixo (2-12%), baixo (12-20%), intermediário (20- 25%) e alto (25-33%). Geralmente, grãos que contém teores médios e baixos de amilose tendem a apresentar textura mais macia, enquanto grãos com teores de amilose altos possuem textura firme (Li & Gilbert, 2018).

A avaliação da qualidade do arroz varia bastante de uma região para outra, ou seja, o que é preferível para um grupo de pessoas pode não ser para

outro (Custodio *et al.*, 2019). Por exemplo, em regiões como o sul da China, Índia e Paquistão, há preferência por grãos longos e delgados, com textura relativamente dura, enquanto em regiões como o norte da China, Japão e Coreia do Sul, os consumidores preferem grãos médios com textura relativamente macia (Adegoke *et al.*, 2021).

No Brasil, além do aspecto do produto cru, há preferência por arroz com qualidade de cocção que proporcione bom rendimento de panela, cozinhe rápido, que os grãos sejam secos e soltos após a cocção e apresentem textura macia após o resfriamento (EMBRAPA, 2021).

4.3. Envelhecimento natural de arroz

O envelhecimento natural começa antes da colheita e continua na pós-colheita, durante o armazenamento do arroz, sendo dependente do tempo, da temperatura e da umidade (Perdon *et al.*, 1997; Chrastil, 1990a). É um processo demorado, necessita de espaços nos armazéns e gera custos operacionais e de manutenção durante todo o período de armazenagem (Saikrishna *et al.*, 2018).

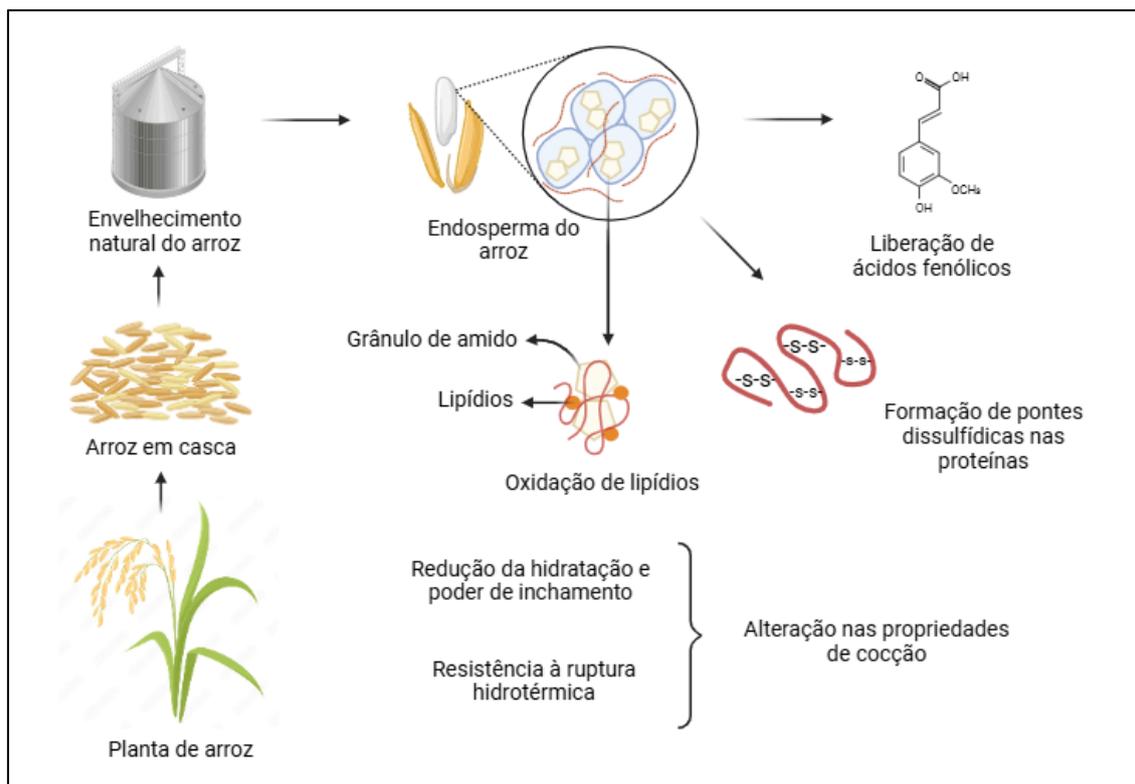
O envelhecimento do arroz é um mecanismo complexo que envolve muitas variáveis. Para entender esse processo, é essencial analisar a interação entre os componentes do grão, como amido, proteína, lipídios e ácidos fenólicos (Figura 7). Segundo Sodhi *et al.* (2003), inúmeras alterações nas propriedades físico-químicas do arroz são notadas após três meses de armazenamento. Estudos demonstraram que o arroz envelhecido natural apresentou diferenças na composição química, em propriedades físicas e químicas (Park *et al.*, 2012), na avaliação sensorial (Kaminski *et al.*, 2013, Griglione *et al.*, 2015, Sung *et al.*, 2014) e nas propriedades culinárias (Zhou *et al.*, 2007).

O arroz, por ser um grão que contém carboidratos, proteínas e lipídios em maior quantidade, as mudanças das condições externas de armazenamento e as atividades enzimáticas são responsáveis pela deterioração desses nutrientes (Lidon, 2002). Pesquisas revelaram que desses nutrientes, os lipídios são os que mais apresentam mudanças durante o envelhecimento de arroz, seguidos pelas proteínas e pelos carboidratos, nessa ordem.

As alterações nos lipídios são causadas principalmente por hidrólise e oxidação (Atungulu *et al.*, 2007). A hidrólise é responsável pela produção de ácidos graxos livres e confere sabor a ranço. Já a oxidação é o processo pelo

qual os ácidos graxos insaturados são oxidados formando hidroperóxidos, os quais produzem compostos carbonílicos como aldeídos e cetonas (Gomes & Kurozawa, 2020). Em estudos com lipídios, foi revelado que os teores de ácidos graxos insaturados na fração lipídica extraível com éter de petróleo foram menores no arroz envelhecido (Zhou *et al.*, 2003).

Figura 7 – Ilustração das principais mudanças químicas que ocorrem durante o envelhecimento natural do arroz



Fonte: Autor.

Com relação ao conteúdo de proteína nos grãos, segundo estudo conduzido por Liu *et al.* (2011), o teor não se alterou durante o armazenamento. No entanto, suas propriedades físicas e químicas sofreram mudanças. Na medida em que o arroz envelhece no armazenamento, os grupos sulfidríla das proteínas são oxidados em ligações dissulfeto e essa mudança estrutural impacta diretamente nas propriedades viscoamilográficas do arroz, resultando em menor viscosidade (Hamaker & Griffin, 1993).

A ocorrência de mudanças no perfil volátil do arroz também é comum durante o armazenamento. Os resultados indicam que o tempo de armazenamento tem maior influência sobre os compostos aromáticos,

independentemente da temperatura de armazenamento (Sung *et al.*, 2014). A presença de aldeídos é responsável pela formação de sabor desagradável durante o armazenamento. Outros compostos como sulfeto e furano também estão presentes durante o envelhecimento de arroz (Biao *et al.*, 2019).

Alterações nos ácidos fenólicos são observadas durante o envelhecimento de arroz, sendo os ácidos fenólicos livres mais impactados do que os ácidos fenólicos ligados. Pesquisadores observaram redução no teor de ácidos fenólicos livres no arroz envelhecido quando comparado ao arroz de safra nova (Zhou *et al.*, 2014).

Além das mudanças na composição química observadas durante o envelhecimento de arroz, ocorrem também alterações nas propriedades físicas e químicas dos grãos. Características de cozimento e propriedades reológicas que são determinadas pelo poder de inchamento, gelatinização e retrogradação do amido, exibem faixas variáveis no arroz (Kong *et al.*, 2015, Zhou *et al.*, 2002b). Alterações nas propriedades de pasta, mensuradas por termoviscosimetria e amilografia, são um dos índices mais sensíveis do processo de envelhecimento de arroz (Perdon *et al.*, 1999, Sowbhagya & Bhattacharya, 2001, Toyoshima *et al.*, 2000). Pesquisas conduzidas por Likitwattanasade & Hongsprabhas (2010), Villareal *et al.* (1976) e Zhou *et al.* (2010), demonstraram que as mudanças nas propriedades de pasta e térmicas de arroz foram dependentes da temperatura e do tempo de armazenamento. A viscosidade de quebra e a viscosidade máxima, representadas no viscoamilograma RVA, são os parâmetros mais detectáveis para avaliar o envelhecimento de arroz (Huang & Lai, 2014, Tananuwong & Malila, 2011).

4.4. Envelhecimento acelerado de arroz

O envelhecimento acelerado de arroz, ao contrário do que ocorre no envelhecimento natural, induz mudanças físicas e químicas desejáveis nos grãos em período muito mais curto, tornando as propriedades de cozimento semelhantes às do arroz envelhecido naturalmente (Gujral & Kumar, 2003). Atualmente, diversos tratamentos térmicos e não-térmicos estão sendo estudados como alternativas rápidas e eficazes para o envelhecimento induzido do arroz.

Millati *et al.* (2021) avaliaram o efeito da temperatura (40, 50 e 60 °C) e do tempo (4, 8, 12, 16 e 20 dias) no envelhecimento acelerado do arroz integral sobre a qualidade dos grãos processados. Os resultados mostraram que a temperatura e o tempo de envelhecimento afetaram a cor, o rendimento de grãos inteiros e o grau de polimento dos grãos. As condições ótimas para melhorar esses parâmetros foram obtidas a partir do envelhecimento acelerado a 40 °C por 12 dias.

Num estudo que induziu o envelhecimento do arroz por aquecimento, duas variedades de arroz, uma da Malásia e outra da Índia, foram aquecidas a 90 °C em um forno por 3 h. O processo de envelhecimento influenciou positivamente as principais características da qualidade do cozimento, como rendimento gravimétrico e volumétrico. Após o tratamento, ocorreram trincas na estrutura do arroz devido à diminuição da umidade, o que afetou diretamente os parâmetros de taxa de absorção de água e perda de sólidos durante o cozimento (Halim *et al.*, 2023).

Tratamentos hidrotérmicos demonstraram eficácia na indução do envelhecimento de arroz. Kaur *et al.* (2023) trataram hidrotermicamente duas cultivares indianas de arroz Basmati denominadas Pusa 1121 e Pusa 1509. As amostras de arroz foram envelhecidas artificialmente utilizando temperaturas de 130-135 °C a 4 kg/cm² de pressão por um período de 3 min. A autoclavagem causou um aumento na dureza e na mastigabilidade, diminuindo a adesividade dos grãos de arroz cozidos em ambas as cultivares.

Um estudo utilizando tratamento hidrotérmico também constatou o envelhecimento acelerado do arroz. Sob tratamento hidrotérmico, amostras secas de arroz em casca (14% de umidade) foram autoclavadas em três pressões (0,0, 0,5 e 1,0 kg/cm²) por 5, 10 e 15 min. Esses tratamentos foram responsáveis por alterar algumas características importantes em grãos de arroz, como rendimento de grãos inteiros, os rendimentos gravimétricos e volumétricos, as perdas de sólidos lixiviados, o tempo de cozimento e o índice de brancura (Yerragopu & Palanimuthu, 2019).

Pesquisas com tratamento térmico por radiofrequência também foram conduzidas como alternativa ao processo de envelhecimento natural. O tratamento por radiofrequência foi aplicado nos grãos utilizando um sistema de aquecimento por radiofrequência na potência de 27,12 MHz, em uma faixa de

umidade de 9,5 a 18,5% e tempos de exposição de 10 a 115 min. O estudo apresentou propriedades distintas ao comparar arroz fresco e arroz envelhecido. O tratamento resultou em aumento da absorção de água, na consistência do gel, no teor de ácidos graxos livres, na coesividade, na aceitabilidade geral e nas propriedades de pasta (viscosidade de pico e viscosidade final) (Hussain *et al.*, 2021).

Outro estudo utilizando radiofrequência foi realizado no arroz em casca, variando a umidade de 11 a 21,5% e o tempo de exposição à radiofrequência de 17 a 208 min. Esses parâmetros influenciaram as propriedades de qualidade avaliadas (textura, moagem, atributos químicos, de cozimento e sensoriais). As condições ótimas do tratamento ocorreram na combinação de 45 min como tempo de exposição e 16,3% de umidade no processo (Iftikhar *et al.*, 2020).

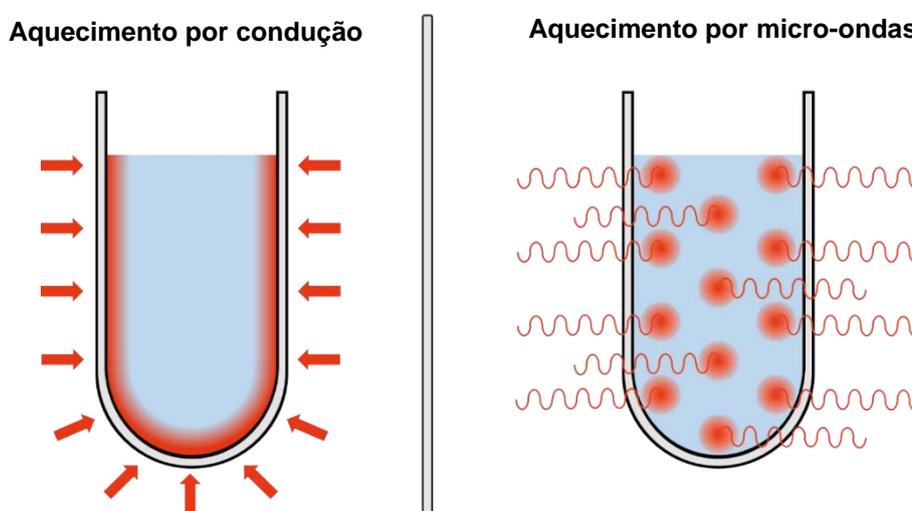
Mais recentemente, Kaur *et al.* (2024) observaram que o tratamento de arroz com ultrassom proporcionou características de cocção semelhantes ao arroz envelhecido naturalmente. O arroz foi tratado utilizando um aparelho ultrassom tipo banho na frequência de 20 kHz e potência de 200 W, variando a temperatura de 30 a 50 °C e o tempo de 30 a 90 min. O tratamento afetou as características de polimento e cozimento do arroz. O arroz tratado apresentou menor tempo de cozimento e maior absorção de água com expansão de volume. A combinação ótima dos parâmetros ocorreu com a combinação de 35,46 °C, 88 min e 44 s, produzindo as alterações mais desejáveis, sendo a qualidade equivalente ao do método convencional de envelhecimento do arroz armazenado por seis meses.

4.5. Micro-ondas

A irradiação micro-ondas está localizada no espectro eletromagnético entre a irradiação infravermelha e a radiofrequência, compreendendo frequências de aproximadamente 300 até 300.000 MHz. Para usos domésticos e laboratoriais, equipamentos que trabalham a 2450 MHz é o mais comum e o comprimento de onda nesta frequência é de 12,2 cm. Com relação à potência, os equipamentos disponíveis no mercado fornecem intensidades de energia que variam de 600 até 1500 W, o que significa uma potência disponível de 90 kJ.m⁻¹ (Mello, Barin, & Guarnieri, 2014).

O uso de micro-ondas tem sido uma alternativa muito viável e difundida na área de processamento de alimentos, como secagem, aquecimento, cocção, pasteurização e preservação. A irradiação micro-ondas proporciona aquecimento rápido e volumétrico, característica distinta ao aquecimento convencional por condução (Figura 8), que é mais demorado e aquece primeiro as camadas periféricas e depois transfere o calor para as camadas internas (Rockembach, 2019). Em consequência, essa tecnologia apresenta algumas vantagens como maior taxa de aquecimento, economia de tempo, fácil operação e economia energética (Chandrasekaran, Ramanathan, & Basak, 2013).

Figura 8 – Diferença entre os aquecimentos por condução e por irradiação micro-ondas



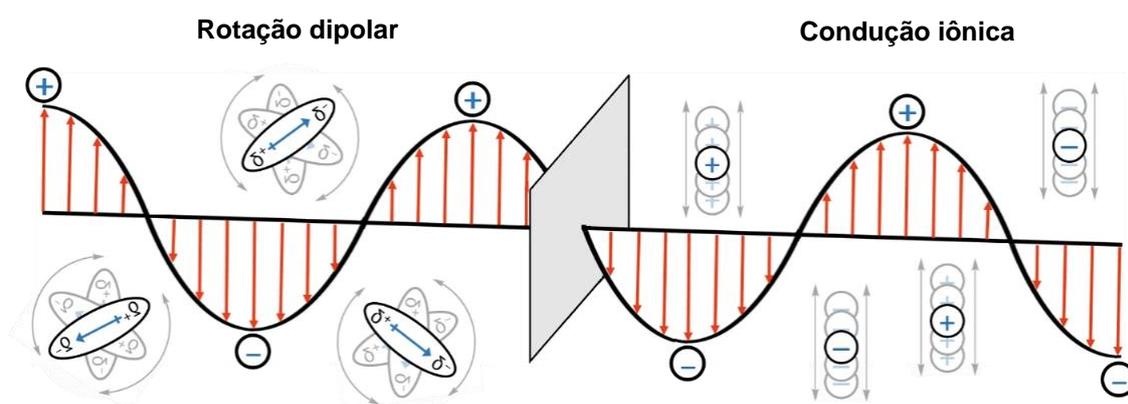
Fonte: CEM.com.

Um estudo realizado por Szymkowiak *et al.* (2020) revelou que as pessoas percebem negativamente o uso de micro-ondas em aplicações alimentares em comparação com outros tipos de tratamentos, como pasteurização, alta pressão hidrostática ou adição de conservantes. Foi comprovado cientificamente que a irradiação micro-ondas não é uma tecnologia perigosa para os seres humanos, a não ser que o dispositivo esteja danificado. O micro-ondas promove a redução da duração do aquecimento dos produtos alimentícios, o que é eficaz para manter o valor nutricional e também é responsável por melhorar determinadas características dos alimentos, como a textura por exemplo (Guzik *et al.*, 2022).

O mecanismo de aquecimento por micro-ondas ocorre pela transferência de eletricidade gerada pelo campo magnético na câmara do equipamento,

ocorrendo em nível molecular. Pela ação do campo elétrico gerado (Figura 9), as partículas polares, como a água, tendem a girar e colidir-se umas às outras gerando energia térmica (calor) que é dissipado na direção do campo elétrico pela condução iônica (Alslaibi *et al.*, 2013).

Figura 9 – Mecanismo de aquecimento por micro-ondas



Fonte: CEM.com.

4.6. Envelhecimento acelerado de arroz por micro-ondas

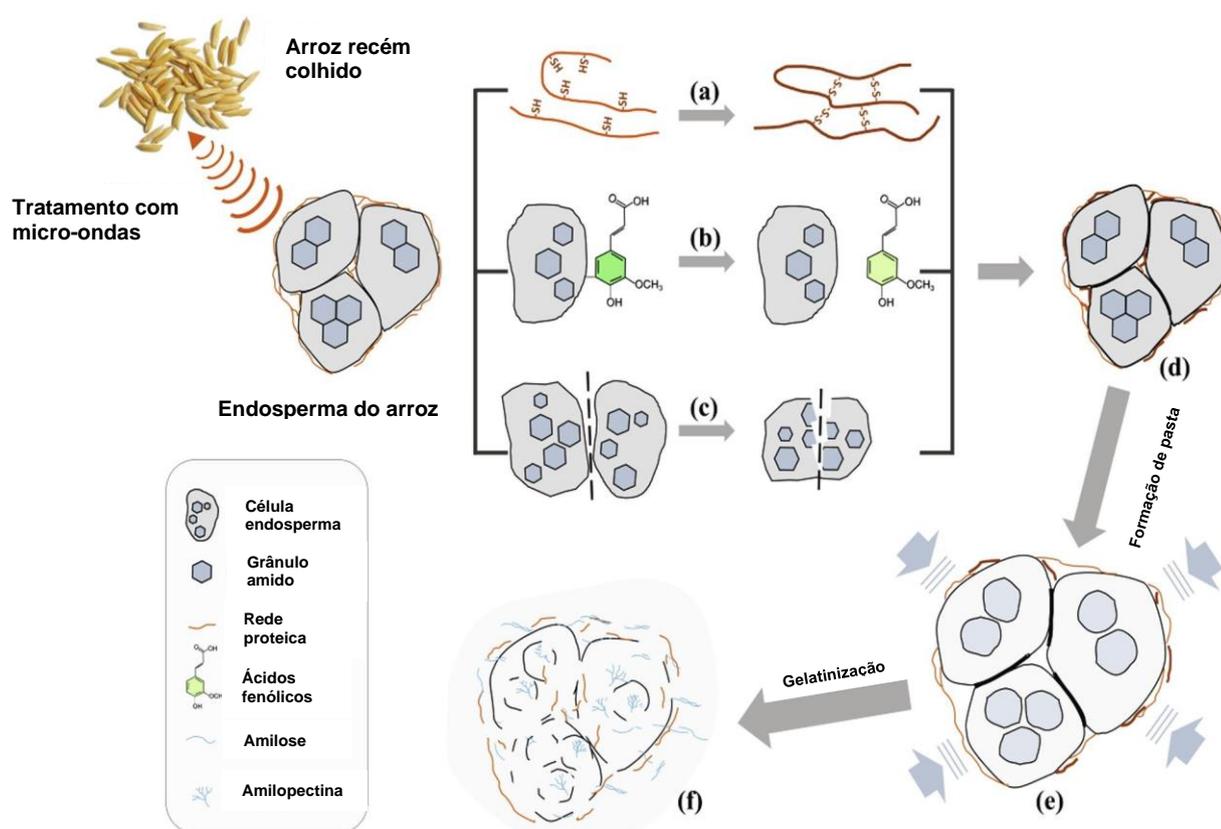
Pesquisas recentes têm revelado que o tratamento com irradiação micro-ondas na pós-colheita do arroz causa mudanças físico-químicas similares as que ocorrem no arroz envelhecido naturalmente por um ano.

Zhong *et al.* (2020) estudaram o efeito do micro-ondas como meio de acelerar o envelhecimento natural do arroz. Os pesquisadores trataram o arroz em casca recém-colhido via irradiação micro-ondas na potência de 540 W por dois minutos. Os resultados encontrados revelaram que as propriedades tecnológicas (parâmetros de pasta, textura e reologia) do arroz mudaram de maneira semelhante ao envelhecimento natural de um ano. As viscosidades de pasta (máxima, mínima, quebra, final e retrogradação) e a temperatura de pasta da farinha de arroz foram aumentadas, a força e a dureza do gel de arroz foram aprimoradas e a adesividade do gel de arroz foi reduzida.

A irradiação micro-ondas promoveu três principais alterações nos grãos. A primeira foi a oxidação de grupos tiol das proteínas e a formação de pontes dissulfídicas, o que aumentou a força de interação da rede proteica. A segunda foi a liberação de ácidos fenólicos livres, os quais podem aumentar a resistência da parede celular. E a terceira foi o aumento da força de adesão entre as paredes

celulares das células do endosperma, o que proporcionou mudanças de clivagem intercelular para clivagem intracelular. Essas mudanças químicas e micromecânicas nos grãos afetaram o poder de inchamento da farinha de arroz (Figura 10). Conseqüentemente, foi responsável por alterar as propriedades tecnológicas do arroz (Zhong *et al.*, 2020).

Figura 10 – Diagrama representando o mecanismo de envelhecimento acelerado de arroz via irradiação micro-ondas. (a), formação das pontes dissulfídicas nas proteínas; (b), liberação dos ácidos fenólicos livres; (c), mudanças micromecânicas nas células do endosperma; (d) e (e), restrição do poder de inchamento da farinha de arroz durante a formação de pasta; (f) gel de arroz



Fonte: Zhong *et al.* (2020).

Noutro estudo realizado por Nayak (2016) também foi utilizado aquecimento por micro-ondas para envelhecimento acelerado de arroz em casca, nas potências de (540, 720 e 900 W), em tempos de exposição de (30, 50, 60, 80 e 90 segundos) e teores de umidade de (12, 14 e 16 %). Os resultados encontrados revelaram que o arroz tratado a 900 W por 60 segundos e 12 % de umidade, apresentou melhorias nas propriedades de beneficiamento, cozimento

e textura, características essas semelhantes ao que acontece no arroz envelhecido naturalmente durante seis meses de armazenamento.

Bruce *et al.* (2022) mostraram que o aquecimento por micro-ondas na secagem de grãos de arroz, seguido por armazenamento de seis meses, conferiu mudanças físicas e químicas significativas. Os autores utilizaram duas cultivares de arroz de grão médio com aproximadamente 20% de umidade e realizaram estudos de secagem através de dois métodos: secagem natural, como tratamento controle e secagem por micro-ondas na frequência de 915 MHz. Após a secagem os grãos foram armazenados durante seis meses a 4 °C e 25 °C, representando as amostras não envelhecidas e envelhecidas, respectivamente. Os resultados encontrados revelaram que os grãos secos via irradiação micro-ondas e envelhecidos naturalmente, tiveram maior viscosidade final, maior dureza e coesão após cocção e menor pico de viscosidade e perda de sólidos comparado ao arroz não envelhecido. As diferenças nos perfis de viscosidade do arroz seco por micro-ondas foram semelhantes às registradas para o arroz safra velha. O micro-ondas promoveu boa secagem e propriedades físico-químicas desejáveis.

Com o objetivo de avaliar a influência da irradiação micro-ondas no envelhecimento acelerado de arroz integral, Devraj *et al.* (2020) trataram duas variedades de arroz grão curto cultivadas na Índia (Sona masuri e RNR-15048), nas potências de 950 e 1400 W por 72 e 91 s, seguido por armazenamento de seis meses. Os resultados revelaram reduções significativas nos teores de umidade, conteúdo de amilose e ácidos graxos livres, com alterações na cor. Além disso, houve aumento no rendimento gravimétrico e volumétrico dos grãos e redução dos sólidos lixiviados e tempo de cocção dos grãos em ambas as cultivares. Após a cocção, os grãos apresentaram menor pegajosidade e redução da viscosidade final na análise de RVA. Segundo os autores, os tratamentos no micro-ondas de 950 W por 72 s e 1400 W por 91 s demonstraram os melhores resultados para os parâmetros avaliados.

5. Material e métodos

5.1. Material

Grãos de arroz em casca da cultivar IRGA 424 RI, amplamente cultivada no Sul do Brasil, Rio Grande do Sul, foram utilizados neste estudo. Os grãos foram descascados e beneficiados no engenho de provas em escala piloto (PAZ-1-DTA, Zaccaria, Brasil). Para as análises de difração de raios-X e propriedades viscoamilográficas (RVA), os grãos de arroz foram moídos com auxílio de um moinho de laboratório (Perten 3100, Perten Instruments, Hägersten, Suécia) utilizando de uma peneira com malha 70 (210 µm). Esses procedimentos foram feitos no Laboratório de Pós-Colheita, Industrialização e Qualidade de Grãos (LABGRÃOS) da Universidade Federal de Pelotas (UFPEL).

5.2. Métodos

5.2.1. Envelhecimento natural

Os grãos, colhidos na safra 2022/23, foram armazenados por um ano em silo metálico, na temperatura de $25\text{ °C} \pm 2\text{ °C}$ e 12-13% de umidade. O envelhecimento natural do arroz ocorreu na propriedade da empresa Tio Joca Alimentos® localizada no município de Santa Vitória do Palmar - RS. Após um ano de armazenamento, a empresa cedeu as amostras de grãos para a realização das análises.

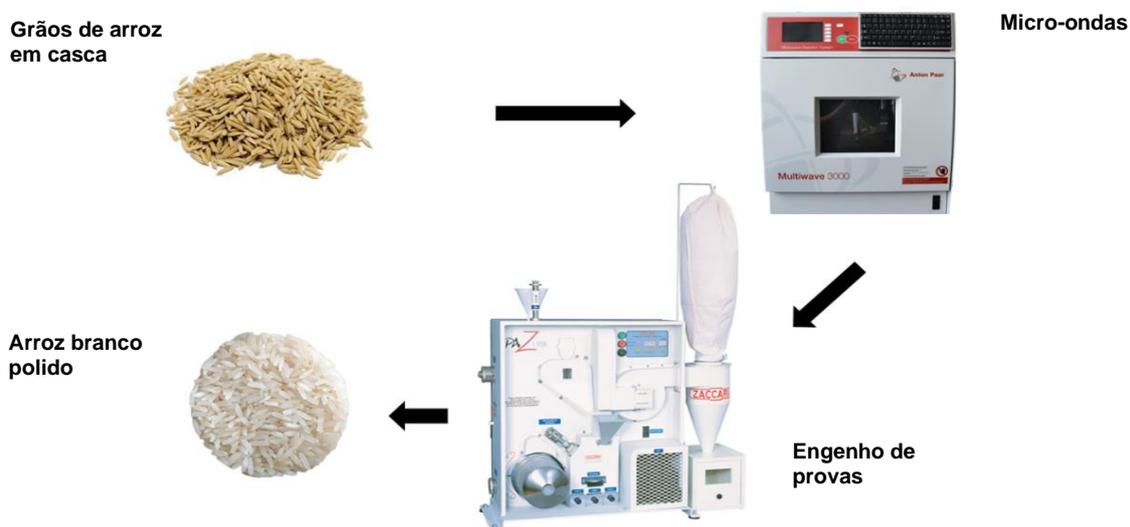
5.2.2. Envelhecimento acelerado de arroz por micro-ondas

Os grãos de arroz em casca da mesma cultivar e da mesma safra que não foram submetidos ao armazenamento também foram cedidos pela mesma empresa, Tio Joca Alimentos®, para as análises de envelhecimento acelerado. Os grãos foram tratados em forno de micro-ondas (Anton Paar, multiwave 5000) na potência de 900 W em seis tempos de exposição (30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos), conforme mostrado na Figura 11. Após cada tempo de tratamento, a temperatura da massa de grãos foi aferida com um termômetro digital infravermelho (Multilaser - HC260) e as amostras foram colocadas em uma caixa de isopor por um período de 24 horas, para evitar choque térmico devido à variação de temperatura. Os grãos foram beneficiados após um dia de repouso.

O experimento foi realizado pela comparação dos resultados das análises dos grãos de arroz safra velha (envelhecimento natural), safra nova (arroz

recém-colhido) e arroz envelhecido por método acelerado (tratamento via irradiação micro-ondas).

Figura 11 – Representação do tratamento dos grãos de arroz em casca via irradiação micro-ondas e beneficiamento em engenho de provas



Fonte: Autor.

5.3. Análises

5.3.1. Rendimento de grãos inteiros

Para a determinação do rendimento de grãos inteiros, foram realizadas triplicatas de 100 gramas de arroz em casca de cada tratamento. As amostras foram descascadas no engenho de provas em escala piloto (PAZ-1-DTA, Zaccaria, Brasil) e polidas durante 60 segundos. Após o polimento, foi realizada a separação por comprimento dos grãos inteiros e quebrados no *trieur* (cilindro alveolado) do equipamento. A verificação dos grãos inteiros e quebrados em ambas as frações obtidas da separação em *trieur* foi realizada com paquímetro digital (Mitutoyo, Santo Amaro, SP, Brasil). Foram considerados grãos quebrados os grãos com comprimento inferior a 4,5 mm conforme descrito na IN MAPA 06/2009 (BRASIL, 2009). Os percentuais de grãos inteiros e quebrados foram calculados com base nas Equações 1 e 2.

$$\text{Grãos inteiros (\%)} = \frac{(GI)}{(PI)-(GM)} \times 100 \quad \text{Eq. 1}$$

$$\text{Grãos quebrados (\%)} = \frac{(GQ)}{(PI)-(GM)} \times 100 \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

GI: grãos inteiros

GQ: grãos quebrados

GM: grãos marinheiros

PI: peso inicial

5.3.2. Tempo de cocção

O tempo de cocção foi avaliado de acordo com o teste de Ranghino (Mohapatra e Bal, 2006). Alíquotas de 100 ml de água destilada foram aquecidas até 100 °C em Becker de 250 ml. Após fervura da água, eram adicionados 20 gramas de arroz, iniciando a contagem do tempo de cozimento a partir do momento de largada dos grãos na água. Após dez minutos de cocção e a cada minuto seguinte, dez grãos eram coletados e pressionados entre duas placas de vidro limpas e observados com luz polarizada. O tempo de cocção era estabelecido quando pelo menos 90% dos grãos não tinham mais o núcleo opaco ou o centro não cozido.

5.3.3. Perfil branquimétrico

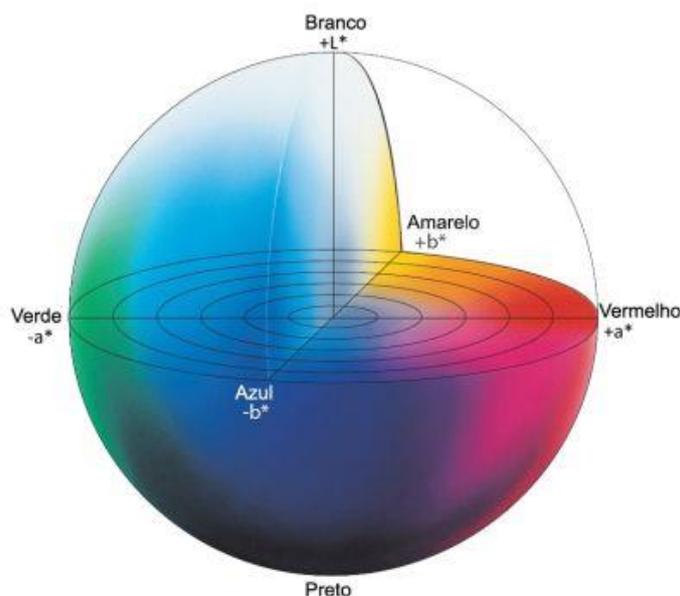
O perfil branquimétrico dos grãos foi determinado em um equipamento medidor de brancura (Modelo MBZ-2, Zaccaria, Brasil). Pequenas amostras de grãos polidos eram colocadas no suporte do equipamento, inseridas na abertura superior e, após estabilização, era realizada a leitura dos parâmetros de brancura, transparência e grau de polimento, conforme escala do equipamento UBZ (Unidade Branquímetro Zaccaria).

5.3.4. Perfil colorimétrico

Para avaliação das mudanças de cor dos grãos de cada tratamento foi utilizado um equipamento denominado colorímetro (Minolta, modelo CR-310, Osaka, Japão), que realiza a leitura das cores em um sistema tridimensional (Figura 12). A avaliação da cor ocorre através de três eixos, onde o eixo L * representa o valor para a luminosidade e avalia do branco (+) até o preto (-), o eixo a * representa o valor que avalia do vermelho (+) até o verde (-) e o eixo b *

representa o valor que avalia do amarelo (+) até o azul (-). A diferença total de cor (ΔE) foi calculada com base na Equação 3, conforme Wrolstad & Smith (2017).

Figura 12 – Sistema tridimensional das cores, demonstrando as coordenadas L^* , a^* e b^*



Fonte – Minolta, 2016.

$$\Delta E = [(L - L^*)^2 + (a - a^*)^2 + (b - b^*)^2]^{0,5} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde, L^* , a^* e b^* são os valores dos atributos de cor da amostra padrão, que nesse caso, foi o arroz safra velha.

5.3.5. Rendimento gravimétrico e volumétrico

O rendimento gravimétrico e volumétrico dos grãos na cocção foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Yadav e Jindal (2007) com algumas modificações. Amostras de 4,5 gramas de grãos polidos foram pesados em tubos Falcon de 50 ml, a altura inicial dos grãos com auxílio de um paquímetro digital foi avaliada (Mitutoyo, Santo Amaro, SP, Brasil) e 13,5 ml de água destilada aquecida foi adicionada. Após, os tubos foram transferidos para um banho-maria com água na temperatura de 100 °C. As amostras foram

retiradas do banho após o tempo de cocção para cada tratamento que foi estabelecido previamente. Após 30 minutos de repouso, os tubos foram pesados para mensurar o rendimento gravimétrico e foram realizadas leituras com o paquímetro digital da altura final dos grãos após o cozimento para avaliar o rendimento volumétrico dos mesmos. Os valores dos rendimentos gravimétrico e volumétrico foram expressos em percentual (%).

5.3.6. Índice de acidez

O índice de acidez das amostras foi avaliado de acordo com o método n° 415/IV das Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 1985) com algumas adaptações. Inicialmente, 2,5 gramas de farinha de arroz foram pesadas em frascos Erlenmeyer de 250 ml, adicionou-se 50 ml de álcool etílico e manteve-se em repouso por 24 horas com a abertura dos frascos vedada para evitar a evaporação do álcool. Após as 24 horas, o sobrenadante de cada amostra foi coletado e transferido para tubos Falcon de 50 ml. Os mesmos foram centrifugados a 5000 rpm por 10 minutos e 20 ml do sobrenadante foram transferidos para frascos Erlenmeyer de 125 ml com três gotas de fenolftaleína. Procedeu-se a titulação com hidróxido de sódio 0,01 M até coloração rósea. O percentual de acidez álcool-solúvel foi calculado de acordo com a equação 4.

$$Acidez (\%) = \left(\frac{(V - V') \times f \times 100}{P \times c} \right) \quad \text{Eq. 4}$$

Onde:

V: n° de ml da solução de hidróxido de sódio 0,01 M gasto na titulação da amostra

V': n° de ml da solução de hidróxido de sódio 0,01 M gasto na titulação do branco

f: fator da solução de hidróxido de sódio 0,01 M

P: peso da amostra usado na titulação

c: correção para solução de NaOH, 10 para solução NaOH 0,1 M e 100 para solução NaOH 0,01 M

5.3.7. Propriedades viscoamilográficas (RVA)

As propriedades viscoamilográficas dos amidos foram avaliadas por um equipamento denominado RVA - *Rapid Visco Analyser* (modelo RVA-4, Newport Scientific, Austrália), por meio do perfil Standard Analysis 1. Foram utilizados 3

gramas de amostra corrigida para 14% de umidade. As amostras foram aquecidas a 50 °C em 1 minuto e, posteriormente, a 95 °C em 3,5 minutos, sendo mantidas a 95 °C durante 2,5 minutos. Em seguida, foram resfriadas para 50 °C em 3,8 minutos e mantidas a 50 °C por 2 minutos. A velocidade de rotação foi mantida a 960 rpm durante 10 segundos e então mantida a 160 rpm durante o restante do processo. Foram avaliadas a temperatura de pasta, viscosidade máxima, viscosidade mínima, viscosidade de quebra, viscosidade final e a retrogradação.

5.3.8. Cristalinidade relativa (difração de raios-X)

Os padrões de difração de raios-X dos grãos moídos foram obtidos utilizando um difratômetro de raios-X Bruker D8 Advance (Bruker Corporation, USA). A região de varredura de difração variou entre 5 ° e 45 ° com uma voltagem alvo de 15 kV, corrente de 40 mA e comprimento de onda (λ): 1,5418 Å.

A cristalinidade relativa (CR) foi calculada conforme descrito por Rabek (1980), usando a Equação 5.

$$CR (\%) = \frac{(AC)}{(AC)+(AA)} \times 100 \quad \text{Eq. 5}$$

Onde:

CR: cristalinidade relativa (%)

AC: área cristalina no difratograma de raios-X

AA: área amorfa no difratograma de raios-X

5.3.9. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

A morfologia da superfície dos grãos de arroz foi examinada usando um microscópio eletrônico de varredura (Shimadzu, SSX-550). Primeiramente, os grãos de arroz foram cozidos e congelados no ultrafreezer a -60 °C por 24 horas. Após esse período, os grãos foram secos por liofilização e alguns foram cortados em seções transversais para melhor visualização da estrutura interna. O grão inteiro e as seções transversais de cada tratamento foram então colocados em uma fita adesiva dupla face, fixada na superfície de um cilindro de metal, e

revestida com ouro. Subsequentemente, as amostras foram examinadas por MEV sob uma voltagem de aceleração de 15 kV e ampliações de 12, 30 e 80 x.

5.3.10. Digestibilidade *in vitro* do amido

Para a simulação da digestão do amido de arroz, foi utilizada a metodologia proposta por Dartois *et al.* (2010), a qual tem o objetivo de simular condições de digestão gástrica e intestinal.

Amostras de 12,5 gramas de arroz cozido dos tratamentos safra velha, safra nova, micro-ondas (90 s) e micro-ondas (120 s) com 70 ml de água foram adicionados a um processador de alimentos para simular o processo de mastigação. Na sequência, os grãos triturados foram transferidos para um reator de vidro encamisado (capacidade de 250 ml) com agitação magnética a 300 rpm para simulação dos movimentos peristálticos do trato gastrointestinal. O reator foi conectado a um banho de água circulatória para manter sua temperatura a 37 ± 1 °C. Na fase gástrica, os grãos de arroz foram digeridos em fluido gástrico simulado, composto por 0,12 g de pepsina, pH 1,2, por 30 minutos. Na fase intestinal, o fluido intestinal simulado, composto por 0,1 g de pancreatina, 1,5 ml de amiloglucosidase e 0,75 mg de invertase foi adicionado à mistura de reação para simular a digestão no intestino delgado por 180 minutos, mantendo o pH em 6,8 (Dartois *et al.*, 2010).

Alíquotas de 0,5 ml foram retiradas aos 0, 15 e 30 minutos de digestão durante a fase gástrica e aos 0, 5, 10, 20, 30, 60, 90, 120 e 180 minutos de digestão durante a fase intestinal, sendo estas misturadas com etanol absoluto (3 ml) para interromper a reação enzimática. Posteriormente, as amostras foram incubadas com solução de amiloglucosidase/invertase conforme descrito por Dartois *et al.* (2010) antes da análise do teor de glicose utilizando o “*D-glucose assay*” (GOPOD-FORMAT, K-GLUC) da Megazyme®. Os resultados foram expressos como percentual de hidrólise do amido usando as Equações 6 e 7.

$$SH (\%) = \frac{(Sh)}{(Si)} \quad \text{Eq. 6}$$

$$SH (\%) = 0,9 \times \frac{(Gp)}{(Si)} \quad \text{Eq. 7}$$

Onde:

SH (%): hidrólise percentual de amido (total)

Sh: quantidade de amido hidrolisado

Si: quantidade inicial de amido (g)

Gp: quantidade de glicose produzida (g)

Foi usado um fator de conversão (do amido para a glicose) de 0,9 que é geralmente calculado a partir do peso molecular do monômero de amido/peso molecular da glicose ($162/180 = 0,9$) (Goñi, Garcia-Alonso, & Saura-Calixto, 1997).

A determinação do teor de amido total foi realizada utilizando o kit comercial “Total Starch Assay Kit (AA/AMG)” da Megazyme® método AOAC 996.11, AACC 76-13.01, utilizado para a determinação de amido total (TS) em farinhas de cereais e produtos alimentícios.

Para o cálculo do índice glicêmico estimado (IGe) e do índice de hidrólise (HI), foi utilizada a Equação 8 de primeira ordem, proposta por Goñi, Garcia-Alonso e Saura-Calixto (1997).

$$C = C_{\infty}(1 - e^{-kt}) \quad \text{Eq. 8}$$

Onde:

C: concentração do amido no tempo t

C_{∞} : concentração de equilíbrio

k: constante cinética da reação (constante de velocidade de pseudo-primeira ordem que mede a taxa de liberação de glicose)

t: tempo escolhido

A área sobre a curva de hidrólise (AUC), calculada como a integral da equação cinética, conforme descrito na Equação 9, foi utilizada para calcular o HI (%), obtido pela relação entre a AUC da amostra de arroz e a AUC da amostra de um alimento de referência (pão branco) (Equação 10). O IGe (%) foi calculado conforme descrito na Equação 11 (Goñi, Garcia-Alonso, & Saura-Calixto, 1997).

$$AUC = C_{\infty} (t_f - t_0) - \left(\frac{C_{\infty}}{k}\right) (1 - e^{-k(t_f - t_0)}) \quad \text{Eq. 9}$$

$$HI = \left(\frac{AUC \text{ amostra}}{AUC \text{ pão branco}} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 10}$$

$$IGe = 39,71 + (0,549 IH) \quad \text{Eq. 11}$$

Onde:

AUC: área sob a curva de hidrólise, calculada como a integral da equação cinética

t_f: tempo final de hidrólise

t₀: tempo inicial da hidrólise

Para determinação das frações de amido rapidamente digerível (RDS) (porção hidrolisada em 0-20 min), amido lentamente digerível (SDS) (porção hidrolisada em 20-120 min) e amido resistente (RS) (porção não digerida após 120 min), foram utilizados os cálculos propostos por Englyst, Kingman e Cummings (1992) e Aalim e Luo (2021), descritos nas Equações 12, 13 e 14, respectivamente.

$$RDS (\%) = ((G_{20} - G_0) \times \left(\frac{0,9}{TS}\right)) \times (100) \quad \text{Eq. 12}$$

$$SDS (\%) = ((G_{120} - G_{20}) \times \left(\frac{0,9}{TS}\right)) \times (100) \quad \text{Eq. 13}$$

$$RS (\%) = (100 - RDS - SDS) \quad \text{Eq. 14}$$

Onde:

G: concentração de glicose (g/100 g de peso seco)

TS: conteúdo total de amido (peso seco g/100 g).

5.3.11. Sólidos lixiviados

A análise de sólidos lixiviados foi realizada de acordo com a metodologia proposta por Bruce *et al.* (2022) com algumas adaptações. Inicialmente, Beckeres de 250 ml foram secos em estufa à 105 °C por 30 min, resfriados em dessecador e pesados em balança analítica. Em seguida, foram pesados 5 g de grãos de arroz em triplicata de cada tratamento e procedeu-se a cocção de acordo com o tempo previamente estabelecido. Após a cocção, os grãos cozidos

foram coletados restando somente a água de cocção. Os Beckeres foram levados para estufa à 105 °C por 24 h. No dia seguinte, foi realizada a pesagem dos Beckeres após resfriamento dos mesmos em dessecador. O cálculo do percentual de sólidos lixiviados na água de cocção foi expresso de acordo com a equação 15.

$$SL (\%) = \left(\frac{PBAS - PTB}{PG} \right) \times 100 \quad \text{Eq. 15}$$

Onde:

SL (%): percentual de sólidos lixiviados

PBAS: peso Becker após secagem

PTB: peso tara dos Beckeres

PG: peso dos grãos

5.3.12. Umidade

A umidade dos grãos em casca foi determinada de acordo com as normas para análise de sementes do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA (BRASIL, 2009).

5.3.13. Proteína bruta

A análise do teor de proteína bruta foi determinada seguindo o método 46-13 da *American Association of Cereal Chemists* (AACC, 1995), e o teor de proteína foi obtido usando um fator de conversão de nitrogênio para proteína de 5,95.

5.4. Análise estatística

5.4.1. Análise univariada

Os resultados das análises foram previamente avaliados quanto a normalidade por teste de Shapiro-Wilk, sendo a anormalidade ($p \leq 0,05$) corrigida quando possível. Os resultados com distribuição normal ($p > 0,05$) foram avaliados por Análise de Variância (do inglês, ANOVA) *one way* e conforme a presença de diferença significativa ($p \leq 0,05$) foi utilizado o teste *post-hoc* de Tukey. Os resultados não-paramétricos foram avaliados pelo teste H de Kruskal-

Wallis. A análise dos dados foi realizada utilizando o *software* Statistica (versão 7.0).

5.4.2. Análise multivariada

Os resultados foram autoescalados e submetidos a Análise de Componentes Principais (PCA, do inglês) e a Análise de Fatores no *software* Statistica (versão 7.0), utilizando como base uma matriz de correlação de Pearson. Para avaliação, as Componentes Principais (PC, do inglês) 1 e 2 foram selecionadas para plotagem dos *loadings* e *scores* no plano fatorial por apresentarem variância total acumulada de 68,64%.

6. Resultados e discussão

6.1. Rendimento de grãos inteiros e índice de acidez

Os resultados do rendimento de grãos inteiros, da incidência de grãos quebrados, da temperatura dos grãos e do índice de acidez do arroz safra velha, safra nova e do arroz tratado no micro-ondas estão expressos na Tabela 2.

Tabela 2 – Rendimento de grãos inteiros, grãos quebrados, temperatura e índice de acidez dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos.

| Tratamentos | Grãos inteiros (%) | Grãos quebrados (%) | Temperatura dos grãos (°C) | Índice de acidez (%) |
|-------------|---------------------------|---------------------------|----------------------------|---------------------------|
| SV | 70,37 ± 0,61 ^A | 3,92 ± 0,61 ^D | - | 0,37 ± 0,09 ^a |
| SN | 70,38 ± 0,05 ^A | 2,58 ± 0,05 ^D | - | 0,34 ± 0,02 ^{ab} |
| 30 | 70,32 ± 0,21 ^A | 2,76 ± 0,10 ^D | 34,90 ± 0,71 ^e | 0,33 ± 0,02 ^{ab} |
| 60 | 70,59 ± 0,13 ^A | 2,60 ± 0,18 ^D | 44,10 ± 2,97 ^d | 0,31 ± 0,04 ^{ab} |
| 90 | 70,67 ± 0,13 ^A | 2,56 ± 0,10 ^D | 50,55 ± 1,20 ^c | 0,26 ± 0,02 ^b |
| 120 | 66,75 ± 0,46 ^A | 6,59 ± 0,28 ^C | 55,35 ± 0,35 ^b | 0,25 ± 0,02 ^b |
| 150 | 53,02 ± 1,97 ^B | 20,22 ± 1,93 ^B | 58,35 ± 0,07 ^{ab} | 0,22 ± 0,02 ^b |
| 180 | 35,99 ± 1,65 ^C | 36,73 ± 1,48 ^A | 60,65 ± 0,92 ^a | 0,10 ± 0,02 ^c |

Os resultados paramétricos foram expressos pela média ± desvio padrão, sendo atribuído letras minúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa ($p \leq 0,05$), conforme o teste *post-hoc* de Tukey. Os resultados não-paramétricos foram expressos pela mediana ± desvio padrão, sendo atribuído letras maiúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa, conforme o teste H de Kruskal-Wallis.

De acordo com os dados da Tabela 2, é possível observar que não houve diferença estatística no rendimento de grãos inteiros entre os tratamentos com

arroz da safra velha, da safra nova e os tratados no micro-ondas nos tempos de 30, 60, 90 e 120 s. No entanto, os tratamentos que prejudicaram mais o rendimento de grãos inteiros foram os tempos de exposição de 150 e 180 s. O aumento do percentual de grãos quebrados ocorreu a partir do tratamento de 120 s no micro-ondas e as temperaturas dos grãos foram aumentando de acordo com o tempo de exposição à irradiação.

Bruce *et al.* (2021) utilizaram a irradiação micro-ondas na secagem de grãos de diferentes cultivares de arroz e avaliaram os efeitos nas propriedades físico-químicas e tecnológicas dos mesmos. O aumento da quantidade de grãos quebrados está relacionado com o aumento da potência do micro-ondas e tempo de exposição. A secagem rápida em temperaturas maiores é responsável por criar fissuras nos grãos que facilitam a quebra no processo de beneficiamento (Siebenmorgen, Yang, & Sung, 2004). Resultados similares foram encontrados no estudo de Nayak (2016), que avaliou o efeito de diferentes potências de micro-ondas, tempos de exposição e umidades dos grãos.

O arroz da safra velha apresentou maior índice de acidez em relação aos demais tratamentos. Estudos demonstraram que os lipídios sofrem hidrólise e ranço oxidativo durante o armazenamento produzindo ácidos graxos livres, que por sua vez, reduzem o pH dos grãos (Wu *et al.*, 2016; Peng *et al.*, 2019).

Na medida em que o tempo de exposição à irradiação micro-ondas aumentou, houve redução nos índices de acidez, sendo que o tratamento de 180 s apresentou menor percentual de acidez. Resultados similares foram encontrados em estudos anteriores (Zhao *et al.*, 2007; Zhong *et al.*, 2020). A redução da acidez pode ter sido consequência devido ao aumento das temperaturas durante o aquecimento no micro-ondas. Isso pode ter causado a oxidação de ácidos graxos livres e formação de produtos secundários, como hidroperóxidos, compostos carbonílicos, hidrocarbonetos e furanos (Jaisut *et al.*, 2009).

6.2. Perfil branquimétrico e colorimétrico

Nas Tabelas 3 e 4 são apresentados os valores do perfil branquimétrico e colorimétrico dos grãos, respectivamente.

Tabela 3 – Perfil branquimétrico dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos.

| Tratamentos | Brancura | Transparência | Polimento |
|-------------|----------------------------|---------------------------|-----------------------------|
| SV | 39,59 ± 0,56 ^g | 2,79 ± 0,07 ^d | 92,33 ± 2,52 ^e |
| SN | 41,17 ± 0,06 ^{de} | 3,05 ± 0,05 ^{bc} | 101,33 ± 0,58 ^d |
| 30 | 40,60 ± 0,40 ^{ef} | 3,34 ± 0,11 ^a | 100,33 ± 1,53 ^d |
| 60 | 42,37 ± 0,76 ^{cd} | 3,20 ± 0,16 ^{ab} | 107,33 ± 3,21 ^c |
| 90 | 44,33 ± 0,75 ^{ab} | 3,07 ± 0,04 ^{bc} | 115,67 ± 2,89 ^{ab} |
| 120 | 45,03 ± 0,29 ^a | 2,85 ± 0,04 ^{cd} | 117,33 ± 1,15 ^a |
| 150 | 43,50 ± 0,10 ^{bc} | 2,75 ± 0,05 ^d | 110,33 ± 0,58 ^{bc} |
| 180 | 43,53 ± 0,06 ^{bc} | 2,74 ± 0,03 ^d | 110,00 ± 0,00 ^c |

Os resultados paramétricos foram expressos pela média ± desvio padrão, sendo atribuído letras minúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa ($p \leq 0,05$), conforme o teste *post-hoc* de Tukey. Os resultados não-paramétricos foram expressos pela mediana ± desvio padrão, sendo atribuído letras maiúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa, conforme o teste H de Kruskal-Wallis.

Tabela 4 – Perfil colorimétrico dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos.

| Tratamentos | L* | a* | b* | ΔE |
|-------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| SV | 67,20 ± 1,23 ^C | -0,34 ± 0,11 ^a | 11,22 ± 0,55 ^a | - |
| SN | 68,49 ± 2,12 ^{BC} | -0,44 ± 0,15 ^{ab} | 9,34 ± 0,61 ^{bc} | 2,65 ± 1,02 ^{cd} |
| 30 | 67,54 ± 1,49 ^{BC} | -0,40 ± 0,08 ^{ab} | 9,72 ± 0,48 ^{bc} | 2,25 ± 0,88 ^e |
| 60 | 71,07 ± 1,42 ^{ABC} | -0,55 ± 0,09 ^{bc} | 9,63 ± 0,42 ^c | 3,88 ± 1,53 ^{bcd} |
| 90 | 73,65 ± 1,78 ^A | -0,69 ± 0,16 ^{cd} | 9,94 ± 0,52 ^{bc} | 6,14 ± 1,86 ^a |
| 120 | 73,63 ± 0,97 ^A | -0,73 ± 0,08 ^d | 10,04 ± 0,44 ^{bc} | 5,90 ± 1,24 ^{ab} |
| 150 | 74,05 ± 0,88 ^A | -0,83 ± 0,09 ^d | 11,41 ± 0,35 ^a | 6,47 ± 1,48 ^a |
| 180 | 71,79 ± 1,78 ^{AB} | -0,75 ± 0,11 ^d | 10,38 ± 0,51 ^b | 4,47 ± 2,15 ^{abc} |

L* - luminosidade; a* - cor verde (valores negativos); b* - cor amarelo (valores positivos); ΔE - diferença de cor. Os resultados paramétricos foram expressos pela média ± desvio padrão, sendo atribuído letras minúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa ($p \leq 0,05$), conforme o teste *post-hoc* de Tukey. Os resultados não-paramétricos foram expressos pela mediana ± desvio padrão, sendo atribuído letras maiúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa, conforme o teste H de Kruskal-Wallis.

O arroz safra velha apresentou menores valores de brancura e polimento quando comparado aos demais tratamentos. A transparência também foi menor, porém apresentou valores similares aos tratamentos no micro-ondas de 120, 150 e 180 s. Após o armazenamento os grãos de arroz tendem a apresentar menor

valor de brancura. Shih *et al.* (2014) relataram que o arroz envelhecido naturalmente apresentou menor transparência, maior coloração amarelada e ausência de brilho. A redução da brancura dos grãos pode estar associada com a reação de Maillard que é uma reação de escurecimento não-enzimática formada pela condensação de um grupo amino com o grupo carbonila do açúcar redutor (Zhou *et al.*, 2002b; Rauh & Xiao, 2022).

A redução do grau de polimento dos grãos de arroz após armazenamento também foi observada por Kaminski, (2012) e Costa (2014). A resistência a remoção do farelo dos grãos pode estar relacionada com a maior firmeza da rede proteica e rearranjos estruturais do amido.

Na medida em que o tempo de exposição à irradiação micro-ondas é maior, ocorre aumento nos valores de brancura e polimento. No entanto, o mesmo padrão não é observado nos valores de transparência, visto que há um pequeno aumento em 30 e 60 s e redução até 180 s de tratamento. Resultados semelhantes foram encontrados por Le *et al.* (2014). O aumento do grau de polimento dos grãos pode estar relacionado a maior formação de fissuras nas camadas de aleurona e pericarpo na medida em que o tempo de exposição à irradiação micro-ondas aumenta (Zhong *et al.*, 2013). Nesse sentido, a maior remoção de farelo durante o beneficiamento foi responsável pelo aumento dos valores de brancura (Park, Kim, & Kim, 2001). A redução da transparência dos grãos está relacionada com a redução da cristalinidade do amido devido a formação fissuras e espaços de ar entre os grânulos de amido após o tratamento de micro-ondas (Lang *et al.*, 2022).

O arroz da safra velha apresentou menor valor de luminosidade (L^*) em relação aos demais tratamentos. Com o aumento do tempo de exposição à irradiação micro-ondas, houve aumento nos valores de luminosidade dos grãos, com uma pequena redução no tratamento de 180 s, porém ainda assim foi maior que o arroz safra nova.

Os valores de a^* foram aumentados de acordo com o tempo de exposição no micro-ondas, sendo que os tratamentos de 120, 150 e 180 s apresentaram maiores valores, indicando maior coloração verde. O arroz safra velha e o tratamento de 150 s apresentaram os maiores valores de b^* , indicando maior coloração amarela dos grãos. Nos tratamentos de 120 e 180 s, houve aumento dos valores de b^* , porém não foram maiores que os tratamentos safra velha e

150 s. Mudanças na cor total dos grãos são visíveis a olho nu quando os valores de ΔE são maiores que 3 (Joukar *et al.*, 2023). Portanto, os tratamentos de 60 s até 180 s no micro-ondas alteraram a cor total dos grãos (Tabela 4).

Park *et al.* (2012) observaram aumento da coloração amarela (b^*) dos grãos após armazenamento em temperatura acima de 20 °C, devido a oxidação lipídica e reação de Maillard. O aumento da intensidade de cor b^* após os tratamentos no micro-ondas pode ter sido consequência dos altos gradientes de umidade gerados dentro dos grãos, que foi responsável pelo movimento dos pigmentos do farelo para o endosperma. Além disso, a reação de Maillard pode ter sido acelerada pelo rápido aumento de temperatura (Le *et al.*, 2014).

O aumento dos valores de luminosidade após os tratamentos no micro-ondas está associado com a diminuição da cristalinidade do amido dos grãos. Grãos opacos tendem a apresentar maior valor L^* quando comparado a grãos translúcidos (Lang *et al.*, 2022).

6.3. Rendimento gravimétrico, volumétrico e tempo de cocção

Na Tabela 5 estão expressos os resultados do rendimento gravimétrico, volumétrico e tempo de cocção dos grãos.

Tabela 5 – Rendimento gravimétrico, volumétrico e tempo de cocção dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos.

| Tratamentos | Rend. gravimétrico (%) | Rend. volumétrico (%) | Tempo de cocção (min) |
|-------------|-----------------------------|------------------------------|----------------------------|
| SV | 378,15 ± 1,04 ^{ab} | 425,68 ± 3,38 ^{bcd} | 16,16 ± 0,06 ^A |
| SN | 384,49 ± 1,14 ^a | 413,77 ± 1,84 ^e | 13,10 ± 0,03 ^B |
| 30 | 342,04 ± 5,73 ^e | 416,33 ± 2,91 ^{de} | 13,14 ± 0,03 ^B |
| 60 | 356,62 ± 2,24 ^d | 431,35 ± 4,33 ^b | 13,43 ± 0,08 ^{AB} |
| 90 | 352,74 ± 1,42 ^d | 427,78 ± 2,73 ^{bc} | 14,44 ± 0,06 ^{AB} |
| 120 | 365,50 ± 0,54 ^c | 441,73 ± 3,28 ^a | 15,36 ± 0,08 ^{AB} |
| 150 | 365,61 ± 2,11 ^c | 424,57 ± 6,42 ^{bcd} | 14,57 ± 0,31 ^{AB} |
| 180 | 372,35 ± 1,53 ^{bc} | 418,68 ± 2,36 ^{cde} | 14,56 ± 0,47 ^{AB} |

Os resultados paramétricos foram expressos pela média ± desvio padrão, sendo atribuído letras minúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa ($p \leq 0,05$), conforme o teste *post-hoc* de Tukey. Os resultados não-paramétricos foram expressos pela mediana ± desvio padrão, sendo atribuído letras maiúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa, conforme o teste H de Kruskal-Wallis.

Os maiores rendimentos gravimétricos dos grãos foram observados no arroz safra velha, safra nova e nos tratamentos de 120, 150 e 180 s no micro-ondas. Com relação ao rendimento volumétrico, os tratamentos safra velha e de 60, 90, 120 e 150 s no micro-ondas apresentaram maiores percentuais.

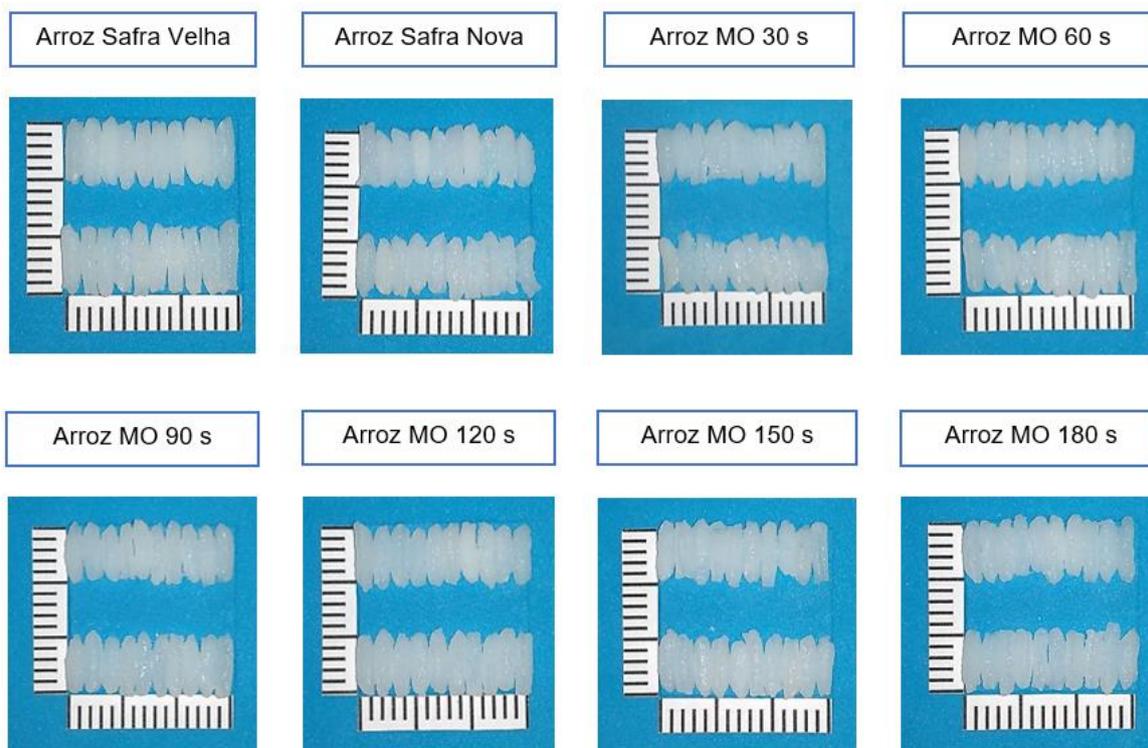
Observa-se na Figura 13 que os grãos de arroz da safra velha apresentaram maior expansão de volume após a cocção quando comparado aos demais tratamentos. Grãos de arroz após o envelhecimento natural tendem a apresentar maior absorção de água e expansão de volume. Isso se dá devido ao fortalecimento da parede celular dos grãos durante o armazenamento que mantém o formato hexagonal e promove maior adsorção de água e aumento de volume (Chrastil, 1990b; Rosniyana, Hashifah, & Norin, 2004; Soponronnarit *et al.*, 2008).

Os grãos da safra nova e 180 s no micro-ondas apresentaram percentuais elevados de absorção de água, porém os rendimentos volumétricos não foram expressivos. O mesmo foi observado no tratamento de 30 s, no entanto o rendimento gravimétrico foi menor. Nesses tratamentos, os grãos apresentaram maior desuniformidade devido a maior abertura do endosperma após a cocção. O tratamento de 150 s também resultou em grãos desuniformes (Figura 13).

O tratamento no micro-ondas que apresentou melhor resultado para os parâmetros avaliados foi o tempo de 120 s, visto que apresentou maior expansão de volume (Figura 13). A absorção de água foi inferior ao arroz safra velha, porém os grãos não romperam após a cocção, o que é uma característica agradável ao consumidor. O aquecimento por micro-ondas promoveu a formação de fissuras na superfície dos grãos crus pelo excesso de remoção de água durante o tratamento, o que fez aumentar a absorção de água e o volume durante o cozimento (Nayak & Mohapatra, 2019; Devraj *et al.*, 2020).

O aumento da desuniformidade dos grãos após os tratamentos de 150 e 180 s no micro-ondas, pode estar relacionado aos maiores tempos de exposição à irradiação, que causou maiores percentuais de rachaduras no endosperma e facilitou a abertura dos grãos na cocção (Dalbhagat *et al.*, 2024).

Figura 13 – Ilustração do rendimento volumétrico dos grãos de arroz safra velha, safra nova e micro-ondas após cocção



Fonte: Autor.

Os grãos de arroz da safra velha apresentaram tempo de cocção superior aos grãos da safra nova e micro-ondas em todos os tempos de exposição à irradiação. Além disso, os tempos de cocção do arroz da safra nova e tratado no micro-ondas por 30 s, não apresentaram diferença estatística. No entanto, os tempos de cocção aumentaram gradativamente de 60 até 120 s, com uma pequena redução em 150 e 180 s, diferindo estatisticamente do arroz da safra nova.

Nicholas *et al.* (2013) estudaram a influência do envelhecimento natural nas propriedades físico-químicas, composição nutricional e características de cozimento de grãos de diferentes variedades de arroz. Os autores relataram aumento do tempo de cozimento em todas as variedades de arroz após seis meses de armazenamento. Outro parâmetro que afeta o tempo de cocção é a temperatura de armazenamento dos grãos. Zhou *et al.* (2010) observaram que o arroz armazenado por um ano em temperatura de 37 °C apresentou maior temperatura de pico e conclusão na análise térmica do amido, quando comparado ao arroz armazenado à 4 °C. Durante o armazenamento ocorrem

interações entre componentes como amilose-amilose, amilose-amilopectina e amido-proteína que dificulta a absorção de água pelos grãos e aumenta o tempo de gelatinização do amido (Ziegler *et al.*, 2018).

O aumento do tempo de cocção após o tratamento por micro-ondas no arroz em casca também foi observado por Le *et al.* (2014). O aquecimento por micro-ondas pode ter aumentado a insolubilidade do amido de arroz em água, da mesma forma que ocorre no envelhecimento natural do arroz. No entanto, em tempos de exposição maiores, o micro-ondas induz a fissuras nos grãos que são responsáveis por aumentar a absorção de água, reduzindo o tempo de cocção (Shen *et al.*, 2019).

6.4. Propriedades viscoamilográficas (RVA)

Na Tabela 5 estão apresentados os resultados das propriedades de pasta da farinha de arroz dos tratamentos safra nova, safra velha e 120 s no micro-ondas.

Tabela 6 – Viscosidade máxima ($V_{m\acute{a}x}$); viscosidade mínima ($V_{m\acute{i}n}$); viscosidade de quebra (V_q); viscosidade final (V_f); viscosidade de retrogradação (V_r); temperatura de pico (T_{pi}) e temperatura de pasta (T_{pa}) dos grãos de arroz moído da safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas no tempo de exposição de 120 segundos.

| Trat. | $V_{m\acute{a}x}$ | $V_{m\acute{i}n}$ | V_q | V_f | V_r | T_{pi} | T_{pa} |
|-------|--------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|
| SV | 3179 ± | 2827 ± | 352 ± | 5283 ± | 2493,5 ± | 6,03 ± | 81,90 ± |
| | 26,87 ^c | 70,71 nd | 43,84 ^b | 46,67 ^c | 64,35 ^b | 0,05 nd | 0,49 ^A |
| SN | 3700 ± | 2739 ± | 924 ± | 5668,5 ± | 2877 ± | 6,06 ± | 73,02 ± |
| | 32,53 ^a | 41,01 nd | 43,84 ^a | 53,03 ^a | 21,21 ^a | 0,09 nd | 1,80 ^B |
| 120 | 3430,5 ± | 2960,5 ± | 499 ± | 5480 ± | 2519,5 ± | 5,93 ± | 73,42 ± |
| | 40,31 ^b | 84,15 nd | 2,83 ^b | 9,90 ^b | 74,25 ^b | 0,09 nd | 6,75 ^B |

Os resultados paramétricos foram expressos pela média ± desvio padrão, sendo atribuído letras minúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa ($p \leq 0,05$), conforme o teste *post-hoc* de Tukey. Os resultados não-paramétricos foram expressos pela mediana ± desvio padrão, sendo atribuído letras maiúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa, conforme o teste H de Kruskal-Wallis. Os resultados ausentes de diferença significativa ($p > 0,05$) receberam “nd” (não diferiu), conforme a ANOVA.

Observa-se que para os parâmetros de viscosidade máxima, viscosidade de quebra, viscosidade final e viscosidade de retrogradação, os tratamentos safra velha e 120 s no micro-ondas apresentaram resultados bastante semelhantes, quando comparado ao arroz safra nova. Para os parâmetros de

viscosidade de quebra e viscosidade de retrogradação os arrozes safra velha e 120 s no micro-ondas não apresentaram diferença estatística (Tabela 6).

De acordo com Chrastil (1990a), foi constatado que a proteína do arroz é responsável por alterar as propriedades de pasta do amido através da oxidação dos grupos sulfidríla em ligações dissulfeto durante o armazenamento. Hamaker e Griffin (1993) relataram que as ligações dissulfeto da proteína causaram diminuição das viscosidades do arroz. Outro estudo demonstrou que a oxidação da glutelina durante o envelhecimento do arroz alterou a viscosidade máxima, viscosidade de quebra, viscosidade final e viscosidade de retrogradação (Shi, Wu, & Quan, 2017). Essa mudança na estrutura da proteína do arroz resultou em menor capacidade de ligação à água durante a gelatinização do amido.

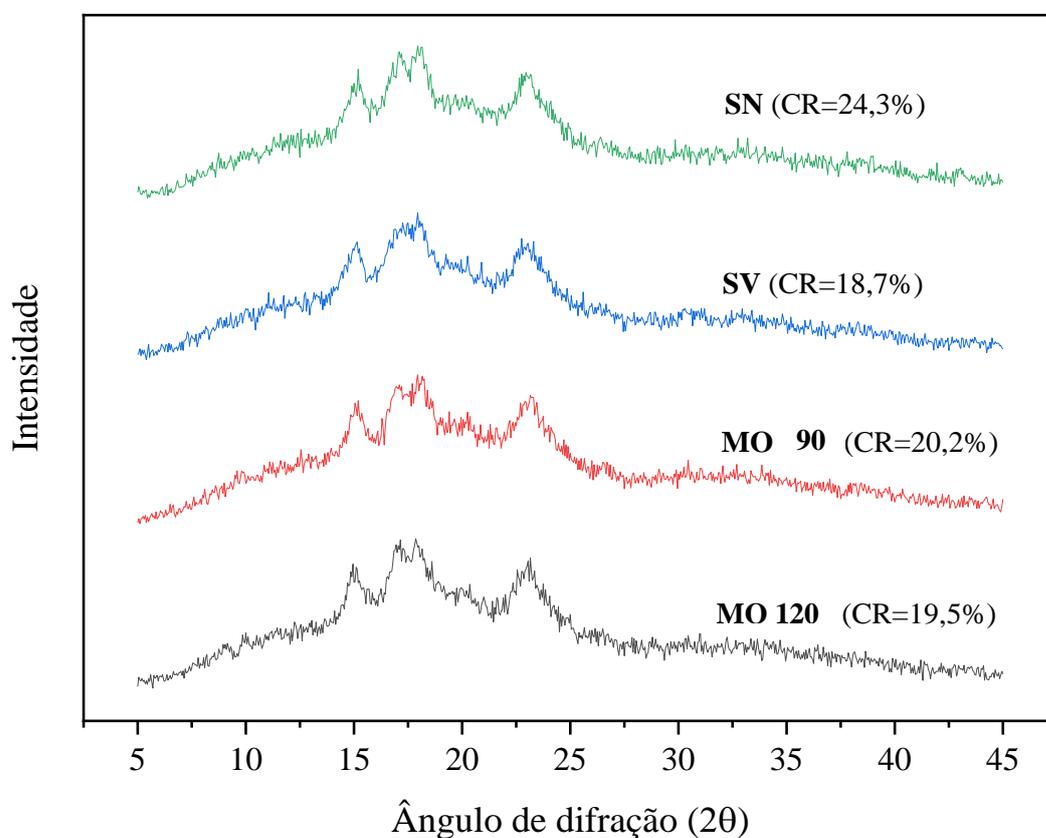
Zhong *et al.* (2020) observaram que o aumento do tempo de exposição à irradiação micro-ondas, causou aumento das ligações dissulfeto na proteína do arroz. As temperaturas durante o aquecimento de micro-ondas podem ter favorecido a oxidação dos grupos tiol da proteína e aumentou o conteúdo de pontes dissulfídicas. Esse fenômeno fortaleceu os grânulos de amido à ruptura durante a gelatinização e alterou as propriedades de pasta (Tananuwong & Malila, 2011). Isso explica o motivo pelo qual as propriedades de pasta do arroz da safra velha e tratado no micro-ondas por 120 s apresentaram resultados semelhantes.

6.5. Cristalinidade relativa (difração de raios-X)

Os difratogramas de raios-X dos grãos moídos das amostras de arroz safra nova, safra velha e micro-ondas 90 e 120 s estão apresentados na Figura 14.

A cristalinidade do amido está relacionada com a estrutura de dupla-hélice formada pelos ramos da amilopectina conectados por ligações de hidrogênio (Chi *et al.*, 2021). Os tratamentos apresentaram um padrão cristalino típico para arroz do tipo A, com difrações nos ângulos $2\theta = 15^\circ$, 17° , 18° e 23° . Esses resultados foram similares aos achados de Zhong *et al.* (2020). Isso sugere que nem o envelhecimento natural e nem o tratamento com micro-ondas alterou o padrão de cristalinidade do amido de arroz.

Figura 14 – Difrátogramas de raios-X dos tratamentos safra nova, safra velha e micro-ondas 90 e 120 segundos. CR é o percentual de cristalinidade relativa de cada tratamento



Com relação aos valores de cristalinidade relativa dos amidos, o arroz safra velha apresentou menor valor, seguido pelos tratamentos no micro-ondas. Zhu *et al.* (2023) relataram diminuição da cristalinidade relativa do arroz após o armazenamento em relação ao arroz não armazenado. O aumento do conteúdo de amilose e a degradação das longas cadeias de amilopectina, podem ter causado a diminuição da cristalinidade.

Cai *et al.* (2024) demonstraram que o tratamento com micro-ondas reduziu a cristalinidade da maioria dos amidos estudados. Em pesquisas anteriores também houveram reduções na cristalinidade após o aquecimento por micro-ondas através da quebra das pontes de hidrogênio do amido, resultando na perda das regiões cristalinas (Oyeyinka *et al.*, 2019; Zhao *et al.*, 2018). Nesse sentido, a potência do micro-ondas e o tempo de tratamento foram responsáveis por causar a ruptura da zona cristalina do amido, que por sua vez reduziu a cristalinidade relativa (Cai *et al.*, 2024).

6.6. Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV)

De acordo com as micrografias eletrônicas de varredura apresentadas na Figura 15, os grãos de arroz safra nova, safra velha e tratados no micro-ondas nos tempos de 90 e 120 segundos, apresentaram diferenças significativas em sua morfologia.

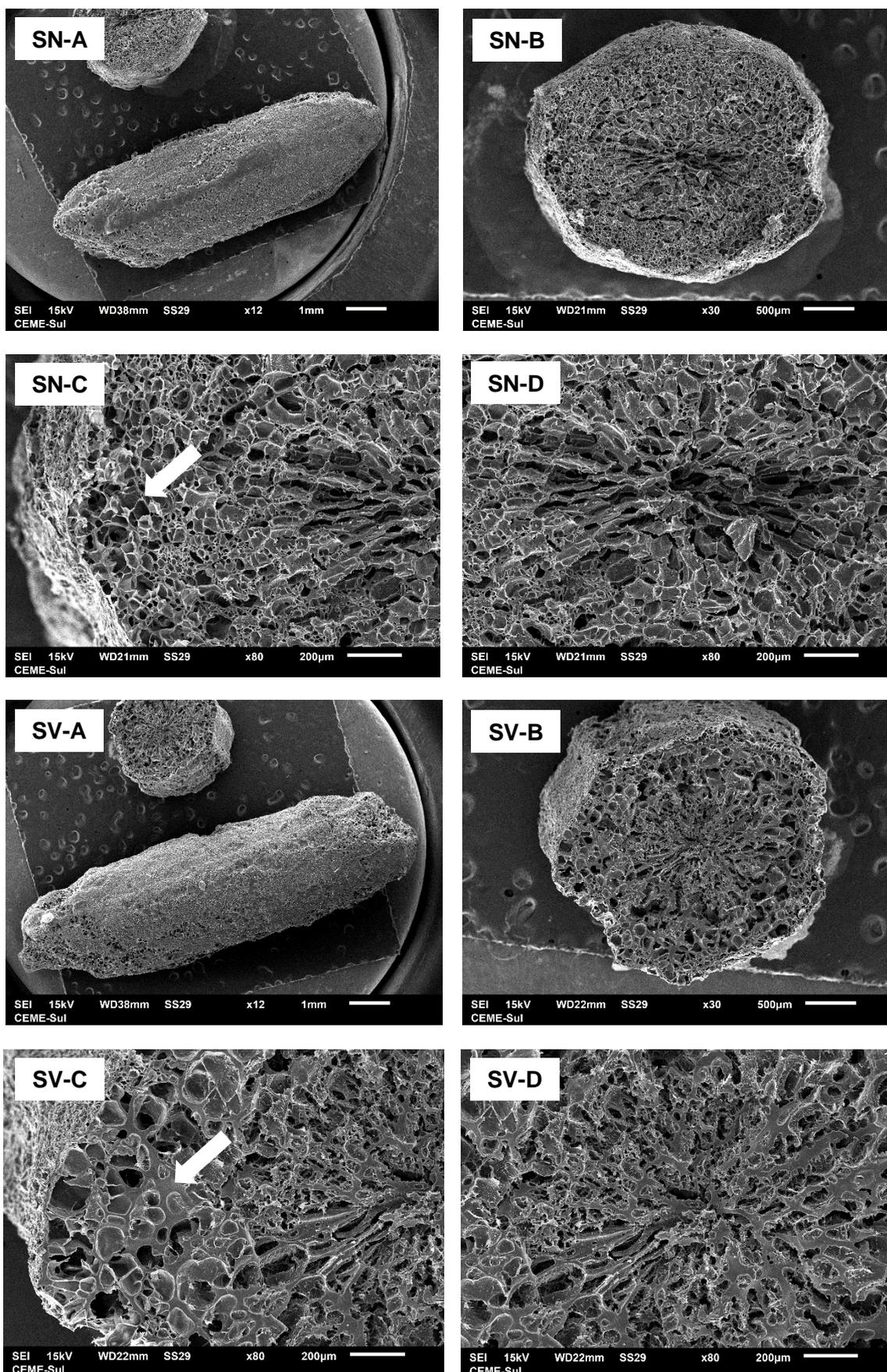
O arroz da safra nova apresentou menor alongação do grão em relação aos demais tratamentos (Figura 15 SN-A). Além disso, apresentou estrutura celular menos densa, com mais espaços aerados no interior dos grãos (Figura 15 SN-C). Em contrapartida, os grãos após o tratamento com micro-ondas apresentaram estrutura celular mais espessa, similar ao arroz safra velha (Figura 15 SV-C; 90-C; 120-C).

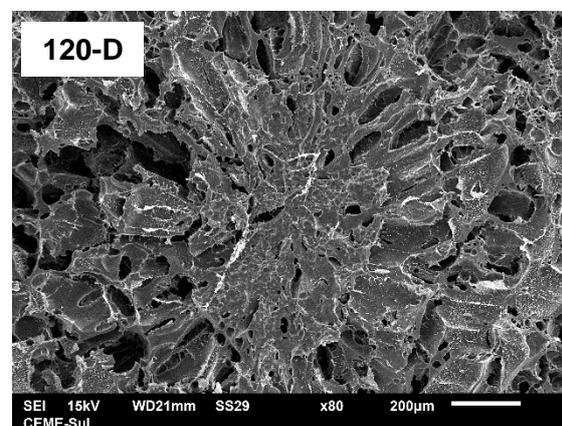
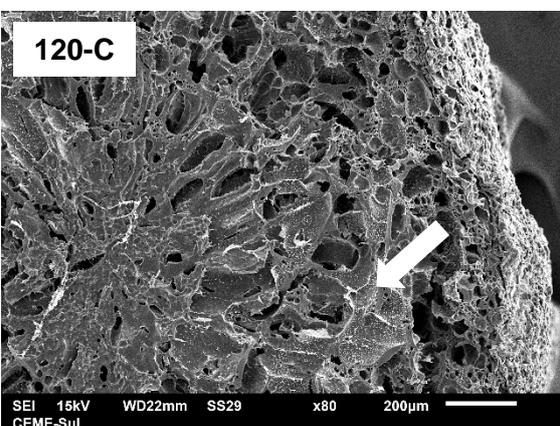
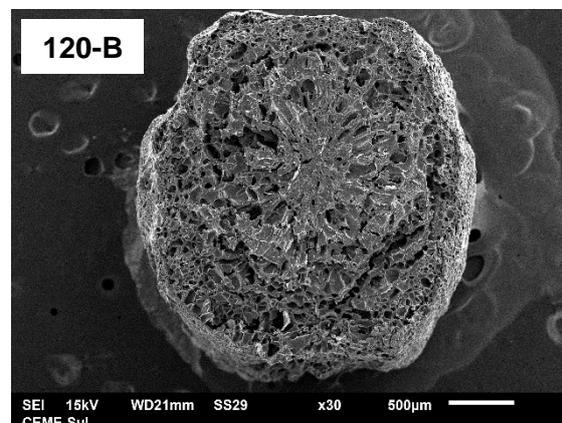
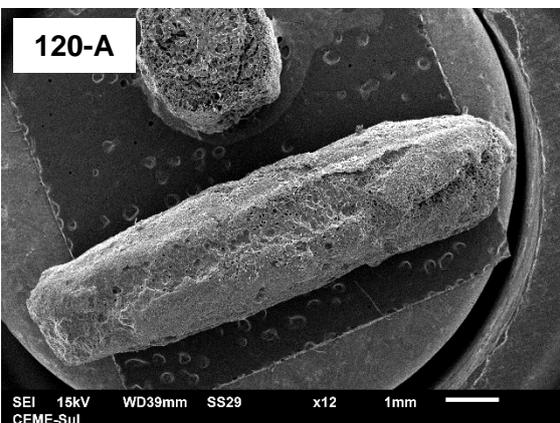
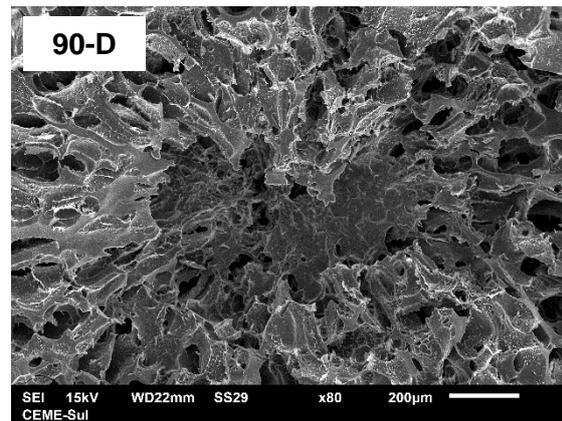
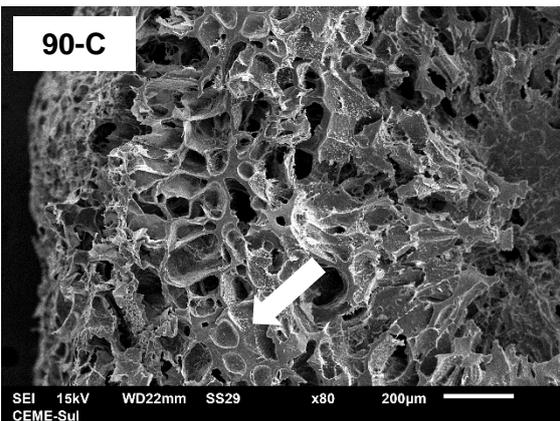
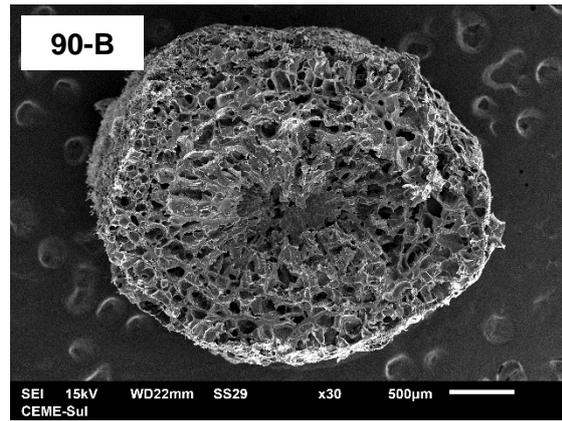
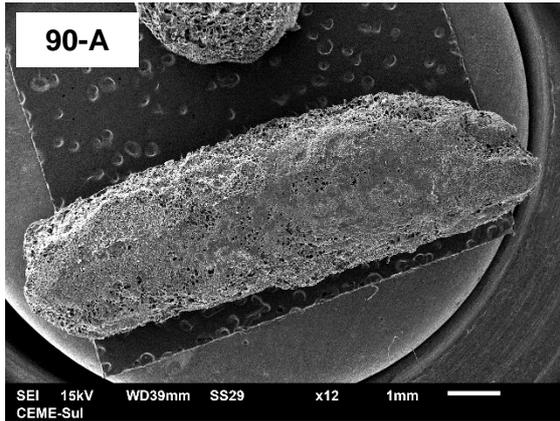
Durante o envelhecimento natural do arroz ocorrem reações químicas entre os ácidos fenólicos livres e ácidos graxos insaturados e/ou ligações cruzadas com o remanescente da parede celular através da esterificação e/ou eterificação. Com isso, a parede celular torna-se mais lignificada causando redução na solubilidade (Zhou *et al.*, 2014). Além disso, há alteração na estrutura da proteína do arroz através da formação de pontes dissulfídicas (Chrastil, 1990a; Hamaker & Griffin, 1993).

De acordo com Zhong *et al.* (2020), a irradiação micro-ondas promoveu a liberação de ácidos fenólicos livres, formação de pontes dissulfídicas na proteína e aumento da força de adesão entre as paredes celulares das células do endosperma do arroz. O aumento do calor gerado pelo micro-ondas causa maior colisão e reorganização do amido, resultando na alteração da morfologia dos grânulos (Tao *et al.*, 2020) e torna a estrutura interna do grão mais espessa (Figura 15 120-C). Essas mudanças colaboraram para maior semelhança com as características observadas no arroz envelhecido naturalmente.

O aumento da alongação dos grãos nos tratamentos safra velha e no micro-ondas está relacionado às mudanças observadas no rendimento gravimétrico e volumétrico dos grãos, conforme discutido anteriormente no tópico 5.4.3.

Figura 15 – Microscopia eletrônica de varredura de grãos de arroz safra nova (SN), safra velha (SV) e micro-ondas 90 e 120 segundos após processo de cocção e liofilização. A = grão inteiro; B = seção transversal do grão; C = seção transversal lateral do grão; D = seção transversal central do grão





6.7. Digestibilidade *in vitro* do amido

Na Tabela 7 estão descritos os dados da digestibilidade do amido de arroz dos tratamentos safra nova, safra velha e micro-ondas nos tempos de exposição de 90 e 120 segundos.

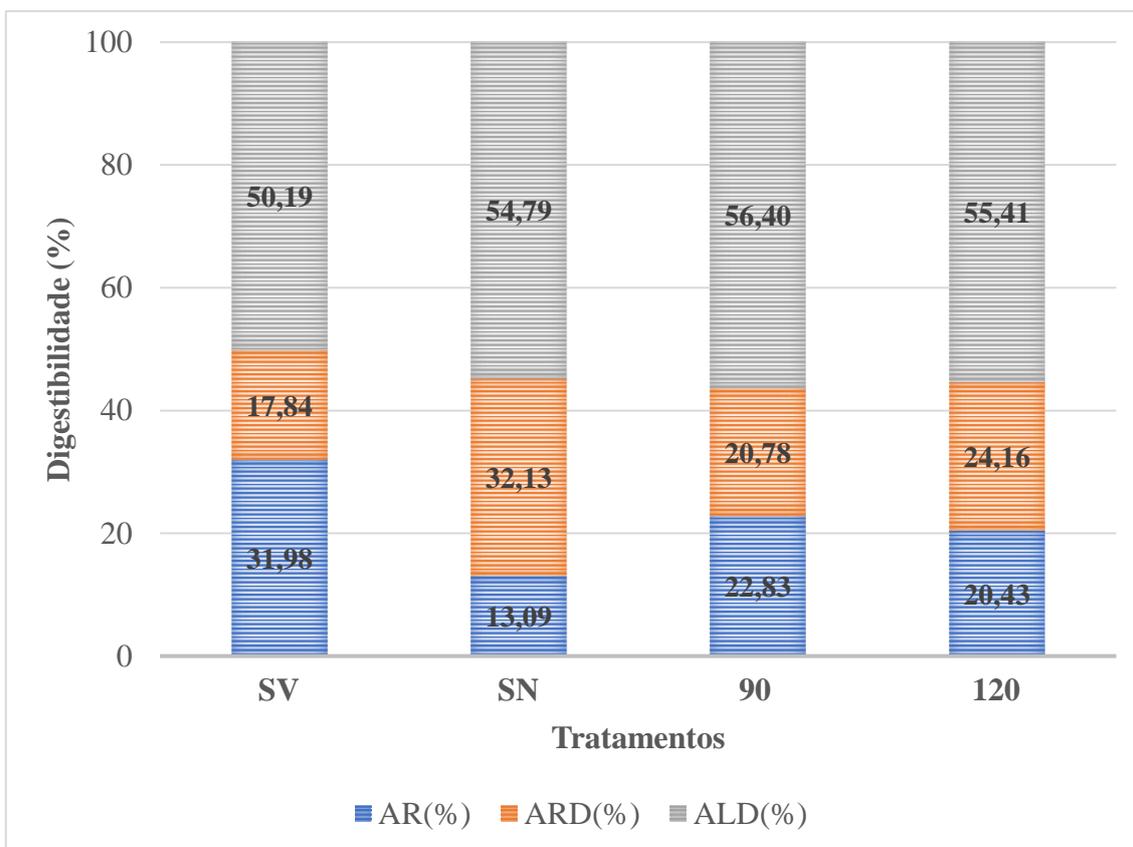
Tabela 7 – Amido total (AT), frações de amido quanto à sua hidrólise: amido rapidamente digerível (ARD), amido lentamente digerível (ALD) e amido resistente (AR), concentração de equilíbrio de hidrólise do amido (C^∞), constante da reação (k), índice de hidrólise (IH) e índice glicêmico estimado (IGe) dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 90 e 120 segundos.

| Trat. | AT (%) | ARD (%) | ALD (%) | AR (%) | C^∞ (%) | k (min^{-1}) | IH | IGe |
|-------|--------------------|--------------------|--------------------|-------------------|---------------------|-------------------------|-------------------|-------------------|
| SV | 61,89 ± | 17,84 ± | 50,19 ± | 31,98 ± | 78,07 ± | 0,095 ± | 71,59 ± | 79,01 ± |
| | 0,18 ^{bc} | 0,64 ^b | 0,40 nd | 0,25 ^a | 0,45 ^c | 0,005 nd | 0,18 ^d | 0,10 ^d |
| SN | 62,53 ± | 32,13 ± | 54,79 ± | 13,09 ± | 106,33 | 0,081 ± | 96,37 ± | 92,61 ± |
| | 0,20 ^a | 0,09 ^a | 0,29 nd | 0,20 ^c | ± 2,26 ^a | 0,007 nd | 1,31 ^a | 0,72 ^a |
| 90 | 61,46 ± | 20,78 ± | 56,40 ± | 22,83 ± | 83,41 ± | 0,103 ± | 76,90 ± | 81,93 ± |
| | 0,08 ^c | 0,84 ^b | 1,58 nd | 2,43 ^b | 2,57 ^c | 0,011 nd | 1,87 ^c | 1,02 ^c |
| 120 | 62,41 ± | 24,16 ± | 55,41 ± | 20,43 ± | 91,44 ± | 0,103 ± | 84,31 ± | 86,00 ± |
| | 0,03 ^{ab} | 4,57 ^{ab} | 5,88 nd | 1,32 ^b | 0,49 ^b | 0,006 nd | 0,75 ^b | 0,41 ^b |

Os resultados paramétricos foram expressos pela média ± desvio padrão, sendo atribuído letras minúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa ($p \leq 0,05$), conforme o teste *post-hoc* de Tukey. Os resultados não-paramétricos foram expressos pela mediana ± desvio padrão, sendo atribuído letras maiúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa, conforme o teste H de Kruskal-Wallis. Os resultados ausentes de diferença significativa ($p > 0,05$) receberam “nd” (não diferiu), conforme a ANOVA.

Em relação ao arroz safra nova, o percentual de amido rapidamente digerível (ARD) foi menor no arroz safra velha e nos tratamentos no micro-ondas, sendo que o tratamento de 90 s no micro-ondas não diferiu estatisticamente do arroz safra velha (Tabela 7). As frações de amido lentamente digerível (ALD) foram semelhantes entre todos os tratamentos, não havendo diferença estatística. Já os percentuais de amido resistente (AR) foram menores no arroz safra nova, seguido pelos tratamentos no micro-ondas e arroz safra velha, o qual apresentou valores superiores aos demais (Tabela 7; Figura 16).

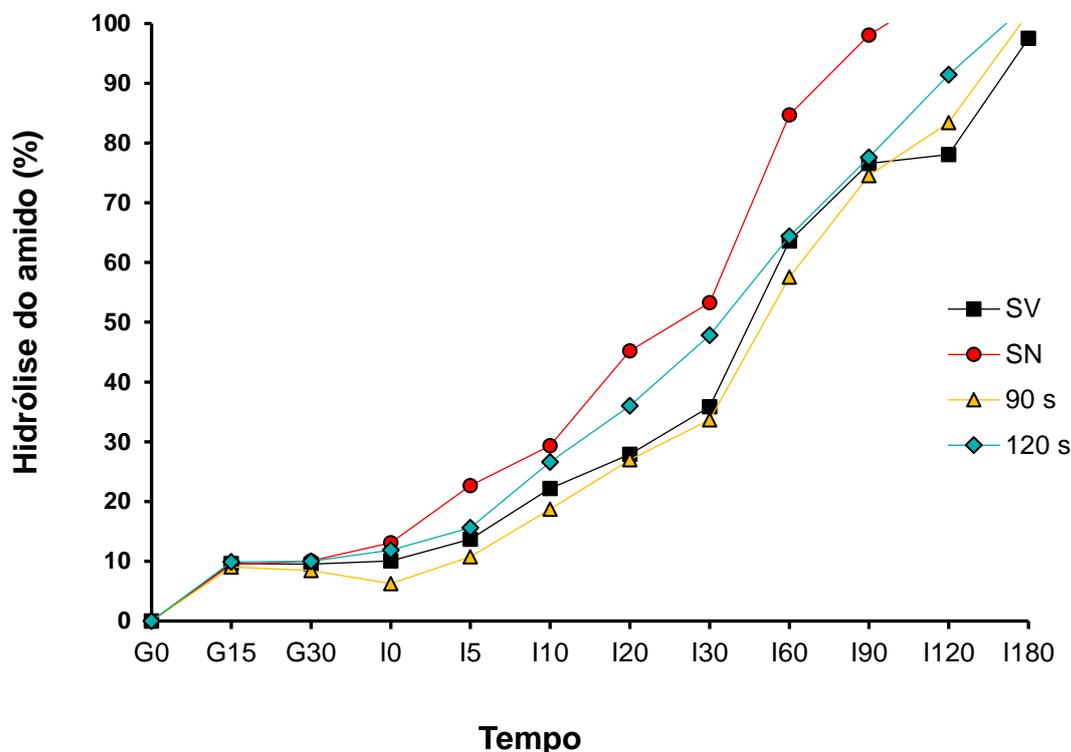
Figura 16 – Mudanças nos percentuais de amido resistente (AR), amido rapidamente digerível (ARD) e amido lentamente digerível (ALD) após a digestibilidade dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 90 e 120 segundos



Os percentuais máximos de hidrólise do amido (C_{∞}) após o tempo de digestão de 180 minutos apresentaram diferenças entre os tratamentos, que refletiu nos índices de hidrólise (HI) e nos índices glicêmicos (IGe). Os tratamentos safra velha e micro-ondas 90 s apresentaram percentuais máximos de hidrólise do amido (C_{∞}) semelhantes, não diferindo estatisticamente (Tabela 7). De acordo com as curvas de hidrólise do amido (Figura 17), observa-se que a digestibilidade do amido de arroz safra velha foi menor em relação aos tratamentos no micro-ondas (90 e 120 s) e arroz safra nova. Resultados semelhantes foram observados no estudo de Azizi *et al.* (2019). Esses autores relatam que o perfil proteico dos grãos foi afetado pelo envelhecimento e induziu mudanças na digestibilidade do amido.

O arroz é composto pelas proteínas glutelina (60-80%), albumina (4-22%), globulina (5-13%) e prolamina (1-5%) (Kim *et al.*, 2014). A glutelina apresenta maior quantidade de aminoácidos contendo enxofre (Padhye & Salunkhe, 1979) e, durante o armazenamento, ocorre a conversão dos grupos sulfidril em

Figura 17 – Curvas de hidrólise do amido (%) dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 90 e 120 segundos



ligações dissulfídicas, aumentando o grau de reticulação das proteínas, que por sua vez, agem no encapsulamento do amido gelatinizado e reduz a digestibilidade do mesmo (Tulyathan, Srisupattarawanich, & Suwanagul, 2008; Zou *et al.*, 2015). Ye *et al.* (2018) relataram que na ausência da proteína a digestibilidade do amido de arroz aumentou. Isso está relacionado devido a diminuição da interação entre amido e proteína, resultando em maior acesso do amido às enzimas digestivas.

Zhou *et al.* (2016) observaram que durante o envelhecimento natural do arroz houve aumento do fortalecimento da parede celular dos grãos, que impactou nas propriedades físico-químicas e nos padrões de digestibilidade do amido. Nesse mesmo estudo, os autores demonstraram que o arroz armazenado em temperatura maior apresentou velocidade de digestão menor, quando comparado ao arroz armazenado em temperatura menor. Com isso, houve redução no índice glicêmico, da mesma forma como foi observado no presente estudo.

A irradiação micro-ondas, conforme descrito por Zhong *et al.* (2020), induziu a formação de pontes dissulfídicas na proteína e aumentou a força de

adesão entre as paredes celulares das células do endosperma do arroz. Essa característica pode ter sido responsável por reduzir o acesso do amido às enzimas digestivas. Isso explica as reduções nas curvas de digestibilidade do amido de arroz após os tratamentos no micro-ondas (Figura 17). Sun *et al.* (2022) observaram aumento de amido resistente no arroz após tratamento no micro-ondas à 500 W por 90 s.

O arroz branco é a principal forma de consumo e é conhecido por apresentar elevado índice glicêmico (Hsu *et al.*, 2015). Alimentos que contém percentuais de ARD altos, causam alterações mais rápidas na glicose no sangue (Thondre *et al.*, 2010). O ALD ou o AR são capazes de retardar a liberação de glicose e o índice glicêmico, reduzindo doenças crônicas como a obesidade, diabetes tipo II e doenças cardiovasculares (Li *et al.*, 2020). Os grãos de arroz safra velha e tratados no micro-ondas apresentaram menores valores de ARD e maiores valores de AR, resultando em reduções nos picos glicêmicos.

6.8. Sólidos lixiviados, umidade e proteína bruta

Os resultados das análises de sólidos lixiviados, umidade e proteína bruta estão apresentados na Tabela 8.

Tabela 8– Sólidos lixiviados, umidade e proteína bruta dos grãos de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratados no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos.

| Tratamentos | Sólidos lixiviados (%) | Umidade (%) | Proteína bruta (%) |
|-------------|----------------------------|---------------------------|---------------------------|
| SV | 5,34 ± 0,01 ^c | 12,67 ± 0,05 ^A | 6,87 ± 0,22 nd |
| SN | 6,93 ± 0,11 ^a | 12,67 ± 0,03 ^A | 6,88 ± 0,19 nd |
| 30 | 6,59 ± 0,24 ^a | 12,76 ± 0,05 ^A | 7,01 ± 0,11 nd |
| 60 | 6,49 ± 0,34 ^{ab} | 12,47 ± 0,08 ^A | 7,11 ± 0,02 nd |
| 90 | 6,03 ± 0,52 ^{abc} | 12,35 ± 0,05 ^A | 6,89 ± 0,20 nd |
| 120 | 5,52 ± 0,47 ^{bc} | 12,16 ± 0,11 ^A | 6,91 ± 0,16 nd |
| 150 | 6,47 ± 0,03 ^{ab} | 11,49 ± 0,17 ^A | 7,07 ± 0,05 nd |
| 180 | 6,34 ± 0,01 ^{abc} | 11,40 ± 0,14 ^A | 7,08 ± 0,10 nd |

Os resultados paramétricos foram expressos pela média ± desvio padrão, sendo atribuído letras minúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa ($p \leq 0,05$), conforme o teste *post-hoc* de Tukey. Os resultados não-paramétricos foram expressos pela mediana ± desvio padrão, sendo atribuído letras maiúsculas diferentes na mesma coluna quando apresentou diferença significativa, conforme o teste H de Kruskal-Wallis. Os resultados ausentes de diferença significativa ($p > 0,05$) receberam “nd” (não diferiu), conforme a ANOVA.

De acordo com a Tabela 8, o arroz safra velha apresentou menor percentual de sólidos lixiviados na água de cocção dos grãos. Dos tratamentos no micro-ondas, o tempo de 120 s promoveu o menor percentual de sólidos lixiviados, seguido de aumento nos tempos de 150 e 180 segundos.

Bruce *et al.* (2022) também observaram menores percentuais de sólidos lixiviados no arroz de safra velha e maiores percentuais nos grãos de safra nova. O maior fortalecimento das paredes celulares no endosperma durante o armazenamento dos grãos, resultou em menor desintegração dos grãos durante o cozimento, reduzindo a lixiviação dos sólidos (Soponronnarit *et al.*, 2008).

A redução da perda de sólidos dos grãos após o tratamento com micro-ondas está relacionada a maior interação entre proteína e amido, o que aumentou a resistência dos grãos à desintegração na cocção (Duangkhamchan *et al.*, 2017; Shen *et al.*, 2019). No entanto, em tempos de exposição mais longos, o micro-ondas pode causar fissuras maiores nos grãos, aumentando a absorção de água e conseqüentemente, causando maior perda de sólidos (Shen *et al.*, 2019).

Os resultados do percentual de umidade revelam que não houve diferença estatística entre os tratamentos. Apesar de haver uma pequena redução da umidade nos tratamentos no micro-ondas de 150 e 180 s, essa diferença não foi estatisticamente significativa (Tabela 8).

Le e Songsermpong (2014) relataram reduções nos percentuais de umidade dos grãos após tratamento no micro-ondas. Porém os autores utilizaram potências maiores, de 1000 W e 2000 W e três rodadas de aquecimento em tempos de exposição de 41, 31 e 23 s. Com isso, as maiores temperaturas geradas no interior dos grãos causaram aumento na redução de umidade. Os percentuais de umidade variaram de 11,38 % para 12,68 %, após a terceira rodada de aquecimento.

Os percentuais de proteína bruta dos tratamentos não apresentaram diferenças significativas (Tabela 8). Os resultados foram consistentes com os de Bruce *et al.* (2022), os quais relataram que não houve alteração no conteúdo de proteínas dos grãos após o envelhecimento e tratamento com micro-ondas.

Conforme descrito anteriormente, durante o armazenamento ocorrem mudanças estruturais nas proteínas, como oxidação dos grupos tiol e formação de pontes dissulfídicas, que por sua vez alteram as propriedades tecnológicas

dos grãos (Chrastil, 1990a; Tananuwong & Malila, 2011; Guo *et al.*, 2015). O micro-ondas acelerou a oxidação dos grupos tiol das proteínas e induziu a formação das ligações dissulfeto (Zhong *et al.*, 2020).

6.9. Análise multivariada

Considerando o perfil multivariado dos tratamentos de arroz, é possível inferir que nos *loadings* (Figura 17) os vetores ΔE (diferença de cor) e Br (brancura) apresentaram uma correlação positiva com os vetores PL (polimento) e TG (temperatura dos grãos). Isso indica que as modificações de cor aumentaram linearmente com o grau de polimento e temperatura dos grãos após exposição à irradiação micro-ondas, sendo associados, principalmente, às amostras submetidas aos tratamentos T3 (90 s), T4 (120 s), T5 (150 s) e T6 (180 s), de acordo com os *scores* (Figura 18).

O aumento dos tempos de exposição dos grãos à irradiação micro-ondas resultou em aumento da temperatura da massa de grãos. Esse fenômeno favoreceu a formação de fissuras nas camadas de aleurona e pericarpo dos grãos, promovendo maior remoção de farelo durante o polimento, que por sua vez, aumentou os valores de brancura (Tabela 3) (Zhong *et al.*, 2013; Park, Kim, & Kim, 2001). Além disso, o aquecimento por micro-ondas reduziu a cristalinidade do amido, induziu a reação de Maillard e ocasionou o movimento de pigmentos da casca para o endosperma dos grãos, refletindo nas mudanças de cores observadas (Tabela 4) (Lang *et al.*, 2022; Le *et al.*, 2014).

Para os vetores GI (grãos inteiros), IA (índice de acidez) e U (umidade) (Figura 17), também foi observado correlação positiva, indicando que o maior percentual de grãos inteiros nas amostras apresentou maior percentual de umidade e acidez, sendo associado às amostras de arroz safra velha (SV), safra nova (SN), T1 (30 s) e T2 (60 s) (Figura 18). Além disso, a angulação de aproximadamente 180° entre esses vetores e o vetor GQ (grãos quebrados) (Figura 17) indica antagonismo, evidenciando que a umidade e o índice de acidez diminuíram linearmente com o aumento de grãos quebrados.

Não houve diferença estatística no percentual de grãos inteiros entre os tratamentos SV, SN e micro-ondas 30 e 60 s (Tabela 2). Além disso, o arroz SV apresentou maior índice de acidez, seguido pelos tratamentos SN e micro-ondas

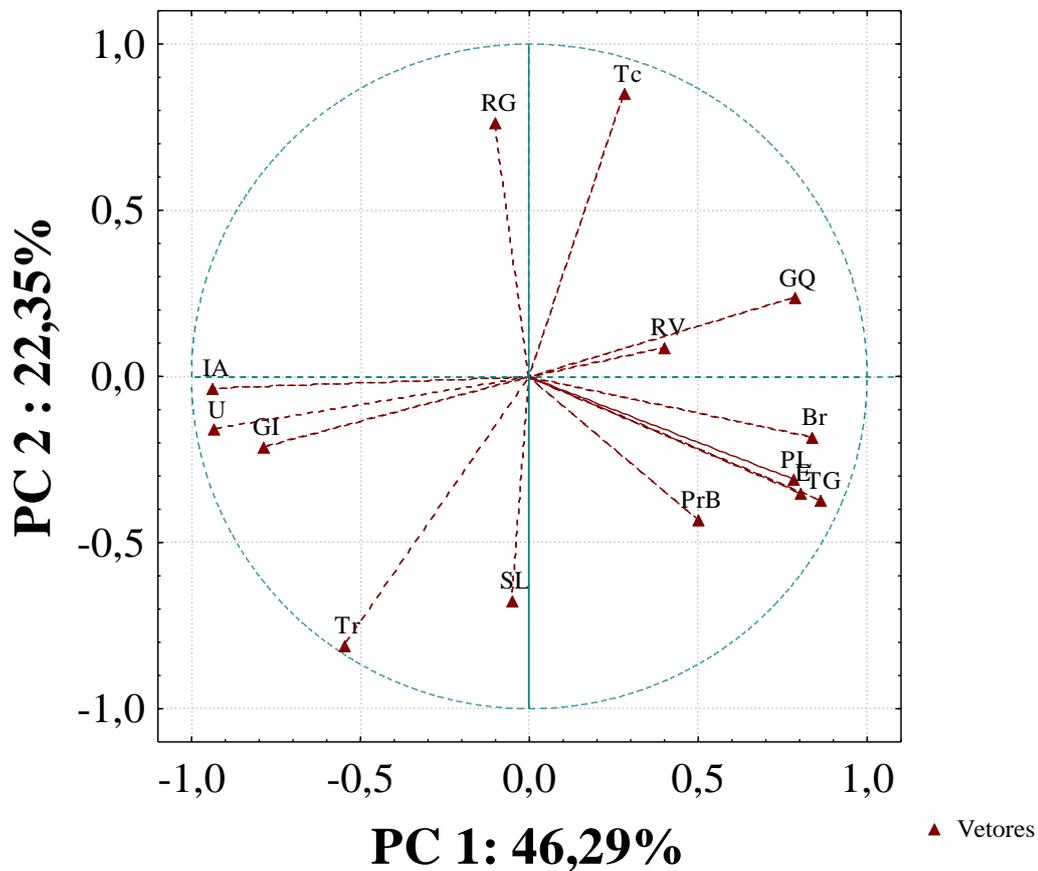
30 e 60 s, e não houve diferença estatística nos percentuais de umidade entre esses tratamentos (Tabelas 2 e 7).

O arroz armazenado tende a apresentar maior índice de acidez devido a hidrólise e ranço oxidativo que ocorre na fração lipídica dos grãos, produzindo ácidos graxos livres que reduzem o pH dos grãos (Wu *et al.*, 2016; Peng *et al.*, 2019). Os tratamentos no micro-ondas nos tempos de 30 e 60 s não mostraram diferenças significativas no índice de acidez em relação ao arroz SN (Tabela 2). No entanto, em tratamentos mais prolongados de 90 a 180 s, o micro-ondas ocasionou reduções significativas nos percentuais de acidez devido ao aumento das temperaturas que causaram oxidação dos ácidos graxos em compostos secundários (Jaisut *et al.*, 2009).

Os menores percentuais de umidade foram observados nos tratamentos de 150 e 180 s, porém essa diferença não foi estatisticamente significativa (Tabela 7). Os maiores gradientes de umidade gerados nesses tratamentos devido às maiores temperaturas empregadas, foram responsáveis pela maior quebra dos grãos (Siebenmorgen, Yang, & Sung, 2004), resultando em diferenças nos percentuais de grãos inteiros (Tabela 2).

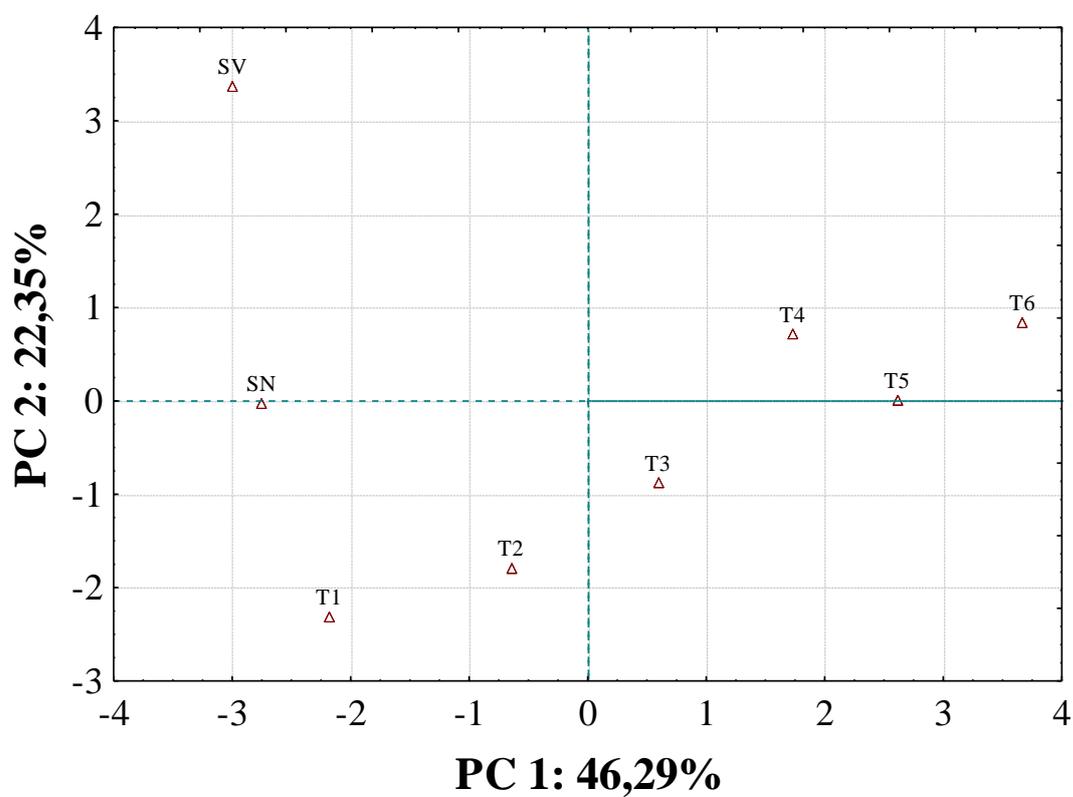
Nos *scores* (Figura 18) houve a formação de dois grupos distintos, sendo as amostras SN, T1, T2 e T3 pertencentes a um grupo e as amostras T4, T5 e T6 a outro grupo. Esses achados indicam que ao considerar o perfil multivariado das amostras de arroz, foi possível diferenciar o tratamento SN com os tratamentos de envelhecimento acelerado em micro-ondas. Observa-se que não houve diferença entre os tratamentos T1 e T2 em relação ao tratamento SN, mas houve diferença entre os tratamentos T3, T4, T5 e T6 em comparação ao arroz SN.

Figura 18 – *Loadings* obtidos por Análise de Componentes Principais para as amostras de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratadas no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos



Em *loadings*: quadrante I – RV (rendimento volumétrico), GQ (grãos quebrados) e Tc (tempo de cocção); quadrante II – RG (rendimento gravimétrico); quadrante III – IA (índice de acidez), U (umidade), GI (grãos inteiros), Tr (transparência) e SL (sólidos lixiviados); e quadrante IV – PrB (proteína bruta), TG (temperatura dos grãos), ΔE (diferença de cor), PL (polimento) e Br (brancura).

Figura 19 – Scores obtidos por Análise de Componentes Principais para as amostras de arroz safra velha (SV), safra nova (SN) e tratadas no micro-ondas nos tempos de exposição de 30, 60, 90, 120, 150 e 180 segundos



Em scores: quadrante I – T4 (120 s), T5 (150 s) e T6 (180 s); quadrante II – SV (safra velha); quadrante III – SN (safra nova), T1 (30 s) e T2 (60 s); e quadrante IV – T3 (90 s).

7. Considerações finais e conclusões

A tecnologia emergente de tratamento com micro-ondas mostrou ser eficaz para o envelhecimento acelerado dos grãos de arroz em casca da cultivar IRGA 424 RI. As mudanças nas propriedades físicas, químicas e tecnológicas dos grãos ocorreram em tempos curtos de exposição à irradiação, não necessitando longos períodos de armazenamento como no envelhecimento natural.

O arroz envelhecido naturalmente apresentou bons rendimentos gravimétrico e volumétrico. Além disso, apresentou menores viscosidades máxima, de quebra, final e retrogradação, maior temperatura de pasta e menor percentual de sólidos lixiviados. A estrutura celular dos grãos tornou-se mais espessa e a digestibilidade do amido foi mais lenta, com maior percentual de amido resistente e menor índice glicêmico. No entanto, apresentou percentual de acidez maior, menor cristalinidade relativa do amido e grãos mais escuros.

O envelhecimento acelerado dos grãos pela irradiação com micro-ondas proporcionou resultados promissores. O tratamento de 120 s no micro-ondas foi o que mais se aproximou do arroz envelhecido naturalmente. Os grãos apresentaram rendimentos gravimétrico e volumétrico semelhantes ao arroz safra velha, sendo que o rendimento volumétrico foi superior. Ainda, apresentaram menores viscosidades máxima, de quebra, final e retrogradação e diminuição no percentual de sólidos lixiviados, no entanto o índice de acidez foi menor em relação ao arroz armazenado. A estrutura celular apresentou característica densa e a digestibilidade do amido foi reduzida. Porém, o tratamento com micro-ondas resultou em grãos mais escuros e opacos, com redução da cristalinidade relativa do amido.

Os resultados das análises realizadas demonstram que o método de envelhecimento induzido por micro-ondas representa uma alternativa viável para as indústrias de processamento de arroz que desejam melhorar características como de cocção, viscoamilográficas e de digestibilidade dos grãos de arroz. A maior economia de tempo no processo de envelhecimento aliado às características físicas e químicas dos grãos, provam que o micro-ondas é uma tecnologia emergente bastante promissora em estudos na pós-colheita do arroz.

8. Referências

AACC, (1995). Approved Methods of Analysis of the American Association of Cereal Chemists. **American Association of Cereal Chemists**, V. 2, AACC International, Saint Paul, USA.

AALIM, Halah; LUO, Zisheng. Insight into rice (*Oryza sativa* L.) cooking: Phenolic composition, inhibition of α -amylase and α -glucosidase, and starch physicochemical and functional properties. **Food Bioscience**, v. 40, p. 100917, 2021.

ADEGOKE, Tosin Victor *et al.* Posttranslational modification of waxy to genetically improve starch quality in rice grain. **International Journal of Molecular Sciences**, v. 22, n. 9, p. 4845, 2021.

ALSLAIBI, Tamer M. *et al.* A review: production of activated carbon from agricultural byproducts via conventional and microwave heating. **Journal of Chemical Technology & Biotechnology**, v. 88, n. 7, p. 1183-1190, 2013.

ATUNGULU, Griffiths *et al.* Activity of gaseous phase steam distilled propolis extracts on peroxidation and hydrolysis of rice lipids. **Journal of Food Engineering**, v. 80, n. 3, p. 850-858, 2007.

AZIZI, Rezvan *et al.* Varietal differences in the effect of rice ageing on starch digestion. **Food Hydrocolloids**, v. 95, p. 358-366, 2019.

BALINDONG, Jeanette L. *et al.* Rice grain protein composition influences instrumental measures of rice cooking and eating quality. **Journal of Cereal Science**, v. 79, p. 35-42, 2018.

BAROUDY, Ahmed A. El *et al.* Modeling land suitability for rice crop using remote sensing and soil quality indicators: the case study of the Nile delta. **Sustainability**, v. 12, n. 22, p. 9653, 2020.

BEMILLER, James N. Starches: molecular and granular structures and properties. **Carbohydrate Chemistry for Food Scientists**, v. 3, p. 159-189, 2019.

BIAO, Yuan *et al.* Influence of gene regulation on rice quality: Impact of storage temperature and humidity on flavor profile. **Food Chemistry**, v. 283, p. 141-147, 2019.

BRANDÃO, Janina Balk; CONTREIRA, Ricardo Aimone; CAIRES, Leonardo Marques. Análise da comercialização do arroz: uma abordagem desde as agroindústrias gaúchas até a região Sudeste. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental Santa Maria**, v. 20, n. 1, p. 01-15, 2016.

BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. Determinação do grau de umidade. In: **Regras para Análise de Sementes**. Brasília: Mapa/ACS, 2009. cap.7, p.308-323.

BRONDANI, Gilberto *et al.* Diferenciais de Custos em Culturas de Arroz. **IX Congresso Internacional de Custos** – Florianópolis, SC, Brasil – 28 a 30 de novembro de 2005.

BRUCE, Rebecca M. *et al.* Aging characteristics of rice dried using microwave at 915 MHz frequency. **Cereal Chemistry**, v. 99, n. 6, p. 1218-1233, 2022.

BRUCE, Rebecca M. *et al.* Impact of specific energy input of a 915 MHz microwave dryer on quality, functional, and physicochemical properties of different rice cultivars. **Cereal Chemistry**, v. 98, n. 3, p. 557-570, 2021.

CAI, Mengdi *et al.* Exploring the remarkable effects of microwave treatment on starch modification: From structural evolution to changed physicochemical and digestive properties. **Carbohydrate Polymers**, p. 122412, 2024.

CEM Corporation. Disponível em: https://cem.com/es/microwave-heating-mechanism-and-theory?_store=es&_from_store=en. Acesso em: abril 2024.

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

CHI, Chengdeng *et al.* Basic principles in starch multi-scale structuration to mitigate digestibility: A review. **Trends in Food Science & Technology**, v. 109, p. 154-168, 2021.

CHRASIL, Joseph. Chemical and physicochemical changes of rice during storage at different temperatures. **Journal of Cereal Science**, v. 11, n. 1, p. 71-85, 1990b.

CHRASIL, Joseph. Protein-starch interactions in rice grains. Influence of storage on oryzenin and starch. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v. 38, n. 9, p. 1804-1809, 1990a.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento (**Portal de Informações Agropecuárias. Grãos – Série Histórica**). Disponível em: <https://www.conab.gov.br/info-agro/safras/graos>. Acesso em: set 2024.

COSTA, Cláudia Militz da. **Efeitos do armazenamento em parâmetros de avaliação de qualidade de grãos de quatro genótipos de arroz**. 2014. 147f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas (UFPEL), Pelotas, 2014.

COUNCE, Paul A.; KEISLING, Terry C.; MITCHELL, Andrew J. A uniform, objective, and adaptive system for expressing rice development. **Crop Science**, v. 40, n. 2, p. 436-443, 2000.

CUSTODIO, Marie Claire *et al.* Rice quality: How is it defined by consumers, industry, food scientists, and geneticists? **Trends in Food Science & Technology**, v. 92, p. 122-137, 2019.

DALA-PAULA, Bruno Martins *et al.* Química & Bioquímica de Alimentos. **Alfenas–MG: Editora Universidade Federal de Alfenas**, 2021.

DALBHAGAT, Chandrakant Genu *et al.* Effect of microwave drying and tempering on color attributes, fissure formation, and cooking characteristics of fortified rice kernels. **Journal of Food Science and Technology**, v. 61, n. 4, p. 706-716, 2024.

DAMODARAN, Srinivasan; PARKIN, Kirk L. **Química de Alimentos de Fennema**. Artmed editora, 2019.

DARTOIS, Anne *et al.* Influence of guar gum on the in vitro starch digestibility—rheological and microstructural characteristics. **Food Biophysics**, v. 5, p. 149-160, 2010.

DEVRAJ, Lavanya *et al.* Influence of microwave heating as accelerated aging on physicochemical, texture, pasting properties, and microstructure in brown rice of selected Indian rice varieties. **Journal of Texture Studies**, v. 51, n. 4, p. 663-679, 2020.

DUANGKHAMCHAN, Wasan *et al.* Infrared heating as a disinfestation method against *Sitophilus oryzae* and its effect on textural and cooking properties of milled rice. **Food and Bioprocess Technology**, v. 10, p. 284-295, 2017.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (**Agência Embrapa de Informação Tecnológica. Cultivos – Arroz**). Disponível em: <https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/cultivos/arroz/pos-producao/pos-colheita/qualidade-de-graos>. Acesso em: março 2024.

ENGLYST, Hans N.; KINGMAN, Susan. M.; CUMMINGS, John H. Classification and measurement of nutritionally important starch fractions. **European Journal of Clinical Nutrition**, v. 46, p. S33-50, 1992.

FERREIRA, Alessandra Machado. Análise do desenvolvimento e produtividade econômica do arroz irrigado por pivô central. 2022.

FITZGERALD, Melissa Anne; McCOUCH, Susan Rutherford; HALL, Robert David. Not just a grain of rice: the quest for quality. **Trends Plant Science**, 2009.

FONSECA, Raíza Cavalcante. **Determinação de parâmetros de qualidade de grãos associados ao comportamento culinário em arroz de terras altas**. 2015. 118f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) - Escola de Agronomia, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.

GOMES, Matheus Henrique Gouveia; KUROZAWA, Louise Emy. Improvement of the functional and antioxidant properties of rice protein by enzymatic hydrolysis for the microencapsulation of linseed oil. **Journal of Food Engineering**, v. 267, p. 109761, 2020.

GOÑI, Isabel; GARCIA-ALONSO, Alejandra; SAURA-CALIXTO, Fulgencio. A starch hydrolysis procedure to estimate glycemic index. **Nutrition Research**, v. 17, n. 3, p. 427-437, 1997.

GRIGLIONE, Alessandra *et al.* High-quality Italian rice cultivars: Chemical indices of ageing and aroma quality. **Food Chemistry**, v. 172, p. 305-313, 2015.

GUJRAL, Hardeep Singh; KUMAR, Vishal. Effect of accelerated aging on the physicochemical and textural properties of brown and milled rice. **Journal of Food Engineering**, v. 59, n. 2-3, p. 117-121, 2003.

GUO, Yubao *et al.* Key proteins causing changes in pasting properties of rice during aging. **Cereal Chemistry**, v. 92, n. 4, p. 384-388, 2015.

GUZIK, Paulina *et al.* Microwave applications in the food industry: An overview of recent developments. **Critical Reviews in Food Science and Nutrition**, v. 62, n. 29, p. 7989-8008, 2022.

HALIM, Anna Arina Bt Ab *et al.* Physicochemical Properties and Tissue Structure of High Kernel Elongation Rice (*Oryza sativa* L.) Varieties as Affected by Heat Treatment. **Foods**, v. 12, n. 11, p. 2207, 2023.

HAMAKER, Bruce R.; GRIFFIN, Virginia K. Effect of disulfide bond-containing protein on rice starch gelatinization and pasting. **Cereal Chemistry**, v. 70, n. 4, p. 377-380, 1993.

HICKEL, Eduardo Rodrigues. Pragas na Lavoura Catarinense de Arroz Irrigado: Cigarrinha Sogata. **Apostilas de Entomologia – Sogata**, 2020.

HSU, Rachel J. C. *et al.* Effects of added water and retrogradation on starch digestibility of cooked rice flours with different amylose content. **Journal of Cereal Science**, v. 61, p. 1-7, 2015.

HUANG, Yu-Chan; LAI, Hsi-Mei. Characteristics of the starch fine structure and pasting properties of waxy rice during storage. **Food Chemistry**, v. 152, p. 432-439, 2014.

HUSSAIN, Syed Zameer *et al.* Effect of radiofrequency induced accelerated ageing on physico-chemical, cooking, pasting and textural properties of rice. **LWT-Food Science and Technology**, v. 139, p. 110595, 2021.

IFTIKHAR, Farheena *et al.* Investigations on the process and product parameters of radio frequency-induced accelerated aged paddy. **Journal of Food Process Engineering**, v. 43, n. 11, p. e13521, 2020.

INSTITUTO ADOLFO LUTZ Normas Analíticas do Instituto Adolfo Lutz. **V1: Métodos Químicos e Físicos para Análise de Alimentos**. São Paulo: IMESP, 3. ed., 1985. p. 127. Método nº. 415/IV.

JAISUT, Donludee *et al.* Accelerated aging of jasmine brown rice by high-temperature fluidization technique. **Food Research International**, v. 42, n. 5-6, p. 674-681, 2009.

JOUKAR, Fatemeh *et al.* Effects of active coatings based on soluble portion of zedo gum on physicochemical, microbial, and antioxidant enzymes characteristics of white shrimp. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 17, n. 2, p. 1535-1547, 2023.

JULIANO, Bienvenido O. Rice in human nutrition. **Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO)**, 168p., 1993.

KAMINSKI, Tiago André *et al.* Changes in culinary, viscoamylographic and sensory characteristics during rice storage at different temperatures. **Journal of Stored Products Research**, v. 53, p. 37-42, 2013.

KAMINSKI, Tiago André. **Influência das condições de armazenamento no envelhecimento de arroz**. 2012. 123f. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia dos Alimentos) - Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Santa Maria, 2012.

KAUR, Ramandeep *et al.* Accelerated aging of paddy through optimized ultrasonication parameters: a response surface methodology approach. **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 18, n. 1, p. 74-86, 2024.

KAUR, Tanbeer *et al.* Application of electromyography (EMG) for textural evaluation of raw, steamed and parboiled Basmati rice cultivars (Pusa 1121 and Pusa 1509). **Journal of Food Measurement and Characterization**, v. 17, n. 4, p. 3228-3239, 2023.

KENNEDY, Gina; BURLINGAME, Barbara; NGUYEN, Nguu. Nutrient impact assessment of rice in major rice-consuming countries. **International Rice Commission Newsletter**, v.51, p.33-42, 2002.

KIM, Sun Tae *et al.* Rice proteomics: a model system for crop improvement and food security. **Proteomics**, v. 14, n. 4-5, p. 593-610, 2014.

KONG, Xiangli *et al.* Physicochemical properties of starches from diverse rice cultivars varying in apparent amylose content and gelatinisation temperature combinations. **Food Chemistry**, v. 172, p. 433-440, 2015.

LANG, Gustavo Heinrich *et al.* Infrared radiation heating: A novel technique for developing quick-cooking rice. **LWT-Food Science and Technology**, v. 154, p. 112758, 2022.

LE, Quoc Tuan; SONGSERMPONG, Sirichai. Head rice yield, pasting property and correlations of accelerated paddy rice aging properties by microwave heating conditions. **International Food Research Journal**, v. 21, n. 2, p. 703, 2014.

LE, Tuan Quoc *et al.* Microwave heating for accelerated aging of paddy and white rice. **Australian Journal of Crop Science**, v. 8, n. 9, p. 1348-1358, 2014.

LEMOS, Míriam Rejane Bonilla; SOARES, Leonor Almeida de Souza. Farelo de arroz: um subproduto em estudo. **Revista Óleos e Grãos**, p. 40-47, 1999.

LI, Hongyan; GILBERT, Robert G. Starch molecular structure: The basis for an improved understanding of cooked rice texture. **Carbohydrate Polymers**, v. 195, p. 9-17, 2018.

LI, Nannan *et al.* An insight into starch slowly digestible features enhanced by microwave treatment. **Food Hydrocolloids**, v. 103, p. 105690, 2020.

LIDON, Fernando C. Lipid, carbohydrate, and protein accumulation in Mn-treated rice. 2002.

LIKITWATTANASADE, Teerarat; HONGSPRABHAS, Parichat. Effect of storage proteins on pasting properties and microstructure of Thai rice. **Food Research International**, v. 43, n. 5, p. 1402-1409, 2010.

LIU, Yongle *et al.* Effects of glutaminase deamidation on the structure and solubility of rice glutelin. **LWT-Food Science and Technology**, v. 44, n. 10, p. 2205-2210, 2011.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Instrução Normativa MAPA nº 6 de 16/02/2009**. Disponível em: <https://www.normasbrasil.com.br/norma/?id=77505> Acesso em: jan 2024.

MARTIN, Margrit; FITZGERALD, Melissa Anne. Proteins in rice grains influence cooking properties! **Journal of Cereal Science**, v. 36, n. 3, p. 285-294, 2002.

MELLO, Paola A.; BARIN, Juliano S.; GUARNIERI, Ricardo A. Microwave heating. In: **Microwave-assisted sample preparation for trace element analysis**. Elsevier, 2014. p. 59-75.

MILLATI, Tanwirul *et al.* The effect of accelerated aging of rough rice with high-temperature storage on color and quality of milled rice. In: **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**. IOP Publishing, 2021. p. 012053.

MINOLTA, Konica. **Controle de cor da indústria de cuidados pessoais: Medição e Análise de cor da pele**. Konica Minolta Sensing Americas, Inc. 101 Williams Drive Ramsey, NJ 07446 USA, 2016. Disponível em: <https://sensing.konicaminolta.us/br/blog/controle-de-cor-da-industria-de-cuidados-pessoais-medicao-e-analise-de-cor-da-pele/> Acesso em: maio 2024.

MOHAPATRA, Debabandya; BAL, Satish. Cooking quality and instrumental textural attributes of cooked rice for different milling fractions. **Journal of Food Engineering**, v. 73, p. 253–259, 2006.

NAYAK, Mana. Use of Microwave Heating for Accelerated Ageing of Rice. **Master's Thesis**. Orissa Agricultural University, Bhubaneswar, India, 2016.

NAYAK, Mana; MOHAPATRA, Minati. Effect of microwave heating on accelerated ageing qualities of rice. **ORYZA-An International Journal on Rice**, v. 56, n. 2, p. 228-235, 2019.

NICHOLAS, Daniel *et al.* Effects of aging on physico-chemical properties, nutritional compositions and cooking characteristics of Bario rice. **Journal of Tropical Agriculture and Food Science**, v. 41, n. 2, p. 239-248, 2013.

NUNES, J. L. S. **Características do Arroz (Oryza Sativa) 2016**. Disponível em: https://www.agrolink.com.br/culturas/arroz/informacoes/caracteristicas_361559.html. Acesso em: jan 2023.

OLIVEIRA, Maurício de. Arroz um alimento de verdade: fonte de nutrientes, aliado da saúde. **Porto Alegre**, 2021.

OYEYINKA, Samson A. *et al.* Effect of short microwave heating time on physicochemical and functional properties of Bambara groundnut starch. **Food Bioscience**, v. 28, p. 36-41, 2019.

PADHYE, V. W., & SALUNKHE, D. K. Extraction and characterization of rice proteins. **Cereal Chemistry**, v. 56, n. 5, p. 389-393, 1979.

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 p. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Agronomia Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2011.

PARK, Chan-Eun *et al.* Changes in physicochemical characteristics of rice during storage at different temperatures. **Journal of Stored Products Research**, v. 48, p. 25-29, 2012.

PARK, Jung Kwang; KIM, Sang Sook; KIM, Kwang Ok. 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.

PENG, Bo *et al.* Effects of rice aging on its main nutrients and quality characters. **Journal of Agricultural Science**, v. 11, n. 17, p. 44-56, 2019.

PERDON, Alicia Antonio *et al.* Effects of rough rice storage conditions on the amylograph and cooking properties of medium-grain rice cv. Bengal. **Cereal Chemistry**, v. 74, n. 6, p. 864-867, 1997.

PERDON, Alicia Antonio *et al.* Starch retrogradation and texture of cooked milled rice during storage. **Journal of Food Science**, v. 64, n. 5, p. 828-832, 1999.

QIAN, Jian-Ya *et al.* Inactivating effect of pulsed electric field on lipase in brown rice. **Innovative Food Science & Emerging Technologies**, v. 22, p. 89-94, 2014.

RABEK, Jan F. Applications of wide-angle X-ray diffraction (WAXD) to the study of the structure of polymers. **Experimental methods in polymer chemistry**, p. 505–508, 1980.

RAUH, Valentin; XIAO, Yinghua. The shelf life of heat-treated dairy products. **International Dairy Journal**, v. 125, p. 105235, 2022.

ROCKEMBACH, Caroline Tuchtenhagen. **Uso da irradiação micro-ondas para melhorar a qualidade do arroz parboilizado**. 2019. 92 p. Tese (Doutorado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Faculdade de Agronomia – Eliseu Maciel, Universidade Federal de Pelotas, Pelotas, 2019.

ROSNİYANA, A.; HASHIFAH, M. A.; NORIN, SA Shariffah. Effect of heat treatment (accelerated ageing) on the physicochemical and cooking properties of rice at different moisture contents. **Journal of Tropical Agriculture and Food Science**, v. 32, n. 2, p. 155, 2004.

SAIKRISHNA, Aruva *et al.* Ageing of rice: A review. **Journal of Cereal Science**, v. 81, p. 161-170, 2018.

SEUNG, David. Amylose in starch: towards an understanding of biosynthesis, structure and function. **New Phytologist**, v. 228, n. 5, p. 1490-1504, 2020.

SHEN, Liuyang *et al.* Improvement of cooking quality of germinated brown rice attributed to the fissures caused by microwave drying. **Journal of Food Science and Technology**, v. 56, p. 2737-2749, 2019.

SHI, Jiayi; WU, Meidan; QUAN, Mengmeng. Effects of protein oxidation on gelatinization characteristics during rice storage. **Journal of Cereal Science**, v. 75, p. 228-233, 2017.

SHIH, Chia-Hung *et al.* Growth performance and intestinal microflora population of broilers fed aged brown rice. **Annals of Animal Science**, v. 14, n. 4, p. 897-909, 2014.

SIEBENMORGEN, Terrence. J.; YANG, Wade; SUN, Zhenhua. Glass transition temperature of rice kernels determined by dynamic mechanical thermal analysis. **Transactions of the ASAE**, v. 47, n. 3, p. 835-839, 2004.

SILVA, Wyller Max Ferreira *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.

SODHI, Navdeep Singh *et al.* Changes in physico-chemical, thermal, cooking and textural properties of rice during aging. **Journal of Food Processing and Preservation**, v. 27, n. 5, p. 387-400, 2003.

SOPONRONNARIT, Somchart *et al.* Comparative study of physicochemical properties of accelerated and naturally aged rice. **Journal of Food Engineering**, v. 85, n. 2, p. 268-276, 2008.

SOWBHAGYA, Chakrabhavi M.; BHATTACHARYA, Kshirod R. Changes in pasting behaviour of rice during ageing. **Journal of Cereal Science**, v. 34, n. 2, p. 115-124, 2001.

STORCK, Cátia Regina. **Varição na composição química em grãos de arroz submetidos a diferentes beneficiamentos**. 2004. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia de Alimentos) – Curso de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Santa Maria, 2004.

STRECK, Eduardo Anibele *et al.* Genetic progress of grain quality of flooded-irrigated rice cultivars in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 53, p. 453-463, 2018.

STRECK, Nereu Augusto *et al.* Improving predictions of developmental stages in winter wheat: a modified Wang and Engel model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 115, n. 3-4, p. 139-150, 2003.

SUN, Xiangxiang *et al.* Modification of multi-scale structure, physicochemical properties, and digestibility of rice starch via microwave and cold plasma treatments. **LWT-Food Science and Technology**, v. 153, p. 112483, 2022.

SUNG, Jeehye *et al.* Mass spectrometry-based electric nose system for assessing rice quality during storage at different temperatures. **Journal of Stored Products Research**, v. 59, p. 204-208, 2014.

SZYMKOWIAK, Andrzej *et al.* Attitude-behaviour dissonance regarding the importance of food preservation for customers. **Food Quality and Preference**, v. 84, p. 103935, 2020.

TANANUWONG, Kanitha; MALILA, Yuwares. Changes in physicochemical properties of organic hulled rice during storage under different conditions. **Food Chemistry**, v. 125, n. 1, p. 179-185, 2011.

TAO, Yuan *et al.* Structural changes of starch subjected to microwave heating: A review from the perspective of dielectric properties. **Trends in Food Science & Technology**, v. 99, p. 593-607, 2020.

THONDRE, Pariyarath S. *et al.* High molecular weight barley β -glucan decreases particle breakdown in chapattis (Indian flat breads) during in vitro digestion. **Food Research International**, v. 43, n. 5, p. 1476-1481, 2010.

TONG, Chuan *et al.* Impact of postharvest operations on rice grain quality: A review. **Comprehensive Reviews in Food Science and Food Safety**, v. 18, n. 3, p. 626-640, 2019.

TOYOSHIMA, Hidechika. Cooperative test on the small-scale rapid method for the gelatinization properties test of rice flours with a Rapid-Visco-Analyzer (RVA). **Journal of the Japanese Society for Food Science and Technology**, v. 44, n. 8, p. 579-584, 2000.

TULYATHAN, Vanna; SRISUPATTARAWANICH, N.; SUWANAGUL, Anawat. Effect of rice flour coating on 2-acetyl-1-pyrroline and n-hexanal in brown rice cv. Jao Hom Supanburi during storage. **Postharvest Biology and Technology**, v. 47, n. 3, p. 367-372, 2008.

VILLAREAL, R. M. *et al.* Changes in physicochemical properties of rice during storage. **Starch-Stärke**, v. 28, n. 3, p. 88-94, 1976.

WALTER, Melissa; MARCHEZAN, Enio; AVILA, Luis Antonio de. Arroz: composição e características nutricionais. **Ciência Rural**, v.38, p. 1184–1192, 2008.

WROLSTAD, Ronald E.; SMITH, Daniel E. Color analysis. **Food Analysis**, p. 545-555, 2017.

WU, Jianyong *et al.* Improvement in storage stability of lightly milled rice using superheated steam processing. **Journal of Cereal Science**, v. 71, p. 130-137, 2016.

YADAV, Binod K.; JINDAL, Vibhu K. Dimensional changes in milled rice (*Oryza sativa* L.) kernel during cooking in relation to its physicochemical properties by image analysis. **Journal of Food Engineering**, v. 81, n. 4, p. 710-720, 2007.

YE, Jiangping *et al.* Effect of endogenous proteins and lipids on starch digestibility in rice flour. **Food Research International**, v. 106, p. 404-409, 2018.

YERRAGOPU, Prem Santhi; PALANIMUTHU, V. Effect of steaming on accelerated ageing of rice (*Oryza sativa* L.). **International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences**, v. 8, n. 2, p. 358-375, 2019.

ZHAO, Kun *et al.* Effects of conventional and microwave pretreatment acetylation on structural and physicochemical properties of wheat starch. **International Journal of Food Science & Technology**, v. 53, n. 11, p. 2515-2524, 2018.

ZHAO, Siming *et al.* Effect of microwaves on rice quality. **Journal of Stored Products Research**, v. 43, n. 4, p. 496-502, 2007.

ZHONG, Yejun *et al.* Accelerated aging of rice by controlled microwave treatment. **Food Chemistry**, v. 323, p. 126853, 2020.

ZHONG, Yejun *et al.* Effect of microwave irradiation on composition, structure and properties of rice (*Oryza sativa* L.) with different milling degrees. **Journal of Cereal Science**, v. 58, n. 2, p. 228-233, 2013.

ZHOU, Zhongkai *et al.* Ageing of stored rice: changes in chemical and physical attributes. **Journal of Cereal Science**, v. 35, n. 1, p. 65-78, 2002b.

ZHOU, Zhongkai *et al.* Composition and functional properties of rice. **International Journal of Food Science and Technology**, v.37, p.849-868, 2002a.

ZHOU, Zhongkai *et al.* Effect of ageing-induced changes in rice physicochemical properties on digestion behaviour following storage. **Journal of Stored Products Research**, v. 67, p. 13-18, 2016.

ZHOU, Zhongkai *et al.* Effect of storage temperature on cooking behaviour of rice. **Food Chemistry**, v. 105, n. 2, p. 491-497, 2007.

ZHOU, Zhongkai *et al.* Effect of storage temperature on rice thermal properties. **Food Research International**, v. 43, n. 3, p. 709-715, 2010.

ZHOU, Zhongkai *et al.* Phenolics, flavonoids, proanthocyanidin and antioxidant activity of brown rice with different pericarp colors following storage. **Journal of Stored Products Research**, v. 59, p. 120-125, 2014.

ZHOU, Zhongkai *et al.* Rice ageing. I. Effect of changes in protein on starch behaviour. **Starch-Stärke**, v. 55, n. 3-4, p. 162-169, 2003.

ZHOU, Zhongkai *et al.* The ageing mechanism of stored rice: A concept model from the past to the present. **Journal of Stored Products Research**, v. 64, p. 80-87, 2015.

ZHU, Dawei *et al.* Effects of storage on the starch fine structure and physicochemical properties of different rice variety types. **Carbohydrate Polymers**, v. 300, p. 120273, 2023.

ZIEGLER, Valmor *et al.* Cooking quality properties and free and bound phenolics content of brown, black, and red rice grains stored at different temperatures for six months. **Food Chemistry**, v. 242, p. 427-434, 2018.

ZOU, Wei *et al.* Combined techniques for characterising pasta structure reveals how the gluten network slows enzymic digestion rate. **Food Chemistry**, v. 188, p. 559-568, 2015.